SSAB DOMEX TUBE
RAKENNEPUTKET

EN 1993 – KÄSIKIRJA 2016

SSAB

SSAB Domex Tube
RAKENNEPUTKET

EN 1993 – käsikirja

2016

ISBN ISBN 978-952-93-7447-2 (nid.)
ISBN 978-952-93-7448-9 (PDF)

Käsikirjoitus DI Petri Ongelin, DI Ilkka Valkonen

Taitto Graafinen Palvelu Martti Lepistö

Painopaikka Otavan Kirjapaino Oy, Keuruu 2016

Kustantaja SSAB Europe Oy

Käsikirjassa esitetyt ohjeet on otettu sisällöltään laajemmista viitestandardeista, joten käsikirjan ohjeet eivät näin ollen välttämättä sisällä kaikkia eri tilanteissa tarvittavia asioita. Suunnittelussa käytettävät viralliset ohjeet on tarkastettava voimassa olevista alkuperäisistä standardeista. Käsikirjan sisällön oikeellisuus on tarkastettu huolellisesti. SSAB Europe Oy tai tekijät eivät kuitenkaan vastaa mahdollisista virheistä tai käsikirjan käytöstä aiheutuneista välittömistä tai välillisistä vahingoista. Käsikirjan tiedot ovat ohjeellisia, joten käyttäjän on varmistettava tulosten oikeellisuus tarkistuslaskelmin. Oikeudet muutoksiin pidätetään.

ESIPUHE - SSAB:n käsikirja (v.2016 painos)

Tämä teos on Ruukin Rakenneputkikäsikirjan (v.2012) SSAB-revisio. Revisioinnin taustalla on SSAB:n ja Rautaruukin yhdistyminen vuonna 2014. Yhtiöiden yhdistymisen seurauksena Ruukin EN 10219 rakenneputket ovat nyt SSAB:n EN 10219 rakenneputkia. Rakenneputkien tuoteperhettä ja niiden ominaisuuksia on samalla uudistettu. Rakenneputkia valmistetaan nyt tuoteperheissä SSAB Domex Tube ja Strenx Tube.

Edellä todettu revisiointitarve on samalla myös tarjonnut mahdollisuuden korjata v.2012 painoksessa havaitut painovirheet, jotka on esitetty Ruukin v.2012 käsikirjaa varten erikseen julkaistussa Errata-listassa (Errata 20.4.2016). Kirjassa on lisäksi toteutettu joitakin muitakin pienimuotoisia stilistisiä paranteluja.

Kuten Ruukin Rakenneputkikäsikirjassa, myös tämän SSAB-käsikirjan perustana ovat julkaisuhetkellä voimassa olevat mitoitusohjeet ja standardit. Vaikka v.2012 käsikirjan julkaisemisesta on kulunut jo neljä vuotta, käsikirjan kannalta keskeisimpien viitestandardien osalta voimassa olevat revisiot ovat edelleen samat kuin v.2012 käsikirjan julkaisuhetkellä (tuotestandardi EN 10219, mitoituksen osalta EN 1991 ja EN 1993 sovellettavat osat, teräsrakenteiden toteutuksen osalta EN 1090 sovellettavat osat). Tämä johdosta kirjan varsinainen normitekninen sisältö on voitu säilyttää käytännössä ennallaan (lukuunottamatta siis edellä mainittuja painovirheiden korjauksia ja rakenneputkien joitakin tuoteteknisiä muutoksia). **Käsikirjassa sovellettujen standardien silloista tilannetta on tarkemmin selostettu seuraavalla sivulla kohdassa *Esipuhe - Ruukin käsikirja v.2012***. Kirjassa käytetyt viitestandardit ja niiden revisiot on esitetty yksityiskohtaisesti kirjan kunkin luvun lopussa olevassa ao. luvun Lähdeluettelossa.

Ainoa poikkeus edellä selostettuun on Eurocoden osaan EN 1993-1-1 vuonna 2014 julkaistu Amendment A1:2014, joka sisältää kyseiseen Eurocoden osaan täysin uuden liitteen (Liite C). Siinä esitetään ohjeet teräsrakenteiden toteutusluokan (EXC, execution class) valinnalle, jotka eroavat aikaisemmista ohjeista jotka on esitetty standardissa EN 1090-2. EN 1993-1-1 Liite C:n käyttö edellyttää kuitenkin kansallisia valintoja jotka esitetään kunkin maan kansallisessa liitteessä (NA, National Annex). Suomen ao. kansallisen liitteen osalta ei ole vielä julkaistu tarvittavaa revisiota, joten Liitettä C ei voida Suomessa vielä käyttää. Tämän vuoksi Liitettä C ei ole myöskään huomioitu tässä käsikirjassa, vaan toteutusluokan valinta on esitetty voimassa olevan EN 1090-2:n ohjeiden mukaisesti.

Voimassa olevat viitestandardit ovat samalla myös syy sille, että CE-merkinnän osalta käsikirjan Luvussa 1 nojataan edelleen Euroopan komission Rakennustuotedirektiiviin (CPD, Construction Products Directive), vaikka sen on vuonna 2013 syrjäyttänyt Rakennustuoteasetus (CPR, Construction Products Regulation): voimassa olevat rakenneputkien tuotestandardi EN 10219 sekä teräsrakenteiden toteutustandardi EN 1090 ovat vielä edelleenkin jo kumotun CPD:n mukaisia.

Rakenneputkikäsikirja on juuriltaan pitkän historian omaava suomalainen teos. Vaikka ruotsalainen SSAB ja suomalainen Rautaruukki ovat yhdistyneet, käsikirjan suomalainen tausta näkyy edelleen siten, että Eurocoden yhteydessä tehtävien kansallisten valintojen osalta käsikirjassa on esitetty nimenomaan Suomen kansallisen liitteen mukaiset ohjeet.

Käsikirjan SSAB-revisioinnin ovat toteuttaneet DI Petri Ongelin, DI Jussi Minkkinen ja TkL Petteri Steen.

Hämeenlinnassa 24.5.2016

SSAB Europe Oy
Tubes and Sections

ESIPUHE - Ruukin käsikirja (v.2012 painos)

Tämä teos on Rautaruukin Putkipalkkikäsikirjan MEF 27/99 täysin uudistettu revisio, joka korvaa edelliset painokset.

Kirja on tarkoitettu Ruukin rakenneputkista valmistettujen rakenteiden suunnitteluohjeeksi ja oppikirjaksi. Kirja perustuu ensisijaisesti yhteiseurooppalaiseen teräsrakenteiden suunnitteluohjeeseen Eurocode 3:een (EN 1993). Kirjassa on otettu huomioon myös vuoden 2011 loppuun mennessä julkaistut Eurocoden eri osien korjausosat (AC, Amendment Corrigendum).

Eurocode 3:n ohjeita on tarvittaessa täydennetty CIDECT:n (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire) julkaisemilla rakenneputkista valmistettavien rakenteiden suunnitteluohjeilla. Todettakoon kuitenkin, että lähdeteoksina ei ole käytetty CIDECT:n vuosina 2008 - 2009 julkaisemia uudistettuja ohjeita, koska ne poikkeavat jossain määrin Eurocode 3:n voimassa olevista ohjeista.

Käsikirja on suunnattu ensisijassa talonrakennukseen, mutta sitä voidaan käyttää soveltuvin osin myös koneenrakennukseen.

Kirjan painopiste on selkeästi rakennesuunnittelussa, mutta kirjassa käsitellään lyhyesti myös rakenneputkista valmistettavien rakenteiden konepajateknistä valmistusta, kuljetusta ja asennusta. Rakenneputkien konepajavalmistuksesta esitetään teräsrakennesuunnittelijalle oleelliset asiat pohjautuen standardiin EN 1090, jolloin suunnittelussa voidaan ottaa valmistuksen vaatimukset huomioon. Kirjassa on otettu huomioon myös vuoden 2011 loppuun mennessä julkaistut standardin EN 1090 eri osien muutokset (A1, Amendment 1). Eurocode 3:ssa esitetyt suunnitteluohjeet ovat voimassa teräsrakenteille, jotka valmistetaan standardin EN 1090 mukaisesti.

Käsikirja korvaa edellisen teoksen, joka perustui tuolloin suunnittelukäytössä olleeseen Eurocoden ENV-versioon. Vaikka EN-Eurocoden ohjeet ovat perusperiaatteiltaan pitkälti pysyneet samoina kuin ENV-versiossakin, on tapahtunut paljon myös muutoksiakin. Kumpikin suunnittelujärjestelmä on oma kokonaisuutensa, jonka eri osia ei saa yhdistellä toisiinsa.

Käsikirjan on kirjoittanut DI Petri Ongelin: Luvut 1-7 ja DI Ilkka Valkonen: Luvut 8-10. Kirjan tekemisessä ovat avustaneet konetekn. Mirkka Salonen ja ins. Markus Tupala sekä ins. opisk. Kaisa Saari ja ins. opisk. Jesse Saari. Kirjan tarkastukseen ovat osallistuneet DI Jouko Kouhi, DI Jouko Kansa, DI Jan Jensén, DI Juha Ikkala, DI Juha Rajala (Luku 1), DI Jussi Minkkinen (Luku 1), KTM Mikko Alinikula, TkT Jyri Outinen (palomitoitus) ja DI Unto Kalamies (EN 1090: teräsrakenteiden toteutus, CE-merkintä). Kirjan on taittanut Graafinen Palvelu Martti Lepistö. Kirjan on painanut ja sitonut Otavan Kirjapaino Oy.

Käsikirjan sisältöön liittyvät kommentit ja parannusehdotukset ovat tervetulleita.

Hämeenlinnassa 28.5.2012

RAUTARUUKKI OYJ

SISÄLLYS

ESIPUHE - SSAB:n käsikirja (v.2016 painos) 4
ESIPUHE - Ruukin käsikirja (v.2012 painos) 5
JOHDANTO 14

1. SSAB:n KYLMÄMUOVATUT RAKENNEPUTKET 17
1.1 SSAB Domex Tube rakenneputket 18
1.2 Rakenneputkien valmistus 19
1.3 Hyväksynnät 20
1.4 Poikkileikkaukset, mitat, poikkileikkausarvot ja merkintä piirustukseen 21
1.5 Mittatoleranssit 22
1.6 Käytettävät materiaalit 23
1.6.1 Teräslajit 23
1.6.2 Eurocoden materiaalivaatimukset lujuusluokille S235-S460 ja materiaalien nimelliset lujuudet 26
1.6.3 Materiaalivakioiden mitoitusarvot 28
1.7 Ainestodistus 28
1.8 Pituus 28
1.9 Pinnansuojaus 29
1.10 Tunnistettavuus 29
1.11 Rakenneputkien pintakäsittely 29
1.11.1 Maalattavuus 29
1.11.2 Kuumasinkittävyys 29
1.12 Hitsattavuus 30
1.13 CE-merkintä ja vaatimustenmukaisuuden osoittaminen 31
1.13.1 Rakennustuotedirektiivi ja uusi Rakennustuoteasetus 31
1.13.2 Rakennustuotteiden CE-merkinnän yleiset vaatimukset 32
1.13.3 Rakenneputken CE-merkintä (EN 10219-1) 36
1.13.4 Rakenneputkista valmistetun rakenneosan CE-merkintä (EN 1090-1) 37
1.14 Lähdeluettelo 46

2. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN KESTÄVYYS 47
2.1 Rajatilamitoitus ja osavarmuusluvut 47
2.2 Sauvan akselisto 53
2.3 Poikkileikkausluokat 53
2.4 Tehollinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4 (neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket) 60
2.4.1 Tehollinen poikkileikkaus murtorajatilassa 62
2.4.2 Tehollinen poikkileikkaus käyttörajatilassa 64
2.5 Normaalivoiman kuormittaman rakenneputken kestävyys 65
2.5.1 Vetokestävyys 65
2.5.2 Puristuskestävyys (ilman nurjahdusta) 67
2.5.2.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien puristuskestävyys (ilman nurjahdusta) 67
2.5.2.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken puristuskestävyys (ilman nurjahdusta) 68
2.5.3 Nurjahduskestävyys 73
2.5.3.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien nurjahduskestävyys 73
2.5.3.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken nurjahduskestävyys 75

2.6 Taivutusmomentin kuormittaman rakenneputken kestävyys 80
2.6.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien taivutuskestävyys 80
2.6.2 Reikien vaikutus taivutuskestävyyteen 82
2.6.3 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken taivutuskestävyys 83
2.6.4 Taivutuskestävyys kahden akselin suhteen 84
2.6.4.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2 84
2.6.4.2 Poikkileikkausluokka 3 84
2.6.4.3 Poikkileikkausluokka 4 85
2.6.5 Kiepahduskestävyys 90
2.6.6 Kiepahduksen estäminen sauvan sivusuuntaisella tuennalla 95
2.6.6.1 Tuentaväli (sauvan tukematon maksimipituus) 95
2.6.6.2 Sivusuuntainen tuenta, kun rakenne sisältää plastisia niveliä 99
2.7 Leikkausvoiman kuormittaman rakenneputken kestävyys 102
2.7.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien leikkauskestävyys 102
2.7.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys 103
2.7.1.2 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys 104
2.7.2 Pyöreiden rakenneputkien leikkauskestävyys 105
2.7.2.1 Pyöreiden rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys 105
2.7.2.2 Pyöreiden rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys 106
2.8 Vääntömomentin kuormittaman rakenneputken kestävyys 111
2.8.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vääntökestävyys 112
2.8.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien plastinen vääntökestävyys 112
2.8.1.2 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vääntölommahduskestävyys 113
2.8.2 Pyöreiden rakenneputkien vääntökestävyys 113
2.8.2.1 Pyöreiden rakenneputkien plastinen vääntökestävyys 113
2.8.2.2 Pyöreiden rakenneputkien vääntölommahduskestävyys 114
2.9 Rakenneputken poikkileikkauksen kestävyys voimasuureyhdistelmille, kun sauvan nurjahdus ja kiepahdus on estetty 116
2.9.1 Neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreät rakenneputket 116
2.9.1.1 Jännitysten rajoittaminen (von Misesin myötöehto) 116
2.9.1.2 Leikkausvoima ja vääntömomentti 117
2.9.1.2.1 Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä 117
2.9.1.2.2 Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä 117
2.9.1.3 Taivutusmomentti ja leikkausvoima 118
2.9.1.3.1 Taivutusmomentti ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä 118
2.9.1.3.2 Taivutusmomentti ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä 120
2.9.1.4 Taivutusmomentti, leikkausvoima ja vääntömomentti 123
2.9.1.5 Taivutusmomentti ja normaalivoima 123
2.9.1.5.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2 123
2.9.1.5.2 Poikkileikkausluokka 3 126
2.9.1.5.3 Poikkileikkausluokka 4 126
2.9.1.6 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima 127

2.9.1.6.1 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä ... 127
2.9.1.6.1.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2 ... 127
2.9.1.6.1.2 Poikkileikkausluokat 3 ja 4 ... 129
2.9.1.6.2 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä 130
2.9.1.7 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti ... 131
2.9.1.7.1 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä ... 131
2.9.1.7.2 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä ... 131
2.9.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreä rakenneputki ... 132
2.10 Rakenneputken kestävyys voimasuureyhdistelmille, kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa ... 139
2.10.1 Taivutusmomentti ja normaalivoima ... 139
2.10.2 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima ... 143
2.11 Rakenneputken kestävyys pistekuormille ... 151
2.11.1 Pistekuormakestävyys ... 151
2.11.2 Pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus ... 155
2.12 Lähdeluettelo ... 160

3. RAKENNEPUTKIEN LIITOSTEN MITOITUS ... 163
3.1 Ristikkorakenteiden hitsattujen liitosten mitoitus ... 163
3.1.1 Pyöreiden sekä neliön ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen liitos neliön tai suorakaiteen muotoiseen paarteeseen ... 172
3.1.2 Pyöreiden uumasauvojen liitos pyöreään paarteeseen ... 184
3.1.3 Pyöreiden sekä neliön ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen liitos I-profiilista valmistettuun paarteeseen ... 192
3.2 Kehärakenteiden hitsatut liitokset ... 192
3.2.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien taivutuskuormitetut liitokset ... 193
3.2.2 Pyöreiden rakenneputkien taivutuskuormitetut liitokset ... 196
3.3 Hitsien mitoitus ... 198
3.3.1 Yleistä ... 198
3.3.2 Rakenneputken ja kylmämuovatun nurkan hitsaaminen ... 200
3.3.3 Pienahitsit ... 201
3.3.3.1 Pienahitsin kestävyys, kun käytetään komponenttimenetelmää ... 203
3.3.3.2 Pienahitsin kestävyys, kun käytetään yksinkertaistettua menetelmää ... 205
3.3.4 Päittäishitsit ... 207
3.3.5 Eri lujuusluokkien väliset hitsausliitokset ... 209
3.3.5.1 Hitsausaineen valinta ... 209
3.3.5.2 Eri lujuusluokkien välisten hitsien mitoitus ... 209
3.3.5.2.1 Pienahitsit ... 209
3.3.5.2.2 Päittäishitsit ... 211
3.4 Rakenneputkien ruuviliitokset ... 212
3.4.1 Rakenneputken jatkaminen ruuviliitoksilla ... 212
3.4.1.1 Jatkosliitokset laipoilla ... 213
3.4.1.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vedetty laippaliitos ... 213

3.4.1.1.2 Pyöreiden rakenneputkien vedetty laippaliitos 221
3.4.1.2 Limitetty vetoliitos 223
3.4.2 Palkin ja pilarin väliset ruuviliitokset 234
3.4.2.1 Rakenneputken taivutusmomentin kuormittama laippaliitos 235
3.5 Rakenneputken liitos perustuksiin 251
3.5.1 Normaalivoiman kuormittaman pilarin liitos perustuksiin 253
3.5.2 Normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormittaman pilarin liitos perustuksiin 255
3.6 Lähdeluettelo 263

4. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN VÄSYMISKESTÄVYYS 265
4.1 Väsyttävä kuormitus 265
4.2 Hitsatun rakenteen väsyminen 266
4.3 Jännityskertymä, vesisäiliömenetelmä 267
4.4 Hitsatun rakenteen väsymistarkastelun menetelmiä 268
4.5 S-N-käyrien käyttö väsymistarkasteluissa 271
4.5.1 Vakioamplitudisen kuormituksen S-N-käyrät 271
4.5.2 Muuttuva-amplitudisen kuormituksen S-N-käyrät 272
4.6 Hitsatun rakenteen väsymiskestävyys Eurocoden mukaisesti 275
4.6.1 Perusvaatimukset 275
4.6.2 Luotettavuustarkastelut 276
4.6.3 Väsymistarkastelut 277
4.6.3.1 Väsymistarkastelu nimellisten jännitysten menetelmällä 277
4.6.3.2 Väsymistarkastelu muunnettujen nimellisten jännitysten menetelmällä 281
4.6.3.3 Väsymistarkastelu hot spot -menetelmällä 293
4.7 Väsyttävästi kuormitetun rakenneputkirakenteen suunnittelu 303
4.7.1 Hitsausliitosten suunnittelu 303
4.7.2 Ruuviliitosten suunnittelu 306
4.7.3 Ristikoiden suunnittelu 306
4.8 Lähdeluettelo 316

5. RAKENNEPUTKEN HAURASMURTUMAN JA LAMELLIREPEILYN ESTÄMINEN 319
5.1 Haurasmurtuma 319
5.2 Haurasmurtuman estäminen Eurocoden mukaisesti 319
5.2.1 Kylmämuovauksen vaikutus haurasmurtumaan, referenssilämpötilan korjaustermi $\Delta T_{\varepsilon .cf}$ kylmämuovatuille rakenneputkille 324
5.2.2 SSAB:n kylmämuovattujen SSAB Domex Tube rakenneputkien alin käyttölämpötila 326
5.3 Lamellirepeily 328
5.4 Lamellirepeilyn estäminen Eurocoden mukaisesti 331
5.5 Lähdeluettelo 336

6. RAKENNEPUTKEN PALOMITOITUS 339
6.1 Palotilan lämmönkehitys 340
6.1.1 Standardipalo 340
6.1.2 Parametrinen palomalli 341
6.2 Teräksen lujuus ja kimmokerroin palotilanteessa 342
6.3 Teräksen lämpötilan kehittyminen 344
6.3.1 Suojaamaton sisällä oleva teräsrakenne 344
6.3.2 Palosuojattu sisällä oleva teräsrakenne 346
6.3.3 Liitokset 347
6.3.4 Teräsosan poikkileikkaustekijä 348

6.4 Rakenneputken kriittinen lämpötila 350
6.5 Palotilanteen kuormat 352
6.6 Rakenneputken kestävyys palotilanteessa 355
6.6.1 Poikkileikkausluokitus palomitoituksessa 355
6.6.2 Palotilanteen mukaisten poikkileikkausluokkien 1-3 kestävyys 356
6.6.2.1 Vetokestävyys 356
6.6.2.2 Puristuskestävyys 357
6.6.2.3 Taivutuskestävyys 358
6.6.2.4 Leikkauskestävyys 360
6.6.2.5 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus, kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa 360
6.6.3 Palotilanteen mukaisen poikkileikkausluokan 4 kestävyys 362
6.7 Liitosten kestävyys palotilanteessa 363
6.7.1 Ruuviliitosten kestävyys 364
6.7.1.1 Leikkauskestävyys ja reunapuristuskestävyys 364
6.7.1.2 Vetokestävyys 365
6.7.2 Hitsausliitosten kestävyys 365
6.7.2.1 Päittäishitsit 365
6.7.2.2 Pienahitsit 366
6.8 Palosuojausmenetelmät 372
6.8.1 Palosuojaus eristämällä 373
6.8.2 Palosuojaus teräsrakenteen lämmönsitomiskykyä nostamalla 375
6.8.3 Palosuojaus rakenteellisin keinoin 376
6.9 Lähdeluettelo 378

7. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN SUUNNITTELU 381
7.1 Rakenteen kuormat 383
7.1.1 Oma paino ja hyötykuormat 384
7.1.2 Lumikuorma 384
7.1.3 Tuulikuorma 388
7.1.4 Kuormayhdistelmät 395
7.1.5 Käyttörajatilan vaatimukset 395
7.1.6 Lisävaakavoimat 397
7.1.7 Kuormien laskenta esimerkkikohteessa 398
7.2 Pilarin suunnittelu 400
7.2.1 Pilarin nurjahduspituus 400
7.2.2 Liitoksen jäykkyyden vaikutus pilarin nurjahduspituuteen 404
7.2.3 Pilarin liitos perustuksiin 405
7.2.4 Pilarin mitoitus esimerkkikohteessa 405
7.2.5 Pilarin perustusliitoksen mitoitus esimerkkikohteessa 409
7.3 Palkin suunnittelu 415
7.3.1 Päätypalkin mitoitus esimerkkikohteessa 416
7.3.2 Ovipalkin mitoitus esimerkkikohteessa 421
7.4 Ristikon suunnittelu 424
7.4.1 Ristikkotyypin valinta 427
7.4.2 Paarreputken valinta 429
7.4.3 Uumasauvojen valinta 431
7.4.4 Ristikkoliitosten suunnittelu 432
7.4.5 Ristikon liitos tuella 434
7.4.6 Ristikon liitos harjalla 435
7.4.7 Ristikon limitetyt liitokset 437
7.4.8 Ristikon jäykkyyden arviointi 442
7.4.9 Ristikon mitoitus esimerkkikohteessa 442

7.5 Rakenteen jäykistäminen ... 458
7.5.1 Jäykistyselementtien mitoitus esimerkkikohteessa ... 459
7.6 Lähdeluettelo ... 465

8. KONEPAJAVALMISTUS JA ASENNUS ... 469
8.1 Yleistä ... 469
8.1.1 Yleiset vaatimukset valmistajalle ... 469
8.1.2 Toteutuseritelmä ... 469
8.1.3 Toteutusluokat ... 469
8.1.4 Osien ja kokoonpanojen jäljitettävyys ... 473
8.2 Rakenneputken katkaisu ... 473
8.2.1 Pyöreän rakenneputken katkaisu ... 474
8.2.2 Katkaisumenetelmät ... 475
8.2.3 Rakenneputken pään loveaminen ... 476
8.3 Rakenneputken taivuttaminen ... 477
8.3.1 Rakenneputken taivutusmenetelmät ... 478
8.4 Ruuviliitokset ... 478
8.4.1 Käytettävät ruuvit, mutterit ja aluslaatat ... 479
8.4.2 Ruuviliitosten asentaminen ... 480
8.4.2.1 Esijännittämättömien ruuvien asentaminen ... 480
8.4.2.2 Esijännitettävien ruuvien asentaminen ... 481
8.4.3 Erityiskiinnittimien ja -menetelmien käyttö ... 483
8.4.3.1 Itsekierteittävät ruuvit ja poraruuvit ... 483
8.4.3.2 Rakenneputken seinämän kitkaporaus ... 483
8.4.3.3 Liitokset kiila-ankkureilla ... 484
8.4.3.4 Liitokset vetoniiteillä ... 484
8.4.3.5 Liitokset kierretapeilla ... 484
8.5 Rakenneputken hitsaaminen ... 485
8.5.1 Hitsausluokat ja hitsausvirheiden toleranssit ... 486
8.5.2 Hitsausmenetelmät ... 487
8.5.3 Hitsausjärjestys ... 488
8.5.4 Railomuodot ... 490
8.5.4.1 Railomuodot rakenneputkien jatkosliitoksissa ... 490
8.5.4.2 Railomuodot rakenneputkien ristikkoliitoksissa ... 493
8.5.5 Esilämmitys ... 497
8.5.6 Jäännösjännitykset ... 498
8.5.7 Hitsien tarkastukset ... 498
8.5.7.1 Ainetta rikkomattomat menetelmät ... 499
8.5.7.2 NDT-menetelmien tarkastuslaajuus ... 501
8.5.7.3 Ainetta rikkovat menetelmät ... 502
8.6 Toleranssit ... 503
8.6.1 Valmistustoleranssit ... 503
8.6.2 Asennustoleranssit ... 511
8.7 Ristikon kokoaminen konepajalla ... 520
8.8 Palosuojaus ... 521
8.9 Asennus ... 521
8.10 Lähdeluettelo ... 522

9. PINTAKÄSITTELYT ... 523
9.1 Yleistä ... 523
9.2 Ympäristöluokat ... 523
9.3 Esikäsittely ... 524
9.4 Korroosionestomaalaus ... 526

9.5 Kuumasinkitys 528
9.6 Pintakäsittelyn tarkastukset 531
9.7 Lähdeluettelo 533

10. KULJETUS JA VARASTOINTI 535
10.1 Eri kuljetusmuodot 535
10.2 Tiekuljetuksen mitta- ja painorajat sekä kuljetusluvat 536
10.3 Rautatiekuljetus 537
10.4 Lähdeluettelo 537

11. LIITTEET 539
Liite 11.1 Rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajeille S355J2H ja S420MH 539
Liite 11.2 Rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajeille S355J2H ja S420MH 581
Liite 11.3 Ristikkoliitosten laskentataulukot 630
Liite 11.4 Kehäliitosten jäykkyyden arvioiminen 679
Liite 11.5 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien minimitaivutussäteet 685
Liite 11.6 Ristikko- ja kehärakenteiden mitoitusohjelmat - ***WinRami***, ***Section*** ja ***Fire Protection System*** 687
Liite 11.7 Liittopilarin mitoitusohjelma - ***ColGraph*** 688

JOHDANTO

Rakenneputki on nykyaikainen ja monipuolinen aines teräsrakenteisiin. Rakenneputki on myös ympäristöystävällinen materiaali, koska se on helposti kierrätettävissä ja uudelleen käytettävissä. Rakenneputkien yksinkertainen muoto ja erinomaiset lujuusominaisuudet tekevät rakenneputkista valmistetuista rakenteista keveitä ja edullisia.

SSAB:n rakenneputkissa suunnittelijalla on valittavanaan laaja mittavalikoima, joka yhdistettynä rakenteeseen sopivan teräslajin kanssa mahdollistaa rakenteen toiminnan ja kustannusten optimoinnin. Lisäksi rakenneputkista saadaan näyttäviä rakenteita ja varsinkin lasertekniikan yleistyminen leikkausmenetelmänä on lisännyt pyöreiden rakenneputkien käyttömahdollisuuksia.

Ristikkorakenteessa rakenneputken suuri nurjahduskestävyys mahdollistaa pitkät jännevälit ja harvan diagonaalijaon. Suljetun profiilin suuri vääntöjäykkyys antaa rakenneputkiristikoille ja rakenneputkille hyvän kiepahduskestävyyden. Yksinkertaiset liitosdetaljit ovat valmistuksen kannalta edullisia. Rakenneputkien pyöreät nurkat ja avarat liitokset helpottavat pintakäsittelyä.

Rakenneputkista voidaan muotoilla keveitä ja jäykkiä kehä- ja arinarakenteita, koska taivutusjäykkyys on suuri kaikkiin suuntiin ja vääntöjäykkyys hyvä. Rakenneputkien vääntöjäykkyyttä voidaan hyödyntää myös erilaisissa konsoli- ja ulokepalkkirakenteissa. Jäykistesauvoissa rakenneputken taipuma on pieni sen suuren jäykkyyden ansiosta.

Rakenneputki soveltuu myös luontevasti liittorakenteeksi. Betonitäytteistä liittopilaria käyttäen voidaan teräksen ja betonin ominaisuudet asennuksessa, normaalikuormituksessa ja palotilanteessa hyödyntää optimaalisesti.

Rakenneputkista valmistetun rakenteen geometrian suunnittelu on helppoa ja nopeaa. Yksinkertainen geometria on ilmaistavissa vähillä parametreilla, joten tietokoneavusteiset suunnittelumenetelmät soveltuvat hyvin rakenneputkirakenteiden suunnitteluun. Rakenteiden painoa, lujuutta ja jäykkyyttä voidaan optimoida seinämänpaksuutta muuttamalla ilman putken ulkomittojen tai rakenteen geometrian muutoksia.

Tässä käsikirjassa esitetään SSAB:n valmistamien rakenneputkien materiaali- ja mittatiedot sekä annetaan ohjeita poikkileikkauksien, liitosten ja rakenteiden mitoitukseen sekä suunnitteluun. Kirjassa käsitellään staattisesti kuormitettujen rakenneputkien mitoituksen lisäksi myös rakenneputkien väsymismitoitusta ja palomitoitusta.

Käsikirjaa täydentää SSAB:n (Ruukin) kehittämä WinRami ohjelmisto, joka on suunniteltu erityisesti rakenneputkirakenteiden mitoitukseen (ks. liite 11.6). Lisätietoja WinRami ohjelmistosta saa Ruukin verkkosivuilta [www.ruukki.com].

Vaikka kirjan painopiste on selkeästi rakennesuunnittelussa, kirjassa käsitellään lyhyesti myös rakenneputkista valmistettavien rakenteiden konepajateknistä valmistusta, kuljetusta ja asennusta. Rakenneputkirakenteiden konepajavalmistuksesta esitetään teräsrakennesuunnittelijalle oleelliset asiat pohjautuen standardiin EN 1090, jolloin suunnittelussa voidaan ottaa valmistuksen vaatimukset huomioon. Käsikirjassa on otettu huomioon myös vuoden 2011 loppuun mennessä julkaistut standardin EN 1090 eri osien muutokset (A1, Amendment 1).

Käsikirjan mitoitusohjeet perustuvat Eurocode 3:een (EN 1993), joka on yhteiseurooppalainen teräsrakenteiden suunnittelustandardi. Eurocode 3:ssa esitetyt suunnitteluohjeet ovat voimas-

sa teräsrakenteille, jotka valmistetaan standardin EN 1090 mukaisesti. Eurocodesta käytetään sen eri osia ja liitteitä. Käsikirjassa on otettu huomioon myös vuoden 2011 loppuun mennessä julkaistut Eurocoden eri osien korjausosat (AC, Amendment Corrigendum). **Käsikirjan laskuesimerkit perustuvat Eurocoden perusolettamuksiin ja suositusarvoihin, ellei toisin mainita.**

Eurocodea on aina käytettävä yhdessä kyseisen Eurocoden osan kunkin maan kansallisen liitteen kanssa (= NA, National Annex). Käsikirjassa on erikseen esitetty Suomen kansallisessa liitteessä annetut ohjeet kunkin käsiteltävän asian kohdalla silloin, kun kyseinen asia kuuluu kansallisten valintojen piiriin.

Eurocoden 3:n ohjeita on tarvittaessa täydennetty CIDECT:n (Comité International pour le Développement et l'Étude de la Construction Tubulaire) julkaisemilla rakenneputkista valmistettavien rakenteiden suunnitteluohjeilla. Todettakoon kuitenkin, että lähdeteoksina ei ole käytetty CIDECT:n vuosina 2008 - 2009 julkaisemia uudistettuja ohjeita, koska ne poikkeavat jossain määrin Eurocode 3:n voimassa olevista ohjeista.

1. SSAB:n KYLMÄMUOVATUT RAKENNEPUTKET

SSAB valmistaa korkealaatuisia kylmämuovattuja rakenneputkia tuoteperheissä Strenx Tube ja SSAB Domex Tube. Kylmämuovausmenetelmällä saavutetaan hyvä mittatarkkuus ja pinnanlaatu.

SSAB Domex Tube ja Strenx Tube tuoteperheet sisältävät taulukossa 1.1 esitetyt teräslajit.

SSAB Domex Tube tuoteperhe sisältää rakenneputket lujuusluokissa S235-S550. Koko SSAB Domex Tube tuoteperheelle taataan monelta osin paremmat ominaisuudet standardin vaatimuksiin nähden. SSAB:n rakenneputkien vakioteräslaji on SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää ja ylittää standardissa EN 10219:2006 teräslajeille S355J2H ja S420MH asetetut vaatimukset. Sen mukana toimitetaan molempien teräslajien ainestodistukset.

Strenx Tube tuoteperhe sisältää rakenneputket lujuusluokissa S700-S960. Niiden soveltuvuus Eurocode 3:n (EN 1993) mukaiseen mitoitukseen on tarkistettava tapauskohtaisesti.

Kaikki SSAB Domex Tube ja Strenx Tube rakenneputket lujuusluokissa S235-S700 ovat CE-merkittyjä.

Tässä käsikirjassa esitetyt mitoitusohjeet koskevat SSAB:n valmistamia standardin EN 10219:2006 [1,2] mukaisia kylmämuovattuja SSAB Domex Tube rakenneputkia lujuusluokissa S235-S460. EN 10219:2006 mukaiset S235-S460 rakenneputket voidaan mitoittaa Eurocode 3:n (EN 1993) ohjeiden mukaisesti, jossa niiden katsotaan täyttävän käytettävältä materiaalilta vaadittavat mekaaniset ominaisuudet [3,4,5].

Tämän käsikirjan laskentaesimerkit perustuvat SSAB Domex Tube Double Graden käyttöön. Esimerkeissä on lisäksi mukana vertailu, millainen painonsäästö on mahdollista saavuttaa hyödyntämällä putken korkeampaa lujuutta S420MH normaalin S355J2H:n sijaan.

Taulukko 1.1 Kylmämuovatut SSAB Domex Tube ja Strenx Tube rakenneputket. Teräslajit

	SSAB:n rakenneputki	EN 10219:2006 vastaavuus	prEN 10219:2016 vastaavuus
1)	SSAB Domex Tube 235JRH [a]	S235JRH	S235JRH
	SSAB Domex Tube 355J2H [a]	S355J2H	S355J2H
	SSAB Domex Tube Double Grade [a]	**S420MH / S355J2H**	**S420MH / S355J2H**
	SSAB Domex Tube 460MH [a]	S460MH	S460MH
2)	SSAB Domex Tube 500MH [b]	–	S500MH
	SSAB Domex Tube 550MH [b]	–	S550MH
	Strenx Tube 700MH,MLH [b]	–	S700MH,MLH
	Strenx Tube 900MH [b]	–	S900MH
	Strenx Tube 960MH [b]	–	S960MH

1) Tämä käsikirja sisältää lujuusluokkien S235-S460 rakenneputkien mitoituksen Eurocode 3:n (EN 1993) mukaisesti.
2) Tässä käsikirjassa ei käsitellä lujuusluokkien yli S460 mitoitusta. Eurocoden osassa EN 1993-1-12 esitetään lisäohjeet lujuusluokkien S500-S700 mitoitukseen myös rakenneputkia koskien, mutta lujuusluokat S500-S700 eivät sisälly rakenneputkien voimassa olevaan tuotestandardiin EN 10219:2006, ja niiden soveltuvuus Eurocode 3:n (EN 1993) mukaiseen mitoitukseen on tarkistettava tapauskohtaisesti.

a) SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät ja ylittävät tuotestandardin EN 10219:2006 vaatimukset.
b) Lujuusluokat S500-S960 eivät sisälly rakenneputkien voimassa olevaan tuotestandardiin EN 10219:2006. Tuotestandardin tulossa oleva revisio (draft prEN 10219:2016) sisältää myös lujuusluokat S500-S960.

1.1 SSAB Domex Tube rakenneputket

SSAB Domex Tube tuoteperhe sisältää taulukossa 1.1 esitetyt rakenneputket lujuusluokissa S235 - S550. Niistä lujuusluokat S235 - S460 sisältyvät voimassa olevaan tuotestandardiin EN 10219:2006, ja lujuusluokat S500 - S550 tuotestandardin tulossa olevaan revisioon (draft prEN 10219:2016).

Tässä käsikirjassa esitetyt mitoitusohjeet koskevat SSAB:n valmistamia standardin EN 10219:2006 [1,2] mukaisia kylmämuovattuja SSAB Domex Tube rakenneputkia lujuusluokissa S235 - S460. EN 10219:2006 mukaiset S235 - S460 rakenneputket voidaan mitoittaa Eurocode 3:n (EN 1993) ohjeiden mukaisesti, jossa niiden katsotaan täyttävän käytettävältä materiaalilta vaadittavat mekaaniset ominaisuudet [3,4,5].

Koko SSAB Domex Tube tuoteperheelle taataan monelta osin paremmat ominaisuudet standardin vaatimuksiin nähden. SSAB:n rakenneputkien vakioteräslaji on SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää ja ylittää standardissa EN 10219:2006 teräslajeille S355J2H ja S420MH asetetut vaatimukset. Sen mukana toimitetaan molempien teräslajien ainestodistukset.

SSAB Domex Tube rakenneputket soveltuvat käytettäväksi hitsatuissa teräsrakenteissa jopa alle -50 ºC käyttölämpötiloissa. Aihetta käsitellään tarkemmin luvussa 5.

SSAB Domex Tube rakenneputket ovat hyvin hitsattavia myös nurkan alueella. Kylmämuovatun rakenneputken nurkan hitsaamiselle on esitetty ohjeita ja vaatimuksia Eurocoden osassa EN 1993-1-8. SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät kyseiset vaatimukset, joten niiden nurkkaa voidaan hitsata ilman erityistoimenpiteitä (ks. tarkemmin kohta 1.12).

Kaikki pituussaumahitsatut *) SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät standardin EN 10219 perusvaatimusten lisäksi myös seuraavat vaatimukset:

- kaikki tuotteet valmistetaan kylmämuovaukseen sopivista vanhenemattomista täysin alumiinitiivistetyistä hienoraeteräksistä ($Al_{total} \geq 0{,}02\,\%$)
- iskusitkeyden testauslämpötila -40 ºC
- kemiallinen koostumus: paremmat arvot kuin standardissa EN 10219
- hiiliekvivalentti: maksimiarvo parempi kuin standardissa EN 10219
- nurkkaan hitsaus mahdollista ilman rajoituksia (täyttää EN 1993-1-8 lisävaatimukset)
- nurkkien säröttömyys taataan
- seinämänpaksuuden toleranssi parempi kuin standardissa EN 10219: seinämänpaksuustoleranssiksi taataan -5 % / +10 %, kuitenkin vähintään ±0,2 mm ja enintään ±0,5 mm
- tuotteet täyttävät standardin EN 10219:2006 seuraavat optiot:
  - optio 1.2: seosainepitoisuuksien arvot ilmoitetaan ainestodistuksessa
  - optio 1.3: varmennetaan iskusitkeys myös laatuluokille JR ja J0
  - optio 1.4: rakenneputket soveltuvat kuumasinkitykseen
  - optio 1.5: rakenneputkien perusaineen korjaushitsauksia ei tehdä
  - optio 1.6: toimituseräkohtainen tarkastus ja testaus myös laatuluokille JR ja J0

Tarkemmat tiedot tuotteiden ominaisuuksista on esitetty kohdassa 1.6, sekä verkkosivuilla [www.ssab.com].

* Kierresaumahitsatut rakenneputket eivät sisälly SSAB Domex Tube tuoteperheeseen, ja niiden tekniset toimitusehdot sovitaan tilauskohtaisesti.

1.2 Rakenneputkien valmistus

SSAB valmistaa rakenneputket kuumavalssatusta teräsnauhasta kylmämuovaamalla ja hitsaamalla. Poikkileikkaukseltaan neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä pienet pyöreät ($d \leq 323{,}9$ mm) rakenneputket pituussaumahitsataan suurtaajuusmenetelmällä (HFW), kuva 1.1. Suuret pyöreät koot ($d \geq 406{,}4$ mm) kierresaumahitsataan jauhekaarimenetelmällä (SAW), kuva 1.2.

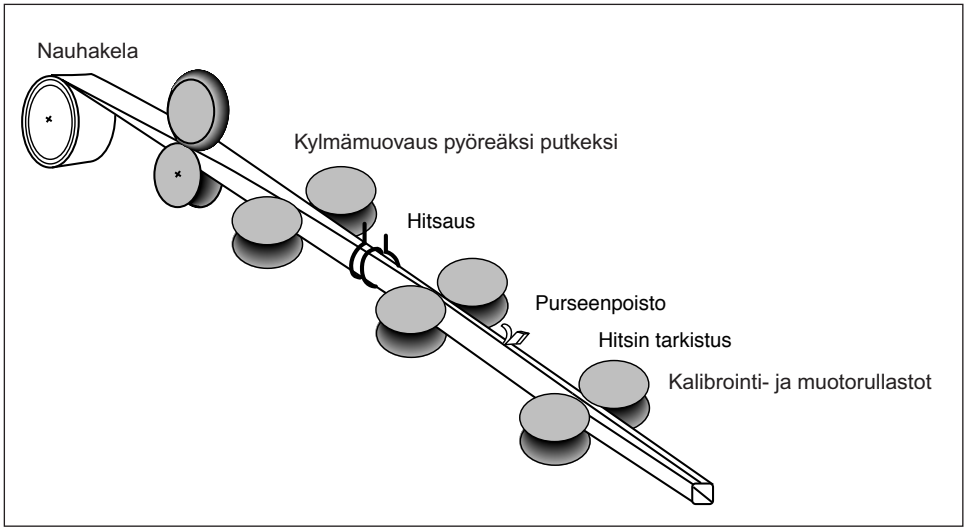
Rakenneputkien laadunvarmistus suoritetaan kaikilla putkitehtailla sertifioidun EN ISO 9001 laatujärjestelmän ja EN ISO 14001 ympäristöjärjestelmän mukaisesti.

Pituussaumahitsatut rakenneputket

Pituussaumahitsattujen rakenneputkien raaka-aineena käytetään teräsnauhaa, joka on leikattu tarkasti putken ulkomittojen edellyttämään leveyteen. Putkilinjan alkupäässä teräsnauha kelataan auki ja nauhojen päät hitsataan yhteen, jonka jälkeen nauha syötetään raina-akkuun. Raina-akku mahdollistaa jatkuvatoimisen valmistusprosessin.

Teräsnauha muovataan muovausrullilla huoneenlämpötilassa vaiheittain pyöreäksi putkiaihioksi. Aihion reunat kuumennetaan suurtaajuusvirralla induktiokelan avulla hitsauslämpötilaan ja puristetaan yhteen. Putkesta poistetaan ulkopuolinen hitsauspurse. Sauman laatu varmistetaan jatkuvatoimisella pyörrevirta- tai ultraäänitarkastuksella. Sisäpurseen höyläys on mahdollista erikseen sovittaessa.

Pyöreän putken halkaisija kalibroidaan lopulliseen mittaan. Tämän jälkeen poikkileikkaus voidaan muovata neliön tai suorakaiteen muotoiseksi profilointirullilla. Putkeen tehdään jatkuva merkintä ja putki katkaistaan asiakkaan tilaamaan mittaan. Putkesta otetaan näytteet, joista testataan mekaaniset arvot ja suoritetaan hitsin ainetta rikkova testaus standardin EN 10219 edellyttämällä tavalla tehtaan laatujärjestelmän mukaisesti.



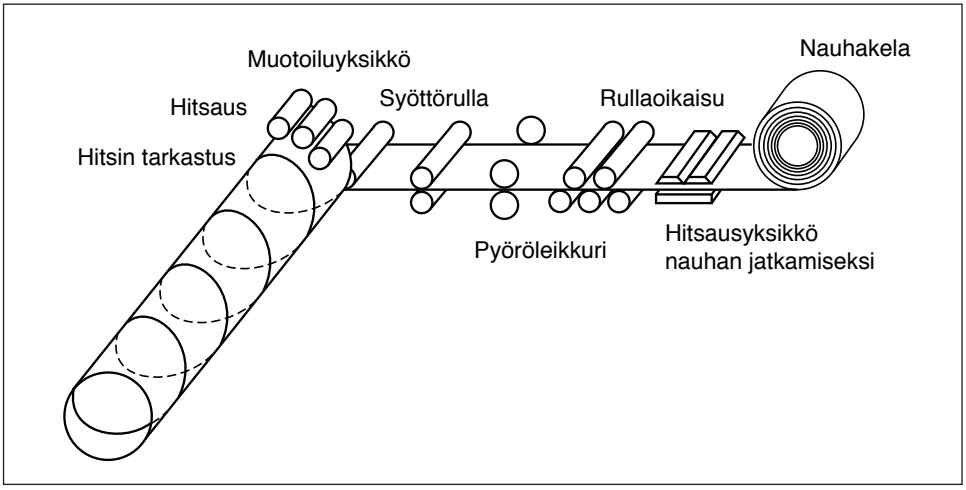
Kuva 1.1 Pituussaumahitsattujen rakenneputkien valmistusperiaate kylmämuovaamalla

Katkaisun jälkeen putkien mitat tarkastetaan ja tuotteet niputetaan. Nauhan jatkossauman sisältävä putki romutetaan. Jokaiseen nippuun kiinnitetään tunnistelappu, johon on merkitty tuotteiden ominaisuudet ja identifiointi. Tunnistelapun perusteella pystytään jäljittämään rakenneputken ominaisuudet aina teräksen valmistukseen saakka.

Kierresaumahitsatut rakenneputket

SSAB valmistaa myös pyöreitä kierresaumahitsattuja rakenneputkia kuumavalssatusta teräsnauhasta halkaisija-alueella Ø 406,4 ...1219 mm. Valmistuslinjan alkupäässä yksittäiset teräsnauhat hitsataan jatkuvaksi nauhaksi, joka oikaistaan ja muovataan kolmitelataivutuksella huoneenlämpötilassa kierresaumaputkeksi. Kierresauma hitsataan sisä- ja ulkopuolelta jauhekaarihitsausmenetelmällä.

Mekaaniset arvot testataan putkesta irrotetuilla testisauvoilla. Putket katkaistaan asiakkaan tilaamiin mittoihin, tarkastetaan ja toimitetaan asiakkaalle.



Kuva 1.2 Kierresaumahitsattujen rakenneputkien valmistusperiaate kylmämuovaamalla

1.3 Hyväksynnät

Rakenneputkien koko valmistusketjun terässulatolta valmiiksi putkeksi kattaa sertifioitu EN ISO 9001 laatujärjestelmä sekä EN ISO 14001 ympäristöjärjestelmä.

SSAB:lla on Inspecta Sertifiointi Oy:n myöntämä oikeus standardin EN 10219 mukaisten rakenneputkien CE-merkintään. Rakennustuotteiden CE-merkintää käsitellään laajemmin kohdassa 1.13.

1.4 Poikkileikkaukset, mitat, poikkileikkausarvot ja merkintä piirustukseen

SSAB:n tuoteohjelmaan kuuluvat pyöreät sekä neliön ja suorakaiteen muotoiset kylmämuovatut EN 10219 mukaiset rakenneputket. Rakenneputkien mitat ja poikkileikkausarvot on esitetty liitteen 11.1 taulukoissa. Esitetyt mitat koskevat rakenneputkien vakioteräslajia SSAB Domex Tube Double Grade. Muiden teräslajien mittojen saatavuus sekä asiakaskohtaisten mittojen mahdollisuus on varmistettava SSAB:n myynnistä tai verkkosivuilta [www.ssab.com].

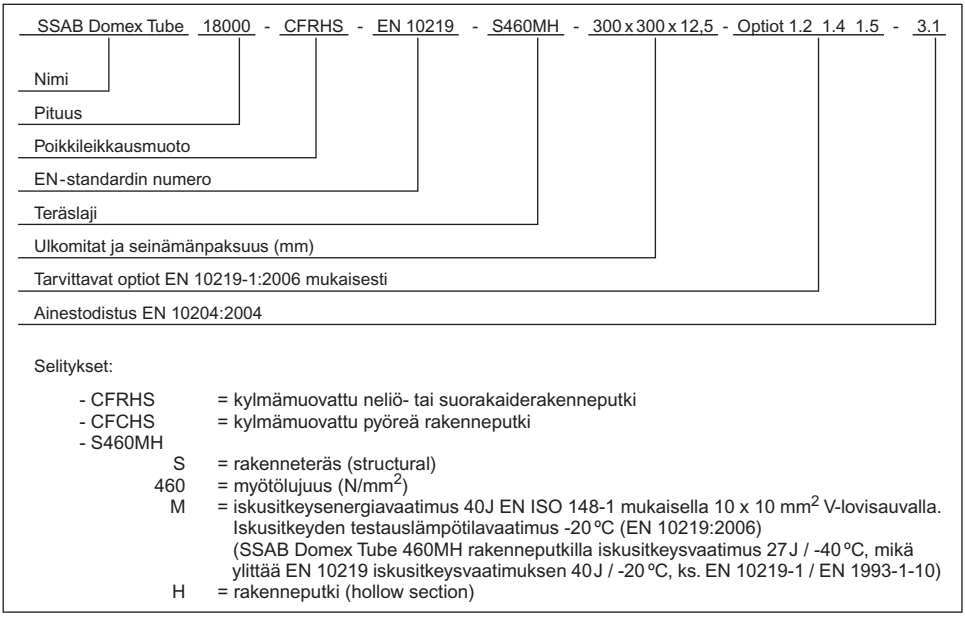
Poikkileikkausarvot on laskettu käyttäen rakenneputkien nimellisiä poikkileikkausmittoja h, b, d ja t sekä taulukoiden yläosassa ilmoitettua standardin EN 10219 mukaista nurkan nimellistä ulkopuolista pyöristyssädettä r.

Erikseen sovittaessa rakenneputkia voidaan toimittaa myös muissa teräslajeissa, pinnansuojauksilla, pintakäsittelyillä, määrämittaan katkaistuina ja erikoistoleransseilla.

Kierresaumahitsattuja rakenneputkia valmistetaan vain sopimuksen mukaan.

Merkintä piirustukseen

SSAB:n rakenneputkien merkintä piirustukseen ja tilaukseen on esitetty kuvassa 1.3.



Kuva 1.3 SSAB:n rakenneputkien merkintä

1.5 Mittatoleranssit

SSAB takaa pituussaumahitsatuille SSAB Domex Tube rakenneputkille paremman seinämänpaksuustoleranssin kuin standardi EN 10219 vaatii. Muut mittatoleranssit vahvistetaan standardin EN 10219 mukaan taulukossa 1.2 esitetyn mukaisesti [2]. Sopimuksen mukaan voidaan käyttää myös muita toleransseja.

Kierresaumahitsattujen rakenneputkien tekniset toimitusehdot sovitaan tilauskohtaisesti.

Taulukko 1.2 Pituussaumahitsatut SSAB Domex Tube rakenneputket. Mittatoleranssit

OMINAISUUS	Toleranssi (sama tai parempi kuin standardissa EN 10219-2:2006)	
	Neliö- ja suorakaiderakenneputki	Pyöreä rakenneputki
Ulkomitat (b, h) a)	Kun b, h < 100 mm: ± 1 %, vähintään ± 0,5 mm Kun 100 mm ≤ b, h ≤ 200 mm: ± 0,8 % Kun b, h > 200 mm: ± 0,6 %	–
Ulkohalkaisija (d) a)	–	± 1 %, kuitenkin vähintään ± 0,5 mm ja enintään ± 10 mm
Pyöreyspoikkeama b)	–	2 %, kun $d/t \leq 100$ b)
Seinämänpaksuus (t)	-5 % / +10 % x), kuitenkin vähintään ± 0,2 mm ja enintään ± 0,5 mm x) EN 10219 vaatimus: -10 % / +10 %	Kun $d \leq 323{,}9$ mm: -5 % / +10 % x), kuitenkin vähintään ± 0,2 mm ja enintään ± 0,5 mm x) EN 10219 vaatimus: -10 % / +10 %
Nurkan ulko-pyöristyssäde (r)	Kun $t \leq 6$ mm: 1,6 x t ... 2,4 x t Kun 6 mm < $t \leq 10$ mm: 2,0 x t ... 3,0 x t Kun t > 10 mm: 2,4 x t ... 3,6 x t	–
Sivujen kohtisuoruus	90° ± 1°	–
Sivujen tasomaisuus c)	0,8 %, kuitenkin vähintään 0,5 mm	–
Kiertymä	2 mm + 0,5 mm/m	–
Suoruus	0,15 % putken kokonaispituudesta d)	0,20 % putken kokonaispituudesta d)
Massa	Yksittäinen putki ± 6 %	Yksittäinen putki: ± 6 %
Vakiopituus	≥ 6000 mm: 0/+50 mm	≥ 6000 mm: 0/+50 mm
Määräpituus	Sovitaan tilauksen yhteydessä	Sovitaan tilauksen yhteydessä

a) Kaikki ulkomitat mitataan neliöpoikkileikkauksilla vähintään etäisyydeltä b ja suorakaidepoikkileikkauksilla vähintään etäisyydeltä h tai pyöreillä poikkileikkauksilla vähintään etäisyydeltä d putken päästä katsottuna. Etäisyyden on oltava kuitenkin vähintään 100 mm.
b) Kun d/t > 100, niin toleranssi sovitaan tilauksen yhteydessä.
c) Koveruuden ja kuperuuden toleranssi on riippumaton ulkomittojen toleranssista.
d) Paikallinen suoruuspoikkeama enintään 3 mm jokaisella 1 m pituudella.

1.6 Käytettävät materiaalit

1.6.1 Teräslajit

SSAB:n valmistamat rakenneputket valmistetaan teräslajeista jotka kaikki ovat kylmämuovaukseen sopivia vanhenemattomia täysin alumiinitiivistettyjä hienoraeteräksiä ($Al_{total} \geq 0{,}02\,\%$).

SSAB Domex Tube tuoteperhe sisältää taulukossa 1.1 esitetyt rakenneputket lujuusluokissa S235 - S550. Niistä lujuusluokat S235 - S460 sisältyvät voimassa olevaan tuotestandardiin EN 10219:2006, ja lujuusluokat S500 - S550 tuotestandardin tulossa olevaan revisioon (draft prEN 10219:2016).

Tässä käsikirjassa esitetyt mitoitusohjeet koskevat SSAB Domex Tube rakenneputkia voimassa olevan tuotestandardin EN 10219:2006 mukaisissa lujuusluokissa S235-S460, jotka voidaan mitoittaa Eurocode 3:n (EN 1993) ohjeiden mukaisesti, jossa niiden katsotaan täyttävän käytettävältä materiaalilta vaadittavat mekaaniset ominaisuudet [3,4,5].

SSAB Domex Tube rakenneputkien tuoteominaisuudet em. lujuusluokissa S235-S460 on esitetty seuraavilla sivuilla taulukoissa 1.3 - 1.6. Yli S460 rakenneputkien soveltuvuus Eurocode 3:n (EN 1993) mukaiseen mitoitukseen on tarkistettava tapauskohtaisesti.

Kaikki SSAB Domex Tube rakenneputket ovat CE-merkittyjä.

SSAB:n rakenneputkien vakioteräslaji on SSAB Domex Tube Double Grade, jolle SSAB takaa taulukon 1.3 mukaisen kemiallisen koostumuksen ja taulukon 1.4 mukaiset mekaaniset ominaisuudet.

Tuote on standardin EN 10219 mukainen ja täyttää molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Rakenneputkirakenteen mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Tuotteen mukana toimitetaan molempien teräslajien mukaiset ainestodistukset. Tuote on CE-merkitty.

Tarkemmat tiedot tuotteiden ominaisuuksista löytyvät verkkosivuilta [www.ssab.com].

Taulukko 1.3 SSAB:n rakenneputkien vakioteräslajin SSAB Domex Tube Double Grade ja standardin EN 10219 mukaisten teräslajien S355J2H ja S420MH kemiallisen koostumuksen vertailu

Teräslaji		Kemiallinen koostumus (%)						
		C	Si	Mn	P	S	Al_{total}	CEV [c]
SSAB Domex Tube Double Grade								
S355J2H	Maksimi	0,16	0,25 [a]	1,60	0,020	0,012	0,020 [b]	0,39
S420MH	Maksimi	0,16	0,25 [a]	1,60	0,020	0,012	0,020 [b]	0,39
EN 10219:2006								
S355J2H	Maksimi	0,22	0,55	1,60	0,035	0,035	0,020 [b]	0,45
S420MH	Maksimi	0,16	0,50	1,70	0,035	0,030	0,020 [b]	0,43

SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät ja ylittävät tuotestandardin EN 10219 vaatimukset.

a) Si-pitoisuus taataan 0,15...0,25 %
(vastaa levyterässtandardin EN 10025-2 kuumasinkittävyysluokkaa 3 ja kuumasinkitysstandardin EN ISO 14713-2 luokkaa B)
b) Minimi %
c) Hitsattavuus on hyvä, jos hiiliekvivalentin arvo on CEV < 0,41.
Hiiliekvivalentin laskentakaava, ks. kohta 1.12.

Taulukko 1.4 SSAB:n rakenneputkien vakioteräslajin SSAB Domex Tube Double Grade ja standardin EN 10219 mukaisten teräslajien S355J2H ja S420MH mekaanisten ominaisuuksien vertailu

Teräslaji	Seinämänpaksuus t	R_{eH} vähintään	R_m (N/mm^2) seinämänpaksuus t (mm)		A_5 vähintään	Iskusitkeys testaus-lämpötila	Iskuenergia vähintään [b]
	(mm)	(N/mm^2)	$t < 3$	$3 \le t \le 16$	(%)	(ºC)	(J)
SSAB Domex Tube Double Grade							
S355J2H	2,0 - 12,5	355	510 - 680	470 - 630	20 [a]	-40	40
S420MH	2,0 - 12,5	420	500 - 660	500 - 660	19 [a]	-40	40
EN 10219:2006							
S355J2H		355	510 - 680	470 - 630	20 [a]	-20	27
S420MH		420	500 - 660	500 - 660	19 [a]	-20	40

SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät ja ylittävät tuotestandardin EN 10219 vaatimukset.
SSAB testaa rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet pitkittäisillä koesauvoilla. Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet testataan poikkileikkauksen pidemmältä sivulta.

a) Rakenneputkien, joiden $d/t < 15$ (pyöreä) tai $(b+h)/2t < 12,5$ (neliö ja suorakaide), murtovenymän vähimmäisvaatimus on 2 %-yks. pienempi.
b) Iskuenergia EN ISO 148-1 mukaisella 10 x 10 mm^2 V-lovisauvalla. Iskusitkeyden testaus suoritetaan EN ISO 148-1 mukaisesti ainepaksuuksilla $\ge$ 6 mm.

Taulukko 1.5 Seostamattomista teräksistä valmistetut SSAB Domex Tube rakenneputket. Mekaaniset ominaisuudet

Teräslaji EN 10219	Seinämänpaksuus t	R_{eH} vähintään	R_m (N/mm^2) seinämänpaksuus t (mm)		A_5 vähintään	Iskusitkeys testaus-lämpötila	Iskuenergia vähintään [d]
	(mm)	(N/mm^2)	$t < 3$	$3 \le t \le 16$	(ºC)	(ºC)	(J)
SSAB Domex Tube							
S235JRH	2,0 - 12,5	235	360 - 510	360 - 510	24 [a]	- 40 [b]	27
S355J2H	2,0 - 12,5	355	510 - 680	470 - 630	20 [a]	- 40 [c]	27

SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät ja ylittävät tuotestandardin EN 10219 vaatimukset.
SSAB testaa rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet pitkittäisillä koesauvoilla. Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet testataan poikkileikkauksen pidemmältä sivulta.

a) Rakenneputkien, joiden $d/t < 15$ (pyöreä) tai $(b+h)/2t < 12{,}5$ (neliö ja suorakaide), murtovenymän vähimmäisvaatimus on 2 %-yks. pienempi.
b) SSAB:n takaama arvo (EN 10219:n vaatimus on testauslämpötilalle +20 ºC)
c) SSAB:n takaama arvo (EN 10219:n vaatimus on testauslämpötilalle -20 ºC).
d) Iskuenergia EN ISO 148-1 mukaisella 10 x 10 mm^2 V-lovisauvalla. Iskusitkeyden testaus suoritetaan EN ISO 148-1 mukaisesti ainepaksuuksilla $\ge$ 6 mm.

Taulukko 1.6 Hienoraeteräksistä valmistetut SSAB Domex Tube rakenneputket. Mekaaniset ominaisuudet

Teräslaji EN 10219	Seinämänpaksuus t	R_{eH} vähintään	R_m	A_5 vähintään	Iskusitkeys testaus-lämpötila	Iskuenergia vähintään [c]
	(mm)	(N/mm^2)	(N/mm^2)	(%)	(ºC)	(J)
SSAB Domex Tube						
S460MH	2,0 - 12,5	460	530 - 720	17 [a]	- 40 [b]	27 [b]

SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät ja ylittävät tuotestandardin EN 10219 vaatimukset.
SSAB testaa rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet pitkittäisillä koesauvoilla. Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien mekaaniset ominaisuudet testataan poikkileikkauksen pidemmältä sivulta.

a) Rakenneputkien, joiden $d/t < 15$ (pyöreä) tai $(b+h)/t < 25$ (neliö ja suorakaide), murtovenymän vähimmäisvaatimus on 2 %-yks. pienempi.
b) SSAB:n takaama arvo iskusitkeydelle 27 J / -40 ºC vastaa arvoa 40 J / -30 ºC (ks. EN 1993-1-10), mikä ylittää EN 10219 iskusitkeysvaatimuksen 40 J / -20 ºC.
c) Iskuenergia EN ISO 148-1 mukaisella 10 x 10 mm^2 V-lovisauvalla. Iskusitkeyden testaus suoritetaan EN ISO 148-1 mukaisesti ainepaksuuksilla $\ge$ 6 mm.

Edellä esitettyjen teräslajien lisäksi SSAB valmistaa kylmämuovattuja rakenneputkia myös muista teräslajeista, kuten Strenx Tube 700MH-960MH ja SSAB Weathering Tube 355WH-500WH rakenneputket. Näiden soveltuvuus Eurocode 3:n (EN 1993) mukaiseen rakenteelliseen käyttöön on selvitettävä tapauskohtaisesti. Näiden teräslajien mekaaniset ominaisuudet, kemiallinen koostumus, suunnitteluohjeet sekä mitta-alueet on esitettty verkkosivuilla [www.ssab.com].

1.6.2 Eurocoden materiaalivaatimukset lujuusluokille S235-S460 ja materiaalien nimelliset lujuudet

Eurocode edellyttää että käytettävällä teräsmateriaalilla tulee olla riittävä sitkeys. Terästen sitkeysvaatimukset ilmaistaan antamalla rajat seuraaville suureille:

- vetomurtolujuuden f_u ja myötölujuuden f_y minimiarvojen suhde
- mittapituutta $L_o = 5{,}65\sqrt{A_o}$ vastaavan murtovenymän minimiarvo
- kokonaistasavenymän ε_u minimiarvo

Vähimmäisvaatimukset edellä mainituille suureille voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvot ovat lujuusluokkien S235-S460 teräksille [3,4,5]:

- $f_u / f_y \geq 1{,}10$
- murtovenymä mittapituudella $L_o = 5{,}65\sqrt{A_o}$ vähintään 15 %
  (tai murtovenymä A_5 vähintään 15 %)
- $\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y$, missä ε_y on myötövenymä ($\varepsilon_y = f_y/E$)

> *Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:*
>
> *Käytetään Eurocoden suositusarvoja ellei EN 1993:n jossakin osassa tai EN 1993:n jonkin osan kansallisessa liitteessä toisin esitetä.*

Lujuusluokkien S235-S460 teräksillä on tällöin riittävä sitkeys ja muodonmuutoskyky, jotta ne materiaaliominaisuuksiensa puolesta soveltuvat kimmoteorian lisäksi myös plastisuusteorian mukaiseen mitoitukseen:

- kestävyyksien laskenta voidaan suorittaa plastisuusteorian mukaan kun sauvan poikkileikkaus täyttää poikkileikkausluokan 1 tai 2 vaatimukset

- voimasuureiden laskenta voidaan suorittaa käyttäen plastisuusteorian mukaista analyysia rakenteiden tai sen osien kokonaistarkastelussa kun sauvan poikkileikkaus täyttää poikkileikkausluokan 1 vaatimukset.

Eurocoden osassa EN 1993-1-1 todetaan standardin EN 10219 mukaisten kylmämuovattujen rakenneputkien täyttävän käytettäviltä materiaaleilta vaadittavat ominaisuudet [3,4,5].

> *Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:*
>
> *Lisäksi voidaan käyttää niitä teräslajeja, joille on voimassa oleva tuotehyväksyntä.*
>
> *Kirjoittajan kommentti:*
> *Suomessa tuotehyväksynnän eräs muoto on Varmennettu Käyttöseloste. Teräsrakenneyhdistys ylläpitää ajantasaista luetteloa teräsrakentamiseen hyväksytyistä voimassa olevista Varmennetuista Käyttöselosteista. Luettelo ja pdf-muotoiset dokumentit on esitetty TRY:n verkkosivuilla [www.terasrakenneyhdistys.fi]*

Tutkimuksissa on osoitettu, että kylmämuovattujen EN 10219 mukaisten rakenneputkien materiaalin sitkeys on riittävä myös plastiseen mitoitukseen, jolloin mitoittavaksi muodostuu käytännössä materiaalin sitkeyden sijasta rakenneosan poikkileikkausluokasta riippuva geometrinen muodonmuutoskyky [7]. Samalla on todettu, että kylmämuovattujen ja kuuma-

muovattujen rakenneputkien välillä ei ole olennaista eroa momentti-kiertymä -yhteyden muodossa tai käytettävissä olevassa plastisen kiertymäkyvyn määrässä [7].

Materiaaliominaisuuksien nimellisarvoja käytetään ominaisarvoina laskelmissa. Rakenneputkien myötölujuuden f_y ja murtolujuuden f_u nimellisarvot valitaan seuraavasti [3,4,5]:

a) joko käyttämällä suoraan tuotestandardissa (EN 10219) määritettyjä arvoja $f_y = R_{eH}$ ja $f_u = R_m$

b) tai käyttämällä Eurocodessa (EN 1993-1-1) esitettyjä taulukon 1.7 mukaisia yksinkertaistettuja nimellisarvoja

Menetelmän valinta voidaan esittää kansallisessa liitteessä.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:
Voidaan käyttää molempia vaihtoehtoja.

Tämän käsikirjan laskuesimerkeissä on käytetty lujuusluokkien S235 - S460 rakenneputkille Eurocoden mukaisia taulukossa 1.7 esitettyjä arvoja. Eri teräslajien nimikkeitä on taulukossa yhdistetty ja lyhennetty soveltuvin osin.

Käytettävällä materiaalilla tulee olla myös riittävä murtumissitkeys vedettyjen osien hauraan murtumisen välttämiseksi alhaisimmassa käyttölämpötilassa, jonka odotetaan esiintyvän rakenteen suunnitellun käyttöiän aikana. Rakenteelliset yksityiskohdat saattavat puolestaan aiheuttaa riskin lamellirepeilylle, joka voidaan välttää edellyttämällä materiaalilta parannettuja paksuussuuntaisia ominaisuuksia. Materiaalinvalintaa haurasmurtuman ja lamellirepeilyn kannalta käsitellään luvussa 5.

Taulukko 1.7 Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt standardin EN 10219 mukaisten kylmämuovattujen rakenneputkien myötölujuuden ja vetomurtolujuuden nimellisarvot lujuusluokissa S235 - S460 [3,4,5]

Standardi ja teräslaji	Seinämänpaksuus $t \leq 40$ mm	
EN 10219-1	f_y (N/mm^2)	f_u (N/mm^2)
S235 H	235	360
S275 H	275	430
S355 H	355	510
S275 NH/NLH	275	370
S355 NH/NLH	355	470
S460 NH/NLH	460	550
S275 MH/MLH	275	360
S355 MH/MLH	355	470
S420 MH/MLH	420	500
S460 MH/MLH	460	530

Tämän taulukon arvot ovat Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt yksinkertaistetut arvot, joita on käytetty tämän käsikirjan laskuesimerkeissä. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

1.6.3 Materiaalivakioiden mitoitusarvot

Rakenneputkille käytetään laskelmissa materiaalivakioina seuraavia arvoja normaalilämpötilamitoituksessa [3,4,5]:

- kimmokerroin $E = 210\,000\ N/mm^2$
- liukukerroin $G = \frac{E}{2(1+\nu)} \approx 81\,000\ N/mm^2$
- Poissonin luku kimmoisella alueella $\nu = 0{,}3$
- lineaarinen lämpölaajeneminen $\alpha = 12 \cdot 10^{-6}/°C$ (kun $T \leq 100\ °C$)
- tiheys $\rho = 7850\ kg/m^3$

1.7 Ainestodistus

Rakenneputket toimitetaan standardin EN 10204 mukaisella ainestodistuksella sopimuksen mukaan. Ainestodistuksessa ilmoitetaan sulatusanalyysi standardin EN 10219 option 1.2 mukaisesti. Yleensä käytetään vastaanottotodistusta EN 10204-3.1 ellei muuta sovita. Vastaanottotodistus EN 10204-3.1 on riittävä täyttämään myös teräsrakenteiden toteutusstandardissa EN 1090-2 esitetyt vaatimukset (taulukko 1.8).

Taulukko 1.8 Ainestodistustyypin määräytyminen standardien EN 1090-2 ja EN 10025-1 mukaisesti [9,10]

Standardi	Ainestodistus
EN 1090-2:	
Rakenneteräkset (myös rakenneputket)	EN 10025-1: taulukon B.1 mukaan [a]
Hitsausaineet	2.2
Ruuvikokoonpanot	2.1 [b]
a) Rakenneteräksille S355 JR tai J0 vaaditaan kuitenkin ainestodistus 3.1 toteutusluokissa EXC2, EXC3 ja EXC4. b) Jos vaaditaan todistustyyppi 3.1, tämä voidaan korvata valmistuserän tunnuksella	
EN 10025-1:	
Kun ohuimman paksuusalueen myötölujuusvaatimus on $\leq 355\ N/mm^2$ ja iskuenergia testataan lämpötilassa 0 °C tai 20 °C	2.2
Kun ohuimman paksuusalueen myötölujuusvaatimus on $\leq 355\ N/mm^2$ ja iskuenergia testataan lämpötilassa alle 0 °C	3.1 tai 3.2
Kun ohuimman paksuusalueen myötölujuusvaatimus on $> 355\ N/mm^2$	3.1 tai 3.2

1.8 Pituus

Rakenneputkien vakiopituudet ovat 6 ja 12 metriä, sekä isojen neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien (alkaen mitoista 100×100 / 120×80 mm) myös 18 metriä. Erikseen sovittaessa neliön ja suorakaiteen muotoisia rakenneputkia voidaan toimittaa määräpituuksina koosta riippuen 12 tai 24 metriin saakka ja pyöreitä rakenneputkia koosta riippuen 12 tai 16 metriin saakka.

SSAB tarjoaa myös erilaisia katkaisupalveluita. Putket voidaan vannesahata asiakkaan haluamiin mittoihin sekä laserleikata. Laserleikkaus on suositeltavaa silloin, kun tarvitaan esimerkiksi viisteytystä tai putken pään muotoonleikkausta. 3D-laserin mahdollistama valmiiseen muotoon leikkaaminen on hyödyllistä erityisesti pyöreiden rakenneputkien liitoksissa. Aihetta käsitellään laajemmin luvussa 8.

1.9 Pinnansuojaus

Rakenneputket toimitetaan sopimuksen mukaan joko ilman pinnansuojausta (toimitustila 'kuiva') tai kevytöljyttynä. Sopimuksen mukaan rakenneputkia toimitetaan myös suihkupuhdistettuna ja suojamaalattuina.

1.10 Tunnistettavuus

SSAB:n pituussaumahitsatut rakenneputket merkitään jatkuvalla mustesuihkukirjoituksella, josta ilmenevät seuraavat tiedot:

- SSAB:n tunniste
- rakenneputken mitat
- tunnistenumero, jolla varmistetaan valmiiden rakenneputkien jäljitettävyys valmistus- ja raaka-ainetietoihin.

1.11 Rakenneputkien pintakäsittely

1.11.1 Maalattavuus

Maalattavien metallipintojen on oltava mahdollisimman tasaisia ja pyöreänurkkaisia. Rakenneputket soveltuvat tässä suhteessa erinomaisesti myös ruiskumaalaukseen, koska ne ovat luonnostaan pyöreänurkkaisia. Rakenneputkien ulkoinen pinnansuojaus on halvempaa kuin vastaavien avoprofiilien johtuen rakenneputken suljetusta muodosta. Putkien maalauspinta-ala (eli ulkopuolinen pinta-ala A_u) on esitetty liitteen 11.1 taulukoissa.

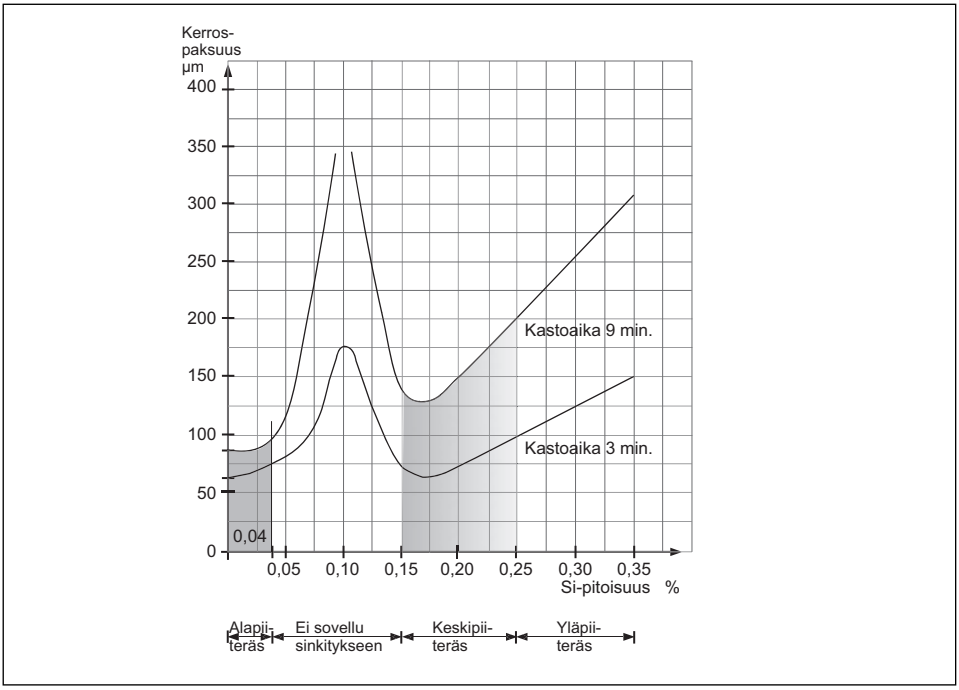
Maalauskäsittely tehdään kuivalle ja puhtaalle pinnalle maalinvalmistajan ohjeiden mukaisesti. Suositeltavia pinnan esikäsittelymenetelmiä ja maaliyhdistelmiä on esitetty standardissa EN ISO 12944. Maalausta käsitellään laajemmin luvussa 9.

1.11.2 Kuumasinkittävyys

Kuumasinkittävyyden varmistamiseksi SSAB Domex Tube Double Grade rakenneputkille taataan piipitoisuus 0,15...0,25 % Si, mikä vastaa levyterässtandardin EN 10025-2 kuumasinkittävyysluokkaa 3 ja kuumasinkitysstandardin EN ISO 14713-2 luokkaa B. Tällä piipitoisuudella saavutetaan useimpiin käyttökohteisiin riittävä yli 100 µm paksuinen sinkkikerros, kun käytetään asianmukaista kuumasinkitystä (kuva 1.4).

Muiden teräslajien piipitoisuus on teräslajikohtainen. Joillakin teräslajeilla pii- ja fosforipitoisuus on Si+P $\leq$0,04 %, jolloin asianmukaisessa kuumasinkityksessä tuotteeseen voidaan saavuttaa ohut sinkkikerros (alle 100 µm). Tällöin sinkityksen pinnanlaatu on tasaisempi ja kiiltävämpi

kuin piipitoisuudella 0,15...0,25 %. Vaatimus teräksen pii- ja fosforipitoisuudesta sovitaan kyselyn ja tilauksen yhteydessä. Kuumasinkitystä käsitellään laajemmin luvussa 9.



Kuva 1.4 Kuumasinkitys. Teräksen Si-pitoisuuden vaikutus sinkkipinnoitteen kerrospaksuuteen. Kun piipitoisuus on kuvion varjostetulla alueella, sinkkikerroksen paksuus ja tarttuvuus ovat hyvin hallittavissa, mikä kuitenkin edellyttää asianmukaista sinkitysmenetelmää

1.12 Hitsattavuus

Taulukoissa 1.3 - 1.6 esitetyistä teräslajeista valmistetut SSAB Domex Tube rakenneputket ovat hyvin hitsattavia kaikilla yleisillä hitsausmenetelmillä. Työlämpötilaa ei normaaleissa konepajaolosuhteissa tarvitse korottaa rakenneputkilla kyseeseen tulevilla ainepaksuuksilla.

Teräksen hitsattavuutta arvioidaan yleensä teräksen kemiallisen koostumuksen perusteella lasketun hiiliekvivalentin (CEV) avulla. Mitä pienempi hiiliekvivalentti, sitä paremmin teräs on hitsattavaa. Yleisin hiiliekvivalentin kaava on IIW:n (International Institute of Welding) kaava:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Cu + Ni}{15} \qquad (1.1)$$

Teräs on kylmähalkeilualttiuden kannalta hyvin hitsattavaa tavallisilla menetelmillä, kun CEV-arvo on alle 0,41. SSAB:n rakenneputkien vakioteräslajilla SSAB Domex Tube Double Grade hiiliekvivalentin arvo on taulukon 1.3 mukaisesti enintään 0,39.

SSAB:n kylmämuovatut SSAB Domex Tube rakenneputket ovat hyvin hitsattavia myös nurkan alueella. Kylmämuovatun rakenneputken nurkan hitsaamiselle on esitetty ohjeita ja vaatimuksia Eurocoden osassa EN 1993-1-8. SSAB:n kylmämuovatut SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät kyseiset vaatimukset, joten niiden nurkkaa voidaan hitsata ilman erityistoimenpiteitä (ks. tarkemmin luku 3, taulukko 3.7).

1.13 CE-merkintä ja vaatimustenmukaisuuden osoittaminen

1.13.1 Rakennustuotedirektiivi ja uusi Rakennustuoteasetus

Direktiivit ovat Euroopan unionin voimaan saattamia, jäsenvaltioille tarkoitettuja lainsäädäntöohjeita. Ne eivät ole yleensä suoraan sellaisenaan jäsenvaltiossa voimassa olevaa lainsäädäntöä, vaan direktiivien valmistuttua niiden sisältö tulee sisällyttää (implementoida) kunkin jäsenmaan kansalliseen lainsäädäntöön määrätyn ajan kuluessa [12].

Toisin kuin direktiivi, Euroopan unionin asetus on voimaan tullessaan suoraan kussakin jäsenmaassa voimassa oleva säädös, jota on noudatettava. Sitä ei siis implementoida kansallisesti osaksi kunkin maan lainsäädäntöä. Asetuksen voimaan tullessa on kuitenkin kunkin maan kansallisia säädöksiä muutettava tarpeen mukaan siten, etteivät ne ole ristiriidassa EU:n asetuksen kanssa [12].

Rakennustuotedirektiivi

Rakennustuotedirektiivi 89/106/ETY (CPD, Construction Products Directive 89/106/EEC) on niin sanottu uuden lähestymistavan (New Approach) direktiivi, joka mahdollistaa tuotteiden CE-merkinnän.

CE-merkittyjä rakennustuotteita voidaan markkinoida ja käyttää ilman kaupan teknisiä esteitä kaikkien Euroopan talousalueen maiden markkinoilla. Direktiivin tavoitteena on muodostaa yhtenäiset, koko Euroopan talousalueen laajuiset sisämarkkinat ilman kansallisia kaupan teknisiä esteitä.

Rakennustuotteiden CE-merkintää ei voida liittää tuotteeseen suoraan direktiiviin perustuen, vaan CE-merkinnän käytön edellytyksenä on joko tuoteryhmäkohtainen harmonisoitu tuotestandardi, tai valmistaja- ja tuotekohtainen Eurooppalainen tekninen hyväksyntä. Voidakseen CE-merkitä tuotteen on valmistajan noudatettava harmonisoitua tuotestandardia (hEN) tai Eurooppalaista teknistä hyväksyntää (ETA, European Technical Approval).

Suurimmassa osassa EU:n jäsenmaita rakennustuotteiden CE-merkintä on säädetty pakolliseksi niille tuotteille, joilla on harmonisoitu tuotestandardi, jonka siirtymäaika on kulunut umpeen. Joissain jäsenmaissa (Suomi, Ruotsi, Iso-Britannia ja Irlanti sekä Euroopan talousalueen maista myös Norja) CE-merkintä ei ole pakollinen, ellei sitä ole tuoteryhmäkohtaisesti pakolliseksi säädetty [12].

Uusi Rakennustuoteasetus

Ensimmäiset Eurooppalaisen teknisen hyväksynnän perusteella CE-merkityt rakennustuotteet tulivat markkinoille vuonna 2000, ja ensimmäiset harmonisoidun tuotestandardin perusteella CE-merkityt tuotteet vuonna 2001.

Järjestelmän laajennuttua kattamaan jo satoja tuoteryhmiä, on voitu todeta että Rakennustuotedirektiiviin perustuvan CE-merkintäjärjestelmän käyttöönotto koko Euroopan talousalueen laajuisesti on osoittautunut epäyhtenäiseksi. Epäyhtenäisyyttä on ilmennyt mm. CE-merkinnän käytön pakollisuudessa, kansallisista päällekkäisistä tuotehyväksyntämenettelyistä luopumisessa, ilmoitettujen laitosten pätevyyksien määrittämisessä ja toiminnassa, sekä rakennustuotteiden markkinavalvonnassa. Epäyhtenäiset toimintatavat ovat johtaneet siihen, ettei Rakennustuotedirektiivin mukaisella CE-merkintäjärjestelmällä olla täysin saavutettu EU:n sille asettamia tavoitteita.

Edellä mainittujen ongelmien poistamiseksi on Euroopan komissio laatinut esityksen Rakennustuoteasetukseksi, joka voimaan tullessaan korvaa entisen Rakennustuotedirektiivin.

Rakennustuoteasetus (CPR, Construction Product Regulation) on valmistunut ja julkaistu päivämäärällä 9.3.2011 (Regulation (EU) No 305/2011). Asetus astuu voimaan kaksivaiheisesti:

- 24.4.2011: Rakennustuoteasetus astuu voimaan tietyiltä osin
- 1.7.2013: Rakennustuoteasetus astuu voimaan kaikilta osin.

Parhaillaan käynnissä olevasta ylimenokaudesta ja siihen liittyvistä erinäisistä vielä avoimista kansallisista seuraamuksista ja tulkinnoista johtuen, CE-merkintää koskevia yleisiä asioita ja viittauksia käsitellään jäljempänä yksinkertaisuuden vuoksi vielä Rakennustuotedirektiiviin perustuen. Rakennustuoteasetuksen osalta todettakoon tässä kuitenkin, että sen voimaan tulon myötä valmistajan on laadittava aikaisemman vaatimustenmukaisuusvakuutuksen (DoC, Declaration of Conformity) sijasta suoritustasoilmoitus (DoP, Declaration of Performance), jossa tulee esittää samat asiat ja tuoteominaisuudet jotka seuraavilla sivuilla on kuvattu entisen Rakennustuotedirektiivin mukaisesti koskien vaatimustenmukaisuusvakuutusta ja CE-merkintää. Rakenneputkia ja rakenneputkirakenteita koskevat tuoteryhmäkohtaiset vaatimukset perustuvat voimassa oleviin harmonisoituihin tuotestandardeihin EN 10219-1 ja EN 1090-1.

1.13.2 Rakennustuotteiden CE-merkinnän yleiset vaatimukset

Rakenneputkia koskee tuotestandardi EN 10219 [1,2]. Rakennustuotteena käytettäviä kantavia rakenneputkirakenteita puolestaan koskee kantavien rakenteiden tuotestandardi EN 1090 [8,9]. Kummankin em. standardin ensimmäinen osa on ns. harmonisoitu standardi joka sisältää liitteen ZA (Annex ZA), mikä tarkoittaa että siinä määritellään mm. kyseessä olevien tuotteiden CE-merkintään liittyvät asiat ja CE-merkinnässä esitettävät tuoteominaisuudet.

EN-Eurocoden lähtökohtana on, että teräsrakenteiden osalta suunnitteluohjeet ja varmuustasot pätevät rakenteille jotka toteutetaan nimenomaan standardin EN 1090 mukaisesti.

Rakennustuotedirektiivin 89/106/ETY (CPD, Construction Products Directive 89/106/EEC) mukaan CE-merkintä edellytetään EU:n sisämarkkinoilla niiltä rakennustuotteilta, jotka on ilmoitettu Euroopan unionin virallisessa lehdessä (OJ, Official Journal), ja joita koskevan harmonisoidun tuotestandardin CE-merkinnän siirtymäaika on päättynyt.

Muista jäsenvaltioista poiketen Suomessa, Ruotsissa, Englannissa ja Irlannissa CE-merkintä on toistaiseksi lainsäädännön perusteella lähtökohtaisesti vapaaehtoinen tuotehyväksyntämenettely. CE-merkintä muuttuu pakolliseksi myös näissä maissa viimeistään Rakennustuoteasetuksen (CPR) myötä.

Rakennustuotedirektiivin keskeisenä tavoitteena on poistaa kaupan tekniset esteet, jotka aiheutuvat jäsenvaltioiden rakennustuotteille asettamista toisistaan poikkeavista kansallisista vaatimuksista. Harmonisoiduissa tuotestandardeissa ja Eurooppalaisissa teknisissä hyväksynnöissä yhdenmukaistetaan (harmonisoidaan) sekä tuotteesta osoitettavat ominaisuudet että menetelmät näiden ominaisuuksien osoittamiseksi. Näin poistuvat kansallisten viranomaisvaatimusten erilaisista tuotevaatimuksista aiheutuvat kaupan tekniset esteet. CE-merkityn tuotteen käyttäjältä ei voida kansallisiin säännöksiin vedoten vaatia esim. uutta testausta tai tuotteen saattamista muun kansallisen hyväksyntämenettelyn kohteeksi. Näin ollen esimerkiksi Suomessa suoritettu vaatimustenmukaisuuden osoittaminen riittää tuotteen markkinoille saattamiseen koko Euroopan talousalueella [11].

CE-merkintää koskevia säännöksiä sovelletaan yhtälailla yksinomaan kotimarkkinoille tarkoitettuihin rakennustuotteisiin, Euroopan talousalueelle vietäviin tuotteisiin kuin myös Suomeen maahantuotuihin tuotteisiin.

CE-merkintä ei ole alkuperämerkintä, eikä se osoita että tuote on valmistettu Euroopan talousalueella. CE-merkinnän kiinnittää rakennustuotteeseen valmistaja tai sen valtuuttama edustaja. Kiinnittämällä CE-merkinnän valmistaja vakuuttaa, että tuote on sitä koskevan Eurooppalaisen harmonisoidun tuotestandardin tai tuotteelle annetun Eurooppalaisen teknisen hyväksynnän (ETA, European Technical Approval) mukainen. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että:

- valmistaja on tuotteen valmistuksessa noudattanut kyseistä asiakirjaa
- valmistaja on huolehtinut tehtaan laadunvalvonnasta sekä tarvittavista testauksista siten kuin edellytetään
- valmistajasta riippumaton ilmoitettu laitos eli Notified Body (testauslaboratorio, tarkastuslaitos tai varmentamiselin) on suorittanut sille kuuluvat tehtävät, jos niitä ko. tuotteen osalta edellytetään.

CE-merkittyjen rakennustuotteiden vaatimustenmukaisuudesta vastaa tuotteen markkinoille saattaja. Ensisijaisesti tämä tarkoittaa tuotteen valmistajaa. Jos kyseessä ei ole kotimainen tuote, maahantuoja vastaa tuotteen vaatimustenmukaisuudesta Suomen markkinoilla riippumatta siitä, onko tuote valmistettu jossain Euroopan talousalueen maassa vai sen ulkopuolella [11].

Rakennustuotteiden markkinavalvonnan tehtävänä on huolehtia, että Euroopan talousalueen markkinoilla on vain sellaisia CE-merkinnällä varustettuja rakennustuotteita, jotka täyttävät niille asetetut vaatimukset. Suomessa Turvatekniikan keskus (TUKES) toimii ympäristöministeriön valtuuttamana CE-merkittyjen rakennustuotteiden markkinavalvojana. Valvonta kohdistuu Suomessa markkinoille saatettuihin tuotteisiin riippumatta siitä, onko ne valmistettu Suomessa, jossain toisessa Euroopan talousalueen maassa vai talousalueen ulkopuolella.

CE-merkinnän yhteydessä ei ole aina tarpeen osoittaa kaikkia harmonisoituja ominaisuuksia. Siltä osin kuin jäsenmaissa ei aseteta tuotteen tietylle ominaisuudelle vaatimuksia tietyssä käyttötarkoituksessa, ei valmistajaltakaan edellytetä kyseisten vaatimusten täyttymisen osoittamista kyseisessä jäsenmaassa. CE-merkinnässä käytetään tällöin kyseisen ominaisuuden kohdalla merkintää NPD, No Performance Determined. Merkintää NPD voidaan myös käyttää harmonisoidussa standardissa esitetyn mukaisesti tietyn ominaisuuden kohdalla osoittamaan, että ko. ominaisuus ei ole olennainen ko. tuotteelle. (Merkintää ei pidä sekoittaa Eurocodessa käytettyyn merkintään NDP, Nationally Determined Parameter, jota käytetään kansallisesti määrättävien arvojen yleisnimityksenä.)

Kukin jäsenmaa päättää kansallisista lähtökohdistaan omalta kohdaltaan, vaaditaanko tuotteelta kaikki harmonisoidussa standardissa tai teknisessä hyväksynnässä määritellyt ominaisuudet vai vain osa niistä. Muita tai poikkeavia tuotekohtaisia vaatimuksia ei kuitenkaan voida viranomaisten toimesta esittää [11].

Rakennuksille ja rakennusosille asetettavat vaatimustasot päätetään edelleen kansallisella tasolla ja tuotteen kelpoisuutta aiottuun käyttöönsä arvioidaan aina näiden vaatimusten pohjalta. Koska eri maiden kansallisissa säädöksissä on voimassa ilmastosta ja maantieteellisistä seikoista johtuvia erityisvaatimuksia ja luokituksia, on tuotetta käytettäessä aina tarkistettava kyseisten vaatimusten täyttyminen. Suomessa ja muissa Pohjoismaissa tyypillinen tähän luokkaan kuuluva vaatimus on pakkasenkestävyys. Näin ollen Eurooppalaisen harmonisoidun standardin tai teknisen hyväksynnän mukaista CE-merkinnällä varustettua tuotetta ei välttämättä voida käyttää samaan tarkoitukseen kaikissa Euroopan talousalueen maissa [11].

Vaatimustenmukaisuuden osoittaminen (Attestation of Conformity, AoC tai AC) tarkoittaa niitä menettelyjä, joilla osoitetaan tuotteen valmistuksen, tuotteen ominaisuuksien ja niiden valvonnan vastaavuus harmonisoidussa standardissa tai Eurooppalaisessa teknisessä hyväksynnässä esitettyihin vaatimuksiin nähden.

Lisäksi useimmiten tarvitaan, siinä laajuudessa kuin kyseisen tuotteen vaatimustenmukaisuuden osoittamismenettely edellyttää, kolmannen osapuolen suorittamaa varmentamista, tarkastusta ja testausta. Kolmantena osapuolena voi toimia vain kyseiselle tuoteryhmälle päteväksi todettu riippumaton ilmoitettu laitos (NB, Notified Body). Tällaisia laitoksia voi olla kullekin tuoteryhmälle useita, ja valmistaja voi vapaasti valita minkä ilmoitetun laitoksen kanssa tekee valvontasopimuksen. Valmistaja voi käyttää missä tahansa Euroopan talousalueen maassa sijaitsevaa ilmoitettua laitosta [11]. Ajantasaiset luettelot päteviksi todetuista Rakennustuotedirektiivin alaisista ilmoitetuista laitoksista on esitetty standardikohtaisesti Euroopan komission verkkosivuilla (hakusana: NANDO).

Taulukko 1.9 Vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa käytettävät menettelyvaihtoehdot ja eri osapuolten tehtävät [11]

Vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa käytettävät menettelyt								
KONTROLLIKEINOT	**1+**	**1**	**2+**		**2**		**3**	**4**
Tuotteen tyyppitestaus	❑	❑	❍	❍	❍	❍	❑	❍
Tehtaalta otettujen näytteiden testaus	❍	❍	❍		❍			
Tehtaalta, markkinoilta tai rakennuspaikalta otettujen pistokoenäytteiden testaus	❑							
Tehtaan sisäinen laadunvalvonta	❍	❍	❍	❍	❍	❍	❍	❍
Tehtaan ja sen sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastus	❑	❑	❑	❑	❑	❑		
Tehtaan sisäisen laadunvalvonnan jatkuva valvonta, arviointi ja hyväksyminen	❑	❑	❑	❑				
❍ = valmistaja ❑ = arviointilaitos (ns. ilmoitettu laitos)								

Vaatimustenmukaisuuden osoittamisessa käytettävät menettelyvaihtoehdot on esitetty taulukossa 1.9. EN 1090-1 määrittelee kantavien teräsrakenteiden AC-luokaksi 2+ mikä merkitsee mm. kolmannen osapuolen suorittamaa tehtaan sisäisen laadunvalvonnan alkutarkastusta ja jatkuvaa valvontaa [8].

Vaatimustenmukaisuuden arvioinnilla tarkoitetaan sekä valmistajan suorittamia tuotannon jatkuvaan laadunvalvontaan liittyviä toimenpiteitä (näytteiden otto, testaustiheys, tulosten analysointi), että ilmoitetun laitoksen vastaavia toimenpiteitä (esim. alkutestaus, tehtaan laadunvalvonnan alkutarkastus sekä jatkuva valvonta).

Vaatimustenmukaisuuden arviointiin liittyvät ohjeet on yleensä kirjoitettu harmonisoituun tuotestandardiin tai siinä viitattuun viitestandardiin. On huomattava, että harmonisoiduissa tuotestandardeissa ja Eurooppalaisissa teknisissä hyväksynnissä ei välttämättä vaadita kaikkia ominaisuuksia selvitettäväksi testaamalla. Testimenetelmän tilalla tai ohella standardissa voidaan esittää esimerkiksi taulukko, josta voidaan suoraan lukea CE-merkinnässä ko. tuotteelle käytettävä ominaisuuden lukuarvo, tai standardissa voidaan esittää laskentamenetelmä tai viitata laskentamenetelmään, jonka mukaan ominaisuus voidaan selvittää. Kantavien rakenteiden ja rakenneosien tapauksessa standardit viittaavat laskentamenetelmänä EN-Eurocodeen, tai standardeissa esitetään laskentamenetelmä joka pohjautuu Eurocodeen.

Kantavien teräsrakenteiden toteutusstandardi EN 1090-1 edellyttää [8], että silloin kun valmistaja ilmoittaa CE-merkinnässä myös tuotteen rakenteellisia kestävyysarvoja, vaatimustenmukaisuuden arvioinnin tulee kattaa myös ao. suunnittelutoiminnot (suunnittelua suorittava henkilöstö, käytössä olevat suunnittelun työkalut / ohjelmistot).

Kun ao. vaatimukset on täytetty ja ilmoitettu laitos on laatinut alla mainitun todistuksen, valmistajan tai valmistajan Euroopan talousalueelle sijoittautuneen edustajan tulee laatia ja pitää yllä **vaatimustenmukaisuusvakuutus**, joka oikeuttaa valmistajan kiinnittämään tuotteeseen CE-merkinnän. Vakuutuksessa tulee olla seuraavat tiedot [11]:

- valmistajan tai valmistajan Euroopan talousalueella toimivan valtuutetun edustajan nimi ja osoite sekä tuotantopaikka
- kokoonpanon kuvaus (esim. tyyppi, tunnistetiedot, käyttötarkoitus jne.) ja kopio CE-merkinnän yhteydessä esitettävistä tiedoista
- vaatimukset, jotka tuote täyttää (esim. ao. EN-standardin liite ZA)
- tuotteen käyttöä koskevat erityisehdot (esim. vaatimukset sen käytöstä tietyin ehdoin jne.)
- mukana olevan valmistajan sisäisen laadunvalvontatodistuksen numero
- sen henkilön nimi ja asema, jolla on oikeus allekirjoittaa vakuutus valmistajan tai valmistajan valtuutetun edustajan puolesta.

Vakuutuksen mukana tulee olla ilmoitetun laitoksen laatima todistus tehtaan sisäisestä laadunvalvonnasta. Todistuksen tulee sisältää edellä esitettyjen tietojen lisäksi seuraavat tiedot:

- ilmoitetun laitoksen nimi ja osoite
- valmistajan sisäisen laadunvalvontatodistuksen numero
- todistuksen mahdolliset kelpoisuusehdot ja voimassaoloaika
- sen henkilön nimi ja asema, jolla on oikeus allekirjoittaa todistus.

CE-merkityn rakennustuotteen valmistajan tai maahantuojan on pyydettäessä esitettävä viranomaiselle edellä selostettu vakuutus ja todistus sen jäsenvaltion virallisilla kielillä, jossa tuotetta on tarkoitus käyttää. Suomessa siis suomen tai ruotsin kielellä [11].

1.13.3 Rakenneputken CE-merkintä (EN 10219-1)

Standardin EN 10219 osa EN 10219-1 on harmonisoitu tuotestandardi. CE-merkinnän siirtymäaika on näiden tuotteiden osalta päättynyt 1.2.2008, joten Rakennustuotedirektiivin mukaan CE-merkintä on ao. terästuotteilla pakollinen (huom. eräiden maiden kuten Suomen poikkeava kanta edellä esitetyn mukaisesti). EN 10219 mukaisten rakenneputkien AC-luokka on 2+.

EN 10219 mukaisten rakenneputkien CE-merkinnässä putkitehtaan tulee esittää seuraavat tiedot [1]:

- ilmoitetun laitoksen tunnusnumero
- valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite
- merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa
- EY-vaatimustenmukaisuustodistuksen numero sekä tehtaan sisäisen laadunvalvonnan hyväksyneen ilmoitetun laitoksen nimi tai tunnusnumero
- viittaus ao. EN-standardiin (SFS-EN 10219-1).
- tuotteen nimike
- tarvittaessa “No performance determined” (NPD) eli ominaisuutta ei ole määritelty.

CE	*CE-vaatimustenmukaisuusmerkintä, joka muodostuu direktiivin 93/68/ETY mukaisesta “CE”-tunnuksesta.*
01234	*Ilmoitetun laitoksen tunnusnumero*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 06 01234-CPD-00234	*Valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite* *Merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa* *Todistuksen numero*
EN 10219-1:2006 Teräsrakentamisessa käytettävä kylmämuovattu teräsrakenneputki **Tuotenimike: S355J2H** **Vaarallinen aine: NPD** **Pitkäaikaiskestävyys: NPD (pinnoittamalla)**	*Eurooppalaisen standardin numero* *Kuvaus tuotteesta ja tiedot sen määräyksissä vaadittavista ominaisuuksista*

Kuva 1.5 Esimerkki EN 10219 mukaisen rakenneputken CE-merkinnästä [1]

1.13.4 Rakenneputkista valmistetun rakenneosan CE-merkintä (EN 1090-1)

Standardin EN 1090 osa EN 1090-1 on harmonisoitu tuotestandardi, jolle CE-merkinnän siirtymäajaksi on ilmoitettu poikkeuksellisesti normaalia pidempi aikaväli 1.1.2011 - 1.7.2014 (alunperin siirtymäajan piti olla 1.1.2011 - 1.7.2012, joka kuitenkin osoittautui riittämättömäksi tiettyjen käytännön ongelmien takia).

EN 1090 mukaisten kantavien rakenteiden AC-luokka on 2+.

Kantavan rakenneosan tai osarakenteen (esim. pilari tai kattoristikko) CE-merkinnässä tulee standardin EN 1090-1 mukaisesti aina esittää seuraavat tiedot [8]:

Perustiedot:

- varmentamiselimen (ilmoitetun laitoksen) tunnusnumero
- valmistajan nimi tai tunnusmerkki, ja rekisteröity osoite
- merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa
- EY:n tehtaan sisäisen laadunvalvontatodistuksen numero
- viittaus kyseiseen EN-standardiin (EN 1090-1)
- kokoonpanojen kuvaus:
  yleisnimi, materiaalit, mitat ja suunniteltu käyttötarkoitus
- tiedot tuotteen niistä ominaisuuksista jotka liittyvät valittuun CE-merkinnän merkitsemistapaan (Menetelmät 1 - 3). Menetelmät 1 - 3 on kuvattu jäljempänä.
- NPD (No Performance Determined eli ominaisuutta ei ole määritelty) kyseeseen tuleville ominaisuuksille
- standardin EN 1090-2 mukainen tuotteen toteutusluokka (EXC, Execution Class)
- viittaus kokoonpanoeritelmään

Standardi EN 1090-1 mahdollistaa eri menetelmiä CE-merkinnän suorittamiseksi. Menetelmät eroavat toisistaan CE-merkinnän sisällön, eli niiden tuotteelle ilmoitettavien ominaisuuksien osalta, jotka tulee ilmoittaa edellä esitettyjen perustietojen lisäksi. Valmistajan tulee tapauskohtaisesti valita kulloinkin tarkoituksenmukainen menetelmä [8].

Menetelmä 1:
Tuoteominaisuuksien ilmoittaminen materiaaliominaisuuksien ja geometristen tietojen perusteella:

Valmistaja ilmoittaa tiedot käytetyistä materiaaleista sekä tiedot tuotteen geometriasta, jotka tarvitaan tuotteen kestävyyden laskennallista määrittämistä varten. Edellisessä kohdassa jo esitettyjen perustietojen lisäksi tällöin tulee ilmoittaa myös seuraavat ominaisuudet [8]:

- geometriset tiedot (mittojen ja muodon toleranssit)
- hitsattavuus, jos tarpeen, muussa tapauksessa ilmoitetaan NPD
- käytetyn teräslajin iskusitkeyden vähimmäisarvon vaatimus
- palokäyttäytyminen:
  ilmoitetaan että materiaalit on luokiteltu luokkaan A1,
  tai;
  jos pinnoittoitteessa on orgaanista ainetta enemmän kuin 1 %,
  kyseeseen tuleva orgaanisen aineen perusteella määräytyvä
  standardin EN 13501-1 mukainen luokka
  (anodisointia tai sinkitystä ei tässä yhteydessä käsitellä pinnoitteena)
- kadmiumin ja sen yhdisteiden päästöt:
  ilmoitetaan NPD
- radioaktiivinen säteily:
  ilmoitetaan NPD
- säilyvyys:
  ilmoitetaan kokoonpanoeritelmän mukaisesti
- rakenteellinen kestävyys:
  ilmoitetaan NPD
- viittaus kokoonpanoeritelmään
- EXC-toteutusluokka

Kuvassa 1.6 on esitetty esimerkki Menetelmän 1 mukaisesta rakenneputkipilarin CE-merkinnästä.

Kokoonpanon tunnistamiseksi tulee käyttää yksilöivää merkkiä, jonka perusteella voidaan jäljittää kokoonpanoeritelmä ja valmistusta koskevat tiedot. Kuvan 1.6 esimerkissä ao. tunnistemerkintänä on ‘M 101’.

CE	*CE-vaatimustenmukaisuusmerkintä, joka muodostuu direktiivin 93/68/ETY mukaisesta "CE"-tunnuksesta.*
01234	*Ilmoitetun laitoksen tunnusnumero*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 11 01234-CPD-00234	*Valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite* *Merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa* *Todistuksen numero*
EN 1090-1:2006+A1:2011 Teräspilari - M 101 CFRHS - EN 10219 - S355J2H - 300x300x12,5 **Geometristen arvojen toleranssit: EN 1090-2.** **Hitsattavuus: Standardin EN 10219-1 mukainen teräs S355J2H.** **Iskusitkeys: 27 J lämpötilassa - 20 ºC.** **Palokäyttäytyminen: Materiaalin luokka A1.** **Kadmiumin päästöt: NPD.** **Radioaktiivinen säteily: NPD.** **Säilyvyys: Pinnan esikäsittely standardin EN 1090-2 mukaisesti, esikäsittelyaste P3. Pinta on maalattu standardin EN ISO 12944-5 mukaisesti, maalausjärjestelmä S.1.09.** **<u>Rakenteelliset ominaisuudet</u>:** **<u>Suunnittelu</u>: NPD.** **<u>Valmistus</u>: Kokoonpanoeritelmän CS-034/2006 ja standardin EN 1090-2 mukaisesti, toteutusluokka EXC2.**	*Eurooppalaisen standardin numero* *Kuvaus tuotteesta ja tiedot sen määräyksissä vaadittavista ominaisuuksista*

Kuva 1.6 Esimerkki Menetelmän 1 mukaisesta CE-merkinnästä [8]

Menetelmä 2:
Kokoonpanon lujuusarvon/arvojen ilmoittaminen:

Tätä menetelmää käytetään, kun valmistaja ilmoittaa ja vastaa myös tuotteen rakenteellista kestävyyttä koskevista ominaisuuksista määritettynä EN-Eurocoden mukaisesti [8].

Kokoonpanon ominaisuudet voidaan ilmoittaa kahdella tavalla [8]:
- vaihtoehto 2a:
  Eurocoden mukaisesti suunniteltu rakenne, jonka käyttökohde tiedetään, jolloin käyttökohde tulee ilmoittaa CE-merkinnässä
- vaihtoehto 2b:
  Eurocoden mukaisesti suunniteltu rakenne, jonka käyttökohdetta ei tiedetä (tuote valmistetaan ns. 'varastoon')

Edellä kohdissa *Perustiedot* ja *Menetelmä 1* esitettyjen tietojen lisäksi CE-merkinnässä tulee ilmoittaa kohdassa *Rakenteelliset ominaisuudet* myös tuotteen seuraavat kestävyystiedot määritettynä EN-Eurocoden mukaisesti:

- kantavuus
- siirtymä (taipuma) käyttörajatilassa
- väsymislujuus
- palonkestävyys
- viittaus mitoituslaskelmiin

Kestävyydet voidaan määrittää joko ominaisarvoina (kaikki) tai suunnitteluarvoina (kaikki). Mitoitus voi perustua Eurocodeen käyttäen kansallisille parametreille joko Eurocodessa esitettyjä suositusarvoja tai suunnitellun käyttömaan kansallisen liitteen mukaisia arvoja.

Käytännössä em. tietojen esittäminen tapahtuu viittaamalla CE-merkinnässä ao. EN-Eurocodeen ja ao. kokoonpanon yksilöityyn suunnitteludokumenttiin sekä ilmoittamalla onko suunnittelussa käytetty Eurocoden suositusarvoja vai jonkin jäsenmaan (minkä) kansallisen liitteen (National Annex) mukaisia NDP-arvoja.

Kuvassa 1.7 on esitetty esimerkki Menetelmän 2a mukaisesta kattoristikon CE-merkinnästä, jolloin tuote on valmistettu tiettyyn yksilöityyn rakennuskohteeseen.

Kokoonpanon tunnistamiseksi tulee käyttää yksilöivää merkkiä, jonka perusteella voidaan jäljittää kokoonpanoeritelmä ja valmistusta koskevat tiedot. Kuvan 1.7 esimerkissä ao. tunnistemerkintänä on 'M 102'.

CE	*CE-vaatimustenmukaisuusmerkintä, joka muodostuu direktiivin 93/68/ETY mukaisesta "CE"-tunnuksesta.*
01234	*Ilmoitetun laitoksen tunnusnumero*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 11 01234-CPD-00234	*Valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite* *Merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa* *Todistuksen numero*
EN 1090-1:2006+A1:2011 Teräksinen kattoristikko Berliinin kirjastoon - M 102 **Geometristen arvojen toleranssit: EN 1090-2.** **Hitsattavuus: Standardin EN 10219-1 mukainen teräs S355J2H.** **Iskusitkeys: 27 J lämpötilassa -20 ºC.** **Palokäyttäytyminen: Materiaalin luokka A1.** **Kadmiumin päästöt: NPD.** **Radioaktiivinen säteily: NPD.** **Säilyvyys: Pinnan esikäsittely standardin EN 1090-2 mukaisesti, esikäsittelyaste P3. Pinta on maalattu standardin EN ISO 12944 mukaisesti, maalausjärjestelmä S.1.09.** **Rakenteelliset ominaisuudet:** **Kantavuus: Mitoitus standardin EN 1993-1 mukaan, ks. liittyvä suunnitteluseloste ja mitoituslaskelmat. Käytetty Saksan NDP arvoja. Viite: DC 102/3.** **Siirtymä käyttörajatilassa: NPD** **Väsymislujuus: NPD.** **Palonkestävyys: Laskettu arvo: R30, ks. DC 102/3.** **Valmistus: Kokoonpanoeritelmän CS-016/2006 ja standardin EN 1090-2 mukaisesti, toteutusluokka EXC3.**	*Eurooppalaisen standardin numero* *Kuvaus tuotteesta ja tiedot sen määräyksissä vaadittavista ominaisuuksista*

Kuva 1.7 Esimerkki Menetelmän 2a mukaisesta CE-merkinnästä [8]

Menetelmä 3a:
Vaatimustenmukaisuusilmoitus valmistajalle annetun kokoonpanoeritelmän perusteella:

Tätä menetelmää käytetään silloin, kun kokoonpanon on suunnitellut joku muu kuin valmistaja, joten suunnitteluprosessi ja rakenteelliset laskelmat eivät tällöin sisälly CE-merkinnän piiriin.

Valmistusta koskevat vaatimukset on yksilöity kokoonpanoeritelmässä, joka perustuu kokoonpanon suunnittelutietoihin. Kokoonpanoeritelmän on laatinut ostaja yksin tai yhteistyössä valmistajan kanssa [8].

Edellä kohdissa *Perustiedot* ja *Menetelmä 1* esitettyjen tietojen lisäksi CE-merkinnässä tulee ilmoittaa kohdassa *Rakenteelliset ominaisuudet* myös seuraavat tiedot:

- viittaus toisten (ostaja) suorittamaan suunnitteluun

Kuvassa 1.8 on esitetty esimerkki Menetelmän 3a mukaisesta CE-merkinnästä.

Kokoonpanon tunnistamiseksi tulee käyttää yksilöivää merkkiä, jonka perusteella voidaan jäljittää kokoonpanoeritelmä ja valmistusta koskevat tiedot. Kuvan 1.8 esimerkissä ao. tunnistemerkintänä on ‘M 103’.

CE	*CE-vaatimustenmukaisuusmerkintä, joka muodostuu direktiivin 93/68/ETY mukaisesta "CE"-tunnuksesta.*
01234	*Ilmoitetun laitoksen tunnusnumero*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 11 01234-CPD-00234	*Valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite* *Merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa* *Todistuksen numero*
EN 1090-1:2006+A1:2011 Teräspilari Luxemburgin Kansallisteatteriin - M 103 CFRHS - EN 10219 - S355J2H - 300x300x12,5 **Geometristen arvojen toleranssit: EN 1090-2.** **Hitsattavuus: Standardin EN 10219-1 mukainen teräs S355J2H.** **Iskusitkeys: 27 J lämpötilassa -20 ºC.** **Palokäyttäytyminen: Materiaalin luokka A1.** **Kadmiumin päästöt: NPD.** **Radioaktiivinen säteily: NPD.** **Säilyvyys: Pinnan esikäsittely standardin EN 1090-2 mukaisesti, esikäsittelyaste P3. Pinta on maalattu standardin EN ISO 12944 mukaisesti, maalausjärjestelmä S.1.09.** **Rakenteelliset ominaisuudet: Suunnittelu: Asiakkaan toimittama, asiakirja Viite no 123. Valmistus: Kokoonpanoeritelmän CS-017 ja standardin EN 1090-2 mukaisesti, toteutusluokka EXC3.**	*Eurooppalaisen standardin numero* *Kuvaus tuotteesta ja tiedot sen määräyksissä vaadittavista ominaisuuksista*

Kuva 1.8 Esimerkki Menetelmän 3a mukaisesta CE-merkinnästä [8]

Menetelmä 3b:
Kokoonpanon lujuusarvon/arvojen ilmoittaminen ostajan tilauksen perusteella:

Tätä menetelmää käytetään silloin, kun valmistaja vastaa itse myös tuotteen rakenteellisesta suunnittelusta rakennuskohteen sijaintimaassa voimassa olevan viranomaisohjeen (muu kuin EN-Eurocode) mukaisesti ostajalta saamiensa rakennuskohteen lähtötietojen perusteella [8].

Edellä kohdissa *Perustiedot* ja *Menetelmä 1* esitettyjen tietojen lisäksi CE-merkinnässä tulee ilmoittaa kohdassa *Rakenteelliset ominaisuudet* myös seuraavat tiedot:

- suunnitteluseloste, standardit ja muut suunnittelueritelmät
- kantavuus
- väsymislujuus
- palonkestävyys
- viittaus mitoituslaskelmiin

Kestävyydet voidaan määrittää joko ominaisarvoina (kaikki) tai suunnitteluarvoina (kaikki) käytetyn suunnittelusäännöstön mukaisesti.

Käytännössä em. tietojen esittäminen tapahtuu viittaamalla CE-merkinnässä ao. suunnittelusäännöstöön ja ao. kokoonpanon yksilöityyn suunnitteludokumenttiin.

Kuvassa 1.9 on esitetty esimerkki Menetelmän 3b mukaisesta CE-merkinnästä.

Kokoonpanon tunnistamiseksi tulee käyttää yksilöivää merkkiä, jonka perusteella voidaan jäljittää kokoonpanoeritelmä ja valmistusta koskevat tiedot. Kuvan 1.9 esimerkissä ao. tunnistemerkintänä on ‘M 104’.

CE	*CE-vaatimustenmukaisuusmerkintä, joka muodostuu direktiivin 93/68/ETY mukaisesta "CE"-tunnuksesta.*
01234	*Ilmoitetun laitoksen tunnusnumero*
AnyCo Ltd, PO Box 21, B-1050 11 01234-CPD-00234	*Valmistajan nimi tai tunnusmerkki ja rekisteröity osoite* *Merkinnän kiinnittämisvuoden kaksi viimeistä numeroa* *Todistuksen numero*
EN 1090-1:2006+A1:2011 4 teräsristikkoa siltaan Bergeniin - M 104 **Geometristen arvojen toleranssit: EN 1090-2.** **Hitsattavuus: Standardin EN 10219-1 mukainen teräs S355J2H.** **Iskusitkeys: 27 J lämpötilassa -20 ºC.** **Palokäyttäytyminen: Materiaalin luokka A1.** **Kadmiumin päästöt: NPD.** **Radioaktiivinen säteily: NPD.** **Säilyvyys: Pinnan esikäsittely standardin EN 1090-2 mukaisesti, esikäsittelyaste P3. Pinta on maalattu standardin EN ISO 12944 mukaisesti, ks. kokoonpanoeritelmästä yksityiskohdat.** **<u>Rakenteelliset ominaisuudet</u>:** **<u>Kantavuus</u>: Mitoitus standardin NS 3472 ja Rautatiehallinnon eritelmän RW 302 mukaan, ks. liittyvä suunnitteluseloste ja mitoituslaskelmat, DC 501/06.** **<u>Siirtymä käyttörajatilassa</u>:** **ks. liittyvä suunnitteluseloste ja mitoituslaskelmat, DC 501/06.** **<u>Väsymislujuus</u>: RW 302.** **<u>Palonkestävyys</u>: NPD.** **<u>Valmistus</u>: Kokoonpanoeritelmän CS-506/2006 ja standardin EN 1090-2 mukaisesti, toteutusluokka EXC3.**	*Eurooppalaisen standardin numero* *Kuvaus tuotteesta ja tiedot sen määräyksissä vaadittavista ominaisuuksista*

Kuva 1.9 Esimerkki Menetelmän 3b mukaisesta CE-merkinnästä [8]

1.14 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 10219-1:2006. (EN 10219-1:2006)
Kylmämuovatut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket.
Osa 1: Tekniset toimitusehdot.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 66 s.

[2] SFS-EN 10219-2:2006. (EN 10219-2:2006)
Kylmämuovatut hitsatut seostamattomista teräksistä ja hienoraeteräksistä valmistetut rakenneputket.
Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 52 s.

[3] SFS-EN 1993-1-1:2005. (EN 1993-1-1:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 100 s.

[4] SFS-EN 1993-1-1:2005+AC:2006. (EN 1993-1-1:2005+AC:2006)
Sisältää myös korjaukset AC:2006.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.

[5] SFS-EN 1993-1-1: AC:2009. (EN 1993-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 16 s.

[6] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-1.
15.10.2007 sekä korjaus 14.2.2008. Ympäristöministeriö. 7 s.

[7] European Commission. 2006. RFCS project:
Design rules for cold-formed structural hollow sections.
Final report. EUR 21973 EN - 2006. 150 s.

[8] SFS-EN 1090-1:2010+A1:2012. (EN 1090-1:2009+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 1: Vaatimukset rakenteellisten kokoonpanojen vaatimustenmukaisuuden arviointiin.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 44 s.

[9] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[10] SFS-EN 10025-1:2004. (EN 10025-1:2004)
Kuumavalssatut rakenneteräkset.
Osa 1: Yleiset tekniset toimitusehdot.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 57 s.

[11] Rakennustuotteiden CE-merkintä rakennustuotedirektiivin mukaisesti.
Ympäristöopas 95. 2004. Ympäristöministeriö. 36 s.

[12] Rakennusalan standardisointiselvitys 2011.
Ympäristöministeriö, Rakennusteollisuus ry.
Suomen Rakennusmedia Oy. 2011. 93 s.

2. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN KESTÄVYYS

2.1 Rajatilamitoitus ja osavarmuusluvut

Rakenteen kestävyydellä tarkoitetaan sen kykyä kantaa siihen kohdistuvat kuormat ilman murtumista tai liian suuria muodonmuutoksia. Kestävyys ja kuorma ovat ajan ja paikan suhteen vaihtelevia suureita. Niillä ei ole siis yhtä absoluuttista arvoa, vaan niiden arvot jakaantuvat tilastollisen todennäköisyyden mukaan. Mitoituksessa kestävyyden ja kuorman hajonta otetaan huomioon käyttämällä osavarmuuslukuja.

Tämän käsikirjan esimerkit on laskettu EN-Eurocoden suositusarvoilla, ellei toisin ole mainittu. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

Eurocodessa annettuja suunnitteluohjeita saatetaan pitää monimutkaisina verrattuna totuttuihin kansallisiin ohjeisiin. On hyvä muistaa, että suunnittelijan on aina sallittua tehdä sellaisia laskentaa helpottavia yksinkertaistuksia, jotka johtavat varmalle puolelle.

Murtorajatilan (ULS, Ultimate Limit State) yleinen mitoitusehto on muotoa:

$$E_d \le R_d \quad \Leftrightarrow \quad \gamma_F \cdot E_k \le \frac{R_k}{\gamma_M} \tag{2.1}$$

missä
- γ_F on kuorman osavarmuusluku
- γ_M on kestävyyden osavarmuusluku
- E_d on kuorman aiheuttaman voiman tai momentin mitoitusarvo (suunnitteluarvo)
- E_k on kuorman aiheuttaman voiman tai momentin ominaisarvo
- R_d on kestävyyden mitoitusarvo (suunnitteluarvo)
- R_k on kestävyyden ominaisarvo

Lausekkeen (2.1) mitoitusehto voidaan esittää myös seuraavassa muodossa, jolloin tuloksesta nähdään suoraan käyttöaste kulloinkin kyseessä olevan kestävyyden suhteen:

$$\frac{E_d}{R_d} \le 1,0 \tag{2.2}$$

Kestävyyden mitoitusarvo R_d esitetään yleensä muodossa R_k/γ_M, missä R_k on kestävyyden ominaisarvo ja γ_M on kestävyyden osavarmuusluku. Osavarmuusluku γ_M saa erilaisia arvoja jäljempänä esitetyn mukaisesti.

Yksittäisten kuormien mitoitusarvot F_d saadaan kertomalla kuormien ominaisarvot F_k kuormien osavarmuusluvuilla γ_F. Kuormien ominaisarvot määritetään Eurocode 1:n (EN 1991) eri osissa.

Käytännössä kuormien mitoitusarvot joudutaan määrittämään samanaikaisesti vaikuttavien kuormien kuormayhdistelynä.

Murtorajatilassa, tavanomaisissa tilanteissa joihin ei liity onnettomuuskuormia, kuormien yhdistely voidaan suorittaa seuraavalla lausekkeella [1,1a]:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G.j} G_{k.j} \; ''+'' \; \gamma_{Q.1} Q_{k.1} \; ''+'' \sum_{i > 1} \gamma_{Q.i} \psi_{0.i} Q_{k.i} \qquad (2.3)$$

tai vaihtoehtoisesti seuraavilla lausekkeilla, joista valitaan kulloinkin epäedullisempi:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G.j} G_{k.j} \; ''+'' \; \gamma_{Q.1} \psi_{0.1} Q_{k.1} \; ''+'' \sum_{i > 1} \gamma_{Q.i} \psi_{0.i} Q_{k.i} \qquad (2.4a)$$

$$\sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G.j} G_{k.j} \; ''+'' \; \gamma_{Q.1} Q_{k.1} \; ''+'' \sum_{i > 1} \gamma_{Q.i} \psi_{0.i} Q_{k.i} \qquad (2.4b)$$

missä
- $''+''$ tarkoittaa lausekkeen termien yhdistämistä (kuormien samanaikaista vaikuttamista)
- j on pysyvän kuorman indeksi
- i on muuttuvan kuorman indeksi
- $G_{k.j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.i}$ on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $\gamma_{G.j}$ on pysyvän kuorman osavarmuusluku (taulukko 2.1)
- $\gamma_{Q.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku (taulukko 2.1)
- $\gamma_{Q.i}$ on muun muuttuvan kuorman osavarmuusluku (taulukko 2.1)
- $\psi_{0.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (taulukko 2.4)
- $\psi_{0.i}$ on muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (taulukko 2.4)
- ξ_j on epäedullisen pysyvän kuorman pienennyskerroin (taulukko 2.1)

Lausekkeet (2.4a) ja (2.4b) on otettu käyttöön, koska lauseke (2.3) on kohtuuttomasti varmalla puolella raskaille rakenteille. Lausekkeet (2.4a) ja (2.4b) johtavat yleensä teräsrakenteilla pienempiin kuormiin kuin lauseke (2.3).

Kansallisessa liitteessä valitaan käytetäänkö lauseketta (2.3) vai lausekkeita (2.4a) ja (2.4b).

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1990 [2]:
Käytetään lausekkeita (2.4a) ja (2.4b) ja taulukoissa 2.1 ja 2.4 esitettyjä osavarmuuslukuja ja yhdistelykertoimia.
Lausekkeessa (2.4a) otetaan huomioon ainoastaan pysyvät kuormat.

Palomitoitus ja siinä käytettävät kuormayhdistelyt käsitellään luvussa 6.

Käyttörajatilassa (SLS, Serviceability Limit State) käytettävät kuormayhdistelyt ja taipumarajat (siirtymärajat) käsitellään luvussa 7.

Väsymismitoituksessa käytettävät kuormayhdistelyt annetaan niissä Eurocoden osissa, jotka käsittelevät väsytyskuormitettuja rakenteita, kuten EN 1993-2 (Sillat) tai EN 1993-6 (Nostureita kannattavat rakenteet). Väsymismitoitusta rakenteen kestävyyden kannalta käsitellään tämän käsikirjan luvussa 4.

Taulukon 2.1 osavarmuuslukujen yhteydessä esiintyvää kuormakerrointa K_{FI} käytetään ainoastaan murtorajatilatarkasteluissa normaalisti tai tilapäisesti vallitsevien mitoitustilanteiden kuormayhdistelyissä, ja silloin ainoastaan epäedullisten kuormien yhteydessä taulukossa esitetyn mukaisesti. Kerrointa ei käytetä palo-, väsymis- eikä käyttörajatilatarkasteluissa. Kertoimen arvo riippuu rakenteen tai rakenneosan luotettavuusluokasta (RC1-RC3) taulukossa 2.2 esitetyn mukaisesti. Luotettavuusluokka puolestaan riippuu samassa taulukossa esitetystä rakenteen seuraamusluokasta (CC1-CC3), joka nimensä mukaisesti määräytyy rakenteen mahdollisen sortumisen seurausten vakavuudesta. Yksittäisen rakenneosan seuraamusluokka ja luotettavuusluokka voi olla korkeampi tai alempi kuin muun rakenteen luokitus [1,1a,2].

Taulukko 2.1 Kuormien osavarmuusluvut talonrakenteille [1,1a,2,22...25]

Tarkastelutilanne	Pysyvät kuormat (γ_G)	Muuttuvat kuormat (γ_Q) [a]	
		Määräävä muuttuva kuorma	Muut muuttuvat kuormat
Kuorman vaikutus on epäedullinen	EN 1990 [c] : 1,35xK_{FI} Suomi [c] : 1,35xK_{FI}	EN 1990 : 1,50xK_{FI} Suomi [b] : 1,50xK_{FI}	EN 1990 : 1,50xK_{FI} Suomi [b] : 1,50xK_{FI}
Kuorman vaikutus on edullinen	EN 1990 : 1,0 Suomi : 0,9	EN 1990 : 0 Suomi : 0 [d]	EN 1990 : 0 Suomi : 0 [d]
Väsymistarkastelu	EN 1993-1-9 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1993-1-9 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1993-1-9 : 1,0 Suomi : 1,0
Palomitoitus	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0
Käyttörajatila	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0

a) Taulukon 2.4 mukaiset kuormat ovat muuttuvia kuormia
b) Lausekkeessa (2.4a) otetaan Suomessa huomioon vain pysyvät kuormat
c) Lausekkeessa (2.4b) käytetään pienennyskerrointa $\xi = 0,85$
(siten että $\xi\gamma_G K_{FI} = 0,85 \times 1,35 \times K_{FI} \approx 1,15 \times K_{FI}$)
d) Kyseistä arvoa ei esitetä Suomen kansallisessa liitteessä, mutta tätä tarkoitetaan

Tässä taulukossa on esitetty Eurocoden (EN 1990 ja EN 1993) ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset osavarmuusluvut. **Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

Taulukko 2.2 Kuormakertoimen K_{FI} arvot eri luotettavuusluokissa [1,1a,2]

Seuraamusluokka	Luotettavuusluokka	Kuormakerroin K_{FI}
CC3	RC3	EN 1990 : 1,1 Suomi : 1,1
CC2	RC2	EN 1990 : 1,0 Suomi : 1,0
CC1	RC1	EN 1990 : 0,9 Suomi : 0,9

Tässä taulukossa on esitetty Eurocoden (EN 1990) ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset kertoimen K_{FI} arvot. **Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

Taulukko 2.3 Seuraamusluokkien ja luotettavuusluokkien määrittely [1,1a,2]

Seuraamus-luokka	Luotettavuus-luokka	Kuvaus	Rakennuksia sekä rakenteita koskevia esimerkkejä
CC3	RC3	EN 1990 ja Suomi: **Suuret** seuraamukset ihmishenkien menetysten *tai* **hyvin suurten** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	EN 1990: Pääkatsomot; julkiset rakennukset joissa vaurion seuraamukset ovat suuret (esim. konserttitalo) Suomi: Rakennuksen kantava runko [a] jäykistävine rakennusosineen sellaisissa rakennuksissa, joissa usein on suuri joukko ihmisiä kuten: - yli 8-kerroksiset [b] asuin-, konttori- ja liike-rakennukset - konserttisalit, teatterit, urheilu- ja näyttelyhallit, katsomot - raskaasti kuormitetut tai suuria jännevälejä sisältävät rakennukset Erikoisrakenteet kuten esim. suuret mastot ja tornit. [a] Ylä- ja välipohjat kuuluvat kuitenkin luokkaan CC2 elleivät ne toimi koko rakennusta jäykistävänä rakenteena. [b] Kellarikerrokset mukaan luettuina.
CC2	RC2	EN 1990 ja Suomi: **Keskisuuret** seuraamukset ihmishenkien menetysten *tai* **merkittävien** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	EN 1990: Asuin- ja liikerakennukset; julkiset rakennukset, joissa vaurion seuraamukset ovat keskisuuret (esim. toimistorakennus) Suomi: Rakennukset ja rakenteet, jotka eivät kuulu luokkiin CC3 tai CC1
CC1	RC1	EN 1990 ja Suomi: **Vähäiset** seuraamukset ihmishenkien menetysten *tai* **pienten tai merkityksettömien** taloudellisten, sosiaalisten tai ympäristövahinkojen takia	EN 1990: Maa- ja metsätalousrakennukset, joissa ei yleensä oleskele ihmisiä (esim. varasto-rakennukset), kasvihuoneet Suomi: 1- ja 2-kerroksiset rakennukset, joissa vain tilapäisesti oleskelee ihmisiä kuten esim. varastot. Rakenteet, joiden vaurioitumisesta ei aiheudu merkittävää vaaraa.
Esimerkkejä eri seuraamusluokkiin (luotettavuusluokkiin) kuuluvista rakenteista on esitetty yksityiskohtaisemmin Eurocoden osissa EN 1990 ja EN 1991-1-7 sekä niiden kansallisissa liitteissä.			
Tässä taulukossa on esitetty Eurocoden (EN 1990) ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset seuraamusluokkien ja luotettavuusluokkien määrittelyt. **Muiden maiden maakohtaiset määrittelyt on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**			

Taulukko 2.4 Kuormien yhdistelykertoimet talonrakenteille [1,1a,2]

Kuorma	EN 1990			Suomi		
	ψ_0	ψ_1	ψ_2	ψ_0	ψ_1	ψ_2
Hyötykuormat rakennuksissa, luokka (ks. EN 1991-1-1)						
- Luokka A: asuintilat	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka B: toimistotilat	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka C: kokoontumistilat	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,3
- Luokka D: myymälätilat	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6
- Luokka E: varastotilat	1,0	0,9	0,8	1,0	0,9	0,8
- Luokka F: liikennöitävät tilat, ajoneuvon paino $\leq$ 30 kN	0,7	0,7	0,6	0,7	0,7	0,6
- Luokka G: liikennöitävät tilat, 30 kN < ajoneuvon paino $\leq$ 160 kN	0,7	0,5	0,3	0,7	0,5	0,3
- Luokka H: vesikatot	0	0	0	0	0	0
Rakennusten lumikuormat (ks. EN 1991-1-3) [a]				b)		
- Suomi, Islanti, Norja, Ruotsi	0,7	0,5	0,2	0,7 [c] 0,7 [d]	0,4 [c] 0,5 [d]	0,2 [c] 0,2 [d]
- Muut CEN:n jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on H > 1000 m merenpinnan yläpuolella	0,7	0,5	0,2			
- Muut CEN:n jäsenmaat, kun sijaintikorkeus on H $\leq$ 1000 m merenpinnan yläpuolella	0,5	0,2	0			
Jääkuorma [e]				0,7	0,3	0
Rakennusten tuulikuormat (ks. EN 1991-1-4)	0,6	0,2	0	0,6	0,2	0
Rakennusten sisäinen lämpötila, ei tulipalossa (ks. EN 1991-1-5)	0,6	0,5	0	0,6	0,5	0

a) Mikäli maata ei ole mainittu, kyseiset paikalliset olosuhteet selvitetään erikseen.
b) Suomi: Lumikuorma: ulkotasoilla ja parvekkeilla ψ_0 = 0 luokkien A, B, F ja G yhteydessä
c) Suomi: kun $s_k < 2{,}75$ kN/m^2
d) Suomi: kun $s_k \geq 2{,}75$ kN/m^2
e) Lisätty Suomen kansalliseen liitteeseen.

Tässä taulukossa on esitetty Eurocoden (EN 1990) ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset kuormien yhdistelykertoimet. **Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

Eurocode 3 määrittelee kestävyyden osavarmuusluvut sekä niille käytetyt merkinnät ja suositellut lukuarvot Eurocoden kussakin osassa erikseen. Taulukossa 2.5 on esitetty talonrakenteiden kannalta keskeisimmät Eurocode 3:n osat ja niissä annetut kestävyyden osavarmuusluvut. Arvot ovat Eurocoden suositusarvoja. **Kunkin maan maakohtaiset arvot tulee tarkistaa kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).** Taulukossa on esitetty myös Suomessa käytettävät arvot.

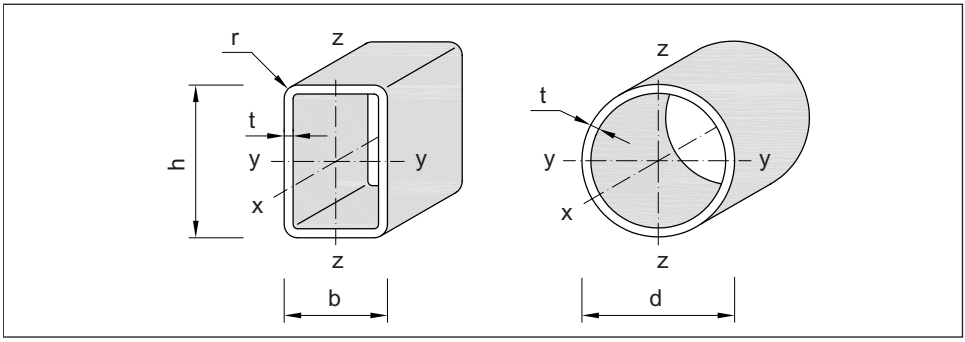
Taulukosta 2.5 voidaan nähdä, että vaikka osavarmuuslukujen määritelmät, merkinnät ja lukuarvot ovat Eurocode 3:n eri osissa pääsääntöisesti samat, paikoin esiintyy myös poikkeamia. EN 1993-1-1 esimerkiksi käyttää nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden osavarmuusluvulle merkintää γ_{M2}, kun taas EN 1993-1-8 käyttää samaa merkintää taulukossa esitettyjen liitosten osavarmuusluvulle. Myös lukuarvot saattavat vaihdella Eurocoden eri osissa: EN 1993-1-1 antaa sauvan stabiiliuden osavarmuusluvulle γ_{M1} suositusarvoksi 1,0, kun taas EN 1993-2 (Sillat) antaa suositusarvoksi 1,1. Käytettävät osavarmuusluvut tulee aina valita asiayhteyden ja sovellettavan Eurocoden osan mukaisesti.

Taulukko 2.5 Kestävyyden osavarmuuslukuja [3...25]

Standardi	Tarkastelutilanne	Osavarmuus-luku	Osavarmuusluvun arvo	
			Eurocoden suositusarvo	Suomi
EN 1993-1-1:	Teräsrakenteiden yleiset säännöt:			
	Poikkileikkauksen kestävyys poikkileikkaus-luokasta riippumatta, mukaan lukien paikallinen lommahdus ja vinoutumisnurjahdus. **Huom:** **Poikkileikkausluokan 4 pyöreät putket:** **ks. EN 1993-1-6**	γ_{M0}	1,0	1,0
	Sauvan kestävyys stabiiliuden suhteen, kun laskelmat tehdään sauvan tarkastuksena	γ_{M1}	1,0	1,0
	Nettopoikkileikkauksen kestävyys vetomurtumisen suhteen (reikien osuus vähennetty bruttopoikkileikkauksesta)	γ_{M2}	1,25	1,25
	Liitosten kestävyys	ks. EN 1993-1-8		
EN 1993-1-2:	Palomitoitus:			
	Kestävyys palomitoituksessa	$\gamma_{M.fi}$	1,0	1,0
EN 1993-1-3:	Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille:			
	Osavarmuusluvut γ_{M0} ja γ_{M1} ja γ_{M2}: kuten edellä EN 1993-1-1			
EN 1993-1-5:	Levyrakenteet:			
	Osavarmuusluvut γ_{M0} ja γ_{M1} valitaan sovellettavan Eurocoden osan (EN 1993-1...EN 1993-6) mukaisesti			
EN 1993-1-6:	Kuorirakenteet:			
	Lommahduskestävyys	γ_{M1}	1,1	1,1
EN 1993-1-8:	Liitokset:			
	Rakenneosien ja poikkileikkausten kestävyys	ks. EN 1993-1-1		
	Ruuvien kestävyys	γ_{M2}	1,25	1,25
	Niittien kestävyys			
	Niveltappien kestävyys			
	Hitsien kestävyys			
	Levyjen reunapuristuskestävyys			
	Liukumiskestävyys - murtorajatilassa (kiinnitysluokka C) - käyttörajatilassa (kiinnitysluokka B)	γ_{M3} $\gamma_{M3.ser}$	1,25 1,1	1,25 1,1
	Injektioruuvin reunapuristuskestävyys	γ_{M4}	1,0	1,0
	Rakenneputkien liitosten kestävyys ristikoissa	γ_{M5}	1,0	1,0
	Niveltappien kestävyys käyttörajatilassa	$\gamma_{M6.ser}$	1,0	1,0
	Korkealujuuksisten ruuvien esijännitys	γ_{M7}	1,1	1,1
EN 1993-1-9:	Väsyminen:			
	Vaurionsietoperiaate - vaurion seuraukset pienet - vaurion seuraukset suuret	γ_{Mf} γ_{Mf}	1,0 1,15	1,0 1,15
	Varman kestämisen periaate - vaurion seuraukset pienet - vaurion seuraukset suuret	γ_{Mf} γ_{Mf}	1,15 1,35	1,15 1,35
Tässä taulukossa on esitetty Eurocode 3:n (EN 1993) taulukossa mainittujen osien ja kyseisten osien Suomen kansallisen liitteen mukaiset kestävyyden osavarmuusluvut. **Eurocode 3:n muissa osissa voidaan esittää muita arvoja kestävyyden osavarmuusluvuille. Kulloinkin tulee käyttää sovellettavan Eurocoden osan ja kyseeseen tulevan maan kansallisen liitteen mukaisia osavarmuuslukuja.**				

2.2 Sauvan akselisto

Sauvan akselisto on kuvan 2.1 mukainen.



Kuva 2.1 Sauvan akselisto ja poikkileikkauksen mittamerkinnät

2.3 Poikkileikkausluokat

Poikkileikkausluokituksen tarkoitus on tunnistaa missä laajuudessa poikkileikkauksen paikallinen lommahdus rajoittaa poikkileikkauksen kestävyyttä ja kiertymiskykyä.

Poikkileikkaukset jaetaan neljään luokkaan (taulukko 2.6). Samassa rakenteessa voi olla rakenneosia eri poikkileikkausluokista. Myös saman poikkileikkauksen eri osat (laipat ja uumat) voivat kuulua eri poikkileikkausluokkiin. Poikkileikkausluokka riippuu poikkileikkauksen puristettujen osien leveys-paksuus-suhteista ja jännitystilasta. Poikkileikkauksen puristettuun osaan kuuluu jokainen osa, johon tarkasteltavan kuormitusyhdistelmän vaikutuksesta syntyy joko täysi tai osittainen puristus. Saman rakenneputken poikkileikkausluokka voi olla erilainen taivutuksessa ja puristuksessa. Poikkileikkausluokka voi vaihdella sauvan pituussuunnassa taivutusmomentin ja normaalivoiman suhteista riippuen [3,4,5].

Poikkileikkausluokka 1 (PL1): Koko poikkileikkaus on tehollinen. Poikkileikkaukseen voi syntyä plastisen taivutuskestävyyden omaava plastinen nivel, jolla on plastisuusteorian edellyttämä riittävä kiertymiskyky.

Poikkileikkausluokka 2 (PL2): Koko poikkileikkaus on tehollinen. Poikkileikkaukseen voi kehittyä plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys, mutta paikallinen lommahdus (local buckling) rajoittaa kiertymiskykyä.

Poikkileikkausluokka 3 (PL3): Koko poikkileikkaus on tehollinen. Taivutetussa poikkileikkauksessa puristusjännitys voi saavuttaa myötölujuuden poikkileikkauksen äärimmäisessä puristetussa reunassa. Poikkileikkaus lommahtaa ennen kuin sisäinen momentti on kehittynyt poikkileikkauksen plastisen taivutuskestävyyden suuruiseksi. Tasaisesti puristetussa poikkileikkauksessa koko poikkileikkaus voi saavuttaa myötölujuuden. (Huom. Laskelmissa jännityksen maksimi rajoitetaan käytännössä myötölujuuden mitoitusarvoon $f_{yd} = f_y / \gamma_{M0}$.)

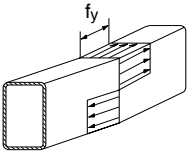
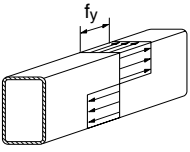
Poikkileikkausluokka 4 (PL4): Vain osa poikkileikkauksesta on tehollista. Poikkileikkauksessa tapahtuu paikallinen lommahdus ennen kuin poikkileikkauksen suurin puristusjännitys jossakin taso-osassa on saavuttanut myötölujuuden. Taivutuskestävyyden ja puristuskestävyyden laskenta perustuu tehollisen poikkileikkaukseen. Poikkileikkauksen kestävyydet lasketaan tällöin vain tehollisten osien pinta-alojen perusteella. Tehollinen poikkileikkaus on erilainen taivuksessa kuin puristuksessa. Poikkileikkausluokan 4 pyöreiden rakenneputkien kestävyyden laskennassa ei voida käyttää tehollista poikkileikkausta, vaan laskenta suoritetaan täydelle poikkileikkaukselle (bruttopoikkileikkaukselle) sylinterikuoren lommahdusjännityksen suhteen [3,4,5,16].

Rakenteen voimasuureet ja kestävyydet voidaan laskea kaikissa poikkileikkausluokissa kimmoteorian mukaisesti, jos otetaan huomioon lommahduksen vaikutus poikkileikkauksen kestävyyteen. Plastisuusteoriaa voidaan käyttää kestävyyksiä laskettaessa PL-luokissa 1 ja 2 ja voimasuureita laskettaessa PL-luokassa 1. Käytännössä voimasuureet voidaan yksinkertaisuuden vuoksi laskea määräävimmän (suurimman) poikkileikkausluokan mukaisesti [3,4,5].

Lievennyksenä edellä esitettyihin vaatimuksiin EN 1993-1-1 antaa mahdollisuuden hyödyntää myös PL-luokkaan 2 kuuluvilla jatkuvilla palkeilla voimasuureiden laskennassa momenttien plastisuusteorian mukaista uudelleenjakautumista (ns. momenttien tasaus) muuntamalla kimmoteorian mukaan laskettuja taivutusmomentteja enintään 15 % (laskettuna taivutusmomentin suurimmasta arvosta) edellyttäen että:

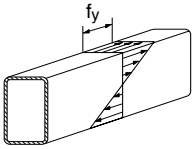
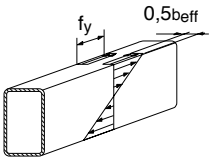
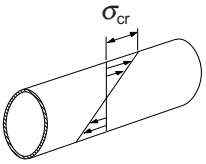
- kehän sisäiset voimat ja momentit jäävät tasapainoon ulkoisten kuormien kanssa ja
- kaikki sauvat joissa momentteja pienennetään kuuluvat PL-luokkaan 1 tai 2 ja
- sauvojen kiepahdus on estetty.

Taulukko 2.6 Mitoitusmenetelmät eri poikkileikkausluokissa [3,4,5,16]

Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjakauma, kun kestävyys on saavutettu
1 neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä pyöreät rakenneputket	plastisuusteoria	plastisuusteoria	
2 neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä pyöreät rakenneputket	plastisuusteoria	kimmoteoria	

(jatkuu)

Taulukko 2.6 Mitoitusmenetelmät eri poikkileikkausluokissa [3,4,5,16] *(jatkuu)*

Poikkileikkausluokka	Kestävyyden laskentatapa	Voimasuureiden laskentatapa	Jännitysjakauma, kun kestävyys on saavutettu
3 neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä pyöreät rakenneputket	kimmoteoria	kimmoteoria	
4 neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket	tehollinen poikkileikkaus	kimmoteoria	
4 pyöreät rakenneputket	täyden poikkileikkauksen lommahdusjännitys	kimmoteoria	

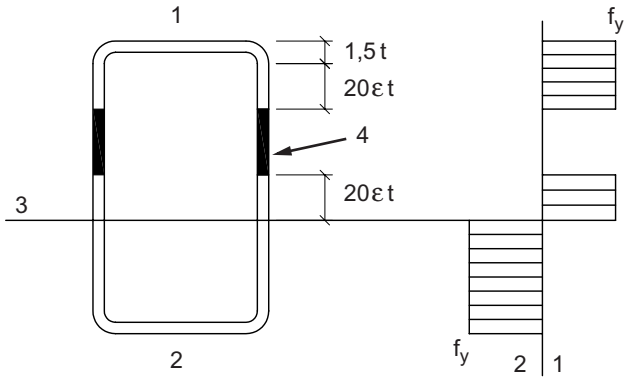
Koko poikkileikkaus luokitellaan yleensä puristetun osan perusteella määräävimpään (suurimpaan) poikkileikkausluokkaan. Vaihtoehtoisesti PL-luokka voidaan määrittää ilmoittamalla erikseen sekä laipan että uuman PL-luokka. Jos uuma mitoitetaan vain leikkausvoimille eikä uumaa mitoiteta taivutukselle ja normaalivoimalle, poikkileikkaus voidaan luokitella PL-luokkaan 2, 3 tai 4 vain laippojen luokituksen perusteella [13,14].

Taulukoissa 2.7 ja 2.8 on esitetty Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaiset rajat eri poikkileikkausluokille. Osan EN 1993-1-5 mukaisesti lasketut PL3:n rajat poikkeavat hieman osassa EN 1993-1-1 esitetyistä arvoista (ks. taulukko 2.7). Ero johtuu Eurocoden eri osien puutteellisesta yhteensovittamisesta [26,27].

Poikkileikkausluokan määrittäminen kannattaa tehdä ‘ylhäältä alaspäin’ siten, että ensin tarkastetaan täyttyvätkö PL1:n vaatimukset, sen jälkeen tarkastetaan PL2:n vaatimukset jne. PL3:n raja tulee tällöin tarkastetuksi osassa EN 1993-1-1 määritetyn rajan mukaisesti, joka on hieman edullisempi kuin osan EN 1993-1-5 mukaisesti laskettu raja. Poikkileikkaukset, jotka eivät täytä PL3:n vaatimuksia, kuuluvat PL4:ään.

Tarkastettaessa PL-luokkien 1 tai 2 vaatimusten täyttymistä, poikkileikkaukseen oletetaan plastisuusteorian mukainen jännitysjakauma ja plastisuusteorian mukainen neutraaliakselin (eli plastisen neutraaliakselin) sijainti. Vasta tarkastuksen lopputulos, eli lopullinen PL-luokitus, osoittaa onko poikkileikkauksella riittävä muodonmuutoskyky, että siihen voi muodostua alkuoletuksen mukainen plastinen jännitysjakauma. Plastisen neutraaliakselin paikan määrittämistä käsitellään kohdassa 2.9.1.5.1.

Poikkileikkaus, jonka uuma kuuluu PL3:een ja puristettu laippa kuuluu PL-luokkaan 1 tai 2, voidaan luokitella PL2:een käyttämällä tehollista uumaa (ns. PL-luokan 2 tehollinen poikkileikkaus). Tällöin uuman puristetun osan korkeudeksi valitaan $20\varepsilon t$ puristetun laipan alapuolelle ja $20\varepsilon t$ tehollisen poikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisen neutraaliakselin yläpuolelle kuvan 2.2 mukaisesti [3,4,5].



1 Puristus
2 Veto
3 Tehollisen poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen neutraaliakseli
4 Uuman tehoton alue, jätetään huomioon ottamatta

Kuva 2.2 Poikkileikkausluokan 2 tehollinen poikkileikkaus [3,4,5]

Poikkileikkausluokalle 3 esitettyjä rajoja taulukoissa 2.7 ja 2.8 voidaan lieventää korvaamalla taulukon lausekkeissa tekijä ε tekijällä ε^* muulloin, paitsi laskettaessa sauvan nurjahduskestävyyttä [3,4,5]:

$$\varepsilon^* = \sqrt{\frac{f_y / \gamma_{M0}}{\sigma_{com.Ed}}} \cdot \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{\gamma_{M0} \cdot \sigma_{com.Ed}}} \qquad (2.5)$$

missä $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ $[f_y] = N/mm^2$

f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

$\sigma_{com.Ed}$ on tarkasteltavan taso-osan suurimman puristusjännityksen mitoitusarvo

Lievennyksestä on hyötyä silloin, kun poikkileikkauksen tarkasteltavan taso-osan suurin puristusjännitys jää alle myötötason. Puristusjännityksen suurin sallittu arvo on yleisesti $\sigma_{com.Ed} = f_y / \gamma_{M0}$, jolloin lauseke (2.5) palautuu taulukoissa 2.7 ja 2.8 esitetyksi alkuperäiseksi ε-tekijän lausekkeeksi.

Sauvan nurjahduskestävyyttä laskettaessa kyseistä lievennystä ei tehdä, vaan PL3:n rajat määritetään taulukoiden 2.7 ja 2.8 alkuperäisten lausekkeiden mukaisesti.

EN 1993-1-1 antaa ohjeet myös samanaikaisesti puristetun ja taivutetun uuman tai laipan poikkileikkausluokan määrittämiseksi (taulukot 2.7 ja 2.8). Samanaikaisesti puristetun ja taivutetun sauvan kestävyyden laskemiseksi ei ole kuitenkaan annettu yksiselitteisiä ohjeita. Tulkintana on esitetty, että PL-luokka voidaan määrittää erikseen pelkän puristuksen ja pelkän taivutuksen perusteella ja yhteisvaikutuskaavoihin otetaan mukaan vastaavasti pelkälle puristukselle ja pelkälle taivutukselle lasketut kestävyydet. Vaihtoehtoisesti yhteisvaikutusta laskettaessa PL-luokka ja yksi tehollinen poikkileikkaus määritetään samanaikaisesti vaikuttavista voimasuureista todellisen (resultoivan) jännitysjakauman perusteella, jolloin yhteisvaikutuskaavoihin saadaan yhden poikkileikkauksen ja PL-luokan mukaiset kestävyydet. Tällöin kuitenkin PL4:n tapauksessa neutraaliakselin siirtymisestä aiheutuva lisämomentti ($\Delta M = N_{Ed} \times e_N$) muuttaa poikkileikkauksen jännitysjakaumaa, mikä johtaa uuden tehollisen poikkileikkauksen laskentaan iteratiivisesti [13,14].

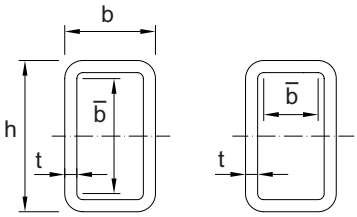
Samanaikaisesti puristetun ja taivutetun uuman tai laipan PL-luokkien 1 ja 2 rajat riippuvat α-kertoimesta, jolla merkitään puristetun osan osuutta tarkasteltavassa levyosassa (taulukko 2.7). Tällöin poikkileikkauksen plastinen jännitysjakauma määritetään sen plastisen neutraaliakselin suhteen. Plastisen neutraaliakselin paikan määrittämistä käsitellään kohdassa 2.9.1.5.1.

Jos samanaikaisessa puristuksessa ja taivutuksessa puristuksen suhteellinen osuus on hyvin suuri ja taivutuksen pieni, lähestytään poikkileikkauksen jännitysjakauman kannalta tasaisen puristuksen tilannetta. Tällöin saadaan taulukon 2.7 puristetun ja taivutetun taso-osan lausekkeista raja-arvona (kun $\alpha \rightarrow 1{,}0$) pelkästään puristetun taso-osan PL-luokille 1 ja 2 esitetyt rajat. Vastaava tulos saadaan ao. taulukosta myös PL-luokalla 3.

Rakenneputkien poikkileikkausluokkien rajat eri lujuusluokkien teräksille saadaan taulukosta 2.9. Tasaisesti puristetun poikkileikkauksen PL1...3 rajoja voi käyttää varmalla puolella olevina rajoina poikkileikkaukselle, johon kohdistuu samanaikainen puristus ja taivutus.

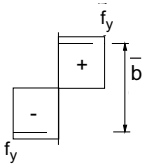
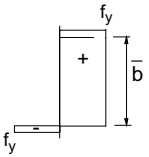
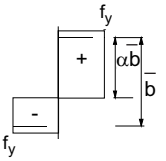
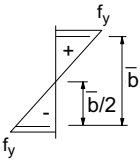
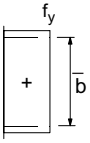
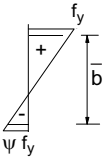
Taulukko 2.7 Poikkileikkausluokkien rajat.
Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket [3,4,5]

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat



$\overline{b} = h - 3t$ tai $b - 3t$ a)

Taivutus ko. akselin suhteen

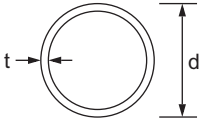
Poikkileikkaus-luokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat b)
Taso-osan jännitysjakauma (puristus positiivinen)			 c)
1	$\overline{b}/t \le 72\varepsilon$	$\overline{b}/t \le 33\varepsilon$	$kun\ \alpha > 0,5$: $\overline{b}/t \le \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun\ \alpha \le 0,5$: $\overline{b}/t \le \frac{36\varepsilon}{\alpha}$
2	$\overline{b}/t \le 83\varepsilon$	$\overline{b}/t \le 38\varepsilon$	$kun\ \alpha > 0,5$: $\overline{b}/t \le \frac{456\varepsilon}{13\alpha - 1}$ $kun\ \alpha \le 0,5$: $\overline{b}/t \le \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$
Taso-osan jännitysjakauma (puristus positiivinen)			
3	$\overline{b}/t \le 124\varepsilon$ d)	$\overline{b}/t \le 42\varepsilon$ e)	$kun\ \psi > -1$: $\overline{b}/t \le \frac{42\varepsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ f) $kun\ \psi \le -1$ g): $\overline{b}/t \le 62\varepsilon(1 - \psi)\sqrt{(-\psi)}$

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	**355**	**420**	460
	ε	1,0000	0,9244	**0,8136**	**0,7480**	0,7148

a) Kuvaan piirrettyä laskentaleveyttä $\overline{b}$ ei ole määritetty yksiselitteisesti Eurocoden osassa EN 1993-1-1 Suositellaan käytettäväksi esitetyn lausekkeen mukaista osassa EN 1993-1-5 esitettyä määrittelyä.
b) Varmalla puolella oleva arvio saadaan, kun poikkileikkausluokka määritetään puhtaan puristuksen mukaan
c) Puristetun osan korkeuden määrittäminen (α-kerroin), ks. kohta 2.9.1.5.1
d) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $\overline{b}/t \le 121,43\varepsilon$
e) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $\overline{b}/t \le 38,25\varepsilon$
f) EN 1993-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta k_σ ja jännityssuhteesta ψ
g) Kohtaa $\psi \le -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\varepsilon_y > f_y / E$

Taulukko 2.8 Poikkileikkausluokkien rajat.
Pyöreät rakenneputket [3,4,5]

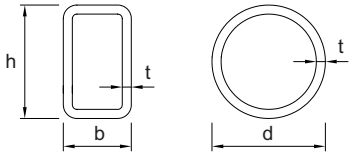
Pyöreä putki

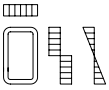


Poikkileikkausluokka	Taivutettu ja/tai puristettu poikkileikkaus
1	$d/t \le 50\varepsilon^2$
2	$d/t \le 70\varepsilon^2$
3	$d/t \le 90\varepsilon^2$ **Huom.** Kun $d/t > 90\varepsilon^2$, ks. EN 1993-1-6.

$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	**355**	**420**	460
	ε	1,0000	0,9244	**0,8136**	**0,7480**	0,7148
	ε^2	1,0000	0,8545	**0,6620**	**0,5595**	0,5109

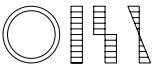
Taulukko 2.9 Poikkileikkausluokkien rajat lujuusluokille S235-S460



Kuormitustapaus			Taivutus			Puristus [a]		
								
Poikkileikkausluokka			1	2	3	1	2	3
f_y (N/mm^2)								
235	b/t	(laippa)	36,0	41,0	45,0	36,0	41,0	45,0
	h/t	(uuma)	75,0	86,0	127,0	36,0	41,0	45,0
275	b/t	(laippa)	33,5	38,1	41,8	33,5	38,1	41,8
	h/t	(uuma)	69,6	79,7	117,6	33,5	38,1	41,8
355	**b/t**	**(laippa)**	**29,8**	**33,9**	**37,2**	**29,8**	**33,9**	**37,2**
	h/t	**(uuma)**	**61,6**	**70,5**	**103,9**	**29,8**	**33,9**	**37,2**
420	**b/t**	**(laippa)**	**27,7**	**31,4**	**34,4**	**27,7**	**31,4**	**34,4**
	h/t	**(uuma)**	**56,9**	**65,1**	**95,8**	**27,7**	**31,4**	**34,4**
460	b/t	(laippa)	26,6	30,2	33,0	26,6	30,2	33,0
	h/t	(uuma)	54,5	62,3	91,6	26,6	30,2	33,0

(jatkuu)

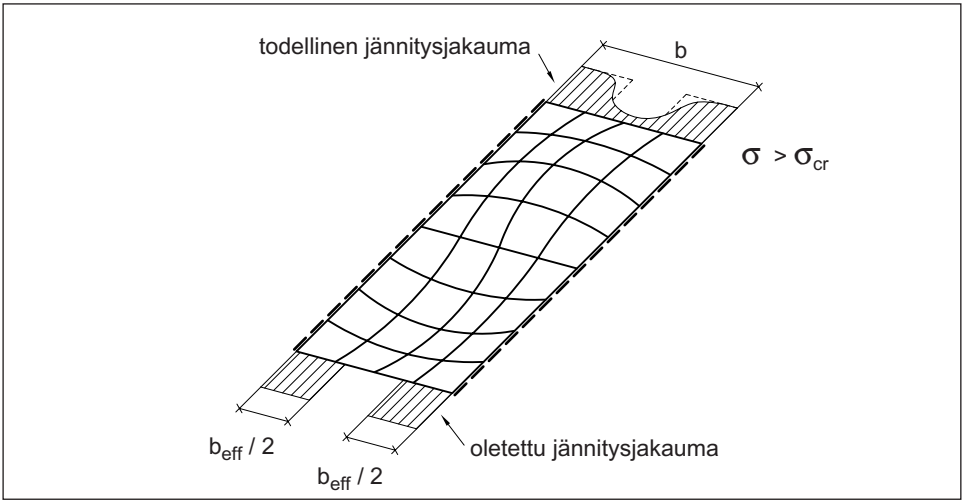
Taulukko 2.9 Poikkileikkausluokkien rajat lujuusluokille S235-S460
(jatkuu)

Kuormitustapaus		Taivutus tai puristus tai samanaikainen taivutus ja puristus		
				
Poikkileikkausluokka		1	2	3
f_y (N/mm^2)				
235	d / t (koko poikkileikkaus)	50,0	70,0	90,0
275	d / t (koko poikkileikkaus)	42,7	59,8	76,9
355	**d / t** (koko poikkileikkaus)	**33,1**	**46,3**	**59,6**
420	**d / t** (koko poikkileikkaus)	**28,0**	**39,2**	**50,4**
460	d / t (koko poikkileikkaus)	25,5	35,8	46,0

a) Tasaisesti puristetun poikkileikkauksen kaikkia PL-luokkien raja-arvoja voidaan käyttää samanaikaisesti puristetun ja taivutetun poikkileikkauksen uumalle ja laipalle varmalla puolella olevina ko. poikkileikkausluokkien rajoina. PL-luokkien tarkat rajat samanaikaisesti puristetun ja taivutetun poikkileikkauksen uumalle voidaan määrittää taulukon 2.7 mukaisesti.

2.4 Tehollinen poikkileikkaus poikkileikkausluokassa 4 (neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket)

Neliön ja suorakaiteen muotoisilla poikkileikkausluokan 4 rakenneputkilla lommahtaminen otetaan huomioon puristettujen osien tehollisten leveyksien ja siten muodostuvan tehollisen poikkileikkauksen avulla (kuva 2.3). Poikkileikkauksen tehollliset ominaisuudet (A_{eff}, I_{eff}, W_{eff}) määritetään näin muodostetulle tehollliselle poikkileikkaukselle. Tehollliset leveydet lasketaan taulukosta 2.10, jolloin taulukossa tarvittava tehollisen leveyden pienennystekijä ρ lasketaan kohtien 2.4.1 ja 2.4.2 mukaisesti. Laipan tehollista leveyttä määritettäessä jännityssuhde ψ lasketaan bruttopoikkileikkauksen ominaisuuksien perusteella. Uuman tehollista leveyttä määritettäessä jännityssuhde lasketaan puristetun laipan tehollisen leveyden ja uuman bruttopoikkileikkauksen perusteella [13,14].



Kuva 2.3 Tehollisen leveyden periaatekuva tasaisesti puristetun (ψ = 1) kahdelta reunalta tuetun lommahtavan taso-osan laskennassa

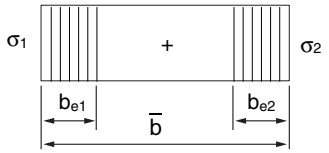
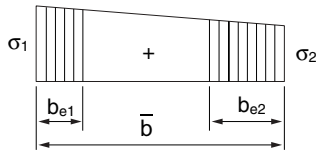
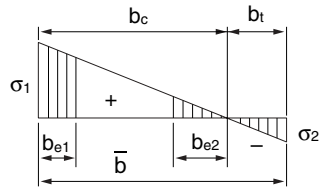
PL4:ssä lommahtaminen voidaan ottaa huomioon tehollisen leveyden sijasta vaihtoehtoisesti myös Eurocoden osassa EN 1993-1-5 esitetyllä pienennettyyn jännitykseen perustuvalla menetelmällä. Pienennettyyn jännitykseen perustuva menetelmä on ekvivalentti tehollisen leveyteen perustuvan menetelmän kanssa yksittäisten levykenttien tapauksissa, mutta ei välttämättä koko poikkileikkauksen suhteen, koska pienennettyjen jännitysten menetelmässä kuorman jakautumista poikkileikkauksen levyosien välillä ei oteta huomioon. Pienennettyjen jännitysten menetelmää ei esitetä tässä käsikirjassa, koska siinä poikkileikkauksen heikoimman osan jännitysrajat voivat määrätä koko poikkileikkauksen kestävyyden, ja koska tehollisen leveyden menetelmä sallii hoikempien levyosien käyttämisen [13,14,28].

Kokonaisanalyysissä (global analysis, kokonaisanalyysillä tarkoitetaan rakenteen sisäisten voimien ja momenttien määrittämistä) levyn lommahduksen vaikutus jäykkyyteen voidaan jättää huomioon ottamatta, kun puristetun osan tehollinen pinta-ala on suurempi kuin ρ_{lim} kertaa saman osan bruttopinta-ala [13,14]. Arvo em. rajalle voidaan määrittää kansallisessa liitteessä. EN 1993-1-5 suositusarvo on ρ_{lim} = 0,5 . Jos osa tarkasteltavasta taso-osasta on puristettua ja osa vedettyä, kuten taivutuksen alaisessa uumassa, sääntöä sovelletaan puristusjännityksen alaiseen osuuteen [28].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-5 [15]:
Käytetään Eurocoden suositusarvoa ρ_{lim} = 0,5.

Mikäli edellä esitetty ehto ei toteudu, lommahduksen vaikutus jäykkyyteen otetaan huomioon kokonaisanalyysissä määrittämällä tehollinen poikkileikkaus murtorajatilan kuormituksilla taulukon 2.10 ja kohdan 2.4.1 mukaisesti. Tehollisen poikkileikkauksen neliömomentti I_{eff} voidaan muuntaa tarkasteltavalle pituudelle vakioarvoksi I_{fic} lausekkeen (2.13) mukaisesti (lauseketta sovelletaan käyttämällä kulloinkin kyseeseen tulevaa murtorajatilan tai käyttörajatilan kuormayhdistelyä).

Taulukko 2.10 Kahdelta reunalta tuettujen puristettujen taso-osien tehollinen leveys [13,14]

Jännitysjakauma (puristus positiivinen)	Tehollinen leveys b_{eff}
	$\psi = 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0{,}5 b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}5 b_{eff}$
	$0 \le \psi < 1$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 2 b_{eff} / (5 - \psi)$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0$ $b_{eff} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0{,}4 b_{eff}$ $b_{e2} = 0{,}6 b_{eff}$

$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	$-3 \le \psi < -1$ a)	-1	$-1 < \psi < 0$	0	$0 < \psi < 1$	1
Lommahdus-kerroin k_σ	$5{,}98(1 - \psi)^2$	$23{,}9$	$7{,}81 - 6{,}29\psi + 9{,}78\psi^2$	$7{,}81$	$\frac{8{,}2}{1{,}05 + \psi}$	$4{,}0$

a) Lauseke on korjattu lähteen [14] mukaisesti.

Mitta $\bar{b}$ määritetään taulukon 2.7 mukaisesti.

2.4.1 Tehollinen poikkileikkaus murtorajatilassa

Tehollisen leveyden menetelmässä taulukon 2.10 pienennystekijä ρ lasketaan neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien puristetulle taso-osalle seuraavasti [13,14]:

$$\rho = 1{,}0 \qquad kun \quad \bar{\lambda}_p \le 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055\psi} \qquad (2.6a)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \le 1{,}0 \qquad kun \quad \bar{\lambda}_p > 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055\psi} \qquad (2.6b)$$

Taso-osan muunnettu hoikkuus lasketaan seuraavasti [13,14]:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \qquad (2.7)$$

Kimmoteorian mukainen taso-osan kriittinen lommahdusjännitys σ_{cr} lasketaan seuraavasti:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \cdot \sigma_E \qquad (2.8)$$

missä σ_E on Eulerin jännitys joka lasketaan seuraavasti:

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)}(t/\bar{b})^2 = 190000 \cdot (t/\bar{b})^2 \qquad (2.9)$$

Kun teräksen kimmokerroin on E = 2,1 · 10^5 N/mm^2 ja Poissonin luku ν = 0,3 , saadaan lausekkeista (2.7) - (2.9) ratkaistua Eurocoden osassa EN 1993-1-5 esitetty lauseke taso-osan muunnetulle hoikkuudelle:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} \qquad (2.10)$$

missä
- $\bar{b}$ on rakenneputken laipan laskennallinen leveys (= b - $3t$) tai uuman laskennallinen korkeus (= h - $3t$)
- t on seinämänpaksuus
- $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$ $\quad [f_y] = N/mm^2$
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- k_σ on jännityssuhdetta ψ ja taso-osan reunojen tuentaehtoja vastaava lommahduskerroin (taulukko 2.10)

Kun poikkileikkauksen tarkasteltavan taso-osan suurin puristusjännitys jää alle myötötason, muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_p$ voidaan korvata muunnetun hoikkuuden pienennetyllä arvolla seuraavasti [13,14]:

$$\bar{\lambda}_{p.red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}} \qquad (2.11)$$

missä
- $\bar{\lambda}_p$ on taso-osan muunnettu hoikkuus lausekkeen (2.10) mukaisesti
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)
- $\sigma_{com.Ed}$ on tarkasteltavan taso-osan suurimman puristusjännityksen mitoitusarvo, joka määritetään tehollisen poikkileikkauksen perusteella, kun kaikki samanaikaisesti vaikuttavat kuormat otetaan huomioon

Edellä oleva menetelmä on varmalla puolella, mutta se vaatii iteratiivisia laskelmia, missä jännityssuhde ψ määritetään jokaisella iteraatiokierroksella jännityksistä, jotka lasketaan edellisestä iteraatiokierroksesta saadun tehollisen poikkileikkauksen perusteella.

Laskettaessa poikkileikkausluokalla 4 nurjahduskestävyyttä tai kiepahduskestävyyttä, taso-osien muunnettu hoikkuus voidaan laskea lausekkeen (2.11) mukaisena pienennettynä arvona $\bar{\lambda}_{p.red}$ vain, jos $\sigma_{com.Ed}$ määritetään toisen kertaluvun mukaan ottaen huomioon kokonaisepätäydellisyydet. Muutoin tulee käyttää lausekkeen (2.10) mukaista muunnetun hoikkuuden normaalia arvoa $\bar{\lambda}_p$ [13,14].

Jos suurin puristusjännitys saavuttaa myötötason ($\sigma_{com.Ed} = f_y / \gamma_{M0}$), lausekkeen (2.11) mukainen $\bar{\lambda}_{p.red}$ palautuu takaisin muunnetuksi hoikkuudeksi $\bar{\lambda}_p$.

Eurocoden osan EN 1993-1-5 liitteessä E on esitetty taso-osan muunnetun hoikkuuden laskemiseksi myös vaihtoehtoinen menetelmä jota ei esitetä tässä käsikirjassa, koska sitä ei saa kuitenkaan käyttää tehollisen poikkileikkauksen määrittämiseksi nurjahduskestävyyden ja kiepahduskestävyyden laskennassa.

2.4.2 Tehollinen poikkileikkaus käyttörajatilassa

Käyttörajatilassa tarvittavan neliömomentin laskemiseksi määritetään tehollinen poikkileikkaus kuten murtorajatilassa, mutta käyttäen muunnettua hoikkuutta $\bar{\lambda}_{p.ser}$, joka lasketaan seuraavasti [13,14]:

$$\bar{\lambda}_{p.ser} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\frac{\sigma_{com.Ed.ser}}{f_y}} \qquad (2.12)$$

missä
- $\bar{\lambda}_p$ on taso-osan muunnettu hoikkuus lausekkeen (2.10) mukaisesti
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- $\sigma_{com.Ed.ser}$ on tarkasteltavan taso-osan suurin puristusjännitys laskettuna tehollisen poikkileikkauksen perusteella käyttörajatilan kuormilla, kun kaikki samanaikaisesti vaikuttavat kuormat otetaan huomioon

Tehollisen poikkileikkauksen perusteella laskettu tehollinen neliömomentti I_{eff} muuttuu jännevälin funktiona. Muuttuvan arvon sijasta voidaan käyttää koko jänteelle (tai tarkasteltavalle pituudelle) yhtä tehollisen neliömomentin fiktiivistä vakioarvoa I_{fic}, joka lasketaan käyttörajatilan kuormilla itseisarvoltaan suurimman kenttämomentin perusteella käyttäen seuraavaa interpolointia [11,13,14]:

$$I_{fic} = I_{gr} - \frac{\sigma_{com.gr}}{\sigma_{com.Ed.ser}} [I_{gr} - I_{eff}(\sigma_{com.Ed.ser})] \qquad (2.13)$$

missä
- I_{gr} on bruttopoikkileikkauksen neliömomentti (liite 11.1)
- $\sigma_{com.gr}$ on bruttopoikkileikkauksen suurin taivutuspuristusjännitys tarkasteltavalla jänteellä (tai tarkasteltavalla pituudella) käyttörajatilan kuormilla ja
- $I_{eff}(\sigma_{com.Ed.ser})$ on tehollisen poikkileikkauksen neliömomentti joka lasketaan käyttörajatilan kuormilla tarkasteltavalla jänteellä vaikuttavan suurimman puristusjännityksen $\sigma_{com.Ed.ser} \geq \sigma_{com.gr}$ perusteella

Käyttörajatilaa käsitellään lisää luvussa 7.

2.5 Normaalivoiman kuormittaman rakenneputken kestävyys

2.5.1 Vetokestävyys

Vedetty poikkileikkaus toimii tehollisena poikkileikkausluokasta riippumatta, joten poikkileikkauksen hoikkuudella ei ole merkitystä. Vedetyn sauvan mitoitusehto on [3,4,5]:

$$N_{Ed} \leq N_{t.Rd} \qquad (2.14)$$

missä N_{Ed} on aksiaalisesti vedetyn sauvan vetovoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$N_{t.Rd}$ on poikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo

Poikkileikkauksen vetokestävyys $N_{t.Rd}$ on pienempi seuraavista [3,4,5]:

$$N_{t.Rd} = N_{pl.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.15)$$

$$N_{t.Rd} = N_{u.Rd} = \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} \qquad (2.16)$$

missä
- $N_{pl.Rd}$ on bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo
- $N_{u.Rd}$ on nettopoikkileikkauksen kestävyyden mitoitusarvo kiinnittimien reikien kohdalla
- A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
- A_{net} on nettopoikkileikkauksen pinta-ala kiinnittimien reikien kohdalla
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku myötäämisen suhteen (taulukko 2.5)
- γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku murtumisen suhteen (taulukko 2.5)

Vaadittaessa ns. hallitun plastisoitumisen mitoitusperiaatteen noudattamista (esim. maanjäristysmitoituksessa, EN 1998), bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo $N_{pl.Rd}$ ei saa olla suurempi kuin kiinnittimien reikien kohdalla määritetty nettopoikkileikkauksen murtumiskestävyyden mitoitusarvo $N_{u.Rd}$. Eli nettopoikkileikkaus ei saa murtua ennen kuin bruttopoikkileikkaus myötää [3,4,5]. Tämä vaatimus saadaan esitettyä lausekkeiden (2.15) ja (2.16) avulla seuraavasti:

$$\frac{A_{net}}{A} \geq \frac{1}{0,9} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{f_u} \qquad (2.17)$$

Ruuvikiinnitysluokassa C (ks. EN 1993-1-8) nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden mitoitusarvo $N_{net.Rd}$ kiinnittimien reikien kohdalla lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$N_{net.Rd} = \frac{A_{net}f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.18)$$

Nettopoikkileikkauksen pinta-ala:

Poikkileikkauksen nettopinta-alaksi valitaan sen bruttopoikkileikkauksen pinta-ala vähennettynä tarkoituksenmukaisesti kaikilla reijillä ja muilla aukoilla. Yksittäisen kiinnittimen reijän vähennykseksi valitaan reijän bruttopoikkileikkauspinta-ala tarkasteltavan poikkileikkauksen tasossa. Upotetuilla (senkatuilla) reijillä upotuksen osuus otetaan huomioon [3,4,5].

Mikäli kiinnittimien reijät eivät ole limitettyjä, reikien vähennettäväksi kokonaispinta-alaksi valitaan reikien pinta-alojen suurin summa missä tahansa poikkileikkauksessa, joka on kohtisuorassa sauvan akseliin nähden (kuva 2.4, murtolinja 2).

Limitettyjen reikien tapauksessa poikkileikkauksen nettopinta-alaksi valitaan pienempi seuraavista [3,4,5]:

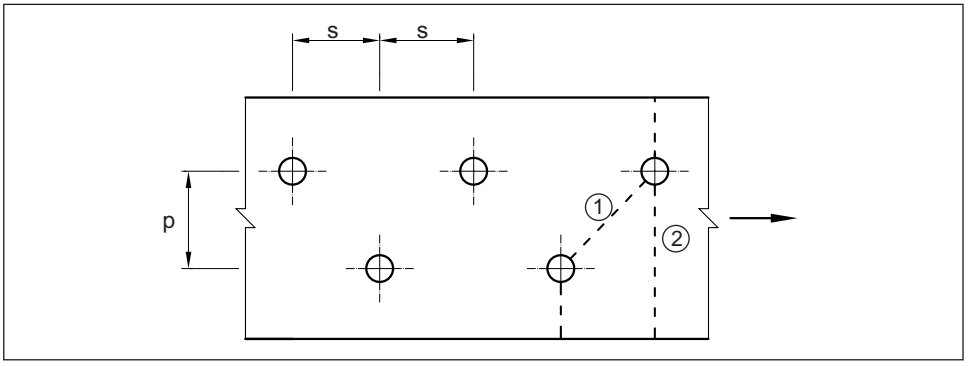
- **suora murtolinja (kuva 2.4, murtolinja 2):**

$$A_{net} = A - \sum td_0 \qquad (2.19)$$

- **limitetty murtolinja (kuva 2.4, murtolinja 1):**

$$A_{net} = A - \sum td_0 + \sum \frac{ts^2}{4p} \qquad (2.20)$$

missä
- A_{net} on nettopoikkileikkauksen pinta-ala kiinnittimien reikien kohdalla
- A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
- t on seinämänpaksuus
- d_0 on reijän halkaisija
- s on sarjaan kuuluvien kahden vierekkäisen limitetyn reijän keskiöiden välinen etäisyys sauvan akselin suunnassa
- p on kahden vierekkäisen reijän keskiöiden välinen etäisyys mitattuna kohtisuorassa suunnassa sauvan akselin suhteen



Kuva 2.4 Nettopoikkileikkauksen pinta-alan määrittäminen. Murtolinjat 1 ja 2 [3,4,5]

2.5.2 Puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)

2.5.2.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)

Puristetun sauvan poikkileikkauksen kestävyyden määrittämisessä otetaan huomioon vain poikkileikkauksen lokaalit stabiilius-ilmiöt, eli taso-osien mahdollisen lommahtamisen vaikutus kestävyyteen. Koko sauvan puristuskestävyyden määrittämisessä otetaan huomioon myös sauvan globaali stabiiliuden menetys, eli mahdollinen nurjahtaminen eri muodoissaan (kohta 2.5.3).

Puristettujen sauvojen poikkileikkauksen mitoitusehto on [3,4,5]:

$$N_{Ed} \leq N_{c.Rd} \qquad (2.21)$$

missä N_{Ed} on puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$N_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo

Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo $N_{c.Rd}$ keskeiselle tasaiselle puristukselle lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$N_{c.Rd} = N_{pl.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \textit{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 (kaikki putket)} \qquad (2.22)$$

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \qquad \textit{poikkileikkausluokassa 4 (neliö ja suorakaide)} \qquad (2.23)$$

missä $N_{pl.Rd}$ on bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo
A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
A_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala keskeisessä puristuksessa
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon puristetun ja taivutetun sauvan poikkileikkauksen kestävyydessä mikäli kiinnitin on reijässä, lukuun ottamatta standardin EN 1090 mukaisia ylisuuria tai pidennettyjä reikiä [3,4,5,29].

Epäkeskeisesti puristettujen sauvojen poikkileikkauksen kestävyys määritetään puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuskaavoilla kohdassa 2.9.1.5 esitetyn mukaisesti.

2.5.2.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)

Poikkileikkausluokan 4 pyöreillä rakenneputkilla puristuskestävyyden mitoitusehto on:

$$N_{Ed} \leq N_{c.Rd} \qquad (2.24)$$

missä N_{Ed} on puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$N_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo

Poikkileikkauksen puristuskestävyyden mitoitusarvo $N_{c.Rd}$ keskeiselle tasaiselle puristukselle määritetään poikkileikkauksen lommahduslujuuden $\chi_x f_y$ perusteella seuraavasti, kun putken kumpaankin päähän on hitsattu päätylevy tai jäykkä rengas, joka estää putken poikkileikkauksen muodon muuttumisen (tai putki on päistään hitsattu ympäröivään rakenteeseen vastaavalla tavalla) [16]:

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi_x A f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (2.25)$$

missä χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle
A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Lommahduksen kimmo-plastinen pienennystekijä χ_x lasketaan seuraavasti [16]:

$$\chi_x = 1,0 \qquad kun \ \ \bar{\lambda}_x \leq 0,2 \qquad (2.26a)$$

$$\chi_x = 1 - 0,6\frac{\bar{\lambda}_x - 0,2}{\bar{\lambda}_{pl.x} - 0,2} \qquad kun \ \ 0,2 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_{pl.x} \qquad (2.26b)$$

$$\chi_x = \frac{\alpha_x}{\bar{\lambda}_x^2} \qquad kun \ \ \bar{\lambda}_x \geq \bar{\lambda}_{pl.x} \qquad (2.26c)$$

missä α_x on kimmoisella alueella epätarkkuudesta aiheutuva pienennystekijä lommahdukselle
$\bar{\lambda}_x$ on muunnettu hoikkuus
$\bar{\lambda}_{pl.x}$ on muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo

Epätarkkuuden pienennystekijä α_x saadaan kaavasta [16]:

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k / t)^{1,44}} \qquad (2.27)$$

missä Δw_k on epätarkkuusamplitudin ominaisarvo
t on seinämänpaksuus

Lausekkeessa (2.27) tarvittava epätarkkuusamplitudin ominaisarvo Δw_k lasketaan seuraavasti [16]:

$$\Delta w_k = \frac{\sqrt{r_m t}}{Q} \qquad (2.28)$$

$$r_m = \frac{d - t}{2} \qquad (2.29)$$

missä r_m on putken seinämän keskilinjan säde
t on seinämänpaksuus
d on putken ulkohalkaisija
Q on putken valmistustarkkuuden mukainen laskentaparametri joka saadaan taulukoista 2.11 ja 2.12.

Valmistustarkkuuden laskentaparametri Q määräytyy standardin EN 1090-2 mukaisista pyöreän sylinterin valmistustoleranssien laatuluokista A...C (A on paras) [29]. Pyöreillä rakenneputkilla merkitsevin muototoleranssi on tällöin yleensä pyöreyspoikkeama. SSAB:n putket täyttävät laatuluokan B pyöreyspoikkeaman kun ulkohalkaisija on $d \leq 400$ mm ja $d/t \leq 100$ (taulukot 1.2 ja 2.12), jolloin laskentaparametri Q saa arvon $Q = 25$ (taulukko 2.11). Muille mitoille valmistustoleranssin sovellettava laatuluokka tulee selvittää tapauskohtaisesti.

Muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo $\bar{\lambda}_{pl.x}$ on [16]:

$$\bar{\lambda}_{pl.x} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{0,4}} \qquad (2.30)$$

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_x$ on [16]:

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \qquad (2.31)$$

missä f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
σ_{cr} on kimmoinen kriittinen lommahdusjännitys

Pyöreän putken kimmoinen kriittinen lommahdusjännitys σ_{cr} lasketaan seuraavasti [16]:

$$\sigma_{cr} = \frac{E}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \cdot C_x \frac{t}{r_m} = 0,605 E C_x \frac{t}{r_m} \qquad (2.32)$$

missä E on kimmokerroin
t on seinämänpaksuus
r_m on putken seinämän keskilinjan säde

Eurocoden osa EN 1993-1-6 määrittelee tekijälle C_x lukuarvon tarkasteltavan sylinterimäisen rakenteen pituuden funktiona. Käytännön rakenneputkirakenteissa pyöreän putken pituus on yleensä suurempi kuin $(1...2)\times d$, jolloin Eurocoden mukaisesti päädytään käyttämään arvoa C_x = 0,6 . Samaa arvoa voi käyttää myös lyhyemmillä pituuksilla varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena.

Taulukko 2.11 Valmistustarkkuuden laskentaparametri Q pyöreän putken valmistustoleranssien eri laatuluokille [16]

Valmistustoleranssin laatuluokka	Kuvaus	Q
Luokka A	Erinomainen	40
Luokka B	Hyvä	25
Luokka C	Tavallinen	16

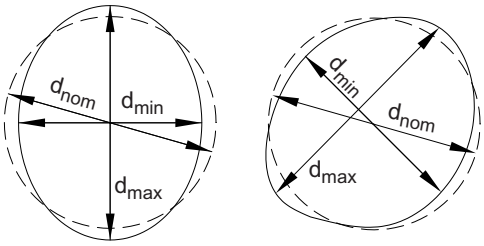
Taulukko 2.12 Sallitut pyöreyspoikkeamat valmistustoleranssin eri laatuluokille [29]

Valmistustoleranssin laatuluokka	Sallittu pyöreyspoikkeama Δ a)		
	Sisähalkaisija		
	$d_i \le 0{,}50$ m b)	0,5 m < d_i < 1,25 m b)	$d_i \ge 1{,}25$ m b)
Luokka A	$\Delta = \pm\, 0{,}014$	$\Delta = \pm\,[0{,}007 + 0{,}0093(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm\, 0{,}007$
Luokka B	$\Delta = \pm\, 0{,}020$	$\Delta = \pm\,[0{,}010 + 0{,}0133(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm\, 0{,}010$
Luokka C	$\Delta = \pm\, 0{,}030$	$\Delta = \pm\,[0{,}015 + 0{,}0200(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm\, 0{,}015$

a) Pyöreyspoikkeama:
Sisähalkaisijan mitattujen maksimi- ja minimiarvojen erotus suhteessa sisähalkaisijan nimellisarvoon:

$$\Delta = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}}$$

b) d_i on sisähalkaisijan nimellisarvo metreissä



Esimerkki 2.1

Lasketaan rakenneputken $200\times100\times5$ poikkileikkauksen puristuskestävyys. Poikkileikkaukseen kohdistuu pelkkä tasainen puristus.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 2836\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

Tarkastetaan poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):
Laippa:

$b/t = 100/5 = 20,0 \le 27,7 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Uuma:

$h/t = 200/5 = 40,0 > 34,4 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 4*

Koko poikkileikkaus kuuluu määräävimmän taso-osan mukaisesti poikkileikkausluokkaan 4.

Lasketaan tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala:
Laipat ovat kokonaan tehokkaat.

Uumat:

$$\bar{b} = h - 3t = 200 - 3 \cdot 5 = 185 \text{ mm}$$

$$\psi = 1, \; k_\sigma = 4,0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{(200 - 3 \cdot 5)/5}{28,4 \cdot \sqrt{235/420} \cdot \sqrt{4,0}} = 0,8709$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,8709 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055 \cdot 1} = 0,6732$$

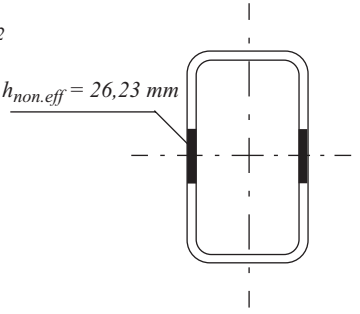
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,8709 - 0,055 \cdot 4}{0,8709^2} = 0,8582 \le 1,0$$

$$h_{eff} = \rho\bar{b} = 0,8582 \cdot 185 = 158,8 \text{ mm}$$

Uuman tehoton alue ja tehoton pinta-ala ovat tällöin:

$$h_{non.eff} = (1-\rho)\bar{b} = (1 - 0,8582) \cdot 185 = 26,23 \text{ mm}$$

$$A_{non.eff} = 2 \cdot h_{non.eff} \cdot t = 2 \cdot 26,23 \cdot 5 = 262,3 \text{ mm}^2$$



Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala on:

$$A_{eff} = A - A_{non.eff} = 2836 - 262,3 = 2574 \text{ mm}^2$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyys on:

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2574 \cdot 420}{1,0} = 1081 \text{ kN}$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, puristuskestävyydeksi saataisiin 945,0 kN (PL4, A_{eff} = 2662 mm^2). Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 poikkileikkaus, jolloin poikkileikkaus ei ole kokonaan tehollinen ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 alentaa poikkileikkauksen tehollisuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa puristuskestävyyttä tässä 14 %.

Esimerkki 2.2

Lasketaan pyöreän rakenneputken 323,9×5 poikkileikkauksen puristuskestävyys. Poikkileikkaukseen kohdistuu pelkkä tasainen puristus.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 5009\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}1$ *(poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)*

Tarkastetaan poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

$$d/t = 323,9/5 = 64,8 > 50,4 \qquad \Rightarrow \text{poikkileikkausluokka 4}$$

Putken kriittinen lommahdusjännitys ja muunnettu hoikkuus ovat:

$$\sigma_{cr} = 0,605EC_x\frac{t}{r_m} = 0,605 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 0,6 \cdot \frac{5}{159,5} = 2390\ N/mm^2$$

$$\bar{\lambda}_x = \sqrt{f_y/\sigma_{cr}} = \sqrt{420/2390} = 0,4192$$

Putken mitat ovat $d \leq 400$ mm ja $d/t \leq 100$ jolloin putki täyttää valmistustoleranssin laatuluokan B vaatimukset (taulukot 1.2 ja 2.12)

$$\Rightarrow Q = 25 \qquad \text{(taulukko 2.11)}$$

$$\Delta w_k = \frac{\sqrt{r_m t}}{Q} = \frac{\sqrt{159,5 \cdot 5}}{25} = 1,130$$

$$\alpha_x = \frac{0,62}{1 + 1,91(\Delta w_k/t)^{1,44}} = \frac{0,62}{1 + 1,91 \cdot (1,130/5)^{1,44}} = 0,5064$$

$$\bar{\lambda}_{p1.x} = \sqrt{\frac{\alpha_x}{0,4}} = \sqrt{\frac{0,5064}{0,4}} = 1,125$$

$$0,2 < \bar{\lambda}_x < \bar{\lambda}_{p1.x}$$

$\Rightarrow$

$$\chi_x = 1 - 0,6\frac{\bar{\lambda}_x - 0,2}{\bar{\lambda}_{p1.x} - 0,2} = 1 - 0,6 \cdot \frac{0,4192 - 0,2}{1,125 - 0,2} = 0,8578$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyydeksi saadaan lopulta:

$$N_{c.Rd} = \frac{\chi_x A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,8578 \cdot 5009 \cdot 420}{1,1} = 1641\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, puristuskestävyydeksi saataisiin 1422 kN. Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 pyöreä poikkileikkaus ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa poikkileikkauksen muunnettua hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa puristuskestävyyttä tässä 15 %.

2.5.3 Nurjahduskestävyys

2.5.3.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien nurjahduskestävyys

Rakenneputki soveltuu erinomaisesti puristussauvaksi, koska rakenneputken materiaali sijaitsee tehokkaasti kaukana poikkileikkauksen keskipisteestä. Suuren vääntöjäykkyyden ansiosta vääntönurjahdusta tai taivutusvääntönurjahdusta (eli avaruusnurjahdusta) ei tarvitse ottaa huomioon. Rakenneputkilla riittää, että tarkastetaan taivutusnurjahdus (eli tasonurjahdus) kummankin pääjäyhyysakselin suhteen.

Puristetun sauvan mitoitusehto nurjahduksessa on [3,4,5]:

$$N_{Ed} \le N_{b.Rd} \qquad (2.33)$$

missä N_{Ed} on aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
$N_{b.Rd}$ on aksiaalisesti puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

Nurjahduskestävyyttä ei tarvitse määrittää, jos sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda} \le 0{,}2$ tai jos $N_{Ed}/N_{cr} \le 0{,}04$ [3,4,5]. Muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}$ ja kimmoteorian mukaisen kriittisen nurjahduskuorman N_{cr} laskeminen esitetään jäljempänä.

Epäkeskeisesti puristettujen sauvojen kestävyys määritetään puristuksen ja taivutuksen yhteisvaikutuskaavoilla kohdassa 2.10.1 esitetyn mukaisesti.

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b.Rd}$ kullekin kyseeseen tulevalle nurjahdusmuodolle ja -suunnalle lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \textit{poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 (kaikki putket)} \qquad (2.34)$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} \qquad \textit{poikkileikkausluokassa 4 (neliö ja suorakaide)} \qquad (2.35)$$

missä χ on kyseeseen tulevan nurjahduskestävyyden pienennystekijä
A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
A_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala keskeisessä puristuksessa
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Pinta-aloja A ja A_{eff} laskettaessa pilarin päissä olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon [3,4,5].

Lausekkeissa (2.34) ja (2.35) oleva pienennystekijä χ lasketaan seuraavasti:

$$\chi = 1,0 \qquad kun \ \bar{\lambda} \le 0,2 \qquad (2.36a)$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \le 1,0 \qquad kun \ \bar{\lambda} > 0,2 \qquad (2.36b)$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \qquad (2.37)$$

missä α on sovellettavan nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä (kylmämuovatut rakenneputket : α = 0,49)

$\bar{\lambda}$ on sauvan muunnettu hoikkuus

Epätarkkuustekijä α määräytyy sovellettavan nurjahduskäyrän (eli nurjahdusluokan) perusteella. Eurocode 3:n mukaan kylmämuovatuilla rakenneputkilla käytetään kaikissa suunnissa kaikilla lujuusluokilla S235 - S460 aina nurjahduskäyrää c, jolloin α = 0,49 [3,4,5]. Puristetun sauvan alkukäyryyden tulee tällöin olla standardissa EN 1090-2 esitettyjen asennustoleranssien sisällä (luku 8).

Lausekkeissa (2.36) - (2.37) tarvittava sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}$ lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} \qquad poikkileikkausluokissa\ 1,\ 2\ ja\ 3\ (kaikki\ putket) \qquad (2.38)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} \qquad poikkileikkausluokassa\ 4\ (neliö\ ja\ suorakaide) \qquad (2.39)$$

missä A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)

A_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen pinta-ala keskeisessä puristuksessa

f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus

N_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma kyseeseen tulevalle nurjahdusmuodolle ja -suunnalle

Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma N_{cr} lasketaan taivutusnurjahdukselle (flexural buckling) seuraavasti, jolloin poikkileikkauksen ominaisuudet määritetään kaikilla poikkileikkausluokilla bruttopoikkileikkauksen mukaan [3,4,5]:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 EA}{(L_{cr}/i)^2} \qquad (2.40)$$

missä E on kimmokerroin

I on bruttopoikkileikkauksen neliömomentti kyseeseen tulevan akselin suhteen (liite 11.1)

L_{cr} on sauvan nurjahduspituus taivutusnurjahduksessa tarkasteltavaan suuntaan

A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)

i on bruttopoikkileikkauksen hitaussäde kyseeseen tulevan akselin suhteen (liite 11.1)

Sauvan nurjahduspituus L_{cr} eri nurjahdusmuodoille ja -suunnille määritetään ottaen huomioon sauvan päiden kiinnitysaste kyseeseen tulevan nurjahdusmuodon ja -suunnan suhteen. Yleensä on kuitenkin varmalla puolella käyttää nurjahduspituutena ristikkorakenteissa sauvan todellista pituutta ja kehärakenteissa teoreettista nurjahduspituutta ilman liitosten jäykkyyden huomioon ottamista. Nurjahduspituuden määritystä käsitellään tarkemmin luvussa 7.

2.5.3.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken nurjahduskestävyys

Poikkileikkausluokan 4 pyöreillä rakenneputkilla nurjahduskestävyyden mitoitusehto on:

$$N_{Ed} \leq N_{b.Rd} \qquad (2.41)$$

missä N_{Ed} on aksiaalisesti puristetun sauvan puristusvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

$N_{b.Rd}$ on aksiaalisesti puristetun sauvan nurjahduskestävyyden mitoitusarvo

Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo $N_{b.Rd}$ lasketaan poikkileikkausluokan 4 pyöreille rakenneputkille seuraavasti:

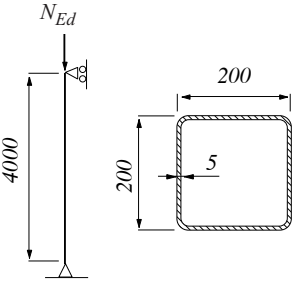
$$N_{b.Rd} = \chi N_{c.Rd} \qquad (2.42)$$

missä $N_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen puristuskestävyys kohdan 2.5.2.2 mukaisesti

χ on taivutusnurjahduksen pienennystekijä

Taivutusnurjahduksen pienennystekijä χ lasketaan samalla tavalla kuin poikkileikkausluokilla 1...3 kohdassa 2.5.3.1 (poikkileikkausluokan 4 pyöreän putken poikkileikkaus on aina kokonaan tehollinen), mutta nyt lausekkeessa (2.38) myötölujuus f_y korvataan poikkileikkauksen lommahduslujuudella $\chi_x f_y$, missä lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä χ_x lasketaan kohdan 2.5.2.2 mukaisesti.

Esimerkki 2.3



Lasketaan rakenneputken 200×200×5 puristuskestävyys. Rakenne on nivelellisesti tuettu molemmista päistä ja nurjahduspituus on 4 m kumpaankin suuntaan.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 3836\ mm^2$
$I = 2410 \cdot 10^4\ mm^4$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1,0$
$\gamma_{M1} = 1,0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Uuma ja laippa:
$h/t = b/t = 200/5 = 40,0 > 34,4 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 4*

Lasketaan putken tehollinen poikkileikkaus, koska putki kuuluu poikkileikkausluokkaan 4:

$$\psi = 1\ ,\ k_\sigma = 4,0$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{(b-3t)/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{(200-3\cdot 5)/5}{28,4\cdot\sqrt{235/420}\cdot\sqrt{4,0}} = 0,8709$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,8709 > 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\psi} = 0,5 + \sqrt{0,085 - 0,055\cdot 1} = 0,6732$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,8709 - 0,055\cdot 4}{0,8709^2} = 0,8582 \le 1,0$$

Poikkileikkauksen tehollisten ja tehottomien osien mitat ovat:

$$b_{eff} = \rho\bar{b} = 0,8582\cdot(200-3\cdot 5) = 158,8\ mm$$

$$b_{non.eff} = (b-3t) - b_{eff} = (200-3\cdot 5) - 158,8 = 26,2\ mm$$

Tehollisesta poikkileikkauksesta lasketaan edelleen tehollinen pinta-ala:

$$A_{eff} = A - (4\cdot b_{non.eff}\cdot t) = 3836 - (4\cdot 26,2\cdot 5) = 3312\ mm^2$$

Poikkileikkauksen lujuuteen perustuva kestävyys:

$$N_{c.Rd} = \frac{A_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3312\cdot 420}{1,0} = 1391\ kN$$

Nyt poikkileikkauksen paikallinen lommahtaminen on otettu huomioon ja voidaan siirtyä tarkastelemaan putken nurjahduskestävyyttä.

Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma N_{cr} lasketaan bruttopoikkileikkauksen arvoilla myös poikkileikkausluokassa 4:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 2410 \cdot 10^4}{4000^2} = 3122\ kN$$

Sauvan hoikkuus on:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3312 \cdot 420}{3122 \cdot 10^3}} = 0,6675 > 0,2$$

Kylmämuovatut rakenneputket kuuluvat nurjahdusluokkaan c (jolloin $\alpha = 0,49$) ja saadaan:

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,6675 - 0,2) + 0,6675^2] = 0,8373$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,8373 + \sqrt{0,8373^2 - 0,6675^2}} = 0,7447 \leq 1,0$$

Nurjahduskestävyydeksi saadaan lopulta:

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A_{eff} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,7447 \cdot 3312 \cdot 420}{1,0} = 1036\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, nurjahduskestävyydeksi saataisiin 950,5 kN. Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 poikkileikkaus, jolloin poikkileikkaus ei ole kokonaan tehollinen ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 alentaa poikkileikkauksen tehollisuutta entisestään ja lisäksi suurentaa nurjahduksessa koko sauvan muunnettua hoikkuutta. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa nurjahduskestävyyttä tässä 9 %.

Esimerkki 2.4

Lasketaan rakenneputken 200×200×8 puristuskestävyys. Rakenne on nivelellisesti tuettu molemmista päistä ja nurjahduspituus on 4 m kumpaankin suuntaan.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 5924\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$I = 3566 \cdot 10^4\ mm^4$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1,0$
$\gamma_{M1} = 1,0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Uuma ja laippa:
$h/t = b/t = 200/8 = 25{,}0 \leq 27{,}7 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Poikkileikkausluokissa 1,2 ja 3 ei tarvitse laskea tehollista poikkileikkausta, vaan koko poikkileikkaus on tehollinen.

Poikkileikkauksen lujuuteen perustuva kestävyys:

$$N_{c.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5924 \cdot 420}{1,0} = 2488 \text{ kN}$$

Siirrytään putken nurjahdustarkasteluun.

Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma on:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 3566 \cdot 10^4}{4000^2} = 4619 \text{ kN}$$

Sauvan hoikkuus on:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{5924 \cdot 420}{4619 \cdot 10^3}} = 0,7339 > 0,2$$

Lasketaan nurjahduksen pienennystekijä (nurjahdusluokka c: $\alpha = 0{,}49$*):*

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,7339 - 0,2) + 0,7339^2] = 0,9001$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,9001 + \sqrt{0,9001^2 - 0,7339^2}} = 0,7036 \leq 1,0$$

Nurjahduskestävyydeksi saadaan lopulta:

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,7036 \cdot 5924 \cdot 420}{1,0} = 1751 \text{ kN}$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, nurjahduskestävyydeksi saataisiin 1557 kN. Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 1 poikkileikkaus, jolloin poikkileikkaus on kokonaan tehollinen. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa kuitenkin nurjahduksessa koko sauvan muunnettua hoikkuutta. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa nurjahduskestävyyttä tässä 12 %.

Esimerkki 2.5

Lasketaan esimerkin 2.2 pyöreän rakenneputken 323,9×5 puristuskestävyys. Poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 4. Rakenne on nivelellisesti tuettu molemmista päistä ja nurjahduspituus on 4 m kumpaankin suuntaan.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 5009\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$I = 6369 \cdot 10^4\ mm^4$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}1$ *(poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)*

Poikkileikkauksen puristuskestävyys $N_{c.Rd}$ *ja lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä* χ_x *ovat nyt samat kuin esimerkissä 2.2:*

$\chi_x = 0{,}8578$
$N_{c.Rd} = 1641\ kN$

Siirrytään putken nurjahdustarkasteluun.

Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma on:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 6369 \cdot 10^4}{4000^2} = 8250\ kN$$

Sauvan hoikkuus on:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\chi_x A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0{,}8578 \cdot 5009 \cdot 420}{8250 \cdot 10^3}} = 0{,}4677 > 0{,}2$$

Lasketaan nurjahduksen pienennystekijä (nurjahdusluokka c: $\alpha = 0{,}49$*):*

$$\Phi = 0{,}5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0{,}2) + \bar{\lambda}^2] = 0{,}5 \cdot [1 + 0{,}49 \cdot (0{,}4677 - 0{,}2) + 0{,}4677^2] = 0{,}6750$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0{,}6750 + \sqrt{0{,}6750^2 - 0{,}4677^2}} = 0{,}8608 \le 1{,}0$$

Nurjahduskestävyydeksi saadaan lopulta:

$$N_{b.Rd} = \chi \cdot N_{c.Rd} = 0{,}8608 \cdot 1641 = 1413\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, nurjahduskestävyydeksi saataisiin 1249 kN. Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 pyöreä poikkileikkaus ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa poikkileikkauksen muunnettua hoikkuutta entisestään ja lisäksi suurentaa nurjahduksessa koko sauvan muunnettua hoikkuutta. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa nurjahduskestävyyttä tässä 13 %.

2.6 Taivutusmomentin kuormittaman rakenneputken kestävyys

2.6.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreiden rakenneputkien taivutuskestävyys

Rakenneputki soveltuu hyvin taivutettuihin rakenteisiin. Erityisen edullinen rakenneputki on silloin, kun siihen kohdistuu useamman akselin suuntaisia kuormituksia. Heikomman jäykkyyden suunnassa rakenneputken taivutuskestävyys on I-profiileihin verrattuna parempi. Rakenteen vaakasuuntainen tuenta voidaan rakenneputkilla toteuttaa käyttäen pidempää tukiväliä.

Taivutusmomentin kuormittaman poikkileikkauksen mitoitusehto on [3,4,5]:

$$M_{Ed} \leq M_{c.Rd} \qquad (2.43)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa, pyöreillä rakenneputkilla taivutusmomenttien $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ aiheuttama kokonaismomentti on $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$

$M_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{c.Rd}$ lasketaan eri poikkileikkausluokissa seuraavasti [3,4,5]:

$$M_{c.Rd} = M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \textit{poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (kaikki putket)} \qquad (2.44)$$

$$M_{c.Rd} = M_{el.Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \textit{poikkileikkausluokassa 3 (kaikki putket)} \qquad (2.45)$$

$$M_{c.Rd} = M_{eff.Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \textit{poikkileikkausluokassa 4 (neliö ja suorakaide)} \qquad (2.46)$$

missä W_{pl} on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
W_{el} on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
W_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Plastisuusteorian ja kimmoteorian mukaiset taivutusvastukset saadaan rakenneputkille liitteen 11.1 taulukoista. Poikkileikkausluokan 4 tehollinen taivutusvastus lasketaan seuraavasti:

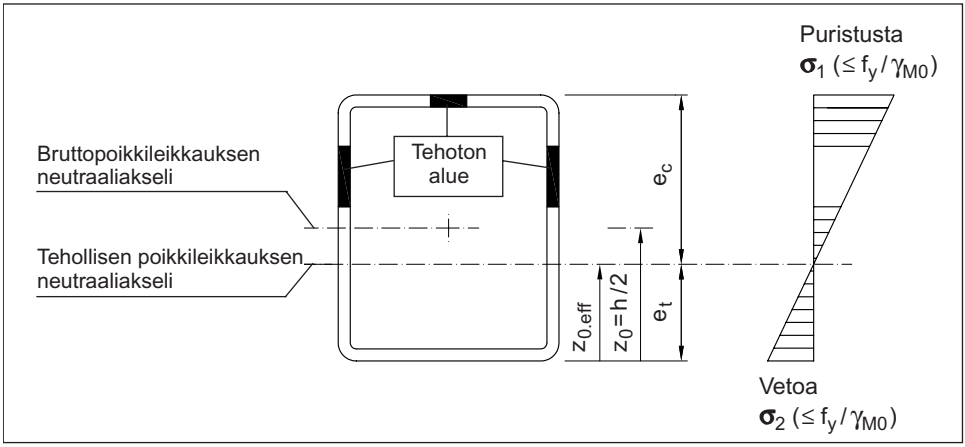
$$W_{eff.c} = \frac{I_{eff}}{e_c} \qquad (2.47)$$

$$W_{eff.t} = \frac{I_{eff}}{e_t} \qquad (2.48)$$

$$W_{eff} = min[W_{eff.c}\ , W_{eff.t}] \qquad (2.49)$$

missä $W_{eff.c}$ on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus puristetun puolen suhteen
$W_{eff.t}$ on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus vedetyn puolen suhteen
I_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen neliömomentti
e_c on tehollisen poikkileikkauksen puristetun laipan ulomman reunan ja tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakselin välinen etäisyys
e_t on tehollisen poikkileikkauksen vedetyn laipan ulomman reunan ja tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakselin välinen etäisyys

Tehollisen poikkileikkauksen määrittäminen on esitetty kohdassa 2.4.



Kuva 2.5 Taivutusmomentin kuormittama poikkileikkausluokan 4 tehollinen poikkileikkaus

Kun poikkileikkaukseen vaikuttaa pelkkä taivutus, tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli sijaitsee tehollisen (eli 'reijällisen') poikkileikkauksen painopisteessä, kuva 2.5. Taivutusmomentti aiheuttaa poikkileikkausluokassa 4 neutraaliakselin siirtymisen myös kaksoissymmetrisellä profiililla. Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakselin paikka voidaan laskea neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla helpoiten seuraavasti, kun poikkileikkaukseen vaikuttaa pelkkä taivutus (muussa tapauksessa neutraaliakselin paikka on määritettävä tehollisen poikkileikkauksen voimatasapainoehdosta $\Sigma F = N_{Ed}$):

$$z_{0.eff} = \frac{Az_0 - \sum[A_{non.eff.i} \cdot z_{non.eff.i}]}{A - \sum A_{non.eff.i}} \qquad (2.50)$$

missä
- A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
- z_0 on bruttopoikkileikkauksen neutraaliakselin z-koordinaatti ($z_0 = h/2$)
- $A_{non.eff.i}$ on poikkileikkauksen tehoton pinta-alan osa
- $z_{non.eff.i}$ on tarkasteltavan tehottoman pinta-alan osan painopisteen z-koordinaatti

Kun tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakselin paikka tunnetaan, tehollinen neliömomentti voidaan laskea seuraavalla Steinerin sääntöön pohjautuvalla lausekkeella:

$$I_{eff} = I + A(z_0 - z_{0.eff})^2 - \sum I_{non.eff.i} - \sum[A_{non.eff.i}(z_{non.eff.i} - z_{0.eff})^2] \qquad (2.51)$$

missä
- I on bruttopoikkileikkauksen neliömomentti (liite 11.1)
- A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
- z_0 on bruttopoikkileikkauksen neutraaliakselin z-koordinaatti ($z_0 = h/2$)
- $z_{0.eff}$ on tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakselin z-koordinaatti lausekkeesta (2.50)
- $I_{non.eff.i}$ on tarkasteltavan tehottoman osan neliömomentti oman painopisteensä suhteen (suorakaiteen muotoisella poikkileikkauksen osalla $I = ab^3/12$, missä a on suorakaiteen leveys ja b on suorakaiteen korkeus)
- $A_{non.eff.i}$ on tarkasteltavan tehottoman osan pinta-ala
- $z_{non.eff.i}$ on tarkasteltavan tehottoman osan painopisteen z-koordinaatti

2.6.2 Reikien vaikutus taivutuskestävyyteen

Vedetyssä laipassa olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon, jos laipan nettopoikkileikkauksen murtumiskestävyyden mitoitusarvo on vähintään yhtäsuuri kuin laipan bruttopoikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen kestävyyden mitoitusarvo [3,4,5]:

$$\frac{0,9A_{f.net}f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.52)$$

missä
- $A_{f.net}$ on vedetyn laipan nettopinta-ala
- f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus
- γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku murtumisen suhteen (taulukko 2.5)
- A_f on vedetyn laipan bruttopinta-ala, rakenneputkella $A_f = 0,5 \cdot [A - 2(h - 3t)t]$

f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku myötäämisen suhteen (taulukko 2.5)

Lauseke (2.52) voidaan esittää myös seuraavassa muodossa (vrt. ehto (2.17)):

$$\frac{A_{f.net}}{A_f} \geq \frac{1}{0,9} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{f_u} \qquad (2.53)$$

Ehto takaa ns. hallitun plastisoitumisen mitoitusperiaatteen mukaisen toiminnan, vrt. kohta 2.5.1.

Jos ehto ei täyty, vedetyn laipan poikkipinta-alaa pienennetään laskelmissa niin paljon, että ehto täyttyy. Vaihtoehtoisesti voidaan varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena käyttää laskelmissa bruttopoikkileikkaukselle pienennettyä taivutuskestävyyttä seuraavasti:

$$M_{red.c.Rd} = k_{red} \cdot M_{c.Rd} \qquad (2.54)$$

$$k_{red} = 0,9 \cdot \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M2}} \cdot \frac{f_u}{f_y} \cdot \frac{A_{f.net}}{A_f} \qquad mutta \;\; k_{red} \leq 1,0 \qquad (2.55)$$

missä $M_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo bruttopoikkileikkaukselle

Uuman vedetyllä alueella olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon, jos vastaava vedettyä aluetta koskeva ehto (2.52) on voimassa koko vedetyllä alueella. Vedetty alue koostuu vedetystä laipasta ja uuman vedetystä osasta.

Puristetulla alueella olevia kiinnittimien reikiä, mikäli kiinnitin on reijässä, ei tarvitse ottaa huomioon elleivät reijät ole standardin EN 1090 mukaisia ylisuuria tai pidennettyjä reikiä [3,4,5,29].

2.6.3 Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken taivutuskestävyys

Poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{c.Rd}$ lasketaan poikkileikkausluokan 4 pyöreälle putkelle lommahduslujuuden $\chi_x f_y$ perusteella seuraavasti:

$$M_{c.Rd} = \frac{\chi_x W_{el} f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (2.56)$$

missä χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kohdan 2.5.2.2 mukaisesti
W_{el} on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

2.6.4 Taivutuskestävyys kahden akselin suhteen

2.6.4.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2

Kun leikkausvoimaa ja normaalivoimaa ei ole, mitoitusehto kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa on poikkileikkausluokissa 1 ja 2 [3,4,5]:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{pl.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{pl.z.Rd}}\right]^{\beta} \leq 1,0 \qquad (2.57)$$

missä $\alpha = \beta = 1{,}66$ (neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket)

$\alpha = \beta = 2$ (pyöreät rakenneputket)

ja $M_{pl.y.Rd}$ ja $M_{pl.z.Rd}$ lasketaan kohdassa 2.6.1 esitetyn mukaisesti.

2.6.4.2 Poikkileikkausluokka 3

Kun leikkausvoimaa ei ole, aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ ei saa ylittää myötölujuuden mitoitusarvoa poikkileikkauksen missään kohdassa [3,4,5]:

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.58)$$

missä f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus

γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Kiinnittimien reijät otetaan tarvittaessa huomioon, ks. kohta 2.6.2.

Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla $\sigma_{x.Ed}$ lasketaan poikkileikkauksen tarkasteltavassa kohdassa ensin kummankin taivutusmomentin $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ osalta erikseen, jonka jälkeen kummankin taivutusmomentin aiheuttamat jännitykset summataan. Käytännön laskelmissa ehto (2.58) voidaan korvata hyväksikäyttöasteiden lineaarisella summalla seuraavasti:

$$\frac{M_{y.Ed}}{M_{el.y.Rd}} + \frac{M_{z.Ed}}{M_{el.z.Rd}} \leq 1,0 \qquad \textit{neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket} \qquad (2.59)$$

Pyöreillä putkilla $\sigma_{x.Ed}$ voidaan laskea suoraan momenttien $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ aiheuttamalla kokonaismomentilla, joka lasketaan vektorisummana (jolloin tilanne palautuu taivutukseksi yhden akselin suhteen):

$$M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2} \qquad \textit{pyöreät rakenneputket} \qquad (2.60)$$

2.6.4.3 Poikkileikkausluokka 4

Kun leikkausvoimaa ei ole, neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla tarkastetaan, että aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ ei ylitä myötölujuuden mitoitusarvoa poikkileikkauksen missään kohdassa [3,4,5]:

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.61)$$

missä f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ määritetään poikkileikkausluokassa 4 tehollisen poikkileikkauksen perusteella.

Kiinnittimien reijät otetaan tarvittaessa huomioon, ks. kohta 2.6.2.

Pyöreillä putkilla tarkastetaan bruttopoikkileikkausta ja lausekkeen (2.60) mukaista kokonaismomenttia $M_{tot.Ed}$ käyttäen, että aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ ei ylitä putken lommahduslujuuden mitoitusarvoa poikkileikkauksen missään kohdassa:

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{\chi_x f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (2.62)$$

missä χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle kohdan 2.5.2.2 mukaisesti
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Esimerkki 2.6
Poikkileikkausluokka 1.

Lasketaan rakenneputken $140 \times 140 \times 6$ taivutuskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_{pl} = 155{,}3 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:
$b/t = 140/6 = 23{,}3 \leq 27{,}7$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Uuma:

$h/t = 140/6 = 23,3 \leq 56,9$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 1, joten taivutuskestävyys voidaan laskea poikkileikkauksen plastisen taivutusvastuksen perusteella.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on:

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{155,3 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 65,2 \text{ kNm}$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, taivutuskestävyydeksi saataisiin 55,1 kNm. Kummassakin tapauksessa kyseessä on taivutuksen suhteen PL-luokan 1 poikkileikkaus, jolloin taivutuskestävyys voidaan laskea plastisen taivutuskestävyyden $M_{pl.Rd}$ mukaisena. Myötölujuuden kasvattaminen S355 → S420 päästään tällöin hyödyntämään kestävyydessä täysimääräisesti (= + 18 %).

Taivutuskestävyydet ja taivutusvastukset on esitetty myös liitteen 11.1 taulukoissa.

Esimerkki 2.7
Poikkileikkausluokka 2.

Lasketaan rakenneputken 150×150×5 taivutuskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_{pl} = 153,0 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420 \text{ N/mm}^2$
$\gamma_{M0} = 1,0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:

$b/t = 150/5 = 30,0 \leq 31,4$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 2*

Uuma:

$h/t = 150/5 = 30,0 \leq 56,9$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Koko poikkileikkaus kuuluu määräävimmän taso-osan mukaisesti poikkileikkausluokkaan 2, joten taivutuskestävyys voidaan laskea poikkileikkauksen plastisen taivutusvastuksen perusteella.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on:

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{153,0 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 64,3 \text{ kNm}$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, taivutuskestävyydeksi saataisiin 54,3 kNm. Kummassakin tapauksessa kyseessä on taivutuksen suhteen PL-luokan 2 poikkileikkaus, jolloin taivutuskestävyys voidaan laskea plastisen taivutuskestävyyden $M_{pl.Rd}$ mukaisena. Myötölujuuden kasvattaminen S355 → S420 päästään tällöin hyödyntämään kestävyydessä täysimääräisesti (= + 18 %).

Esimerkki 2.8
Poikkileikkausluokka 3.

Lasketaan rakenneputken 160×160×5 taivutuskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_{el} = 150{,}3 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420 \text{ N/mm}^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:

$b/t = 160/5 = 32,0 \leq 34,4$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 3*

Uuma:

$h/t = 160/5 = 32,0 \leq 56,9$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Koko poikkileikkaus kuuluu määräävimmän taso-osan mukaisesti poikkileikkausluokkaan 3, joten taivutuskestävyys lasketaan poikkileikkauksen kimmoisen taivutusvastuksen perusteella.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on:

$$M_{el.Rd} = \frac{W_{el} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{150,3 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 63,1 \text{ kNm}$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, poikkileikkauksen havaittaisiin täyttävän PL-luokan 2 vaatimukset. Lujuusluokan S355 mukaisena poikkileikkauksen muodonmuutoskyky olisi siis riittävä, että taivutuskestävyys voidaan määrittää plastisen taivutuskestävyyden $M_{pl.Rd}$ mukaisena, jolloin taivutuskestävyydeksi saadaan 62,2 kNm. Havaitaan, että tilanteissa joissa myötölujuuden muuttaminen aiheuttaa poikkileikkausluoki-

tuksessa PL3/PL2-muutoksen, ei taivutuskestävyydessä juurikaan ole eroa lujuusluokkien S420 ja S355 välillä. Käytettävältä rakenneosalta saatetaan kuitenkin joissakin tilanteissa vaatia poikkileikkausluokitusta PL1 tai PL2 (esim. rakenneputkien ristikkoliitokset, ks. tarkemmin luku 3). Jos kooltaan muuten sopivan putken mittasuhteet sattuvat olemaan sellaiset, että poikkileikkausluokkavaatimus ei toteudu S420 mukaisena, voidaan double grade putki silti saada täyttämään tarvittavat ehdot mitoittamalla se tällöin lujuusluokkaan S355 perustuen.

Esimerkki 2.9
Poikkileikkausluokan 4 neliön muotoinen rakenneputki.

Lasketaan rakenneputken $200 \times 200 \times 5$ taivutuskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 3836\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$I = 2410 \cdot 10^4\ mm^4$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:

$b/t = 200/5 = 40,0 > 34,4$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 4*

Uuma:

$h/t = 200/5 = 40,0 \leq 56,9$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Uuma kuuluu poikkileikkausluokkaan 1, joten uuma on kokonaan tehollinen.

Koko poikkileikkaus kuuluu määräävimmän taso-osan mukaisesti poikkileikkausluokkaan 4.

Lasketaan puristetun laipan tehollinen leveys:

$$\bar{b} = h - 3t = 200 - 3 \cdot 5 = 185\ mm$$

$$\psi = 1\ ,\ k_\sigma = 4{,}0$$

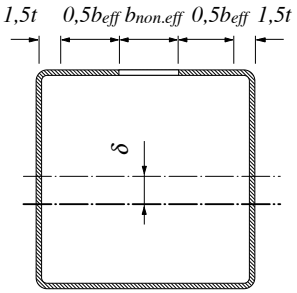
$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28{,}4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{(200 - 3 \cdot 5)/5}{28{,}4 \cdot \sqrt{235/420} \cdot \sqrt{4{,}0}} = 0{,}8709$$

$$\bar{\lambda}_p = 0{,}8709 > 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055\psi} = 0{,}5 + \sqrt{0{,}085 - 0{,}055 \cdot 1} = 0{,}6732$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0{,}055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0{,}8709 - 0{,}055 \cdot 4}{0{,}8709^2} = 0{,}8582 \leq 1{,}0$$

$$b_{eff} = \rho\bar{b} = 0{,}8582 \cdot 185 = 158{,}8\ mm$$

Laipan tehoton alue ja tehoton pinta-ala ovat tällöin:



$$b_{non.eff} = (1-\rho)\bar{b} = (1-0,8582)\cdot 185 = 26,23\ mm$$

$$A_{non.eff} = h_{non.eff}\cdot t = 26,23\cdot 5 = 131,15\ mm^2$$

Tehollisen poikkileikkauksen neutraaliakseli siirtyy alemmaksi. Uusi neutraaliakselin paikka lasketaan lausekkeella (2.50):

$$z_{0.eff} = \frac{Az_0 - \sum[A_{non.eff.i}\cdot z_{non.eff.i}]}{A - \sum A_{non.eff.i}}$$

$$= \frac{3836\cdot 100 - 131,15\cdot(200-5/2)}{3836-131,15} = 96,55\ mm$$

Tehollisen poikkileikkauksen neliömomentti saadaan lausekkeesta (2.51):

$$I_{eff} = I + A(z_0 - z_{0.eff})^2 - \sum I_{non.eff.i} - \sum[A_{non.eff.i}(z_{non.eff.i} - z_{0.eff})^2]$$

$$= 2410\cdot 10^4 + 3836\cdot(100-96,55)^2 - \frac{26,23\cdot 5^3}{12} - 131,15\cdot[(200-5/2)-96,55]^2$$

$$= 2281\cdot 10^4\ mm^4$$

Reunaetäisyys on puristuspuolella suurempi, joten tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus on:

$$W_{eff.c} = \frac{I_{eff}}{e_c} = \frac{2281\cdot 10^4}{200-96,55} = 220,5\cdot 10^3\ mm^3$$

Tehollisen poikkileikkauksen taivutuskestävyydeksi saadaan:

$$M_{eff.Rd} = \frac{W_{eff} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{220,5\cdot 10^3\cdot 420}{1,0} = 92,6\ kNm$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, taivutuskestävyydeksi saataisiin 80,7 kNm (PL4, $W_{eff} = 227,3\cdot 10^3\ mm^3$). Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 poikkileikkaus, jolloin poikkileikkaus ei ole kokonaan tehollinen ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 alentaa poikkileikkauksen tehollisuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa taivutuskestävyyttä tässä 15 %.

Esimerkki 2.10
Poikkileikkausluokan 4 pyöreä rakenneputki.

Lasketaan esimerkissä 2.2 tarkastellun pyöreän rakenneputken 323,9×5 taivutuskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_{el} = 393{,}3 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}1$ *(poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)*

Poikkileikkausluokan tarkastaminen on esitetty esimerkissä 2.2.

Esimerkissä 2.2 on laskettu putkelle 323,9×5 lommahduslujuudeksi:
$\chi_x f_y = 0{,}8578 \cdot 420 = 360{,}3\ N/mm^2$

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on:

$$M_{c.Rd} = \frac{\chi_x W_{el} f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0{,}8578 \cdot 393{,}3 \cdot 10^3 \cdot 420}{1{,}1} = 128{,}8\ kNm$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, taivutuskestävyydeksi saataisiin 111,7 kNm. Kummassakin tapauksessa kyseessä on PL-luokan 4 pyöreä poikkileikkaus ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa poikkileikkauksen muunnettua hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa taivutuskestävyyttä tässä 15 %.

2.6.5 Kiepahduskestävyys

Taivutettaessa sauvaa vahvemman akselin suhteen puristettu laippa saattaa menettää stabiiliutensa nurjahtamalla sivusuuntaan, jolloin sauva samalla kiertyy pituusakselinsa ympäri. Ilmiötä kutsutaan kiepahdukseksi (lateral torsional buckling).

Kiepahdukseen vaikuttavat sauvan pituus, kuormitus, profiilin poikkileikkausarvot, sauvan tuenta ja materiaaliominaisuudet. Mitä korkeampi poikkileikkaus on leveyteensä nähden, sitä helpommin palkki kiepahtaa. Heikomman akselin suhteen taivutettu sauva ei kiepahda. Kuormituksista määräävimmän tapauksen antaa vakiomomentti.

Verrattuna avoimiin poikkileikkauksiin kuten I- tai H-profiileihin, rakenneputkilla on erityisen hyvä kiepahduskestävyys niiden kotelomaisen poikkileikkauksen suuren vääntöjäykkyyden ansiosta.

Pyöreillä ja neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole käytännössä kiepahdusvaaraa, joten niiden kiepahdusta ei tarvitse ottaa huomioon [3,4,5].

Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla kiepahduskestävyys voi kuitenkin muodostua mitoittavaksi, jos käytetään pitkiä rakenneputkia joiden b/h-suhde on pieni. Tässä esitetty kiepahduskestävyyden laskenta voidaan vaihtoehtoisesti korvata sauvan puristetun laipan sivuttaistukien välisen etäisyyden tarkastamisella. Asiaa käsitellään kohdassa 2.6.6.

Taivutetun sauvan mitoitusehto kiepahdukselle on [3,4,5]:

$$M_{Ed} \le M_{b.Rd} \qquad (2.63)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
$M_{b.Rd}$ on kiepahduskestävyyden mitoitusarvo

Eurocoden osa EN 1993-1-1 antaa kaksi eri menetelmää kiepahduskestävyyden laskemiseksi. Tässä esitetään niistä edullisempi (ks. EN 1993-1-1: 6.3.2.3):

Kiepahduskestävyyttä ei tarvitse määrittää (eli kiepahdus ei alenna taivutuskestävyyttä), jos sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle on $\bar{\lambda}_{LT} \le \bar{\lambda}_{LT.0}$ tai jos $M_{Ed} / M_{cr} \le \bar{\lambda}^2_{LT.0}$ [3,4,5]. Muunnetun hoikkuuden $\bar{\lambda}_{LT}$ ja kimmoteorian mukaisen kriittisen kiepahdusmomentin M_{cr} laskeminen esitetään jäljempänä. Parametrin $\bar{\lambda}_{LT.0}$ arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvo on $\bar{\lambda}_{LT.0}$ = 0,4 [3,4,5].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:
Kylmämuovatuille rakenneputkille käytetään arvoa $\bar{\lambda}_{LT.0} = 0{,}4$

Kiepahduskestävyyden mitoitusarvo $M_{b.Rd}$ lasketaan vahvemman akselin suhteen taivutetulle sivusuunnassa tukemattomalle sauvalle seuraavasti [3,4,5]:

$$M_{b.Rd} = W_y \frac{\chi_{LT} f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (2.64)$$

missä $W_y = W_{pl.y}$ poikkileikkausluokissa 1 ja 2 (liite 11.1)
$W_y = W_{el.y}$ poikkileikkausluokassa 3 (liite 11.1)
$W_y = W_{eff.y}$ poikkileikkausluokassa 4
χ_{LT} on kiepahduskestävyyden pienennystekijä
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Taivutusvastusta laskettaessa sauvan päissä olevia kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon [3,4,5].

Kiepahduskestävyyden pienennystekijä χ_{LT} lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi^2_{LT} - \beta \bar{\lambda}^2_{LT}}} \qquad mutta \begin{cases} \chi_{LT} \le 1,0 \\ \chi_{LT} \le \dfrac{1,0}{\bar{\lambda}^2_{LT}} \end{cases} \qquad (2.65)$$

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT.0}) + \beta \bar{\lambda}^2_{LT}] \qquad (2.66)$$

missä α_{LT} on sovellettavan kiepahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä
$\bar{\lambda}_{LT}$ on sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle

Lausekkeissa (2.65) ja (2.66) tarvittavat arvot parametreille $\bar{\lambda}_{LT.0}$ ja β, sekä sovellettava kiepahduskäyrä ja sitä vastaava epätarkkuustekijä α_{LT} voidaan valita kansallisessa liitteessä. Eurocode ei esitä erikseen mitään suositusarvoja rakenneputkille.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:
Kylmämuovatuille rakenneputkille käytetään seuraavia arvoja:
$\bar{\lambda}_{LT.0} = 0,4$
$\beta = 0,75$
Kiepahduskäyrä ja epätarkkuustekijä α_{LT} valitaan taulukoiden 2.13 ja 2.14 mukaisesti.

Teräksen lujuusluokka (S235 - S460) ei siis vaikuta kiepahduskäyrän valintaan.

Taulukko 2.13 Kiepahduskäyrien epätarkkuustekijä [3,4,5]

Kiepahduskäyrä	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α_{LT}	0,21	0,34	0,49	0,76

Taulukko 2.14 Kiepahduskäyrän valinta Suomen kansallisen liitteen mukaisesti [6]

Poikkileikkaus	Rajat	Kiepahduskäyrä
Kylmämuovatut rakenneputket	$h/b \leq 2$ $2 < h/b < 3,1$	c d

Kiepahduskestävyyden pienennystekijää χ_{LT} voidaan parantaa ottamalla huomioon sivuttaistukien välinen momenttipinnan muoto seuraavasti [3,4,5]:

$$\chi_{LT.mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad mutta \quad \begin{cases} \chi_{LT.mod} \leq 1,0 \\ \chi_{LT.mod} \leq \dfrac{1,0}{\bar{\lambda}^2_{LT}} \end{cases} \qquad (2.67)$$

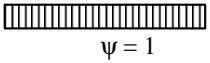
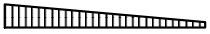
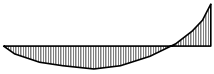
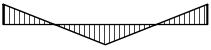
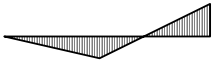
missä tekijän f arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Eurocode suosittelee seuraavaa maksimiarvoa [3,4,5]:

$$f = 1 - 0,5(1 - k_c)[1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0,8)^2] \leq 1,0 \qquad (2.68)$$

missä k_c on taulukon 2.15 mukainen korjaustekijä

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:
Käytetään arvoa $f = 1,0$.

Taulukko 2.15 Korjaustekijä k_c [3,4,5]

Momenttipinnan muoto	k_c
 $\psi = 1$  $-1 \le \psi \le 1$	$1,0$ $\frac{1}{1,33 - 0,33\psi}$
	$0,94$ $0,90$ $0,91$
 	$0,86$ $0,77$ $0,82$

Lausekkeissa (2.65) - (2.66) tarvittava sauvan muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_{LT}$ lasketaan seuraavasti [3,4,5]:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \qquad (2.69)$$

missä W_y on poikkileikkausluokan mukainen taivutusvastus (ks. lauseke 2.64)
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
M_{cr} on kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti

Kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti M_{cr} lasketaan vahvemman akselin suhteen taivutetulle suorakaiteen muotoiselle rakenneputkelle seuraavasti. Poikkileikkauksen ominaisuudet määritetään kaikilla poikkileikkausluokilla bruttopoikkileikkauksen mukaan [3,4,5,30]:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2}\left[\sqrt{\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g\right] \qquad (2.70)$$

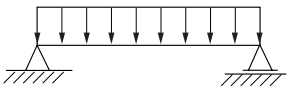
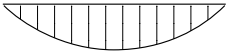
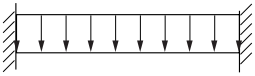
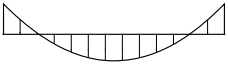
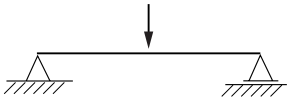
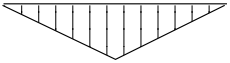
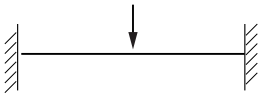
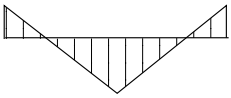
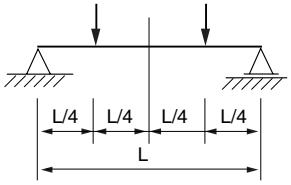
missä
- C_1 *ja* C_2 ovat vakioita, jotka riippuvat kuormituksesta (taulukko 2.17)
- I_z on neliömomentti heikomman akselin suhteen (liite 11.1)
- I_t on vääntöneliömomentti (liite 11.1)
- E on kimmokerroin
- G on liukukerroin
- L on sauvan pituus sivusuunnassa tuettujen pisteiden välillä (kiepahdustukien väli)
- k on sauvan päiden tuennasta riippuva tehollisen pituuden kerroin (taulukko 2.16)
- $z_g = +\, h/2$ kun kuorma vaikuttaa putken ylälaipalla alaspäin (eli kohti vääntökeskiötä, epästabiloiva vaikutus)
- $z_g = 0$ kun kuormana on pelkästään taivutusmomentti, joka on sauvan päiden välillä vakio tai lineaarisesti muuttuva
- $z_g = -\, h/2$ kun kuorma vaikuttaa putken alalaipalla alaspäin (eli poispäin vääntökeskiöstä, stabiloiva vaikutus)

Kaavassa (2.70) oletetaan, että sauvan kumpikin pää on tuettu siten, että sivusiirtymä ja kiertymä pituusakselin suhteen on estetty (ns. haarukkatuenta). Muihin tuentaehtoihin ja kuormitukseen (taivutusmomenttipinnan muotoon) liittyvät vaikutukset otetaan kaavassa (2.70) huomioon siinä esiintyvien eri parametrien avulla (ks. taulukot 2.16 ja 2.17). Käyristymisjäyhyyden vaikutus on jätetty ottamatta huomioon, sillä sen vaikutus on kotelopoikkileikkauksella vähäinen.

Taulukko 2.16 Suorakaiteen muotoisen rakenneputken kiepahdus. Tehollisen pituuden kertoimet eri tuentatapauksille [30,31]

Tuenta sauvan päissä pystyakselin ympäri tapahtuvan kiertymän suhteen	
Kiertymä estetty sauvan molemmissa päissä	k = 0,5
Kiertymä vapaa sauvan molemmissa päissä	k = 1,0
Kiertymä estetty sauvan toisessa päässä, toinen pää voi kiertyä vapaasti	k = 0,7

Taulukko 2.17 Tekijöiden C_1 ja C_2 arvot, jotka vastaavat tehollisen pituuden kerrointa k [30]

Kuormitus ja tukiehdot	Taivutusmomenttipinnan muoto	k	Tekijöiden arvot	
			C_1	C_2
		1,0 0,5	1,132 0,972	0,459 0,304
		1,0 0,5	1,285 0,712	1,562 0,652
		1,0 0,5	1,365 1,070	0,553 0,432
		1,0 0,5	1,565 0,938	1,267 0,715
		1,0 0,5	1,046 1,010	0,430 0,410

2.6.6 Kiepahduksen estäminen sauvan sivusuuntaisella tuennalla

2.6.6.1 Tuentaväli (sauvan tukematon maksimipituus)

Kuten edellä on todettu, pyöreillä ja neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole käytännössä kiepahdusvaaraa, joten niiden kiepahdusta ei tarvitse ottaa huomioon [3,4,5].

Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla kiepahduskestävyys voi kuitenkin muodostua mitoittavaksi. Kiepahduskestävyyden laskenta voidaan vaihtoehtoisesti korvata sauvan puristetun laipan sivuttaistukien välisen etäisyyden tarkastamisella seuraavasti:

Eurocoden mukaan kiepahdus ei alenna sauvan taivutuskestävyyttä, jos sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle on $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0{,}4$. Lausekkeista (2.69) ja (2.70) voidaan tämän perusteella johtaa suorakaiteen muotoisen rakenneputken sivuttaistukien väliselle etäisyydelle L_c varmalla puolella oleva maksimiarvo:

$$L_c \leq \frac{0,4^2}{f_y W_y} \cdot \frac{\pi}{k} \sqrt{(EI_z)(GI_t)} \qquad (2.71)$$

missä
- k on sauvan päiden tuennasta riippuva tehollisen pituuden kerroin (taulukko 2.16)
- E on kimmokerroin
- G on liukukerroin
- I_z on neliömomentti heikomman akselin suhteen (liite 11.1)
- I_t on vääntöneliömomentti (liite 11.1)
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- W_y on poikkileikkausluokan mukainen taivutusvastus (ks. lauseke 2.64)

Lausekkeessa (2.71) oletetaan, että sauvan päissä on haarukkatuenta, ja sauvaan kohdistuu vakiomomentti joka on kiepahduksen kannalta kuormituksista määräävin.

Lausekkeesta (2.71) saadaan poikkileikkausluokkaan 3 kuuluvalle rakenneputkelle edelleen likiarvo:

$$\frac{L_c}{h-t} \leq 0,4^2 \cdot \frac{\pi}{k} \cdot \frac{\sqrt{3EG}}{f_y} \cdot \frac{\gamma^2}{1+3\gamma} \cdot \sqrt{\frac{3+\gamma}{1+\gamma}} \qquad (2.72)$$

$$\gamma = \frac{b-t}{h-t} \qquad (2.73)$$

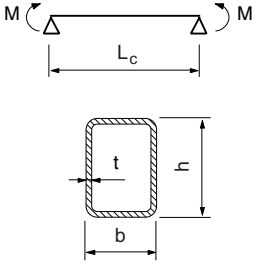
missä
- k on sauvan päiden tuennasta riippuva tehollisen pituuden kerroin (taulukko 2.16)
- E on kimmokerroin
- G on liukukerroin
- b on suorakaiteen muotoisen putken leveys
- h on suorakaiteen muotoisen putken korkeus
- t on seinämänpaksuus

Lausekkeen (2.72) mukaiset puristetun laipan tuentavälin raja-arvot suorakaiteen muotoisille PL3 rakenneputkille on esitetty taulukossa 2.18 ja kuvassa 2.6 olettamalla tehollisen pituuden kertoimelle k varmalla puolella oleva arvo k = 1,0 .

PL-luokilla 1 ja 2 saadaan lauseketta (2.72) ja taulukkoa 2.18 vastaava likiarvo pienentämällä niiden antamaa raja-arvoa kimmoisen ja plastisen taivutusvastuksen suhteella $W_{el.y} / W_{pl.y}$.

Jos edellä esitetyt tarkasteltavana olevan poikkileikkausluokan mukaiset ehdot tuentavälille L_c eivät toteudu, täytyy suorakaiteen muotoisten rakenneputkien kiepahduskestävyys selvittää tarkemmin kohdassa 2.6.5 esitetyn mukaisesti.

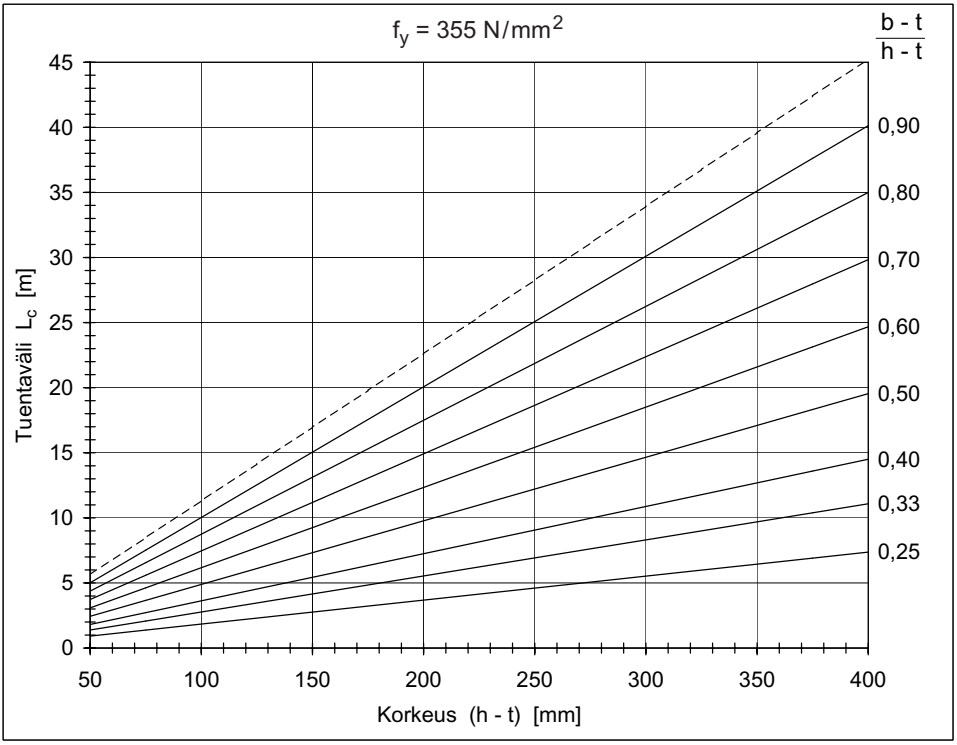
Taulukko 2.18 Raja-arvot suorakaiteen muotoisten poikkileikkausluokkaan 3 kuuluvien rakenneputkien puristetun laipan sivusuuntaiselle tuentavälille L_c, jonka alittuessa kiepahduskestävyyttä ei tarvitse tarkastaa



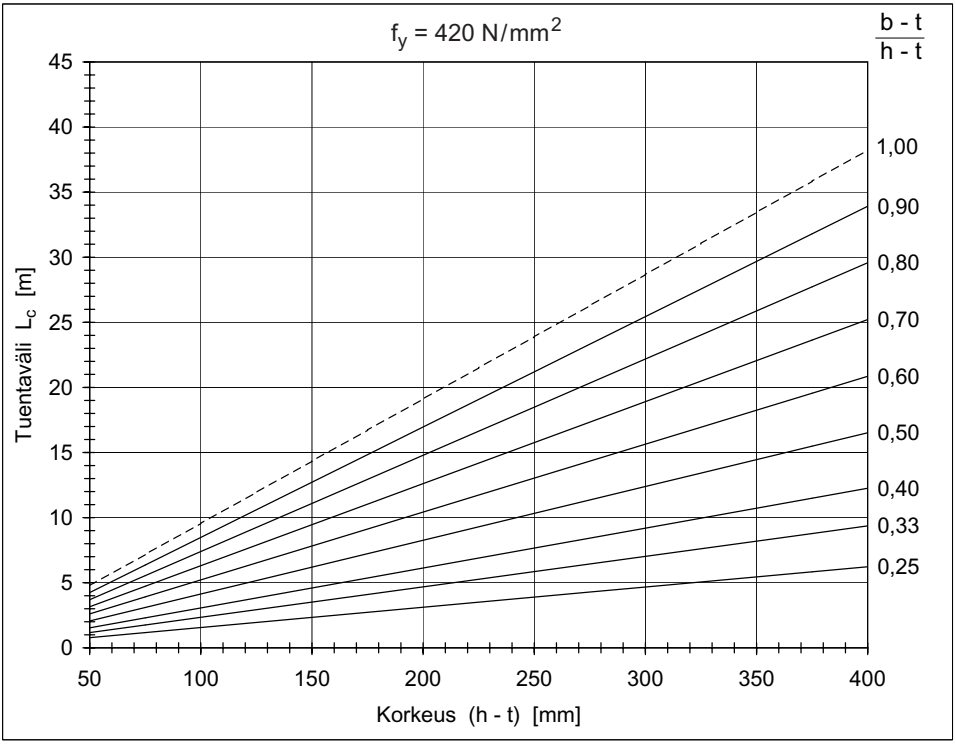
$\frac{b-t}{h-t}$	$\frac{L_c}{h-t}$				
	S235	S275	**S355**	**S420**	S460
0,25	27,8	23,8	**18,4**	**15,6**	14,2
0,33	41,8	35,8	**27,7**	**23,4**	21,4
0,40	54,8	46,8	**36,3**	**30,6**	28,0
0,50	73,8	63,1	**48,9**	**41,3**	37,7
0,60	93,2	79,6	**61,7**	**52,1**	47,6
0,70	112,7	96,3	**74,6**	**63,0**	57,6
0,80	132,2	112,9	**87,5**	**73,9**	67,5
0,90	151,5	129,5	**100,3**	**84,8**	77,4
1,00 a)	170,8	146,0	**113,1**	**95,6**	87,3

a) EN 1993-1-1 mukaan neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole kiepahdusvaaraa.

Taulukon arvot on määritetty haarukkatuetulle sauvalle käyttämällä varmalla puolella olevaa tehollisen pituuden kerrointa k = 1,0.
Lisäksi on oletettu, että sauvaan kohdistuu vakiomomentti joka on kiepahduksen kannalta kuormituksista määräävin.
Poikkileikkausluokille 1 ja 2 raja-arvot saadaan kertomalla taulukon arvot suhteella $W_{el,y} / W_{pl,y}$.



Kuva 2.6a Kiepahduksen raja-arvokäyrät taulukon 2.18 mukaisesti (f_y = 355 N/mm^2)



Kuva 2.6b Kiepahduksen raja-arvokäyrät taulukon 2.18 mukaisesti (f_y = 420 N/mm^2)

2.6.6.2 Sivusuuntainen tuenta, kun rakenne sisältää plastisia niveliä

Rakenteen kokonaisanalyysi voidaan suorittaa plastisuusteoriaan perustuen edellyttäen, että kehän osien kiepahdus estetään seuraavilla tavoilla [3,4,5]:

- sijoitetaan sivuttaistuet 'kiertyneisiin' plastisiin niveliin ja
- todennetaan että em. sivuttaistukien ja muiden sivuttaistukien välinen etäisyys on enintään stabiilin pituuden L_m mittainen. Koska Eurocodessa ei anneta ohjeita sivuttaistukien välisen stabiilin pituuden L_m laskemiseksi rakenneputkille, suositellaan käytettäväksi lausekkeen (2.71) mukaista sivuttaisen tuentavälin raja-arvoa (taivutusvastuksena käytetään tällöin PL-luokan 1 mukaisesti plastista taivutusvastusta).

Jos voidaan osoittaa, että millään murtorajatilan kuormayhdistelyllä plastinen nivel 'ei kierry', sivuttaistukia ei tarvita kyseisessä nivelessä [3,4,5].

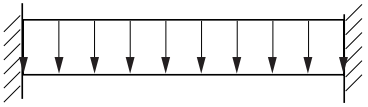
Jos sivuttaistukea ei ole käytännöllistä sijoittaa juuri plastisen nivelen kohdalle, sen saa sijoittaa enintään etäisyydelle $h/2$ plastisesta nivelestä sauvan akselin suunnassa mitattuna [3,4,5].

Sivusuuntaisen tuennan tarkempi suunnittelu on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-1.

Esimerkki 2.11

Tarkastetaan rakenneputken $300 \times 100 \times 5$ kiepahdus. Putken pituus on 7 m ja se on kummastakin päästään kiinnitetty putkipilariin täysin jäykästi niin, että siirtymät ja kiertymät kaikkien akselien suhteen on estetty. Putkea kuormittaa ylälaipalla oleva tasainen kuorma vahvemman akselin suhteen.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.



$I_t = 2044 \cdot 10^4\ mm^4$ *(liite 11.1)*
$I_z = 722{,}8 \cdot 10^4\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$W_{el.y} = 271{,}0 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$W_{pl.y} = 348{,}2 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$
$\gamma_{M1} = 1{,}0$

Tarkastetaan poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:

$b/t = 100/5 = 20,0 \le 27,7$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Uuma:

$h/t = 300/5 = 60,0 \le 65,1$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 2*

Koko poikkileikkaus kuuluu poikkileikkausluokkaan 2.

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys on:

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{348{,}2 \cdot 10^3 \cdot 420}{1{,}0} = 146{,}2\ kNm$$

Lasketaan kimmoteorian mukainen kriittinen kiepahdusmomentti:
$k = 0{,}5$ *(taulukko 2.16)*
$C_1 = 0{,}712$ *(taulukko 2.17)*
$C_2 = 0{,}652$ *(taulukko 2.17)*
$z_g = h/2 = 300/2 = 150\ mm$ *(lauseke 2.70)*

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 EI_z}{(kL)^2}\left[\sqrt{\frac{(kL)^2 GI_t}{\pi^2 EI_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g\right]$$

$$= 0,712 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 722,8 \cdot 10^4}{(0,5 \cdot 7000)^2} \cdot$$

$$\left[\sqrt{\frac{(0,5 \cdot 7000)^2 \cdot 81000 \cdot 2044 \cdot 10^4}{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 722,8 \cdot 10^4} + (0,652 \cdot 150)^2} - (0,652 \cdot 150)\right]$$

$$= 931,7 \text{ kNm}$$

Sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle on tällöin:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{348,2 \cdot 10^3 \cdot 420}{931,7 \cdot 10^6}} = 0,3962 \le 0,4 \Rightarrow \text{kiepahdus ei pienennä kestävyyttä}$$

Vastaava tulos olisi saatu myös rajapituuksien avulla:

Taulukosta (2.18) saadaan rajapituuden varmalla puolella olevaksi likiarvoksi poikkileikkausluokan 2 putkelle soveltaen:

$$\gamma = \frac{b-t}{h-t} = \frac{100-5}{300-5} = 0,32 \sim 0,33$$

$$\frac{L_c}{h-t} = 23,4 \cdot \frac{W_{el.y}}{W_{pl.y}} = 23,4 \cdot \frac{271,0 \cdot 10^3}{348,2 \cdot 10^3} = 18,2$$

$$L_c = 18,2 \cdot (h-t) = 18,2 \cdot (300-5) = 5,4 \text{ m} \le L = 7 \text{ m}$$

$\Rightarrow$ *koska pituus ylittää rajapituuden likiarvon, rajapituus kannattaa laskea tarkemmin kaavasta (2.71), jolloin saadaan huomioitua sauvan päiden tuenta (k-kerroin) todellisen tilanteen mukaisesti:*

$$L_c = \frac{0,4^2}{f_y W_y} \cdot \frac{\pi}{k}\sqrt{(EI_z)(GI_t)}$$

$$= \frac{0,16}{420 \cdot 348,2 \cdot 10^3} \cdot \frac{\pi}{0,5} \cdot \sqrt{(210000 \cdot 722,8 \cdot 10^4) \cdot (81000 \cdot 2044 \cdot 10^4)}$$

$$= 10,9 \text{ m} \ge L = 7 \text{ m} \Rightarrow \text{kiepahdus ei pienennä kestävyyttä}$$

Vertailu S420 vs S355:
Lujuusluokan S420 perusteella putken poikkileikkausluokka on PL2 ja lujuusluokan S355 perusteella PL1. Kummassakin tapauksessa poikkileikkauksen taivutuskestävyys määräytyy plastisen taivutuskestävyyden perusteella, joten materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 kasvattaa poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä täysimääräisesti suoraan myötölujuuksien suhteessa (+18 %). Kaavasta (2.71) nähdään, että kiepahduksen kannalta tämä

tarkoittaa että lujuusluokan S420 perusteella mitoitettaessa sivuttaistukien välistä etäisyyttä on vastaavasti tihennettävä myötölujuuksien suhteessa, jotta kiepahdus ei alenna myötölujuuden kasvattamisen johdosta suurentunutta poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä.

2.7 Leikkausvoiman kuormittaman rakenneputken kestävyys

Tässä esitetyt ohjeet on tarkoitettu palkkirakenteiden leikkauskestävyyden määrittämiseen. Leikkauskestävyys liittyen palkki-pilariliitoksiin tai ristikkoliitoksiin; ks. Eurocoden osa EN 1993-1-8 sekä tämän käsikirjan luku 3.

Leikkauskestävyyden mitoitusehto voidaan esittää muodossa:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd} \qquad (2.74)$$

missä V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa, pyöreillä rakenneputkilla leikkausvoimien $V_{y.Ed}$ ja $V_{z.Ed}$ aiheuttama kokonaisleikkausvoima on

$$V_{Ed} = \sqrt{V_{y.Ed}^2 + V_{z.Ed}^2}$$

V_{Rd} on pienempi seuraavista:
plastinen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ tai leikkauslommahduskestävyys $V_{b.Rd}$

2.7.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien leikkauskestävyys

Leikkauskestävyyden laskentatapa riippuu poikkileikkauksen kuormituksen suuntaisten uumien hoikkuudesta. Eurocoden osissa EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 annettu uuman hoikkuuden raja-arvo on esitetty hitsattujen profiilien poikkileikkausmerkintöjä käyttäen. Raja-arvoa sovelletaan rakenneputkille seuraavasti:

$$\frac{h}{t} \leq \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 \quad \Rightarrow \quad \textit{lasketaan plastinen leikkauskestävyys (kohta 2.7.1.1)} \qquad (2.75a)$$

$$\frac{h}{t} > \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 \quad \Rightarrow \begin{cases} \text{- } \textit{lasketaan leikkauslommahduskestävyys (kohta 2.7.1.2)} \\ \text{- } \textit{uuma tulee varustaa pystyjäykisteillä tukien kohdalla} \end{cases} \qquad (2.75b)$$

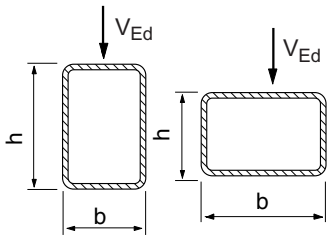
missä h on putken korkeus leikkausvoiman suunnassa
t on seinämänpaksuus
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad [f_y] = N/mm^2$
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
η on muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä

Muokkauslujittumista ei hyödynnetä rakenneputkien leikkauskestävyyttä laskettaessa. Määritettäessä uuman hoikkuusrajaa lausekkeella (2.75) uuman hoikkuutta ei näin ollen myöskään pienennetä η-tekijällä, vaan sille voidaan käyttää arvoa η = 1,0 [3,4,5].

Ehdon (2.75) mukaiset uuman hoikkuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 2.19 perustuen edellä esitetyn mukaisesti arvoon η = 1,0. Käytännössä vain muutamilla rakenneputkilla leikkauslommahdus muodostuu mitoittavaksi.

Jos uuman hoikkuusraja ei edellytä profiilin varustamista poikittaisjäykisteillä tukien kohdalla, täytyy päätytuella tarkastaa jäykistämättömän uuman kestävyys tukireaktiolle kohdan 2.11 mukaisesti.

Taulukko 2.19 Raja-arvot uuman hoikkuudelle, jonka ylittyessä leikkauslommahduskestävyys tulee määrääväksi



$\frac{h}{t}$				
S235	S275	**S355**	**S420**	S460
75,0	69,6	**61,6**	**56,9**	54,5

Taulukon arvot on määritetty käyttäen η-tekijälle rakenneputkilla arvoa η = 1,0 [3,4,5].

2.7.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys

Kun vääntöä ei ole, plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ lasketaan kaavasta [3,4,5]:

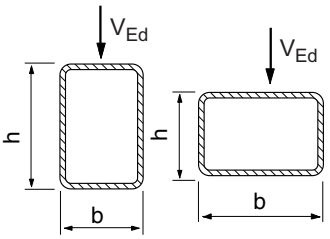
$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \qquad (2.76)$$

missä A_V on leikkauspinta-ala
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Leikkauspinta-ala on [3,4,5]:

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b + h} \qquad (2.77)$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
h on putken korkeus leikkausvoiman suunnassa
b on putken leveys



Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon leikkauskestävyyden laskemisessa lukuun ottamatta leikkauskestävyyden laskemista liitosalueilla osan EN 1993-1-8 mukaan [3,4,5]. Osassa EN 1993-1-8 ei ole kuitenkaan esitetty yleisiä ohjeita reikävähennyksen huomioon ottamiseksi leikkauskestävyyttä laskettaessa. Tässä käsikirjassa suositellaan, että reikävähennyksen suhteen noudatetaan seuraavaa menettelyä:

Kiinnittimien reikien kohdalla kaava (2.77) korvataan seuraavalla kaavalla, kun kiinnittimen reikä on leikkauskuorman kantavassa taso-osassa (leikkauskuorman suuntaisessa taso-osassa):

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b+h} - \sum(d_0\, t) \qquad (2.78)$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
h on putken korkeus leikkausvoiman suunnassa
b on putken leveys
d_0 on reijän halkaisija leikkauskuorman kantavassa levyosassa
t on seinämänpaksuus

2.7.1.2 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys

Leikkauslommahduskestävyyden laskenta on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-5 [13,14]. Leikkauslommahduskestävyys koostuu uuman osuudesta ja laippojen osuudesta. Uuman osuus puolestaan riippuu uuman hoikkuudesta ja jäykistystavasta. Tarkastelusta muodostuu tällöin varsin monivaiheinen.

Koska rakenneputkilla leikkauslommahduskestävyys muodostuu määrääväksi vain harvoin, tyydytään tässä esittämään Eurocoden osaan EN 1993-1-5 perustuen varmalla puolella oleva yksinkertaistettu laskentatapa, jossa laippojen vaikutusta ei oteta huomioon ja uuman pystyjäykisteiden vaikutus lasketaan heikoimman jäykistystavan mukaisesti.

Jäykistämättömien ja jäykistettyjen uumien leikkauslommahduskestävyys $V_{b.Rd}$ voidaan tällöin laskea seuraavasta kaavasta:

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} = A_V \cdot \frac{\chi_w f_y}{\sqrt{3}\,\gamma_{M1}} \qquad (2.79)$$

missä $V_{bw.Rd}$ on uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä
χ_w on uuman osuuden pienennystekijä (taulukko 2.20)
A_V on leikkauspinta-ala kaavan (2.77) mukaisesti
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Uuman osuuden pienennystekijä χ_w määritetään taulukosta 2.20.

Taulukko 2.20 Uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä. Pienennystekijä χ_w

$\bar{\lambda}_w < 0{,}83$	1,00
$0{,}83 \le \bar{\lambda}_w < 1{,}08$	$0{,}83 / \bar{\lambda}_w$
$\bar{\lambda}_w \ge 1{,}08$	$0{,}83 / \bar{\lambda}_w$

Taulukossa 2.20 tarvittava uuman muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_w$ lasketaan seuraavasti:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\bar{b}/t}{86{,}4\varepsilon} = \frac{(h-3t)/t}{86{,}4\varepsilon} \qquad (2.80)$$

missä h on putken korkeus leikkausvoiman suunnassa
t on seinämänpaksuus
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad [f_y] = N/mm^2$
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus

2.7.2 Pyöreiden rakenneputkien leikkauskestävyys

Pyöreiden rakenneputkien leikkauskestävyyden laskenta määräytyy seuraavasti:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3 $\Rightarrow$ lasketaan plastinen leikkauskestävyys (kohta 2.7.2.1)
Poikkileikkausluokka 4 $\Rightarrow$ lasketaan leikkauslommahduskestävyys (kohta 2.7.2.2)

2.7.2.1 Pyöreiden rakenneputkien plastinen leikkauskestävyys

Kun vääntöä ei ole, plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ lasketaan kaavasta [3,4,5]:

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \qquad (2.81)$$

missä A_V on leikkauspinta-ala
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Leikkauspinta-ala on [3,4,5]:

$$A_V = A\frac{2}{\pi} \qquad (2.82)$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)

2.7.2.2 Pyöreiden rakenneputkien leikkauslommahduskestävyys

Poikkileikkauksen leikkauslommahduskestävyyden mitoitusarvo $V_{b.Rd}$ määritetään poikkileikkauksen leikkauslommahduslujuuden $\chi_\tau f_y/\sqrt{3}$ perusteella seuraavasti, kun putken kumpaankin päähän on hitsattu päätylevy tai jäykkä rengas, joka estää putken poikkileikkauksen muodon muuttumisen (tai putki on päistään hitsattu ympäröivään rakenteeseen vastaavalla tavalla) [16]:

$$V_{b.Rd} = A_{bV} \cdot \frac{\chi_\tau f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M1}} \qquad (2.83)$$

$$A_{bV} = \pi r_m t \qquad (2.84)$$

missä
- A_{bV} on leikkauslommahduksen laskennallinen pinta-ala
- r_m on putken seinämän keskilinjan säde
- t on seinämänpaksuus
- χ_τ on leikkauslommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kuorelle
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Leikkauslommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä χ_τ lasketaan seuraavasti, vrt. kohta 2.5.2.2 [16]:

$$\chi_\tau = 1,0 \qquad kun\ \bar{\lambda}_\tau \le 0,4 \qquad (2.85a)$$

$$\chi_\tau = 1 - 0,6\frac{\bar{\lambda}_\tau - 0,4}{\bar{\lambda}_{pl.\tau} - 0,4} \qquad kun\ 0,4 < \bar{\lambda}_\tau < \bar{\lambda}_{pl.\tau} \qquad (2.85b)$$

$$\chi_\tau = \frac{\alpha_\tau}{\bar{\lambda}_\tau^2} \qquad kun\ \bar{\lambda}_\tau \ge \bar{\lambda}_{pl.\tau} \qquad (2.85c)$$

missä
- α_τ on kimmoisella alueella epätarkkuudesta aiheutuva pienennystekijä leikkauslommahdukselle (taulukko 2.21)
- $\bar{\lambda}_\tau$ on muunnettu hoikkuus leikkauslommahdukselle
- $\bar{\lambda}_{pl.\tau}$ on muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo leikkauslommahdukselle

Epätarkkuuden pienennystekijä α_τ määräytyy standardin EN 1090-2 mukaisista pyöreän sylinterin valmistustoleranssien laatuluokista A...C (A on paras) [29]. Pyöreillä rakenneputkilla merkitsevin muototoleranssi on tällöin yleensä pyöreyspoikkeama. SSAB:n putket täyttävät laa-

tuluokan B pyöreyspoikkeaman kun ulkohalkaisija on $d \leq 400$ mm ja $d/t \leq 100$ (taulukot 1.2 ja 2.12), jolloin epätarkkuuden pienennystekijä α_τ saa arvon α_τ = 0,65 (taulukko 2.21). Muille mitoille valmistustoleranssin sovellettava laatuluokka tulee selvittää tapauskohtaisesti.

Taulukko 2.21 Epätarkkuuden pienennystekijä α_τ leikkauslommahdukselle [16]

Valmistustoleranssin laatuluokka	Kuvaus	α_τ
Luokka A	Erinomainen	0,75
Luokka B	Hyvä	0,65
Luokka C	Tavallinen	0,50

Muunnetun hoikkuuden plastinen raja-arvo $\bar{\lambda}_{pl.\tau}$ leikkauslommahdukselle on [16]:

$$\bar{\lambda}_{pl.\tau} = \sqrt{\frac{\alpha_\tau}{0,4}} \qquad (2.86)$$

Muunnettu hoikkuus $\bar{\lambda}_\tau$ leikkauslommahdukselle on [16]:

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_y/\sqrt{3}}{\tau_{cr}}} \qquad (2.87)$$

missä f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
τ_{cr} on kimmoinen kriittinen leikkauslommahdusjännitys

Pyöreän putken kimmoinen kriittinen leikkauslommahdusjännitys τ_{cr} lasketaan seuraavasti [16]:

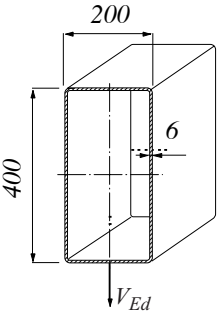
$$\tau_{cr} = 0,75EC_\tau \cdot \sqrt{\frac{t}{L}} \cdot \left[\frac{t}{r_m}\right]^{3/4} \qquad (2.88)$$

missä E on kimmokerroin
L on putken pituus
t on seinämänpaksuus
r_m on putken seinämän keskilinjan säde

Eurocoden osa EN 1993-1-6 määrittelee tekijälle C_τ lukuarvon tarkasteltavan sylinterimäisen rakenteen pituuden funktiona. Varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena voidaan käyttää arvoa C_τ = 1,0 .

Esimerkki 2.12

Lasketaan rakenneputken $400 \times 200 \times 6$ leikkauskestävyys.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A \quad = 6963\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y \quad = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} \quad = 1,0$

Ensin tarkastetaan onko uuman leikkauslommahtaminen otettava huomioon. Esimerkkiputken mitoilla saadaan:

$$\frac{h}{t} = \frac{400}{6} = 66,67 > \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72\sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,86$$

$\Rightarrow$ *uuman leikkauslommahdus pitää ottaa huomioon ja uuma pitää varustaa pystyjäykisteillä tukien kohdalla.*

Uuman muunnettu hoikkuus on:

$$\bar{\lambda}_w = \frac{\bar{b}/t}{86,4\varepsilon} = \frac{(h-3t)/t}{86,4\varepsilon} = \frac{(400-3\cdot 6)/6}{86,4\cdot\sqrt{235/420}} = 0,9851$$

$0,83 \le \bar{\lambda}_w < 1,08$

Lommahduksen pienennystekijä uumalle on tällöin taulukon 2.20 mukaisesti:

$\chi_w = 0,83/\bar{\lambda}_w = 0,83/0,9851 = 0,8426$

Putken leikkauspinta-ala on:

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b+h} = 6963 \cdot \frac{400}{200+400} = 4642\ mm^2$$

Putken leikkauslommahduskestävyydeksi saadaan:

$$V_{b.Rd} = V_{bw.Rd} = A_V \cdot \frac{\chi_w f_y}{\sqrt{3}\,\gamma_{M1}} = 4642 \cdot \frac{0,8426 \cdot 420}{\sqrt{3}\cdot 1,0} = 948,5\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, leikkauslommahduskestävyydeksi saataisiin 871,9 kN. Kummassakin tapauksessa leikkauslommahdus on mitoittava, ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa uuman hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa leikkauslommahduskestävyyttä tässä 9 %.

Esimerkki 2.13

Lasketaan rakenneputken 400×200×8 leikkauskestävyys, kun poikkileikkausta kuormitetaan vahvemmassa suunnassa.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 9124\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

$$\frac{h}{t} = \frac{400}{8} = 50 \le \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72 \cdot \sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,86$$

$\Rightarrow$ *uuman leikkauslommahdusta ei tarvitse ottaa huomioon*

Lasketaan putken plastinen leikkauskestävyys:

Putken leikkauspinta-ala on:

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b+h} = 9124 \cdot \frac{400}{200+400} = 6083\ mm^2$$

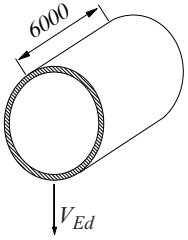
Plastinen leikkauskestävyys on:

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 6083 \cdot \frac{420/\sqrt{3}}{1,0} = 1475\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, leikkauskestävyydeksi saataisiin 1247 kN. Kummassakin tapauksessa leikkauskestävyys voidaan laskea plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ mukaisena. Myötölujuuden kasvattaminen S355 → S420 päästään tällöin hyödyntämään kestävyydessä täysimääräisesti (= + 18 %).

Esimerkki 2.14

Lasketaan esimerkin 2.10 poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken 323,9×5 leikkauskestävyys, kun putken pituus on 6 m. Leikkausvoima oletetaan vakioksi koko putken pituudella.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}1$ *(poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)*

Pyöreän putken leikkauskestävyys lasketaan leikkauslommahduskestävyyden perusteella, kun putken poikkileikkausluokka on 4.

Putken kriittinen leikkauslommahdusjännitys ja muunnettu hoikkuus ovat:

$$\tau_{cr} = 0,75 E C_\tau \cdot \sqrt{\frac{t}{L}} \cdot \left[\frac{t}{r_m}\right]^{3/4} = 0,75 \cdot 210000 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{5}{6000}} \cdot \left[\frac{5}{159,5}\right]^{3/4} = 338,7 N/mm^2$$

$$\bar{\lambda}_\tau = \sqrt{\frac{f_y/\sqrt{3}}{\tau_{cr}}} = \sqrt{\frac{420/\sqrt{3}}{338,7}} = 0,8461$$

Putken mitat ovat $d \le 400$ *mm ja* $d/t \le 100$ *jolloin putki täyttää valmistustoleranssin laatuluokan B vaatimukset (taulukot 1.2 ja 2.12)*

$$\Rightarrow \alpha_\tau = 0,65 \quad \text{(taulukko 2.21)}$$

$$\bar{\lambda}_{pl.\tau} = \sqrt{\frac{\alpha_\tau}{0,4}} = \sqrt{\frac{0,65}{0,4}} = 1,275$$

$$0,4 < \bar{\lambda}_\tau < \bar{\lambda}_{pl.\tau}$$

$\Rightarrow$

$$\chi_\tau = 1 - 0,6\frac{\bar{\lambda}_\tau - 0,4}{\bar{\lambda}_{pl.\tau} - 0,4} = 1 - 0,6 \cdot \frac{0,8461 - 0,4}{1,275 - 0,4} = 0,6941$$

Leikkauslommahduksen laskennallinen pinta-ala on:

$$A_{bV} = \pi r_m t = \pi \cdot 159,5 \cdot 5 = 2505\ mm^2$$

Leikkauslommahduskestävyydeksi saadaan lopulta:

$$V_{b.Rd} = A_{bV} \cdot \frac{\chi_\tau f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M1}} = 2505 \cdot \frac{0,6941 \cdot 420/\sqrt{3}}{1,1} = 383,3\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, leikkauslommahduskestävyydeksi saataisiin 345,8 kN. Kummassakin tapauksessa leikkauslommahdus on mitoittava, ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa poikkileikkauksen hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa leikkauslommahduskestävyyttä tässä 11 %.

Esimerkki 2.15

Lasketaan pyöreän rakenneputken 323,9×8 leikkauskestävyys.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Pyöreän putken leikkauskestävyys lasketaan plastisen leikkauskestävyyden perusteella, kun putken poikkileikkausluokka on 3 ($d/t = 40,5 \leq 50,4$):

$A = 7939\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1,0$

Laskennallinen leikkauspinta-ala on:

$$A_V = A\frac{2}{\pi} = 7939 \cdot \frac{2}{\pi} = 5054\ mm^2$$

Plastinen leikkauskestävyys on:

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 5054 \cdot \frac{420/\sqrt{3}}{1,0} = 1226\ kN$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, leikkauskestävyydeksi saataisiin 1036 kN. Kummassakin tapauksessa leikkauskestävyys voidaan laskea plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ mukaisena. Myötölujuuden kasvattaminen S355 → S420 päästään tällöin hyödyntämään kestävyydessä täysimääräisesti (= + 18 %).

2.8 Vääntömomentin kuormittaman rakenneputken kestävyys

Rakenneputket soveltuvat erinomaisesti rakenteisiin, joissa esiintyy vääntökuormitusta. Niiden vääntöjäykkyys on avoimiin profiileihin verrattuna ylivoimainen. Lisäksi vääntökestävyyden laskenta on rakenneputkilla huomattavasti yksinkertaisempaa kuin avoimilla profiileilla.

Vääntökestävyyden mitoitusehto voidaan esittää muodossa:

$$M_{x.Ed} \leq M_{x.Rd} \qquad (2.89)$$

missä $M_{x.Ed}$ on vääntömomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
$M_{x.Rd}$ on pienempi seuraavista:
plastinen vääntökestävyys $M_{x.pl.Rd}$ tai
vääntölommahduskestävyys $M_{x.b.Rd}$

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan vääntömomentin kuormittamilla rakenneputkilla laskentaa saadaan yksinkertaistaa siten, että voidaan olettaa koko ulkoisen momentin välittyvän pel-

kästään vapaana vääntönä (eli voidaan jättää ottamatta huomioon estetyn väännön osuudet kokonaisvääntömomentissa ja jännityksissä) [3,4,5]. Vääntömomentin mitoitusarvo voidaan tällöin esittää muodossa:

$$M_{x.Ed} = M_{t.Ed} \qquad (2.90)$$

missä $M_{t.Ed}$ on vapaan väännön (eli Saint Venantin väännön) mitoitusarvo

Vääntökestävyyttä laskettaessa tulee ottaa huomioon myös poikkileikkauksen yksittäisten taso-osien leikkauskestävyys ja leikkauslommahduskestävyys [3,4,5]. Siksi vääntökestävyyden laskenta esitetään seuraavassa samaan tapaan jaoteltuna kuin leikkauskestävyys kohdassa 2.7.

2.8.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vääntökestävyys

Vääntökestävyyden laskentatapa riippuu poikkileikkauksen taso-osien hoikkuudesta vastaavasti kuin leikkauskestävyys kohdassa 2.7.1:

$$\frac{max(b,h)}{t} \le \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 \quad \Rightarrow \textit{lasketaan plastinen vääntökestävyys (kohta 2.8.1.1)} \qquad (2.91a)$$

$$\frac{max(b,h)}{t} > \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 \quad \Rightarrow \textit{lasketaan vääntölommahduskestävyys (kohta 2.8.1.2)} \qquad (2.91b)$$

missä
- b on poikkileikkauksen leveys
- h on poikkileikkauksen korkeus
- t on seinämänpaksuus
- $\varepsilon = \sqrt{235/f_y} \quad [f_y] = N/mm^2$
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- η on muokkauslujittumisen huomioon ottava tekijä

Pienennystekijälle η käytetään rakenneputkilla arvoa η = 1,0 (ks. kohta 2.7.1).

Ehdon (2.91) mukaiset hoikkuuden raja-arvot on esitetty taulukossa 2.19 perustuen edellä esitetyn mukaisesti arvoon η = 1,0. Kuten leikkauslommahduksen suhteenkin, käytännössä vain muutamilla rakenneputkilla vääntölommahdus muodostuu mitoittavaksi.

2.8.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien plastinen vääntökestävyys

Rakenneputken plastisuusteorian mukainen vääntökestävyys $M_{x.pl.Rd}$ on [32]:

$$M_{x.pl.Rd} = \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} W_t \approx \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \cdot 2A_t t \qquad (2.92)$$

missä
- W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
- A_t on poikkileikkauksen seinämän keskiviivan rajoittama pinta-ala

t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

2.8.1.2 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vääntölommahduskestävyys

Rakenneputken vääntölommahduskestävyys $M_{x.b.Rd}$ voidaan laskea vääntölommahduslujuuden $\chi_t f_y / \sqrt{3}$ perusteella lausekkeesta:

$$M_{x.b.Rd} = \frac{\chi_t f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} W_t \approx \frac{\chi_t f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} \cdot 2A_t t \qquad (2.93)$$

missä χ_t on vääntölommahduksen pienennystekijä
W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
A_t on poikkileikkauksen seinämän keskiviivan rajoittama pinta-ala
t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Vääntölommahduksen pienennystekijä χ_t lasketaan kohdan 2.7.1.2 mukaisesti kuten χ_w, mutta hoikkuuden lausekkeeseen (2.80) sijoitetaan nyt suurempi (eli määräävä) poikkileikkauksen mitoista b tai h.

2.8.2 Pyöreiden rakenneputkien vääntökestävyys

Pyöreiden rakenneputkien vääntökestävyyden laskenta määräytyy seuraavasti:

Poikkileikkausluokat 1, 2 ja 3 $\Rightarrow$ lasketaan plastinen vääntökestävyys (kohta 2.8.2.1)
Poikkileikkausluokka 4 $\Rightarrow$ lasketaan vääntölommahduskestävyys (kohta 2.8.2.2)

2.8.2.1 Pyöreiden rakenneputkien plastinen vääntökestävyys

Pyöreiden rakenneputkien plastisuusteorian mukainen vääntökestävyys $M_{x.pl.Rd}$ on [32]:

$$M_{x.pl.Rd} = \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} W_t \approx \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \cdot 2A_t t \qquad (2.94)$$

missä W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
A_t on poikkileikkauksen seinämän keskiviivan rajoittama pinta-ala
t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

2.8.2.2 Pyöreiden rakenneputkien vääntölommahduskestävyys

Pyöreiden putkien vääntölommahduskestävyys $M_{x.b.Rd}$ lasketaan vääntölommahduslujuuden $\chi_t f_y / \sqrt{3}$ perusteella lausekkeesta:

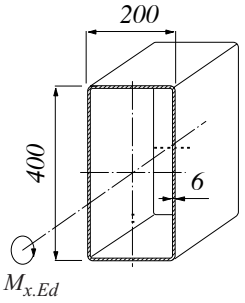
$$M_{x.b.Rd} = \frac{\chi_t f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} W_t \approx \frac{\chi_t f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} \cdot 2A_t t \qquad (2.95)$$

missä
- χ_t on vääntölommahduksen pienennystekijä
- W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
- A_t on poikkileikkauksen seinämän keskiviivan rajoittama pinta-ala
- t on seinämänpaksuus
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Vääntölommahduksen pienennystekijä χ_t lasketaan pyöreille putkille kohdan 2.7.2.2 mukaisesti kuten χ_τ.

Esimerkki 2.16

Tarkastellaan esimerkin 2.12 rakenneputkea 400×200×6, jota kuormittaa vääntömomentti $M_{x.Ed}$ = 170 kNm.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_t = 877{,}1 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}0$

Ensin tarkastetaan onko vääntölommahtaminen otettava huomioon. Esimerkkiputken mitoilla saadaan:

$$\frac{max(b,h)}{t} = \frac{400}{6} = 66,67 > \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72\sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,86$$

$\Rightarrow$ *putken vääntökestävyyden määrää vääntölommahduskestävyys.*

Putken hoikin taso-osa on uuma, jonka muunnettu hoikkuus on lauseketta (2.80) vääntölommahdukselle soveltaen:

$$\bar{\lambda}_t = \frac{\bar{b}/t}{86,4\varepsilon} = \frac{(h-3t)/t}{86,4\varepsilon} = \frac{(400-3\cdot 6)/6}{86,4\cdot\sqrt{235/420}} = 0,9851$$

$0,83 \le \bar{\lambda}_t < 1,08$

Vääntölommahduksen pienennystekijäksi saadaan taulukon 2.20 mukaisesti ($\chi_t = \chi_w$):

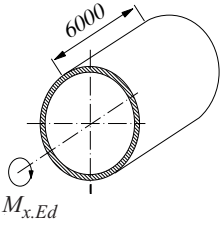
$$\chi_t = 0,83/\bar{\lambda} = 0,83/0,9851 = 0,8426$$

Putken vääntölommahduskestävyydeksi saadaan:

$$M_{x.b.Rd} = \frac{\chi_t f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M1}} W_t = \frac{0,8426 \cdot 420/\sqrt{3}}{1,0} \cdot 877,1 \cdot 10^3 = 179,2\ kNm \geq M_{x.Ed} \quad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, vääntölommahduskestävyydeksi saataisiin 164,7 kNm jolloin putken kestävyys ei riitä. Kummassakin tapauksessa vääntölommahdus on mitoittava, ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa uuman hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa vääntölommahduskestävyyttä tässä 9 %.

Esimerkki 2.17



Tarkastellaan esimerkin 2.14 poikkileikkausluokan 4 pyöreää rakenneputkea 323,9×5, jota kuormittaa vääntömomentti $M_{x.Ed}$ = 110 kNm.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$W_t = 786,6 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1,1$ *(poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)*

Pyöreän putken vääntökestävyys lasketaan vääntölommahduskestävyyden perusteella, kun putken poikkileikkausluokka on 4.

Vääntölommahduksen pienennystekijä χ_t on pyöreälle putkelle sama kuin leikkauslommahduksen pienennystekijä χ_τ, mikä on jo laskettu esimerkissä 2.14:

$$\chi_t = \chi_\tau = 0,6941$$

Vääntölommahduskestävyys on:

$$M_{x.b.Rd} = \frac{\chi_t f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M1}} W_t = \frac{0,6941 \cdot 420/\sqrt{3}}{1,1} \cdot 786,6 \cdot 10^3 = 120,4\ kNm \geq M_{x.Ed} \quad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, vääntölommahduskestävyydeksi saataisiin 108,6 kNm jolloin putken kestävyys ei riitä. Kummassakin tapauksessa vääntölommahdus on mitoittava, ja materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 suurentaa poikkileikkauksen hoikkuutta entisestään. Silti myötölujuuden kasvattaminen 18 % parantaa vääntölommahduskestävyyttä tässä 11 %.

2.9 Rakenneputken poikkileikkauksen kestävyys voimasuureyhdistelmille, kun sauvan nurjahdus ja kiepahdus on estetty

Pistekuormakestävyys ja sen yhteisvaikutus muiden voimasuureiden kanssa käsitellään myöhemmin kohdassa 2.11.

2.9.1 Neliön ja suorakaiteen muotoiset sekä poikkileikkausluokkien 1, 2 ja 3 pyöreät rakenneputket

2.9.1.1 Jännitysten rajoittaminen (von Misesin myötöehto)

Kimmoteorian mukainen kestävyyden todentaminen on aina sallittua kaikissa poikkileikkausluokissa edellyttäen, että poikkileikkausluokassa 4 käytetään tehollisen poikkileikkauksen ominaisuuksia [3,4,5].

Jos yhteisvaikutusten tarkastamiseksi ei ole annettu muuta soveltuvaa kaavaa, kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa kestävyyden todentamiseen voidaan käyttää seuraavaa von Misesin vertailujännitykseen perustuvaa myötöehtoa poikkileikkauksen kriittisessä pisteessä [3,4,5]:

$$\left[\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right]^2 + \left[\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right]^2 - \left[\frac{\sigma_{x.Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right]\left[\frac{\sigma_{z.Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right] + 3\left[\frac{\tau_{Ed}}{f_y/\gamma_{M0}}\right]^2 \le 1,0 \qquad (2.96)$$

missä
- $\sigma_{x.Ed}$ on pituussuuntaisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa (puristus on positiivinen)
- $\sigma_{z.Ed}$ on poikittaisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa (puristus on positiivinen)
- τ_{Ed} on leikkausjännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Lausekkeen (2.96) mukainen tarkastelu voi olla varmalla puolella, koska siinä ei oteta huomioon osittaista plastisoitumista, joka sallitaan myös kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa tietyissä tilanteissa. Tämän takia tätä menetelmää kannattaa käyttää vain, kun yhteisvaikutusta ei voida tarkastella yksittäisten kestävyyksien N_{Rd}, M_{Rd} ja V_{Rd} perusteella [3,4,5].

2.9.1.2 Leikkausvoima ja vääntömomentti

Väännön yhteisvaikutus leikkausvoiman kanssa otetaan Eurocoden eri osissa huomioon hieman eri tavoin. Osan EN 1993-1-1 ohjeita käytetään kun poikkileikkauksen leikkauskestävyys on plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ suuruinen, ja osan EN 1993-1-5 ohjeita käytetään kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä, eli $V_{b.Rd} < V_{pl.Rd}$.

2.9.1.2.1 Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan leikkausvoiman ja vääntömomentin vaikuttaessa samanaikaisesti, plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ pienennetään arvoon $V_{pl.T.Rd}$ ja leikkausvoiman tulee täyttää seuraava ehto [3,4,5]:

$$V_{Ed} \leq V_{pl.T.Rd} \qquad (2.97)$$

Vääntömomentin pienentämä plastinen leikkauskestävyys $V_{pl.T.Rd}$ voidaan laskea rakenneputkille kaavasta [3,4,5]:

$$V_{pl.T.Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t.Ed}}{(f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M0}}} \cdot V_{pl.Rd} \qquad (2.98)$$

$$\tau_{t.Ed} = \frac{M_{t.Ed}}{W_t} \approx \frac{M_{t.Ed}}{2A_t t} \qquad (2.99)$$

$$M_{t.Ed} = M_{x.Ed} \qquad (2.100)$$

missä
- $V_{pl.Rd}$ on plastinen leikkauskestävyys kohdan 2.7 mukaisesti
- $\tau_{t.Ed}$ on vapaan väännön osuus leikkausjännityksestä
- $M_{x.Ed}$ on vaikuttavan vääntömomentin mitoitusarvo
- $M_{t.Ed}$ on vapaan väännön (eli Saint Venantin väännön) osuus vaikuttavasta vääntömomentista (ks. kohta 2.8)
- W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
- A_t on poikkileikkauksen seinämän keskiviivan rajoittama pinta-ala
- t on seinämänpaksuus
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

2.9.1.2.2 Leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä

Näitä Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisia tarkasteluja tarvitaan vain joillakin neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, sillä pyöreillä rakenneputkilla leikkauskestävyys määritellään poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 aina plastisen leikkauskestävyyden perusteella (ks. kohta 2.7.2), jolloin leikkausvoiman ja väännön yhteisvaikutus tarkastetaan edellisen kohdan 2.9.1.2.1 mukaisesti.

Väännön vaikutukset sisältyvät Eurocoden osassa EN 1993-1-5 leikkauslommahdustarkasteluihin siten, että mahdollisesta väännöstä aiheutuva leikkaus tulee ottaa huomioon jo määritettäessä vaikuttavaa leikkausvoimaa V_{Ed} [13,14]. Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla väännön vaikutus leikkausvoimaan voidaan laskea seuraavasti:

$$\Delta V = \tau_{t.Ed} A_V \qquad (2.101)$$

missä $\tau_{t.Ed}$ on väännöstä aiheutuva leikkausjännitys kaavan (2.99) mukaisesti
A_V on leikkausvoiman V_{Ed} suuntainen leikkauspinta-ala kaavan (2.77) mukaisesti

2.9.1.3 Taivutusmomentti ja leikkausvoima

Ohjeet samanaikaisen taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle on esitetty Eurocoden osissa EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5. Osan EN 1993-1-1 ohjeita käytetään kun poikkileikkauksen leikkauskestävyys on plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ suuruinen, ja osan EN 1993-1-5 ohjeita käytetään kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä, eli $V_{b.Rd} < V_{pl.Rd}$.

2.9.1.3.1 Taivutusmomentti ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen täytyy ottaa huomioon, jos leikkausvoima ylittää puolet plastisesta leikkauskestävyydestä, eli $V_{Ed} > 0{,}5 V_{pl.Rd}$. Tällöin poikkileikkausluokan mukaista taivutuskestävyyttä pienennetään käyttämällä tarkasteltavan suunnan mukaiselle leikkauspinta-alalle pienennettyä myötölujuutta $(1-\rho) f_y$, missä ρ on [3,4,5]:

$$\rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1 \right]^2 \qquad (2.102)$$

missä V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo tarkasteltavassa suunnassa
$V_{pl.Rd}$ on plastinen leikkauskestävyys tarkasteltavassa suunnassa kohdan 2.7.1.1 (neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket) tai kohdan 2.7.2.1 (pyöreät rakenneputket) mukaisesti

Myötölujuuden pienentämisen sijasta voidaan vaihtoehtoisesti pienentää poikkileikkauksen vastaavan osan paksuutta käyttämällä kyseiselle osalle paksuutta $(1-\rho) t$ [3,4,5].

Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket (kaikki PL-luokat):

Leikkausvoiman takia pienennetty taivutuskestävyyden mitoitusarvo voidaan vaihtoehtoisesti laskea kaikilla poikkileikkausluokilla plastisen taivutuskestävyyden pienennettynä arvona seuraavasta kaavasta, mutta tällöin tulee lopuksi tarkastaa, että ei ylitetä poikkileikkauksen todellisen PL-luokan mukaista kohdan 2.6.1 mukaisesti laskettua taivutuskestävyyttä $M_{c.Rd}$ [3,4,5]:

$$M_{V.y.Rd} = \left[W_{pl.y} - \frac{\rho A_V^2}{8t} \right] \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}} \right) \qquad mutta \;\; M_{V.y.Rd} \leq M_{c.y.Rd} \qquad (2.103)$$

missä
- $W_{pl.y}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
- $M_{c.y.Rd}$ on poikkileikkauksen todellisen PL-luokan mukainen taivutuskestävyys kohdan 2.6.1 mukaisesti
- ρ lasketaan kaavan 2.102 mukaisesti
- A_V on z-suuntaisen leikkausvoiman $V_{z.Ed}$ mukainen leikkauspinta-ala kaavan (2.77) mukaisesti
- t on seinämänpaksuus
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Kaavan (2.103) tarkastelusuuntia vaihtamalla voidaan laskea vastaavasti y-suuntaisen leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys z-akselin suhteen.

Kahden akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle ja samanaikaisille leikkausvoimille ei esitetä Eurocoden osassa EN 1993-1-1 (eikä sitä edeltävässä esistandardissa ENV 1993-1-1) valmista yhteisvaikutusehtoa, vaan ainoastaan yleisen tason periaatteellinen ohjeistus. Eurocoden ohjeita on tältä osin tulkittu eri lähteissä hieman eri tavoin. Tulkintojen perusteella voidaan esittää seuraavat yhteisvaikutusehdot [33,34]:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{V.y.Rd}} \right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{V.z.Rd}} \right]^{\beta} \leq 1,0 \qquad poikkileikkausluokat\ 1\ ja\ 2 \qquad (2.104)$$

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{V.y.Rd}} \right] + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{V.z.Rd}} \right] \leq 1,0 \qquad poikkileikkausluokat\ 3\ ja\ 4 \qquad (2.105)$$

missä tekijöiden α ja β arvoiksi otetaan kohdan 2.6.4.1 mukaisesti $\alpha = \beta = 1{,}66$.

Kaikki edellä esitetyt (M+V) yhteisvaikutustarkastelut voidaan PL-luokilla 3 ja 4 vaihtoehtoisesti korvata von Misesin myötöehtoon perustuvalla jännitystarkastelulla kohdan 2.9.1.1 mukaisesti (jolloin ei tehdä leikkausvoimista aiheutuvia laskennallisia pienennyksiä paksuuksiin tai lujuuksiin, ja jännitykset - ja poikkileikkausluokan 4 tapauksessa yksi tehollinen poikkileikkaus - lasketaan kaikkien voimasuureiden vaikuttaessa samanaikaisesti).

Pyöreät rakenneputket (PL-luokat 1, 2 ja 3):

Leikkausvoiman takia pienennetty taivutuskestävyyden mitoitusarvo voidaan laskea varmalla puolella yksinkertaistaen käyttämällä pienennettyä myötölujuutta $(1-\rho)f_y$ koko poikkileikkaukselle:

$$M_{V.Rd} = (1 - \rho) M_{c.Rd} \qquad (2.106)$$

missä ρ lasketaan kaavan 2.102 mukaisesti käyttäen leikkausvoimalle arvoa

$$V_{Ed} = \sqrt{V_{y.Ed}^2 + V_{z.Ed}^2}$$

$M_{c.Rd}$ on poikkileikkauksen todellisen PL-luokan mukainen taivutuskestävyys kohdan 2.6.1 mukaisesti

Kahden akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle ja samanaikaisille leikkausvoimille saadaan lauseketta (2.106) ja kohtaa 2.6.4 soveltaen yhteisvaikutusehdoksi:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{V.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{V.z.Rd}}\right]^{\beta} \leq 1,0 \qquad (2.107)$$

missä tekijöiden α ja β arvoiksi otetaan pyöreillä rakenneputkilla $\alpha = \beta = 2$. Koska pyöreillä putkilla $M_{V.y.Rd} = M_{V.z.Rd}$, lauseke (2.107) sievenee muotoon:

$$M_{Ed} \leq M_{V.Rd} \qquad (2.108)$$

missä $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$

2.9.1.3.2 Taivutusmomentti ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä

Näitä Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisia tarkasteluja tarvitaan vain joillakin neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, sillä pyöreillä rakenneputkilla leikkauskestävyys määritellään poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 aina plastisen leikkauskestävyyden perusteella (ks. kohta 2.7.2).

Jos poikkileikkaus on mitoitettu niin, että laipat pystyvät yksinään kantamaan vaikuttavan taivutusmomentin (eli $M_{Ed} \leq M_{f.Rd}$), taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon (laippojen taivutuskestävyyden laskeminen neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla esitetään jäljempänä).

Muussa tapauksessa taivutuksen ja leikkauslommahduksen yhteisvaikutus täytyy ottaa huomioon, jos leikkausvoima ylittää puolet kohdan 2.7.1.2 mukaisesta leikkauslommahduskestävyyden uuman osuudesta, eli jos $V_{Ed} > 0{,}5 V_{bw.Rd}$ [3,4,5,13,14].

Taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutusehto on neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla tällöin [13,14]:

$$\bar{\eta}_1 + \left[1 - \frac{M_{f.Rd}}{M_{pl.Rd}}\right](2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \le 1,0 \qquad kun \;\; \bar{\eta}_1 \ge \frac{M_{f.Rd}}{M_{pl.Rd}} \tag{2.109}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} \tag{2.110}$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw.Rd}} \tag{2.111}$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

$M_{f.Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun vain tehol̲liset laipat otetaan huomioon

$M_{pl.Rd}$ on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo, kun poikkileikkaus koostuu poikkileikkausluokan mukaisesti tehollisista laipoista ja poikkileikkausluokasta riippumatta täysin tehollisesta uumasta

V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa mukaanlukien mahdollisesta väännöstä aiheutuva leikkaus

$V_{bw.Rd}$ on uuman osuus poikkileikkauksen leikkauslommahduskestävyydestä (kohta 2.7.1.2)

Yhteisvaikutusehto (2.109) pätee kaikilla poikkileikkausluokilla. On kuitenkin huomattava, että siinä käytetty Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukainen määritelmä plastiselle taivutuskestävyydelle poikkeaa osan EN 1993-1-1 mukaisesta määritelmästä (vrt. lauseke (2.44)).

Yhteisvaikutusehtoa (2.109) ei tarvitse tarkastaa sellaisessa poikkileikkauksessa, joka on enintään $h_w/2$ etäisyydellä tuesta, jossa on uuman pystyjäykisteet [13,14].

Pelkkien tehollisten laippojen taivutuskestävyys $M_{f.Rd}$ voidaan laskea neliön ja suorakaiteen muotoiselle rakenneputkelle seuraavasti [13,14,28]:

$$M_{f.Rd} = \frac{A_{f.eff} f_y}{\gamma_{M0}} \cdot (h - t) \tag{2.112}$$

$$A_{f.eff} = A_f - A_{f.non.eff} \tag{2.113}$$

$$A_f = [A - 2(h - 3t)t]/2 \tag{2.114}$$

$$A_{f.non.eff} = (1 - \rho)(b - 3t)t \tag{2.115}$$

missä h on poikkileikkauksen korkeus taivutusakselin suhteen

b on poikkileikkauksen leveys

A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)

A_f on laipan bruttopinta-ala

$A_{f.eff}$ on puristetun laipan tehollinen pinta-ala

$A_{f.non.eff}$ on puristetun laipan tehoton pinta-ala

ρ on tehollisen leveyden piennennystekijä kohdan 2.4.1 mukaisesti
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Kaava (2.109) kuvaa sitä, että pääosin uumaan kohdistuva leikkausrasitus ei vaikuta laippojen kykyyn kantaa taivutusmomenttia. Suuri leikkausrasitus heikentää siten vain uumien osuutta taivutuskestävyydessä (ensimmäinen sulkulauseke). Mahdollisesta väännöstä tai laipan suuntaisesta leikkausvoimasta aiheutuvalla laipan leikkausjännityksellä on enemmän merkitystä, ja silloin kaavaan (2.111) sijoitetaan uuman leikkauslommahduskestävyyden paikalle laipan kyseeseen tuleva leikkauskestävyys (eli plastinen leikkauskestävyys tai leikkauslommahduskestävyys), ja leikkausvoiman V_{Ed} paikalle laipassa vaikuttava leikkausvoima, kuitenkin vähintään puolet laipan leikkauskestävyydestä. Samalla kaavaan (2.109) sijoitetaan $M_{f.Rd} = 0$, ja tekijän $\overline{\eta}_1$ arvoksi otetaan lausekkeen (2.110) sijasta tekijä η_1 lausekkeesta [13,14]:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{W_{eff.y} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed} + N_{Ed}\, e_{Nz}}{W_{eff.z} f_y / \gamma_{M0}} \le 1,0 \qquad (2.116)$$

missä A_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala kun vain tasainen puristus vaikuttaa poikkileikkaukseen
W_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus kun vain momentti vaikuttaa tarkasteltavan akselin suhteen
e_N on neutraaliakselin siirtyminen tarkasteltavaan suuntaan kun poikkileikkaukseen kohdistuu vain tasainen puristus, jolloin kaksoissymmetrian johdosta rakenneputkilla on $e_{Ny} = 0$ ja $e_{Nz} = 0$

Yhteisvaikutusehdosta (2.109) voidaan ratkaista seuraava lauseke poikkileikkauksen pienennetylle taivutuskestävyydelle y-akselin suhteen, kun leikkausvoima vaikuttaa vain z-suunnassa:

$$M_{V.y.Rd} = M_{f.Rd} + (M_{pl.Rd} - M_{f.Rd})(1 - \rho_{bw}) \qquad (2.117)$$

$$\rho_{bw} = \left[\frac{2V_{z.Ed}}{V_{bw.Rd}} - 1\right]^2 \qquad (2.118)$$

Lauseke (2.117) pätee samoin edellytyksin kuin lauseke (2.109).

Lausekkeen (2.117) taivutuskestävyys muodostuu laippojen taivutuskestävyyden ja pienennetyn uuman osuuden summasta. Vertaamalla lausekkeita (2.117) - (2.118) aikaisemmin kohdassa 2.9.1.3.1 esitettyihin ohjeisiin nähdään, että jos poikkileikkauksen uuman hoikkuus on riittävän pieni jotta $V_{bw.Rd} \rightarrow V_{pl.Rd}$, lauseke (2.117) muistuttaa Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitettyä ohjetta jonka mukaan poikkileikkausluokan mukaista taivutuskestävyyttä pienennetään käyttämällä leikkauspinta-alalle pienennettyä myötölujuutta $(1-\rho)f_y$. Osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 ohjeiden samannäköisyydestä huolimatta lopputulokset poikkeavat kuitenkin toisistaan lähinnä siksi, että osan EN 1993-1-5 ohjetta sovelletaan kaikille poikkileikkausluokille, kun taas osassa EN 1993-1-1 lähtökohtana on poikkileikkausluokan mukaisen taivutuskestävyyden pienentäminen. Myös kaavoissa käytettyjen termien määritelmät poikkeavat hieman toisistaan.

2.9.1.4 Taivutusmomentti, leikkausvoima ja vääntömomentti

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan väännön vaikutus taivutuskestävyyteen otetaan huomioon jos leikkausvoima ylittää puolet väännön pienentämästä plastisesta leikkauskestävyydestä, eli $V_{Ed} > 0{,}5V_{pl.T.Rd}$. Pienentynyt taivutuskestävyys lasketaan tällöin kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti, mutta ρ lasketaan kaavasta [3,4,5]:

$$\rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{pl.T.Rd}} - 1\right]^2 \qquad (2.119)$$

missä $V_{pl.T.Rd}$ lasketaan kohdan 2.9.1.2.1 mukaisesti.

Osan EN 1993-1-1 ohjeet väännön yhteisvaikutukselle on tarkoitettu kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti tilanteelle, jossa leikkauslommahdus ei pienennä plastista leikkauskestävyyttä. Jos sen sijaan leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä, yhteisvaikutustarkastelut tehdään kohdan 2.9.1.3.2 mukaisesti, jolloin mahdollisen väännön vaikutukset tulee ottaa huomioon vaikuttavassa leikkausvoimassa V_{Ed} kohdan 2.9.1.2.2 mukaisesti [13,14].

2.9.1.5 Taivutusmomentti ja normaalivoima

Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen tarkastaminen perustuu poikkileikkauksen kestävyyden tarkastamiseen, kun sauvan nurjahdusta ja kiepahdusta ei oteta huomioon. Poikkileikkausluokan määrittäminen riippuu poikkileikkauksen jännitysjakaumasta. Poikkileikkausluokka voidaan yksinkertaisuuden vuoksi määrittää pelkästään puristusrasituksen perusteella, jolloin ollaan varmalla puolella.

2.9.1.5.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2

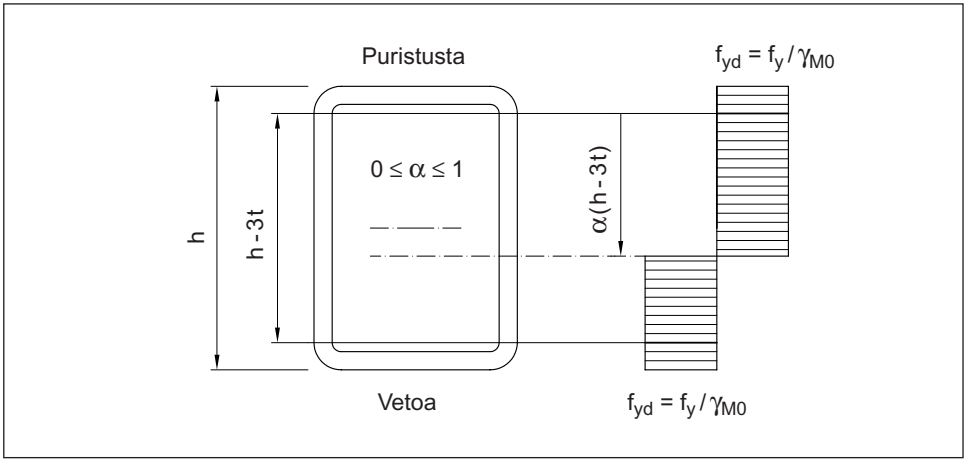
Taivutetussa poikkileikkauksessa samanaikainen normaalivoima aiheuttaa jännitysjakauman muuttumisen ja neutraaliakselin paikan siirtymisen (kuva 2.7). Plastisuusteorian mukaisessa mitoituksessa (PL-luokat 1 ja 2) neutraaliakselin siirtyminen vaikuttaa neliön ja suorakaiteen muotoisilla putkilla poikkileikkausluokkien rajoihin α-kertoimen kautta taulukon 2.7 mukaisesti (pyöreillä putkilla neutraaliakselin paikka ei vaikuta poikkileikkausluokkaan, ks taulukko 2.8). α-kerroin voidaan laskea neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla kaavasta:

$$\alpha = 0,5 \cdot \left[1 + \frac{N_{Ed}}{2(h-3t)\,t \cdot f_y / \gamma_{M0}}\right] \qquad (2.120)$$

$$|N_{Ed}| \le 2(h-3t)\,t \cdot f_y / \gamma_{M0} \qquad (2.121)$$

missä
- N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa (puristus on positiivinen)
- h on poikkileikkauksen korkeus taivutusakselin suhteen
- t on seinämänpaksuus
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Kaavaa (2.120) voidaan käyttää, kun vaikuttava normaalivoima N_{Ed} on enintään lausekkeen (2.121) suuruinen, jolloin plastinen neutraaliakseli sijaitsee laskennallisen uuman alueella ($0 \le \alpha \le 1$).



Kuva 2.7 Samanaikaisesti puristetun ja taivutetun poikkileikkauksen plastisen neutraaliakselin sijainti α-kertoimen avulla määritettynä (PL-luokat 1 ja 2)

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys pienenee normaalivoiman vaikutuksesta. Mitoitusehto on tällöin muotoa [3,4,5]:

$$M_{Ed} \le M_{N.Rd} \qquad (2.122)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
$M_{N.Rd}$ on normaalivoiman vaikutuksesta pienentynyt poikkileikkauksen taivutuskestävyys

Plastisuusteorian mukaisen pienentyneen taivutuskestävyyden mitoitusarvo riippuu poikkileikkauksen muodosta. Eri poikkileikkausten kestävyydet voidaan laskea seuraavista kaavoista [3,4,5]:

Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket, kun kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon:

- **taivutus y-akselin suhteen:**

$$M_{N.y.Rd} = M_{pl.y.Rd} \qquad kun \quad N_{Ed} \le \frac{0,5(A-2bt)f_y}{\gamma_{M0}} \quad ja \quad N_{Ed} \le 0,25N_{pl.Rd} \qquad (2.123a)$$

muulloin:

$$M_{N.y.Rd} = M_{pl.y.Rd}\frac{1-n}{1-0,5a_w} \qquad mutta \quad M_{N.y.Rd} \le M_{pl.y.Rd} \qquad (2.123b)$$

- **taivutus z-akselin suhteen:**

$$M_{N.z.Rd} = M_{pl.z.Rd} \qquad kun \quad N_{Ed} \le \frac{0,5(A-2ht)f_y}{\gamma_{M0}} \quad ja \quad N_{Ed} \le 0,25N_{pl.Rd} \qquad (2.124a)$$

muulloin:

$$M_{N.z.Rd} = M_{pl.z.Rd}\frac{1-n}{1-0,5a_f} \qquad mutta \quad M_{N.z.Rd} \le M_{pl.z.Rd} \qquad (2.124b)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$

$a_w = (A - 2bt)/A$ $\quad mutta \quad a_w \le 0,5$

$a_f = (A - 2ht)/A$ $\quad mutta \quad a_f \le 0,5$

Kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa yhteisvaikutusehto on [3,4,5]:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.z.Rd}}\right]^{\beta} \le 1,0 \qquad (2.125)$$

missä tekijöiden α ja β arvoiksi voidaan neliön ja suorakaiteen muotoisilla putkilla ottaa varmalla puolella oleva arvo $\alpha = \beta = 1$ tai arvot voidaan laskea seuraavasti [3,4,5]:

$$\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13n^2} \qquad mutta \quad \alpha = \beta \le 6 \qquad (2.126)$$

Varmalla puolella olevana likimääräistyksenä voidaan käyttää seuraavaa hyväksikäyttöasteiden lineaariseen summaamiseen perustuvaa yhteisvaikutusehtoa [3,4,5]:

$$\frac{N_{Ed}}{Af_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{pl.y}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{pl.z}f_y/\gamma_{M0}} \le 1,0 \qquad (2.127)$$

Pyöreät rakenneputket, kun kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon:

$$M_{N.Rd} = M_{pl.Rd}(1-n^{1,7}) \qquad mutta \quad M_{N.Rd} \le M_{pl.Rd} \qquad (2.128)$$

missä $n = N_{Ed}/N_{pl.Rd}$

Kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa yhteisvaikutusehto on [3,4,5]:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.z.Rd}}\right]^{\beta} \le 1,0 \qquad (2.129)$$

missä tekijöiden α ja β arvoiksi otetaan pyöreillä putkilla $\alpha = \beta = 2$. Koska pyöreillä putkilla $M_{N.y.Rd} = M_{N.z.Rd}$, lauseke (2.129) sievenee muotoon:

$$M_{Ed} \le M_{N.Rd} \qquad (2.130)$$

missä $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$

2.9.1.5.2 Poikkileikkausluokka 3

Kimmoteorian mukaisessa mitoituksessa taivutetun poikkileikkauksen neutraaliakselin siirtyminen samanaikaisen normaalivoiman vaikutuksesta muuttaa poikkileikkauksen reunajännitysten suhdetta ψ, jolloin poikkileikkausluokkien rajat muuttuvat taulukossa 2.7 esitetyn mukaisesti.

Kun leikkausvoimaa ei ole, aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ ei saa ylittää myötölujuuden mitoitusarvoa poikkileikkauksen missään kohdassa [3,4,5]:

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.131)$$

Kiinnittimien reijät otetaan tarvittaessa huomioon, ks. kohdat 2.5.1 ja 2.6.2.

Lauseke (2.131) voidaan esittää myös hyväksikäyttöasteiden summana seuraavasti:

Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket:

$$\frac{N_{Ed}}{A f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \qquad (2.132)$$

Pyöreät rakenneputket:

$$\frac{N_{Ed}}{A f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{Ed}}{W_{el} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \qquad (2.133)$$

missä $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$

2.9.1.5.3 Poikkileikkausluokka 4

Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, kun leikkausvoimaa ei ole, aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ ei saa ylittää myötölujuuden mitoitusarvoa poikkileikkauksen missään kohdassa [3,4,5]:

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad (2.134)$$

Aksiaalinen jännitys $\sigma_{x.Ed}$ määritetään poikkileikkausluokassa 4 tehollisen poikkileikkauksen perusteella. Kiinnittimien reijät otetaan tarvittaessa huomioon, ks. kohdat 2.5.1 ja 2.6.2.

Vaihtoehtona ehdolle (2.134) voidaan tarkastaa seuraava yhteisvaikutusehto [3,4,5,13,14]:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff.y} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff.z} f_y / \gamma_{M0}} \leq 1,0 \qquad (2.135)$$

missä A_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala kun <u>vain tasainen puristus</u> vaikuttaa poikkileikkaukseen

W_{eff} on poikkileikkauksen tehollinen taivutusvastus kun vain momentti vaikuttaa tarkasteltavan akselin suhteen

e_N on neutraaliakselin siirtyminen tarkasteltavaan suuntaan kun poikkileikkaukseen kohdistuu vain tasainen puristus, jolloin kaksoissymmetrian johdosta rakenneputkilla on e_{Ny} = 0 ja e_{Nz} = 0

Suureiden N_{Ed}, $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$ etumerkit riippuvat vaikuttavien aksiaalisten jännitysten yhdistelmästä.

2.9.1.6 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima

Kuten taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutuksessa (kohta 2.9.1.3), myös (M+N+V) yhteisvaikutuksen tarkastaminen on jaettu Eurocodessa osiin EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 riippuen siitä, pienentääkö leikkauslommahdus poikkileikkauksen plastista leikkauskestävyyttä. Osan EN 1993-1-1 ohjeita käytetään kun poikkileikkauksen leikkauskestävyys on plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ suuruinen, ja osan EN 1993-1-5 ohjeita käytetään kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä, eli $V_{b.Rd} < V_{pl.Rd}$.

2.9.1.6.1 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan leikkausvoiman vaikutusta taivutuskestävyyteen ei tarvitse ottaa huomioon, jos leikkausvoima on korkeintaan puolet plastisesta leikkauskestävyydestä, eli $V_{Ed} \leq 0{,}5 V_{pl.Rd}$. Tällöin riittää, että tarkastetaan taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus kohdan 2.9.1.5 mukaisesti.

Muussa tapauksessa taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutuksen mukaisia kestävyyksiä (kohta 2.9.1.5) pienennetään vielä lisää käyttämällä tarkasteltavan suunnan mukaiselle leikkauspinta-alalle (eli leikkausvoiman suuntaisille taso-osille) pienennettyä myötölujuutta $(1-\rho)f_y$, missä ρ lasketaan kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti [3,4,5].

Myötölujuuden pienentämisen sijasta voidaan vaihtoehtoisesti pienentää poikkileikkauksen vastaavan osan paksuutta käyttämällä kyseiselle osalle paksuutta $(1-\rho)\,t$ [3,4,5].

Varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena voidaan koko poikkileikkaukselle käyttää pienennettyä myötölujuutta $(1-\rho)f_y$ tai vaihtoehtoisesti pienennettyä paksuutta $(1-\rho)\,t$.

2.9.1.6.1.1 Poikkileikkausluokat 1 ja 2

Neutraaliakselin siirtyminen tapahtuu kuten samanaikaisen taivutuksen ja normaalivoiman tapauksessa (ks. kohta 2.9.1.5.1).

Samanaikaisen taivutusmomentin, normaalivoiman ja leikkausvoiman mitoitusehto on muotoa [3,4,5]:

$$M_{Ed} \leq M_{N.V.Rd} \qquad (2.136)$$

missä M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
$M_{N.V.Rd}$ on normaalivoiman ja leikkausvoiman vaikutuksesta pienentynyt poikkileikkauksen taivutuskestävyys

Plastisuusteorian mukaisen pienentyneen taivutuskestävyyden mitoitusarvo riippuu poikkileikkauksen muodosta.

Eri poikkileikkausten kestävyydet voidaan laskea seuraavista kaavoista. Kaavat ovat perusrakenteeltaan pitkälti samoja kuin (M+N) yhteisvaikutuskaavat kohdassa 2.9.1.5.1, mutta nyt otetaan lisäksi huomioon leikkausvoiman pienentävä vaikutus leikkausta kulloinkin kantavien poikkileikkauksen osien kestävyyksissä (pinta-aloissa) ja sitä kautta koko poikkileikkauksessa [3,4,5,34]. Todettakoon tässä yhteydessä, että standardi EN 1993-1-1 poikkeaa tällöin hieman kohdassa 2.7.1.1 leikkauskestävyyden laskennassa käyttämästään leikkauspinta-alan määrittelystä.

Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket, kun kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon:

- **taivutus y-akselin suhteen (N_{Ed} ja $V_{z.Ed}$ ja $M_{y.Ed}$):**

$$M_{N.V.y.Rd} = M_{V.y.Rd} \quad kun \quad N_{Ed} \le \frac{0,5A_{w.red}f_y}{\gamma_{M0}} \quad ja \quad N_{Ed} \le 0,25N_{V.Rd} \qquad (2.137a)$$

muulloin:

$$M_{N.V.y.Rd} = M_{V.y.Rd}\frac{1-n_V}{1-0,5a_V} \quad mutta \quad M_{N.V.y.Rd} \le M_{V.y.Rd} \qquad (2.137b)$$

missä $n_V = N_{Ed} / N_{V.Rd}$
$a_V = A_{w.red} / A_{tot.red}$ mutta $a_V \le 0,5$
$A_{w.red} = (1-\rho_z)(A-2bt)$
$A_{tot.red} = A - \rho_z(A-2bt)$
$N_{V.Rd} = A_{tot.red}f_y / \gamma_{M0}$
ρ_z ja $M_{V.y.Rd}$ lasketaan kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti

- **taivutus z-akselin suhteen (N_{Ed} ja $V_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$):**

$$M_{N.V.z.Rd} = M_{V.z.Rd} \quad kun \quad N_{Ed} \le \frac{0,5A_{f.red}f_y}{\gamma_{M0}} \quad ja \quad N_{Ed} \le 0,25N_{V.Rd} \qquad (2.138a)$$

muulloin:

$$M_{N.V.z.Rd} = M_{V.z.Rd}\frac{1-n_V}{1-0,5a_V} \quad mutta \quad M_{N.V.z.Rd} \le M_{V.z.Rd} \qquad (2.138b)$$

missä $n_V = N_{Ed} / N_{V.Rd}$
$a_V = A_{f.red} / A_{tot.red}$ mutta $a_V \le 0,5$
$A_{f.red} = (1-\rho_y)(A-2ht)$
$A_{tot.red} = A - \rho_y(A-2ht)$
$N_{V.Rd} = A_{tot.red}f_y / \gamma_{M0}$
ρ_y ja $M_{V.z.Rd}$ lasketaan kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti

Kahden akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle ja samanaikaisille leikkausvoimille ei esitetä Eurocoden osassa EN 1993-1-1 (eikä sitä edeltävässä esistandardissa ENV 1993-1-1) valmista yhteisvaikutusehtoa, vaan ainoastaan yleisen tason periaatteellinen ohjeistus. Eurocoden ohjeita on tältä osin tulkittu eri lähteissä hieman eri tavoin. Tulkintojen perusteella voidaan esittää seuraava yhteisvaikutusehto [33,34]:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.V.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.V.z.Rd}}\right]^{\beta} \leq 1,0 \qquad (2.139)$$

missä tekijät α ja β saadaan kohdan 2.9.1.5.1 mukaisesti, kuitenkin sillä erolla että laskettaessa α ja β tekijöitä kaavasta (2.126) neliön tai suorakaiteen muotoisille putkille käytetään tekijän n sijasta nyt tekijää n_V, joka lasketaan erikseen kummallekin tekijälle α ja β lausekkeiden (2.137) ja (2.138) yhteydessä esitettyjen määritelmien mukaisesti.

Pyöreät rakenneputket, kun kiinnittimien reikiä ei tarvitse ottaa huomioon:

$$M_{N.V.Rd} = M_{V.Rd}(1 - n^{1,7}) \qquad mutta \quad M_{N.V.Rd} \leq M_{V.Rd} \qquad (2.140)$$

missä $n = N_{Ed} / N_{pl.Rd}$

$M_{V.Rd}$ lasketaan kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti

Kahden akselin suhteen tapahtuvassa taivutuksessa yhteisvaikutusehto on:

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.V.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.V.z.Rd}}\right]^{\beta} \leq 1,0 \qquad (2.141)$$

missä tekijöille α ja β käytetään pyöreillä putkilla samoja arvoja kuin kohdassa 2.9.1.5.1, eli $\alpha = \beta = 2$. Koska pyöreillä putkilla $M_{N.y.Rd} = M_{N.z.Rd}$, lauseke (2.141) sievenee muotoon:

$$M_{Ed} \leq M_{N.V.Rd} \qquad (2.142)$$

missä $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$

2.9.1.6.1.2 Poikkileikkausluokat 3 ja 4

Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan poikkileikkausluokissa 3 ja 4 leikkausvoiman yhteisvaikutus otetaan huomioon käyttämällä pienennettyä lujuutta $(1-\rho)f_y$ leikkauspinta-alalle, kun lasketaan kestävyyksiä ja poikkileikkaussuureita. Pienennetty lujuus voidaan vaihtoehtoisesti ottaa huomioon siten, että tehollisen poikkipinnan ja poikkileikkaussuureiden laskennassa leikkauspinta-alan paksuutena käytetään pienennettyä paksuutta $(1-\rho)t$. Tekijä ρ lasketaan kohdan 2.9.1.3.1 mukaisesti.

Laskenta muodostuu tällöin kuitenkin varsin hankalaksi erityisesti, jos leikkausvoima vaikuttaa samanaikaisesti sekä y- että z-suuntiin. Käytännössä kannattaa tehdä varmalla puolella oleva yksinkertaistus, jossa koko poikkileikkaukselle käytetään pienennettyä lujuutta $(1-\rho)f_y$. Yhteisvaikutuskaavat voidaan tällöin esittää seuraavissa muodoissa:

- **poikkileikkausluokka 3 (kaikki muodot):**

$$\frac{N_{Ed}}{A f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed}}{W_{el.y} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed}}{W_{el.z} f_y / \gamma_{M0}} \leq (1 - \rho) \qquad (2.143)$$

- **poikkileikkausluokka 4 (neliön ja suorakaiteen muotoiset putket):**

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{W_{eff.y} f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{W_{eff.z} f_y / \gamma_{M0}} \leq (1 - \rho) \qquad (2.144)$$

missä ehtoyhtälöiden vasen puoli lasketaan (ilman leikkausvoimasta johtuvia pienennyksiä) kuten (M+N) yhteisvaikutus kohdassa 2.9.1.5. Jos leikkausvoima vaikuttaa samanaikaisesti sekä y- että z-suuntiin, sijoitetaan ehtoyhtälön oikealle puolelle termin $(1-\rho)$ paikalle määräävä (eli pienin) termeistä $(1-\rho_y)$ tai $(1-\rho_z)$. Kaksoissymmetrian johdosta lausekkeessa (2.144) neutraaliakselin siirtymä on rakenneputkilla $e_{Ny} = 0$ ja $e_{Nz} = 0$. Tekijä ρ lasketaan kaavasta (2.102).

Edellä esitetyt (M+N+V) yhteisvaikutustarkastelut voidaan PL-luokilla 3 ja 4 vaihtoehtoisesti korvata von Misesin myötöehtoon perustuvalla jännitystarkastelulla kohdan 2.9.1.1 mukaisesti (jolloin ei tehdä leikkausvoimista aiheutuvia laskennallisia pienennyksiä paksuuksiin tai lujuuksiin, ja jännitykset - ja poikkileikkausluokan 4 tapauksessa yksi tehollinen poikkileikkaus - lasketaan kaikkien voimasuureiden vaikuttaessa samanaikaisesti).

2.9.1.6.2 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä

Näitä Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisia tarkasteluja tarvitaan vain joillakin neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, sillä pyöreillä rakenneputkilla leikkauskestävyys määritellään poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 aina plastisen leikkauskestävyyden perusteella (ks. kohta 2.7.2).

Jos poikkileikkaukseen vaikuttaa taivutusmomentin ja leikkausvoiman lisäksi myös normaalivoima, yhteisvaikutus tarkastetaan kuten kohdassa 2.9.1.3.2 on esitetty taivutuksen ja leikkauksen yhteisvaikutukselle, kuitenkin sillä erotuksella että [13,14]:

- $M_{pl.Rd}$ korvataan kohdan 2.9.1.5.1 perusteella lasketulla pienennetyllä taivutuskestävyyden mitoitusarvolla $M_{N.Rd}$ (käyttäen lähtökohtana kohdassa 2.9.1.3.2 esitetyn mukaisesti poikkileikkausta, joka koostuu poikkileikkausluokan mukaisesti tehollisista laipoista ja poikkileikkausluokasta riippumatta täysin tehollisesta uumasta)
- $M_{f.Rd}$ korvataan laippojen pienennetyllä taivutuskestävyyden arvolla $M_{N.f.Rd}$

Laippojen pienennetty taivutuskestävyys $M_{N.f.Rd}$ voidaan laskea neliön ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille kaavasta:

$$M_{N.f.Rd} = M_{f.Rd}\left[1 - \frac{N_{Ed}}{2A_f f_y / \gamma_{M0}}\right] \qquad (2.145)$$

missä laippojen taivutuskestävyys $M_{f.Rd}$ lasketaan kaavasta (2.112) ja laipan pinta-ala A_f kaavasta (2.114).

Jos normaalivoima on niin suuri että uumat ovat puristettuina koko korkeudeltaan (h - 3t), ei tehdä edellä kuvattuja pienennyksiä, vaan taivutusmomentin, normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutus tarkastetaan suoraan kohdan 2.9.1.3.2 mukaisella lausekkeella (2.109), mutta laippojen taivutuskestävyyden arvoksi asetetaan nyt $M_{f.Rd}$ = 0 ja tekijän $\overline{\eta}_1$ arvoksi otetaan lausekkeen (2.110) sijasta tekijä η_1 lausekkeesta (2.116) [13,14].

Jos laipassa vaikuttaa mahdollisesta väännöstä tai laipan suuntaisesta leikkausvoimasta aiheutuva leikkausjännitys, yhteisvaikutus tarkastetaan kohdassa 2.9.1.3.2 esitetyn kyseisen tilanteen mukaisesti, jolloin myös normaalivoiman yhteisvaikutus tulee otettua huomioon. Näin toimitaan riippumatta siitä, ovatko uumat kokonaan puristettuina vai ei [13,14].

2.9.1.7 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti

Leikkausvoimasta johtuen yhteisvaikutuksen tarkastaminen jakautuu Eurocodessa jälleen osiin EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-5 riippuen siitä, pienentääkö leikkauslommahdus poikkileikkauksen plastista leikkauskestävyyttä. Osan EN 1993-1-1 ohjeita käytetään kun poikkileikkauksen leikkauskestävyys on plastisen leikkauskestävyyden $V_{pl.Rd}$ suuruinen, ja osan EN 1993-1-5 ohjeita käytetään kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä, eli $V_{b.Rd} < V_{pl.Rd}$.

2.9.1.7.1 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä

Kuten kohdassa 2.9.1.4, väännön lisävaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon, jos leikkausvoima on korkeintaan puolet kohdan 2.9.1.2.1 mukaisesta väännön pienentämästä plastisesta leikkauskestävyydestä, eli $V_{Ed} \leq 0{,}5\,V_{pl.T.Rd}$. Tällöin riittää että tarkastetaan taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus kohdan 2.9.1.5 mukaisesti.

Muussa tapauksessa yhteisvaikutus tarkastetaan kuten ilman vääntöä (eli kohdan 2.9.1.6.1 mukaisesti), mutta ρ lasketaan ottaen huomioon väännön pienentävä vaikutus kohdan 2.9.1.4 mukaisesti.

2.9.1.7.2 Taivutusmomentti, normaalivoima, leikkausvoima ja vääntömomentti, kun leikkauslommahdus pienentää leikkauskestävyyttä

Näitä Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisia tarkasteluja tarvitaan vain joillakin neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla, sillä pyöreillä rakenneputkilla leikkauskestävyys määritellään poikkileikkausluokissa 1, 2 ja 3 aina plastisen leikkauskestävyyden perusteella (ks. kohta 2.7.2).

Taivutusmomentin, normaalivoiman, leikkausvoiman ja vääntömomentin yhteisvaikutus voidaan tarkastaa kohdan 2.9.1.6.2 mukaisesti, sillä kuten aikaisemmin on todettu, Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisissa tarkasteluissa mahdollisen väännön vaikutukset tulee ottaa huomioon vaikuttavassa leikkausvoimassa V_{Ed} (väännön vaikutus leikkausvoimassa V_{Ed}, ks. kohta 2.9.1.2.2) [13,14].

2.9.2 Poikkileikkausluokan 4 pyöreä rakenneputki

Poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken poikkileikkauksen kestävyys kaikilla voimasuureyhdistelmillä voidaan todentaa seuraavilla bruttopoikkileikkauksen normaalijännityksen ja leikkausjännityksen jännitystarkasteluilla:

Pituussuuntainen vetojännitys ei saa poikkileikkauksen missään pisteessä ylittää myötölujuuden mitoitusarvoa, ja pituussuuntainen puristusjännitys ei saa ylittää poikkileikkauksen lommahduslujuuden mitoitusarvoa [16]:

$$\sigma_{x.Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} \pm \frac{M_{Ed}}{W_{el}} \qquad (2.146)$$

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \qquad kun\ \sigma_{x.Ed}\ on\ vetoa \qquad (2.147)$$

$$\sigma_{x.Ed} \leq \frac{\chi_x f_y}{\gamma_{M1}} \qquad kun\ \sigma_{x.Ed}\ on\ puristusta \qquad (2.148)$$

missä
- $\sigma_{x.Ed}$ on pituussuuntaisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
- N_{Ed} on normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilasssa (puristus on positiivinen)
- A on bruttopoikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
- M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa, $M_{Ed} = \sqrt{M_{y.Ed}^2 + M_{z.Ed}^2}$
- W_{el} on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
- χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kohdan 2.5.2.2 mukaisesti
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-1 mukaisesti** (taulukko 2.5)
- γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Leikkausvoimasta ja / tai väännöstä aiheutuva leikkausjännityksen τ_{Ed} maksimiarvo ei saa ylittää leikkauslommahduslujuuden mitoitusarvoa [16]:

$$\tau_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{\pi r_m t} + \frac{M_{x.Ed}}{W_t} \qquad (2.149)$$

$$\tau_{Ed} \leq \frac{\chi_\tau f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M1}} \qquad (2.150)$$

missä
- τ_{Ed} on leikkausjännityksen kimmoteorian mukainen maksimiarvo
- V_{Ed} on leikkausvoiman mitoitusarvo murtorajatilassa, $V_{Ed} = \sqrt{V_{y.Ed}^2 + V_{z.Ed}^2}$
- r_m on putken seinämän keskilinjan säde
- t on seinämänpaksuus
- $M_{x.Ed}$ on vääntömomentin mitoitusarvo murtorajatilassa

W_t on poikkileikkauksen vääntövastus (liite 11.1)
χ_τ on leikkauslommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kohdan 2.7.2.2 mukaisesti
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Samanaikaisesti vaikuttavan normaalijännityksen ja leikkausjännityksen yhteisvaikutus voidaan todentaa poikkileikkauksen kriittisessä pisteessä seuraavalla lommahduslujuuksiin perustuvalla yksinkertaistetulla jännitystarkastelulla, joka on johdettu Eurocoden kuorirakenteiden osassa EN 1993-1-6 esitetystä yleisemmän tilanteen yhteisvaikutusehdosta [16]:

$$\left[\frac{\sigma_{x.Ed}}{\chi_x f_y/\gamma_{M1}}\right]^{k_x} + \left[\frac{\tau_{Ed}}{\chi_\tau (f_y/\sqrt{3})/\gamma_{M1}}\right]^{k_\tau} \le 1,0 \qquad (2.151)$$

$$k_x = 1,25 + 0,75\chi_x \qquad (2.152)$$

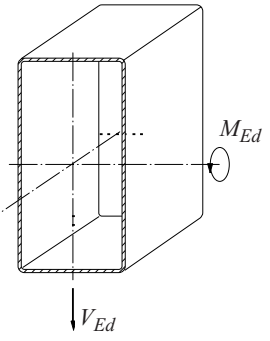
$$k_\tau = 1,75 + 0,25\chi_\tau \qquad (2.153)$$

missä $\sigma_{x.Ed}$ on pituussuuntaisen jännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa (puristus on positiivinen)
τ_{Ed} on leikkausjännityksen mitoitusarvo tarkasteltavassa kohdassa
χ_x on lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kohdan 2.5.2.2 mukaisesti
χ_τ on leikkauslommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä kohdan 2.7.2.2 mukaisesti
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku **EN 1993-1-6 mukaisesti** (taulukko 2.5)

Jos pituussuuntainen jännitys on vetoa, ehtoon (2.151) sijoitetaan $\sigma_{x.Ed} = 0$ [16].

Esimerkki 2.18

Lasketaan rakenneputken 400×200×6 kestävyys taivutusmomentin ja leikkausvoiman yhteisvaikutukselle. Käytetään hyväksi esimerkkiä 2.12, jossa laskettiin saman putken leikkauslommahduskestävyys, ja todettiin että leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen leikkauskestävyyttä.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Voimasuureet ovat:

$V_{Ed} = 650\ kN$
$M_{Ed} = 320\ kNm$

$A = 6963\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$W_{pl} = 906{,}0 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

$V_{bw.Rd} = 948{,}5\ kN$ *(uuman osuus leikkauslommahduskestävyydestä, esimerkistä 2.12)*

Tarkastetaan putken poikkileikkausluokka (taulukko 2.9):

Laippa:
$b/t = 200/6 = 33,3 \le 34,4$ *(puristettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 3*

Uuma:
$h/t = 400/6 = 66,7 \le 95,8$ *(taivutettu)* $\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 3*

Laipat ja koko poikkileikkaus ovat siis kokonaan tehokkaat.

Lasketaan pelkkien tehollisten laippojen taivutuskestävyys:

$$A_f = [A - 2(h - 3t)t]/2 = [6963 - 2 \cdot (400 - 3 \cdot 6) \cdot 6]/2 = 1190\ mm^2 = A_{f.eff}$$

$$M_{f.Rd} = \frac{A_{f.eff} f_y}{\gamma_{M0}} \cdot (h - t) = \frac{1190 \cdot 420}{1,0} \cdot (400 - 6) = 196,9\ kNm < M_{Ed} = 320\ kNm$$

Laipat eivät yksinään pysty kantamaan vaikuttavaa taivutusmomenttia
$\Rightarrow$ *uumia tarvitaan laippojen avuksi joten taivutuksen ja leikkausvoiman yhteisvaikutus täytyy tarkastaa.*

Tarkastetaan leikkausvoiman suuruus suhteessa uuman leikkauslommahduskestävyyteen:

$$V_{Ed} = 650\ kN > 0{,}5 V_{bw.Rd} = 0{,}5 \cdot 948{,}5 = 474{,}3\ kN$$

Leikkausvoima on yli puolet leikkauslommahduskestävyyden uuman osuudesta, joten leikkausvoima pienentää taivutuskestävyyttä.

Tehollisten laippojen ja täysin tehokkaaksi oletetun uuman plastinen taivutuskestävyys on tässä esimerkissä sama kuin koko poikkileikkauksen plastinen taivutuskestävyys:

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{906{,}0 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 380,5\ kNm$$

Lasketaan yhteisvaikutusehdon apusuureet:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl.Rd}} = \frac{320,0}{380,5} = 0,8410$$

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw.Rd}} = \frac{650,0}{948,5} = 0,6853$$

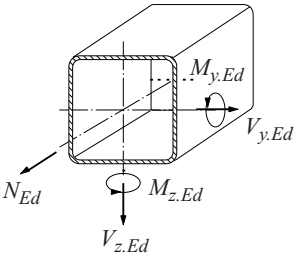
Tarkastetaan yhteisvaikutusehto:

$$\bar{\eta}_1 + \left[1 - \frac{M_{f.Rd}}{M_{pl.Rd}}\right](2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,8410 + \left[1 - \frac{196,9}{380,5}\right](2 \cdot 0,6853 - 1)^2 = 0,9073 \le 1,0 \quad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, laskentamenettely säilyisi tässä samana (eli leikkauslommahdus määrää leikkauskestävyyden ja leikkausvoima pienentää taivutuskestävyyttä). S355 putkena poikkileikkaus kestäisi kummankin kuormituksen erikseen, mutta ei niiden yhteisvaikutusta, sillä viimeinen yhteisvaikutusehto antaisi tuloksen 1,11 > 1,0 eli putken kestävyys ei riitä. Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa kokonaiskestävyyttä tässä likimäärin samassa suhteessa, eli myötölujuuden kasvattaminen päästään hyödyntämään kestävyydessä täysimääräisesti.

Esimerkki 2.19

Tarkastetaan kestääkö esimerkissä 2.4 tarkasteltu rakenneputki 200×200×8 kuvan mukaisen kuormituksen.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Kuormien arvot ovat:

$N_{Ed} = 1400$ kN
$M_{y.Ed} = 55$ kNm
$M_{z.Ed} = 50$ kNm
$V_{z.Ed} = 500$ kN
$V_{y.Ed} = 200$ kN

$A = 5924\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$W_{pl} = 420,9 \cdot 10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1,0$
$\gamma_{M1} = 1,0$

Tarkastetaan poikkileikkausluokka varmalla puolella yksinkertaistaen pelkän tasaisen puristuksen mukaan (taulukko 2.9):

$h/t = b/t = 200/8 = 25 \leq 27,7 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 1*

Leikkauskestävyyden laskentatapa riippuu uumien hoikkuudesta (taulukko 2.19):

$h/t = 200/8 = 25 \leq 56,9$

$\Rightarrow$ *leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä joten poikkileikkauksen leikkauskestävyyden määrää plastinen leikkauskestävyys (kummankin akselin suunnassa)*

Poikkileikkauksen plastinen leikkauskestävyys on sama molempien akselien suunnassa:

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b+h} = 5924 \cdot \frac{200}{200+200} = 2962\ mm^2$$

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 2962 \cdot \frac{420/\sqrt{3}}{1,0} = 718,2\ kN$$

Tarkastetaan taivutus y-akselin suhteen:

Poikkileikkauksen plastinen taivutuskestävyys on:

$$M_{pl.y.Rd} = \frac{W_{pl.y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{420,9 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 176,8\ kNm$$

Tarkastetaan täytyykö leikkausvoiman vaikutus ottaa huomioon yhteisvaikutusehdoissa:

$V_{z.Ed} = 500\ kN > 0,5 V_{z.pl.Rd} = 0,5 \cdot 718,2 = 359,1\ kN$

$\Rightarrow$ *leikkausvoiman yhteisvaikutus täytyy ottaa huomioon z-akselin suunnassa*

Leikkausvoiman aiheuttama suhteellinen vähennys taivutuskestävyyteen riippuu parametrista ρ*:*

$$\rho_z = \left[\frac{2V_{z.Ed}}{V_{z.pl.Rd}} - 1\right]^2 = \left[\frac{2 \cdot 500}{718,2} - 1\right]^2 = 0,1540$$

Leikkausvoiman pienentämä taivutuskestävyys on:

$$M_{V.y.Rd} = \left[W_{pl.y} - \frac{\rho_z A_V^2}{8t}\right]\left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}}\right) = \left[420,9 \cdot 10^3 - \frac{0,1540 \cdot 2962^2}{8 \cdot 8}\right]\left(\frac{420}{1,0}\right) = 167,9\ kNm$$

Tarkastetaan kaavassa (2.137a) esitettyjen vaatimusten perusteella pitääkö normaalivoiman vaikutus huomioida taivutuskestävyydessä:

leikkausvoiman pienentämät pinta-alat ovat:

$$A_{w.red} = (1-\rho_z)(A-2bt) = (1-0,1540) \cdot (5924 - 2 \cdot 200 \cdot 8) = 2305\ mm^2$$

$$A_{tot.red} = A - \rho_z(A-2bt) = 5924 - 0,1540 \cdot (5924 - 2 \cdot 200 \cdot 8) = 5505\ mm^2$$

leikkausvoiman pienentämä normaalivoimakestävyys on:

$$N_{V.Rd} = A_{tot.red} f_y / \gamma_{M0} = 5505 \cdot 420 / 1,0 = 2312\ kN \geq N_{Ed} \quad OK$$

$$N_{Ed} = 1400\ kN > 0,25 N_{V.Rd} = 0,25 \cdot 2312 = 578,0\ kN$$

⇒ normaalivoima ylittää ainakin tämän kaavassa (2.137a) esitetyistä kahdesta raja-arvosta, joten normaalivoiman vaikutus pitää ottaa huomioon taivutuskestävyyttä laskettaessa:

$$n_V = N_{Ed} / N_{V.Rd} = 1400 / 2312 = 0,6055$$

$$a_V = A_{w.red} / A_{tot.red} = 2305 / 5505 = 0,4187 \leq 0,5$$

$$M_{N.V.y.Rd} = M_{V.y.Rd} \frac{1 - n_V}{1 - 0,5 a_V} = 167,9 \cdot \frac{1 - 0,6055}{1 - 0,5 \cdot 0,4187} = 83,8\ kNm \leq M_{V.y.Rd} = 167,9\ kNm$$

$$M_{N.V.y.Rd} = 83,8\ kNm \geq M_{y.Ed} \quad OK$$

Tarkastetaan taivutus z-akselin suhteen:

Poikkileikkauksen plastinen taivutuskestävyys on:

$$M_{pl.z.Rd} = \frac{W_{pl.z} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{420,9 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0} = 176,8\ kNm$$

Tarkastetaan täytyykö leikkausvoiman vaikutus ottaa huomioon yhteisvaikutusehdoissa:

$$V_{y.Ed} = 200\ kN \leq 0,5 V_{y.pl.Rd} = 0,5 \cdot 718,2 = 359,1\ kN$$

⇒ leikkausvoiman yhteisvaikutusta ei tarvitse ottaa huomioon y-akselin suunnassa, joten yhteisvaikutus z-akselin suhteen voidaan suorittaa (M+N) yhteisvaikutustarkasteluna:

Tarkastetaan kaavassa (2.124a) esitettyjen vaatimusten perusteella pitääkö normaalivoiman vaikutus huomioida taivutuskestävyydessä:

$$N_{pl.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{5924 \cdot 420}{1,0} = 2488\ kN$$

$$N_{Ed} = 1400\ kN > 0,25 N_{pl.Rd} = 0,25 \cdot 2488 = 622,0\ kN$$

⇒ normaalivoima ylittää ainakin tämän kaavassa (2.124a) esitetyistä kahdesta raja-arvosta, joten normaalivoiman vaikutus pitää ottaa huomioon taivutuskestävyyttä laskettaessa:

$$n = N_{Ed} / N_{pl.Rd} = 1400 / 2488 = 0,5627$$

$$a_f = (A - 2ht) / A = (5924 - 2 \cdot 200 \cdot 8) / 5924 = 0,4598 \leq 0,5$$

$$M_{N.z.Rd} = M_{pl.z.Rd} \frac{1 - n}{1 - 0,5 a_f} = 176,8 \cdot \frac{1 - 0,5627}{1 - 0,5 \cdot 0,4598} = 100,4\ kNm \leq M_{pl.z.Rd} = 176,8\ kNm$$

$$M_{N.z.Rd} = 100,4\ kNm$$

Kuten aikaisemmin todettiin, y-suuntainen leikkausvoima on niin pieni, että sitä ei tarvitse ottaa huomioon laskettaessa taivutuskestävyyttä z-akselin suhteen. Näin ollen voidaan merkitä:

$$M_{N.V.z.Rd} = M_{N.z.Rd} = 100,4\ kNm \geq M_{z.Ed} \qquad OK$$

Tarkastetaan vielä kahden akselin suhteen samanaikaisen taivutuksen yhteisvaikutus:

Lasketaan y-akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle tarvittava parametri α (leikkausvoiman vaikutus otetaan tällöin huomioon käyttämällä n-tekijän sijasta tekijää n_V):

$$\alpha = \frac{1,66}{1-1,13n_V^2} = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot 0,6055^2} = 2,834 \leq 6$$

Lasketaan z-akselin suhteen tapahtuvalle taivutukselle tarvittava parametri β (aikaisemmin todetun mukaisesti leikkausvoiman vaikutusta ei tarvitse tässä suunnassa nyt ottaa huomioon, joten $n_V = n$):

$$\beta = \frac{1,66}{1-1,13n_V^2} = \frac{1,66}{1-1,13n^2} = \frac{1,66}{1-1,13 \cdot 0,5627^2} = 2,585 \leq 6$$

Tarkastetaan yhteisvaikutusehto (2.141):

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{N.V.y.Rd}}\right]^{\alpha} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{N.V.z.Rd}}\right]^{\beta} = \left[\frac{55}{83,8}\right]^{2,834} + \left[\frac{50}{100,4}\right]^{2,585} = 0,4681 \leq 1,0 \qquad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, laskentamenettely säilyisi tässä samana, mutta jo tarkastelussa y-akselin suhteen päädyttäisiin toteamaan että poikkileikkaus ei kestä (M + V) yhteisvaikutusta.

2.10 Rakenneputken kestävyys voimasuureyhdistelmille, kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa

2.10.1 Taivutusmomentti ja normaalivoima

Ellei suoriteta toisen kertaluvun mukaista analyysiä, taivutusmomentin ja normaalivoiman kuormittaman sauvan kestävyys tarkastetaan seuraavien ohjeiden mukaisesti kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa (lisäksi tulee tarkastaa poikkileikkauksen kestävyydet kohdan 2.9 mukaisesti sauvan kriittisissä kohdissa).

Rakennejärjestelmän sauvoille kestävyyden tarkastus voidaan tehdä perustuen yksittäisten sauvojen tarkasteluun, jotka ajatellaan irrotetuksi rakenteesta. Sivusiirtyvien rakenteiden toisen kertaluvun vaikutukset (P-Δ-vaikutukset) otetaan huomioon joko sauvanpäämomenteissa tai käyttämällä tarkoituksenmukaisia nurjahduspituuksia (ks. kohta 7.2.1) [3,4,5].

Yhteisvaikutuskaavoihin sisältyy toisen kertaluvun ilmiöiden vaikutus kestävyyteen tarkasteltavan sauvan itsensä osalta. Kaavat perustuvat päistään nivelellisesti ja haarukkalaakerein tuetun yksiaukkoisen sauvan mallintamiseen (tukien välillä joko on tai ei ole sivuttaista jatkuvaa tuentaa), ja sauvaan kohdistuu puristusvoima, sauvanpäämomentit ja / tai poikittaisia kuormia. Mahdollisten poikittaisten kuormien ja niistä aiheutuvan leikkausvoiman yhteisvaikutus tulee otettua tällöin epäsuorasti huomioon momenttipinnan muodon perusteella määräytyvien ekvivalentin momentin kertoimien avulla (taulukko 2.25).

Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen kuormittamille sauvoille tarkastetaan seuraavat ehdot [3,4,5]:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \le 1,0 \qquad (2.154)$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \le 1,0 \qquad (2.155)$$

missä

N_{Ed}, $M_{y.Ed}$ ja $M_{z.Ed}$	ovat puristusvoiman ja sauvan maksimimomenttien mitoitusarvot
$\Delta M_{y.Ed}$ ja $\Delta M_{z.Ed}$	ovat neutraaliakselin siirtymisestä aiheutuvat momentit poikkileikkausluokalla 4, ks. lisäksi ohjeet taulukossa 2.22
N_{Rk}, $M_{y.Rk}$ ja $M_{z.Rk}$	ovat poikkileikkauksen PL-luokan mukaiset puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyksien ominaisarvot (taulukko 2.22)
χ_y ja χ_z	ovat kohdan 2.5.3 mukaisia taivutusnurjahduksen pienennystekijöitä
χ_{LT}	on kohdan 2.6.5 mukainen kiepahduksen pienennystekijä
k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz}	ovat yhteisvaikutustekijöitä (taulukot 2.23 ja 2.24)

Yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} on Eurocoden osassa EN 1993-1-1 laadittu kahdelle vaihtoehtoiselle menetelmälle. Menetelmä 1 on tarkempi, mutta laskennallisesti työläämpi. Menetelmä 2 antaa enemmän varmalla puolella olevia tuloksia, mutta on laskennallisesti hieman yksinkertaisempi. Kansallisessa liitteessä valitaan kumpaa menetelmää käytetään.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [6]:

Käytetään Menetelmää 2 jos se soveltuu.
Myös Menetelmää 1 voidaan käyttää.

Standardissa EN 1993-1-1 annetut Menetelmän 2 mukaiset yhteisvaikutustekijät on esitetty taulukoissa 2.23 ja 2.24. Menetelmän 2 taulukkoarvot on jaettu osassa EN 1993-1-1 tuoteläh-töisesti kahteen ryhmään: I-profiilit ja suorakaiderakenneputket (joihin sisältyy myös neliön muotoiset putket). Tässä käsikirjassa esitetään standardin taulukkoarvot vain rakenneputkien osalta.

Pyöreille rakenneputkille ei ole annettu Menetelmän 2 suhteen erikseen ohjeita. Lähteen [35] mukaan Menetelmää 2 voidaan kuitenkin käyttää myös pyöreille rakenneputkille. Täten käytän-nössä kaikki sauvat, siis myös pyöreät rakenneputket, voidaan tarkastaa Menetelmän 2 mukai-sesti. **Myös tässä käsikirjassa esitetään, että pyöreille putkille käytetään Menetelmässä 2 suorakaiderakenneputkille esitettyjä ohjeita.**

Pyöreillä ja neliön muotoisilla rakenneputkilla ei ole käytännössä kiepahdusvaaraa, joten niiden kiepahdusta ei tarvitse ottaa huomioon ja tekijän χ_{LT} arvoksi voidaan valita χ_{LT} = 1,0. Yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} valitaan taulukosta 2.23.

Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla kiepahduskestävyys voi kuitenkin muodostua mitoitta-vaksi. Jos kohtien 2.6.5 tai 2.6.6 mukaisesti voidaan todeta että kiepahdus ei muodostu kriittiseksi, tekijän χ_{LT} arvoksi voidaan valita χ_{LT} = 1,0 ja yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} valitaan taulukosta 2.23. Mikäli kiepahdus on kriittinen, kiepahduksen pienennystekijä χ_{LT} lasketaan kohdan 2.6.5 mukaisesti ja yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} valitaan taulukosta 2.24.

Taulukko 2.22 Osavarmuusluvut γ_{M1} sekä arvot N_{Rk}, $M_{i.Rk}$ ja $\Delta M_{i.Ed}$ eri PL-luokille

	PL-luokat 1, 2 ja 3			**PL-luokka 4**	
	Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket sekä pyöreät rakenneputket			Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket	Pyöreät rakenneputket
Suure	PL1	PL2	PL3	PL4	PL4
N_{Rk}	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A$	$f_y A_{eff}$	$\chi_x f_y A$ b)
$M_{y.Rk}$	$f_y W_{pl.y}$	$f_y W_{pl.y}$	$f_y W_{el.y}$	$f_y W_{eff.y}$	$\chi_x f_y W_{el.y}$ b)
$M_{z.Rk}$	$f_y W_{pl.z}$	$f_y W_{pl.z}$	$f_y W_{el.z}$	$f_y W_{eff.z}$	$\chi_x f_y W_{el.z}$ b)
$\Delta M_{y.Ed}$	0	0	0	$e_{Ny} N_{Ed}$ a)	0
$\Delta M_{z.Ed}$	0	0	0	$e_{Nz} N_{Ed}$ a)	0
χ_{M1}	ks. taulukko 2.5 (EN 1993-1-1)	ks. taulukko 2.5 (EN 1993-1-1)	ks. taulukko 2.5 (EN 1993-1-1)	ks. taulukko 2.5 (EN 1993-1-1)	ks. taulukko 2.5 **(EN 1993-1-6)**

a) Kaksoissymmetrian johdosta rakenneputkilla on $e_{Ny} = 0$ ja $e_{Nz} = 0$.
b) Lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä χ_x lasketaan kohdan 2.5.2.2 mukaisesti.

Taulukko 2.23 Yhteisvaikutustekijät k_{ij} sauvoille, jotka eivät ole alttiit vääntömuodonmuutoksille [3,4,5]

Yhteisvaikutustekijät	Poikkileikkaustyyppi	Suunnitteluoletukset	
		Kimmoteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 3 ja 4	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 1 ja 2
k_{yy}	Suorakaideputket	$C_{my}\left[1+0,6\bar{\lambda}_y\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] \le C_{my}\left[1+0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$	$C_{my}\left[1+(\bar{\lambda}_y-0,2)\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] \le C_{my}\left[1+0,8\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$
k_{yz}	Suorakaideputket	k_{zz}	0,6 k_{zz}
k_{zy}	Suorakaideputket	0,8 k_{yy}	0,6 k_{yy}
k_{zz}	Suorakaideputket	$C_{mz}\left[1+0,6\bar{\lambda}_z\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] \le C_{mz}\left[1+0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$	$C_{mz}\left[1+(\bar{\lambda}_z-0,2)\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] \le C_{mz}\left[1+0,8\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$

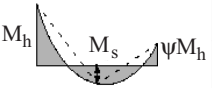
- Suorakaiteen muotoisille rakenneputkille, joihin kohdistuu aksiaalinen puristus ja taivutus $M_{y.Ed}$ yhden akselin suhteen, tekijälle k_{zy} voidaan valita arvo $k_{zy} = 0$.
- Tekijöille k_{ij} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.

Taulukko 2.24 Yhteisvaikutustekijät k_{ij} sauvoille, jotka ovat alttiit vääntö-muodonmuutoksille [3,4,5]

Yhteis-vaikutus-tekijät	Suunnitteluoletukset	
	Kimmoteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 3 ja 4	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkausominaisuudet, poikkileikkausluokat 1 ja 2
k_{yy}	k_{yy} taulukon 2.23 mukaisesti	k_{yy} taulukon 2.23 mukaisesti
k_{yz}	k_{yz} taulukon 2.23 mukaisesti	k_{yz} taulukon 2.23 mukaisesti
k_{zy}	$\left[1-\frac{0,05\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ $\geq\left[1-\frac{0,05}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$	$\left[1-\frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ $\geq\left[1-\frac{0,1}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$ kun $\bar{\lambda}_z < 0,4$: $k_{zy} = 0,6+\bar{\lambda}_z$ $\leq\left[1-\frac{0,1\bar{\lambda}_z}{(C_{mLT}-0,25)}\cdot\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$
k_{zz}	k_{zz} taulukon 2.23 mukaisesti	k_{zz} taulukon 2.23 mukaisesti

Tekijöille k_{ij} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.

Taulukko 2.25 Ekvivalentin momentin kertoimet C_{mi} taulukoissa 2.23 ja 2.24 [3,4,5]

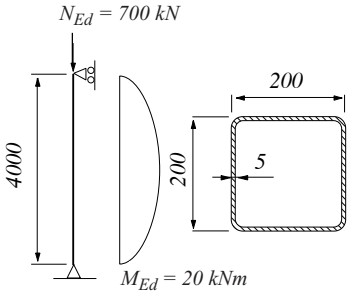
Momenttipinta	Alue		C_{my} ja C_{mz} ja C_{mLT}	
			Tasan jakautunut kuormitus	Pistemäinen kuormitus
	$-1 \le \psi \le 1$		$0,6 + 0,4\psi \ge 0,4$	
 $\alpha_s = M_s / M_h$	$0 \le \alpha_s \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,2 + 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$0,2 + 0,8\alpha_s \ge 0,4$
	$-1 \le \alpha_s < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,1 - 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$- 0,8\alpha_s \ge 0,4$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,1(1-\psi) - 0,8\alpha_s \ge 0,4$	$0,2(-\psi) - 0,8\alpha_s \ge 0,4$
$\alpha_h = M_h / M_s$	$0 \le \alpha_h \le 1$	$-1 \le \psi \le 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
	$-1 \le \alpha_h < 0$	$0 \le \psi \le 1$	$0,95 + 0,05\alpha_h$	$0,90 + 0,10\alpha_h$
		$-1 \le \psi < 0$	$0,95 + 0,05\alpha_h(1+2\psi)$	$0,90 + 0,10\alpha_h(1+2\psi)$ a)
Sivusiirtyvien kehien sauvoille ekvivalentin momentin kertoimiksi valitaan arvot $C_{my} = 0,9$ tai $C_{mz} = 0,9$				
Kertoimet C_{my}, C_{mz} ja C_{mLT} valitaan kyseeseen tulevien tukipisteiden välisen taivutusmomenttipinnan mukaan seuraavasti: Momenttikerroin — Akseli, jonka suhteen taivutus tapahtuu — Taso, jossa tukipisteet ovat sivusiirtymättömiä C_{my} — y-y — z-z C_{mz} — z-z — y-y C_{mLT} — y-y — y-y				
a) Lauseke on korjattu lähteen [5] mukaisesti.				
Tekijöille C_{mi} taulukossa esitetyt raja-arvot eivät tarkoita voimassaoloehtoa, vaan laskelmissa ao. tekijälle käytettävää raja-arvoa.				

2.10.2 Taivutusmomentti, normaalivoima ja leikkausvoima

Samanaikaisen taivutusmomentin, normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutukselle on Eurocodessa esitetty tarvittavat yhteisvaikutustarkastelut omana kohtanaan ainoastaan poikkileikkauksen kestävyyden suhteen. Kyseiselle voimasuureyhdistelmälle ei ole esitetty erikseen ohjeita nurjahtavaa tai kiepahtavaa sauvaa koskien.

(M+N+V) yhteisvaikutus sisältyy kuitenkin kohdan 2.10.1 mukaiseen nurjahtavan tai kiepahtavan sauvan (M+N) yhteisvaikutukseen, jossa mahdollisten poikittaisten kuormien ja niistä aiheutuvan leikkausvoiman yhteisvaikutus on otettu epäsuorasti huomioon momenttipinnan muodon perusteella määräytyvien ekvivalentin momentin kertoimien avulla (taulukko 2.25).

Esimerkki 2.20



Lasketaan esimerkin 2.3 rakenneputken 200×200×5 kestävyys, kun sitä rasittaa normaalivoiman lisäksi tasaisesta poikittaiskuormasta aiheutuva taivutusmomentti. Poikittaiskuorma vaikuttaa vain z-akselin suunnassa. Rakenne on nivelellisesti tuettu molemmista päistä kumpaankin suuntaan.

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

A_{eff} = 3312 mm^2 *kun pelkkä puristus vaikuttaa (esimerkistä 2.3)*
W_{eff} = 220,5 · $10^3 mm^3$ *kun pelkkä taivutus vaikuttaa (esimerkistä 2.9)*
f_y = 420 N/mm^2
γ_{M1} = 1,0

Esimerkissä rajaudutaan tarkastamaan voimasuureiden yhteisvaikutus sauvan stabiiliuden kannalta.

Lukijan tehtäväksi jää tarkastaa poikkileikkauksen kestävyys yksittäisille voimasuureille (N_{Ed}, M_{Ed}, V_{Ed}), sekä niiden yhteisvaikutukselle sauvan kriittisissä kohdissa (tuella normaalivoiman ja leikkausvoiman yhteisvaikutus, sekä jänteen puolivälissä taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus).

Esimerkin 2.3 perusteella nähdään ilman tarkempaa tarkasteluakin, että poikkileikkaus kuuluu PL-luokkaan 4 (taivutuksessa puristettuna oleva laippa määrää tässä PL-luokan).

Esimerkistä 2.3 saadaan sauvan hoikkuus, nurjahduksen pienennystekijä ja nurjahduskestävyys:

$\bar{\lambda}$ = 0, 6675
χ = 0,7447
$N_{b.Rd}$ = 1036 kN

Em. arvot ovat samat molempien akselien suhteen, koska kyseessä on symmetrinen poikkileikkaus ja nurjahduspituus (sauvan tuennat) on sama kumpaankin suuntaan.

Koska kyseessä on neliön muotoinen rakenneputki, voidaan heti todeta että sauva ei ole altis kiepahdukselle, eli kiepahdus ei pienennä taivutuskestävyyttä. Näin ollen kiepahduksen pienennystekijälle voidaan käyttää arvoa χ_{LT} = 1,0 ja yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} voidaan ottaa taulukosta 2.23. Koska taivutusmomentti vaikuttaa vain y-akselin suhteen ($M_{z.Ed}$ = 0), tarvitaan ainoastaan yhteisvaikutustekijät k_{yy} ja k_{zy}.

Sauvan yhteisvaikutusehdoissa tarvitaan poikkileikkauksen puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden ominaisarvot (eli karakteristiset arvot):

$$N_{Rk} = f_y A_{eff} = 420 \cdot 3312 = 1391\ kN$$

$$M_{y.Rk} = M_{z.Rk} = f_y W_{eff} = 420 \cdot 220,5 \cdot 10^3 = 92,6\ kNm$$

Momenttipinnan muodosta riippuva kerroin C_{my} saadaan taulukosta 2.25 samassa taulukossa esitetyn parametrin α_h perusteella:

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0$$

$$C_{my} = 0,95 + 0,05\alpha_h = 0,95 + 0 = 0,95$$

Yhteisvaikutustekijöiksi k_{yy} ja k_{zy} saadaan taulukosta 2.23:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 0,95 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,6675 \cdot \frac{700}{0,7447 \cdot 1391/1,0}\right] = 1,207$$

k_{yy} saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{yy} = 1,207 \le C_{my}\left[1 + 0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,95 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{700}{0,7447 \cdot 1391/1,0}\right] = 1,335$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,8 \cdot 1,207 = 0,9656$$

Tarkastetaan normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusehdot:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{700}{0,7447 \cdot \frac{1391}{1,0}} + 1,207 \cdot \frac{20+0}{1,0 \cdot \frac{92,6}{1,0}} + 0 = 0,9364 \le 1,0 \quad OK$$

Lisäksi on tarkastettava ehto:

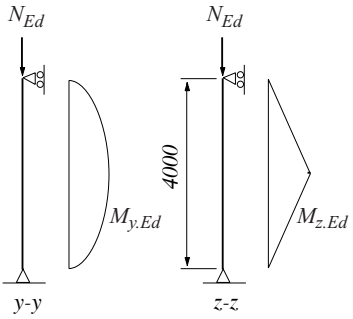
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{700}{0,7447 \cdot \frac{1391}{1,0}} + 0,9656 \cdot \frac{20+0}{1,0 \cdot \frac{92,6}{1,0}} + 0 = 0,8843 \le 1,0 \quad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa tulokseksi (S420: 0,9364 →) S355: 1,037 > 1,0 , eli sauva ei kestä. Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa kokonaiskestävyyttä tässä noin 10 %.

Esimerkki 2.21

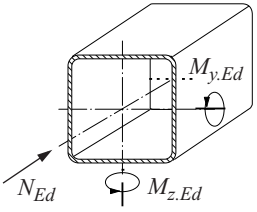
Lasketaan esimerkin 2.8 rakenneputken 160×160×5 kestävyys kuvan mukaiselle kuormitukselle. Sauvan nurjahduspituus on 4 m ja se on tuettu nivelellisesti molemmista päistä kumpaankin suuntaan.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Kuormien arvot ovat:

N_{Ed} = 400 kN (puristusta)
$M_{y.Ed}$ = 12 kNm
$M_{z.Ed}$ = 12 kNm



A = 3036 mm^2 (liite 11.1)
I = 1202 · 10^4 mm^4 (liite 11.1)
W_{el} = 150,3 · 10^3 mm^3 (liite 11.1)
f_y = 420 N/mm^2
γ_{M1} = 1,0

Esimerkissä rajaudutaan tarkastamaan voimasuureiden yhteisvaikutus sauvan stabiiliuden kannalta.

Lukijan tehtäväksi jää tarkastaa poikkileikkauksen kestävyys yksittäisille voimasuureille sekä niiden yhteisvaikutukselle sauvan kriittisissä kohdissa (eli tässä esimerkissä tuella ja jänteen puolivälissä).

Esimerkin 2.8 perusteella nähdään ilman tarkempaa tarkasteluakin, että poikkileikkaus kuuluu PL-luokkaan 3 (taivutuksessa puristettuna oleva laippa määrää tässä PL-luokan).

Puristetun rakenneputken nurjahduksen pienennystekijä χ lasketaan nurjahduskäyrän c perusteella (kohta 2.5.3.1):

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 1202 \cdot 10^4}{4000^2} = 1557\ kN$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{3036 \cdot 420}{1557 \cdot 10^3}} = 0,9050 > 0,2$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,9050 - 0,2) + 0,9050^2] = 1,082$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,082 + \sqrt{1,082^2 - 0,9050^2}} = 0,5970 \le 1,0$$

Nurjahduskestävyydeksi pelkälle normaalivoimalle saadaan:

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5970 \cdot 3036 \cdot 420}{1,0} = 761,2\ kN \ge N_{Ed} = 400\ kN \quad OK$$

Em. arvot ovat samat molempien akselien suhteen, koska kyseessä on symmetrinen poikkileikkaus ja nurjahduspituus (sauvan tuennat) on sama kumpaankin suuntaan.

Koska kyseessä on neliön muotoinen rakenneputki, voidaan heti todeta että sauva ei ole altis kiepahdukselle, eli kiepahdus ei pienennä taivutuskestävyyttä. Näin ollen kiepahduksen pienennystekijälle voidaan käyttää arvoa $\chi_{LT} = 1,0$ ja yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} voidaan ottaa taulukosta 2.23.

Sauvan yhteisvaikutusehdoissa tarvitaan poikkileikkauksen puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden ominaisarvot:

$$N_{Rk} = f_y A = 420 \cdot 3036 = 1275\ kN$$

$$M_{y.Rk} = M_{z.Rk} = f_y W_{el} = 420 \cdot 150,3 \cdot 10^3 = 63,1\ kNm$$

Momenttipinnan muodosta riippuvat kertoimet C_{my} ja C_{mz} saadaan taulukosta 2.25 samassa taulukossa esitetyn parametrin α_h perusteella:

taivutukselle y-akselin suhteen (tasan jakautunut kuormitus):

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0$$

$$C_{my} = 0,95 + 0,05\alpha_h = 0,95 + 0 = 0,95$$

taivutukselle z-akselin suhteen (pistekuorma jänteen puolivälissä):

$$\alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0$$

$$C_{mz} = 0,90 + 0,10\alpha_h = 0,90 + 0 = 0,90$$

Yhteisvaikutustekijöiksi saadaan taulukosta 2.23:

taivutukselle y-akselin suhteen:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 0,95 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,9050 \cdot \frac{400}{0,5970 \cdot 1275/1,0}\right] = 1,221$$

k_{yy} saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{yy} = 1,221 \le C_{my}\left[1 + 0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,95 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{400}{0,5970 \cdot 1275/1,0}\right] = 1,250$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,8 \cdot 1,221 = 0,9768$$

taivutukselle z-akselin suhteen:

$$k_{zz} = C_{mz}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 0,90 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,9050 \cdot \frac{400}{0,5970 \cdot 1275/1,0}\right] = 1,157$$

k_{zz} saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{zz} = 1,157 \le C_{mz}\left[1 + 0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,90 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{400}{0,5970 \cdot 1275/1,0}\right] = 1,184$$

$$k_{yz} = k_{zz} = 1,157$$

Tarkastetaan normaalivoiman ja taivutusmomenttien yhteisvaikutusehdot:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{400}{0,5970 \cdot \frac{1275}{1,0}} + 1,221 \cdot \frac{12}{1,0 \cdot \frac{63,1}{1,0}} + 1,157 \cdot \frac{12}{\frac{63,1}{1,0}} = 0,9777 \le 1,0 \quad OK$$

lisäksi on tarkastettava ehto:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{400}{0,5970 \cdot \frac{1275}{1,0}} + 0,9768 \cdot \frac{12}{1,0 \cdot \frac{63,1}{1,0}} + 1,157 \cdot \frac{12}{\frac{63,1}{1,0}} = 0,9313 \le 1,0 \quad OK$$

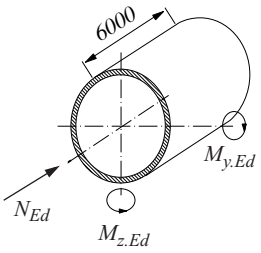
Vertailu S420 vs S355:

Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa tulokseksi (S420: 0,9777 →) S355: 1,114 > 1,0 , eli sauva ei kestä. Yhteis-

vaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa kokonaiskestävyyttä tässä lähes 14 %.

Esimerkki 2.22

Lasketaan esimerkin 2.17 poikkileikkausluokan 4 pyöreän rakenneputken 323,9×5 kestävyys viereisen kuvan mukaiselle kuormitusyhdistelmälle. Sauvan pituus on 6 m. Molemmat taivutusmomentit oletetaan vakioksi sauvan pituuden suhteen. Sauva on tuettu nivelellisesti molemmista päistä kumpaankin suuntaan.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Kuormien arvot ovat:

N_{Ed} = 700 kN (puristusta)
$M_{y.Ed}$ = 18 kNm
$M_{z.Ed}$ = 18 kNm

A = 5009 mm^2 (liite 11.1)
I = 6369 · 10^4 mm^4 (liite 11.1)
W_{el} = 393,3 · 10^3 mm^4 (liite 11.1)
f_y = 420 N/mm^2
γ_{M1} = 1,1 (poikkileikkausluokan 4 pyöreä putki, EN 1993-1-6)

Esimerkissä rajaudutaan tarkastamaan voimasuureiden yhteisvaikutus sauvan stabiiliuden kannalta.

Lukijan tehtäväksi jää tarkastaa poikkileikkauksen kestävyys yksittäisille voimasuureille sekä niiden yhteisvaikutukselle.

Poikkileikkauksen puristuskestävyys $N_{c.Rd}$ ja lommahduksen kimmoplastinen pienennystekijä χ_x ovat nyt samat kuin esimerkissä 2.2:

χ_x = 0,8578
$N_{c.Rd}$ = 1641 kN

Siirrytään putken nurjahdustarkasteluun. Kimmoteorian mukainen kriittinen nurjahduskuorma on:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \cdot 210000 \cdot 6369 \cdot 10^4}{6000^2} = 3667 \text{ kN}$$

Sauvan hoikkuus on:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{\chi_x A f_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{0,8578 \cdot 5009 \cdot 420}{3667 \cdot 10^3}} = 0,7015 > 0,2$$

Lasketaan nurjahduksen pienennystekijä (nurjahdusluokka c, $\alpha = 0{,}49$):

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,7015 - 0,2) + 0,7015^2] = 0,8689$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,8689 + \sqrt{0,8689^2 - 0,7015^2}} = 0,7238 \leq 1,0$$

Nurjahduskestävyydeksi saadaan:

$$N_{b.Rd} = \chi \cdot N_{c.Rd} = 0,7238 \cdot 1641 = 1188\ kN \geq N_{Ed} \quad OK$$

Em. arvot ovat samat molempien akselien suhteen, koska kyseessä on symmetrinen poikkileikkaus ja nurjahduspituus (sauvan tuennat) on sama kumpaankin suuntaan.

Koska kyseessä on pyöreä rakenneputki, voidaan heti todeta että sauva ei ole altis kiepahdukselle, eli kiepahdus ei pienennä taivutuskestävyyttä. Näin ollen kiepahduksen pienennystekijälle voidaan käyttää arvoa $\chi_{LT} = 1,0$ ja yhteisvaikutustekijät k_{yy}, k_{yz}, k_{zy} ja k_{zz} voidaan ottaa taulukosta 2.23.

Sauvan yhteisvaikutusehdoissa tarvitaan poikkileikkauksen puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden ominaisarvot (poikkileikkausluokan 4 pyöreällä putkella poikkileikkauksen puristuskestävyyden ja taivutuskestävyyden ominaisarvot lasketaan poikkileikkauksen lommahduslujuuden $\chi_x f_y$ perusteella):

$$N_{Rk} = \chi_x f_y A = 0,8578 \cdot 420 \cdot 5009 = 1805\ kN$$

$$M_{y.Rk} = M_{z.Rk} = \chi_x f_y W_{el} = 0,8578 \cdot 420 \cdot 393,3 \cdot 10^3 = 141,7\ kNm$$

Momenttipinnan muodosta riippuvat kertoimet C_{my} ja C_{mz} saadaan taulukosta 2.25 sauvan päiden momenttisuhteen ψ perusteella:

taivutukselle y-akselin suhteen (vakiomomentti):

$$\psi = 1$$

$$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot 1 = 1,0 \quad \text{(kuitenkin vähintään 0,4)}$$

taivutukselle z-akselin suhteen saadaan tässä samat arvot eli $C_{mz} = C_{my} = 1,0$. Yhteisvaikutustekijöiksi saadaan taulukosta 2.23:

taivutukselle y-akselin suhteen:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 1,0 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,7015 \cdot \frac{700}{0,7238 \cdot 1805/1,1}\right] = 1,248$$

k_{yy} saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{yy} = 1,248 \leq C_{my}\left[1 + 0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 1,0 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{700}{0,7238 \cdot 1805/1,1}\right] = 1,354$$

$$k_{zy} = 0,8 \cdot k_{yy} = 0,8 \cdot 1,248 = 0,9984$$

taivutukselle z-akselin suhteen:

$$k_{zz} = C_{mz}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_z \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 1,0 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,7015 \cdot \frac{700}{0,7238 \cdot 1805/1,1}\right] = 1,248$$

k_{zz} saa olla kuitenkin enintään:

$$k_{zz} = 1,248 \le C_{mz}\left[1 + 0,6\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 1,0 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{700}{0,7238 \cdot 1805/1,1}\right] = 1,354$$

$$k_{yz} = k_{zz} = 1,248$$

Tarkastetaan normaalivoiman ja taivutusmomenttien yhteisvaikutusehdot:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{700}{0,7238 \cdot \frac{1805}{1,1}} + 1,248 \cdot \frac{18}{1,0 \cdot \frac{141,7}{1,1}} + 1,248 \cdot \frac{18}{\frac{141,7}{1,1}} = 0,9382 \le 1,0 \quad OK$$

lisäksi on tarkastettava ehto:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{700}{0,7238 \cdot \frac{1805}{1,1}} + 0,9984 \cdot \frac{18}{1,0 \cdot \frac{141,7}{1,1}} + 1,248 \cdot \frac{18}{\frac{141,7}{1,1}} = 0,9033 \le 1,0 \quad OK$$

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa tulokseksi (S420: 0,9382 →) S355: 1,058 > 1,0, eli sauva ei kestä. Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa kokonaiskestävyyttä tässä lähes 13 %.

2.11 Rakenneputken kestävyys pistekuormille

2.11.1 Pistekuormakestävyys

Tässä esitetyt ohjeet on tarkoitettu palkkirakenteiden pistekuormakestävyyden määrittämiseen. Pistekuormakestävyys liittyen palkki-pilariliitoksiin tai ristikkoliitoksiin; ks. Eurocoden osa EN 1993-1-8.

Pistekuormiin luetaan varsinaisten ulkoisten pistekuormien lisäksi myös palkin tukireaktiot.

Pistekuorman vaikuttaessa on tarkastettava rakenneputken uuman paikallinen kestävyys, koska rakenneputkien seinämät ovat suhteellisen ohuita. Kestävyys on sitä suurempi mitä laajemmalle alueelle pistemäinen kuorma saadaan jaettua.

Eurocodessa ei esitetä suoraan rakenneputkille kohdistettuja ohjeita pistekuormakestävyyden määrittämiseksi.

Pyöreillä putkilla kannattaa välttää paikallisten pistekuormien syntyminen rakenteellisin keinoin siten, että pistekuorma viedään esim. hitsattujen päätylevyjen avulla leikkaukseksi koko poikkileikkaukselle.

Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien pistekuormakestävyydelle voidaan käyttää varmalla puolella olevana arviona Eurocoden osassa EN 1993-1-3 kylmämuovatuille profiileille esitettyjä ohjeita, mutta rakenneputkille sovellettuna seuraavasti:

Pistekuormakestävyyden mitoitusehdoksi saadaan:

$$\frac{F_{Ed}}{2F_{1w.Rd}} \leq 1,0 \qquad (2.156)$$

missä F_{Ed} on putkeen kohdistuvan pistekuorman mitoitusarvo murtorajatilassa
$F_{1w.Rd}$ on pistekuormakestävyyden mitoitusarvo yhtä uumaa kohti

Ehdossa (2.156) on oletettu, että pistekuorma F_{Ed} kohdistuu putken kummallekin uumalle symmetrisesti, jolloin putken pistekuormakestävyys on uumien yhteenlaskettu pistekuormakestävyys. Epäsymmetrisessä kuormitustilanteessa kummankin uuman pistekuormakestävyys tarkastetaan erikseen siihen kohdistuvan pistekuorman osuuden suhteen. Varmalla puolella olesvana yksinkertaistuksena voidaan aina olettaa, että toinen uuma kantaa koko pistekuorman yksinään.

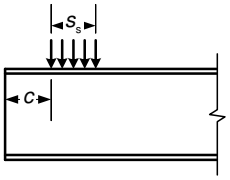
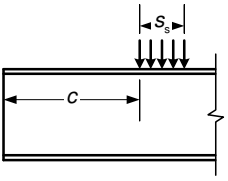
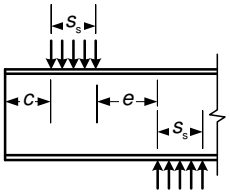
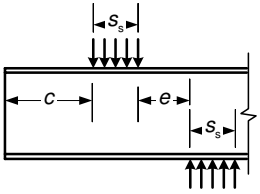
Yhden uuman pistekuormakestävyys lasketaan seuraavasta kaavasta:

$$F_{1w.Rd} = C_F \cdot \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} \qquad (2.157)$$

missä $F_{1w.Rd}$ on pistekuormakestävyyden mitoitusarvo yhtä uumaa kohti
C_F on kyseeseen tulevan kuormitustapauksen mukainen tekijä taulukosta 2.26
t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
γ_{M1} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Taulukossa 2.26 pistekuormat on jaettu neljään tapaukseen sen mukaan, vaikuttaako pistekuorma palkin yhdellä puolella tai molemmilla vastakkaisilla puolilla, ja vaikuttaako pistekuorma kaukana tai lähellä palkin päätä. Pistekuormakestävyys on aina olennaisesti pienempi, jos pistekuorma vaikuttaa lähellä palkin jäykistämätöntä päätä.

Taulukko 2.26 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien pistekuormakestävyys. Tekijä C_F eri kuormitustapauksille

Kuormitustyyppi		Pistekuormakestävyys
Tyyppi 1a	Yksi pistekuorma: c ≤ 1,5 (h - t) 	kun $s_s/t \le 60$: $C_F = k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{(h-t)/t}{132} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right]$ kun $s_s/t > 60$: $C_F = k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{(h-t)/t}{132} \right] \left[0,71 + 0,015 \frac{s_s}{t} \right]$
Tyyppi 1b	Yksi pistekuorma: c > 1,5 (h - t) 	kun $s_s/t \le 60$: $C_F = k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{(h-t)/t}{49,5} \right] \left[1 + 0,007 \frac{s_s}{t} \right]$ kun $s_s/t > 60$: $C_F = k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{(h-t)/t}{49,5} \right] \left[0,75 + 0,011 \frac{s_s}{t} \right]$
Tyyppi 2a	Kaksi vastakkaista pistekuormaa: c ≤ 1,5 (h - t) 	kun e ≤ 1,5 (h - t) : $C_F = k_1 k_2 k_3 \left[6,66 - \frac{(h-t)/t}{64} \right] \left[1 + 0,01 \frac{s_s}{t} \right]$ Huom. a) ja b)
Tyyppi 2b	Kaksi vastakkaista pistekuormaa: c > 1,5 (h - t) 	kun e ≤ 1,5 (h - t) : $C_F = k_3 k_4 k_5 \left[21,0 - \frac{(h-t)/t}{16,3} \right] \left[1 + 0,013 \frac{s_s}{t} \right]$ Huom. a) ja b)

$k_1 = 1,33 - 0,33k$, $k_2 = 1,15 - 0,15(r_i/t)$ mutta $k_2 \ge 0,50$ ja $k_2 \le 1,0$

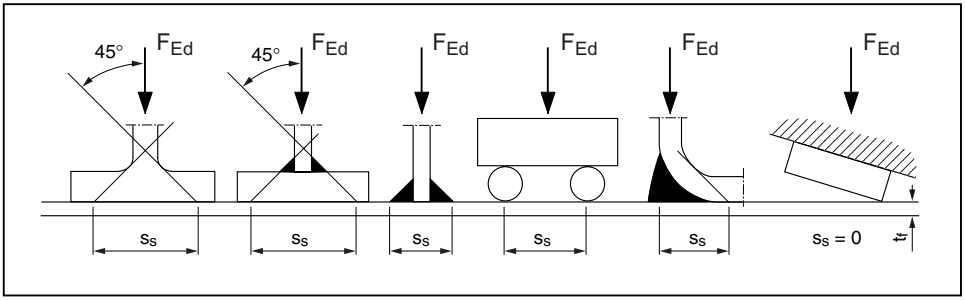
$k_3 = 1,0$, $k_4 = 1,22 - 0,22k$, $k_5 = 1,06 - 0,06(r_i/t)$ mutta $k_5 \le 1,0$

missä: r_i = nurkan sisäsäde , $k = f_y/228$ $[f_y] = N/mm^2$

a) Kahden yhtäsuuren vastakkaissuuntaisen pistekuorman tapauksessa, jos jäykän tukipinnan s_s pituudet ovat erisuuria, käytetään pienempää arvoa s_s.

b) Jos e > 1,5 (h - t) , tilanne tarkastellaan Tyypin 1 mukaisesti kummallekin yksittäiselle kuormalle erikseen.

Taulukossa 2.26 tarvitaan pistekuormalle ns. jäykän tukipinnan pituus s_s, eli pituus jolle putken päällä oleva pistekuorma laskennallisesti kohdistuu. Tukipinnan pituus voidaan määrittää kuvan 2.8 perusteella. Kuorman oletetaan tällöin leviävän 45º kulmassa [13,14]. Mitta s_s saa kuitenkin olla korkeintaan $(h - t)$.

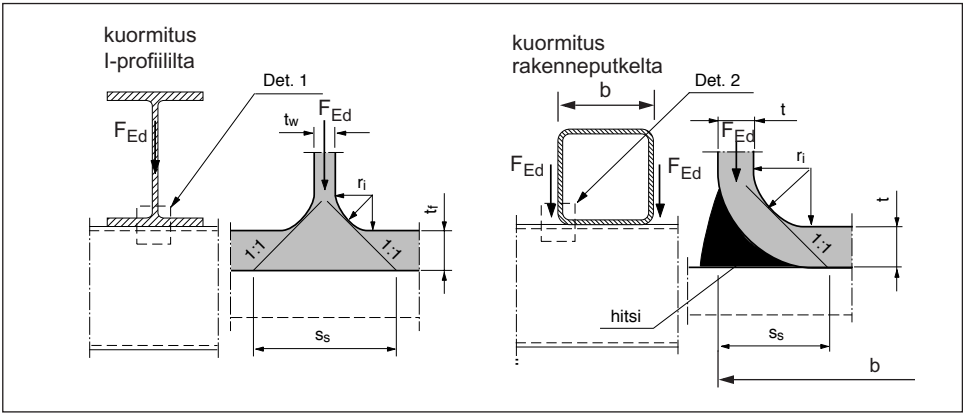


Kuva 2.8 Pistekuorman jakaantumispituus

Jos kuormaa välittävä kantopinta muodostaa kulman putken pinnan kanssa (kuva 2.8, viimeinen tapaus), pituuden s_s arvoksi valitaan s_s = 0 [13,14].

Kuvan 2.8 neljännessä tapauksessa, kun kuorma vaikuttaa kahden laakerirullan kautta, tarkastelu suoritetaan kahtena eri tapauksena siten, että ensin kestävyys tarkastetaan käyttäen kuormalle F_{Ed} pituutta s_s kuvan 2.8 mukaisesti, ja sen jälkeen tarkastetaan tilanne kummallekin yksittäiselle kuormalle $F_{Ed}/2$ erikseen käyttäen pituutta s_s = 0 [28].

Yleisesti, jos useita pistemäisiä kuormia sijaitsee lähellä toisiaan, kestävyys tarkastetaan kullekin yksittäiselle kuormalle sekä kokonaiskuormalle. Jälkimmäisessä tapauksessa pituuden s_s arvoksi valitaan äärimmäisten pistekuormien keskiöiden välinen etäisyys [13,14].



Kuva 2.9 Pistekuorman jakaantumispituus kun kuorman välittää valssattu profiili tai rakenneputki. Yksityiskohtia

Kuvan 2.8 ensimmäinen ja viides tapaus on esitetty yksityiskohtaisemmin kuvassa 2.9. Kuvien perusteella jakaantumispituudelle s_s voidaan johtaa seuraavat kaavat:

$$s_s = t_w + 2t_f + 2(2-\sqrt{2})r_i \quad \textit{(kuorma valssatulta profiililta)} \tag{2.158}$$

$$s_s = t_w + 2t_f + 2\sqrt{2}a \quad \textit{(kuorma hitsatulta profiililta)} \tag{2.159}$$

$$s_s = 2t + (2-\sqrt{2})r_i \quad \textit{(kuorma rakenneputkelta, kun nurkan pyöristys on täytetty hitsillä, ks. kuva 2.9 Det.2} \tag{2.160}$$

missä
- t_w on I-profiilin uuman paksuus
- t_f on I-profiilin laipan paksuus
- r_i on valssatun I-profiilin tai rakenneputken nurkan sisäpuolinen pyöristyssäde
- a on hitsatun I-profiilin kaulahitsin a-mitta
- t on rakenneputken seinämän paksuus

2.11.2 Pistekuorman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus

Koska pistekuormakestävyys on edellä määritetty Eurocoden osaan EN 1993-1-3 perustuen, tarkastetaan myös pistekuorman yhteisvaikutus samaan Eurocoden osaan perustuen. Tällöin riittää, että tarkastetaan pistekuorman ja samanaikaisen taivutusmomentin yhteisvaikutus.

Yhteisvaikutus tarkastetaan seuraavien yksinkertaistettujen ehtojen mukaisesti [11]:

$$\frac{M_{Ed}}{f_y W_{eff}/\gamma_{M0}} \le 1,0 \tag{2.161}$$

$$\frac{F_{Ed}}{2F_{1w.Rd}} \le 1,0 \tag{2.162}$$

$$\frac{M_{Ed}}{f_y W_{eff}/\gamma_{M0}} + \frac{F_{Ed}}{2F_{1w.Rd}} \le 1,25 \tag{2.163}$$

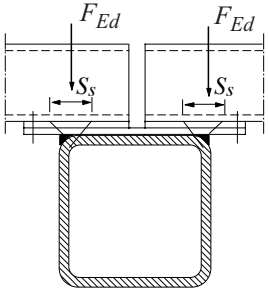
missä
- M_{Ed} on taivutusmomentin mitoitusarvo murtorajatilassa
- W_{eff} on tehollisen poikkileikkauksen taivutusvastus (poikkileikkausluokkien PL1...3 tapauksessa kimmoteorian mukainen taivutusvastus W_{el})
- f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)
- F_{Ed} on putkeen kohdistuvan pistekuorman mitoitusarvo murtorajatilassa
- $F_{1w.Rd}$ on pistekuormakestävyyden mitoitusarvo yhtä uumaa kohti kohdan 2.11.1 mukaisesti

Ehdossa (2.163) taivutusmomentti M_{Ed} voidaan laskea tuen reunassa [11].

Esimerkki 2.23

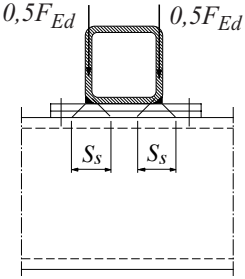
Lasketaan kuvan mukaisessa tilanteessa rakenneputkien $200\times200\times10$ ja $100\times100\times5$ pistekuormakestävyys. Jokaisen liitoslevyn paksuus on $t_p = 10$ mm.

Putket ovat teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.



$100\times100\times5$

$200\times200\times10$



$r_i/t = 1{,}0$ *putkella* $100\times100\times5$
$r_i/t = 1{,}5$ *putkella* $200\times200\times10$

$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M1} = 1{,}0$

Putken $200\times200\times10$ pistekuormakestävyys:

Määritetään oikeanpuoleisessa kuvassa jäykän tukipinnan pituus s_s.
Lasketaan kuormituspituus s_s ensin ilman liitoslevyjä:

$$s_s = 2t + (2-\sqrt{2})r_i = 2\cdot5 + (2-\sqrt{2})\cdot5 = 12,9\ mm$$

$\Rightarrow$ *putken $100\times100\times5$ vasemman ja oikeanpuoleisen uuman rajaaman alueen väliin jäisi putken $200\times200\times10$ pinnalla kuormittamatonta pituutta $100 - 2\cdot12{,}9 = 74{,}2$ mm.*

Liitoslevyt ($t_p = 10$ mm) lisäävät tukipinnan pituutta s_s 'ulospäin ja sisäänpäin' suhteessa niiden paksuuteen määrällä:

$$\Delta s_{s.in} = \Delta s_{s.out} = t_p + t_p = 10 + 10 = 20\ mm$$

Laskennallinen kuormituspituus s_s ei saa ylittää käytettävissä olevaa todellista pituutta, joten tarkastetaan menevätkö vasemman ja oikeanpuoleiset kuormituspituudet s_s 'sisäpuolella' päällekkäin:

$$2\cdot(s_s + \Delta s_{s.in}) = 2\cdot(12,9 + 20) = 65,8 \le b = 100\ mm$$

$\Rightarrow$ *kuormituspituudet eivät mene päällekkäin, joten liitoslevyjen tuoma kuormituspituuden lisäys voidaan hyödyntää täysimääräisesti.*

Lopulliset laskennalliset kuormituspituudet ovat näin ollen yhteensä:

$$s_{s.left.tot} = s_{s.right.tot} = s_s + \Delta s_{s.in} + \Delta s_{s.out} = 12,9 + 20 + 20 = 52,9 \text{ mm} \le h - t = 190 \text{ mm} \quad OK$$

Pistekuormat $0,5F_{Ed}$ ovat lähekkäin mutta silti toisistaan erilliset (koska edellä todetun mukaisesti niiden kuormituspituudet eivät ulotu toisiinsa asti), joten putkelta $100\times100\times5$ tulevat kuormat täytyy tarkastella kahtena eri tapauksena: ensin erillisinä kuormina $0,5F_{Ed}$ ja sitten yhdistettynä kokonaiskuormana F_{Ed} (ks. oikeanpuoleinen kuva).

Tarkastellaan oikeanpuoleisessa kuvassa pistekuormat ensin erillisinä kuormina $0,5F_{Ed}$:

kuormitus on tyyppiä 1b (taulukko 2.26):

$$k = f_y / 228 = 420/228 = 1,842$$

$$k_3 = 1,0$$

$$k_4 = 1,22 - 0,22k = 1,22 - 0,22 \cdot 1,842 = 0,8148$$

$$k_5 = 1,06 - 0,06(r_i/t) = 1,06 - 0,06 \cdot 1,5 = 0,97 \le 1,0$$

$$s_{s.left.tot}/t = 52,9/10 = 5,29 \le 60$$

$$C_F = k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{(h-t)/t}{49,5}\right]\left[1 + 0,007\frac{s_{s.left.tot}}{t}\right] =$$

$$1,0 \cdot 0,8148 \cdot 0,97 \cdot \left[14,7 - \frac{(200-10)/10}{49,5}\right] \cdot [1 + 0,007 \cdot 5,29] = 11,73$$

$$F_{1w.Rd} = C_F \cdot \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} = 11,73 \cdot \frac{10^2 \cdot 420}{1,0} = 492,7 \text{ kN}$$

$\Rightarrow$ *oikeanpuoleisessa kuvassa pistekuormakestävyys kuormalle $0,5F_{Ed}$ on 492,7 kN*

$\Rightarrow$ *kokonaiskuormalle F_{Ed} pistekuormakestävyys on erillisiin pistekuormiin perustuen:*

$$F_{Rd} = 2 \cdot 492,7 = 985,4 \text{ kN}$$

Tarkastellaan oikeanpuoleisessa kuvassa pistekuormat sitten yhdistettynä kuormana $0,5F_{Ed} + 0,5F_{Ed} = F_{Ed}$:

Kuormituspituuden s_s arvoksi otetaan nyt äärimmäisten pistekuormien keskiöiden välinen etäisyys (liitoslevyistä ei tällöin ole hyötyä, sillä ne eivät muuta kuormien vaikutuspisteiden keskiöväliä):

$$s_{s.total} = b - 2 \cdot (s_s/2) = 100 - 2 \cdot (12,9/2) = 87,1 \text{ mm}$$

$$s_{s.total}/t = 87,1/10 = 8,71 \le 60$$

$$C_F = k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{(h-t)/t}{49,5}\right]\left[1 + 0,007\frac{s_{s.total}}{t}\right] =$$

$$1,0 \cdot 0,8148 \cdot 0,97 \cdot \left[14,7 - \frac{(200-10)/10}{49,5}\right] \cdot [1 + 0,007 \cdot 8,71] = 12,00$$

$$F_{1w.Rd} = C_F \cdot \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} = 12,00 \cdot \frac{10^2 \cdot 420}{1,0} = 504,0\ kN$$

$\Rightarrow$ pistekuormakestävyys kokonaiskuormalle F_{Ed} on 504,0 kN yhdistettyyn kuormitukseen perustuen.

Putken $200 \times 200 \times 10$ osalta määräväksi muodostuu siis tarkastelu yhdistetylle kuormitukselle, jolloin pistekuormakestävyys kokonaiskuormalle F_{Ed} on 504,0 kN.

Putken $100 \times 100 \times 5$ pistekuormakestävyys:

Määritetään vasemmanpuoleisessa kuvassa jäykän tukipinnan pituus s_s.
Lasketaan kuormituspituus s_s ensin ilman liitoslevyjä:

$$s_s = 2t + (2 - \sqrt{2})r_i = 2 \cdot 10 + (2 - \sqrt{2}) \cdot 15 = 28,8\ mm$$

Kun myös liitoslevyt otetaan huomioon, saadaan laskennalliseksi kuormituspituudeksi:

$$s_{s.tot} = s_s + \Delta s_{s.left} + \Delta s_{s.right} = 28,8 + 20 + 20 = 68,8\ mm \le h - t = 95\ mm \quad OK$$

Vasemmanpuoleisesta kuvasta nähdään ilman tarkempiakin alkuarvoja, että taulukon 2.26 merkinnöin:

$$c \le 1,5(h - t) = 1,5 \cdot (100 - 5) = 142,5\ mm$$

$\Rightarrow$ kuormitus on tyyppiä 1a, jolloin:

$$k = f_y / 228 = 420 / 228 = 1,842$$

$$k_1 = 1,33 - 0,33k = 1,33 - 0,33 \cdot 1,842 = 0,7221$$

$$k_2 = 1,15 - 0,15(r_i / t) = 1,15 - 0,15 \cdot 1,0 = 1,0 \quad (k_2 \ge 0,5 \ \text{ja} \ k_2 \le 1,0)$$

$$k_3 = 1,0$$

$$s_{s.tot} / t = 68,8 / 5 = 13,76 \le 60$$

$$C_F = k_1 k_2 k_3 \left[5,92 - \frac{(h - t)/t}{132}\right]\left[1 + 0,01 \frac{s_{s.tot}}{t}\right] =$$

$$0,7221 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot \left[5,92 - \frac{(100 - 5)/5}{132}\right] \cdot [1 + 0,01 \cdot 13,76] = 4,745$$

$$F_{1w.Rd} = C_F \cdot \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} = 4,745 \cdot \frac{5^2 \cdot 420}{1,0} = 49,8\ kN$$

$\Rightarrow$ vasemmanpuoleisessa kuvassa kummallekin putkelle $100 \times 100 \times 5$ pistekuormakestävyys kuormalle F_{Ed} on etummaisen ja takimmaisen uuman yhteenlaskettu kestävyys eli:

$$F_{Rd} = 2F_{1w.Rd} = 2 \cdot 49,8 = 99,6\ kN$$

Koko liitoksen pistekuormakestävyyden määrää siis rakenneputken $100 \times 100 \times 5$ kestävyys. Liitoksessa vaikuttava suurin sallittu pistekuorman arvo on siten F_{Ed} = 99,6 kN.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin putken 200×200×10 kestävyydeksi 459,0 kN ja putken 100×100×5 kestävyydeksi 95,2 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa pistekuormakestävyyttä tässä siis tapauksesta riippuen 5...10 %.

2.12 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008. (EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008)
Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
Sisältää myös muutokset A1:2005 ja korjaukset AC:2008.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 185 s.

[1a] SFS-EN 1990: AC:2010. (EN 1990: AC:2010)
Korjausosa AC:2010 standardiin EN 1990.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 22 s.

[2] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 7 s.

[3] SFS-EN 1993-1-1:2005. (EN 1993-1-1:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 100 s.

[4] SFS-EN 1993-1-1:2005+AC:2006. (EN 1993-1-1:2005+AC:2006)
Sisältää myös korjaukset AC:2006.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.

[5] SFS-EN 1993-1-1: AC:2009. (EN 1993-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 16 s.

[6] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-1.
15.10.2007 sekä korjaus 14.2.2008. Ympäristöministeriö. 7 s.

[7] SFS-EN 1993-1-2:2005. (EN 1993-1-2:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 76 s.

[8] SFS-EN 1993-1-2:2005+AC:2005. (EN 1993-1-2:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 81 s.

[9] SFS-EN 1993-1-2: AC:2009. (EN 1993-1-2: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-2.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 3 s.

[10] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-2.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[11] SFS-EN 1993-1-3:2006+AC:2009. (EN 1993-1-3:2006+AC:2009)
Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille.
Sisältää myös korjaukset AC:2009.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 128 s.

[12] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-3.
3.7.2008. Ympäristöministeriö. 5 s.

[13] SFS-EN 1993-1-5:2006. (EN 1993-1-5:2006)
Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-5: Levyrakenteet.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 58 s.

[14] SFS-EN 1993-1-5: AC:2009. (EN 1993-1-5: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-5.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

[15] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-5.
3.7.2008. Ympäristöministeriö. 3 s.

[16] SFS-EN 1993-1-6:2007+AC:2009. (EN 1993-1-6:2007+AC:2009)
Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-6: Kuorirakenteiden lujuus ja stabiilius.
Sisältää myös korjaukset AC:2009.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 93 s.

[17] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-6.
3.7.2008. Ympäristöministeriö. 3 s.

[18] SFS-EN 1993-1-8:2005. (EN 1993-1-8:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-8: Liitosten mitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 149 s.

[19] SFS-EN 1993-1-8:2005+AC:2005. (EN 1993-1-8:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 137 s.

[20] SFS-EN 1993-1-8: AC:2009. (EN 1993-1-8: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-8.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

[21] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-8.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 2 s.

[22] SFS-EN 1993-1-9:2005. (EN 1993-1-9:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-9: Väsyminen.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.

[23] SFS-EN 1993-1-9:2005+AC:2005. (EN 1993-1-9:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 37 s.

[24] SFS-EN 1993-1-9: AC:2009. (EN 1993-1-9: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-9.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

[25] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-9.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[26] Kouhi J. 20xx. “Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu:
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Sovellutusohjeita, taustatietoja, kommentteja, tulkintoja, selvennyksiä,
kansallinen liite ja sen taustoja, oppi- ja opetusaineistoa, esimerkkejä.”
Teräsrakenneyhdistys ry. Työversio 2009.

[27] Kouhi J. 20xx. “Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu:
Osa 1-5: Levyrakenteet.
Sovellutusohjeita, taustatietoja, kommentteja, tulkintoja, selvennyksiä,
kansallinen liite ja sen taustoja, oppi- ja opetusaineistoa, esimerkkejä.”
Teräsrakenneyhdistys ry. Työversio 2009.

[28] JRC Scientific and Technical Reports:
Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 “Plated structural elements”.
Background documents in support to the implementation, harmonization and
further development of the Eurocodes. First Edition October 2007.
EUR 22898 EN - 2007. 226 s.

[29] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[30] SFS-ENV 1993-1-1:1993. (ENV 1993-1-1:1992)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 436 s.
Standardi on kumottu.

[31] Access Steel. 2006. NCCI:
Mono-symmetrical uniform members under bending and axial compression.
Document SN030a-EN-EU. [www.access-steel.com] (30.4.2010)

[32] Wardenier J. 2001. Hollow Sections in Structural Applications.
1st edition. 199 s. CIDECT. [www.cidect.org] (11.4.2012).

[33] ECCS. 1996. Handbuch für Entwurf, Berechnung und Bemessung unverschieblicher
oder seitensteifer Stahlhochbauten nach Eurocode 3. ECCS No 85-DE. 232 s.

[34] Compendium of EN 1993-1-1. Summary, design aids and flow charts.
ECSC Euro Build project. 84 s. [www.eurobuild-in-steel.com] (4.5.2010)

[35] ECCS. 2006. Rules for Member Stability in EN 1993-1-1.
Background documentation and design guidelines.
ECCS Technical Committee 8 - Stability. ECCS Publication No 119. 259 s.

3. RAKENNEPUTKIEN LIITOSTEN MITOITUS

3.1 Ristikkorakenteiden hitsattujen liitosten mitoitus

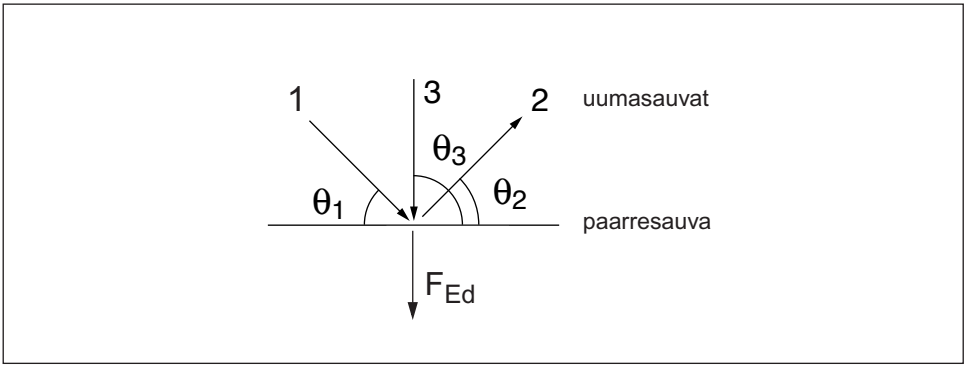
Ristikkorakenteissa liitokset oletetaan yleensä nivelellisiksi ja uumasauvat mitoitetaan pelkän normaalivoiman suhteen. Paarteen ja uumasauvojen mittasuhteista riippuen liitosten jäykkyyden vaikutus voidaan ottaa huomioon, jolloin uumasauvan nurjahduspituus pienenee (ks. kohta 7.4.3). Paarteen jännevälillä vaikuttavista poikittaisista kuormista tulee myös taivutuskuormaa, jolloin paarre pitää mitoittaa puristettuna ja taivutettuna sauvana. Puristuskestävyyden kannalta ohutseinäinen putkipalkki on edullisin. Ohutseinäinen ja leveä paarre on kuitenkin liitoksen kestävyyden kannalta huonompi kuin paksuseinäinen ja kapea paarre.

Ristikkoliitoksissa mitoitusehdot tarkastetaan liitoksen jokaisen sauvan osalta erikseen. Mitoitusehto voidaan esittää yleisessä muodossa seuraavasti (esitetty tässä tarkoituksellisesti 'nurinpäin' käännettynä):

$$N_{i.Rd} \geq N_{i.Ed} \qquad (3.1)$$

missä $N_{i.Rd}$ on uumasauvan i kestävyyden mitoitusarvo
$N_{i.Ed}$ on uumasauvassa i vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

Mitoitusehdossa (3.1) voidaan yleensä pitäytyä pelkkien uumasauvojen (liitos)kestävyyksien tarkasteluun, sillä liitosten kestävyystaulukoissa (liite 11.3) myös paarteen kestävyys on ilmaistu uumasauvojen kestävyytenä (esimerkiksi paarteen pinnan murtuminen myötäämällä on taulukon kaavoissa ilmaistu uumasauvassa vaikuttavan suurimman 'sallitun' voiman eli kestävyyden avulla).



Kuva 3.1 Esimerkki. KT-ristikkoliitos (uumasauvat 1,2,3) johon kohdistuu lisäksi ulkoinen pistekuorma / tukivoima F_{Ed}

Ristikkoliitoksissa vaikuttavat sauvavoimat lasketaan yleensä olettaen uumasauvojen päät nivelellisiksi. Esimerkiksi kuvan 3.1 tapauksessa mitoitusehto (3.1) saadaan tällöin liitoksen kullekin uumasauvalle seuraavaan muotoon:

Uumasauva 1: $N_{1.Rd} \geq N_{1.Ed} \quad | \cdot \sin\theta_1$ *(3.2)*

eli:

$$N_{1.Rd} \sin\theta_1 \geq N_{1.Ed} \sin\theta_1 = N_{2.Ed} \sin\theta_2 \text{ ″+″ } N_{3.Ed} \sin\theta_3 \text{ ″+″ } F_{Ed}$$

Uumasauva 2: $N_{2.Rd} \geq N_{2.Ed} \quad | \cdot \sin\theta_2$ *(3.3)*

eli:

$$N_{2.Rd} \sin\theta_2 \geq N_{2.Ed} \sin\theta_2 = N_{1.Ed} \sin\theta_1 \text{ ″+″ } N_{3.Ed} \sin\theta_3 \text{ ″+″ } F_{Ed}$$

Uumasauva 3: $N_{3.Rd} \geq N_{3.Ed} \quad | \cdot \sin\theta_3$ *(3.4)*

eli:

$$N_{3.Rd} \sin\theta_3 \geq N_{3.Ed} \sin\theta_3 = N_{1.Ed} \sin\theta_1 \text{ ″+″ } N_{2.Ed} \sin\theta_2 \text{ ″+″ } F_{Ed}$$

missä $N_{i.Rd}$ on uumasauvan i kestävyyden mitoitusarvo

$N_{i.Ed}$ on uumasauvassa i vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa

F_{Ed} on mahdollisen ulkoisen pistekuorman / tukivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa (mikäli kyseistä kuormaa ei ole, asetetaan F_{Ed} = 0). Myös paarteen ja kuormaa F_{Ed} paarteeseen siirtävän rakenneosan itsensä osalta tulee tarkastaa vastaava mitoitusehto $F_{Rd} \geq F_{Ed}$ missä liitoksen kestävyys F_{Rd} lasketaan tapauskohtaisesti kulloinkin soveltuvalla liitteen 11.3 kestävyystaulukolla (yleensä X-liitoksen taulukko 11.3.2 tai 11.3.4, tai levyn liitos paarteeseen taulukko 11.3.15)

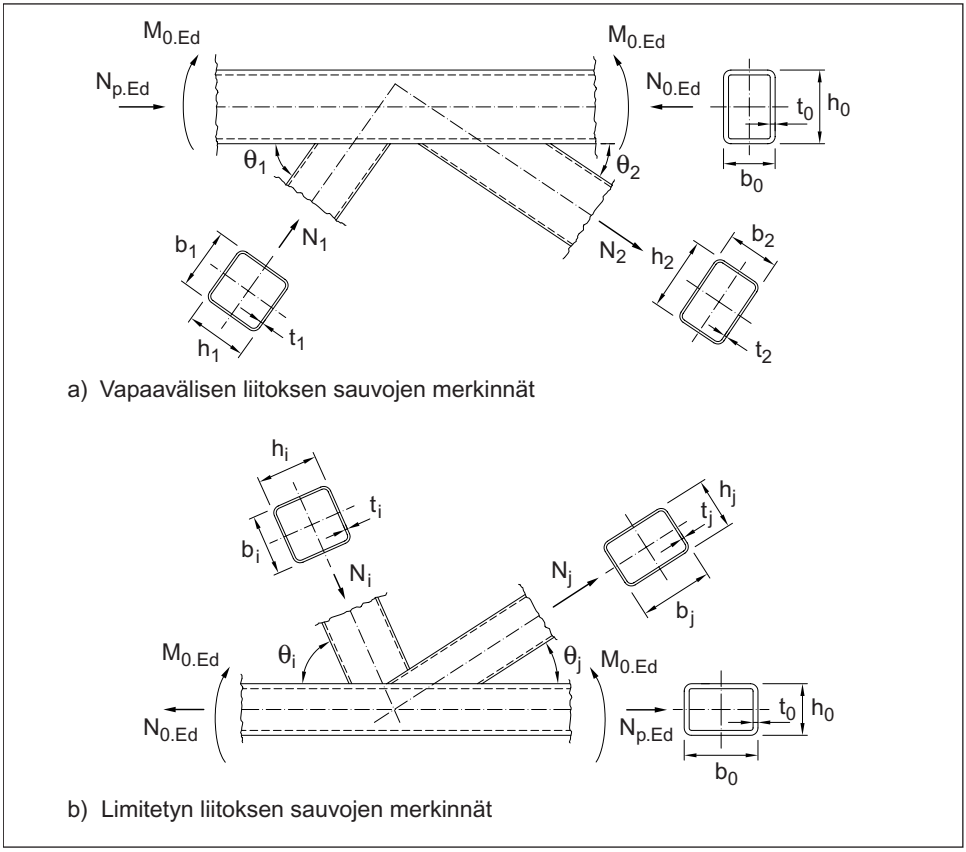
"+" tarkoittaa lausekkeen termien yhdistämistä (voimien samanaikaista vaikuttamista) (voimien etumerkit määräytyvät tapauskohtaisesti)

Ristikkoliitoksien kestävyyksiä tarkastettaessa on muistettava, että kestävyystaulukoissa (liite 11.3) esitetyt kestävyydet koskevat ainoastaan sauvojen liitoskestävyyksiä. **Lisäksi on aina muistettava tarkastaa liitokseen liittyvien sauvojen (uumasauvat ja paarteet):**

- poikkileikkauksen kestävyys (luku 2) ja
- puristettujen sauvojen nurjahduskestävyys (luku 2) ja
- hitsien kestävyys (kohta 3.3).

Kuvassa 3.2 on esitetty ristikkoliitoksen sauvoille käytetyt merkinnät. Sauvoille käytettävät alaindeksit määritellään seuraavasti:

0 = paarre
1 = puristettu uumasauva
2 = vedetty uumasauva
3 = keskimmäinen uumasauva (kun liitoksessa on kolme uumasauvaa)
i = limittävä uumasauva (kun kyseessä on limitetty liitos)
j = limitetty uumasauva (kun kyseessä on limitetty liitos)



Kuva 3.2 Liitoksen sauvojen merkinnät [4,5,6]

Kuvissa 3.3 ja 3.4 on esitetty muita liitoksen laskennan kannalta keskeisiä parametrejä.

Taulukkoon 3.2 on koottu erilaisia tasoristikoiden liitostyyppejä. Avaruusristikoiden liitostyyppejä on käsitelty lähteissä [12] ja [13].

Taulukossa 3.3 on esitetty erilaisia rakenneputkiristikoiden vaurioitumismalleja. Määräävä vaurioitumismalli riippuu paarteen ja uumasauvojen mittasuhteista sekä liitoksen geometriasta.

Eurocoden osassa EN 1993-1-8 esitetyt ristikkoliitosten laskentakaavat perustuvat osaksi koetuloksiin. Laskentakaavoja erilaisten rakenneputkien ristikkoliitoksille on esitetty liitteessä 11.3. Sen kussakin taulukossa on esitetty kyseiselle liitostyypille kriittiset vaurioitumismallit ja kestävyydet. Liitoksen kestävyys lasketaan kulloinkin kyseeseen tulevan taulukon kullekin esitetylle vaurioitumismuodolle, joista määräävä (pienin) arvo valitaan liitoksen lopulliseksi kestävyydeksi. Taulukoita käytettäessä puristus on positiivinen. Liitosten mitoituksessa paarresauvassa vaikuttavalle itseisarvoltaan suurimmalle aksiaaliselle voimalle (tai vastaavasti jännitykselle) käy-

tetään merkintää $N_{0.Ed}$. Kun liitoksen uumasauvoissa vaikuttavien voimien vaakakomponentit jätetään huomioon ottamatta, paarresauvan aksiaaliselle voimalle käytetään merkintää $N_{p.Ed}$ (ks. kuva 3.2).

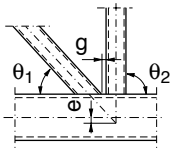
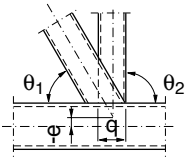
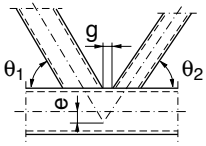
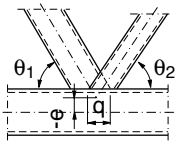
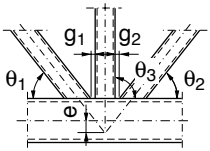
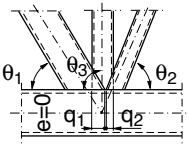
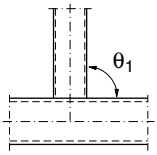
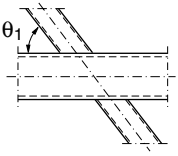
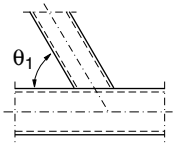
Uumasauvan ja paarteen välisen hitsin kestävyys ei sisälly taulukoiden tarkasteluihin, vaan taulukoissa oletetaan että hitsien kestävyys on mitoitettu riittäväksi. Hitsien mitoitusta käsitellään jäljempänä kohdassa 3.3.

Taulukoiden kaavoilla lasketut kestävyydet pätevät lujuusluokkaan S355 asti. Käytettäessä lujempia teräslajeja kestävyydet tulee kertoa taulukon 3.1 mukaisella korjauskertoimella [4,5,6].

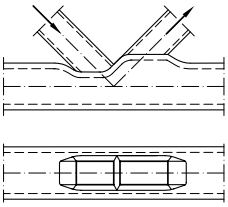
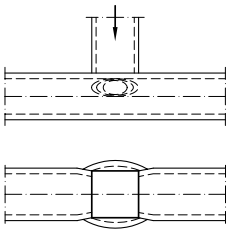
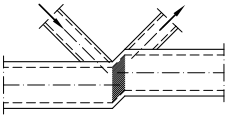
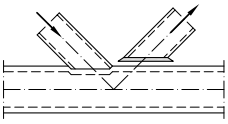
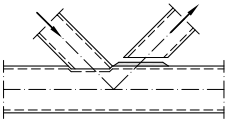
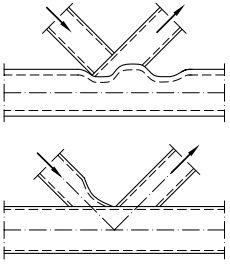
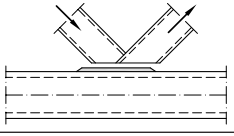
Taulukko 3.1 Rakenneputkien ristikkoliitosten kestävyyden korjauskerroin eri lujuusluokille [4,5,6]

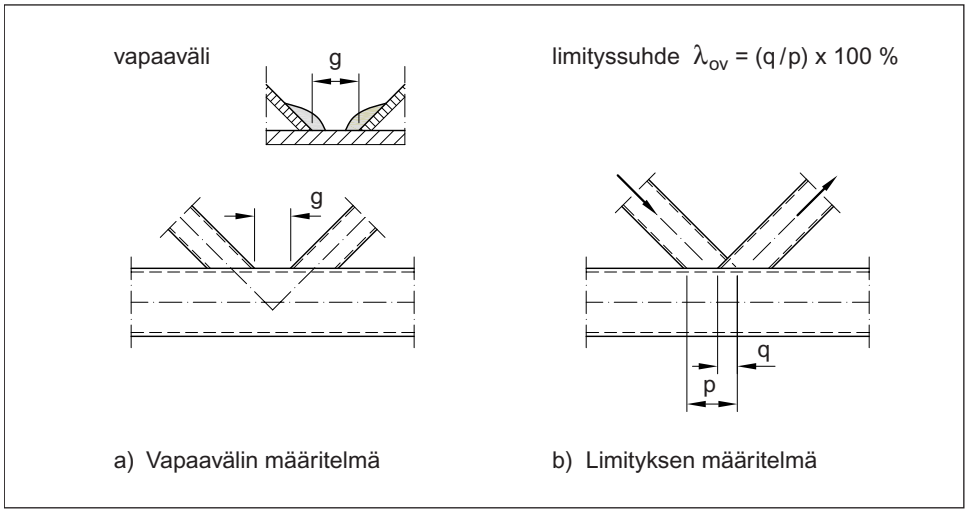
Lujuusluokka	Kestävyyden korjauskerroin
S235...S355	1,0
S420...S460	0,9

Taulukko 3.2 Ristikkorakenteiden liitostyyppejä

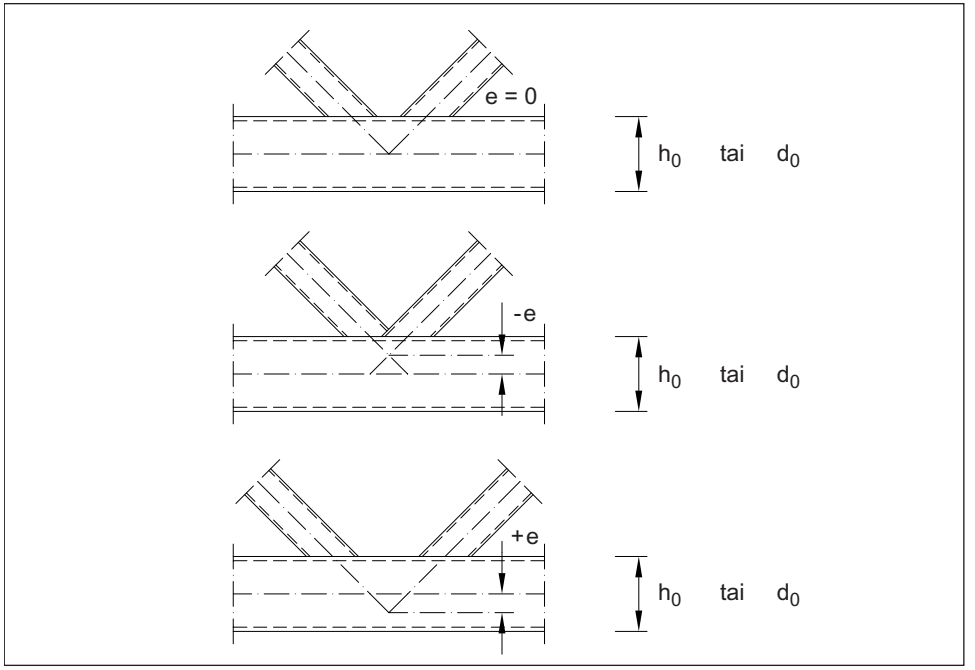
Liitostyyppi	Vapaavälinen	Limitetty
N		
K		
KT		
T		
X		
Y		

Taulukko 3.3 Ristikkorakenteiden liitosten vaurioitumismalleja [4,5,6]

Murtotapa		Rakenne, jolla murtotapa on mahdollinen
Paarteen pinnan plastinen murtuminen tai paarteen koko poikkileikkauksen murtuminen plastisoitumalla		Ohutseinäinen paarre ja pieni uumasauvan leveys verrattuna paarteen leveyteen
Paarteen uuman murtuminen myötäämällä tai lommahtamalla uumasauvan puristuksesta johtuen		Korkea ja ohutseinäinen paarre sekä samanlevyiset paarre ja uumasauva
Paarteen leikkausmurtuminen		Matala ja ohutseinäinen paarre
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		Ohutseinäinen ja leveä paarre, uumasauva hieman paarretta kapeampi
Uumasauvan tai hitsin murtuminen		Ohutseinäinen uumasauva ja paksuseinäinen paarre
Uumasauvan tai paarresauvan paikallinen lommahdus		Paarre: Ohutseinäinen ja leveä Uumasauva: Ohutseinäinen ja suuri sivumitta
Uumasauvojen leikkautuminen paarteesta		Limitetty liitos, kun limityksen suuruus $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ <u>tai</u> kun uumasauvojen $h_1 < b_1$ tai $h_2 < b_2$



Kuva 3.3 Liitoksen vapaaväli ja limitys [4,5,6]



Kuva 3.4 Liitoksen epäkeskeisyys [4,5,6]

Kuvan 3.4 mukaisesti epäkeskeisyys saa positiivisen arvon, kun uumasauvojen neutraaliakselit leikkaavat paarteen painopisteakselin vastakkaisella puolella. Vastaavasti epäkeskeisyys on negatiivinen, kun leikkauspiste sijaitsee paarteen painopisteakselin uumasauvojen puolella. Liitoksen vapaaväli tarkoittaa uumasauvojen väliin jäävää tilaa. Liitos on limitetty, kun uumasauvat ovat osittain tai kokonaan päällekkäin. Limitys voidaan myös laskea negatiivisena vapaavälinä. Epäkeskeisyys ja vapaaväli riippuvat toisistaan seuraavasti [13]:

$$g = \left(e + \frac{h_0}{2}\right)\frac{sin(\theta_1 + \theta_2)}{sin\theta_1 sin\theta_2} - \frac{h_1}{2sin\theta_1} - \frac{h_2}{2sin\theta_2} \qquad (3.5)$$

$$e = \left(\frac{h_1}{2sin\theta_1} + \frac{h_2}{2sin\theta_2} + g\right)\frac{sin\theta_1 sin\theta_2}{sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2} \qquad (3.6)$$

missä θ_i on uumasauvan ja paarteen välinen pienempi kulma
h_i on uumasauvan korkeus
h_0 on paarteen korkeus

Liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvia momentteja ei tarvitse ottaa huomioon liitoksen kestävyyden laskennassa, jos uumasauvan ja paarteen systeemipituus L sekä liitoksen epäkeskeisyys toteuttavat seuraavat ehdot [4,5,6]:

$$L \geq 6h \qquad (3.7)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \qquad (3.8)$$

missä h on tarkasteltavan sauvan (uumasauva tai paarre) poikkileikkauksen korkeus ja h_0 on paarteen poikkileikkauksen korkeus ristikon tasossa. Pyöreiden rakenneputkien tapauksessa em. ehdoissa käytetään poikkileikkauksen korkeuden h sijasta putken halkaisijaa d.

Myöskään sauvojen mitoituksessa liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvia momentteja ei tarvitse ottaa huomioon uumasauvojen ja vedetyn paarteen tapauksessa, jos molemmat edellä esitetyt ehdot toteutuvat. Sen sijaan puristetun paarteen tapauksessa liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit tulee aina ottaa huomioon. Tällöin epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit jaetaan liitoksen molemmilla puolilla oleville puristetuille paarresauvoille niiden suhteellisten jäykkyyslukujen I/L suhteessa, missä L on sauvan systeemipituus [4,5,6].

Jos jompikumpi ehdoista (3.7) tai (3.8) ei toteudu, epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit tulee ottaa huomioon sekä liitoksen että sen sauvojen mitoituksessa. Tällöin epäkeskeisyydestä aiheutuvat momentit jaetaan liitoksen kaikille sauvoille niiden suhteellisten jäykkyyslukujen I/L suhteessa [4,5,6].

Liitosten kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat liitosten sekundääriset momentit voidaan jättää huomioon ottamatta sekä sauvojen että liitosten mitoituksessa edellyttäen, että sauvan pituus toteuttaa ehdon (3.7), ja että liitoksen geometria toteuttaa kestävyystaulukoissa kyseiselle liitokselle esitetyt vaatimukset [4,5,6].

Yhteenveto tapauksista, joissa momentit otetaan huomioon, on esitetty taulukossa 3.4.

Taulukko 3.4 Taivutusmomenttien huomioon ottaminen [4,5,6]

Tarkasteltava osa tai liitos	Momentin aiheuttaja		
	Sekundääriset vaikutukset	Poikittainen kuormitus	Epäkeskeisyys
Puristettu paarre	Ei, jos sauvan pituus toteuttaa ehdon (3.7) ja jos liitoksen geometria toteuttaa kestävyystaulukoissa sille asetetut vaatimukset	Kyllä	Kyllä
Vedetty paarre			Ei, jos ehdot (3.7) ja (3.8) toteutuvat, ja jos liitoksen geometria toteuttaa kestävyystaulukoissa sille asetetut vaatimukset
Uumasauva			
Liitos			

Taulukko 3.5 Rakenneputkien ristikkoliitosten yleiset vaatimukset [4,5,6]

Liitettävät sauvat:
• kylmämuovatut rakenneputket ovat standardin EN 10219 mukaisia pyöreitä tai neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
• liitokset voivat muodostua myös em. rakenneputkien ja avoimien profiilien liitoksista
• putken seinämänpaksuus on vähintään $t \geq 2{,}5$ mm (Huom: SSAB suosittelee $t \geq 3$ mm ristikon osien yhteensovittamisen ja hitsattavuuden varmistamiseksi)
• sauvojen puristettujen taso-osien tulee täyttää poikkileikkausluokkien 1 tai 2 vaatimukset (määritettynä tasaisen puristuksen mukaan), ellei kyseeseen tulevan liitoksen kestävyystaulukoissa ole tapauskohtaisesti toisin sanottu
Liitoksen geometria:
• paarteiden ja uumasauvojen, sekä vierekkäisten uumasauvojen välisten kulmien tulee olla vähintään $\theta_i \geq 30°$
• liitoksessa kohtaavien sauvojen päät valmistetaan siten, että putkien poikkileikkausten muoto ei muutu (ohjeet eivät siis koske päistään litistettyjen putkien liitoksia)
Vapaaväliset liitokset (ks. kuva 3.3):
• vapaavälisissä liitoksissa riittävän tilan varmistamiseksi riittävien hitsien aikaansaamiseksi uumasauvojen välisen vapaavälin tulee olla vähintään $g \geq (t_1 + t_2)$
Limitetyt liitokset (ks. kuva 3.3):
• kun limitettävien sauvojen seinämänpaksuudet ja / tai teräslajit ovat erilaisia, pienimmän $t_i \cdot f_{yi}$ arvon omaava sauva asetetaan päällimmäiseksi
• kun limitettävien uumasauvojen leveys on erilainen, kapeampi sauva asetetaan leveämmän sauvan päälle
• osittain limitetyissä liitoksissa SSAB suosittelee, että myös limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu hitsataan aina paarteeseen (Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan näin ei tarvitse tehdä edellyttäen, että uumasauvojen aksiaalisten voimien paarresauvoja vastaan kohtisuorat komponentit poikkeavat toisistaan enintään 20 %)
• limitetyissä liitoksissa limityksen tulee olla riittävän suuri leikkausvoiman siirtämiseksi yhdestä uumasauvasta toiseen. Limityksen tulee olla vähintään $\lambda_{ov} \geq 25$ %
• Jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ tai jos suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_1 < b_1$ ja/tai $h_2 < b_2$, tulee tarkastaa myös uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta: $\lambda_{ov.lim}$ = 60 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen $\lambda_{ov.lim}$ = 80 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen

Ristikkoliitosten kestävyyskaavoja käytettäessä on varmistuttava, että liitos täyttää laskentataulukoiden voimassaoloehdot. Taulukoiden voimassaoloehdot kohdistuvat sekä tarkasteltavan liitoksen geometriaan että liitoksen muodostavien putkien poikkileikkausluokkiin ja

poikkileikkauksen mittoihin. Taulukossa 3.5 on esitetty Eurocoden osan EN 1993-1-8 yleiset vaatimukset liitoksille. Liitostyyppikohtaiset muut vaatimukset on esitetty jäljempänä kohdissa 3.1.1 - 3.1.2 sekä liitteen 11.3 taulukoissa.

3.1.1 Pyöreiden sekä neliön ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen liitos neliön tai suorakaiteen muotoiseen paarteeseen

Ennen liitoksen kestävyyden laskentaa on mitoitettava sauvat niihin kohdistuvan kuormituksen mukaisesti (luku 2). Liitokset oletetaan yleensä nivelellisiksi, joten uumasauvat mitoitetaan vain normaalivoimalle. Uumasauvan ja paarteen välinen hitsi mitoitetaan yleensä tasalujaksi uumasauvan suhteen (ks. kohta 3.3). Liitoksen epäkeskeisyydestä aiheutuvia momentteja ei tarvitse ottaa huomioon liitoksen kestävyyden laskennassa, jos liitoksen muodostavien sauvojen systeemipituus sekä liitoksen epäkeskeisyys toteuttavat edellä kohdassa 3.1 esitetyt ehdot.

Sauvojen puristettujen taso-osien tulee toteuttaa poikkileikkausluokkien 1 tai 2 vaatimukset (määritettynä tasaisen puristuksen mukaan), ellei kyseeseen tulevan liitoksen kestävyystaulukoissa ole tapauskohtaisesti toisin sanottu [4,5,6].

Jos kyseessä on vapaavälinen N-, K- tai KT-liitos, vapaavälin g (kuva 3.3) tulee toteuttaa seuraavat ehdot [4,5,6,13]:

$$g \geq t_1 + t_2 \qquad (3.9)$$

$$0,5(1-\beta)b_0 \leq g \leq 1,5(1-\beta)b_0 \qquad (3.10)$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2}{2b_0} \quad tai \quad \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \qquad \text{kun N- tai K-liitos} \qquad (3.11)$$

$$\beta = \frac{d_1 + d_2 + d_3}{3b_0} \quad tai \quad \frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6b_0} \qquad \text{kun KT-liitos} \qquad (3.12)$$

missä
- t_i on uumasauvan seinämänpaksuus
- d_i on uumasauvan poikkileikkauksen halkaisija
- b_i on uumasauvan poikkileikkauksen leveys
- h_i on uumasauvan poikkileikkauksen korkeus
- b_0 on paarteen leveys

Jos vapaaväli on edellä esitettyjä raja-arvoja suurempi, liitosta käsitellään kahtena erillisenä liitoksena [4,5,6].

Paarteen normaalivoima ja taivutusmomentti vaikuttavat paarteen pinnan kestävyyteen. Tämä riippuvuus lasketaan parametrin n avulla [4,5,6]:

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} \qquad (3.13)$$

missä $N_{0.Ed}$ on paarteessa vaikuttava itseisarvoltaan suurin normaalivoima (kuva 3.2)

$M_{0.Ed}$ on paarteessa vaikuttava taivutusmomentti (kuva 3.2)
A_0 on paarteen poikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)
$W_{el.0}$ on paarteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)
f_{y0} on paarteen nimellinen myötölujuus
γ_{M5} on rakenneputkien ristikkoliitosten osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Liitosten kestävyys lasketaan esimerkeissä 3.1 - 3.6 liitteen 11.3 taulukoiden mukaisesti. Liitoksen kestävyys lasketaan kestävyystaulukoissa erilaisilla murtomalleilla, joista valitaan pienin arvo liitoksen lopulliseksi kestävyydeksi. Rakenneputkien ristikkoliitosten laskennassa käytetään liitosten kestävyydelle osavarmuuslukua γ_{M5} (ks. taulukko 2.5), jolle on käytetty Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaista suositusarvoa γ_{M5} = 1,0.

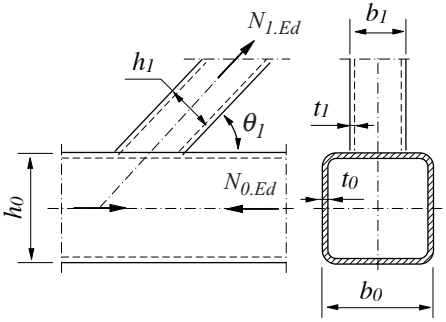
Taulukoita käytettäessä on tarkastettava, että ristikon sauvat ja liitoksen geometria toteuttavat taulukoissa esitetyt vaatimukset. Liitoksen voimassaoloehdot ovat voimassa esimerkeissä 3.1 - 3.6, mutta niiden tarkastamista ei ole esitetty tässä yhteydessä.

Teräslaji on kaikissa esimerkeissä SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Seuraavissa esimerkeissä mitoitus on suoritettu lujuusluokan S420 mukaan, ellei tapauskohtaisesti toisin ole sanottu.

Liitteen 11.3 taulukoissa ja esimerkeissä 3.1 - 3.6 on oletettu, että rakenneputkien ristikkoliitoksen osavarmuusluvun γ_{M5} arvo on Eurocoden suositusarvon ja Suomen kansallisen liitteen mukaisesti γ_{M5} = 1,0. Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex). Liitteen 11.3 laskentataulukot soveltuvat teräslajeille, joiden myötölujuus on enintään f_y = 460 N/mm^2. Käytettäessä teräslajeja joiden myötölujuus on yli f_y = 355 N/mm^2, liitoskestävyydet on kerrottava taulukon 3.1 mukaisella korjauskertoimella.

Esimerkki 3.1
Y-liitos, jossa uumasauva on vedetty (taulukko 11.3.1)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:



Paarre: 200×200×8
A_0 = 5924 mm^2 *(liite 11.1)*

Uumasauva: 100×100×5
A_1 = 1836 mm^2 *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 45°$
$\beta = b_1/b_0 = 100/200 = 0{,}5$
$\eta = h_1/b_0 = 100/200 = 0{,}5$

$N_{0.Ed}$ = 936 kN *(puristusta)*
$N_{1.Ed}$ = 590 kN *(vetoa)*

Paarteen pinnan normaalijännitys $\sigma_{0.Ed}$ vaikuttaa liitoksen kestävyyteen termin k_n muodossa:

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{936 \cdot 10^3}{5924 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,3762$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,3762}{0,5} = 0,9990 \le 1,0 \qquad \textit{(puristettu paarre)}$$

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:
Koska $\beta = 0,5 \le 0,85$ tarkastetaan paarteen pinnan kestävyys:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta)\sin\theta_1}\left(\frac{2\eta}{\sin\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta}\right)/\gamma_{M5} \qquad \textit{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{0,9990 \cdot 420 \cdot 8^2}{(1-0,5)\sin 45}\left(\frac{2 \cdot 0,5}{\sin 45} + 4\sqrt{1-0,5}\right)/1,0 = 290,0 \text{ kN} \le N_{1.Ed} = 590 \text{ kN}$$

Liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyys on siis uumasauvan 1 (eli i = 1) liitoskestävyys joka on $N_{1.Rd}$ = 290,0 kN, mikä on huomattavasti pienempi kuin uumasauvan normaalivoima $N_{1.Ed}$ = 590 kN. Uumasauvaksi pitää valita suurempi putki tai paarteen pintaa täytyy vahvistaa, jotta liitoksen kestävyys olisi riittävä.

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristetun sauvan (paarteen) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 257,3 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 13 %.

Esimerkki 3.2
T-liitos, jossa uumasauva on puristettu (taulukko 11.3.1).

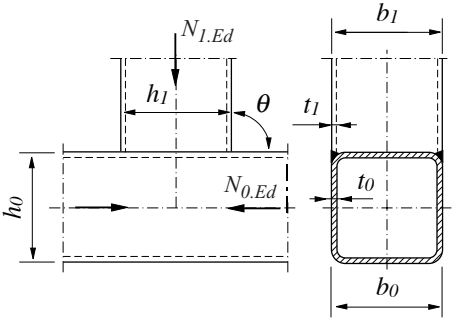
Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:

Paarre: 100×100×6
A_0 = 2163 mm^2 (liite 11.1)

Uumasauva: 100×100×5
A_1 = 1836 mm^2 (liite 11.1)

$\theta_1 = 90°$
$\beta = b_1/b_0 = 100/100 = 1,0$

$N_{0.Ed}$ = 400 kN (puristusta)
$N_{1.Ed}$ = 350 kN (puristusta)



$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{400 \cdot 10^3}{2163 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,4403$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,4403}{1,0} = 1,124 > 1,0 \quad \Rightarrow k_n = 1,0$$

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen:
Paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen saattaa olla mitoittava murtotapa, koska β on 1,0. Lasketaan ensin lommahdusjännitys käyttäen nurjahdusluokkaa c :

$$\bar{\lambda} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin\theta_1}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{100}{6} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin 90}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{420}}} = 0,7224$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (0,7224 - 0,2) + 0,7224^2] = 0,8889$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{0,8889 + \sqrt{0,8889^2 - 0,7224^2}} = 0,7108 \leq 1,0$$

T-liitokselle:

$$f_b = \chi \cdot f_{y0} = 0,7108 \cdot 420 = 298,5 \text{ N/mm}^2$$

Nyt voidaan laskea paarteen uuman kestävyys:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n f_b t_0}{\sin\theta_1}\left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 10t_0\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,0 \cdot 298,5 \cdot 6}{\sin 90}\left(\frac{2 \cdot 100}{\sin 90} + 10 \cdot 6\right)/1,0 = 419,1 \text{ kN}$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Uumasauvan tehollinen leveys:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{100/6} \cdot \frac{420 \cdot 6}{420 \cdot 5} \cdot 100 = 72 \text{ mm} \leq b_1 = 100 \text{ mm}$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff})/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 5 \cdot (2 \cdot 100 - 4 \cdot 5 + 2 \cdot 72)/1,0 = 612,4 \text{ kN}$$

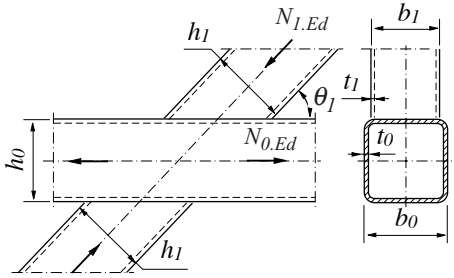
Liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyyden määrää tässä paarteen uuman kestävyys, joka ilmaistaan uumasauvan 1 (eli i = 1) kestävyytenä $N_{1.Rd} = 419,1 \text{ kN} \geq N_{1.Ed}$ OK

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauva ja paarre) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 413,6 kN. Tässä esimerkissä materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 ei siis juurikaan paranna liitoksen kestävyyttä.

Esimerkki 3.3
X-liitos, jossa uumasauvat ovat puristettuja (taulukko 11.3.1)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:



Paarre: $200 \times 200 \times 8$
$A_0 = 5924\ mm^2$ (liite 11.1)

Uumasauvat: $180 \times 180 \times 6$
$A_1 = 4083\ mm^2$ (liite 11.1)

$\theta_1 = 30^o$
$\beta = b_1 / b_0 = 180 / 200 = 0{,}90$
$\eta = h_1 / b_0 = 180 / 200 = 0{,}90$
$\gamma = 0{,}5 b_0 / t_0 = 0{,}5 \cdot 200 / 8 = 12{,}5$

$N_{0.Ed} = 620\ kN$ *(vetoa)* $\Rightarrow k_n = 1{,}0$
$N_{1.Ed} = 1000\ kN$ *(puristusta)*

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska $0{,}85 \le \beta \le 1\text{-}(1/\gamma) = 0{,}92$:

$$b_{e.p} = \frac{10}{b_0 / t_0} \cdot b_1 = \frac{10}{200/8} \cdot 180 = 72\ mm \le b_1 = 180\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \sin\theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 2b_{e.p} \right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0{,}9 \cdot \frac{420 \cdot 8}{\sqrt{3} \sin 30} \cdot \left(\frac{2 \cdot 180}{\sin 30} + 2 \cdot 72 \right) / 1{,}0 = 3017\ kN$$

Paarteen pinnan myötääminen ja paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen:
Paarteen kestävyys joudutaan laskemaan sekä paarteen pinnan että uuman osalta, koska $0{,}85 < \beta < 1{,}0$. Lasketaan ensin liitoksen kestävyys paarteen pinnan suhteen, kun $\beta = 0{,}85$ ja paarteen uuman suhteen, kun $\beta = 1{,}0$. Tämän jälkeen interpoloidaan lineaarisesti kestävyys oikealla arvolla $\beta = 0{,}9$:

a) $\beta = 0{,}85$:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta)\sin\theta_1} \cdot \left(\frac{2\eta}{\sin\theta_1} + 4\sqrt{1-\beta} \right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,0 \cdot 420 \cdot 8^2}{(1-0,85)\sin 30} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,9}{\sin 30} + 4\sqrt{1-0,85} \right) / 1,0 = 1661 \text{ kN}$$

b) $\beta = 1{,}0$:

$$\bar{\lambda} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin\theta_1}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{200}{8} - 2 \right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin 30}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{420}}} = 1,602$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,602 - 0,2) + 1,602^2] = 2,127$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{2,127 + \sqrt{2,127^2 - 1,602^2}} = 0,2836 \le 1,0$$

X-liitokselle:

$$f_b = 0,8\chi \cdot f_{y0} \cdot \sin\theta_1 = 0,8 \cdot 0,2836 \cdot 420 \cdot \sin 30 = 47,6 \text{ N/mm}^2$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n f_b t_0}{\sin\theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,0 \cdot 47,6 \cdot 8}{\sin 30} \cdot \left(\frac{2 \cdot 180}{\sin 30} + 10 \cdot 8 \right) / 1,0 = 548,4 \text{ kN}$$

Tarkastetaan, voidaanko arvolla $\beta = 1{,}0$ käyttää suoraan edellä saatua kestävyyttä 548,4 kN, vai täytyykö tarkastaa myös paarteen leikkautuminen:

$\cos\theta_1 = \cos 30 = 0,8660 \le h_1/h_0 = 180/200 = 0,9$

$\Rightarrow$ *paarteen leikkautumista ei tarvitse tarkastaa*

Nyt interpoloidaan paarteen kestävyys käyttäen edellä laskettuja arvoja:

$$N_{1.Rd} = 1661 + \frac{548,4 - 1661}{1,0 - 0,85} \cdot (0,9 - 0,85) = 1290 \text{ kN}$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:

Uumasauvan tehollinen leveys on:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{200/8} \cdot \frac{420 \cdot 8}{420 \cdot 6} \cdot 180 = 96,0 \text{ mm} \le b_1 = 180 \text{ mm}$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y0} t_1 (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff}) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 6 \cdot (2 \cdot 180 - 4 \cdot 6 + 2 \cdot 96,0) / 1,0 = 1198 \text{ kN}$$

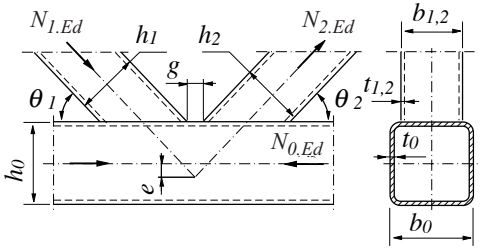
Liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyys on pienin edellisistä eli $N_{1.Rd} = 1198\ kN \geq N_{1.Ed}$ *OK*

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauvat ja paarre) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 1125 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 6,5 %.

Esimerkki 3.4
K-liitos vapaavälillä (taulukko 11.3.2)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:



Paarre: $200 \times 200 \times 8$
$A_0 = 5924\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauvat: $150 \times 150 \times 6$
$A_1 = A_2 = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = \theta_2 = 45°$
$g = 28\ mm$

$N_{0.Ed} = 1364\ kN$ *(puristusta)*
$N_{1.Ed} = 600\ kN$ *(puristusta)*
$N_{2.Rd} = 600\ kN$ *(vetoa)*

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{150 + 150 + 150 + 150}{4 \cdot 200} = 0,75$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{200}{2 \cdot 8} = 12,5$$

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{1364 \cdot 10^3}{5924 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,5482$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,5482}{0,75} = 1,008 > 1,0 \quad \Rightarrow k_n = 1,0$$

Tarkastetaan liitoksen vapaavälin ehdot:

$g = 28\ mm \geq t_1 + t_2 = 6 + 6 = 12\ mm \quad OK$

$g/b_0 = 28/200 = 0,14 \geq 0,5(1-\beta) = 0,5 \cdot (1-0,75) = 0,125 \quad OK$

$g/b_0 = 0,14 \leq 1,5(1-\beta) = 1,5 \cdot (1-0,75) = 0,375 \quad OK$

$\Rightarrow$ *liitoksen vapaaväli on sallituissa rajoissa*

Tarkastetaan liitoksen epäkeskeisyyden ehdot:

$$e = \left(\frac{h_1}{2\sin\theta_1} + \frac{h_2}{2\sin\theta_2} + g\right)\frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)} - \frac{h_0}{2}$$

$$= \left(\frac{150}{2\sin 45} + \frac{150}{2\sin 45} + 28\right)\frac{\sin 45 \sin 45}{\sin(45+45)} - \frac{200}{2} = 20,1\ mm$$

$-0,55h_0 = -110\ mm \leq e = 20,1\ mm \leq 0,25h_0 = 50\ mm \quad OK$

$\Rightarrow$ *liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa*

Lasketaan liitoksen kestävyys vain uumasauvan 1 suhteen, koska uumasauvat ovat samankokoisia ja samassa kaltevuuskulmassa ja koska niiden kuormitus on yhtäsuuri.

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_1} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0}\right)/\gamma_{M5} \qquad (S420: kerroin = 0,9)$$

$$= 0,9 \cdot \frac{8,9 \cdot 1,0 \cdot 420 \cdot 8^2 \cdot \sqrt{12,5}}{\sin 45} \cdot \left(\frac{150+150+150+150}{4 \cdot 200}\right) = 807,4\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska $\beta \leq 1 - (1/\gamma) = 0,92$*:*

$$b_{e.p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1 = \frac{10}{200/8} \cdot 150 = 60\ mm \leq b_1 = 150\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{y0}\, t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_1}\left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + b_1 + b_{ep}\right)/\gamma_{M5} \qquad (S420: kestävyyskerroin = 0,9)$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420 \cdot 8}{\sqrt{3}\sin 45}\left(\frac{2 \cdot 150}{\sin 45} + 150 + 60\right)/1,0 = 1566\ kN$$

Paarteen leikkautuminen:
Koko paarteen leikkauskestävyydeksi liitoksen kohdalla saadaan:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1+\frac{4\cdot 28^2}{3\cdot 8^2}}} = 0,2402$$

$$A_{v0} = (2h_0 + \alpha b_0)t_0 = (2\cdot 200 + 0,2402\cdot 200)\cdot 8 = 3584\ mm^2$$

$$N_{1.Rd} = 0,9\cdot \frac{f_{y0}\cdot A_{v0}}{\sqrt{3}\sin\theta_1} / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9\cdot \frac{420\cdot 3584}{\sqrt{3}\sin 45} / 1,0 = 1106\ kN$$

Paarteen kestävyys normaalivoimalle liitoksessa vapaavälin kohdalla:

$$N_{0.gap.Ed} = N_{0.Ed} - N_{2.Ed}\cos\theta_2 = 1364 - 600\cdot\cos 45 = 939,7\ kN \quad \text{(puristusta)}$$

$$V_{0.gap.Ed} = N_{1.Ed}\sin\theta_1 = 600\cdot\sin 45 = 424,3\ kN$$

$$A_{V0} = A_0\cdot\frac{h_0}{b_0+h_0} = 5924\cdot\frac{200}{200+200} = 2962\ mm^2$$

$$V_{pl.Rd} = A_{V0}\cdot\frac{f_{y0}/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 2962\cdot\frac{420/\sqrt{3}}{1,0} = 718,2\ kN$$

$$N_{0.gap.Rd} = 0,9\cdot[(A_0 - A_{v0})f_{y0} + A_{v0}f_{y0}\sqrt{1-(V_{0.gap.Ed}/V_{pl.Rd})^2}]/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420 = 0,9)}$$

$$= 0,9\cdot[(5924-3584)\cdot 420 + 3584\cdot 420\cdot\sqrt{1-(424,3/718,2)^2}]/1,0 = 1978\ kN$$

$$N_{0.gap.Rd} = 1978\ kN \geq N_{0.gap.Ed} = 939,7\ kN \quad OK$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Uumasauvan tehollinen leveys on:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0}\cdot\frac{f_{y0}\cdot t_0}{f_{y1}\cdot t_1}\cdot b_1 = \frac{10}{200/8}\cdot\frac{420\cdot 8}{420\cdot 6}\cdot 150 = 80\ mm \leq b_1 = 150\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0,9\cdot f_{y1}t_1(2h_1 - 4t_1 + b_1 + b_{eff})/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9\cdot 420\cdot 6\cdot(2\cdot 150 - 4\cdot 6 + 150 + 80)/1,0 = 1148\ kN$$

Liitoksen kestävyys:
Paarteessa vaikuttavien voimien osalta liitoksen kestävyyden määrää paarteen kestävyys vapaavälin kohdalla $N_{0.gap.Rd} = 1978\ kN \geq N_{0.gap.Ed} = 939,7\ kN$ *OK*

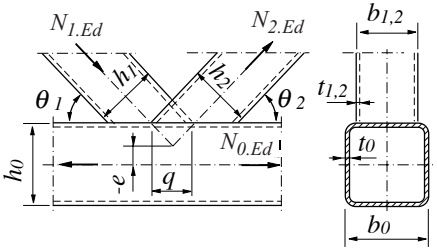
Uumasauvoissa vaikuttavien voimien osalta liitoksen kestävyyden määrää paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, jonka suhteen uumasauvojen kestävyydet ovat:
$N_{1.Rd} = 807,4\ kN \geq N_{1.Ed}$ *OK*
$N_{2.Rd} = 807,4\ kN \geq N_{2.Ed}$ *OK*

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (paarre ja uumasauva 1) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin paarteen osalta 1741 kN ja uumasauvojen osalta 723,5 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä uumasauvojen osalta lähes 12 % ja paarteen osalta lähes 14 %.

Esimerkki 3.5
Limitetty K-liitos (taulukko 11.3.3)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:



Paarre: $180 \times 180 \times 8$
$A_0 = 5284\ mm^2$ (liite 11.1)

Uumasauvat: $140 \times 140 \times 6$
$A_1 = A_2 = 3123\ mm^2$ (liite 11.1)

$\theta_1 = \theta_2 = 60°$
$q = -g = 90$ mm (limitys)

$N_{0.Ed} = 1500$ kN (vetoa)
$N_{1.Ed} = 800$ kN (puristusta)
$N_{2.Rd} = 800$ kN (vetoa)

Tarkastetaan liitoksen epäkeskeisyyden ehdot:

$$e = \left(\frac{h_1}{2\sin\theta_1} + \frac{h_2}{2\sin\theta_2} + g\right)\frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2}$$

$$= \left(\frac{140}{2\sin 60} + \frac{140}{2\sin 60} + (-90)\right)\frac{\sin 60 \sin 60}{\sin(60+60)} - \frac{180}{2} = -27,9\ mm$$

$-0,55h_0 = -99\ mm \le e = -27,9\ mm \le 0,25h_0 = 45\ mm$ *OK*
$\Rightarrow$ *liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa*

Limityksen suhteellinen arvo λ_{ov} on (kuva 3.3):

$p = h_1 / \sin\theta_1 = 140 / \sin 60 = 161,7\ mm$

$\lambda_{ov} = (q/p) \cdot 100\ \% = (90/161,7) \cdot 100\ \% = 55,7\ \% \ge 25\ \%$ *OK*

Uumasauvojen leikkautuminen irti paarteesta:
Kyseinen murtumismuoto pitää tarkastaa jos toinen seuraavista ehdoista toteutuu:

jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim} = 80\ \%$ *(kun piiloon jäävä sivu hitsataan paarteeseen)*

jos $h_1 < b_1$ *tai* $h_2 < b_2$

$\Rightarrow$ *nyt kumpikaan em. ehdoista ei toteudu, joten uumasauvojen leikkautuminen ei muodostu kriittiseksi.*

Kun paarteena on neliön- tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki, limitetyn liitoksen tapauksessa lasketaan aina ensin limittävän (eli päällä olevan) sauvan kestävyys (ks. taulukko 11.3.3):

Uumasauva 1 (= limittävä uumasauva):

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Nyt $50\ \% \leq \lambda_{ov} < 80\ \%$*, joten tehollisesksi leveydeksi saadaan:*

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{180/8} \cdot \frac{420 \cdot 8}{420 \cdot 6} \cdot 140 = 83\ mm \leq b_1 = 140\ mm$$

$$b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{140/6} \cdot \frac{420 \cdot 6}{420 \cdot 6} \cdot 140 = 60\ mm \leq b_1 = 140\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y1} t_1 \cdot (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$
$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 6 \cdot (83 + 60 + 2 \cdot 140 - 4 \cdot 6)/1,0 = 904,9\ kN \geq N_{1.Ed} \quad OK$$

Uumasauva 2 (= limitetty uumasauva):

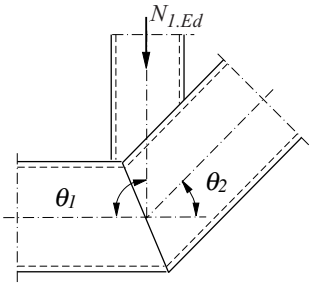
Limitetyn uumasauvan kestävyys saadaan asettamalla sen hyväksikäyttöaste samaksi kuin limittävällä uumasauvalla:

$$N_{2.Rd} = \frac{A_2 \cdot f_{y2}}{A_1 \cdot f_{y1}} \cdot N_{1.Rd} = \frac{3123 \cdot 420}{3123 \cdot 420} \cdot 904,9 = 904,9\ kN \geq N_{2.Ed} \quad OK$$

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristetun sauvan (limittävä uumasauva 1) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 849,9 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 6,5 %.

Esimerkki 3.6
Ristikon alanurkan liitos (taulukko 11.3.14 => 11.3.3).



Ristikon alanurkan liitos

Ristikon alanurkan kestävyys voidaan laskea limitetyn liitoksen kaavoilla, jolloin alapaarteen kuvitellaan jatkuvan suorana ilman taitosta (ks. alempi kuva).

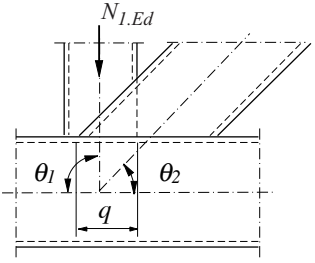
Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:

Paarre: $120 \times 120 \times 6$
$A_0 = 2643\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauva: $100 \times 100 \times 5$
$A_1 = 1836\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 90°$
$\theta_2 = 45°$

$N_{1.Ed} = 500\ kN$ *(puristusta)*
$N_{0.l.Ed} = 500\ kN$ *(vetoa, vasen paarre)*
$N_{0.r.Ed} = 707\ kN$ *(vetoa, oikea paarre)*



Laskennassa käytetty malli

Tehdään liitos niin, että epäkeskeisyys $e = 0$.

Jotta epäkeskeisyydeksi saadaan haluttu $e = 0$, *tarvitaan limitys (= negatiivinen vapaaväli) jonka suuruus voidaan laskea vapaavälin kaavasta asettamalla siinä epäkeskeisyyden arvoksi* $e = 0$.

Tällöin limitykseksi saadaan (kaava 3.5):

$$q = -\left[\left(e + \frac{h_0}{2}\right)\frac{\sin(\theta_1 + \theta_2)}{\sin\theta_1 \sin\theta_2} - \frac{h_1}{2\sin\theta_1} - \frac{h_2}{2\sin\theta_2}\right]$$

$$= -\left[\left(0 + \frac{120}{2}\right)\frac{\sin(90 + 45)}{\sin 90 \sin 45} - \frac{100}{2\sin 90} - \frac{120}{2\sin 45}\right] = (-)74,9\ mm$$

Limityksen suhteellinen arvo λ_{ov} *on (kuva 3.3):*

$$p = h_1 / \sin\theta_1 = 100 / \sin 90 = 100\ mm$$

$$\lambda_{ov} = (q/p) \cdot 100\ \% = (74,9/100) \cdot 100\ \% = 74,9\ \% \geq 25\ \% \quad OK$$

Uumasauvojen leikkautuminen irti paarteesta:
Kyseinen murtumismuoto pitää tarkastaa jos toinen seuraavista ehdoista toteutuu:

jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim} = 80\ \%$ *(kun piiloon jäävä sivu hitsataan paarteeseen)*

jos $h_1 < b_1$ *tai* $h_2 < b_2$

$\Rightarrow$ *nyt kumpikaan em. ehdoista ei toteudu, joten uumasauvojen leikkautuminen ei muodostu kriittiseksi.*

Kun paarteena on neliön- tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki, limitetyn liitoksen tapauksessa lasketaan aina ensin limittävän (eli päällä olevan) sauvan kestävyys (ks. taulukko 11.3.3):

Uumasauva 1 (= limittävä uumasauva):

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Nyt 50 % ≤ λ_{ov} < 80 %, joten tehollisesksi leveydeksi saadaan:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{120/6} \cdot \frac{420 \cdot 6}{420 \cdot 5} \cdot 100 = 60\ mm \le b_1 = 100\ mm$$

$$b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{120/6} \cdot \frac{420 \cdot 6}{420 \cdot 5} \cdot 100 = 60\ mm \le b_1 = 100\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y1} t_1 \cdot (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 5 \cdot (60+60+2 \cdot 100 - 4 \cdot 5)/1,0 = 567,0\ kN \ge N_{1.Ed} = 500\ kN \quad OK$$

Uumasauva 2 (= limitetty uumasauva):

Limitetyn uumasauvan kestävyys saadaan asettamalla sen hyväksikäyttöaste samaksi kuin limittävällä uumasauvalla:

$$N_{2.Rd} = \frac{A_2 \cdot f_{y2}}{A_1 \cdot f_{y1}} \cdot N_{1.Rd} = \frac{2643 \cdot 420}{1836 \cdot 420} \cdot 567,0 = 816,2\ kN \ge N_{0.r.Ed} = 700\ kN \quad OK$$

Liitoksen kestävyys:
Todellisen liitoksen kestävyyden määrää siis uumasauvan kestävyys:
$N_{1.Rd}$ = 567,0 kN ≥ $N_{1.Ed}$ OK

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteiden poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristetun sauvan (uumasauva) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 532,5 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 6,5 %.

3.1.2 Pyöreiden uumasauvojen liitos pyöreään paarteeseen

Pyöreän uumasauvan liitos pyöreään paarteeseen lasketaan liitteen 11.3 taulukoiden mukaisesti. Pyöreistä rakenneputkista valmistetuissa ristikoissa noudatetaan muuten samoja laskentaperiaatteita kuin kohdassa 3.1.1 neliön ja suorakaiteen muotoisilla putkilla.

Puristetun uumasauvan ja paarteen tulee täyttää poikkileikkausluokkien 1 tai 2 vaatimukset [4,5,6].

Jos kyseessä on vapaavälinen N-, K- tai KT-liitos, vapaavälin g (kuva 3.3) tulee toteuttaa seuraava ehto [4,5,6,13]:

$$g \geq t_1 + t_2 \qquad (3.14)$$

missä t_i on uumasauvan seinämänpaksuus

Paarteen normaalivoima ja taivutusmomentti vaikuttavat paarteen pinnan kestävyyteen. Tämä riippuvuus lasketaan pyöreistä putkista tehtyjen paarteiden tapauksessa parametrin n_p avulla (vrt. parametri n kohdassa 3.1.1):

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} \qquad (3.15)$$

missä $N_{p.Ed} = N_{0.Ed} - \Sigma N_{i.Ed} \cos\theta_i$

$N_{0.Ed}$ on paarteessa vaikuttava itseisarvoltaan suurin normaalivoima (ks. kuva 3.2)

$N_{i.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava normaalivoima (ks. kuva 3.2)

θ_i on uumasauvan ja paarteen välinen kulma

A_0 on paarteen poikkileikkauksen pinta-ala (liite 11.1)

$M_{0.Ed}$ on paarteessa vaikuttava taivutusmomentti (ks. kuva 3.2)

$W_{el.0}$ on paarteen kimmoteorian mukainen taivutusvastus (liite 11.1)

f_{y0} on paarteen nimellinen myötölujuus

γ_{M5} on rakenneputkien ristikkoliitosten osavarmuusluku (taulukko 2.5)

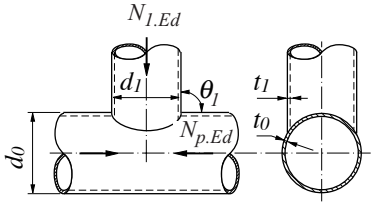
Liitosten kestävyys lasketaan esimerkeissä 3.7 - 3.10 liitteen 11.3 taulukoiden mukaisesti. Liitoksen kestävyys lasketaan kestävyystaulukoissa erilaisilla murtomalleilla, joista valitaan pienin arvo liitoksen lopulliseksi kestävyydeksi. Rakenneputkien ristikkoliitosten laskennassa käytetään liitosten kestävyydelle osavarmuuslukua γ_{M5} (ks. taulukko 2.5), jolle on käytetty Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaista suositusarvoa γ_{M5} = 1,0.

Taulukoita käytettäessä on tarkastettava, että ristikon sauvat ja liitoksen geometria toteuttavat taulukoissa esitetyt vaatimukset. Liitoksen voimassaoloehdot ovat voimassa esimerkeissä 3.7 - 3.10, mutta niiden tarkastamista ei ole esitetty tässä yhteydessä.

Teräslaji on kaikissa esimerkeissä SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Seuraavissa esimerkeissä mitoitus on suoritettu lujuusluokan S420 mukaan, ellei tapauskohtaisesti toisin ole sanottu.

Liitteen 11.3 taulukoissa ja esimerkeissä 3.7 - 3.10 on oletettu, että rakenneputkien ristikkoliitoksen osavarmuusluvun γ_{M5} arvo on Eurocoden suositusarvon ja Suomen kansallisen liitteen mukaisesti γ_{M5} = 1,0. Muiden maiden maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex). Liitteen 11.3 laskentataulukot soveltuvat teräslajeille, joiden myötölujuus on enintään f_y = 460 N/mm^2. Käytettäessä teräslajeja joiden myötölujuus on yli f_y = 355 N/mm^2, liitoskestävyydet on kerrottava taulukon 3.1 mukaisella korjauskertoimella.

Esimerkki 3.7
T-liitos (taulukko 11.3.4)



Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:

Paarre: 219,1×10
$A_0 = 6569\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauva: 168,3×5
$A_1 = 2565\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 90°$

$N_{1.Ed} = 550\ kN$ *(puristusta)*
$N_{p.Ed} = 1020\ kN$ *(puristusta)*

Paarteen pinnan normaalijännitys $\sigma_{0.Ed}$ *vaikuttaa liitoksen kestävyyteen termin* k_p *muodossa:*

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{1020 \cdot 10^3}{6569 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,3697$$

$$k_p = 1,0 - 0,3|n_p| - 0,3n_p^2 = 1,0 - 0,3 \cdot 0,3697 - 0,3 \cdot 0,3697^2 = 0,8481 \le 1,0$$

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} = \frac{168,3}{219,1} = 0,7681$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{219,1}{2 \cdot 10} = 10,96$$

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:
Paarteen pinnan myödön suhteen laskettu liitoksen kestävyys on:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1} \cdot (2,8 + 14,2\beta^2)/\gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{10,96^{0,2} \cdot 0,8481 \cdot 420 \cdot 10^2}{\sin 90} \cdot (2,8 + 14,2 \cdot 0,7681^2)/1,0 = 578,4\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska $d_1 = 168,3\ mm \le d_0 - 2t_0 = 199,1\ mm$*:*

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \left(\frac{1+\sin\theta_1}{2\sin^2\theta_1} \right) / \gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 168,3 \cdot \left(\frac{1+\sin 90}{2\sin^2 90} \right) / 1,0 = 1154\ kN$$

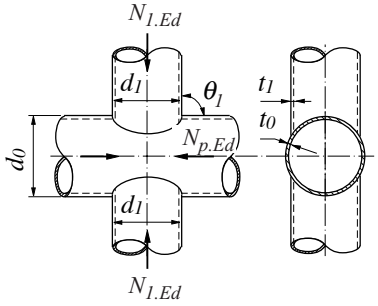
Liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyyden määrää siis uumasauvan murtuminen myötäämällä, jolloin:
$N_{1.Rd} = 578{,}4\ kN \geq N_{1.Ed}$ *OK*

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauva ja paarre) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 519,7 kN < $N_{1.Ed}$, eli liitos ei kestä. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 11 %.

Esimerkki 3.8
X-liitos (taulukko 11.3.4)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:



Paarre: 219,1×10
$A_0 = 6569\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauvat: 193,7×6
$A_1 = 3538\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 90°$

$N_{1.Ed} = 550\ kN$ *(puristusta)*
$N_{p.Ed} = 1020\ kN$ *(puristusta)*

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{1020 \cdot 10^3}{6569 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,3697$$

$$k_p = 1,0 - 0,3|n_p| - 0,3 n_p^2 = 1,0 - 0,3 \cdot 0,3697 - 0,3 \cdot 0,3697^2 = 0,8481 \leq 1,0$$

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} = \frac{193,7}{219,1} = 0,8841$$

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:
Paarteen pinnan myödön suhteen laskettu liitoksen kestävyys on:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_p f_{y0} t_0^2}{\sin\theta_1}\left(\frac{5,2}{1-0,81\beta}\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{0,8481 \cdot 420 \cdot 10^2}{\sin 90}\left(\frac{5,2}{1-0,81 \cdot 0,8841}\right)/1,0 = 587,2\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska
$d_1 = 193,7\ mm \le d_0 - 2t_0 = 199,1\ mm$:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \left(\frac{1+\sin\theta_1}{2\sin^2\theta_1} \right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

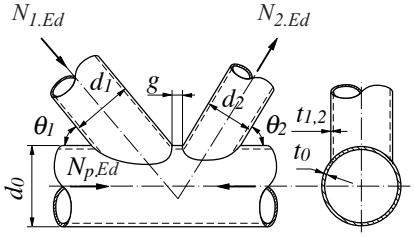
$$= 0,9 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 193,7 \cdot \left(\frac{1+\sin 90}{2\sin^2 90} \right) / 1,0 = 1328\ kN$$

Liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyyden määrää siis uumasauvan murtuminen myötäämällä, jolloin:
$N_{1.Rd} = 587,2\ kN \ge N_{1.Ed}$ *OK*

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauvat ja paarre) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin 527,6 kN < $N_{1.Ed}$, eli liitos ei kestä. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kestävyyttä tässä noin 11 %.

Esimerkki 3.9
Vapaavälinen K-liitos (taulukko 11.3.5)



Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:

Paarre: 219,1×10
$A_0 = 6569\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauvat:
168,3×5 (puristettu sauva)
$A_1 = 2565\ mm^2$ *(liite 11.1)*

139,7×5 (vedetty sauva)
$A_2 = 2116\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 50°$
$\theta_2 = 60°$
$g = 25\ mm$

$N_{1.Ed} = 600\ kN$ *(puristusta)*
$N_{2.Ed} = 530,7\ kN$ *(vetoa)*
$N_{p.Ed} = 636,4\ kN$ *(puristusta)*

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{636,4 \cdot 10^3}{6569 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,2307$$

$$k_p = 1,0 - 0,3|n_p| - 0,3n_p^2 = 1,0 - 0,3 \cdot 0,2307 - 0,3 \cdot 0,2307^2 = 0,9148 \le 1,0$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{219,1}{2 \cdot 10} = 10,96$$

Tarkastetaan liitoksen vapaavälin ehdot:
$g = 25\ mm \ge t_1 + t_2 = 5 + 5 = 10\ mm$ *OK*
$\Rightarrow$ *liitoksen vapaaväli on sallituissa rajoissa*

Tarkastetaan liitoksen epäkeskeisyys (kaava (3.6)) ja epäkeskeisyyden sallitut raja-arvot (ehto (3.8)):

$$e = \left(\frac{d_1}{2\sin\theta_1} + \frac{d_2}{2\sin\theta_2} + g\right)\frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{d_0}{2}$$

$$= \left(\frac{168,3}{2\sin 50} + \frac{139,7}{2\sin 60} + 25\right)\frac{\sin 50 \sin 60}{\sin(50+60)} - \frac{219,1}{2} = 42,6\ mm$$

$-0,55d_0 = -120,5\ mm \le e = 42,6\ mm \le 0,25d_0 = 54,8\ mm$ *OK*
$\Rightarrow$ *liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa*

Uumasauva 1 (= puristettu uumasauva):

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + e^{\left(\frac{g}{2t_0} - 1,33\right)}}\right) = 10,96^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \cdot 10,96^{1,2}}{1 + e^{\left(\frac{25}{2 \cdot 10} - 1,33\right)}}\right) = 1,971$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1}\left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{d_1}{d_0}\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,971 \cdot 0,9148 \cdot 420 \cdot 10^2}{\sin 50}\left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{168,3}{219,1}\right)/1,0 = 857,2\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska
$d_1 = 168,3\ mm \le d_0 - 2t_0 = 199,1\ mm$*:*

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_1 \left(\frac{1 + \sin\theta_1}{2\sin^2\theta_1}\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 168,3 \cdot \left(\frac{1 + \sin 50}{2\sin^2 50}\right)/1,0 = 1736\ kN$$

Puristetun uumasauvan kestävyyden määrää tässä siis paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, jolloin:
$N_{1.Rd} = 857{,}2\ kN \geq N_{1.Ed}$ *OK*

Uumasauva 2 (= vedetty uumasauva):

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:
Kestävyys lasketaan puristetun uumasauvan kyseisen kestävyyden avulla:

$$N_{2.Rd} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \cdot N_{1.Rd} = \frac{\sin 50}{\sin 60} \cdot 857,2 = 758,2\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska
$d_2 = 139{,}7\ mm \leq d_0 - 2t_0 = 199{,}1\ mm$*:*

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_2 \left(\frac{1+\sin\theta_2}{2\sin^2\theta_2} \right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 139,7 \cdot \left(\frac{1+\sin 60}{2\sin^2 60} \right) / 1,0 = 1192\ kN$$

Vedetyn uumasauvan kestävyyden määrää tässä siis samaten paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, jolloin:
$N_{2.Rd} = 758{,}2\ kN \geq N_{2.Ed}$ *OK*

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (paarre ja uumasauva 1) nurjahduskestävyys.*

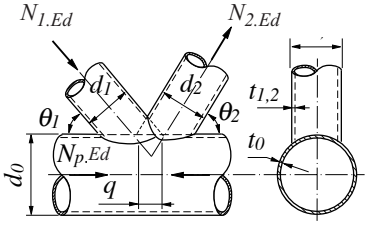
Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyyden määräisi edelleen paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, minkä suhteen kestävyydeksi saataisiin puristetulle uumasauvalle 788,4 kN ja vedetylle uumasauvalle 697,4 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoskestävyyttä kummankin uumasauvan osalta tässä noin 9 %.

Esimerkki 3.10
Limitetty K-liitos (taulukko 11.3.6)

Liitoksen geometria ja kuormitus ovat seuraavat:

Paarre: 219,1×10
$A_0 = 6569\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauvat: 139,7×5



$A_1 = A_2 = 2116\ mm^2$ *(liite 11.1)*

$\theta_1 = 40°$
$\theta_2 = 50°$
$q = -g = 85$ *mm (limitys)*

$N_{1.Ed} = 600$ *kN (puristusta)*
$N_{2.Ed} = 503{,}5$ *kN (vetoa)*
$N_{p.Ed} = 636{,}4$ *kN (puristusta)*

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{636,4 \cdot 10^3}{6569 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,2307$$

$$k_p = 1,0 - 0,3|n_p| - 0,3n_p^2 = 1,0 - 0,3 \cdot 0,2307 - 0,3 \cdot 0,2307^2 = 0,9148 \le 1,0$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{219,1}{2 \cdot 10} = 10,96$$

Tarkastetaan liitoksen epäkeskeisyyden ehdot:

$$e = \left(\frac{d_1}{2\sin\theta_1} + \frac{d_2}{2\sin\theta_2} + g\right)\frac{\sin\theta_1 \sin\theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{d_0}{2}$$

$$= \left(\frac{139,7}{2\sin 40} + \frac{139,7}{2\sin 50} + (-85)\right)\frac{\sin 40 \sin 50}{\sin(40+50)} - \frac{219,1}{2} = -53,0\ mm$$

$-0{,}55d_0 = -120{,}5\ mm \le e = -53{,}0\ mm \le 0{,}25d_0 = 54{,}8\ mm$ *OK*
$\Rightarrow$ *liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa*

Limityksen suhteellinen arvo λ_{ov} *on (kuva 3.3):*

$p = d_2/\sin\theta_2 = 139,7/\sin 50 = 182,4$ *mm*
$\lambda_{ov} = (q/p) \cdot 100\ \% = (85/182,4) \cdot 100\ \% = 46{,}6\ \% \ge 25\ \%$ *OK*

Uumasauvojen leikkautuminen irti paarteesta:
Kyseinen murtumismuoto pitää tarkastaa jos toinen seuraavista ehdoista toteutuu:

jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim} = 80\ \%$ *(kun piiloon jäävä sivu hitsataan paarteeseen)*

jos $h_1 < b_1$ *tai* $h_2 < b_2$ *(koskee vain suorakaiteen muotoisia putkia)*

$\Rightarrow$ *nyt kumpikaan em. ehdoista ei toteudu, joten uumasauvojen leikkautuminen ei muodostu kriittiseksi.*

<u>Kun paarteena on pyöreä rakenneputki</u>, limitetyn liitoksen tapauksessa lasketaan aina ensin limitetyn (eli alla olevan) sauvan kestävyys (ks. taulukko 11.3.6):

Uumasauva 1 (= limitetty uumasauva):

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \cdot \gamma^{1,2}}{1 + e^{\left(\frac{-q}{2t_0} - 1,33\right)}} \right) = 10,96^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \cdot 10,96^{1,2}}{1 + e^{\left(\frac{-85}{2 \cdot 10} - 1,33\right)}} \right) = 2,297$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1} \left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5} \qquad \textit{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{2,297 \cdot 0,9148 \cdot 420 \cdot 10^2}{\sin 40} \left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{139,7}{219,1} \right) / 1,0 = 1026\ kN \geq N_{1.Ed} \quad OK$$

Uumasauva 2 (= limittävä uumasauva):

Kestävyys lasketaan limitetyn uumasauvan kestävyyden avulla:

$$N_{2.Rd} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \cdot N_{1.Rd} = \frac{\sin 40}{\sin 50} \cdot 1026 = 860,9\ kN \geq N_{2.Ed} \quad OK$$

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvojen ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (paarre ja uumasauva 1) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyyden määräisi edelleen paarteen pinnan murtuminen myötäämällä, minkä suhteen kestävyydeksi saataisiin puristetulle uumasauvalle 943,6 kN ja vedetylle uumasauvalle 791,8 kN. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoskestävyyttä kummankin uumasauvan osalta tässä noin 9 %.

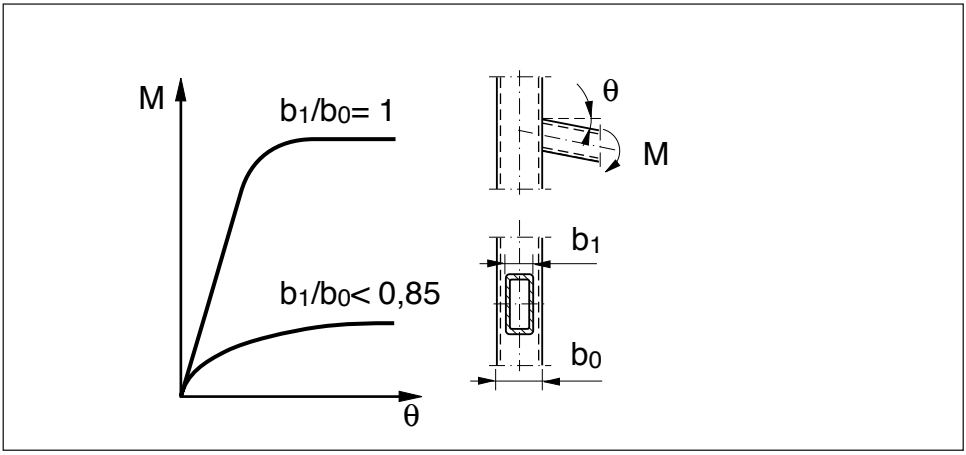
3.1.3 Pyöreiden sekä neliön ja suorakaiteen muotoisten uumasauvojen liitos I-profiilista valmistettuun paarteeseen

Liitoksien mitoitus tapahtuu samalla periaatteella kuin kohdassa 3.1.1, mutta nyt käytetään liitteen 11.3 taulukoita 11.3.7 ja 11.3.8.

3.2 Kehärakenteiden hitsatut liitokset

Kehärakenteiden liitoksissa on sekä taivutusmomenttia että aksiaalista kuormitusta. Liitoksen jäykkyys vaikuttaa liitosmomentin suuruuteen ja liitosmomentti vaikuttaa liitoksen jäykkyyteen, joten lopullisen voimasuurejakauman selvittämiseksi pitäisi laskenta suorittaa iteratiivisesti. Yleensä varmalla puolella oleva menetelmä on mallintaa rakenteen kaikki liitokset ensin täysin nivelellisinä, jolloin saadaan maksimi kenttämomentit, ja sitten täysin jäykkinä, jolloin saadaan liitosten ja niiden kautta viereisille rakenneosille siirtyvien rasitusten maksimi arvot. Liitteessä 11.4 on annettu ohjeet liitoksen jäykkyyden arvioimiseksi, kun rakenneputket ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia.

Kuvassa 3.5 on esitetty kehäliitoksen momentti-kiertymäkuvaaja. Käyrän jyrkkyys kuvaa liitoksen jäykkyyttä, joka riippuu palkin leveyden suhteesta pilarin leveyteen ja liitososien seinämän paksuudesta. Mitä suurempi on b_1/b_0-suhde ja seinämän paksuus, sitä jäykempi on liitos.



Kuva 3.5 Kehäliitoksen jäykkyys

3.2.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien taivutuskuormitetut liitokset

Liitteen 11.3 taulukossa 11.3.11 on esitty laskentakaavat neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien liitoksille, kun niitä kuormittaa taivutusmomentti ristikon tasossa (in-plane, M_{ip}) tai ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa (out-of-plane, M_{op}).

Samanaikaisen taivutuksen ja normaalivoiman kuormittamat uumasauvojen liitokset paarteeseen mitoitetaan seuraavalla yhteisvaikutusehdolla [4,5,6]:

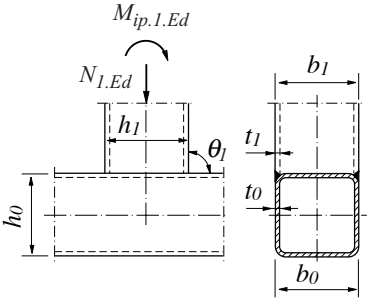
$$\frac{N_{1.Ed}}{N_{1.Rd}} + \frac{M_{ip.1.Ed}}{M_{ip.1.Rd}} + \frac{M_{op.1.Ed}}{M_{op.1.Rd}} \leq 1,0 \qquad (3.16)$$

missä
- $N_{1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava normaalivoima
- $N_{1.Rd}$ on uumasauvan liitoskestävyys normaalivoimalle kohdan 3.1.1 mukaisesti
- $M_{ip.1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava taivutusmomentti ristikon tasossa
- $M_{ip.1.Rd}$ on uumasauvan liitoksen taivutuskestävyys ristikon tasossa (liite 11.3)
- $M_{op.1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava taivutusmomentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa
- $M_{op.1.Rd}$ on uumasauvan liitoksen taivutuskestävyys ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa (liite 11.3)

Sisäisen momentin mitoitusarvo $M_{1.Ed}$ voidaan määrittää kohdasta, missä uumasauvan keskilinja leikkaa paarresauvan pinnan [4,5,6].

Yhteisvaikutuksen lisäksi on tarkastettava erikseen liitoksen kestävyys pelkälle normaalivoimalle (kohta 3.1.1) ja pelkälle taivutusmomentille (liitteen 11.3 taulukko 11.3.11).

Esimerkki 3.11
Puristettu ja taivutettu T-liitos
(taulukot 11.3.1 ja 11.3.11)



Liitoksen sauvat ja kuormat ovat seuraavat:

Paarre: $150\times150\times6$
$A_0 = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauva: $150\times150\times6$
$A_1 = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$W_{pl.1} = 179{,}9\cdot10^3\ mm^3$ *(liite 11.1)*

Kuormat:
$M_{ip.1.Ed} = 15\ kNm$
$N_{1.Ed} = 150\ kN$ *(puristusta)*

$\beta = b_1 / b_0 = 150/150 = 1{,}0$

Liitoksen taivutuskestävyys (taulukko 11.3.11):

Paarteen uuman murtuminen myötäämällä:
Koska $\beta = 1{,}0$*, lasketaan paarteen uuman murtuminen myötäämällä:*
T-liitos: $f_{yk} = f_{y0}$

$$M_{ip.1.Rd} = 0{,}9\cdot0{,}5 f_{yk} t_0 (h_1 + 5t_0)^2 / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$
$$= 0{,}9\cdot0{,}5\cdot420\cdot6\cdot(150+5\cdot6)^2/1{,}0 = 36{,}7\ kNm$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Koska $\beta = 1{,}0$*, on laskettava myös uumasauvan murtuminen myötäämällä:*

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0}\cdot\frac{f_{y0}\cdot t_0}{f_{y1}\cdot t_1}\cdot b_1 = \frac{10}{150/6}\cdot\frac{420\cdot6}{420\cdot6}\cdot150 = 60\ mm \le b_1 = 150\ mm$$

$$M_{ip.1.Rd} = 0{,}9\cdot f_{y1}\cdot\left[W_{pl.1} - \left(1-\frac{b_{eff}}{b_1}\right) b_1 (h_1 - t_1)\, t_1\right]/\gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$
$$= 0{,}9\cdot420\cdot\left[179{,}9\cdot10^3 - \left(1-\frac{60}{150}\right)\cdot150\cdot(150-6)\cdot6\right]/1{,}0 = 38{,}6\ kNm$$

Liitoksen taivutuskestävyys on pienin edellisistä eli
$M_{ip.1.Rd} = 36{,}7\ kNm \ge M_{ip.1.Ed}$ *OK*

Liitoksen puristuskestävyys (taulukko 11.3.1):

Uumasauvan puristuskestävyys liitoksessa lasketaan kohdan 3.1.1 mukaisesti. Koska uumasauva ja paarre ovat tasalevyisiä (eli β = 1,0), tarkastetaan uumasauvan murtuminen myötäämällä ja paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen:

Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen:
Lasketaan ensin lommahdusjännitys käyttäen nurjahdusluokkaa c:

$$\bar{\lambda} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin\theta_1}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}} = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{150}{6} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin 90}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{2,1 \cdot 10^5}{420}}} = 1,133$$

$$\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] = 0,5 \cdot [1 + 0,49 \cdot (1,133 - 0,2) + 1,133^2] = 1,370$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} = \frac{1}{1,370 + \sqrt{1,370^2 - 1,133^2}} = 0,4672 \le 1,0$$

T-liitos:

$$f_b = \chi \cdot f_{y0} = 0,4672 \cdot 420 = 196,2 \text{ N/mm}^2$$

Koska paarteeseen ei kohdistu uumasauvan kuormitusten lisäksi muita voimasuureita, saadaan:

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = 0 + 0 = 0$$

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} = 1,3 - 0 = 1,3 \quad \text{mutta } k_n \le 1,0 \quad \Rightarrow k_n = 1,0$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n f_b t_0}{\sin\theta_1}\left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + 10t_0\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,0 \cdot 196,2 \cdot 6}{\sin 90}\left(\frac{2 \cdot 150}{\sin 90} + 10 \cdot 6\right)/1,0 = 381,4 \text{ kN}$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{150/6} \cdot \frac{420 \cdot 6}{420 \cdot 6} \cdot 150 = 60 \text{ mm} \le b_1 = 150 \text{ mm}$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff})/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 6 \cdot (2 \cdot 150 - 4 \cdot 6 + 2 \cdot 60)/1,0 = 898,1 \text{ kN}$$

Liitoksen puristuskestävyys on pienin edellä lasketuista arvoista
$N_{1.Rd} = 381,4 \text{ kN} \ge N_{1.Ed}$ *OK*

Liitoksen yhteisvaikutusehto:

$$\frac{N_{1.Ed}}{N_{1.Rd}} + \frac{M_{ip.1.Ed}}{M_{ip.1.Rd}} + \frac{M_{op.1.Ed}}{M_{op.1.Rd}} = \frac{150}{381,4} + \frac{15}{36,7} + 0 = 0,8020 \leq 1,0 \quad OK$$

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauva) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa tulokseksi (S420: 0,8020 →) S355: 0,8137. Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 ei tässä esimerkissä juurikaan paranna liitoksen kokonaiskestävyyttä.

3.2.2 Pyöreiden rakenneputkien taivutuskuormitetut liitokset

Liitteen 11.3 taulukossa 11.3.12 on esitty laskentakaavat pyöreiden rakenneputkien liitoksille, kun niitä kuormittaa taivutusmomentti ristikon tasossa tai ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa.

Samanaikaisen taivutuksen ja normaalivoiman kuormittamat uumasauvojen liitokset paarteeseen mitoitetaan seuraavalla yhteisvaikutusehdolla (vrt. edellä neliön- ja suorakaiteen muotoiset) [4,5,6]:

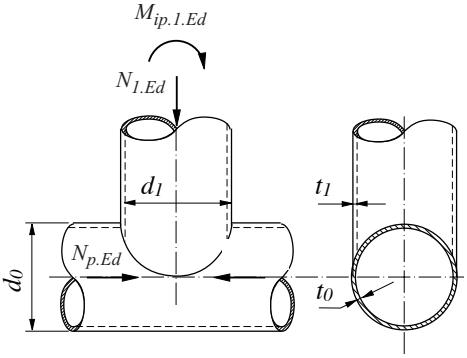
$$\frac{N_{1.Ed}}{N_{1.Rd}} + \left[\frac{M_{ip.1.Ed}}{M_{ip.1.Rd}}\right]^2 + \frac{M_{op.1.Ed}}{M_{op.1.Rd}} \leq 1,0 \qquad (3.17)$$

missä
- $N_{1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava normaalivoima
- $N_{1.Rd}$ on uumasauvan liitoskestävyys normaalivoimalle kohdan 3.1.2 mukaisesti
- $M_{ip.1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava taivutusmomentti ristikon tasossa
- $M_{ip.1.Rd}$ on uumasauvan liitoksen taivutuskestävyys ristikon tasossa (liite 11.3)
- $M_{op.1.Ed}$ on uumasauvassa vaikuttava taivutusmomentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa
- $M_{op.1.Rd}$ on uumasauvan liitoksen taivutuskestävyys ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa (liite 11.3)

Sisäisen momentin mitoitusarvo $M_{1.Ed}$ voidaan määrittää kohdasta, missä uumasauvan keskilinja leikkaa paarresauvan pinnan [4,5,6].

Yhteisvaikutuksen lisäksi on tarkastettava erikseen liitoksen kestävyys pelkälle normaalivoimalle (kohta 3.1.2) ja pelkälle taivutusmomentille (liitteen 11.3 taulukko 11.3.12).

Esimerkki 3.12
Puristettu ja taivutettu T-liitos
(taulukot 11.3.4 ja 11.3.12)



Liitoksen sauvat ja kuormat ovat seuraavat:

Paarre: 219,1×5
$A_0 = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Uumasauva: 219,1×5
$A_1 = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*

Kuormat:
$M_{ip.1.Ed} = 33\ kNm$
$N_{1.Ed} = 100\ kN$ *(puristusta)*
$N_{p.Ed} = 300\ kN$ *(puristusta)*

$\theta_1 = 90°$
$\beta = d_1 / d_0 = 219,1 / 219,1 = 1,0$
$\gamma = 0,5 d_0 / t_0 = 0,5 \cdot 219,1 / 5 = 21,91$

Lasketaan ensin paarteen pinnan normaalijännityksen $\sigma_{0.Ed}$ *vaikutus:*

$$n_p = \frac{\sigma_{p.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{300 \cdot 10^3}{3363 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,2124$$

$$k_p = 1,0 - 0,3|n_p| - 0,3 n_p^2 = 1,0 - 0,3 \cdot 0,2124 - 0,3 \cdot 0,2124^2 = 0,9227 \le 1,0$$

Liitoksen taivutuskestävyys (taulukko 11.3.12):

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$M_{ip.1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{4,85 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin\theta_1} \cdot \beta/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{4,85 \cdot \sqrt{21,91} \cdot 0,9227 \cdot 420 \cdot 5^2 \cdot 219,1}{\sin 90} \cdot 1,0/1,0 = 43,4\ kNm$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautumiskestävyyttä ei tarvitse laskea koska
$d_1 = 219,1\ mm > d_0 - 2t_0 = 219,1 - 2 \cdot 5 = 209,1\ mm.$

Liitoksen taivutuskestävyys on siten
$M_{ip.1.Rd} = 43,4\ kNm \ge M_{ip.1.Ed}$ *OK*

Liitoksen puristuskestävyys (taulukko 11.3.4):

Uumasauvan puristuskestävyys liitoksessa lasketaan kohdan 3.1.2 mukaisesti.
Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1} \cdot (2,8 + 14,2\,\beta^2)/\gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{21,91^{0,2} \cdot 0,9227 \cdot 420 \cdot 5^2}{\sin 90}(2,8 + 14,2 \cdot 1,0^2)/1,0 = 274,8\ kN$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautumiskestävyyttä ei tarvitse laskea koska
$d_1 = 219,1\ mm > d_0 - 2t_0 = 219,1 - 2 \cdot 5 = 209,1\ mm.$

Liitoksen puristuskestävyys on siten paarteen pinnan määräämänä
$N_{1.Rd} = 274,8\ kN \geq N_{1.Ed}$ *OK*

Liitoksen yhteisvaikutusehto:

$$\frac{N_{1.Ed}}{N_{1.Rd}} + \left[\frac{M_{ip.1.Ed}}{M_{ip.1.Rd}}\right]^2 + \frac{M_{op.1.Ed}}{M_{op.1.Rd}} = \frac{100}{274,8} + \left[\frac{33}{43,4}\right]^2 + 0 = 0,9421 \leq 1,0 \quad OK$$

Edellä suoritetun liitoksen kestävyystarkastelun lisäksi tulee tarkastaa erikseen:
- *liitoksen hitsit sekä*
- *uumasauvan ja paarteen poikkileikkauksen kestävyys ja*
- *puristettujen sauvojen (uumasauva ja paarre) nurjahduskestävyys.*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, saataisiin (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa tulokseksi (S420: 0,9421 →) S355: 1,075 > 1,0, eli liitos ei kestä. Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa liitoksen kokonaiskestävyyttä tässä noin 14 %.

3.3 Hitsien mitoitus

3.3.1 Yleistä

Työmaalla tehtäviä hitsejä pitäisi välttää mahdollisuuksien mukaan, koska hitsaaminen on hankalampaa asennustyömaalla kuin konepajassa. Lisäksi hitsauksen laadunvarmistus onnistuu konepajassa helpommin.

Tässä esitetyt ohjeet perustuvat Eurocoden osaan EN 1993-1-8, jossa esitetyt säännöt pätevät käytettäessä yleisiä lisäaineellisia kaarihitsausmenetelmiä (esim. puikkohitsaus, MIG/MAG-hitsaus, jauhekaarihitsaus) ja kun liitettävien levyjen ainepaksuus on vähintään 4 mm ja rakenneputkien seinämänpaksuus on vähintään 2,5 mm [4,5,6].

Todettakoon, että Eurocoden ohjeet eivät päde laserhitsaukselle.

Käytettävien hitsausaineiden tulee olla Eurocoden osassa EN 1993-1-8 esitettyjen viitestandardien mukaisia. Hitsausaineet tulee valita siten, että niiden myötölujuuden, murtolujuuden, murtovenymän ja Charpy-V iskuenergian minimiarvot vastaavat vähintään hitsattavan perusaineen vastaavia arvoja [4,5,6].

Standardi EN ISO 5817 määrittelee hitsausluokat, joita sovelletaan valmistettaviin hitsausliitoksiin [15]. Hitsausluokkia on kolme, ja ne merkitään tunnuksilla D (tyydyttävä), C (hyvä) tai B (vaativa). Ne perustuvat sallittuihin hitsausvirheisiin, joiden raja-arvot on annettu ao. standardissa (ks. tarkemmin tämän käsikirjan kohta 8.5.1). Vaadittava hitsausluokka määräytyy taulukossa 3.6 esitetyn mukaisesti standardissa EN 1090-2 rakenteelle tai rakenneosalle valitun toteutusluokan perusteella [14]. Taulukossa tarvittavia EXC-toteutusluokkia ja niiden valintaa käsitellään luvussa 8. Yleensä päädytään käyttämään hitsausluokkaa B tai C. Hitsausluokan valinnalla ei ole kuitenkaan vaikutusta hitsien kestävyyden laskentaan.

Taulukko 3.6 Hitsausluokkien määräytyminen standardin EN 1090-2 mukaan [14]

	Toteutusluokka (EN 1090-2)			
	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4
Hitsausluokka [a)]	Luokka D	Luokka C [b)]	Luokka B	Luokka B+ [c)]

a) Standardin EN ISO 5817 mukainen hitsausluokka lukuun ottamatta virhetyyppejä:
- "Jyrkkä liittyminen" (505)
- "Mikroliitosvirhe" (401)

joita ei oteta huomioon.

b) Yleensä hitsausluokka C, paitsi hitsausluokka D seuraaville virhetyypeille:
- "Reunahaava" (5011,5012)
- "Pintapalon valuma" (506)
- "Sytytysjälki" (601)
- "Avoin imuontelo" (2025)

c) Hitsausluokka B, sekä lisävaatimukset EN 1090-2 taulukon 17 mukaisesti.

Hitsien lamellirepeilyä tulee välttää. Lamellirepeilyä käsitellään luvussa 5.

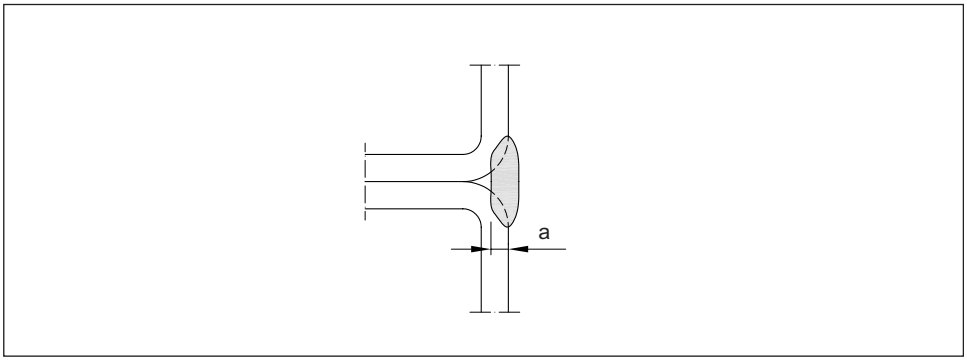
Hitsausliitokset tulee suunnitella siten, että niillä on riittävä muodonmuutoskyky. Liitosten, joihin voi muodostua plastinen nivel, hitsit suunnitellaan siten, että hitseillä on vähintään sama kestävyyden mitoitusarvo kuin heikoimmalla liitettävistä osista. Muissa liitoksissa, joissa vaaditaan mahdollisen venymisen takia muodonmuutoskykyä, hitseiltä vaaditaan riittävää lujuutta jotta ne eivät murru ennen viereisen perusaineen yleistä myötäämistä [4,5,6].

Rakenneputkilla uumasauvojen ja paarresauvojen väliset hitsit mitoitetaan siten, että niillä on riittävä kestävyys, joka sallii epätasaiset jännitysjakaumat ja takaa riittävän muodonmuutoskyvyn taivutusmomenttien uudelleenjakautumiseksi. Uumasauvan poikkileikkauksen piirin yksikköpituutta kohti laskettu hitsin kestävyyden mitoitusarvo ei yleensä saa olla pienempi kuin kyseisen sauvan poikkileikkauksen piirin yksikköpituutta kohti laskettu poikkileikkauksen kestävyyden mitoitusarvo. Tämä vaatimus voidaan jättää huomioon ottamatta, mikäli hitsin pienempi koko voidaan perustella sekä kestävyyden että muodonmuutos- ja kiertymiskyvyn suhteen, ottaen samalla huomioon että vain osa hitsin pituudesta toimii tehollisesti [4,5,6].

3.3.2 Rakenneputken ja kylmämuovatun nurkan hitsaaminen

Rakenneputkien hitsatuissa liitoksissa hitsi kiertää yleensä putken koko piirin ympäri, ja hitsinä käytetään joko päittäishitsiä tai pienahitsiä tai näiden yhdistelmää. Ristikkoliitoksissa hitsityypin valinta suoritetaan uumasauvan ja paarteen välisen astekulman perusteella (ks. luku 8, kuvat 8.15 - 8.18). Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla voidaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan käyttää myös kylkihitsejä, kuva 3.6.

Hitsattavien osien esivalmistelua ja hitsauksen suoritusta käsitellään tarkemmin luvussa 8.

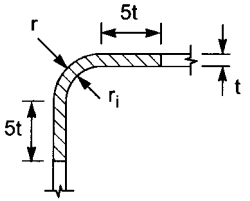


Kuva 3.6 Neliön tai suorakaiteen muotoisen rakenneputken kylkihitsi ja sen suunniteltu paksuus [4,5,6]

Rakenneputken kylmämuovattua nurkkaa ja aluetta $5t$ sen kummallakin puolella saadaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan hitsata, jos taulukossa 3.7 esitetyt vaatimukset toteutuvat. Mikäli taulukon vaatimukset eivät toteudu, kylmämuovatut alueet täytyy normalisoida kylmämuovauksen jälkeen mutta ennen hitsausta [4,5,6].

SSAB:n kylmämuovatut SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät taulukossa 3.7 esitetyt Eurocoden osan EN 1993-1-8 vaatimukset, joten niitä voidaan hitsata ilman hitsausta edeltävää normalisointia.

Taulukko 3.7 Ehdot hitsaamiselle kylmämuovatulla alueella tai sen välittömässä läheisyydessä [4,5,6]



r/t	r_i/t	Kylmämuovauksesta aiheutuva pinnan venymä (%)	Suurin sallittu paksuus a) (mm)
≥26	≥25	≤2	kaikki
≥11	≥10	≤5	kaikki
≥4,0	≥3,0	≤14	24
≥3,0	≥2,0	≤20	12
≥2,5	≥1,5	≤25	10
≥2,0	≥1,0	≤33	6

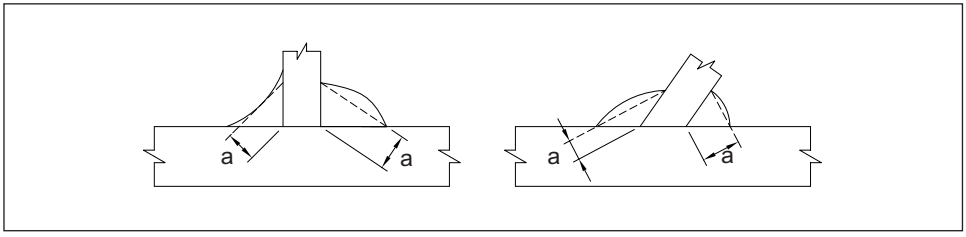
a) Kun käytetään täysin tiivistettyä terästä jonka Al ≥ 0,02 %

Standardin EN 10219:2006 mukaiset kylmämuovatut rakenneputket jotka eivät täytä taulukossa esitettyjä ehtoja, katsotaan täyttävän kyseiset vaatimukset edellyttäen, että kaikki seuraavat ehdot toteutuvat:
- seinämänpaksuus on enintään 12,5 mm
- teräs on alumiinitiivistetty vaatimuksen (a) mukaisesti
- teräslaji on jokin seuraavista: J2H, K2H, MH, MLH, NH tai NLH
- teräksen analyysi toteuttaa seuraavat ehdot: C ≤ 0,18 %
  P ≤ 0,020 %
  S ≤ 0,012 %

3.3.3 Pienahitsit

Pienahitsejä voidaan käyttää osien kiinnittämiseen, jos liitospintojen muodostama kulma on 60 - 120°. Myös pienemmät kulmat kuin 60° ovat sallittuja. Kuitenkin tällöin hitsiä tarkastellaan osittain läpihitsattuna päittäishitsinä (kohta 3.3.4), jolloin hitsin paksuudeksi valitaan enintään se hitsautumissyvyys, joka voidaan saavuttaa säännöllisesti (osoitettava hitsauskokein). Kulman ollessa yli 120° pienahitsin kestävyys tulee määrittää kokeellisesti Eurocoden osassa EN 1990 esitettyjen kokeellisen mitoituksen ohjeiden mukaisesti [4,5,6].

Pienahitsin efektiivinen a-mitta on suurimman kolmion (joko tasakylkinen tai erikylkinen) korkeus, joka voidaan piirtää hitsin kylkien ja hitsin pinnan sisään mitattuna kohtisuorassa suunnassa kyseisen kolmion uloimpaan pintaan nähden, ks. kuva 3.8 [4,5,6]. Yleensä pyritään käyttämään tasakylkisiä pienahitsejä.



Kuva 3.7 Pienahitsin efektiivinen a-mitta [4,5,6]

Voimia siirtävän pienahitsin a-mitaksi tulee valita vähintään 3 mm [4,5,6]:

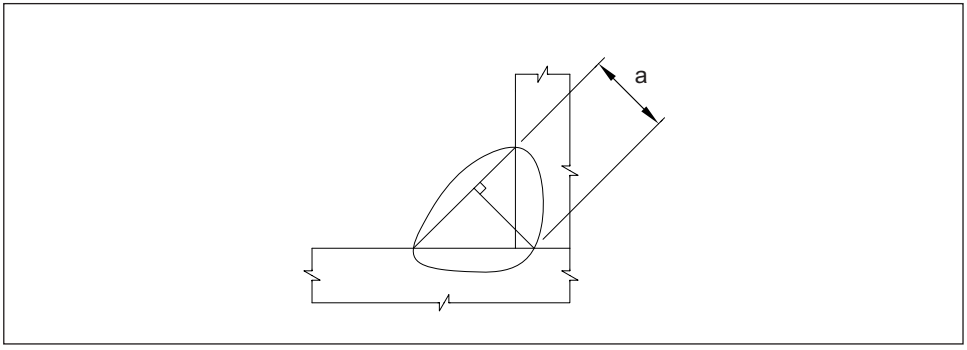
$$a \geq 3\ mm \qquad (3.18)$$

Hitsin kokoon vaikuttavat hitsaustekniset seikat, kun hitsin koko ei määräydy lujuusteknisten vaatimusten perusteella. Hitsin jäähtymisnopeuden kannalta a-mitta ohjeistetaan lähteessä [16] valitsemaan lujuusluokilla S235 - S420 tällöin seuraavasti:

$$a \geq \sqrt{t}\ mm - 0,5\ mm \qquad (3.19)$$

missä t on aineen paksuus (paksumpi liitettävistä levyistä). Jos hitsin a-mitta on kaavan (3.19) mukaista arvoa pienempi, liitettävää osaa on esilämmitettävä.

Suunnittelija merkitsee konepajapiirustuksiin aina laskelmien edellyttämän efektiivisen a-mitan ilman tunkeuman vaikutusta. Mekanisoitua hitsausta käytettäessä konepajassa voidaan harkita tunkeuman hyväksikäyttöä kuvan 3.8 mukaisesti edellyttäen, että hitsauskokein osoitetaan että vaadittu tunkeuma voidaan jatkuvasti saavuttaa käytettävällä hitsausmenetelmällä [4,5,6].



Kuva 3.8 Pienahitsin efektiivinen a-mitta, kun hyödynnetään tunkeumaa [4,5,6]

Pienahitsin tehollisena pituutena l_{eff} käytetään täysikokoisen pienahitsin kokonaispituutta. Tehollisen pituuden arvoksi voidaan valita hitsin kokonaispituus vähennettynä arvolla kaksi kertaa efektiivinen a-mitta. Edellyttäen, että hitsi on täysikokoinen koko pituudeltaan, ei tehollista pituutta tarvitse pienentää hitsin aloitus- tai lopetuskohtien takia [4,5,6]:

Pienahitsejä, joiden tehollinen pituus on lyhyempi kuin suurempi arvoista 30 mm tai 6 kertaa a-mitta, ei käsitellä voimia siirtävinä [4,5,6]:

$$l_{eff} \geq max[6a\ ;\ 30\ mm] \qquad (3.20)$$

Pienahitsejä ei saa lopettaa rakenneosien päissä tai sivuilla, vaan ne hitsataan jatkuvina ja täysikokoisina kulman ympäri kaksi kertaa hitsin kyljen pituiseksi jos liitoksen muoto sen mahdollistaa. Katkopienahitsien tapauksessa tätä sääntöä sovelletaan vain nurkkien viimeiseen hitsiin [4,5,6].

Pienahitsin kestävyys lasketaan käyttämällä joko komponenttimenetelmää tai yksinkertaistettua menetelmää seuraavassa esitetyn mukaisesti.

3.3.3.1 Pienahitsin kestävyys, kun käytetään komponenttimenetelmää

Komponenttimenetelmässä hitsin yksikköpituuden siirtämät voimat jaetaan hitsin pituussuuntaisen akselin suhteen yhdensuuntaisiin ja sitä vastaan kohtisuoriin komponentteihin, sekä hitsin laskentapinnan suuntaisiin ja sitä vastaan kohtisuorassa oleviin komponentteihin [4,5,6].

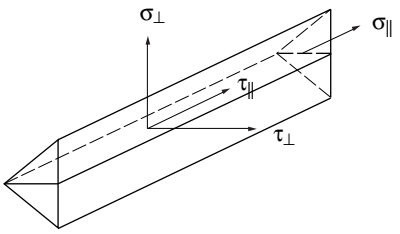
Hitsin pinta-alan mitoitusarvo on [4,5,6]:

$$A_w = \sum a l_{eff} \qquad (3.21)$$

missä a on pienahitsin efektiivinen a-mitta
l_{eff} on pienahitsin tehollinen pituus

Hitsin pinta-alan mitoitusarvon oletetaan sijaitsevan hitsin juuressa [4,5,6].

Jännitykset jaetaan hitsin laskentapinnalla kuvan 3.9 mukaisiin komponentteihin. Kunkin komponentin oletetaan jakaantuvan hitsin laskentapinnalla tasaisesti [4,5,6].



- $\sigma_\perp$ on laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys
- $\sigma_\parallel$ on hitsin akselin suuntainen normaalijännitys
- $\tau_\perp$ on hitsin akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa) ja
- $\tau_\parallel$ on hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys (laskentapinnan tasossa).

Kuva 3.9 Pienahitsin laskentapinnan jännitykset

Hitsin akselin suuntaista normaalijännitystä $\sigma_{||}$ ei oteta huomioon laskettaessa hitsin kestävyyttä [4,5,6]. Hitsin akselin suuntainen normaalijännitys johtuu siitä, että hitsi joutuu venymään pituussuunnassa saman verran kuin liitettävät osat. Tämä jännitys on hitsin kannalta sekundäärinen, koska se ei johdu hitsiä kuormittavasta primääristä voimasta. Näin ollen sitä ei oteta huomioon laskettaessa hitsin staattista kestävyyttä.

Pienahitsin mitoitusehdot ovat [4,5,6]:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \le \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \qquad (3.22)$$

$$\sigma_{\perp} \le \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \qquad (3.23)$$

missä f_u on heikoimman liitettävän osan nimellinen murtolujuus
β_w on kyseeseen tuleva lujuuskerroin (taulukko 3.8)
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Todettakoon, että tasakylkisellä pienahitsillä ehto (3.22) muodostuu aina määrääväksi.

Taulukko 3.8 Hitsin lujuuskertoimet terästen eri lujuusluokille [4,5,6]

	Hitsin lujuuskerroin β_w
S235	0,8
S275	0,85
S355	**0,9**
S420	**1,0**
S460	1,0

Putkiristikoiden hitsatuissa liitoksissa muodostuu liitoksen alueelle paikallisia jännityshuippuja. Plastinen myötääminen tasaa kuitenkin jännityshuippuja. Tämän vuoksi liitosten hitsit mitoitetaan yleensä tasalujiksi sauvojen kanssa.

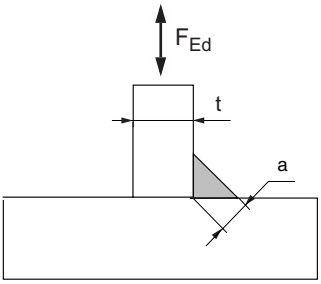
Asettamalla ehtoon (3.22) perustuen (tasakylkisellä pienahitsillä ehto (3.22) muodostuu aina määrääväksi) putken piirin pituusyksikköä kohti laskettu hitsin kestävyys vähintään yhtäsuureksi putken seinämän plastisen vetokestävyyden $t \cdot f_y / \gamma_{M0}$ kanssa, saadaan ratkaistua pienahitsin (yksipuoleinen ja tasakylkinen) vaadittava a-mitta siten, että hitsi on tasaluja putkeen kohdistuvan aksiaalisen vedon, puristuksen ja / tai taivutusmomentin suhteen [17]:

$$a \ge 2 \cdot \frac{\beta_w}{\sqrt{2}} \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot t \qquad (3.24)$$

missä t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus
β_w on kyseeseen tuleva lujuuskerroin (taulukko 3.8)
γ_{M2} ja γ_{M0} ovat kestävyyden osavarmuuslukuja (taulukko 2.5)

Taulukossa 3.9 on esitetty lausekkeen (3.24) mukaisesti määritetty vaadittava a-mitta tasalujalle putken piirin ympäri kiertävälle tasakylkiselle pienahitsille, kun putkeen kohdistuu aksiaalista vetoa, puristusta ja / tai taivutusmomenttia. Hitsillä on tällöin myös riittävä muodonmuutoskyky. **Esimerkiksi ristikkorakenteissa uumasauvojen hitsien a-mitat voidaan valita taulukon 3.9 mukaisesti.**

Taulukko 3.9 Putkeen kohdistuvan aksiaalisen vedon, puristuksen ja / tai taivutuksen suhteen tasalujan pienahitsin vaadittava a-mitta, kun hitsi kiertää putken piirin ympäri



Teräslaji	Myötölujuus [a] f_y (N/mm^2)	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Hitsin a-mitta [b]
S235H	235	360	0,92·t
S275H	275	430	0,96·t
S355H	**355**	**510**	**1,11·t**
S275NH	275	370	1,12·t
S355NH	355	470	1,20·t
S460NH	460	550	1,48·t
S275MH	275	360	1,15·t
S355MH	355	470	1,20·t
S420MH	**420**	**500**	**1,48·t**
S460MH	460	530	1,53·t

a) Taulukon 1.7 mukaiset nimelliset lujuusarvot.
b) Kuitenkin vähintään a ≥ 3 mm.

- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon a-mitat pätevät:
  - kun liitettävään rakenneputkeen kohdistuu vain aksiaalista vetoa, puristusta ja / tai taivutusta
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun liitettävä rakenneputki on samaa tai alempaa lujuusluokkaa kuin viereinen rakenneosa
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään liitettävän rakenneputken vastaavia arvoja.

3.3.3.2 Pienahitsin kestävyys, kun käytetään yksinkertaistettua menetelmää

Pienahitsin kestävyys voidaan vaihtoehtoisesti laskea myös ns. yksinkertaistetulla menetelmällä. Tällöin hitsiin kohdistuvien voimien resultantin oletetaan aiheuttavan hitsin laskentapoikkipintaan aina pelkkää leikkausta riippumatta voimaresultantin ja hitsin todellisesta suunnasta (varmalla puolella oleva yksinkertaistus). Komponenttimenetelmän mitoitusehdosta (3.22) saadaan tällöin johdettua hitsin (leikkaus)lujuuden mitoitusarvolle seuraava kaava [4,5,6]:

$$f_{vw.d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \qquad (3.25)$$

missä f_u on heikoimman liitettävän osan nimellinen murtolujuus
β_w on kyseeseen tuleva lujuuskerroin (taulukko 3.8)
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Menetelmän etuna on, että hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuntaa ei tarvitse tuntea, koska näin laskien se ei vaikuta hitsin kestävyyden mitoitusarvoon. Riittää että tunnetaan hitsiin kohdistuvan voimaresultantin suuruus. Toisaalta menetelmä johtaa hieman ylimitoitukseen riippuen voiman suunnasta.

Hitsin mitoitusehto on [4,5,6]:

$$F_{w.Ed} \leq F_{w.Rd} \qquad (3.26)$$

missä $F_{w.Ed}$ on hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo
$F_{w.Rd}$ on hitsin kestävyyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti

Hitsin kestävyyden mitoitusarvo pituusyksikköä kohti lasketaan kaavasta [4,5,6]:

$$F_{w.Rd} = f_{vw.d}\, a \qquad (3.27)$$

missä $f_{vw.d}$ on hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo kaavan (3.25) mukaisesti
a on pienahitsin a-mitta

Kaavaan (3.27) perustuen voidaan määrittää tarvittava a-mitta tasalujalle yksipuoleiselle tasakylkiselle pienahitsille varmalla puolella yksinkertaistaen, kun oletetaan liitettävän putken seinämään piirin pituusyksikköä kohti kohdistuva voima sen plastisen vetokestävyyden $t \cdot f_y / \gamma_{M0}$ suuruiseksi, jolloin vaadittavalle a-mitalle saadaan seuraava lauseke:

$$a \geq \sqrt{3}\,\beta_w \cdot \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M0}} \cdot \frac{f_y}{f_u} \cdot t \qquad (3.28)$$

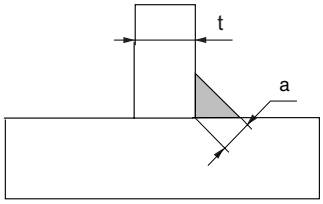
missä t on seinämänpaksuus
f_y on materiaalin nimellinen myötölujuus
f_u on materiaalin nimellinen murtolujuus
β_w on kyseeseen tuleva lujuuskerroin (taulukko 3.8)
γ_{M2} ja γ_{M0} ovat kestävyyden osavarmuuslukuja (taulukko 2.5)

Taulukossa 3.10 on esitetty lausekkeen (3.28) mukaisesti määritetty vaadittava a-mitta tasalujalle putken piirin ympäri kiertävälle tasakylkiselle pienahitsille, kun putkeen voi kohdistua normaalijännitystä ja / tai leikkausjännitystä aiheuttavia kuormia. Taulukon arvoja voidaan käyttää riippumatta putkeen kohdistuvien voimien resultantin suunnasta. Hitsillä on tällöin myös riittävä muodonmuutoskyky.

Taulukossa 3.10 esitetyt hitsin a-mitat ovat noin 22 % suuremmat kuin taulukossa 3.9, joka rajoittuu tilanteeseen jossa putkeen kohdistuu ainoastaan normaalijännitystä aiheuttavia kuormia. Jos putken seinämänpaksuus on yli 8 mm, tarvittava a-mitta alkaa olla jo niin suuri, että kannattaa harkita hitsin toteuttamista kohdan 3.3.4 mukaisesti osittain tai täysin läpihitsattuna päittäishitsinä, jota vahvistetaan tarvittaessa pienahitsillä [17].

Jos putken seinämässä vaikuttaa pelkkää leikkausjännitystä, taulukon 3.10 a-mitat ovat selvästi ylimitoitetut, ja on edullisempaa mitoittaa vastaavasti myös hitsi tasalujaksi pelkälle putken seinämän leikkaukselle, jolloin selvitään yli 40 % pienemmällä a-mitalla.

Taulukko 3.10 Putkeen kohdistuvan aksiaalisen vedon, puristuksen, taivutuksen ja / tai leikkauksen suhteen vähintään tasalujan pienahitsin vaadittava a-mitta, kun hitsi kiertää putken piirin ympäri



Teräslaji	Myötölujuus [a] f_y (N/mm^2)	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Hitsin a-mitta [b]
S235H	235	360	1,13·t
S275H	275	430	1,18·t
S355H	**355**	**510**	**1,36·t**
S275NH	275	370	1,37·t
S355NH	355	470	1,47·t
S460NH	460	550	1,81·t
S275MH	275	360	1,41·t
S355MH	355	470	1,47·t
S420MH	**420**	**500**	**1,82·t**
S460MH	460	530	1,88·t

a) Taulukon 1.7 mukaiset nimelliset lujuusarvot.
b) Kuitenkin vähintään a ≥ 3 mm.

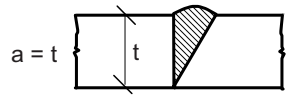
- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon a-mitat pätevät:
  - riippumatta rakenneputken seinämässä vaikuttavien jännitysten resultantin suunnasta
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun liitettävä rakenneputki on samaa tai alempaa lujuusluokkaa kuin viereinen rakenneosa
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään liitettävän rakenneputken vastaavia arvoja.

3.3.4 Päittäishitsit

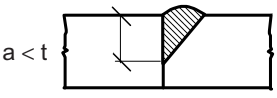
Rakenneputkien hitsattu jatkosliitos ja osa putkiristikoiden uumasauvojen liitoksista (ks. luku 8, kuvat 8.15 - 8.18) toteutetaan läpihitsattuina tai osittain läpihitsattuina päittäishitseinä.

Läpihitsatun päittäishitsin kestävyys voidaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan olettaa yhtä suureksi kuin heikoimman liitettävän osan kestävyys edellyttäen, että käytetään hitsausaineita joiden myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään hitsattavan perusaineen vastaavia arvoja [4,5,6].

Osittain läpihitsatun päittäishitsin kestävyys lasketaan kohdan 3.3.3 mukaisesti kuten tunkeuman omaavan pienahitsin kestävyys. Osittain läpihitsatun päittäishitsin paksuudeksi valitaan enintään se hitsautumissyvyys, joka voidaan saavuttaa säännöllisesti (osoitettava hitsauskokein) [4,5,6].



a) Täysin läpihitsattu päittäishitsi

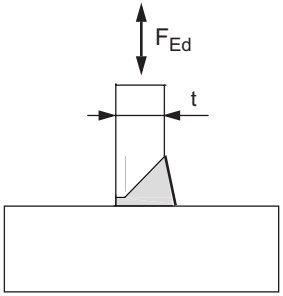


b) Osittain läpihitsattu päittäishitsi

Kuva 3.10 Päittäishitsejä puoli-V-railossa

Läpihitsatun päittäishitsin tapauksessa Eurocode siis sallii olettaa edellä esitetyn mukaisesti, että kiinnityksen kestävyys on yhtä suuri kuin heikoimman liitettävän osan kestävyys. Jos läpihitsatun päittäishitsin kestävyys kuitenkin lasketaan komponenttimenetelmällä soveltaen yhdenmukaisesti osittain läpihitsatun päittäishitsin kestävyydelle esitettyjä ohjeita, havaitaan että laskentamallin antamat tulokset eivät ole täysin yhtäpitäviä tasalujuusotaksuman kanssa, ks. taulukko 3.11.

Taulukko 3.11 Läpihitsatun päittäishitsin laskennallinen kestävyys, jos sovelletaan osittain läpihitsatun päittäishitsin laskentaohjeita komponenttimenetelmällä



Teräslaji	Myötölujuus [a] f_y (N/mm^2)	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Hitsin kestävyys [b]
S235H	235	360	$1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}$
S275H	275	430	$1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}$
S355H	**355**	**510**	$\mathbf{1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}}$
S275NH	275	370	$0{,}97 \cdot N_{pl.Rd}$
S355NH	355	470	$0{,}95 \cdot N_{pl.Rd}$
S460NH	460	550	$0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}$
S275MH	275	360	$0{,}94 \cdot N_{pl.Rd}$
S355MH	355	470	$0{,}95 \cdot N_{pl.Rd}$
S420MH	**420**	**500**	$\mathbf{0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}}$
S460MH	460	530	$0{,}83 \cdot N_{pl.Rd}$

a) Taulukon 1.7 mukaiset nimelliset lujuusarvot.

b) $N_{pl.Rd} = t \cdot f_y / \gamma_{M0}$ on putken seinämän plastisuusteorian mukainen kestävyys putken piirin pituusyksikköä kohti. Mitoituskestävyys on rajoitettu enintään putken seinämän kestävyyden $N_{pl.Rd}$ suuruiseksi. Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan täysin läpihitsatun päittäishitsin kestävyys voidaan otaksua yhtäsuureksi kuin heikoimman liitettävän osan kestävyys.

- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1{,}0$ ja $\gamma_{M2} = 1{,}25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon arvot pätevät:
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun liitettävä rakenneputki on samaa tai alempaa lujuusluokkaa kuin viereinen rakenneosa
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään liitettävän rakenneputken vastaavia arvoja.

3.3.5 Eri lujuusluokkien väliset hitausliitokset

3.3.5.1 Hitsausaineen valinta

Hitsausaineen on oltava perusainetta hieman seostetumpi, jotta myös valmiiseen hitsiin saadaan perusaineen tasoiset lujuus- ja iskusitkeysominaisuudet. Käytännössä hitsausaine määräytyy sekä teräksen lujuusluokan että iskusitkeysluokan perusteella. Kuumavalssattujen terästen hitsausaineeksi suositellaan samanlujuuksinen tai vain vähän lujempi (5...10 %) hitsausaine kuin perusaine [18].

Eurocodessa tai standardissa EN 1090-2 ei esitetä ohjeita hitsausaineen valinnalle tilanteessa, jossa eri lujuusluokan teräksiä liitetään yhteen. Tällöin hitsausaine valitaan kuitenkin yleensä alemman lujuusluokan mukaan, ellei erityisesti ole syytä toisin määrätä [16].

Täysin läpihitsatun päittäishitsin tapauksessa, kun hitsataan saman paksuisia mutta eri lujuusluokan materiaaleja yhteen, on selvää että alemman lujuusluokan materiaalin kestävyys määrää koko liitoksen kestävyyden (kunhan hitsausaine on valittu vähintään samanlujuiseksi kyseisen perusaineen kanssa). Liitoksen kestävyyttä ei saada suuremmaksi, vaikka hitsausaine valittaisiin lujemman perusaineen mukaan.

Sama pätee myös pienahitsin suhteen: Eurocoden mukaisessa mitoituksessa liitoksen laskennallista kestävyyttä ei saada suuremmaksi, vaikka hitsausaine valittaisiin lujemman perusaineen mukaan.

Sen sijaan tarpeettoman lujan (= seostetun) hitsausaineen käytöstä seuraa vain korkea jäännösjännitystila sekä lisääntynyt vetely- ja halkeiluvaara.

3.3.5.2 Eri lujuusluokkien välisten hitsien mitoitus

3.3.5.2.1 Pienahitsit

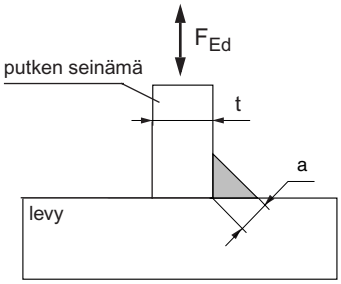
Eri lujuusluokkien välisen pienahitsin kestävyys lasketaan kohdassa 3.3.3 esitettyjen ohjeiden mukaisesti. Hitsin kestävyyttä määritettäessä käytetään kaavoissa (3.22) - (3.28) murtolujuuden f_u arvona aina heikomman perusaineen murtolujuutta ja kyseisen lujuusluokan mukaista taulukossa 3.8 esitettyä lujuuskerrointa β_w [4,5,6].

Taulukossa 3.12 on esitetty eri lujuusluokkien väliselle putki-levy-liitokselle kohdan 3.3.3.1 komponenttimenetelmällä lausekkeen (3.24) mukaisesti määritetty vaadittava a-mitta putken suhteen tasalujalle putken piirin ympäri kiertävälle tasakylkiselle pienahitsille, kun putkeen kohdistuu aksiaalista vetoa, puristusta ja / tai taivutusmomenttia. Esimerkiksi putkipilarin ja pohjalevyn välisen tasalujan pienahitsin a-mitta voidaan valita taulukon 3.12 mukaisesti.

Taulukossa 3.13 on esitetty eri lujuusluokkien väliselle putki-levy-liitokselle kohdan 3.3.3.2 yksinkertaistetulla menetelmällä lausekkeen (3.28) mukaisesti määritetty vaadittava a-mitta putken suhteen tasalujalle putken piirin ympäri kiertävälle tasakylkiselle pienahitsille, kun putkeen voi kohdistua normaalijännitystä ja / tai leikkausjännitystä aiheuttavia kuormia. Taulukon arvoja voidaan käyttää riippumatta levyyn kohdistuvien voimien resultantin suunnasta.

Todettakoon, että taulukoissa 3.12 ja 3.13 esitetyissä a-mitan lukuarvoissa voidaan paikoin havaita eri teräslajien välillä tiettyä periaatteellista epäloogisuutta, mikä aiheutuu Eurocodessa määritellyn lujuusluokkakohtaisen β_w-kertoimen aiheuttamasta epäjatkuvuudesta.

Taulukko 3.12 Eri lujuusluokkien väliset hitsit. Putkeen kohdistuvan aksiaalisen vedon, puristuksen ja / tai taivutuksen suhteen tasalujan pienahitsin vaadittava a-mitta, kun hitsi kiertää putken piirin ympäri

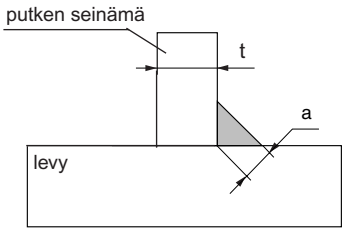


Levy		Hitsin a-mitta [b]	
Teräslaji	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Rakenneputki S355H	Rakenneputki S420MH
S235	360	1,39·t	1,65·t
S275	430	1,24·t	1,48·t
S355	**490**	**1,15·t**	**1,36·t**
S275N	390	1,37·t	1,62·t
S355N	490	1,15·t	1,36·t
S420N	520	1,11·t	1,48·t
S460N	540	1,11·t	1,48·t
S275M	370	1,44·t	1,71·t
S355M	470	1,20·t	1,42·t
S420M	520	1,11·t	1,48·t
S460M	540	1,11·t	1,48·t

a) Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt standardin EN 10025 mukaisten lujuusluokkien S235 - S460 levyterästen vetomurtolujuuden nimellisarvot, kun $t \leq 40$ mm.
b) Kuitenkin vähintään $a \geq 3$ mm.

- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1,0$ ja $\gamma_{M2} = 1,25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon a-mitat pätevät:
  - kun liitettävään rakenneputkeen kohdistuu vain aksiaalista vetoa, puristusta ja / tai taivutusta
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään heikomman liitettävän osan vastaavia arvoja.

Taulukko 3.13 Eri lujuusluokkien väliset hitsit. Putkeen kohdistuvan aksiaalisen vedon, puristuksen, taivutuksen ja / tai leikkauksen suhteen vähintään tasalujan pienahitsin vaadittava a-mitta, kun hitsi kiertää putken piirin ympäri



Levy		Hitsin a-mitta [b]	
Teräslaji	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Rakenneputki S355H	Rakenneputki S420MH
S235	360	1,71·t	2,02·t
S275	430	1,52·t	1,80·t
S355	**490**	**1,41·t**	**1,67·t**
S275N	390	1,68·t	1,98·t
S355N	490	1,41·t	1,67·t
S420N	520	1,36·t	1,82·t
S460N	540	1,36·t	1,82·t
S275M	370	1,77·t	2,09·t
S355M	470	1,47·t	1,74·t
S420M	520	1,36·t	1,82·t
S460M	540	1,36·t	1,82·t

a) Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt standardin EN 10025 mukaisten lujuusluokkien S235 - S460 levyterästen vetomurtolujuuden nimellisarvot, kun $t \leq 40$ mm.
b) Kuitenkin vähintään $a \geq 3$ mm.

- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1{,}0$ ja $\gamma_{M2} = 1{,}25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon a-mitat pätevät:
  - riippumatta rakenneputken seinämässä vaikuttavien jännitysten resultantin suunnasta
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään heikomman liitettävän osan vastaavia arvoja.

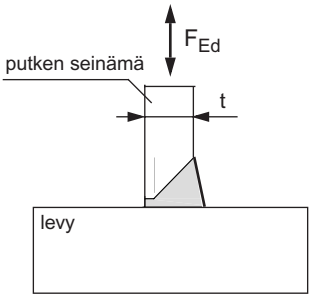
3.3.5.2.2 Päittäishitsit

Eri lujuusluokkien välisen osittain läpihitsatun päittäishitsin kestävyys lasketaan kohdassa 3.3.4 esitettyjen ohjeiden mukaisesti. Hitsin kestävyyttä määritettäessä käytetään kaavoissa (3.22) - (3.28) murtolujuuden f_u arvona aina heikomman perusaineen murtolujuutta ja kyseisen lujuusluokan mukaista taulukossa 3.8 esitettyä lujuuskerrointa β_w [4,5,6].

Läpihitsatun päittäishitsin kestävyys voidaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan olettaa yhtä suureksi kuin heikoimman liitettävän osan kestävyys edellyttäen, että käytetään hitsausaineita joiden myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään hitsattavan perusaineen vastaavia arvoja [4,5,6].

Taulukossa 3.14 on esitetty läpihitsatun päittäishitsin kestävyys eri lujuusluokkien väliselle putki-levy-liitokselle putken oman plastisen vetokestävyyden $t \cdot f_y / \gamma_{M0}$ suhteen, jos sovelletaan osittain läpihitsatun päittäishitsin laskentaohjeita komponenttimenetelmällä (ks. kohdat 3.3.4 ja 3.3.3.1).

Taulukko 3.14 Eri lujuusluokkien väliset hitsit. Läpihitsatun päittäishitsin laskennallinen kestävyys, jos sovelletaan osittain läpihitsatun päittäishitsin laskentaohjeita komponenttimenetelmällä



Levy		Hitsin kestävyys [b]	
Teräslaji	Murtolujuus [a] f_u (N/mm^2)	Rakenneputki S355H	Rakenneputki S420MH
S235	360	$0{,}66 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}56 \cdot N_{pl.Rd}$
S275	430	$0{,}77 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}65 \cdot N_{pl.Rd}$
S355	**490**	$\mathbf{0{,}99 \cdot N_{pl.Rd}}$	$\mathbf{0{,}84 \cdot N_{pl.Rd}}$
S275N	390	$0{,}77 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}65 \cdot N_{pl.Rd}$
S355N	490	$0{,}99 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}84 \cdot N_{pl.Rd}$
S420N	520	$1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}$
S460N	540	$1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}$
S275M	370	$0{,}75 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}63 \cdot N_{pl.Rd}$
S355M	470	$0{,}95 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}81 \cdot N_{pl.Rd}$
S420M	520	$\mathbf{1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}}$	$\mathbf{0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}}$
S460M	540	$1{,}00 \cdot N_{pl.Rd}$	$0{,}86 \cdot N_{pl.Rd}$

a) Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyt standardin EN 10025 mukaisten lujuusluokkien S235 - S460 levyterästen vetomurtolujuuden nimellisarvot, kun $t \leq 40$ mm.

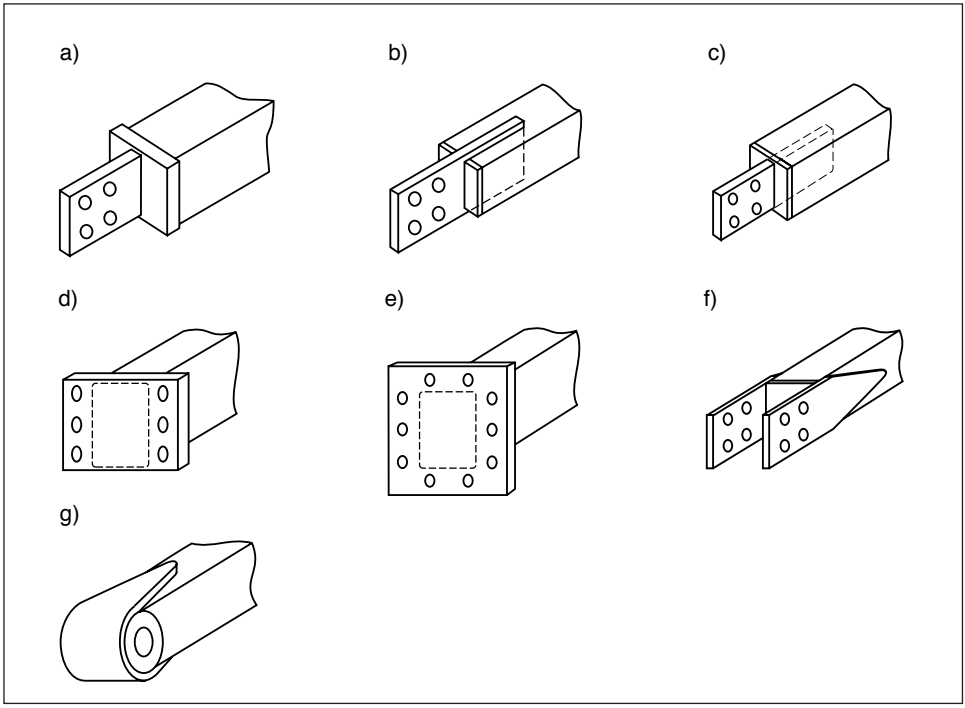
b) $N_{pl.Rd} = t \cdot f_y / \gamma_{M0}$ on putken seinämän plastisuusteorian mukainen kestävyys putken piirin pituusyksikköä kohti. Mitoituskestävyys on rajoitettu enintään putken seinämän kestävyyden $N_{pl.Rd}$ suuruiseksi. Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaan täysin läpihitsatun päittäishitsin kestävyys voidaan otaksua yhtäsuureksi kuin heikomman liitettävän osan kestävyys.

- Tämän taulukon arvot on laskettu Eurocoden osien EN 1993-1-1 ja EN 1993-1-8 suositusarvoilla $\gamma_{M0} = 1{,}0$ ja $\gamma_{M2} = 1{,}25$. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**
- Taulukon arvot pätevät:
  - kun hitsi kiertää liitettävän rakenneputken piirin ympäri
  - kun käytetään hitsausainetta, jonka myötölujuuden ja murtolujuuden minimiarvot vastaavat vähintään heikomman liitettävän osan vastaavia arvoja.

3.4 Rakenneputkien ruuviliitokset

3.4.1 Rakenneputken jatkaminen ruuviliitoksilla

Rakenteet on yleensä edullista koota osarakenteiksi konepajassa hitsaamalla ja liittää sitten nämä osat työmaalla ruuviliitoksilla. Ruuviliitokset ovat nopeampia ja helpompia asentaa työmaaolosuhteissa kuin hitsatut liitokset. Kuvassa 3.11 on esitetty erilaisia rakenneputkien liitosvaihtoehtoja ruuviliitoksia käyttäen.



Kuva 3.11 Rakenneputken jatkosliitoksia

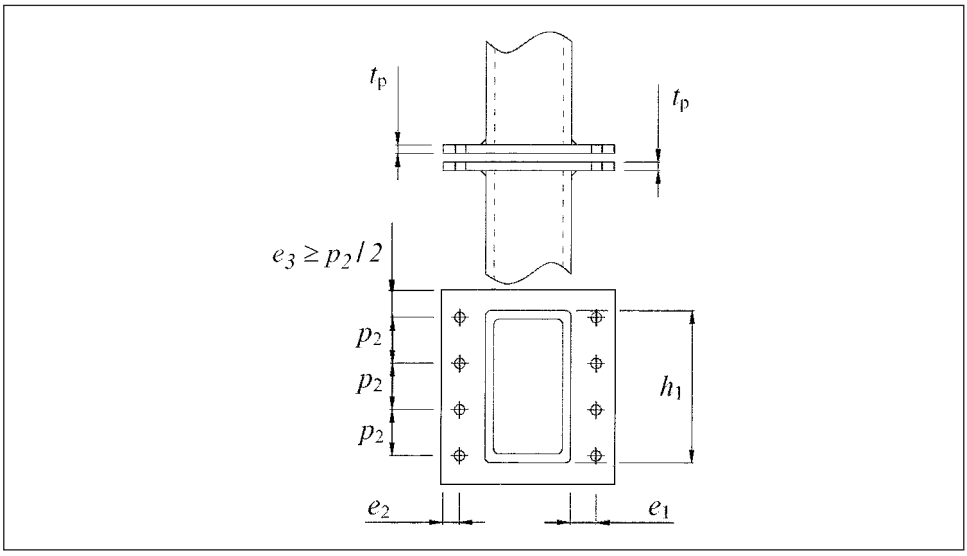
Liitoksen kannalta tärkeitä näkökohtia ovat kuormituksen siirtäminen mahdollisimman keskeisesti poikkileikkauksen suhteen ja liitoksen komponenttien tasainen jäykkyys. Vetokuormitettu liitos on siten parempi toteuttaa vaihtoehdoilla b, c, f tai g. Näissä liitoksissa vetokuormitus siirtyy suorempaa tietä rakenneputkelle kuin a, d tai e kohdan liitoksissa, joissa on myös lamellirepeilyvaara. Laippaliitoksissa d ja e laipan paksuus on syytä valita riittävän suureksi, jotta laipan joustosta aiheutuvat ruuvien vipuvoimat pysyisivät pieninä.

3.4.1.1 Jatkosliitokset laipoilla

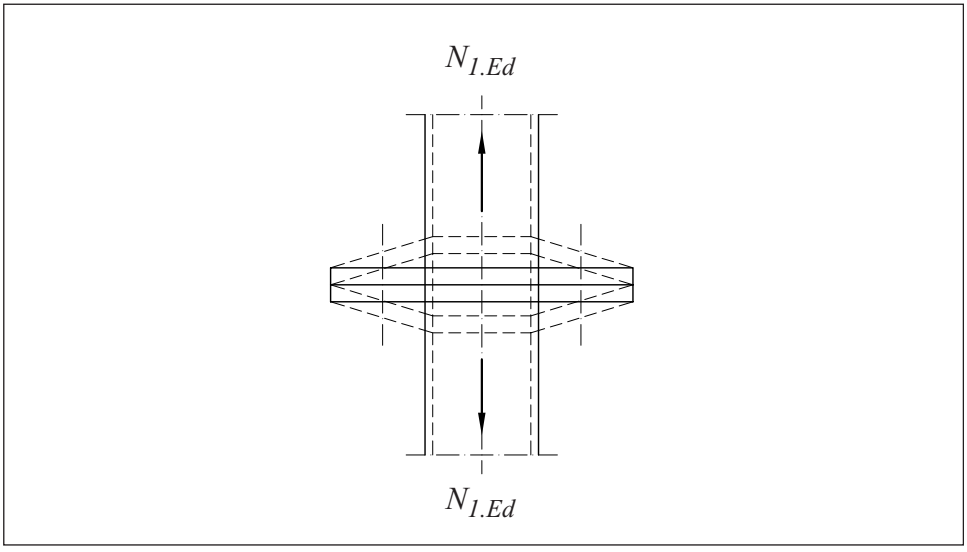
Eurocodessa ei esitetä ohjeita rakenneputkien laippaliitokselle. Tässä esitetyt Eurocoden kanssa yhteensopivat ohjeet perustuvat lähteisiin [12,13,19].

3.4.1.1.1 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vedetty laippaliitos

Laippaliitos voidaan laskea olettamalla se kaksiulotteiseksi T-kappaleiden liitokseksi, jossa ruuvit sijaitsevat rakenneputken vastakkaisilla sivuilla (kuva 3.12). Vetokuormitus aiheuttaa putken seinämien kohdalle plastisen nivelen (kuva 3.13). Laipan kestävyys vedolle saadaan laskettua laipan plastisen momentin avulla.



Kuva 3.12 Jatkosliitos laipoilla, kun käytetään neliön tai suorakaiteen muotoisia putkia



Kuva 3.13 Laippaliitoksen rakennemalli

Laippaliitoksen laskentamalli (kuva 3.13) on lähtökohdiltaan yhtäläinen I-profiilien laippaliitoksille käytetyn ekvivalentin T-osan laskentamallin kanssa, jossa murtumismuotona on ruuvien murtuminen samalla kun laippalevy myötää. I-profiileilla käytetty T-osan laskentamalli ei kuitenkaan sovellu täysin sellaisenaan suoraan rakenneputkille, joita käytettäessä laipan plastiset nivelet mm. asettuvat suoritettujen kokeiden perusteella hieman eri kohtiin, kuin I-profiilien laippaliitoksissa.

Vipuvaikutuksesta syntyviä lisävoimia ei tarvitse erikseen ottaa huomioon ruuvien kuormituksessa ja kestävyydessä, sillä ne sisältyvät implisiittisesti laskentamalliin vastaavalla tavalla, kuin Eurocoden osassa EN 1993-1-8 I-profiilien laippaliitokselle käytetyssä ekvivalentin T-osan laskentamallissa. Vipuvoimien vaikutus voidaan kuitenkin haluttaessa laskea erikseen jäljempänä esitetyllä tavalla.

Käytetty laskentamalli on puoliempiirinen, ja se on testattu laipan paksuuksilla 12...26 mm. Mallia voidaan käyttää, kun liitos toteuttaa seuraavat ehdot [19]:

- ruuvirivit sijaitsevat tasavälein laippaliitoksen kahdella vastakkaisella sivulla kuvan 3.12 mukaisesti
- ruuvien lukumäärä on: $4 \le n \le 2(h_1 / p_2) + 2$
- ruuvin vapaareikien nimellisvälys on standardin EN 1090-2 normaalin pyöreän reijän mukainen
- reikien sijainti (kuva 3.12):
  $e_1 \ge 1{,}2 d_0$, missä d_0 = ruuvin reijän halkaisija
  $e_2 \ge 1{,}2 d_0$ ja $e_2 \le 1{,}25 e_1$
  $e_3 \ge p_2 / 2$, alarajan ylittävää osuutta ei kuitenkaan hyödynnetä laipan kestävyydessä
  $2{,}4 d_0 \le p_2 \le \min[14 t_p ; 200 \text{ mm}]$, suositus: p_2 = (3...5) $\times d_0$

Vipuvoimien minimoimiseksi ja vastaavasti liitoksen kestävyyden maksimoimiseksi kannattaa mitta e_1 pitää mahdollisimman pienenä siten, että e_1 = (1,5 ... 2) $\times d_0$ (laipan hitsin ja ruuvin kannan väliin pitää jäädä kuitenkin vähintään 5 mm) ja mitaksi e_2 valitaan $e_2 \approx 1{,}25 e_1$ [19].

Laippaliitoksen kestävyyden laskenta alkaa ruuvirivin suhteellisen nettopinta-alan kertoimen δ määrityksellä [19]:

$$\delta = 1 - \frac{d_0}{p_2} \qquad (3.29)$$

missä d_0 on ruuvin reijän halkaisija
p_2 on reikien keskiöetäisyys

Lasketaan laippalevyn plastiselle momentille apusuure K [19]:

$$K = \frac{4b'}{0,9 \cdot (f_{yp}/\gamma_{M0}) \cdot p_2} \qquad (3.30)$$

$$b' = e_1 - 0,5d + t_1 \qquad \textit{ruuvirivin vipuvarsi plastisen nivelen suhteen} \qquad (3.31)$$

missä
- e_1 on ruuvin reijän keskiön etäisyys putken reunasta (kuva 3.12)
- d on ruuvin nimellishalkaisija
- t_1 on putken seinämänpaksuus
- p_2 on reikien keskiöetäisyys (kuva 3.12)
- f_{yp} on laipan nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Valitaan laipan paksuus t_p seuraavien minimi- ja maksimiarvojen väliltä [19]:

$$\sqrt{\frac{K \cdot F_{t.Ed}}{1+\delta}} \le t_p \le \sqrt{K \cdot F_{t.Ed}} \qquad (3.32)$$

missä $F_{t.Ed}$ on normaalivoima yhtä ruuvia kohti (= $N_{1.Ed}/n$)

Lausekkeessa (3.32) oletetaan ruuveissa vaikuttavaksi vetovoimaksi $F_{t.Ed}$ ruuvien vetokestävyys $F_{t.Rd}$ (esitetään jäljempänä), kun lasketaan liitoksen kestävyyttä murtorajatilassa.

Lasketaan parametri α_{Rd}, joka ottaa huomioon reikien vaikutuksen laipan plastisen momentin arvoihin ruuvien kohdalla suhteessa laipan plastiseen momenttiin putken seinämän kohdalla, kun ruuvien vetovoiman oletetaan olevan ruuvien vetokestävyyden suuruinen [19]:

$$\alpha_{Rd} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \left[\frac{e_2 + 0,5d}{\delta \cdot (e_2 + e_1 + t_1)} \right] \ge 0 \qquad (3.33)$$

Liitoksen kestävyys saadaan ratkaistuksi merkitsemällä plastisissa nivelissä tehty työ yhtäsuureksi ulkoisen kuorman tekemän työn kanssa [19]:

$$N_{1.Rd} = \frac{t_p^2 (1 + \delta\alpha_{Rd}) n}{K} \qquad (3.34)$$

missä n on ruuvien lukumäärä

Lausekkeesta (3.34) on jätetty pois lähteessä [19] ao. kaavaan virheellisesti sisällytetty osavarmuusluku γ_{M2} (K-tekijän lauseke edellä sisältää jo valmiiksi kestävyydelle tarvittavan varmuustason sekä implisiittisesti että ekplisiittisesti).

Lopuksi tarkastetaan seuraavat mitoitusehdot [19]:

$N_{1.Ed} \le N_{1.Rd}$ *liitoksen kestävyys* *(3.35)*

$N_{1.Ed} \le n \cdot F_{t.Rd}$ *ruuvien vetokestävyys* *(3.36)*

$N_{1.Ed} \le n \cdot B_{p.Rd}$ *ruuvien lävistymiskestävyys* *(3.37)*

Lisäksi tulee tarkastaa rakenneputken ja laipan välisen hitsin kestävyys kohdan 3.3 mukaisesti.

Ehdoissa (3.32) - (3.37) ruuvin vetokestävyys $F_{t.Rd}$ ja lävistymiskestävyys $B_{p.Rd}$ lasketaan seuraavista lausekkeista [4,5,6]:

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} \qquad (3.38)$$

$$B_{p.Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} \qquad (3.39)$$

missä k_2 = 0,63 uppokantaruuveille

k_2 = 0,90 muille ruuveille

f_{ub} on ruuvin nimellinen murtolujuus

A_s on ruuvin jännityspinta-ala (pinta-ala kierteiden kohdalla)

d_m on lävistymishalkaisija, jonka arvoksi valitaan pienempi seuraavista:

- ruuvin kannan etäisimpien pisteiden välin ja avainvälin keskiarvo, tai
- mutterin etäisimpien pisteiden välin ja avainvälin keskiarvo

t_p on laipan paksuus

f_u on levymateriaalin (laipan) nimellinen murtolujuus

γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Lävistymiskestävyyden lauseke (3.39) ei päde uppokantaruuveille.

Mikäli halutaan selvittää vipuvoimista ruuveille aiheutuva kokonaisvoima, se voidaan laskea seuraavasti (kuten edellä todettiin, vipuvoimia ei tarvitse erikseen ottaa huomioon koska niiden vaikutus sisältyy implisiittisesti edellä esitettyyn liitoksen kestävyyden laskentaan) [13]:

$$F_{b.Ed} = F_{t.Ed} \cdot \left[1 + \frac{b'}{a'} \cdot \frac{\delta\alpha_{Ed}}{1 + \delta\alpha_{Ed}} \right] \qquad (3.40)$$

$$a' = e_2 + 0,5d \qquad (3.41)$$

$$\alpha_{Ed} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Ed}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \frac{1}{\delta} \qquad (3.42)$$

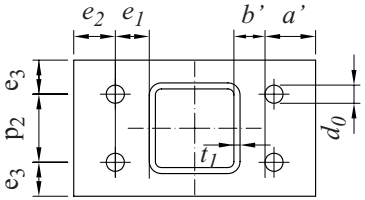
missä $F_{b.Ed}$ on kokonaisruuvivoima yhtä ruuvia kohti sisältäen vipuvoiman

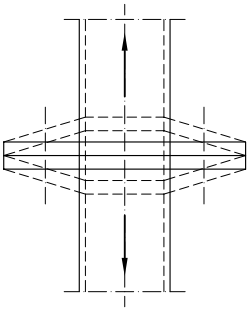
Ruuvissa vaikuttavan kokonaisvoiman $F_{b.Ed}$ pitää olla pienempi kuin ruuvin vetokestävyys $F_{t.Rd}$ ja lävistymiskestävyys $B_{p.Rd}$.

Esimerkki 3.13

Lasketaan viereisen laippaliitoksen vetokestävyys. Laipan paksuus on 35 mm ja teräslaji on S355J2. Ruuvit M24 ovat lujuusluokkaa 10.9.

Rakenneputki on 120×120×8. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.





$A_1 = 3364\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$ *putken myötölujuus*
$f_{yp} = 355\ N/mm^2$ *laipan myötölujuus*
$f_{up} = 490\ N/mm^2$ *laipan murtolujuus*
$f_{ub} = 1000\ N/mm^2$ *ruuvin murtolujuus*
$\gamma_{M0} = 1{,}0$
$\gamma_{M2} = 1{,}25$

Laipan reikien sijainnin parametrit ovat:
$d = 24\ mm$
$d_0 = 26\ mm$
$p_2 = 90\ mm$
$e_1 = 45\ mm$
$e_2 = 55\ mm$
$e_3 = 45\ mm$

Tarkastetaan vaatimukset reikien sijainnille:
$e_1 = 45\ mm \geq 1{,}2d_0 = 31{,}2\ mm$ *OK*
$e_2 = 55\ mm \geq 1{,}2d_0 = 31{,}2\ mm$ *OK*
$e_2 = 55\ mm \leq 1{,}25e_1 = 56{,}3\ mm$ *OK*
$e_3 = 45\ mm \geq p_2 / 2 = 45\ mm$ *OK*
$p_2 = 90\ mm \geq 2{,}4d_0 = 62{,}4\ mm$ *OK*
$p_2 = 90\ mm \leq min[14t_p\ ;\ 200\ mm] = min[490\ mm\ ;\ 200\ mm] = 200\ mm$ *OK*

Tarkastetaan vaatimus ruuvien lukumäärälle:

$$4 \leq n = 4 \leq 2(h_1/p_2) + 2 = 2 \cdot (120/90) + 2 = 4{,}7 \quad OK$$

Putken poikkileikkauksen vetokestävyys:

$$N_{t.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3364 \cdot 420}{1{,}0} = 1413\ kN$$

Hitsien kestävyys:
Määritetään hitsin a-mitta siten, että hitsi on vähintään tasaluja putken plastisen vetokestävyyden $N_{t.Rd}$ kanssa kun putki on hitsattu laippalevyyn S355J2 (taulukko 3.12):

$$a \geq 1,36 \cdot t_1 = 1,36 \cdot 8 = 10,9 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *valitaan a = 11 mm*

Ruuvien kestävyys:
Ruuvin vetokestävyys on:

$A_s = 353 \text{ mm}^2$ *M24 ruuvin jännityspinta-ala (eli kierteellisen osan pinta-ala)*

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 1000 \cdot 353}{1,25} = 254,2 \text{ kN}$$

Ruuvin lävistymiskestävyys on:

$d_m = 37,8$ mm *M24 ruuvin kannan tai mutterin lävistymishalkaisija*

$$B_{p.Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot \pi \cdot 37,8 \cdot 35 \cdot 490 / 1,25 = 977,6 \text{ kN}$$

$\Rightarrow$ *ruuvien kestävyyden määrää niiden vetokestävyys 254,2 kN*

Laippaliitoksen kestävyys:
Lasketaan tarvittavat apusuureet:

$$\delta = 1 - \frac{d_0}{p_2} = 1 - \frac{26}{90} = 0,7111$$

$$b' = e_1 - 0,5d + t_1 = 45 - 0,5 \cdot 24 + 8 = 41,0 \text{ mm}$$

$$K = \frac{4b'}{0,9 \cdot (f_{yp}/\gamma_{M0}) \cdot p_2} = \frac{4 \cdot 41,0}{0,9 \cdot (355/1,0) \cdot 90} = 5,703 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$$

Tarkastetaan vaatimukset laipan paksuudelle:
Laipan paksuuden minimi- ja maksimiarvot lasketaan kaavasta:

$$\sqrt{\frac{K \cdot F_{t.Ed}}{1+\delta}} \leq t_p \leq \sqrt{K \cdot F_{t.Ed}}$$

Koska ruuviin kohdistuvaa vaikuttavaa voimaa ei nyt tunneta vaan tehtävänä on määrittää liitoksen kestävyys murtorajatilassa, oletetaan että ruuviin vaikuttava voima $F_{t.Ed}$ on ruuvin vetokestävyyden $F_{t.Rd}$ = 254,2 kN suuruinen.

Laipan paksuuden minimi- ja maksimiarvoiksi saadaan tällöin:

$$\sqrt{\frac{5,703 \cdot 10^{-3} \cdot 254,2 \cdot 10^3}{1+0,7111}} \leq t_p \leq \sqrt{5,703 \cdot 10^{-3} \cdot 254,2 \cdot 10^3}$$

$$29,1 \text{ mm} \leq t_p \text{ mm} \leq 38,1 \text{ mm}$$

$\Rightarrow t_p = 35$ mm = OK

Liitoksen kestävyydeksi saadaan:

$$\alpha_{Rd} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{t_p^2} - 1\right) \cdot \left[\frac{e_2 + 0,5d}{\delta \cdot (e_2 + e_1 + t_1)}\right]$$

$$= \left(\frac{5,703 \cdot 10^{-3} \cdot 254,2 \cdot 10^3}{35^2} - 1\right) \cdot \left[\frac{55 + 0,5 \cdot 24}{0,7111 \cdot (55 + 45 + 8)}\right] = 0,1600 \geq 0$$

$$N_{1.Rd} = \frac{t_p^2(1 + \delta\alpha_{Rd})n}{K} = \frac{35^2 \cdot (1 + 0,7111 \cdot 0,1600) \cdot 4}{5,703 \cdot 10^{-3}} = 957,0 \text{ kN}$$

Koko liitoksen kestävyys:
Liitoksen kestävyyden määrää pienin edellä lasketuista kestävyyksistä, joka on laippaliitoksen kestävyys 957 kN.

Vipuvoimien vaikutus:
Vipuvoimia ei ole välttämätöntä erikseen tarkastaa, sillä edellä laskettu liitoksen kestävyys $N_{1.Rd}$ ottaa implisiittisesti huomioon myös vipuvoimat. Selvitetään silti vipuvoimista aiheutuva ruuvissa vaikuttava kokonaisvoima $F_{b.Ed}$, kun oletetaan että liitokseen kohdistuu liitoksen kestävyyden suuruinen voima $N_{1.Ed} = N_{1.Rd} = 957,0$ kN, jolloin normaalivoima yhtä ruuvia kohti on 957,0 kN / 4 = 239,3 kN:

$$\alpha_{Ed} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Ed}}{t_p^2} - 1\right) \cdot \frac{1}{\delta} = \left(\frac{5,703 \cdot 10^{-3} \cdot 239,3 \cdot 10^3}{35^2} - 1\right) \cdot \frac{1}{0,7111} = 0,1604$$

$$a' = e_2 + 0,5d = 55 + 0,5 \cdot 24 = 67,0 \text{ mm}$$

$$F_{b.Ed} = F_{t.Ed} \cdot \left[1 + \frac{b'}{a'} \cdot \frac{\delta\alpha_{Ed}}{1 + \delta\alpha_{Ed}}\right] = 239,3 \cdot \left[1 + \frac{41}{67} \cdot \frac{0,7111 \cdot 0,1604}{1 + 0,7111 \cdot 0,1604}\right] = 254,3 \text{ kN}$$

$$F_{b.Ed} = 254,3 \text{ kN} \leq F_{t.Rd} = 254,2 \text{ kN} \quad OK$$

$$F_{b.Ed} = 254,3 \text{ kN} \leq B_{p.Rd} = 977,6 \text{ kN} \quad OK$$

Todetaan, että kun liitokseen kohdistuu laippaliitoksen kestävyyden $N_{1.Rd} = 957,0$ kN suuruinen normaalivoima, vipuvoimat sisältävä ruuvin kokonaisvoima on tässä $F_{b.Ed} = 1,06 \times F_{t.Ed} = 254,3$ kN, eli käytännössä ruuvin vetokestävyyden $F_{t.Rd}$ suuruinen (muilla alkuarvoilla vipuvoiman osuus voisi olla huomattavasti suurempi).

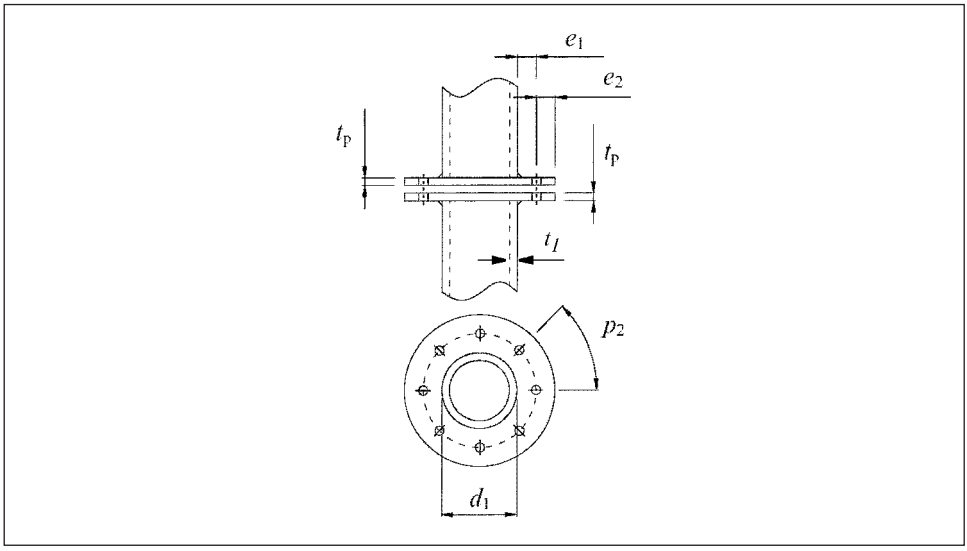
Eli kun laipan paksuus on valittu lausekkeen (3.32) minimi- ja maksimiarvojen mukaisesti, laippaliitoksen kestävyys saavutetaan samalla putken normaalivoimalla $N_{1.Ed}$, jolla ruuvin kokonaisvoima $F_{b.Ed}$ saavuttaa ruuvin vetokestävyyden.

Tämän esimerkin avulla voidaan siis havaita, että ruuvin kokonaisvoima ei pääse ylittymään vaikka vipuvoimia ei erikseen tarkastettaisikaan. Eli vipuvoimien vaikutus on otettu laippaliitoksen kestävyydessä implisiittisesti huomioon, kuten laskentaohjeissa on todettu.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin rakenneputken osalta lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin edelleen laippaliitoksen määräämänä sama 957 kN, mutta hitsin osalta riittäisi hieman pienempi a-mitta: $a \geq 1{,}15 \cdot t = 9{,}2$ mm $\Rightarrow$ $a = 10$ mm (taulukko 3.12). Putken materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 ei siis tässä esimerkissä vaikuta liitoksen kestävyyteen.

3.4.1.1.2 Pyöreiden rakenneputkien vedetty laippaliitos

Pyöreiden putkien laippaliitos ja sen mitoille käytetyt merkinnät on esitetty kuvassa 3.14. Laskenta on sikäli yhtäläinen kantikkaiden putkien kanssa, että vipuvaikutuksesta syntyviä lisävoimia ei tässäkään tarvitse erikseen ottaa huomioon ruuvien kuormituksessa ja kestävyydessä, sillä ne sisältyvät implisiittisesti laskentamalliin.



Kuva 3.14 Jatkosliitos laipoilla, kun käytetään pyöreitä putkia [19]

Laskentamallia voidaan käyttää, kun liitos toteuttaa seuraavat ehdot [19]:

- ruuvit sijaitsevat laipassa putken ympäri tasaisin välein
- ruuvien lukumäärä on: $n \geq 4$
- ruuvin vapaareikien nimellisvälys on standardin EN 1090-2 normaalin pyöreän reijän mukainen
- reikien sijainti (kuva 3.14):
  $e_1 \geq 1{,}2 d_0$, missä d_0 = ruuvin reijän halkaisija
  $e_2 \geq 1{,}2 d_0$ ja $e_2 \leq 1{,}25 e_1$
  $2{,}4 d_0 \leq p_2 \leq \min[14 t_p ; 200 \text{ mm}]$

Vipuvoimien minimoimiseksi ja vastaavasti liitoksen kestävyyden maksimoimiseksi kannattaa mitta e_1 pitää mahdollisimman pienenä siten, että e_1 = (1,5 ... 2) $\times d_0$ (laipan hitsin ja ruuvin kannan väliin pitää jäädä kuitenkin vähintään 5 mm) ja mitaksi e_2 valitaan $e_2 \approx 1{,}25 e_1$ [19].

Liitoksen mitoitusehdot ovat [19]:

$$N_{1.Ed} \le \frac{t_p^2 f_{yp} \pi f_3}{2 \cdot \gamma_{M0}} \qquad \textit{laipan täydellinen myötääminen} \qquad (3.43)$$

$$N_{1.Ed} \le \frac{n \cdot 0,67 F_{t.Rd}}{1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \ln(r_1/r_2)}} \qquad \textit{ruuvien murtuminen kun laippa samalla myötää} \qquad (3.44)$$

$$N_{1.Ed} \le n \cdot F_{t.Rd} \qquad \textit{ruuvien vetokestävyys} \qquad (3.45)$$

$$N_{1.Ed} \le n \cdot B_{p.Rd} \qquad \textit{ruuvien lävistymiskestävyys} \qquad (3.46)$$

missä
- $N_{1.Ed}$ on putkessa vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo murtorajatilassa
- $F_{t.Rd}$ on yhden ruuvin vetokestävyys kaavan (3.38) mukaisesti
- $B_{p.Rd}$ on yhden ruuvin lävistymiskestävyys kaavan (3.39) mukaisesti
- n_p on ruvien lukumäärä
- t_p on laippalevyn paksuus
- f_{yp} on laippalevyn nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Lisäksi tulee tarkastaa rakenneputken ja laipan välisen hitsin kestävyys kohdan 3.3 mukaisesti.

Lausekkeeseen (3.44) on lisätty lähteestä [19] pois jäänyt pienennyskerroin 0,67, jolla otetaan huomioon ruuveihin kohdistuvat vipuvoimat [12].

Ehdoissa (3.43) - (3.44) tarvittavat parametrit lasketaan seuraavasti [19]:

$$f_3 = \frac{1}{2k_1}(k_3 - \sqrt{k_3^2 - 4k_1}) \qquad (3.47)$$

$$k_1 = \ln(r_1/r_3) \qquad (3.48)$$

$$k_3 = k_1 + 2 \qquad (3.49)$$

$$r_1 = \frac{d_1}{2} + e_1 + e_{eff} \qquad (3.50)$$

$$r_2 = \frac{d_1}{2} + e_1 \qquad (3.51)$$

$$r_3 = \frac{d_1 - t_1}{2} \qquad (3.52)$$

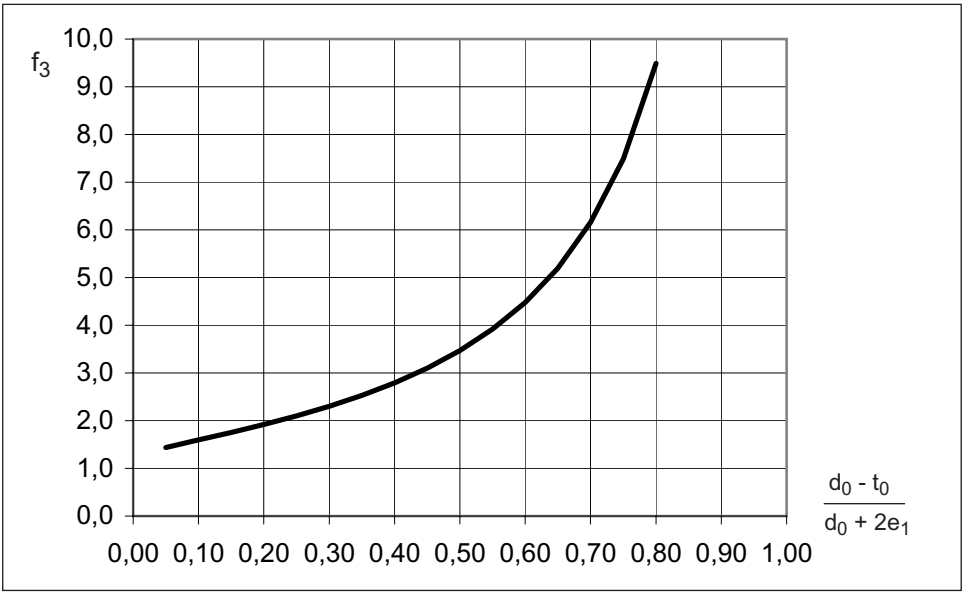
$$e_{eff} = min[e_2 ; 1{,}25 e_1] \qquad (3.53)$$

Dimensioton tekijä f_3 saadaan vaihtoehtoisesti kuvasta 3.15.

Vaadittavalle laipan paksuudelle ja ruuvien lukumäärälle voidaan ratkaista lausekkeet suoraan edellä esitetyistä ehdoista (3.43) - (3.44):

$$t_p \geq \sqrt{\frac{2 \cdot N_{1.Ed} \cdot \gamma_{M0}}{f_{yp} \pi f_3}} \qquad (3.54)$$

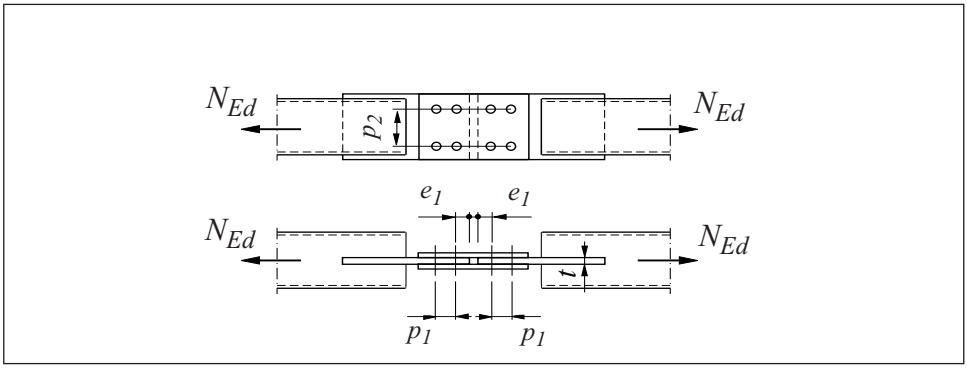
$$n \geq \frac{N_{1.Ed}}{0,67 F_{t.Rd}} \cdot \left[1 - \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_3 \ln(r_1 / r_2)} \right] \qquad (3.55)$$



Kuva 3.15 Laippaliitoksen muotoparametri f_3 pyöreillä rakenneputkilla

3.4.1.2 Limitetty vetoliitos

Limitetty vetoliitos sopii hyvin ristikon alapaarteen jatkosliitokseksi, koska kuormitus on levyjen suuntainen. Kun liitos toteutetaan kuvan 3.16 mukaisesti, liitoslevyillä ei ole lamellirepeilyvaaraa.



Kuva 3.16 Limitetty vetoliitos

Liitoksen kestävyys lasketaan tarkastelemalla erikseen ruuvien ja liitoslevyjen kestävyys. Ruuvit välittävät liitoksessa vaikuttavan voiman leikkauskestävyytensä avulla. Ruuvin leikkauskestävyys yhtä leikettä kohti lasketaan seuraavasti [4,5,6]:

- kun ruuvin kierteet ovat leikkautumistasossa:

$$F_{v.Rd} = 0,6 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \qquad \textit{ruuvin lujuusluokilla 4.6 , 5.6 , 8.8} \qquad (3.56)$$

$$F_{v.Rd} = 0,5 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} \qquad \textit{ruuvin lujuusluokilla 4.8 , 5.8 , 6.8 , 10.9} \qquad (3.57)$$

- kun ruuvin kierteet eivät ole leikkautumistasossa:

$$F_{v.Rd} = 0,6 f_{ub} A / \gamma_{M2} \qquad \textit{ruuvin kaikilla lujuusluokilla} \qquad (3.58)$$

missä
- $F_{v.Rd}$ on ruuvin leikkauskestävyys leikettä kohden
- f_{ub} on ruuvin murtolujuus
- A_s on ruuvin jännityspinta-ala (pinta-ala kierteiden kohdalla)
- A on ruuvin poikkipinta-ala varren kierteettömällä alueella
- γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Merkittävissä voimaa kantavissa leikkausliitoksissa on suositeltavaa käyttää aina osakierteisiä ruuveja siten, että leikkautumistaso on ruuvin varren kierteettömällä alueella. Sekundäärisissä liitoksissa (esim. porrasaskelmien kiinnittäminen reisilankkuun) voidaan käyttää täyskierteisiä ruuveja.

Jos ruuvien ja yhteenliitettävien osien toleransseista johtuen on vaarana, että kierteet menevät leikkautumistasoon, on järkevää tehdä laskelmat jo alunperin siten, että oletetaan kierteiden olevan leikkautumistasossa.

Liitoslevyjen osalta tarkastetaan:

- nettopoikkileikkauksen vetokestävyys $N_{t.Rd}$
- ruuviliitoksen reunapuristuskestävyys $F_{b.Rd}$
- ruuviliitoksen palamurtumiskestävyys $V_{eff.Rd}$

Liitoslevyn nettopoikkileikkauksen vetokestävyys voidaan laskea samalla periaatteella kuin rakenneputken vetokestävyys (kohta 2.5.1).

Liitoslevyn reunapuristuskestävyys riippuu myös reikien sijainnista ja ruuvien lujuudesta seuraavasti [4,5,6]:

$$F_{b.Rd} = k_1 \alpha_b f_u d t / \gamma_{M2} \qquad (3.59)$$

missä f_u on tarkasteltavan osan nimellinen murtolujuus
d on ruuvin nimellishalkaisija
t on tarkasteltavan osan paksuus
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Lausekkeessa (3.59) tarvittavat tekijät k_1 ja α_b määritetään seuraavasti:

- voiman suunnassa:

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_u}\ ;\ \frac{e_1}{3d_0}\right] \qquad \textit{levyn pään ruuveille} \qquad (3.60a)$$

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_u}\ ;\ \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}\right)\right] \qquad \textit{sisemmille ruuveille} \qquad (3.60b)$$

- voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa:

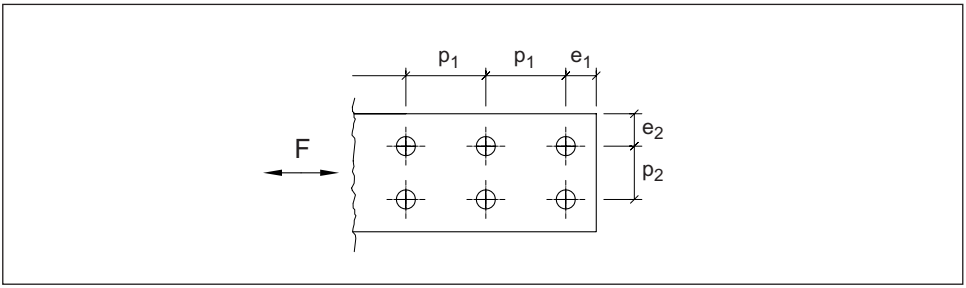
$$k_1 = min\left[2,5\ ;\ \left(2,8\frac{e_2}{d_0} - 1,7\right)\ ;\ \left(1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7\right)\right] \qquad \textit{reunarivin ruuveille} \qquad (3.60c)$$

$$k_1 = min\left[2,5\ ;\ \left(1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7\right)\right] \qquad \textit{sisemmille ruuveille} \qquad (3.60d)$$

missä f_u on tarkasteltavan osan nimellinen murtolujuus
f_{ub} on ruuvin nimellinen murtolujuus
d_0 on ruuvin reijän nimellishalkaisija
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)
e_1, p_1 sekä e_2, p_2 ovat ruuvin reikien sijainnit voiman suunnassa ja voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa kuvan 3.17 mukaisesti

Reikien sijoittelun minimietäisyydet on esitetty taulukossa 3.15.

Väsytyskuormitetuille rakenteille reikien pienimmät keskiövälit sekä reuna- ja päätyetäisyydet on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-9 [8,9,10].



Kuva 3.17 Kiinnittimien välisten etäisyyksien merkinnät [4,5,6]

Taulukko 3.15 Vaatimukset reikien minimietäisyyksille [4,5,6]

Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli (ks. kuva 3.17)	Minimiarvo
Päätyetäisyys e_1	$1{,}2d_0$
Reunaetäisyys e_2	$1{,}2d_0$
Keskiöväli p_1	$2{,}2d_0$
Keskiöväli p_2	$2{,}4d_0$
Väsytyskuormitetuille rakenteille reikien pienimmät keskiövälit ja reuna- ja päätyetäisyydet on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-9.	

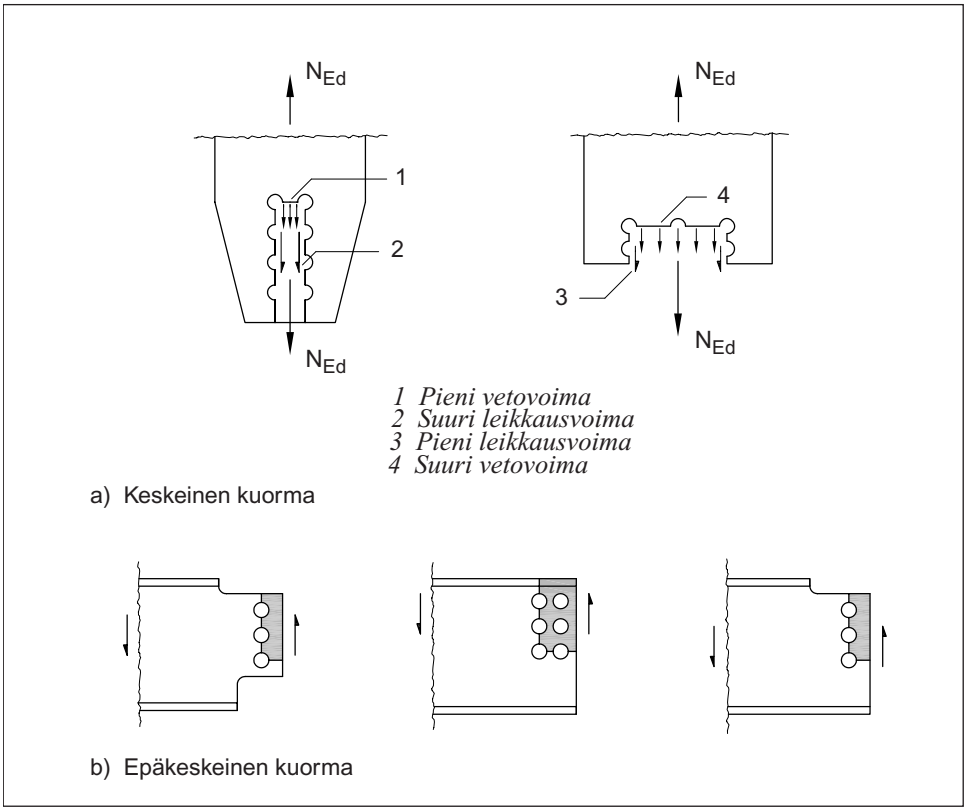
Ruuviryhmä voi murtua liitoslevyn tai profiilin päässä kuvan 3.18 mukaisesti. Kyseessä on palamurtuminen, joka aiheutuu perusaineen vetomurtumisesta vedon kuormittamassa pinnassa samalla kun leikkauksen kuormittama pinta myötää leikkautumalla. Murtuminen tapahtuu nettopoikkileikkauksessa pitkin ruuvien keskilinjoja. Palamurtuminen voi määrätä liitoksen kestävyyden, kun käytetään korkeaa teräslujuutta ja pieniä ruuvien reunaetäisyyksiä.

Palamurtumiskestävyys lasketaan seuraavista kaavoista [4,5,6]:

$$V_{eff.1.Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0} \qquad \textit{keskeinen kuorma (kuva 3.19 a)} \qquad (3.61)$$

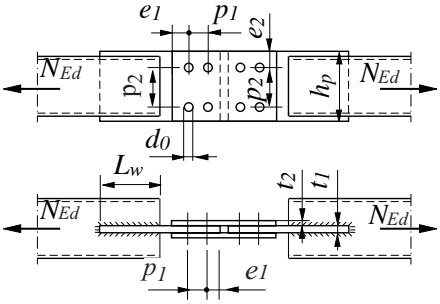
$$V_{eff.2.Rd} = 0{,}5 f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_y A_{nv} / \gamma_{M0} \qquad \textit{epäkeskeinen kuorma (kuva 3.19 b)} \qquad (3.62)$$

missä
- f_u on tarkasteltavan osan nimellinen murtolujuus
- f_y on tarkasteltavan osan nimellinen myötölujuus
- A_{nt} on vedon kuormittama nettopinta-ala (kuva 3.18)
- A_{nv} on leikkauksen kuormittama nettopinta-ala (kuva 3.18)
- γ_{M2} ja γ_{M0} ovat kestävyyden osavarmuuslukuja (taulukko 2.5)



Kuva 3.18 Palamurtuminen [4,5,6]

Esimerkki 3.14



Lasketaan oheisen liitoksen vetokestävyys. Liitoslevyjen teräslaji on S355J2. Ruuvit M24 ovat lujuusluokkaa 8.8. Käytetään osakierteisiä ruuveja joiden pituudet valitaan siten, että kierteet eivät ole leikkautumistasossa. Oletetaan, että ruuvikiinnitysluokka on muu kuin luokka C.

Rakenneputki on 150×150×6. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

$A = 3363\ mm^2$ *(liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$ *putken myötölujuus*
$f_u = 500\ N/mm^2$ *putken murtolujuus*
$f_{yp} = 355\ N/mm^2$ *liitoslevyjen myötölujuus*
$f_{up} = 490\ N/mm^2$ *liitoslevyjen murtolujuus*
$f_{ub} = 800\ N/mm^2$ *ruuvin murtolujuus*
$\gamma_{M0} = 1{,}0$
$\gamma_{M2} = 1{,}25$

Liitoksen geometrian parametrit ovat:

$t_1 = 20\ mm$
$t_2 = 10\ mm$
$h_p = 170\ mm$
$d = 24\ mm$
$d_0 = 26\ mm$
$e_1 = 40\ mm$
$e_2 = 45\ mm$
$p_1 = p_2 = 80\ mm$

Tarkastetaan vaatimukset reikien sijainnille:

$e_1 = 40\ mm \geq 1,2d_0 = 31,2\ mm$ *OK*

$e_2 = 45\ mm \geq 1,2d_0 = 31,2\ mm$ *OK*

$p_1 = 80\ mm \geq 2,2d_0 = 57,2\ mm$ *OK*

$p_2 = 80\ mm \geq 2,4d_0 = 62,4\ mm$ *OK*

A. Rakenneputken poikkileikkauksen vetokestävyys:

$$N_{t.Rd} = N_{pl.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{3363 \cdot 420}{1,0} = 1412\ kN$$

B. Ruuvien leikkauskestävyys:

Ruuvin leikkauskestävyys, kun kierteet eivät ole leikkautumistasossa:

$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 24^2}{4} = 452\ mm^2$ *M24 ruuvin kierteettömän osan poikkipinta-ala*

$F_{v.Rd} = 0,6 f_{ub} A / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 800 \cdot 452 / 1,25 = 173,6\ kN$ *yhtä leikkauspintaa kohti*

Liitos on kaksileikkeinen (keskimmäisen levyn osalta), joten yhden ruuvin leikkauskestävyydeksi saadaan:

$F_{v.Rd} = 2 \cdot 173,6 = 347,2\ kN$

Ruuveja on 4 kpl, joten koko liitoksen leikkauskestävyys on:

$F_{v.Rd} = 4 \cdot 347,2 = 1389\ kN$

C. Keskimmäinen liitoslevy:

Nettopoikkileikkauksen vetokestävyys:

Liitoslevyjä voidaan tarkastella kuten vedettyjä poikkileikkauksia. Siten saadaan reijällisen poikkileikkauksen kestävyys kaavoista (2.15) ja (2.16):

$A = t_1 h_p = 20 \cdot 170 = 3400\ mm^2$

$A_{net} = t_1 (h_p - 2d_0) = 20 \cdot (170 - 2 \cdot 26) = 2360\ mm^2$

$$N_{t.Rd} = N_{pl.Rd} = \frac{Af_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{3400 \cdot 355}{1,0} = 1207\ kN$$

$$N_{t.Rd} = N_{u.Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_{up}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 2360 \cdot 490}{1,25} = 832,6\ kN$$

Keskimmäisen liitoslevyn vetokestävyyden määrää siis sen nettopoikkileikkauksen vetokestävyys 832,6 kN

Reunapuristuskestävyys:

Liitoslevyn ruuvikiinnitysten reunapuristuskestävyys on esimerkkiliitoksen reikien sijoittelulla:

voiman suunnassa:

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_{up}}\ ;\ \frac{e_1}{3d_0}\right] = min[1,0\ ;\ 1,633\ ;\ 0,5128\ ] = 0,5128 \quad \text{levyn pään ruuvit}$$

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_{up}}\ ;\ \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}\right)\right] = min[1,0;1,633;0,7756\ ] = 0,7756 \text{ sisemmät ruuvit}$$

voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa (nyt kaikki ruuvit ovat reunarivin ruuveja):

$$k_1 = min\left[2,5\ ;\ \left(2,8\frac{e_2}{d_0} - 1,7\right)\ ;\ \left(1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7\right)\right] = min[2,5\ ;\ 3,146\ ;\ 2,608] = 2,5$$

Reunapuristuskestävyyksiksi eri ruuveille saadaan nyt:

$$F_{b.Rd} = k_1\alpha_b f_u dt/\gamma_{M2} = 2,5 \cdot 0,5128 \cdot 490 \cdot 24 \cdot 20/1,25 = 241,2\ kN \quad \text{levyn pään ruuvit}$$

$$F_{b.Rd} = k_1\alpha_b f_u dt/\gamma_{M2} = 2,5 \cdot 0,7756 \cdot 490 \cdot 24 \cdot 20/1,25 = 364,8\ kN \quad \text{sisemmät ruuvit}$$

Koko ruuviryhmän kestävyys määritetään yksittäisten ruuvien reunapuristuskestävyyksien mitoitusarvojen $F_{b.Rd}$ summana edellyttäen, että jokaisen yksittäisen ruuvin leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{v.Rd}$ on suurempi tai yhtä suuri kuin vastaavan yksittäisen ruuvin reunapuristuskestävyyden $F_{b.Rd}$ mitoitusarvo. Muussa tapauksessa ruuviryhmän kestävyys määritetään kertomalla ruuvien lukumäärä kiinnitinryhmän pienimmällä yksittäisen ruuvin kestävyyden mitoitusarvolla, joka on $F_{b.Rd}$ tai $F_{v.Rd}$ sen mukaan, kumpi on pienempi [4,5,6].

Nähdään, että sisempien ruuvien osalta ruuvin leikkauskestävyys 347,2 kN jää pienemmäksi kuin reunapuristuskestävyys 364,8 kN, joten koko liitoksen kestävyyttä ei voida nyt määrittää reunapuristuskestävyyksien summana.

⇒ koko liitoksen kestävyys saadaan tässä kertomalla ruuvien lukumäärä kiinnitinryhmän pienimmällä yksittäisen ruuvin kestävyyden mitoitusarvolla, eli:

$$4 \cdot 241,2 = 964,8\ kN$$

Palamurtumiskestävyys:

Palamurtumiskestävyys lasketaan tässä neljän ruuvin muodostamalle palalle.

Leikkauksen kuormittama nettopinta-ala:

$$A_{nv} = 2t_1(e_1 + p_1 - d_0 - d_0/2) = 2 \cdot 20 \cdot (40 + 80 - 26 - 26/2) = 3240\ mm^2$$

Vedon kuormittama nettopinta-ala:

$$A_{nt} = t_1(p_2 - d_0) = 20 \cdot (80 - 26) = 1080\ mm^2$$

Palamurtumiskestävyys keskeiselle (veto)kuormalle:

$$V_{eff.1.Rd} = f_{up} A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_{yp} A_{nv} / \gamma_{M0}$$
$$= 490 \cdot 1080 / 1,25 + (1/\sqrt{3}) \cdot 355 \cdot 3240 / 1,0 = 1087\ kN$$

D. Ulommaiset liitoslevyt:

Ulommaisissa liitoslevyissä ruuvien reunaetäisyydet ovat tässä esimerkissä samat kuin keskimmäisessä liitoslevyssä, joten voidaan suoraan hyödyntää keskimmäiselle liitoslevylle edellä laskettuja kestävyyksiä.

Nettopoikkileikkauksen vetokestävyys:

$$N_{t.Rd} = \frac{t_2}{t_1} \cdot 832,6 = \frac{10}{20} \cdot 832,6 = 416,3\ kN$$

⇒ *kahdelle levylle kestävyys on yhteensä 832,6 kN*

Reunapuristuskestävyys:

$$F_{b.Rd} = \frac{t_2}{t_1} \cdot 241,2 = \frac{10}{20} \cdot 241,2 = 120,6\ kN \quad \text{per ruuvi (levyn pään ruuvit)}$$

$$F_{b.Rd} = \frac{t_2}{t_1} \cdot 364,8 = \frac{10}{20} \cdot 364,8 = 182,4\ kN \quad \text{per ruuvi (sisemmät ruuvit)}$$

Nähdään, että sisempien ruuvien osalta ruuvin leikkauskestävyys 173,6 kN (ulommaisten levyjen osalta kyseessä on yksileikkeinen liitos) jää pienemmäksi kuin reunapuristuskestävyys 182,4 kN, joten koko liitoksen kestävyyttä ei voida nyt määrittää reunapuristuskestävyyksien summana.

⇒ *koko liitoksen kestävyys saadaan tässä kertomalla ruuvien lukumäärä kiinnitinryhmän pienimmällä yksittäisen ruuvin kestävyyden mitoitusarvolla, eli:*

$4 \cdot 120,6 = 482,4\ kN$

⇒ *kahdelle levylle kestävyys on yhteensä 964,8 kN*

Palamurtumiskestävyys:

$$V_{eff.1.Rd} = \frac{t_2}{t_1} \cdot 1087 = \frac{10}{20} \cdot 1087 = 543,5\ kN$$

⇒ *kahdelle levylle kestävyys on yhteensä 1087 kN*

E. Hitsien kestävyys:

Valitaan kaksipuoleisen pienahitsin a-mitaksi a = 5 mm, joka pystytään hitsaamaan yhtenä hitsipalkona.

Edellä saatujen tulosten mukaan liitoksen kestävyyden määrää liitoslevyjen nettoleikkauksen vetokestävyys $N_{t.Rd}$ = 832,6 kN (= ulommaisten levyjen yhteenlaskettu kestävyys = keskimmäisen levyn kestävyys).

Mitoitetaan siis hitsin pituus L_w (ks. kuva) siten, että hitsi on vähintään tasaluja liitoslevyjen vetokestävyyden $N_{t.Rd}$ = 832,6 kN suhteen.

Liitoksen vetokuormitus N_{Ed} aiheuttaa hitseihin nyt pelkkää leikkausjännitystä. Sovelletaan hitsin mitoitukseen kaavaa (3.22).

$\sigma_\perp = 0$ *(* $\Rightarrow$ *ehtoa (3.23) ei tarvitse tässä tarkastaa)*

$\tau_\perp = 0$

$$\tau_{II} = \frac{N_{t.Rd}/4}{A_w} = \frac{N_{t.Rd}}{4L_w a}$$

$$\sqrt{\sigma_\perp^2 + 3(\tau_\perp^2 + \tau_\parallel^2)} = \sqrt{0 + 3 \cdot (0 + \tau_\parallel^2)} = \sqrt{3}\tau_\parallel \le \frac{f_{uw}}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

Nyt voidaan ratkaista vaadittava hitsin pituus:

$$L_w \ge \frac{N_{t.Rd}}{4a} \cdot \frac{\beta_w \gamma_{M2}}{f_{uw}/\sqrt{3}}$$

Hitsin murtolujuutena käytetään laskelmissa heikomman liitettävän osan murtolujuutta [4,5,6]:

$f_{uw} = min[f_u ; f_{up}] = min[500 ; 490] = 490\ N/mm^2$ *(= S355)*

$\beta_w = 0,9$ *(hitsin lujuuskerroin, taulukko 3.8)* *(= S355)*

Vaadittavaksi hitsin pituudeksi saadaan:

$$L_w \ge \frac{N_{t.Rd}}{4a} \cdot \frac{\beta_w \gamma_{M2}}{f_{uw}/\sqrt{3}} = \frac{832,6 \cdot 10^3}{4 \cdot 5} \cdot \frac{0,9 \cdot 1,25}{490/\sqrt{3}} = 165,5\ mm$$

$\Rightarrow$ *valitaan* $L_w = 170\ mm$

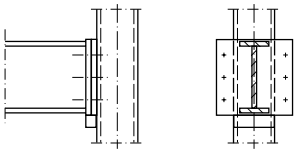
F. Liitoksen kestävyys:

Liitoslevyjen nettopoikkileikkauksen vetokestävyys määrää siis koko liitoksen kestävyyden: $N_{t.Rd}$ = 832,6 kN.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin rakenneputken osalta lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin edelleen liitoslevyjen nettopoikkileikkauksen vetokestävyyden määräämänä sama 832,6 kN, ja hitsin pituudeksi sama 170 mm. Putken materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 ei siis tässä esimerkissä vaikuta liitoksen kestävyyteen.

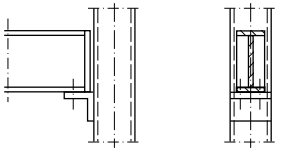
3.4.2 Palkin ja pilarin väliset ruuviliitokset

Rakenneputki tai I-profiili voidaan liittää rakenneputkipilariin monin eri tavoin, joita on esitelty kuvissa 3.19 - 3.25. Liitoksen tekeminen jäykäksi edellyttää päätylevyjen käyttöä, jolloin palkkien pituustoleranssi on tiukempi. Moniaukkoisissa rakenteissa pituuden vaihtelut saattavat kertautua, jolloin yhdellä jännevälillä pituuspoikkeama täytyy tasata välilevyjen avulla. Joustavammat liitokset, joissa ruuvit välittävät leikkausvoimia, antavat enemmän säätövaraa. Joustavissa liitoksissa on muistettava tarkastella myös momentteja, jotka syntyvät leikkausvoiman epäkeskeisyydestä pilarin suhteen.



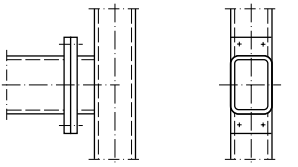
Kuva 3.19 I-palkin ja putkipilarin liitos, joka kantaa leikkaus-, taivutus- ja normaalivoimia. Liitoksen kestävyyden rajoittaa tavallisesti pilariuuman lommahdus tai plastisoituminen leikkautumalla.

Kuva 3.19



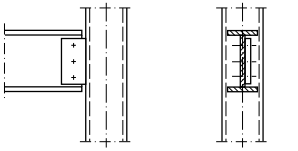
Kuva 3.20 Tavallinen I-profiilin liitos putkipilariin. Palkin pää on syytä jäykistää levyllä, jolloin leikkausvoima siirtyy kosketuspaineella tukikappaleen jäykkään kohtaan. Liitos soveltuu lähinnä palkeille, joilla on pieni leikkausvoima.

Kuva 3.20



Kuva 3.21 Liitos saadaan osittain jäykäksi, jos siinä käytetään hyvin jäykkiä päätylaippoja. Yleensä on kätevintä otaksua liitos nivelelliseksi ja ottaa ulokkeen taivutusmomentti huomioon pilarin mitoituksessa. Yksinkertaisuutensa ansiosta tällainen laippaliitos on suosittu ristikkorakenteissa. Monimutkaiset liitosdetaljit toteutetaan hitsaamalla. Yksinkertaiset, suorat sauvat liitetään nurkkapisteestä lähteviin konsoleihin laippaliitoksin. Pilarin ja konsolin välisen liitoksen jäykkyyden arvioiminen voidaan tehdä liitteen 11.4 avulla.

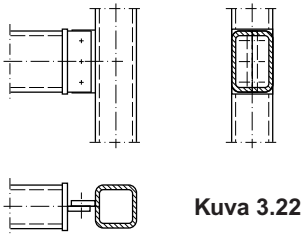
Kuva 3.21



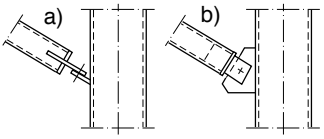
Kuva 3.22a

Kuva 3.22 Kuvien a ja b mukaiset liitokset ovat hyvin analogiset. Kun ruuviliitos toteutetaan tavanomaisena ruuvin varren leikkausvoimalla kantavana liitoksena, tekevät ruuvien ja reikien välykset liitoksesta taivutukseen nähden epämääräisen. Kitkaliitoksella saadaan voimasuureet siirtymään palkista kiinnityslevyyn jäykästi.

Jos liitosta rasittaa vain leikkausvoima, voidaan kiinnityslevy liittää suoraan pilarin laippaan. Taivutusmomenttia tai normaalivoimaa kantavassa liitoksessa pilarin laippa on tavallisesti jäykistettävä vahvikelevyllä.

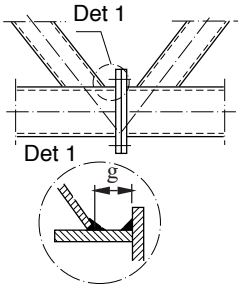


Kuva 3.22b



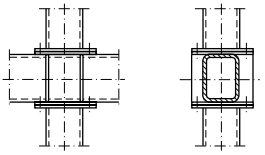
Kuva 3.23 Kuvissa a ja b on esitetty esimerkit vinositeen liitoksesta pilariin.

Kuva 3.23

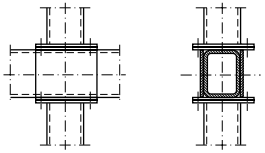


Kuva 3.24 Ristikon jatkosliitos. Diagonaaleja ei pidä liittää päätylaippoihin, vaan ne on liitettävä suoraan paarteeseen. Vapaaväli g määritetään tällöin uumasauvasta päätylaippaan ja sen on täytettävä liitteen 11.3 laskentataulukoiden vaatimukset.

Kuva 3.24



Kuva 3.25a



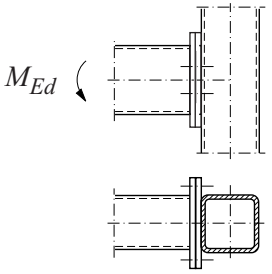
Kuva 3.25b

Kuva 3.25 Kuvat a ja b esittävät palkki-pilariliitoksia, kun palkki viedään pilarin ohi jatkuvana. Tällaisen liitoksen toiminnassa on olennaista, että rakenteen asennuksen ja käytön aikaiset kuormat ovat lähes symmetriset. Pilarin on oltava riittävän vahva taivutukseen nähden, kun palkeilta tulevat taivutusmomentit ja leikkausvoimat ovat erisuuruisia. Pilarin laippaliitos käsitellään nurjahdukseen nähden nivelenä ellei liitoksen jäykkyyttä lisätä erikoistoimenpitein.

3.4.2.1 Rakenneputken taivutusmomentin kuormittama laippaliitos

Laippaliitos pystyy siirtämään sekä taivutusmomenttia että leikkausvoimaa. Taivutuskestävyyden laskennassa liitos jaetaan osiin, joista kriittisin määrää koko liitoksen taivutuskestävyyden. Tarkasteltavia liitoksen osa-alueiden kestävyyksiä ovat:

- pilarin uuman taivutuskestävyys
- pilarin uuman leikkauskestävyys
- laippojen ja ruuvien vetokestävyys
- liitoksen hitsien kestävyydet



Kuva 3.26 Rakenneputkien laippaliitos

Liitoksen hitsit mitoitetaan kohdan 3.3 mukaisesti. Taivutusmomentin kuormittamissa hitsatuissa liitoksissa hitsit tulee mitoittaa siten, että liitoksen taivutuskestävyys määräytyy aina muiden liitoksen osa-alueiden kuin hitsien perusteella [4,5,6]. Varmalla puolella oleva yksinkertaistus on mitoittaa hitsit aina vähintään tasalujiksi liitettävien rakenneputkien kanssa.

Taivutusmomentin kuormittaman laippaliitoksen muiden osa-alueiden kestävyydet tarkastetaan seuraavasti:

Pilarin uuman taivutuskestävyys

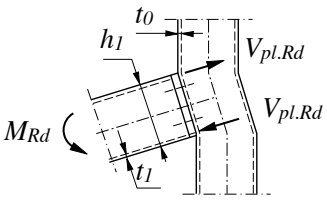
Pilarin uuman taivutuskestävyyttä voidaan arvioida rakenneputkien hitsattujen ristikkoliitosten kaavoilla, jolloin pilaria tarkastellaan paarresauvana (taulukko 11.3.11). Tällöin on muistettava varmistaa, että pilari täyttää rakenneputkien hitsatuille ristikkoliitoksille ja kestävyystaulukossa paarteelle esitetyt vaatimukset. Pilarin kylkeen kaikilta neljältä sivulta hitsattu laippalevy edustaa nyt paarteen kanssa samanlevyistä uumasauvaa, jolloin taulukosta saadaan pilarin (eli paarteen) uumien taivutuskestävyydeksi:

$$M_{ip.1.Rd} = 0,5 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot (h_1 + 5t_0)^2 / \gamma_{M5} \qquad (3.63)$$

missä h_1 on palkin poikkileikkauksen korkeus
(varmalla puolella oleva yksinkertaistus)
t_0 on pilarin seinämänpaksuus
f_{y0} on pilarin nimellinen myötölujuus
γ_{M5} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Pilarin uuman leikkauskestävyys

Pilarin leikkauskestävyys täytyy myös tarkastaa, koska momenttikuormitus siirtyy palkin laipoilta pilarin leikkausvoimaksi. Oletetaan, että pilarilla ei ole ulkoista leikkauskuormaa, jolloin pilarin leikkausvoima muodostuu vain liitoksen kuormituksesta. Liitoksen taivutuskestävyys leikkauksen suhteen saadaan kertomalla pilarin uumien leikkauskestävyys palkin korkeudella:



Kuva 3.27 Liitoksen taivutuskestävyyden laskentamalli pilarin uuman leikkauskestävyyden määräämänä

$$M_{Rd} = V_{pl.Rd}(h_1 - t_1) = A_V \cdot \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} \cdot (h_1 - t_1) \qquad (3.64)$$

missä $V_{pl.Rd}$ on pilarin plastisen leikkauskestävyyden mitoitusarvo
A_V on pilarin leikkauspinta-ala kohdan 2.7.1.1 mukaisesti

h_1 on palkin poikkileikkauksen korkeus
(varmalla puolella oleva yksinkertaistus)
t_1 on palkin laipan paksuus
f_{y0} on pilarin nimellinen myötölujuus
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

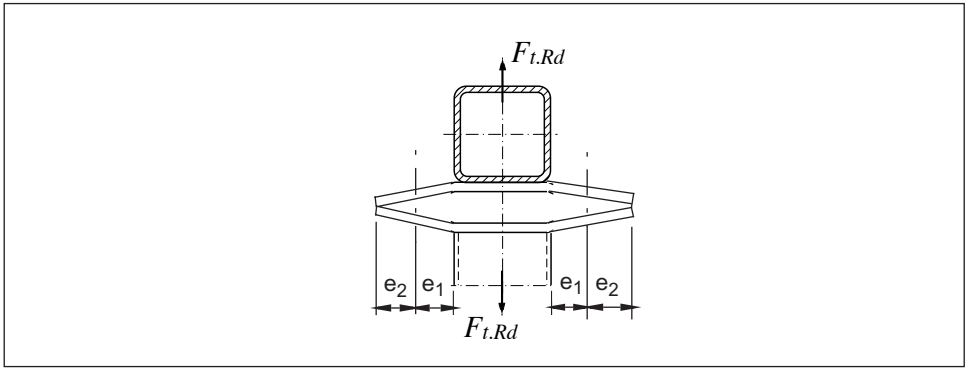
Koska taivutuskestävyyden lauseke (3.64) perustuu pilarin plastiseen leikkauskestävyyteen, tulee pilarien uumien hoikkuuden toteuttaa plastisen leikkauskestävyyden käytölle kohdassa 2.7.1 esitetyt ehdot. Tällöin pilarin uumalla voidaan katsoa myös olevan riittävä kiertymiskyky, jos rakenteelle halutaan käyttää plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä.

Laippojen ja ruuvien vetokestävyys

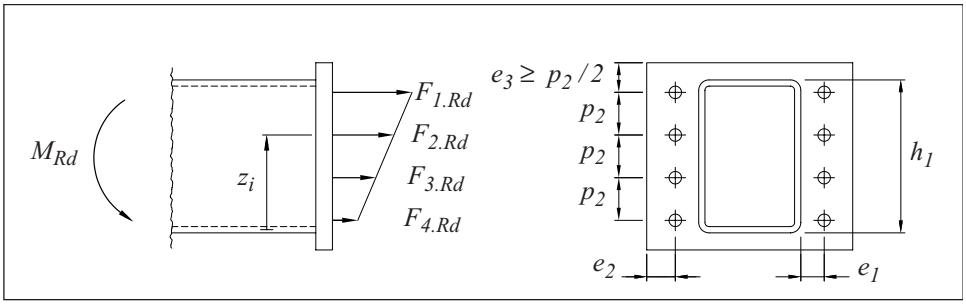
Vedettyjen laippojen ja ruuvien kestävyys voidaan laskea perustuen samaan laskentamalliin, joka on esitetty vedetylle laippaliitokselle kohdassa 3.4.1.1.1, kun liitoksen geometria toteuttaa siinä esitetyt vaatimukset. Liitoksen tarkastelu jaetaan tällöin kahteen osaan (palkki ja laippa, sekä pilari ja laippa), joista heikomman vetokestävyys määrää laippaliitoksen taivutuskestävyyden (ks. kuva 3.28).

Laippaliitoksen ja sen ruuvien kannalta tarkastelua voidaan yksinkertaistaa otaksumalla että kyseessä on taivutusmomentin kuormittama kahden palkin pään laippaliitos, jossa pilarin tilalle ajatellaan palkin poikkileikkauksen korkuinen mutta pilarin levyinen rakenneputki (varmalla puolella oleva yksinkertaistus).

Liitokseen kohdistuu yleensä myös leikkausvoimaa, jolloin alin ruuvirivi (tai tarvittava määrä alimpia ruuvirivejä) voidaan varata laskennallisesti pelkän leikkausvoiman kantamiseen. Jäljelle jäävät ruuvirivit kantavat tällöin laskennallisesti pelkän taivutusmomentin, jolloin varmalla puolella oleva yksinkertaistus on jakaa ruuvivoimat eri ruuviriveille kimmoteorian mukaisesti (kimmoteoriaa voidaan käyttää aina). Ylimmän ruuvirivin saavuttaessa vetokestävyytensä, muissa ruuviriveissä samanaikaisesti vaikuttava voima jakautuu suhteessa etäisyyteen puristuskeskiöstä kuvan 3.29 mukaisesti. Puristuskeskiön otaksutaan sijaitsevan palkin puristetun laipan seinämänpaksuuden keskellä.



Kuva 3.28 Laippaliitoksen laskentamalli



Kuva 3.29 Ruuvivoimien jakautuminen eri ruuviriveille kimmoteorian mukaisesti

Ylimmän ruuvirivin vetokestävyys lasketaan seuraavasti:

$$F_{1.Rd} = \frac{t_p^2(1 + \delta\alpha_{Rd})n}{K} \qquad (3.65)$$

missä n = 2 on ylimmän ruuvirivin ruuvien lukumäärä

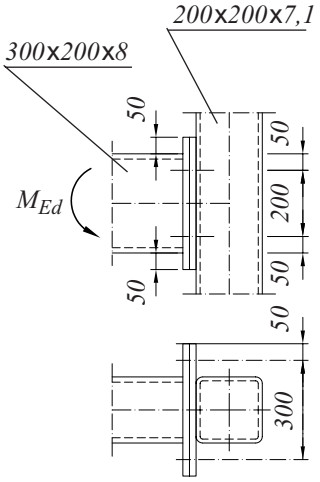
Muut lausekkeessa (3.65) tarvittavat tekijät lasketaan kohdan 3.4.1.1.1 mukaisesti, mutta ruuvissa vaikuttavat voima $F_{t.Ed}$ korvataan ruuvin vetokestävyydellä $F_{t.Rd}$.

Liitoksen (palkki ja laippa, tai pilari ja laippa) taivutuskestävyys saadaan nyt lausekkeesta:

$$M_{Rd} = F_{1.Rd}\, z_1 + \sum F_{i.Ed}\, z_i \qquad (3.66)$$

missä z_i on kyseessä olevan ruuvirivin etäisyys puristuskeskiöstä, jonka otaksutaan sijaitsevan palkin puristetun laipan seinämänpaksuuden keskellä, ks. kuva 3.29.

Esimerkki 3.15



Lasketaan kuvan mukaisen laippaliitoksen taivutuskestävyys. Laippojen paksuudeksi valitaan 20 mm. Laippojen teräslaji on S355J2. Ruuvit M22 ovat lujuusluokkaa 8.8.

Pilarina on rakenneputki 200×200×7,1 ja palkkina rakenneputki 300×200×8. Putket ovat teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

f_y = 420 N/mm^2 *putken myötölujuus*
f_u = 500 N/mm^2 *putken murtolujuus*
f_{yp} = 355 N/mm^2 *laipan myötölujuus*
f_{up} = 490 N/mm^2 *laipan murtolujuus*
f_{ub} = 800 N/mm^2 *ruuvin murtolujuus*
γ_{M0} = 1,0
γ_{M2} = 1,25
γ_{M5} = 1,0

Laipan reikien sijainnin parametrit ovat:
d = 22 mm
d_0 = 24 mm
p_2 = 200 mm
e_1 = 50 mm
e_2 = 50 mm
e_3 = 100 mm (ks. kuva 3.29)

Putkien poikkileikkausten kestävyydet taivutukselle ovat:
300×200×8: $M_{pl.Rd}$ = 318,0 kNm (liite 11.1)
200×200×7,1: $M_{pl.Rd}$ = 159,3 kNm (liite 11.1)

Tavallisesti liitoksessa on lisäksi leikkausvoimaa, joka on otettava huomioon liitosta mitoitettaessa, joten varataan alimmainen ruuvirivi mahdollisen leikkausvoiman kantamiseen ja lasketaan taivutuskestävyys pelkästään ylimmän ruuvirivin perusteella (alimman ruuvirivin merkitys taivutuskestävyydelle olisi joka tapauksessa varsin vähäinen, vain noin 4 %).

A. Pilarin uuman taivutuskestävyys:

Pilarin uuman taivutuskestävyys lasketaan ristikkoliitosten taivutuskaavoilla, jolloin pilarin tulee täyttää kyseeseen tulevassa kestävyystaulukossa (liite 11.3.11) paarteelle esitetyt vaa-

timukset. Todettakoon, että esimerkin pilari toteuttaa kyseiset vaatimukset, mutta niiden tarkastamista ei esitetä tässä.

Pilarin uuman taivutuskestävyydeksi saadaan:

$$M_{ip.1.Rd} = 0,9 \cdot 0,5 f_{y0} t_0 (h_1 + 5t_0)^2 / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$
$$= 0,9 \cdot 0,5 \cdot 420 \cdot 7,1 \cdot (300 + 5 \cdot 7,1)^2 / 1,0 = 151,0 \text{ kNm}$$

B. Pilarin uuman leikkauskestävyys:

Pilarin uuman leikkauskestävyys lasketaan luvussa 2 esitetyllä tavalla.
Tarkastetaan uuman hoikkuusvaatimus plastisen leikkauskestävyyden kannalta:

$$\frac{h}{t} = \frac{200}{7,1} = 28,2 \le \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72 \cdot \sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,9 \quad OK$$

$A = 5305 \text{ mm}^2$ *pilarin poikkipinta-ala*

$$A_V = A \cdot \frac{h}{b+h} = 5305 \cdot \frac{200}{200+200} = 2653 \text{ mm}^2$$ *pilarin leikkauspinta-ala*

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 2653 \cdot \frac{420/\sqrt{3}}{1,0} = 643,3 \text{ kN}$$ *pilarin plastinen leikkauskestävyys*

Pilarin uuman leikkauskestävyyden ja palkin korkeuden perusteella saadaan liitoksen taivutuskestävyydeksi nyt:

$$M_{Rd} = V_{pl.Rd}(h_1 - t_1) = 643,3 \cdot 10^3 \cdot (300 - 8) = 187,8 \text{ kNm}$$

C. Laippojen ja ruuvien kestävyys:

C.1 Palkin ruuvit ja laippa:

<u>Ruuvien kestävyys</u>:

Yhden ruuvin vetokestävyys on:

$A_s = 303 \text{ mm}^2$ *M22 ruuvin jännityspinta-ala (eli kierteellisen osan pinta-ala)*

$$F_{t.Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 303}{1,25} = 174,5 \text{ kN}$$

Lasketaan ruuvin lävistymiskestävyys valitulla laipan paksuudella:

$d_m = 35,7 \text{ mm}$ *(M22 ruuvin kannan tai mutterin lävistymishalkaisija)*

$$B_{p.Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot \pi \cdot 35,7 \cdot 20 \cdot 490 / 1,25 = 527,6 \text{ kN}$$

$\Rightarrow$ *ruuvien kestävyyden määrää niiden vetokestävyys 174,5 kN*

Laippaliitoksen kestävyys:

Tarkastetaan vaatimukset reikien sijainnille:

$e_1 = 50\ mm \geq 1{,}2d_0 = 28{,}8\ mm \quad OK$

$e_2 = 50\ mm \geq 1{,}2d_0 = 28{,}8\ mm \quad OK$

$e_2 = 50\ mm \leq 1{,}25e_1 = 62{,}5\ mm \quad OK$

$e_3 = 100\ mm \geq p_2 / 2 = 100\ mm \quad OK$

$p_2 = 200\ mm \geq 2{,}4d_0 = 57{,}6\ mm \quad OK$

$p_2 = 200\ mm \leq min[14t_p\ ;\ 200\ mm] = min[280\ mm\ ;\ 200\ mm] = 200\ mm \quad OK$

Tarkastetaan vaatimus ruuvien lukumäärälle:

$$4 \leq n = 4 \leq 2(h_1/p_2) + 2 = 2 \cdot (300/200) + 2 = 5 \quad OK$$

Lasketaan tarvittavat apusuureet:

$$\delta = 1 - \frac{d_0}{p_2} = 1 - \frac{24}{200} = 0,88$$

$$b' = e_1 - 0,5d + t_1 = 50 - 0,5 \cdot 22 + 8 = 47\ mm$$

$$K = \frac{4b'}{0,9 \cdot (f_{yp}/\gamma_{M0}) \cdot p_2} = \frac{4 \cdot 47}{0,9 \cdot (355/1,0) \cdot 200} = 2,942 \cdot 10^{-3}\ mm^2/N$$

Tarkastetaan vaatimukset laipan paksuudelle:
koska ruuviin kohdistuvaa vaikuttavaa voimaa ei nyt tunneta vaan tehtävänä on määrittää liitoksen kestävyys murtorajatilassa, oletetaan että ruuviin vaikuttava voima $F_{t.Ed}$ on ruuvin vetokestävyyden $F_{t.Rd} = 174{,}5\ kN$ suuruinen

laipan paksuuden minimi- ja maksimiarvoiksi saadaan tällöin:

$$\sqrt{\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{1+\delta}} \leq t_p \leq \sqrt{K \cdot F_{t.Rd}}$$

$$\sqrt{\frac{2,942 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^3}{1+0,88}} \leq t_p \leq \sqrt{2,942 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^3}$$

$$16,5\ mm \leq t_p \leq 22,7\ mm$$

$$\Rightarrow t_p = 20\ mm = OK$$

Laippaliitoksen ylimmän ruuvirivin vetokestävyydeksi saadaan nyt:

$$\alpha_{Rd} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{t_p^2} - 1 \right) \cdot \left[\frac{e_2 + 0,5d}{\delta \cdot (e_2 + e_1 + t_1)} \right]$$

$$= \left(\frac{2,942 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^3}{20^2} - 1 \right) \cdot \left[\frac{50 + 0,5 \cdot 22}{0,88 \cdot (50 + 50 + 8)} \right] = 0,1819 \geq 0$$

$$F_{1.Rd} = \frac{t_p^2 (1 + \delta \alpha_{Rd}) n}{K} = \frac{20^2 \cdot (1 + 0,88 \cdot 0,1819) \cdot 2}{2,942 \cdot 10^{-3}} = 315,5 \text{ kN} \quad \textit{(ylin ruuvirivi: n=2)}$$

Palkin puoleisen laippaliitoksen osalta liitoksen taivutuskestävyydeksi saadaan (kun alin ruuvirivi säästetään mahdolliselle leikkausvoimalle):

$z_1 = 200 + 50 - 8/2 = 246$ mm *(ylimmän ruuvirivin etäisyys puristuskeskiöstä)*

$$M_{Rd} = F_{1.Rd} z_1 + \sum F_{i.Ed} z_i = 315,5 \cdot 10^3 \cdot 246 + 0 = 77,6 \text{ kNm}$$

C.2 Pilarin ruuvit ja laippa:

Koska laippalevyn paksuus on sama kuin palkin laippalevyllä, voidaan suoraan hyödyntää edellä kohdassa C.1 laskettuja arvoja.

<u>Ruuvien kestävyys</u>:

Sama kuin edellä kohdassa C.1.

<u>Laippaliitoksen kestävyys</u>:

Vaatimukset reikien sijainnille ja ruuvien lukumäärällä on jo tarkastettu kohdassa C.1.

Lasketaan tarvittavat apusuureet:

$$\delta = 1 - \frac{d_0}{p_2} = 1 - \frac{24}{200} = 0,88$$

$$b' = e_1 - 0,5d + t_1 = 50 - 0,5 \cdot 22 + 7,1 = 46,1 \text{ mm}$$

$$K = \frac{4b'}{0,9 \cdot (f_{yp} / \gamma_{M0}) \cdot p_2} = \frac{4 \cdot 46,1}{0,9 \cdot (355/1,0) \cdot 200} = 2,886 \cdot 10^{-3} \text{ mm}^2/\text{N}$$

laipan paksuuden minimi- ja maksimiarvoiksi saadaan tällöin:

$$\sqrt{\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{1+\delta}} \le t_p \le \sqrt{K \cdot F_{t.Rd}}$$

$$\sqrt{\frac{2,886 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^{3}}{1+0,88}} \le t_p \le \sqrt{2,886 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^{3}}$$

$$16,4\ mm \le t_p \le 22,4\ mm$$

$\Rightarrow t_p = 20\ mm = OK$

Laippaliitoksen ylimmän ruuvirivin vetokestävyydeksi saadaan nyt:

$$\alpha_{Rd} = \left(\frac{K \cdot F_{t.Rd}}{t_p^2} - 1\right) \cdot \left[\frac{e_2 + 0,5d}{\delta \cdot (e_2 + e_1 + t_1)}\right]$$

$$= \left(\frac{2,886 \cdot 10^{-3} \cdot 174,5 \cdot 10^{3}}{20^2} - 1\right) \cdot \left[\frac{50 + 0,5 \cdot 22}{0,88 \cdot (50 + 50 + 7,1)}\right] = 0,1676 \ge 0$$

$$F_{1.Rd} = \frac{t_p^2(1+\delta\alpha_{Rd})n}{K} = \frac{20^2 \cdot (1+0,88 \cdot 0,1676) \cdot 2}{2,886 \cdot 10^{-3}} = 318,1\ kN \quad \textit{(ylin ruuvirivi: n=2)}$$

Pilarin puoleisen laippaliitoksen osalta liitoksen taivutuskestävyydeksi saadaan (kun alin ruuvirivi säästetään mahdolliselle leikkausvoimalle):

$z_1 = 200 + 50 - 8/2 = 246\ mm$ *(ylimmän ruuvirivin etäisyys puristuskeskiöstä)*

$$M_{Rd} = F_{1.Rd}\, z_1 + \sum F_{i.Ed}\, z_i = 318,1 \cdot 10^3 \cdot 246 + 0 = 78,3\ kNm$$

C.3 Laippojen taivutuskestävyys:

Palkin ruuvien ja laippojen taivutuskestävyys on pienempi kuin pilarin ruuvien ja laipan, joten palkin ruuvit ja laippa määrää laippojen taivutuskestävyyden:

$M_{Rd} = 77,6\ kNm$

D. Hitsien mitoitus:

<u>Palkki ja laippa</u>:

Taivutusmomentin kuormittamissa hitsatuissa liitoksissa hitsit tulee mitoittaa siten, että liitoksen taivutuskestävyys määräytyy aina muiden liitoksen osa-alueiden kuin hitsien perusteella [4,5,6].

Varmalla puolella oleva yksinkertaistus on mitoittaa hitsit aina vähintään tasalujiksi liitettävien rakenneputkien kanssa. Rakenneputkien tapauksessa tämä on yleensäkin perusperi-

aate, sillä rakenneputkien liitoksissa jäykkyys yleensä vaihtelee liitoksen eri kohdissa, mistä aiheutuu hitsin rasitusten epätasainen jakautuminen. Mitoittamalla hitsit tasalujaksi rakenneputken seinämän kanssa varmistetaan, että hitsillä on riittävä kestävyys ja muodonmuutoskyky tasata rasitusta.

Palkkiin hitsattavan laipan osalta putken piirin ympäri kiertävän pienahitsin a-mitaksi tarvitaan tällöin yksinkertaistetulla menetelmällä laskien $a \geq 1{,}67 \cdot t$ (taulukko 3.13). Tarkemmalla komponenttimenetelmällä laskien riittää taulukon 3.12 mukaisesti $a \geq 1{,}36 \cdot t$, kun palkkiin kohdistuu vain normaalijännitystä aiheuttavaa taivutusta.

Hitsin a-mitan vaatimukseksi saadaan siis:

$a \geq 1,36 \cdot t = 1,36 \cdot 8 = 10,9 \text{ mm}$

$\Rightarrow$ *valitaan a = 11 mm koko putken ympäri.*

Pilari ja laippa:

Laippalevy hitsataan pilarin kylkeen kaikilta neljältä sivultaan. Mitoitetaan hitsi tasalujaksi pilarin kanssa kuten palkin ja laipan välinen hitsi edellä, jolloin hitsin a-mitan vaatimukseksi saadaan:

$a \geq 1,36 \cdot t = 1,36 \cdot 7,1 = 9,7 \text{ mm}$

$\Rightarrow$ *valitaan a = 10 mm koko putken ympäri.*

E. Koko liitoksen taivutuskestävyys:

Palkin ruuvien ja laippojen kestävyys on pienin, joten se määrää koko liitoksen taivutuskestävyyden:

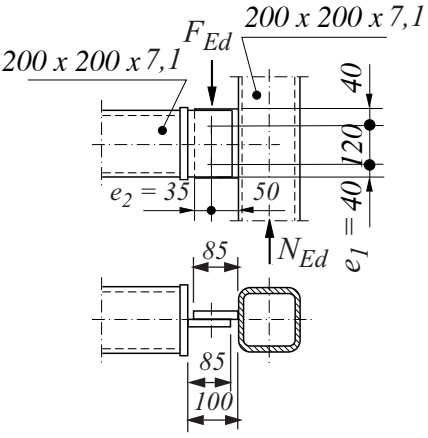
$M_{Rd} = 77{,}6 \text{ kNm}$

Huom:
Jos liitokseen kohdistuu momentin lisäksi leikkausvoimaa (kuten tilanne yleensä on), tulee edellä tehtyjen tarkastelujen lisäksi tarkastaa:

- *molempien laippalevyjen pystysuuntaisten hitsien kestävyys myös ao. leikkausvoimalle*
- *alimman ruuvirivin ruuvien leikkauskestävyys ao. leikkausvoimalle*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin rakenneputken osalta lujuusluokkaan S355 perustuen, liitoksen kestävyydeksi saataisiin edelleen palkin ruuvin ja laippojen määräämänä sama 77,6 kNm, mutta hitsien osalta riittäisi hieman pienempi a-mitta: $a \geq 1{,}36 \cdot t \rightarrow 1{,}15 \cdot t$ (taulukko 3.12). Putken materiaalilujuuden nostaminen S355 $\rightarrow$ S420 ei siis tässä esimerkissä vaikuta liitoksen kestävyyteen.

Esimerkki 3.16



Tarkastetaan viereisen limitetyn leikkausliitoksen kestävyys.

Pilarin normaalivoima on N_{Ed} = 300 kN (puristusta). Liitosta kuormittaa palkin päässä voima F_{Ed} = 150 kN. Liitoslevyjen paksuus on 15 mm ja teräslaji S355J2. Ruuvit M20 ovat lujuusluokkaa 8.8.

Pilarina ja palkkina on rakenneputki 200×200×7,1. Putket ovat teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Kuvan ruuvikiinnitys käsitellään nivelellisenä liitoksena joka ei siirrä momenttia, mutta pystykuorman F_{Ed} epäkeskeisyydestä aiheutuu seuraavat momentit:

- *pilarin kylkeen hitsatun liitoslevyn juureen (ja hitsiin) kohdistuva momentti: $M_{Ed} = 150 \cdot 0{,}05 = 7{,}5$ kNm*
- *pilariin kohdistuva momentti (otettava huomioon pilarin mitoituksessa): $M_{Ed} = 150 \cdot (0{,}05 + 0{,}2/2) = 22{,}5$ kNm*
- *palkin päätylevyyn hitsatun liitoslevyn juureen sekä hitseihin: $M_{Ed} = 150 \cdot 0{,}05 = 7{,}5$ kNm*
- *palkin päätylevyyn ja sen kiinnityshitseihin: $M_{Ed} = 150 \cdot (0{,}05 + 0{,}015) = 9{,}75$ kNm*

A	$= 5305$ mm^2	*(liite 11.1)*
f_y	$= 420$ N/mm^2	*putken myötölujuus*
f_u	$= 500$ N/mm^2	*putken murtolujuus*
f_{yp}	$= 355$ N/mm^2	*liitoslevyjen myötölujuus*
f_{up}	$= 490$ N/mm^2	*liitoslevyjen murtolujuus*
f_{ub}	$= 800$ N/mm^2	*ruuvin murtolujuus*
γ_{M0}	$= 1{,}0$	
γ_{M2}	$= 1{,}25$	
γ_{M5}	$= 1{,}0$	

Liitoksen geometrian parametrit ovat:

$t_p = 15\ mm$
$d = 20\ mm$
$d_0 = 22\ mm$
$e_1 = 40\ mm$
$e_2 = 35\ mm$
$p_1 = 120\ mm$
$h_p = 200\ mm$

Tarkastetaan vaatimukset reikien sijainnille:

$e_1 = 40\ mm \geq 1,2 d_0 = 26,4\ mm$ *OK*

$e_2 = 35\ mm \geq 1,2 d_0 = 26,4\ mm$ *OK*

$p_1 = 120\ mm \geq 2,2 d_0 = 48,4\ mm$ *OK*

A. Ruuvien leikkauskestävyys:

Ruuvin leikkauskestävyys, kun kierteiden oletetaan olevan leikkautumistasossa (varmalla puolella oleva oletus):

$A_s = 245\ mm^2$ *M20 ruuvin jännityspinta-ala (eli kierteellisen osan pinta-ala)*

$F_{v.Rd} = 0,6 f_{ub} A_s / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 800 \cdot 245 / 1,25 = 94,1\ kN$

2 ruuvia ja yksileikkeinen liitos $\Rightarrow F_{v.Rd} = 2 \cdot 94,1 = 188,2\ kN \geq F_{Ed}$ *OK*

B. Liitoslevyjen reunapuristuskestävyys:

Liitoslevyjen reunapuristuskestävyys lasketaan kuten esimerkissä 3.14:

voiman suunnassa:

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_{up}}\ ;\ \frac{e_1}{3d_0}\right] = min[1,0\ ;\ 1,633\ ;\ 0,6061] = 0,6061$$ *levyn pään ruuvit*

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_{up}}\ ;\ \left(\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}\right)\right] = min[1,0; 1,633; 1,568] = 1,0$$ *sisemmät ruuvit*

voimaa vastaan kohtisuorassa suunnassa (nyt kaikki ruuvit ovat reunarivin ruuveja):

$$k_1 = min\left[2,5\ ;\ \left(2,8\frac{e_2}{d_0} - 1,7\right)\ ;\ \left(1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7\right)\right] = min[2,5\ ;\ 2,755\ ;\ -] = 2,5$$

Reunapuristuskestävyyksiksi eri ruuveille saadaan nyt:

$F_{b.Rd} = k_1 \alpha_b f_u d t / \gamma_{M2} = 2,5 \cdot 0,6061 \cdot 490 \cdot 20 \cdot 15 / 1,25 = 178,2\ kN$ *levyn pään ruuvi*

$F_{b.Rd} = k_1 \alpha_b f_u d t / \gamma_{M2} = 2,5 \cdot 1,0 \cdot 490 \cdot 20 \cdot 15 / 1,25 = 294,0\ kN$ *sisempi ruuvi*

Koko ruuviryhmän kestävyys määritetään yksittäisten ruuvien reunapuristuskestävyyksien mitoitusarvojen $F_{b.Rd}$ summana edellyttäen, että jokaisen yksittäisen ruuvin leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{v.Rd}$ on suurempi tai yhtä suuri kuin vastaavan yksittäisen ruuvin reunapuristuskestävyyden $F_{b.Rd}$ mitoitusarvo. Muussa tapauksessa ruuviryhmän kestävyys määritetään kertomalla ruuvien lukumäärä kiinnitinryhmän pienimmällä yksittäisen ruuvin kestävyyden mitoitusarvolla, joka on $F_{b.Rd}$ tai $F_{v.Rd}$ sen mukaan, kumpi on pienempi [4,5,6].

Nähdään, että jokaisen ruuvin osalta $F_{v.Rd} < F_{b.Rd}$ (ks. edellä kohta A).
⇒ koko liitoksen kestävyys saadaan tässä kertomalla ruuvien lukumäärä kiinnitinryhmän pienimmällä yksittäisen ruuvin kestävyyden mitoitusarvolla, eli:

$2 \cdot 94,1 = 188,2\ kN \geq F_{Ed}$ *OK*

C. Liitoslevyjen palamurtumiskestävyys:

Palamurtumiskestävyys lasketaan tässä kahden ruuvin muodostamalle palalle.

Leikkauksen kuormittama nettopinta-ala:

$A_{nv} = t_p(e_1 + p_1 - d_0 - d_0/2) = 15 \cdot (40 + 120 - 22 - 22/2) = 1905\ mm^2$

Vedon kuormittama nettopinta-ala:

$A_{nt} = t_p(e_2 - d_0/2) = 15 \cdot (35 - 22/2) = 360\ mm^2$

Palamurtumiskestävyys epäkeskeiselle kuormalle:

$V_{eff.2.Rd} = 0,5 f_{up} A_{nt} / \gamma_{M2} + (1/\sqrt{3}) f_{yp} A_{nv} / \gamma_{M0}$

$= 0,5 \cdot 490 \cdot 360 / 1,25 + (1/\sqrt{3}) \cdot 355 \cdot 1905 / 1,0 = 461,0\ kN \geq F_{Ed}$ *OK*

D. Liitoslevyjen nettoleikkauksen leikkauskestävyys:

Nettoleikkauksen leikkauskestävyys reikien kohdalla:

$A_{V.net} = (h_p - 2d_0) t_p = (200 - 2 \cdot 22) \cdot 15 = 2340\ mm^2$

$$V_{pl.net.Rd} = A_{V.net} \cdot \frac{f_y / \sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 2340 \cdot \frac{355 / \sqrt{3}}{1,0} = 479,6\ kN \geq F_{Ed} \quad OK$$

E. Liitoslevyjen bruttopoikkileikkauksen kestävyys levyn tyvessä:

Bruttoleikkauksen leikkauskestävyys levyn tyvessä:

$$A_V = h_p t_p = 200 \cdot 15 = 3000\ mm^2$$

$$V_{pl.Rd} = A_V \cdot \frac{f_y/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 3000 \cdot \frac{355/\sqrt{3}}{1,0} = 614,9\ kN \geq F_{Ed} \quad OK$$

Liitoslevyn taivutuskestävyys on:

$$W_{el.p} = \frac{t_p h_p^2}{6} = \frac{15 \cdot 200^2}{6} = 100 \cdot 10^3\ mm^3$$

$$M_{el.p.Rd} = \frac{W_{el.p} f_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 355}{1,0} = 35,5\ kNm \geq M_{Ed} = 7,5\ kNm \quad OK$$

Leikkausvoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutus:

$$V_{Ed} = 150\ kN \leq 0,5 \cdot V_{pl.Rd} = 0,5 \cdot 614,9 = 307,5\ kN$$

$\Rightarrow$ *leikkausvoima ei pienennä liitoslevyn taivutuskestävyyttä*

F. Pilariin hitsatun levyliitoksen kestävyys:

Liitoksen kestävyys lasketaan ristikkoliitosten kestävyyskaavoilla. Levy-putki-liitos on esitetty liitteen 11.3 taulukossa 11.3.15. Pilarin ja levyn tulee tällöin täyttää taulukossa 11.3.15 esitetyt vaatimukset. Todettakoon, että kyseiset vaatimukset toteutuvat, mutta niiden tarkastamista ei esitetä tässä.

Pilarin (paarteen) pinnan normaalijännitys $\sigma_{0.Ed}$ *vaikuttaa liitoksen kestävyyteen termin* k_m *muodossa (puristus on positiivista):*

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{300 \cdot 10^3}{5305 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,1346$$

$$k_m = 1,3 - 1,3|n| = 1,3 - 1,3 \cdot 0,1346 = 1,125 > 1 \quad \Rightarrow k_m = 1,0$$

Paarteen (pilarin) pinnan murtuminen myötäämällä
(S420: lujuuskerroin = 0,9):

$$M_{1.Rd} = 0,5 N_{1.Rd} h_1 = 0,5 \cdot h_1 \cdot [0,9 \cdot k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (2h_1/b_0 + 4\sqrt{1 - t_1/b_0})]/\gamma_{M5}$$

$$= 0,5 \cdot 200 \cdot [0,9 \cdot 1,0 \cdot 420 \cdot 7,1^2 \cdot (2 \cdot 200/200 + 4\sqrt{1 - 15/200})]/1,0$$

$$= 11,1\ kNm \geq M_{Ed} = 7,5 kNm \quad OK$$

G. Hitsien kestävyys:

Pilari ja liitoslevyn välinen hitsi:

Taivutusmomentin kuormittamissa hitsatuissa liitoksissa hitsit tulee mitoittaa siten, että liitoksen taivutuskestävyys määräytyy aina muiden liitoksen osa-alueiden kuin hitsien perusteella [4,5,6]. Varmalla puolella oleva yksinkertaistus on mitoittaa hitsit aina vähintään tasalujiksi liitettävien osien kanssa.

Koska liitoslevyn juureen kohdistuu samanaikaisesti sekä taivutusta että leikkausta, käytetään taulukkoa 3.13, jonka mukaan saadaan yhdelle pienahitsille vaadittavaksi a-mitaksi $a = 1{,}67 \cdot t_p$ *. Liitoslevy hitsataan kuitenkin kaksipuoleisella pienahitsilla, jolloin kummankin a-mitaksi tarvitaan* $a = 0{,}84 \cdot t_p = 0{,}84 \cdot 15 = 12{,}6\ mm \Rightarrow 13\ mm$*. Hitsistä muodostuisi siis varsin suuri.*

Edullisempaa on mitoittaa hitsi vaikuttavalle leikkausvoimalle ja samalla taivutuksen suhteen vähintään yhtä kestäväksi kuin pilarin kyljen edellä laskettu momenttikestävyys (joka on pienempi kuin liitoslevyn momenttikestävyys), eli $V_{Ed} = 150\ kN$ *ja* $M_{Ed} = M_{1.Rd} = 11{,}1$ *kNm. Lasketaan hitsin jännityskomponentit liitoslevyn ylä- ja alareunassa soveltaen kohdassa 3.3.3.1 esitettyä hitsin komponenttimenetelmää:*

$$\tau_{||} = \frac{V_{Ed}}{2ah_p}$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{M_{Ed}}{W_{el.p}} \cdot \frac{t_p}{2a} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}}$$

Hitsin mitoitusehdot ovat (murtolujuutena käytetään liitettävistä osista heikomman murtolujuutta):

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0{,}9 f_u}{\gamma_{M2}}$$

Kokeillaan a-mittaa 3 mm joka on pienin sallittu a-mitta kantavalle pienahitsille (ks. kohta 3.3.3), jolloin hitsin jännityksiksi saadaan kun pienahitsit molemmin puolin levyä:

$$\tau_{||} = \frac{V_{Ed}}{2ah_p} = \frac{150 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 200} = 125\ N/mm^2$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{M_{1.Rd}}{W_{el.p}} \cdot \frac{t_p}{2a} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{11{,}1 \cdot 10^6}{100 \cdot 10^3} \cdot \frac{15}{2 \cdot 3} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 196{,}2\ N/mm^2$$

Tarkastetaan molemmat mitoitusehdot:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} = 448,2\ N/mm^2 > \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,9 \cdot 1,25} = 435,6\ N/mm^2 \quad ei\ OK$$

$$\sigma_{\perp} = 196,2\ N/mm^2 \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 490}{1,25} = 352,8\ N/mm^2 \quad OK$$

$\Rightarrow$ *hitsin a-mitta 3 mm ei siis riitä, toisaalta tuloksista nähdään heti että a = 4 mm kyllä riittää*

Hitsin jäähtymisnopeuden kannalta tarvitaan (ks. kohta 3.3.3):

$a \geq \sqrt{t}\ mm - 0,5\ mm = \sqrt{15} - 0,5 = 3,4\ mm$ *(t = paksumpi liitettävistä osista)*

$\Rightarrow$ *valitaan a = 4 mm (sekä kestävyys että jäähtymisnopeus OK)*

Palkin päätylevyn ja liitoslevyn välinen hitsi:

Samaa a-mittaa voidaan käyttää palkin päätylevyn ja liitoslevyn välisessä hitsissä.

Palkin päätylevyn ja palkin väliset hitsit:

Päätylevyn korkeus ja leveys valitaan nyt siten, että levy ulottuu jokaiselta sivultaan 10 mm palkin poikkileikkauksen ulkopuolelle, jotta palkin ympäri kiertävälle pienahitsille jää riittävästi tilaa.

Pystyhitsit mitoitetaan kantamaan yksinään pelkkä leikkausvoima, ja vaakahitsit mitoitetaan kantamaan yksinään pelkkä taivutusmomentti.

Koska päätylevyn hitseihin kohdistuu sama leikkausvoima $V_{Ed} = 150\ kN$ *kuin liitoslevyn juureenkin, ja leikkausvoiman kantavia hitsejä on kummassakin samaa määrä, riittää pystyhitseille sama a-mitta kuin liitoslevyllekin, eli valitaan sama a = 4 mm.*

Vaakahitsit mitoitetaan kantamaan yksinään taivutusmomentti, jonka suuruus on:

$$M_{Ed} = 150 \cdot (0,05 + 0,015) = 9,75\ kNm$$

Kokeillaan riittääkö kantavan pienahitsin pienin sallittu a-mitta a = 3 mm:

$$\tau_{||} = 0$$

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{M_{Ed}}{h_1} \cdot \frac{1}{ab_1} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{9,75 \cdot 10^6}{200} \cdot \frac{1}{3 \cdot 200} \cdot \frac{1}{\sqrt{2}} = 57,5\ N/mm^2$$

Tarkastetaan hitsin mitoitusehdot:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} = 115,0\ N/mm^2 \leq \frac{f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,9 \cdot 1,25} = 435,6\ N/mm^2 \quad OK$$

$$\sigma_{\perp} = 57,5\ N/mm^2 \leq \frac{0,9 f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 490}{1,25} = 352,8\ N/mm^2 \quad OK$$

Todetaan, että vaakahitseille riittäisi a = 3 mm, mutta valitaan vaakahitseille sama a = 4 mm joka valittiin pystyhitseillekin.

Liitoksen kestävyys:

Suoritettujen tarkastelujen perusteella voidaan todeta että liitos kestää siihen kohdistuvan kuormituksen, kun hitsien a-mitat valitaan edellä esitetyn mukaisesti.

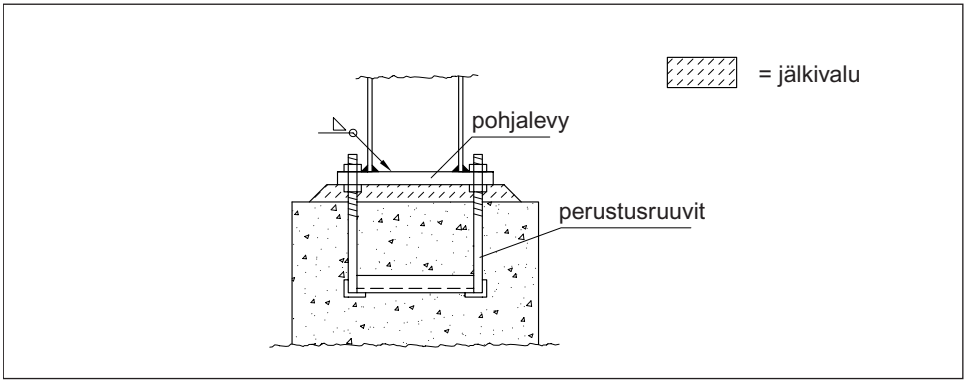
Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin rakenneputken osalta lujuusluokkaan S355 perustuen, pilariin hitsatun levyliitoksen kestävyydeksi (kohta F) saataisiin 10,5 kNm (S420: 11,1 kNm), mikä riittää. Hitsien osalta päädyttäisiin samoihin a-mittoihin. Putken materiaalilujuuden nostamisella S355 → S420 ei siis tässä esimerkissä ole juurikaan merkitystä.

3.5 Rakenneputken liitos perustuksiin

Pilarin pohjaosat on suunniteltava riittävän suuriksi, jäykiksi ja kestäviksi pilarissa vaikuttavien aksiaalisten voimien, taivutusmomenttien ja leikkausvoimien siirtämiseksi perustuksille siten, että perustusten kestävyys ei ylity.

Tavanomaisessa kuvan 3.30 mukaisessa perustusruuviliitoksessa pilarin alapäähän hitsataan pohjalevy, joka kiinnitetään pulteilla (perustusruuveilla) betoniperustukseen. Perustusruuveja on oltava vähintään neljä kappaletta, jos pilari aiotaan asentaa vapaasti seisovana. Asennuksen aikaisten rasitusten vuoksi käytetään vähintään ruuvikokoa M20 [20].

Jotta varmistettaisiin perustusruuvien paikallaan pysyminen perustuksen valun aikana ja erityisesti yksittäisten ruuvien keskinäisten välien pitämiseksi sallituissa toleransseissa, kiinnitetään ruuvit useimmiten toisiinsa esimerkiksi kulmaterästen avulla kuvan 3.30 mukaisesti siten, että muodostuu esivalmistettu pulttiryhmä (ns. pulttikori) [20].



Kuva 3.30 Pilarin liitos perustukseen perustusruuvien avulla [20]

Pilarin ja pohjalevyn liitosta voidaan joutua vahvistamaan jäykistelevyillä. Jäykistyksillä saadaan jaettua pintapaine tasaisemmin perustukselle, jolloin voidaan pienentää pohjalevyn paksuutta. Eurocodessa tosin ei anneta ohjeita jäykisteiden vaikutuksesta pohjalevyn paksuuteen. Tarvittaessa ohjeita löytyy mm. lähteestä [20]. Usein on kuitenkin taloudellisempaa tehdä pohjalevy paksumpana ja jättää jäykisteet pois.

Pilarissa vaikuttavat veto- ja puristusjännitykset siirtyvät pohjalevyyn siten, että ne vaikuttavat kohtisuoraan pohjalevyn valssaussuuntaa vastaan (vastaava tilanne on myös päätylevyn avulla toteutetuissa palkkiliitoksissa, kun päätylevy hitsataan palkin päähän). Lamellirepeilyn välttäminen on tällöin erityisen tärkeää. Lamellirepeilyä käsitellään luvussa 5.

Perustusruuvien ja perustuksen mitoituksessa on tutkittava eri kuormitustapaukset. Perustuksen kestävyyttä määritettäessä on etsittävä se kuormitustapaus, joka aiheuttaa suurimman pintapaineen perustukseen. Pohjalevyn koko ja paksuus on valittava niin suureksi, että betoniperustusten puristusjännitys ei ylitä kohdan 3.5.1 mukaista betonin pintapaineen mitoitusarvoa f_{jd} [4,5,6].

Perustusruuvit valitaan vetokestävyyden, leikkauskestävyyden tai yhdistetyn veto- ja leikkauskestävyyden perusteella. Jos perustusruuveihin kohdistuu vetoa, tulee myös pohjalevyn ja pilarin muodostaman laippaliitoksen vetokestävyys tarkastaa (vrt. laippaliitos kohdassa 3.4.1.1.1). Myös asennusaikainen tilanne voi joissakin tapauksissa olla määräävä kuormitustapaus, jolloin perustusruuvit valitaan nurjahduskestävyyden perusteella.

Valmiissa rakenteessa perustusruuvien mitoituksessa määräävänä on useimmiten veto. Vetovoimien siirtämiseksi perustuksille ruuvit on ankkuroitava betoniin. Koska pelkän tartunnan hyväksikäyttö johtaisi hyvin suuriin ankkurointipituuksiin, perustusruuvit ankkuroidaan käyttäen koukkua, aluslaattaa tai jotain muuta ankkurointikappaletta, joka on riittävästi testattu ja hyväksytty. Perustusruuvien kestävyyden mitoitusarvoksi valitaan pienempi seuraavista arvoista: kohdan 3.4.1.1.1 mukainen (perustus)ruuvin vetokestävyyden mitoitusarvo ja Eurocoden osan EN 1992-1-1 mukainen betonin ja perustusruuvin välisen kiinnityksen tartuntalujuuden mitoitusarvo. Ankkurointipituus määritetään Eurocoden osan EN 1992-1-1 mukaisesti. Kun perustusruuvin päässä on koukku, ankkurointipituus valitaan siten että tartuntamurtoa ei tapahdu ennen perustusruuvin myötäämistä. Koukkutyyppistä ankkurointia ei käytetä perustusruuveille, joiden myötölujuus f_{yb} on suurempi kuin 300 N/mm^2 [4,5,6].

Pohjalevyn ja sen alla olevan tuen välisen leikkausvoiman siirtämiseksi käytetään jotakin seuraavista menetelmistä [4,5,6]:

- liitoksen kestävyyden mitoitusarvon laskenta perustuu pohjalevyn ja sen alla olevan tuen väliseen kitkaan

- leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan perustusruuvien leikkautumisen perusteella (perustusruuvien leikkauskestävyyden määrittäminen poikkeaa hieman muista ruuveista, ks. EN 1993-1-8: 6.2.2(7))

- leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan ympäröivän perustuksen osan leikkautumisen perusteella

Jos edellä mainitut menetelmät eivät riitä leikkausvoimien siirtämiseksi, voidaan pohjalevyn alapuolelle hitsata vaarnaprofiili, joka mitoitetaan kantamaan leikkausvoima joko yhdessä suunnassa tai molemmissa suunnissa pääakselien suhteen. Tällöin perustusruuvit voidaan mitoittaa vain vedolle ja asennusaikaiselle puristukselle (nurjahduskestävyys).

Perustuksen betonirakenne ja raudoitus mitoitetaan Eurocoden osan EN 1992-1-1 mukaisesti [1,2].

3.5.1 Normaalivoiman kuormittaman pilarin liitos perustuksiin

Normaalivoiman kuormittaman pilarin tapauksessa täytyy tarkastaa perustuksen kestävyys normaalivoiman aiheuttamalle pintapaineelle. Pintapaineen oletetaan jakautuvan pohjalevyn alla tasaisesti kuvassa 3.31 esitetylle alueelle. Pintapaine aiheuttaa pohjalevyyn taivutusmomentin, jonka suuruus rajoitetaan liian suurien muodonmuutosten välttämiseksi pohjalevyn kimmoteorian mukaiseen taivutuskestävyyteen, jolloin betonin pintapaineen mitoituslujuus f_{jd} määrää pohjalevyn koon seuraavasti:

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6M_{p.Ed}}{l_{eff} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}}} \qquad (3.67)$$

$$M_{p.Ed} = \frac{l_{eff} s^2 f_{jd}}{2} \qquad (3.68)$$

missä
- t_p on pohjalevyn paksuus
- $M_{p.Ed}$ on betonin pintapaineesta pohjalevyyn kohdistuva taivutus
- l_{eff} on pohjalevyn tehollinen pituus kuvan 3.31 mukaisesti
- s on pohjalevyn ulottuma pilarin laipan ulkopuolelle, kuitenkin niin että mitan c ylittävä alue jätetään huomioon ottamatta, eli $s \leq c$ kuvan 3.31 mukaisesti
- f_{yp} on pohjalevyn nimellinen myötölujuus
- γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku (taulukko 2.5)

Perustuksen pintapaineen mitoituslujuus f_{jd} saadaan seuraavasti [1,2,4,5,6]:

$$f_{jd} = \frac{\beta_j F_{Rdu}}{b_{eff} l_{eff}} \qquad (3.69)$$

$$F_{Rdu} = f_{cd} A_{co} \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{co}}} \leq 3,0 f_{cd} A_{co} \qquad (3.70)$$

$$f_{cd} = \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C \qquad (3.71)$$

Lausekkeet (3.69) - (3.71) on esitetty tässä Eurocoden esittämässä muodossa. Kun otetaan huomioon, että $A_{co} = b_{eff} l_{eff}$, saadaan betonin pintapaineen mitoituslujuuden f_{jd} lauseke seuraavaan muotoon:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C \qquad (3.72)$$

$$k_j = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{co}}} \quad \text{mutta } k_j \leq 3,0 \qquad (3.73)$$

missä β_j = 2/3, kun jälkivalun ominaislujuus on vähintään 0,2 kertaa betoniperustuksen ominaislujuus ja jälkivalun paksuus on enintään 0,2 kertaa teräksisen pohjalevyn pienin leveys. Kun jälkivalun paksuus on suurempi kuin 50 mm, jälkivalun ominaislujuus valitaan vähintään yhtä suureksi kuin betoniperustuksen ominaislujuus.

k_j on keskittymistekijä; k_j = 1, kun käytetään varmalla puolella olevaa oletusta (tarkempi laskenta: ks. EN 1992-1-1: kohta 6.7)

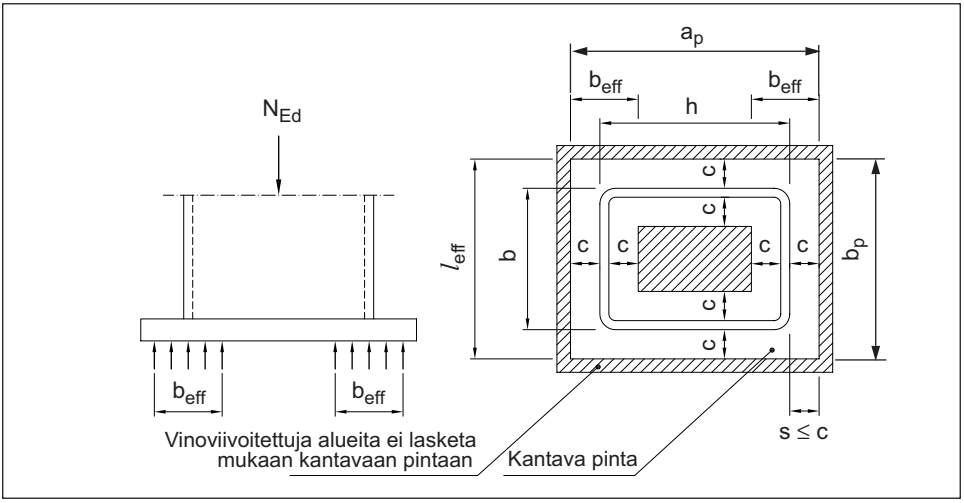
α_{cc} on betonin lujuudelle käytettävä kerroin, jonka arvo valitaan kansallisessa liitteessä väliltä 0,8 ja 1,0

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1992-1-1 [3]:
Käytetään arvoa $\alpha_{cc} = 0,85$

f_{ck} on betonin lieriölujuuden ominaisarvo 28 vuorokauden ikäisenä

γ_C on betonin osavarmuusluku, jolle EN 1992-1-1 suositusarvo on γ_C = 1,5

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1992-1-1 [3]:
Käytetään Eurocoden suositusarvoa $\gamma_C = 1,5$



Kuva 3.31 Puristettu pinta-ala pohjalevyn alapuolella

Pohjalevyn alapuolella oleva puristettu pinta-ala määritetään kuvan 3.31 mukaisesti. Kantavan pinnan ulottuman määräävä mitta c lasketaan seuraavasti [4,5,6]:

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp} / \gamma_{M0}}{3 f_{jd}}} \qquad (3.74)$$

Koko pohjalevy on kantavaa pintaa, jos seuraavat ehdot toteutuvat (ks. kuva 3.31):

$(b - 2t) \le 2c$ *putken sisään jäävä alue on täysin tehollinen* (3.75)

$b_p \le b + 2c \quad ja \quad a_p \le h + 2c$ *putken ulkopuolinen alue on täysin tehollinen* (3.76)

missä mitat a_p ja b_p ovat pohjalevyn ulkomitat

3.5.2 Normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormittaman pilarin liitos perustuksiin

Normaalivoiman ja taivutusmomentin keskinäisistä suhteista riippuen pohjalevy voi olla kokonaan puristuksella tai kokonaan vedolla, tai liitoksen toinen puoli on puristuksella ja toinen puoli vedolla.

Normaalivoiman ja taivutusmomentin kuormittaman pilarin perustusliitoksessa on pohjalevyn ja perustuksen kestävyyden lisäksi tarkastettava perustusruuvien vetokestävyys ja ankkurointikestävyys, jos perustusruuveihin aiheutuu vetoa. Myös leikkausvoiman vaikutus on otettava huomioon.

Laskettaessa taivutusmomenteista perustusruuveille aiheutuvia vetovoimia, momenttivartta ei saa olettaa suuremmaksi kuin puristetun puolen kantopinnan painopisteen ja vedetyn puolen ruuviryhmän painopisteen välinen etäisyys [4,5,6].

Kuvasta 3.32 saadaan seuraavat tasapainoehdot, kun putkipilari sijaitsee pohjalevyssä keskeisesti:

$$N_{Ed} = N_c - N_s = l_{eff} y f_{jd} - A_s f_{yb} \qquad (3.77)$$

$$M_{Ed} + N_{Ed}[0,5 a_p - (a_p - d)] = N_c (d - 0,5 y) \qquad (3.78)$$

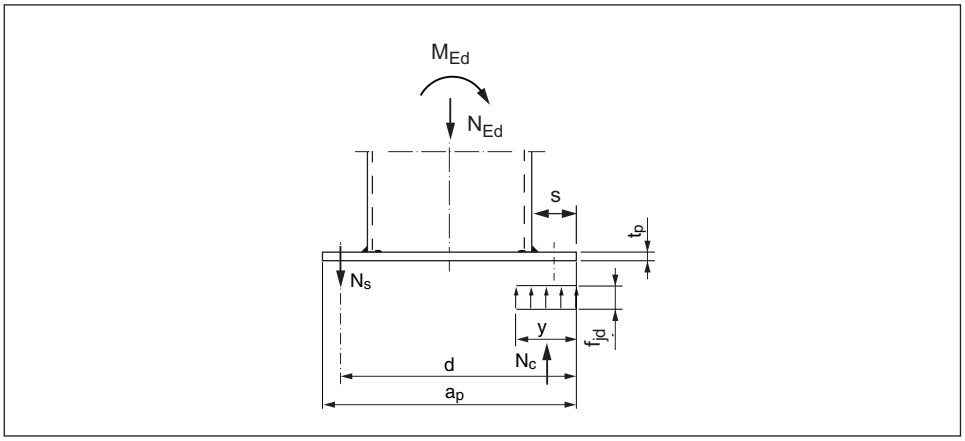
Jälkimmäisestä ehdosta voidaan ratkaista betonin puristuspinnan korkeus:

$$M_{Ed} + N_{Ed}(d - 0,5 a_p) = l_{eff} y f_{jd} (d - 0,5 y)$$

$$\Rightarrow 0,5 l_{eff} f_{jd} y^2 - l_{eff} f_{jd} d y + [M_{Ed} + N_{Ed}(d - 0,5 a_p)] = 0$$

$$\Rightarrow y = \frac{l_{eff} f_{jd} d \pm \sqrt{(-l_{eff} f_{jd} d)^2 - 2 l_{eff} f_{jd} [M_{Ed} + N_{Ed}(d - 0,5 a_p)]}}{l_{eff} f_{jd}} \qquad (3.79)$$

missä l_{eff} on pohjalevyn tehollinen leveys puristuspuolella (ks. kuva 3.31).



Kuva 3.32 Puristetun ja taivutetun pilarin rakennemalli

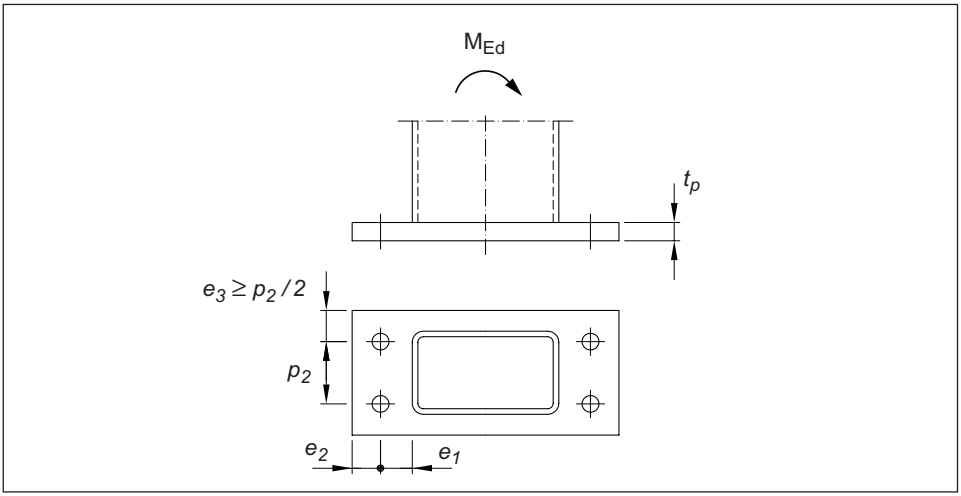
Pohjalevyn paksuus on määritettävä sekä puristus- että vetopuolen suhteen.

Puristuspuolella pohjalevyn paksuus tarkastetaan kuten edellä kohdassa 3.5.1.

Vetopuolella pohjalevyn ja pilarin muodostaman laippaliitoksen vetokestävyys tarkastetaan vastaavalla tavalla kuin kohdassa 3.4.1.1.1. Liitoksen tulee tällöin toteuttaa seuraavat ehdot:

- ruuvirivit sijaitsevat laippaliitoksen kahdella vastakkaisella sivulla kuvan 3.33 mukaisesti
- ruuvien lukumäärä on: $4 \le n \le 2(h / p_2) + 2$
- ruuvin vapaareikien nimellisvälys on standardin EN 1090-2 normaalin pyöreän reijän mukainen
- reikien sijainti (kuva 3.33):
  $e_1 \ge 1{,}2 d_0$, missä d_0 = ruuvin reijän halkaisija
  $e_2 \ge 1{,}2 d_0$ ja $e_2 \le 1{,}25 e_1$
  $e_3 \ge p_2 / 2$, alarajan ylittävää osuutta ei kuitenkaan hyödynnetä laipan kestävyydessä
  $2{,}4 d_0 \le p_2 \le \min[14 t_p ; 200 \text{ mm}]$, suositus: $p_2 = (3...5) \times d_0$

Suositellaan, että mitta e_1 pidetään mahdollisimman pienenä siten, että e_1 = (1,5 ... 2) $\times d_0$ (laipan hitsin ja ruuvin kannan väliin pitää jäädä kuitenkin vähintään 5 mm) ja mitaksi e_2 valitaan $e_2 \approx 1{,}25 e_1$.



Kuva 3.33 Pohjalevyn ruuvien sijoittelu

Laskenta suoritetaan kohdassa 3.4.1.1.1 esitetyn mukaisesti, mutta pohjalevyn tapauksessa oletetaan että vipuvoimia ei esiinny johtuen perustusruuvien suuresta venymäpituudesta ja pohjalevyn paksuudesta. Tällöin pohjalevyn kestävyys jää pienemmäksi ja kestävyys lasketaan kaavan (3.34) sijasta seuraavasti:

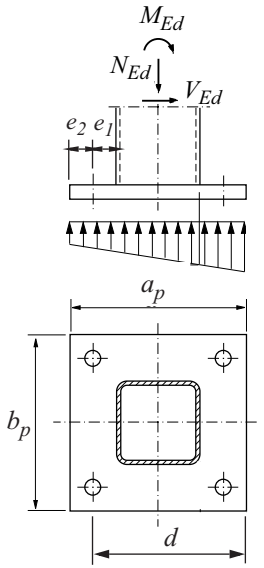
$$N_{1.Rd} = \frac{t_p^2 n_t}{K} \qquad (3.80)$$

missä n_t on vetopuolen ruuvien lukumäärä

Perustusruuvien vetokestävyys $F_{t.Rd}$ tarkastetaan kohdassa 3.4.1.1.1 esitetyn mukaisesti (pohjalevyn paksuudesta johtuen lävistymiskestävyys $B_{p.Rd}$ ei pääse muodostumaan määräävämmäksi).

Lisäksi tulee tarkastaa rakenneputken ja laipan välisen hitsin kestävyys kohdan 3.3 mukaisesti.

Esimerkki 3.17



Tarkastetaan rakenneputken 200×200×8 liitoksen kestävyys. Pohjalevyn teräslaji on S355J2 ja mitat $a_p \times b_p$ = 400×400 ja paksuus 40 mm.

Putkipilari on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade.

Liitoksen ruuveihin ei kohdistu vetoa (todennetaan jäljempänä), joten ruuvien sijoittelussa ei tarvitse noudattaa vedettyä laippaliitosta koskevia vaatimuksia, joten liitos saa olla oheisen kuvan mukainen.

Pilarin kuormat ovat seuraavat:
N_{Ed} = 1500 kN
M_{Ed} = 35 kNm
V_{Ed} = 100 kN

Poikkileikkaussuureet:
I_y = $3566 \cdot 10^4$ mm^4 *(liite 11.1)*
$W_{el.y}$ = $356{,}6 \cdot 10^3$ mm^3 *(liite 11.1)*
A = 5924 mm^2 *(liite 11.1)*

Levyn mitat:

t_p	= 40 mm	e_1	= 50 mm
a_p	= 400 mm	e_2	= 50 mm
b_p	= 400 mm	d	= 350 mm

f_{yp} = 355 N/mm^2 , f_{up} = 490 N/mm^2 kun $t \leq 40$ mm

γ_{M0} = 1,0 *(taulukko 2.5)*
γ_{M2} = 1,25 *(taulukko 2.5)*
β_w = 0,9 *(taulukko 3.8)*

A. Pohjalevyn mitoitus:

<u>Pohjalevyn paksuus puristuspuolen perusteella</u>*:*

Betonin lujuus:
C30/37

f_{ck} = 30 N/mm^2
γ_C = 1,5 *[1,2,3]*
α_{cc} = 0,85 *[1,2,3]*

Betonin pintapaineen mitoituslujuus:

$$f_{jd} = \beta_j \cdot k_j \cdot \alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_C = (2/3) \cdot 1 \cdot 0,85 \cdot 30 / 1,5 = 11,3 \text{ N/mm}^2$$

Kantavan pinnan ulottuma:

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp} / \gamma_{M0}}{3 f_{jd}}} = 40 \cdot \sqrt{\frac{355/1,0}{3 \cdot 11,3}} = 129,4 \text{ mm}$$

Putken sisäpuolisen pohjalevyn alueen tehollisuus:

$$2c = 2 \cdot 129,4 = 258,8 \text{ mm} \geq b - 2t = 200 - 2 \cdot 8 = 184 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *putken sisään jäävä alue on täysin tehollinen*

Putken ulkopuolisen pohjalevyn alueen tehollisuus:

$$b + 2c = 200 + 2 \cdot 129,4 = 458,8 \text{ mm} \geq b_p = 400 \text{ mm}$$

$$h + 2c = 200 + 2 \cdot 129,4 = 458,8 \text{ mm} \geq a_p = 400 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *putken ulkopuolelle jäävä alue on täysin tehollinen*

$\Rightarrow$ *koko pohjalevy on tehollinen, joten:*

$l_{eff} = b_p = 400$ *mm*

Pohjalevyn ulottuma pilarin laipan ulkopuolella:

$$s = e_1 + e_2 = 50 + 50 = 100 \text{ mm} \leq c = 129,4 \text{ mm}$$

Tarkastetaan pohjalevyn paksuus puristuksen perusteella:

$$M_{p.Ed} = \frac{l_{eff} s^2 f_{jd}}{2} = \frac{400 \cdot 100^2 \cdot 11,3}{2} = 22,6 \text{ kNm}$$

$$t_p \geq \sqrt{\frac{6 M_{p.Ed}}{l_{eff} \cdot f_{yp} / \gamma_{M0}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 22,6 \cdot 10^6}{400 \cdot 355/1,0}} = 30,9 \text{ mm}$$

$\Rightarrow t_p = 40$ *mm = OK*

Pohjalevyn paksuus vetopuolen perusteella:

Lasketaan ensin tuleeko perustusruuveille vetoa otaksutussa murtotilassa:

$$y = \frac{l_{eff} f_{jd} d \pm \sqrt{(-l_{eff} f_{jd} d)^2 - 2 l_{eff} f_{jd} [M_{Ed} + N_{Ed}(d - 0,5 a_p)]}}{l_{eff} f_{jd}}$$

$$= \frac{400 \cdot 11,3 \cdot 350 \pm \sqrt{(-400 \cdot 11,3 \cdot 350)^2 - 2 \cdot 400 \cdot 11,3 \cdot [35 \cdot 10^6 + 1500 \cdot 10^3 \cdot (350 - 0,5 \cdot 400)]}}{400 \cdot 11,3}$$

$= 263,7$ *mm (tai 436,3 mm)*

$N_c = l_{eff} \cdot y \cdot f_{jd} = 400 \cdot 263,7 \cdot 11,3 = 1192$ *kN* *(puristusta)*

$N_s = N_c - N_{Ed} = 1192 - 1500 = -308$ *kN*

$\Rightarrow$ *perustusruuveissa ei ole vetoa*

$\Rightarrow$ *pohjalevyn paksuutta ei näin ollen tarvitse tarkastaa vedon perusteella*

Jos perustusruuveissa olisi vetoa, täytyisi ruuvien sijoittelu toteuttaa niin, että kohdassa 3.5.2 esitetyt geometriavaatimukset täyttyvät.

B. Perustusruuvit:

Koska perustusruuveissa ei ole vetoa, riittää että ne mitoitetaan vain leikkausvoiman suhteen. Valitaan A500HW -harjateräsruuvit 4×M30 valmistajan taulukon mukaan. Perustusruuvien kestävyys tarkastetaan valmistajan ohjeiden mukaan. Valmistajan ilmoittama normaalivoimakestävyys huomioi myös ankkurointikestävyyden. Betonilaadun poiketessa valmistajan taulukossa käytetystä laadusta pitää käyttää korjauskerrointa. Perustuksen suunnittelija huolehtii perustuksen raudoituksesta, ruuvityypin valinta vaikuttaa kuitenkin tähän.

Valmistajan taulukko on laadittu betonilaadulle C25/30, joten ruuvien kestävyydet voidaan ottaa suoraan taulukon mukaan.

Ruuvien vetokestävyys:

Valmistajan taulukon mukaan ruuvin vetokestävyys on:

$N_{t.Rd} = 222,1$ *kN* *OK (ruuveissa ei ole vetoa)*

Ruuvien leikkauskestävyys:

Leikkausvoima V_{Ed} jakautuu tasan kaikille neljälle ruuville. Yhden ruuville tuleva leikkausvoima on siten:

$V_{Ed} = 100,0/4 = 25,0\ kN$

Valitun ruuvin leikkausvoimakestävyys on valmistajan taulukon mukaan:

$F_{v.Rd} = 27,2\ kN \geq 25,0\ kN$ *OK*

Normaali- ja leikkausvoiman yhteisvaikutus:

Lopputilanteen yhteisvaikutusta ei tarvitse erikseen tarkistaa.

Ruuvien keskiöetäisyys 300 mm täyttää valmistajan ilmoittaman minimietäisyyden. Minimireunaetäisyydet tulee myös tarkastaa ja kapasiteetit vähennetään tarvittaessa valmistajan ohjeiden mukaan.

Lisäksi tulee tarkastaa, että asennusaikaiset kuormat eivät ylitä perustusruuvien kestävyyttä (mahdollinen ruuvien nurjahdus).

C. Hitsien mitoitus:

Pilarin laipan hitsit:

Lasketaan tuleeko pilarin hitseille vetoa. Taivutusmomentin vetopuolella pilarin seinämän keskilinjan jännitys on:

$$\sigma_x = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h-t}{2} - \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{35 \cdot 10^6}{3566 \cdot 10^4} \cdot \frac{200-8}{2} - \frac{1500 \cdot 10^3}{5924} = 94,2 - 253,2 = -159,0\ kN$$

$\Rightarrow$ *taivutusmomentti ei ole riittävän suuri aiheuttamaan pilariin ja sen hitseihin vetojännitystä.*

Puristusjännitykset voidaan välittää perustuksiin kosketuspaineen kautta, jolloin hitsejä ei tarvitse mitoittaa kuin veto- ja leikkausvoimille. Pohjalevyn ja pilarin alapään välillä on tällöin oltava tiivis kosketus. Tämä on mainittava pilarin kokoonpanopiirustuksessa.

Pilarin uuman hitsit:

Kun puristusjännitykset välitetään kosketuspaineen kautta, riittää että uuman hitsit mitoitetaan kantamaan leikkausvoimat.

Kokeillaan a-mittaa 3 mm joka on pienin sallittu a-mitta kantavalle pienahitsille (ks. kohta 3.3.3):

$$\tau_{||} = \frac{V_{Ed}}{2ah} = \frac{100 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 200} = 83,3\ N/mm^2$$

Kun hitsiin kohdistuu pelkkää leikkausta, hitsin mitoitusehto on (murtolujuutena käytetään liitettävistä osista heikomman murtolujuutta):

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{0 + 3 \cdot (0 + 83,3^2)} = 144,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,9 \cdot 1,25} = 435,6 \text{ N/mm}^2 \quad OK$$

Hitsin jäähtymisnopeuden kannalta tarvitaan (ks. kohta 3.3.3):

$a \geq \sqrt{t}\ mm - 0,5\ mm = \sqrt{40} - 0,5 = 5,8\ mm$ *(t = paksumpi liitettävistä osista)*

$\Rightarrow$ *valitaan a = 6 mm koko pilarin ympäri*

Edellä suoritettujen liitoksen kestävyystarkastelujen lisäksi tulee tarkastaa pilarin itsensä kestävyys puristukselle, taivutukselle, leikkaukselle ja niiden yhteisvaikutukselle.

Betoniperustus suunnitellaan Eurocoden osan EN 1992-1-1 mukaisesti.

Vertailu S420 vs S355:
Tässä esimerkissä on tarkasteltu lähinnä pohjalevyn ja perustusruuvien kestävyyttä, eikä pilarin itsensä kestävyyttä, joten putkipilarin teräslajilla voi olla merkitystä ainoastaan pilarin ja pohjalevyn välisten hitsien mitoituksessa. Hitsien osalta pohjalevy on kuitenkin tämän esimerkin laskentamenettelyssä määräävä riippumatta siitä, valitaanko putkipilarin mitoitusperusteeksi S355J2H tai S420MH.

3.6 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1992-1-1:2005. (EN 1992-1-1:2004)
Eurokoodi 2. Betonirakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 222 s.

[2] SFS-EN 1992-1-1: AC:2008. (EN 1992-1-1: AC:2008)
Korjausosa AC:2008 standardiin EN 1992-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 25 s.

[3] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1992-1-1.
15.10.2007 sekä korjaus 16.1.2008. Ympäristöministeriö. 15 s.

[4] SFS-EN 1993-1-8:2005. (EN 1993-1-8:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-8: Liitosten mitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 149 s.

[5] SFS-EN 1993-1-8:2005+AC:2005. (EN 1993-1-8:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 137 s.

[6] SFS-EN 1993-1-8: AC:2009. (EN 1993-1-8: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-8.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

[7] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-8.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 2 s.

[8] SFS-EN 1993-1-9:2005. (EN 1993-1-9:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-9: Väsyminen.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.

[9] SFS-EN 1993-1-9:2005+AC:2005. (EN 1993-1-9:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 37 s.

[10] SFS-EN 1993-1-9: AC:2009. (EN 1993-1-9: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-9.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

[11] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-9.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[12] CIDECT. 1991. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No 1.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 68 s.

[13] CIDECT. 1992. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No 3. Verlag TÜV Rheinland GmbH. 102 s.

[14] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011) Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus. Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset. Sisältää myös muutokset A1:2011. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[15] SFS-EN ISO 5817:2006. (EN ISO 5817:2003) Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 64 s.

[16] SFS 2373:1980. Hitsaus. Staattisesti kuormitettujen teräsrakenteiden hitsausliitosten mitoitus ja lujuuslaskenta. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 38 s. *Standardi on kumottu.*

[17] Access Steel. 2006. NCCI: Design model for welded joints in trusses using structural hollow sections. Document SN040a-EN-EU. [www.access-steel.com] (12.4.2012)

[18] Hitsaajan opas. 2003. Rautaruukki Steel. 112 s.

[19] Access Steel. 2006. NCCI: Design models for splices in structural hollow sections. Document SN044a-EN-EU. [www.access-steel.com] (12.4.2012)

[20] Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja. 2010. Teräsrakenneyhdistys ry. 183 s.

4. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN VÄSYMISKESTÄVYYS

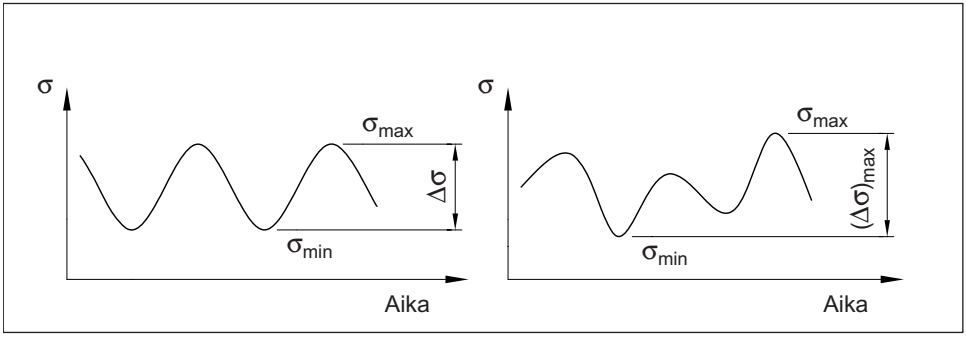
Rakenneputkirakenteet sisältävät käytännössä aina myös hitsausliitoksia. Ristikkosauvojen liitokset toteutetaan yleensä hitsaamalla rakenneputket suoraan toisiinsa. Palkkien ja pilareiden liitokset toteutetaan useimmiten ruuviliitoksina, mutta silloinkin rakenneputkiin on ruuviliitosta varten ensin hitsattu erilaisia kiinnityslevyjä, laippalevyjä tai päätylevyjä. Rakenneputken itsensä väsymiskestävyys on harvoin pienempi kuin liitoksen väsymiskestävyys.

Rakenneputkirakenteiden väsymismitoitukseen sovelletaan periaatteessa samoja ohjeita kuin hitsattuihin rakenteisiin yleensäkin. Rakenneputkien väsymismitoitukseen sisältyy kuitenkin myös eräitä erityispiirteitä, joita käsitellään tarvittavin osin tässä luvussa hitsattujen rakenteiden väsymismitoituksen lomassa.

4.1 Väsyttävä kuormitus

Väsyttävä kuormitus voi aiheuttaa rakenteen murtumisen tietyn ajan kuluessa, vaikka rakenteen kantokyky staattiselle kuormalle olisi riittävä. Väsyttävä kuormitus on suunnaltaan, suuruudeltaan tai sijainniltaan vaihtelevaa ja vaihtelu voi olla vakioamplitudista tai muuttuva-amplitudista (kuva 4.1). Vakioamplitudinen kuormitus aiheuttaa tarkasteltavaan kohtaan jännitysvaihtelun, joka on vakio. Tällaisen tilanteen voivat aiheuttaa esimerkiksi koneet, jotka toimivat tietyllä kierroslukualueella. Normaalisti väsyttävä kuormitus on muuttuva-amplitudista, jolloin tarkasteltavan kohdan jännitysvaihtelu muuttuu ajan suhteen. Esimerkiksi nosturin aiheuttama kuormitus nosturiratapalkille on muuttuva-amplitudista kuormitusta, kuten myös ajoneuvokuorman aiheuttama kuormitus siltoihin.

Dynaamisesti kuormitetuissa rakenteissa pitää ottaa huomioon värähtelyn vaikutus jännityksiin. Jännityksen lisäys on merkittävä, jos rakenteen ominaistaajuus on lähellä kuorman värähtelytaajuutta. Rakenteet pyritään yleensä suunnittelemaan siten, että alin ominaistaajuus olisi korkeampi kuin dynaamisen kuormituksen taajuus. Näin vältytään resonanssin aiheuttamilta jännityshuipuilta. Dynaamisen kuormituksen taajuus voi olla myös ominaistaajuutta korkeampi, jos resonanssitaajuus ohitetaan nopeasti (esim. koneiden perustukset).

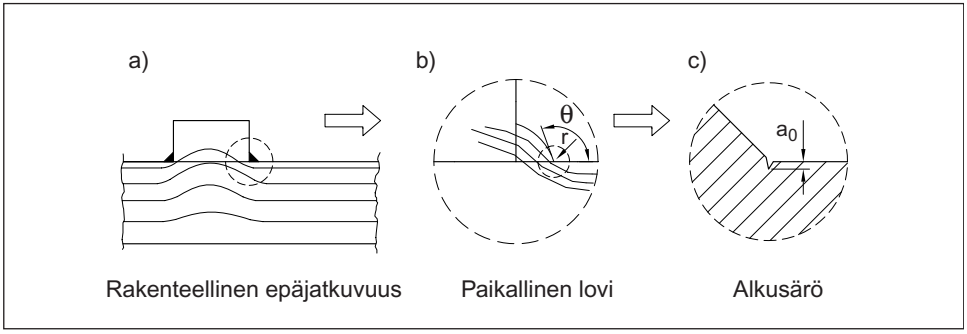


Kuva 4.1 Vakioamplitudinen ja muuttuva-amplitudinen kuormitus

4.2 Hitsatun rakenteen väsyminen

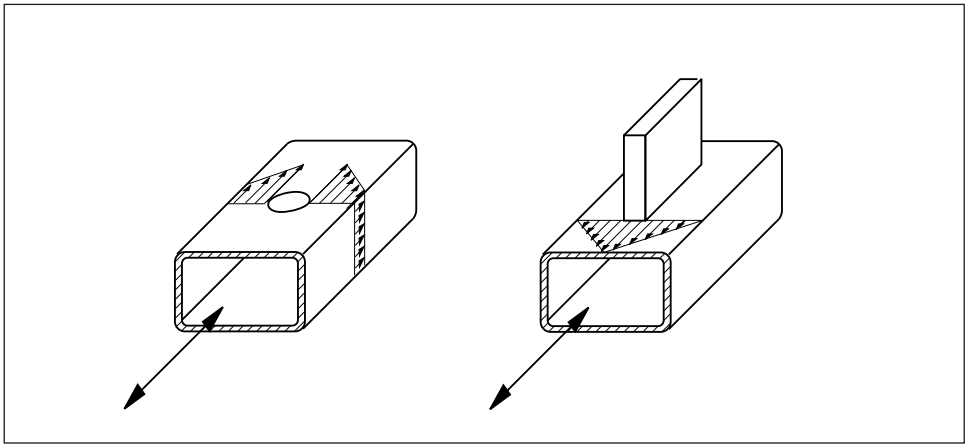
Hitsatussa rakenteessa on aina pieniä alkusäröjä (kuva 4.2), jotka kasvavat ja etenevät väsyttävän kuormituksen vaikutuksesta. Lisäksi ehjään materiaaliin voi ydintyä väsyttävän kuormituksen johdosta särö, joka kasvaa ja etenee samalla tavalla kuin alkusärö. Särön reunoihin syntyy voimakkaita jännityshuippuja, jotka edistävät särön kasvua. Lisäksi rakenteen epäjatkuvuuskohdat synnyttävät jännityshuippuja (kuva 4.3). Hitsatussa rakenteessa kriittinen paikka on hitsin ja perusaineen rajaviiva. Särö voi ydintyä hitsiin tai sen läheisyyteen, josta vaurio etenee. Hitsausliitoksen väsymiskestävyys on normaalisti pienempi kuin perusaineen väsymiskestävyys, joten hitsaustyön laatu vaikuttaa merkittävästi koko rakenteen väsymiskestävyyteen.

Särön ydintyminen ja kasvu alkaa ensimmäisestä jännitysvaihtelusta. Murtumaan johtavien jännitysvaihteluiden lukumäärä eli rakenteen elinikä riippuu kuormituksen luonteesta. Periaatteessa vetojännitys, ei puristus, aiheuttaa väsymisvaurion. Perustapauksessa kuormitus, jossa osa jännitysvaihtelusta on puristuspuolella, on väsymisen suhteen edullisempi kuin jos koko jännitysvaihtelu on vedon puolella. Lisäksi elinikä lyhenee suuremmilla keskijännitystasoilla samansuuruisilla jännitysvaihteluilla [1].



Kuva 4.2 Hitsatun rakenteen eri tasoisia epäjatkuvuuskohtia ja tyypillinen alkusärön sijainti [2]

Edellä oleva perusoletus ei päde kaikille tapauksille vaan ainoastaan materiaaleille, joissa ei ole jäännösjännityksiä. Hitsausliitosten tärkein tekijä väsymisilmiössä on jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma$ suuruus. Nimellisen keskijännityksen merkitys on vähäinen hitsatussa tilassa olevissa rakenteissa, koska hitsauksen aiheuttamat jäännösjännitykset pitävät todellisen jännitystason korkeana. Hitsattujen, hitsatussa tilassa olevien rakenteiden väsymisstandardit perustuvatkin oletukseen, että jännitys heilahtelee vetomyötölujuudesta alaspäin riippumatta nimellisen jännityksen etumerkistä [1,2].



Kuva 4.3 Rakenteessa olevia epäjatkuvuuskohtia

Hitsatun rakenteen väsymiskestävyyteen vaikuttavat seuraavat seikat:

- jännitysten vaihteluväli
- kuormituskertojen lukumäärä
- rakenteen epäjatkuvuuskohdat (kuva 4.3)
- hitsien muotoilu
- alkusärön suuruus
- jäännösjännitykset ja
- teräksen sitkeys.

Hitsatussa tilassa olevan rakenteen väsymiskestävyys sen sijaan ei riipu käytetyn teräksen lujuudesta: kuten edellä todettiin, hitsatussa rakenteessa on aina valmiiksi pieniä alkusäröjä, ja niiden kasvu puolestaan tapahtuu kaikissa hitsattavissa rakenneteräksissä käytännöllisesti katsoen samalla nopeudella riippumatta teräksen myötölujuudesta. Lujasta teräksestä on hyötyä vain, jos alkusäröt pystytään poistamaan, sillä silloin särön ydintyminen ilman alkuvikaa olevaan pintaan vaikeutuu [2].

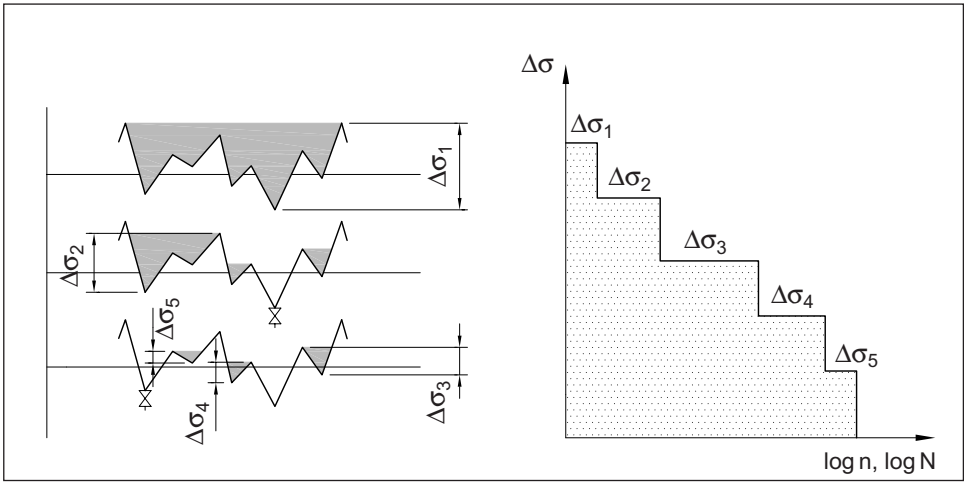
Väsytyskuormitetussa hitsatussa rakenteessa myötölujuuden kasvattamisesta on hyötyä silloin, jos rakenteen pysyvien kuormien osuus on suuri, tai jos väsyttävään kuormaan sisältyy yksittäisiä suuria maksimikuormia, joiden johdosta alemman lujuusluokan teräksen staattinen kestävyys ei riitä [3].

4.3 Jännityskertymä, vesisäiliömenetelmä

Todellinen jännitysvaihtelu on harvoin vakioamplitudista vaan jännitykset vaihtelevat satunnaisesti eli jännitys on muuttuva-amplitudista. Muuttuva-amplitudinen kuormitus täytyy mitoitusta varten muuttaa käyttökelpoiseen muotoon. Menetelmiä jännityshistorian muuntamiseksi jännityskertymäksi on useita, joista yleisesti käytössä on ns. vesisäiliö-menetelmä (reservoir method), jossa jännitysvaihtelut luokitellaan sopivalla porrastuksella vaihtelutasoihin ja lasketaan

kunkin vaihtelutason jännitysvaihteluiden lukumäärät. Suuruusjärjestyksen mukaisesti lajiteltuna jännitysvaihteluista muodostuu kuvan 4.4 mukainen jännityskertymä, jota voidaan hyödyntää väsymismitoituksessa jännitysvaihteluiden mitoitusarvoa tai Palmgren-Minerin vauriosummaa laskettaessa [1].

Standardeissa voidaan myös antaa valmiita tyypitettyjä jännityskertymiä. Esimerkiksi Eurocoden osassa EN 1991-3 on esitetty nostureita kannattaville rakenteille standardoidut kertymät eri nosturiluokille ekvivalenttien vauriokertoimien avulla.



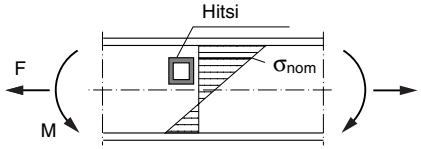
Kuva 4.4 Vesisäiliömenetelmä ja jännitysvaihteluiden kertymä. Vesisäiliömenetelmässä jännityshistoria kuvitellaan vettä täynnä olevaksi säiliöksi. Suurin jännitysheilahdus $\Delta\sigma_1$ vastaa vedenpinnan laskua, kun alimmasta kohdasta avataan pohjaventtiili. Seuraavaksi avataan venttiili josta saadaan seuraavaksi suurin vedenpinnan lasku ja tuloksena on $\Delta\sigma_2$. Näin jatketaan kunnes kaikki vesi on laskettu pois [1,2]

4.4 Hitsatun rakenteen väsymistarkastelun menetelmiä

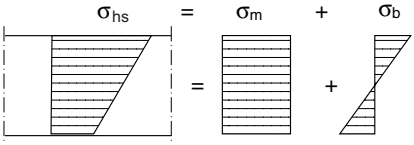
Väsymisanalyysin menetelmät voidaan karkeasti jakaa kahteen pääryhmään [1]:

- Wöhler- eli S-N-käyriin perustuvat menetelmät
- murtumismekaniikkaa soveltavat menetelmät

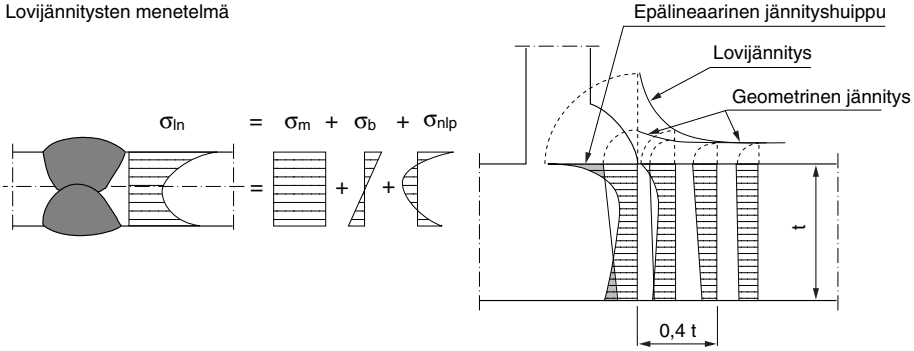
a) Nimellisten jännitysten menetelmä



b) Hot spot -jännitysten menetelmä



c) Lovijännitysten menetelmä



σ_{nom}	on nimellisjännitys (lineaarisen kimmoteorian mukaisia jännityksiä)
σ_{hs}	on hot spot -jännitys (epäjatkuvuuskohdan kriittisessä pisteessä oleva geometrinen jännitys)
σ_m	on kalvojännitys
σ_b	on kuoren taivutusjännitys
σ_{ln}	on lovijännitys
σ_{nlp}	on epälineaarinen huippujännitys

Kuva 4.5 Väsymistarkastelussa käytettäviä jännityksiä [4]

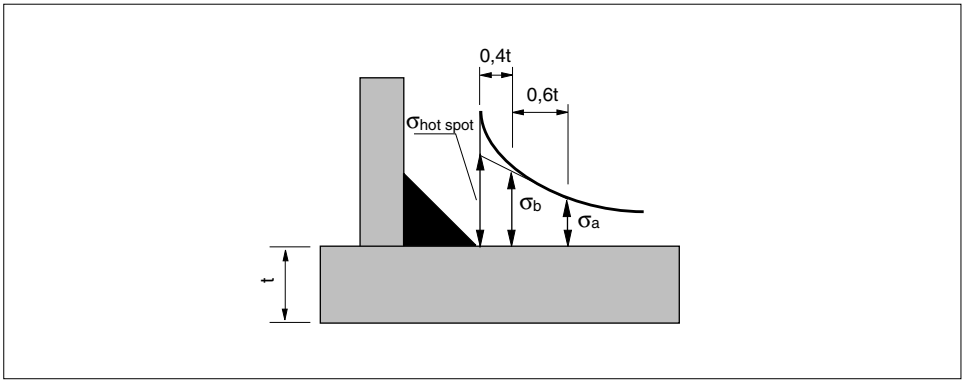
Wöhler- eli *S-N*-käyriin perustuvia menetelmiä ovat:

- nimelliseen jännitykseen perustuva menetelmä
- geometriseen (hot spot) jännitykseen perustuva menetelmä
- lovijännitykseen perustuva menetelmä
- lovikohdan venymään perustuva menetelmä

S-N-käyriin perustuvissa menetelmissä väsymislujuus on ilmaistu väsytyskokeiden tuloksena saatuina kuvan 4.7 mukaisina käyrinä. S tulee sanasta “Stress” (oikeastaan jännitysheilahdus, stress range) ja N vastaa murtumiseen johtavaa jännitysjaksojen lukumäärää.

Nimelliseen jännitykseen (kuva 4.5a) perustuvassa menetelmässä rakenteen jännitykset lasketaan kimmoteorian mukaan eikä rakenteen epäjatkuvuuskohtien vaikutusta oteta huomioon, koska ne sisältyvät kuormituskokeisiin. Sen sijaan ne makrogeometriset vaikutukset, jotka eivät sisälly koetuloksiin, on otettava jännitysten laskennassa huomioon.

Hot spot -menetelmä (kuva 4.5b) soveltuu vain tapauksille, joissa särö alkaa kasvaa hitsin rajaviivalta. Juuren puolelta alkavan särön kasvu tarkastellaan tavallisesti nimellisillä jännityksillä. Hot spot -jännitys on rakenteen epäjatkuvuuskohdan kriittisessä pisteessä oleva kyseisen kohdan geometriasta riippuva eli "geometrinen" jännitys. Särön oletetaan ydintyvän epäjatkuvuuskohtaan. Geometrinen jännitys voidaan jakaa kahteen osaan, kalvojännitykseen ja kuoren taivutusjännitykseen. Geometrinen jännitys sisältää rakenteen epäjatkuvuuskohdan aiheuttaman jännityskeskittymän ja on näin ollen nimellistä jännitystä suurempi kriittisessä pisteessä (hot spot -piste). Kriittinen piste sijaitsee tavallisesti hitsin rajaviivalla. Rakenne mallinnetaan sopivalla FEM-ohjelmalla jännitysten määrittämiseksi, tai jännitykset mitataan venymäliuskoilla tutkittavasta kohdasta. Koska tavoitteena on mitata rakenteellista jännitystä, joka ei sisällä loven läheisyydessä esiintyvää huippujännitystä, venymäliuskoja ei saa laittaa liian lähelle hitsin rajaviivaa (hitsin rajaviivalla olevan loven vaikutus sisältyy kokeellisesti määritettyyn S-N-käyrään). Yksityiskohdasta riippuen käytetään kahta tai kolmea mittauspistettä. Jos käytetään kahta mittauspistettä, hot spot -jännitys määritetään mittaamalla jännitykset kuvan 4.6 mukaisesti 0,4t ja 1,0t etäisyydeltä hitsin rajaviivasta (t on levyn paksuus) ja ekstrapoloimalla jännitys lineaarisesti tutkittavaan kohtaan. Jos käytetään kolmea mittauspistettä, ekstrapolointi suoritetaan epälineaarisesti. Hot spot -jännitys voidaan joissakin tapauksissa laskea myös kertomalla nimellinen jännitys konsentraatiokertoimella. Konsentraatiokertoimia esitetään kirjallisuudessa [2,5,6]. Konsentraatiokertoimelle käytetään eri lähteissä eri merkintöjä kuten k_f, K_s tai SCF (Stress Concentration Factor). Merkintöjen moninaisuudesta johtuen on kulloinkin syytä varmistua, että tarkoitetaan nimenomaan hot spot -jännityksen laskemiseen tarkoitettua jännityskonsentraatiokerrointa.



Kuva 4.6 Hot spot -jännityksen ekstrapolointi kun käytetään kahta mittauspistettä

Lovijännitykseen perustuva menetelmä (kuva 4.5c) soveltuu sekä hitsin rajaviivalta että juuren puolelta alkavan väsymisen tutkimiseen. Lovijännitys on todellinen jännitys loven pohjalla. Lovijännitykseen lisätään hot spot -jännityksessä vaikuttavien eri jännitysten (kalvojännitys ja kuoren taivutusjännitys) lisäksi loven aiheuttama epälineaarinen huippujännitys, joka rajoittuu yleensä n. 0,3 - 0,4t:n päähän loven pohjasta. Lovijännitysten laskemiseksi rakenne on mallinnettava sopivalla FEM-ohjelmalla [2].

Murtumismekaniikan avulla voidaan laskea väsymisikä särön kasvunopeuden perusteella. Alkusärön koko ja muoto vaikuttavat merkittävästi rakenteen käyttöikään.

Edellä mainittuja menetelmiä käsitellään enemmän mm. lähteissä [2,3].

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 esitetyt väsymistarkastelut perustuvat pääasiassa nimellisen jännityksen menetelmään, jota voidaan käyttää myös rakenneputkilla.

Lisäksi osan EN 1993-1-9 liitteessä B on esitetty muutamille tapauksille väsymisluokat myös hot spot -menetelmään perustuen. Hot spot -menetelmän osalta Eurocode on kuitenkin hyvin suppea, ja varsinaiset rakenneputkille sovellettavat ohjeet puuttuvat, vaikka hot spot -menetelmä on erityisen käyttökelpoinen juuri rakenneputkien monimuotoisille liitoksille. Tässä luvussa esitetään jäljempänä rakenneputkien ristikkoliitoksille tarkoitetut Eurocoden kanssa yhteensopivat hot spot -mitoitusohjeet perustuen pääosin lähteisiin [5,6,7].

Muita menetelmiä, kuten lovikohdan venymään perustuvaa menetelmää tai murtumismekaniikkaan perustuvaa menetelmää ei käsitellä osassa EN 1993-1-9.

4.5 S-N-käyrien käyttö väsymistarkasteluissa

Seuraavassa esitettävät ohjeet ja kaavat koskevat S-N-käyrien perusperiaatteita ilman mitoituksessa käytettäviä osavarmuuslukuja. Varsinaisissa mitoituslaskelmissa tarvittavat kuorman ja materiaalin osavarmuusluvut otetaan huomioon kohdassa 4.6 esitettävän mukaisesti.

4.5.1 Vakioamplitudisen kuormituksen S-N-käyrät

S-N-käyrästöissä (kuva 4.7) kunkin rakennedetaljin väsymislujuudet on esitetty perustuen eri rakennedetaljeille ominaisiin väsymisluokkiin, jotka vastaavat taulukoissa 4.4 - 4.9 esitettyjä väsymisluokkia. Väsymisluokka on ilmaistu merkinnällä $\Delta\sigma_C$, mikä vastaa väsymislujuutta jännitysvaihteluvälien lukumäärällä $N = 2 \cdot 10^6$, jossa aikaisemmin ajateltiin väsymisrajan jo olevan saavutettu.

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 on esitetty kaikkiaan 14 eri väsymisluokkaa välillä 36...160. Joissakin lähteissä väsymisluokalle käytetään myös merkintää FAT (Fatigue). Ainoastaan hitsaamattomilla tuotteilla (valssausreunaiset levyt ja profiilit) päästään parhaimpaan väsymisluokkaan 160. Pituussaumahitsattujen rakenneputkien väsymisluokka (kun $t \leq 12{,}5$ mm) on heti tämän alapuolella eli 140. Eurocoden väsymisluokkataulukoista nähdään, että kaikkien muiden rakennosien ja detaljien väsymisluokat jäävät tämän alapuolelle.

Eri liitostyypeille ja rakennedetaljeille tehdyissä väsytyskokeissa on havaittu, että kullakin jännitysvaihteluvälillä $\Delta\sigma$ väsymiseen johtava syklien (jännitysvaihteluvälien) lukumäärä N asettuu kohtalaisen hyvin log-log-asteikolla laskevalle suoralle, jonka kaltevuus on 1:3. Kun

pystyakselille merkitään $\log(\Delta\sigma)$ ja vaaka-akselille vastaavasti $\log(N)$, *S-N*-käyrän kalteva osa toteuttaa tällöin yhtälön [2]:

$$N \cdot (\Delta\sigma)^3 = C = vakio \quad \Rightarrow N = \frac{C}{(\Delta\sigma)^3} \tag{4.1}$$

missä N on väsymiseen johtava syklien lukumäärä
$\Delta\sigma$ on jännitysvaihteluväli
C on kullekin detaljityypille ominainen vakio

Yhtälössä (4.1) tarvittava vakio C voidaan ratkaista tarkasteltavan väsymisluokan avulla seuraavasti:

$$C = 2 \cdot 10^6 \cdot (\Delta\sigma_C)^3 \tag{4.2}$$

Vakioamplitudisella kuormituksella suoritetuissa testeissä on myöhemmin päädytty tulokseen, että varsinainen väsymisraja, eli jännitysvaihteluväli jonka alapuolella kestoikä voidaan olettaa äärettömäksi, asettuukin kuormanvaihtoluvun $N = 5 \cdot 10^6$ kohdalle, joten vakioamplitudisen kuormituksen *S-N*-käyrä kääntyy siinä vaakasuoraksi (kuva 4.7, katkoviivoitettu osa). Vastaavalle jännitysvaihteluvälille, eli vakioamplitudisen kuormituksen väsymisrajalle, käytetään merkintää $\Delta\sigma_D$.

Vakioamplitudisen kuormituksen väsymisraja $\Delta\sigma_D$ voidaan laskea tarkasteltavan väsymisluokan perusteella kaavasta:

$$\Delta\sigma_D = (2/5)^{1/3}\Delta\sigma_C = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C \tag{4.3}$$

4.5.2 Muuttuva-amplitudisen kuormituksen S-N-käyrät

Muuttuva-amplitudisella kuormituksella väsymisrajan merkitys on vähäisempi kuin vakioamplitudikokeissa. Jos jännitysvaihteluväli ylittää väsymisrajan ja syklejä on riittävän monta, ne ydintävät loven pohjalle terävän särön, jota sitten väsymisrajaa pienemmätkin jännitysheilahdukset pystyvät kasvattamaan. Mitä suuremmaksi särö ehtii kasvaa, sitä pienemmät jännitysheilahdukset pystyvät sitä kasvattamaan [2].

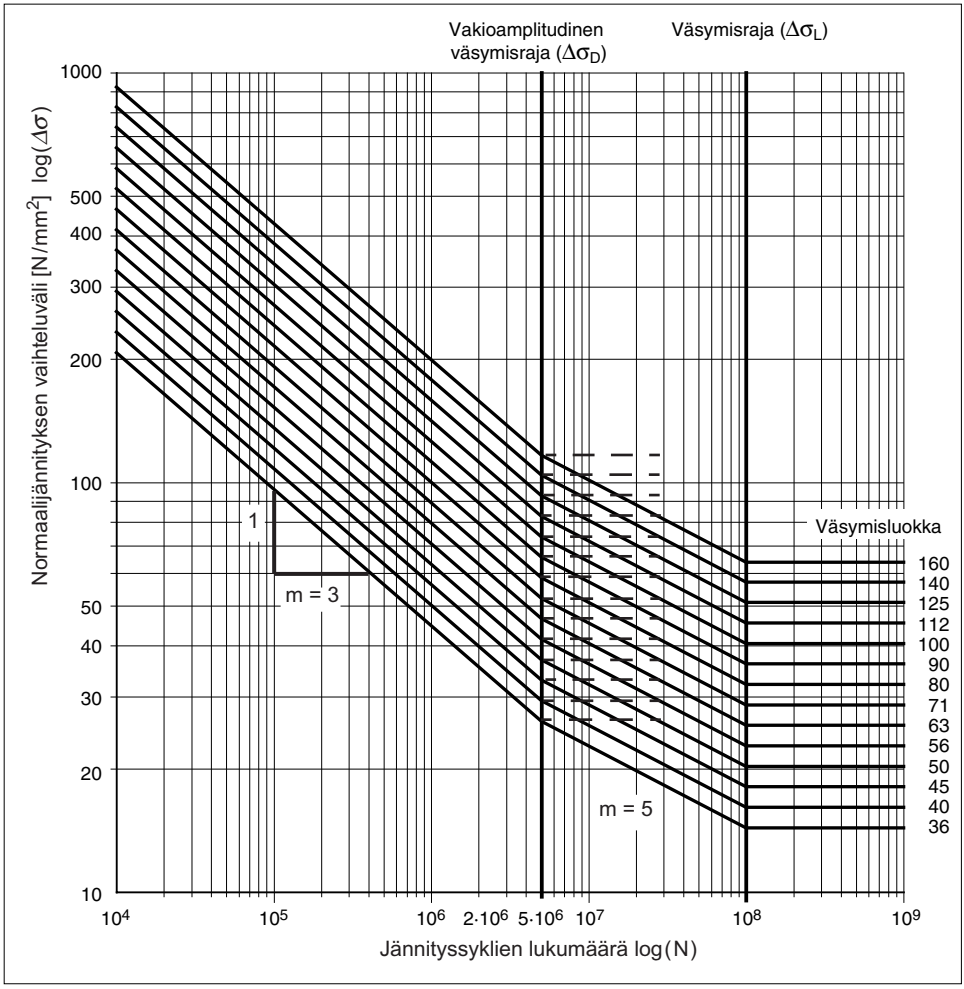
S-N-käyrissä tämä näkyy siten, että vakioamplitudisen kuormituksen väsymisrajan kohdalla käyrä ei käännykään vaakasuoraksi, vaan jatkuu edelleen alaspäin, tosin alkuosaa loivemmalla 1:5 kaltevuudella kuvassa 4.7 esitetyn mukaisesti. *S-N*-käyrää kutsutaan tällöin kaksoiskaltevaksi. Muuttuva-amplitudisen kuormituksen väsymisraja $\Delta\sigma_L$ saavutetaan kohdassa $N = 1 \cdot 10^8$, jossa käyrä kääntyy vaakasuoraksi. Väsymisrajaa $\Delta\sigma_L$ pienemmät jännitysheilahdukset voidaan jättää ottamatta huomioon muuttuva-amplitudisen kuormituksen väsymistarkasteluissa. Kuvan 4.7 käyrää käytetään nimellisten jännitysten menetelmässä myös rakenneputkille.

Lauseketta (4.1) vastaten *S-N*-käyrän loivempi osa noudattaa tällöin seuraavaa kaavaa:

$$N \cdot (\Delta\sigma)^5 = C = vakio \quad \Rightarrow N = \frac{C}{(\Delta\sigma)^5} \tag{4.4}$$

Muuttuva-amplitudisen kuormituksen alempi väsymisraja $\Delta\sigma_L$ (ks. kuva 4.7) saadaan kaavasta:

$$\Delta\sigma_L = (5/100)^{1/5}\Delta\sigma_D = 0,549 \cdot \Delta\sigma_D = 0,405 \cdot \Delta\sigma_C \qquad (4.5)$$



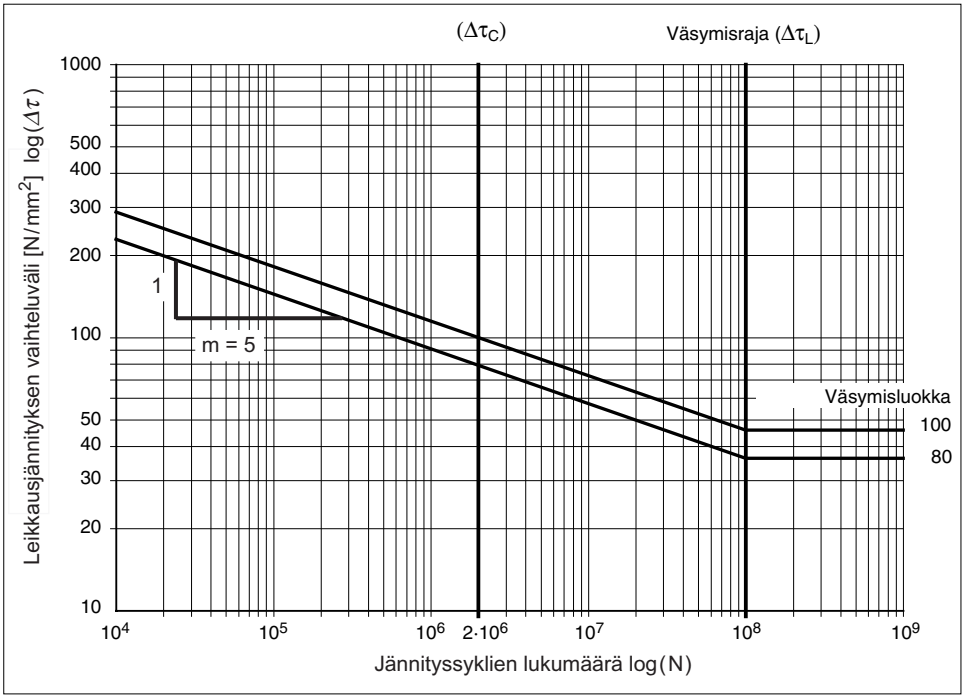
Kuva 4.7 Väsymislujuuden kaksoiskaltevat S-N-käyrät normaalijännityksen vaihteluväleille log-log-asteikolla

Leikkausjännityksen vaihteluväleille käytetään sekä vakioamplitudisella että muuttuva-amplitudisella kuormituksella samaa yksiosaista 1:5 kaltevuudella olevaa S-N-käyrää kuvan 4.8 mu-

kaisesti. Leikkausjännityksen vaihteluväleillä on kussakin väsymisluokassa vain yksi väsymisraja $\Delta\tau_L$ joka asettuu kuormanvaihtoluvun $N = 1 \cdot 10^8$ kohdalle, jossa käyrä kääntyy vaakasuoraksi. Leikkausjännityksen vaihteluvälin väsymisraja voidaan laskea kaavasta:

$$\Delta\tau_L = (2/100)^{1/5}\Delta\tau_C = 0,457 \cdot \Delta\tau_C \qquad (4.6)$$

Kuvan 4.8 käyrää käytetään nimellisten jännitysten menetelmässä myös rakenneputkille, kun kyseessä on leikkausjännityksen vaihteluväli.



Kuva 4.8 Väsymislujuuden yksiosaiset S-N-käyrät leikkausjännityksen vaihteluväleille log-log-asteikolla

Muuttuva-amplitudisen kuormituksen aiheuttamat erisuuret jännitysvaihtelut käsitellään väsymistarkasteluissa ns. Palmgren-Minerin säännöllä, joka perustuu kumulatiiviseen vaurion summaamiseen siten, että jokainen $\Delta\sigma_i$ -taso vaurioittaa liitosta n_i / N_i verran, jolloin kestoikä katsotaan saavutetun kun kumulatiivinen vaurio saavuttaa arvon 1:

$$\sum \frac{n_i}{N_i} \leq 1,0 \qquad (4.7)$$

missä n_i on $\Delta\sigma_i$:n suuruisten jännitysvaihteluvälien lukumäärä

N_i on vaurion aiheuttavien $\Delta\sigma_i$:n suuruisten jännitysvaihteluvälien lukumäärä (väsymisikä) tarkasteltavassa väsymisluokassa S-N-käyrän mukaisesti

Palmgren-Minerin vauriosumman laskenta voidaan korvata ns. ekvivalentilla vakioamplitudisella jännitysvaihteluvälillä. Ekvivalentti jännitysvaihteluväli voidaan määrittää joko asettamalla osavaurioiden summa yhtä suureksi kuin alkuperäisellä syklien kokonaismäärällä aiheutuva ekvivalentin jännitysheilahduksen aiheuttama kokonaisvaurio, tai määrittämällä ekvivalentti jännitysheilahdus jonkin muun kuormanvaihtoluvun referenssimäärän perusteella. Usein ekvivalentti jännitysvaihteluväli määritetään valitsemalla kuormanvaihtoluvun N referenssiarvoksi $N = 2 \cdot 10^6$. Tätä vastaava ekvivalentti jännitysvaihteluväli $\Delta\sigma_{E.2}$ on tällöin:

$$\Delta\sigma_{E.2} = \sqrt[3]{\frac{\sum(n_i \cdot \Delta\sigma_i^{\,3})}{2 \cdot 10^6}} \qquad (4.8)$$

missä n_i ja $\Delta\sigma_i$ ovat tarkasteltavassa väsymisluokassa väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ yläpuolella olevia jännitysvaihteluvälejä ja niiden syklien lukumääriä.

Kaksoiskaltevaa S-N-käyrää varten kaava (4.8) voidaan muokata seuraavaan muotoon:

$$\Delta\sigma_{E.2} = \sqrt[3]{\frac{\sum(n_i \cdot \Delta\sigma_i^{\,3}) + \left(\frac{C}{5 \cdot 10^6}\right)^{-2/3} \cdot \sum(n_j \cdot \Delta\sigma_j^{\,5})}{2 \cdot 10^6}} \qquad (4.9)$$

missä n_i ja $\Delta\sigma_i$ ovat tarkasteltavassa väsymisluokassa väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ yläpuolella olevia jännitysvaihteluvälejä ja niiden syklien lukumääriä

n_j ja $\Delta\sigma_j$ ovat tarkasteltavassa väsymisluokassa väsymisrajojen $\Delta\sigma_D$ ja $\Delta\sigma_L$ väliin sijoittuvia jännitysvaihteluvälejä ja vastaavia syklien lukumääriä (jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_L$ alapuolelle jääviä jännitysheilahduksia ei oteta huomioon)

C on tarkasteltavan rakenneyksityiskohdan väsymisluokan mukainen vakio, joka lasketaan kaavasta (4.2)

4.6 Hitsatun rakenteen väsymiskestävyys Eurocoden mukaisesti

4.6.1 Perusvaatimukset

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 esitetyt ohjeet rakenneosien, kiinnitysten ja liitosten väsymiskestävyyden tarkastamiseksi perustuvat S-N-käyrien mukaiseen väsymislujuuteen. Standardissa esitetyt S-N-käyrien väsymislujuudet perustuvat suurten koekappaleiden täysimittakaavaisiin väsytystesteihin, joten niihin sisältyy vaikutuksia geometrisista ja rakenteellisista epäjatkuvuuksista, sekä valmistustoleranssien ja hitsauksen jäännösjännitysten vaikutuksia.

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 esitetyt ohjeet pätevät kaikille rakenneteräksille, ruostumattomille teräksille ja suojaamattomille säänkestäville teräksille, kun [8,9,10]:

- rakenteet toteutetaan standardin EN 1090-2 mukaisesti (valmistuksen laatu, toleranssit jne.) (Eurocoden osan EN 1993-1-9 väsymisluokkia koskevien taulukoiden yhteydessä on tarvittaessa esitetty lisävaatimuksia, ks. kirjan taulukot 4.4 - 4.9)
- materiaali täyttää Eurocoden osan EN 1993-1-10 mukaiset sitkeysvaatimukset
- rakenteet ovat tavallisissa ilmasto-olosuhteissa ja ne on suojattu riittävästi korroosion suhteen
- rakenteiden lämpötila on enintään 150 ºC
- tavallisista kuormista $\psi_1 Q_k$ aiheutuvat nimelliset, muunnetut nimelliset ja geometriset jännitysvaihteluvälit ovat normaalijännityksille enintään $\Delta\sigma \leq 1,5 f_y$ ja leikkausjännityksille enintään $\Delta\tau \leq 1,5 f_y / \sqrt{3}$

Väsymismitoituksessa jännitysten vaihteluvälin rajoittamisen taustalla on tarve estää vaihtoplastisoitumisen tapahtuminen väsytyskuormitetussa rakenneosassa. Sitä ajatellen edellä esitetty mitoituskuormaan $\psi_1 Q_k$ perustuva Eurocoden rajoitus ei ole riittävä, ja se on ristiriidassa Eurocodessa itsessään jäljempänä esitettyjen ohjeiden kanssa, jossa varsinainen jännitysvaihteluvälien $\Delta\sigma$ ja $\Delta\tau$ laskenta määritetään suoritettavaksi mitoituskuormalla $\gamma_{Ff} Q_k$ (esim. kaavat (4.12) ja (4.13)). Tämän vuoksi on suositeltavaa, että myös jännitysvaihteluvälien rajoittaminen määritetään vastaavaan mitoituskuormaan perustuen seuraavasti:

$$\Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \leq 1,5 f_y \qquad \textit{normaalijännityksille} \qquad (4.10)$$

$$\Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k) \leq 1,5 f_y / \sqrt{3} \qquad \textit{leikkausjännityksille} \qquad (4.11)$$

4.6.2 Luotettavuustarkastelut

Väsymistarkasteluissa käytettävä kuorman osavarmuusluku on annettu esimerkiksi Eurocoden osissa EN 1993-2 (Terässillat) ja EN 1993-6 (Nostureita kannattavat rakenteet), joissa sille on esitetty suositusarvo γ_{Ff} = 1,0. Arvoa 1,0 voidaan yleensäkin käyttää väsyttävälle kuormalle, ellei erikseen muuta ole sanottu.

Kestävyyden osavarmuusluvut γ_{Mf} määräytyvät väsymistarkasteluissa taulukon 4.1 mukaisesti riippuen sovellettavasta mitoitusperiaatteesta ja mahdollisen vaurion seurauksista. Kansallisessa liitteessä voidaan antaa ohjeita sovellettavasta mitoitusperiaatteesta ja sen yhteydessä käytettävistä kestävyyden osavarmuusluvuista.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-9 [11]:

Käytetään Eurocodessa suositeltuja taulukon 4.1 mukaisia arvoja.
Yleensä käytetään varman kestämisen periaatetta.

Taulukko 4.1 Kestävyyden osavarmuusluvun γ_{Mf} arvot väsymistarkasteluissa [8...11]

Luotettavuustarkastelu	Vaurion seuraukset	
	Pienet	Suuret
Vaurionsietoperiaate	1,00	1,15
Varman kestämisen periaate	1,15	1,35
- Taulukossa on esitetty Eurocoden osan EN 1993-1-9 suositusarvot. - Suomen kansallinen liite: Käytetään Eurocoden suositusarvoja.		

Vaurionsietoperiaate eli särön kasvamisen salliva periaate edellyttää, että kasvavat säröt havaitaan ja määrätään korjattavaksi pakollisilla määräaikaistarkastuksilla, joita noudatetaan rakenteen koko käyttöiän ajan. Suunnittelijan tulee määrittää tarkastusohjeet sekä suurin sallittu vikakoko ottaen huomioon tarkastettavuus ja rakenteen todellinen käyttö sekä antaa ohjeet vian korjaamiseksi. Lisäksi edellytetään, että väsymisvaurion kuitenkin sattuessa kuormien uudelleenjakautuminen voi tapahtua eri rakenneosien välillä ja jäljelle jäävä rakenne pystyy kantamaan vähintään käytetyn kuormayhdistelmän ilman murtumista [8,9,10].

Varman kestämisen periaate antaa hyväksyttävän luotettavuustason rakenteen koko suunnitellulle käyttöiälle ilman säännöllistä väsymisvaurioiden käytön aikaista tarkastusta. Varman kestämisen periaatetta sovelletaan tapauksissa, joissa yhdessä rakenneosassa syntyvät paikalliset säröt voivat nopeasti aiheuttaa rakenneosan tai koko rakenteen murtumisen [8,9,10].

4.6.3 Väsymistarkastelut

Väsymistarkastelu tehdään tapauksesta riippuen seuraavasti [8,9,10]:

- käyttämällä **nimellistä jännitysvaihteluväliä** taulukoiden 4.4 - 4.9 ohjeiden mukaisesti tarkasteltavalle rakenneyksityiskohdalle (väsymisluokalle)

- käyttämällä **muunnettua nimellistä** jännitysvaihteluväliä rakenneyksityiskohdille, joissa väsymistarkastelukohdassa esiintyy makrogeometrisia vaikutuksia, jotka eivät sisälly taulukoiden 4.4 - 4.9 tarkasteltavaan tapaukseen (esim. poikkileikkaus muuttuu jyrkästi särön ydintymiskohdan lähellä)

- käyttämällä **geometriseen (hot spot) jännitykseen** perustuvaa menetelmää

4.6.3.1 Väsymistarkastelu nimellisten jännitysten menetelmällä

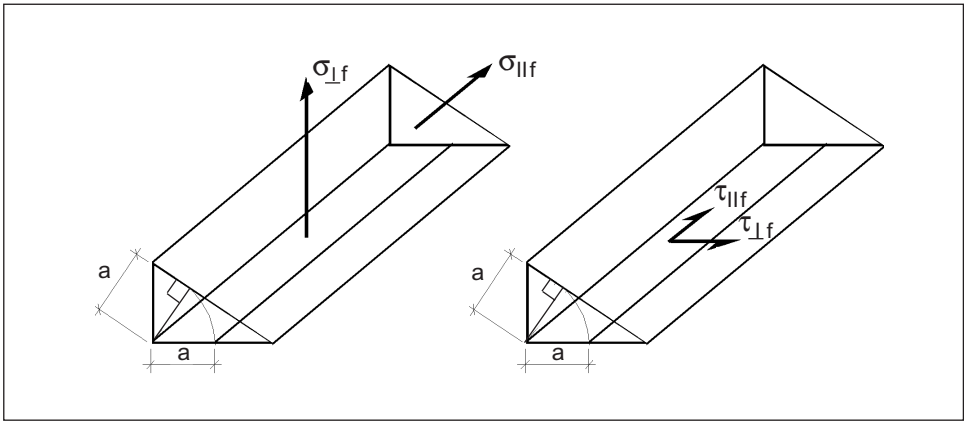
Jännitykset lasketaan potentiaalisessa väsymissärön esiintymiskohdassa käyttörajatilakuormilla lineaarisen kimmoteorian mukaisesti. Poikkileikkausluokassa 4 jännitykset lasketaan tehollisen poikkileikkauksen perusteella noudattaen Eurocoden osan EN 1993-1-5 mukaisia sääntöjä [8,9,10].

Nimellisten jännitysten laskentamallissa jännitykseen lasketaan mukaan kaikkien sellaisten epäjatkuvuuskohtien vaikutukset, joita ei ole esiintynyt koesauvoissa, ja jotka eivät näin ollen implisiittisesti sisälly tarkasteltavaan taulukoiden 4.4 - 4.9 mukaiseen rakenneyksityiskohtaan.

Perusmateriaalissa kyseeseen tulevat jännitykset ovat:
- nimellinen normaalijännitys σ
- nimellinen leikkausjännitys τ

Hitsien kyseeseen tulevat jännitykset ovat kuvan 4.9 mukaisesti:
- hitsin akselia vastaan kohtisuora normaalijännitys: $\sigma_{wf} = \sqrt{\sigma_{\perp f}^2 + \tau_{\perp f}^2}$
- hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys: $\tau_{wf} = \tau_{\parallel f}$

Edellä esitetty menetelmä poikkeaa kohdassa 3.3.3 esitetystä Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaisesta pienahitseille murtorajatilassa esitetystä menetelmästä. Jännityksille σ_{wf} ja τ_{wf} tehdään kummallekin oma tarkastelunsa.



Kuva 4.9 Pienahitsin jännitykset [8,9,10]

Rakenneputkien hitsausliitokset toteutetaan yleensä täysin läpihitsattuina päittäishitseinä, tai tasalujuusperiaatteen mukaisesti mitoitettuina pienahitseinä (ks. kohta 3.3). Väsymiskestävyyden kannalta kriittisin kohta on kummassakin tapauksessa hitsin rajaviivalla, johon väsymissärö muodostuu. Tällöin hitsille itselleen ei tarvitse yleensä tehdä erillistä väsymistarkastelua, vaan väsymistarkastelu perustuu perusaineen jännitysvaihteluun riippumatta siitä, suoritetaanko väsymistarkastelu nimellisten jännitysten menetelmällä (kyseiselle liitokselle taulukoissa määritellyn väsymisluokan mukaisesti) tai hot spot -jännitysten menetelmällä.

Väsymistarkasteluissa käytettävä jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo on $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$, missä $\Delta\sigma_{E.2}$ on ekvivalentti jännitysvaihteluväli kuormanvaihtoluvulla $N = 2 \cdot 10^6$ (ks. kohta 4.5.2).

Nimellisen jännitysvaihteluvälin mitoitusarvot $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$ ja $\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E.2}$ määritetään seuraavasti [8,9,10]:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \ldots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\sigma(\gamma_{Ff} Q_k) \qquad \textit{normaalijännityksille} \qquad (4.12)$$

$$\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E.2} = \lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \lambda_i \cdot \ldots \cdot \lambda_n \cdot \Delta\tau(\gamma_{Ff} Q_k) \qquad \textit{leikkausjännityksille} \qquad (4.13)$$

missä kertoimet λ_i ovat ekvivalentteja vauriokertoimia, jotka riippuvat kuormituksen luonteesta ja jännitysvaihteluvälien lukumäärästä. Ne saadaan asianomaisista Eurocoden osista, esim. nostureita kannattaville rakenteille EN 1991-3: taulukko 2.12.

Jos tietoa λ_i-kertoimista ei ole olemassa, nimellisen jännitysvaihteluvälin arvo voidaan määrittää kohtien 4.3 ja 4.5 mukaisesti. Jännitysvaihteluvälien huippuarvot, jotka edustavat vähemmän kuin 1 % kokonaisvauriosta, ja pienet jännitysvaihteluvälit jotka ovat väsymisrajan alarajaarvon $\Delta\sigma_L$ alapuolella, voidaan jättää huomioon ottamatta [8,9,10].

Väsymislujuus:

Eurocoden osan EN 1993-1-9 mukaisin merkinnöin väsymislujuudet $\Delta\sigma_R$ ja $\Delta\tau_R$ lasketaan vakioamplitudiselle nimelliselle jännitysvaihteluvälille seuraavasti [8,9,10]:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \qquad missä\ \ m = 3\ \ kun\ \ N \le 5 \cdot 10^6 \qquad (4.14)$$

$$\Delta\tau_R^m N_R = \Delta\tau_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \qquad missä\ \ m = 5\ \ kun\ \ N \le 1 \cdot 10^8 \qquad (4.15)$$

Vaihtuva-amplitudiselle kuormitukselle normaalijännityksen väsymislujuudet $\Delta\sigma_R$ lasketaan kaksoiskaltevan S-N-käyrän perusteella seuraavasti [8,9,10]:

$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_C^m \cdot 2 \cdot 10^6 \qquad missä\ \ m = 3\ \ kun\ \ N \le 5 \cdot 10^6 \qquad (4.16)$$

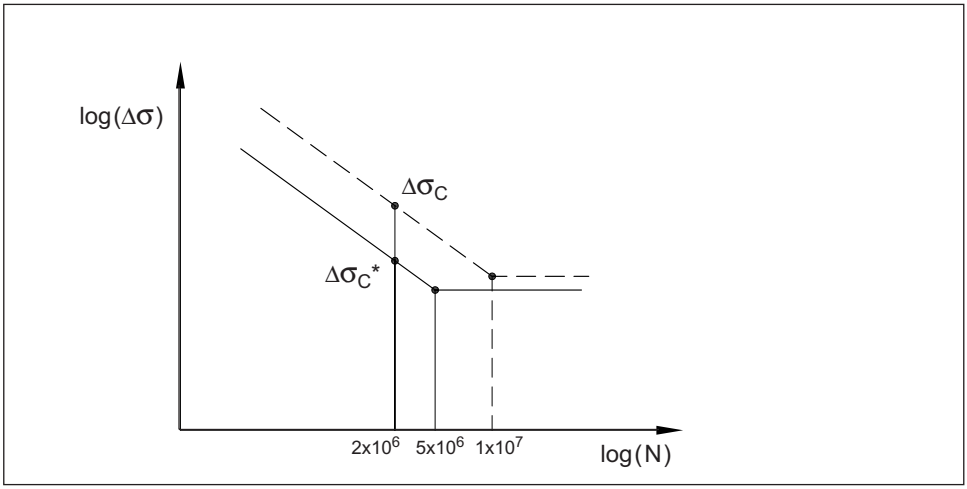
$$\Delta\sigma_R^m N_R = \Delta\sigma_D^m \cdot 5 \cdot 10^6 \qquad missä\ \ m = 5\ \ kun\ \ 5 \cdot 10^6 \le N \le 1 \cdot 10^8 \qquad (4.17)$$

Lausekkeiden (4.14) - (4.17) mukaiset väsymislujuudet vastaavat kuvissa 4.7 ja 4.8 esitettyjä S-N-käyriä, joita käytetään myös rakenneputkille.

Joidenkin rakenneyksityiskohtien väsytyskoetulokset eivät täysin sovi yhteen kuvan 4.7 mukaisiin väsymislujuuden S-N-käyriin. Mahdollisen alimitoituksen välttämiseksi taulukoissa 4.4 - 4.9 tähdellä merkittyjen rakennedetaljien väsymisluokat ($\Delta\sigma_C$*) ovat yhden luokan alempana, kuin niiden $2 \cdot 10^6$ sykliä vastaava väsymisluokka edellyttää. Vaihtoehtoisesti voidaan menetellä siten, että tähdellä merkityn rakennedetaljin väsymisluokkaa kasvatetaan yhdellä väsymisluokalla edellyttäen, että vakioamplitudinen väsymisraja $\Delta\sigma_D$ määritetään tällöin kuvan 4.10 mukaisesti $1 \cdot 10^7$ sykliä vastaavana pienennettynä väsymisrajana käyttäen S-N-käyrän kaltevuudelle arvoa m = 3 [8,9,10].

Kuormanvaihtolukua $N = 1 \cdot 10^7$ vastaava pienennetty väsymisraja $\Delta\sigma_{D.red}$ voidaan laskea kaavasta:

$$\Delta\sigma_{D.red} = (2/10)^{1/3} \Delta\sigma_C = 0,585 \cdot \Delta\sigma_C \qquad (4.18)$$



Kuva 4.10 Vaihtoehtoinen väsymislujuuden S-N-käyrä rakenneyksityiskohdille, jotka on luokiteltu merkinnällä $\Delta\sigma_C$* [8,9,10]

Todentaminen väsymisen suhteen:

Väsymistarkasteluissa käytettävät mitoitusehdot ovat [8,9,10]:

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}} \le 1,0 \qquad \textit{normaalijännityksen vaihteluväleille} \qquad (4.19)$$

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E.2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}} \le 1,0 \qquad \textit{leikkausjännityksen vaihteluväleille} \qquad (4.20)$$

missä $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$ ja $\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E.2}$ määritetään kaavojen (4.12) ja (4.13) mukaisesti
γ_{Ff} on väsyttävän kuorman osavarmuusluku (kohta 4.6.2)
$\Delta\sigma_C$ ja $\Delta\tau_C$ ovat taulukoiden 4.4 - 4.9 mukaisia tarkasteltavan rakenneyksityiskohdan väsymisluokkia
γ_{Mf} määritetään kohdan 4.6.2 mukaisesti

Joidenkin rakenneyksityiskohtien osalta mitoitusehdot (4.19) ja (4.20) tarkastetaan pääjännitysten jännitysvaihteluvälien suhteen (ks. taulukko 4.7).

Ellei toisin mainita, taulukoiden 4.4 - 4.9 mukaisissa rakenneyksityiskohdissa yhdistettyjen jännitysvaihteluvälien $\Delta\sigma_{E.2}$ ja $\Delta\tau_{E.2}$ tapauksissa todennetaan lisäksi seuraava yhteisvaikutusehto [8,9,10]:

$$\left[\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}}{\Delta\sigma_C/\gamma_{Mf}}\right]^3 + \left[\frac{\gamma_{Ff}\Delta\tau_{E.2}}{\Delta\tau_C/\gamma_{Mf}}\right]^5 \le 1,0 \qquad (4.21)$$

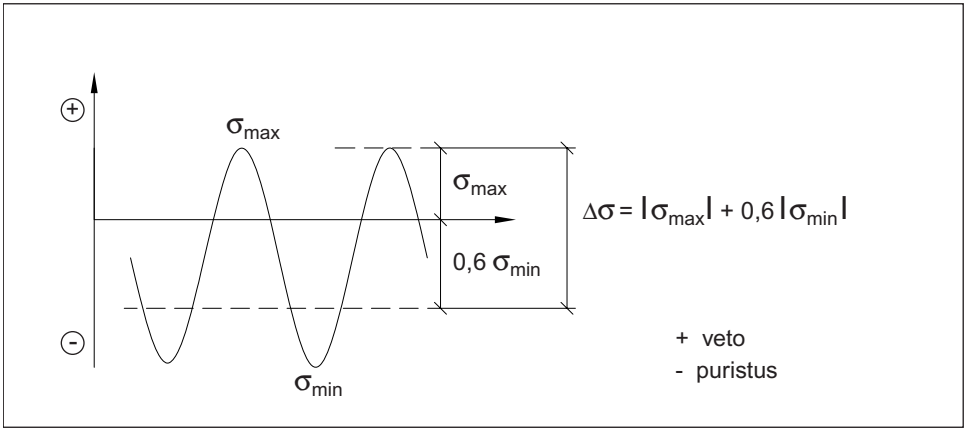
Taulukoissa 4.4 - 4.9 on esitetty joitakin Eurocoden osassa EN 1993-1-9 rakenneputkille ja niiden yhteydessä esiintyville rakenneyksityiskohdille määritettyjä väsymisluokkia.

4.6.3.2 Väsymistarkastelu muunnettujen nimellisten jännitysten menetelmällä

Kohdan 4.6.3.1 mukaisesti laskettuja nimellisiä jännityksiä, jännitysvaihteluvälejä tai väsymislujuuksia on tietyissä tilanteissa muunnettava korjaustermeillä ennen todentamisen suorittamista. Muuntamista koskevat Eurocoden osan EN 1993-1-9 ohjeet on esitetty tässä kokonaisuudessaan, vaikka rakenneputkien osalta kyseeseen tuleekin käytännössä ainoastaan viimeinen tapaus (Rakenneputkien ristikkorakenteet).

Jännitysvaihtelu puristuspuolella:

Eurocode sallii kuvan 4.11 mukaisesti puristuspuolella tapahtuvan jännitysvaihtelun redusoinnin kertoimella 0,6, jos hitsatusta rakenteesta on poistettu jäännösjännitykset myöstämällä, tai rakenteessa ei ole hitsejä [8,9,10].



Kuva 4.11 Puristuspuolella tapahtuvan jännitysvaihtelun redusointi kun hitsatusta rakenteesta on poistettu jäännösjännitykset tai rakenteessa ei ole hitsejä [8,9,10]

Koon vaikutus:

Paksuudesta tai muista geometrisista vaikutuksista aiheutuva koon vaikutus otetaan huomioon taulukoiden 4.4 - 4.9 ohjeiden mukaisesti. Väsymislujuus määritetään tällöin seuraavasti [8,9,10]:

$$\Delta\sigma_{C.red} = k_s \cdot \Delta\sigma_C \qquad (4.22)$$

missä kerroin k_s saadaan taulukoista 4.4 - 4.9.

Levyn paksuus vaikuttaa väsymislujuuteen kolmella tavalla [2]:
- geometrisena vaikutuksena
- tilastollisena vaikutuksena
- teknologisena vaikutuksena

Geometrinen vaikutus syntyy seuraavasti: Paksun aineen pinnalla olevien lovien vaikutus ulottuu syvemmälle aineeseen kuin ohuessa rakenneosassa. Siten kasvuun lähtenyt särö saa kasvaa pitempään korkean huippujännityksen alueella ja paksun rakenneosan kestoikä jää normaalia lyhyemmäksi. Levyrakenteissa rajana pidetään 25 mm paksuutta, josta ylöspäin väsymislujuus heikkenee [2].

Tilastollinen vaikutus syntyy siitä, että raskaissa rakenteissa on enemmän hitsiä ja siten suurempi mahdollisuus, että esiintyy normaalia suurempi alkuvika [2].

Teknologinen vaikutus syntyy siitä, että paksuja aineita hitsataan suuremmilla hitsausprosessin arvoilla, joten jäännösjännitykset ja alkuviat voivat olla suurempia [2].

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 levyn paksuuden vaikutus on määritetty kaavassa (4.22) esitetyn väsymislujuuden pienennyskertoimen k_s avulla seuraavasti [8,9,10]:

$$k_s = \left(\frac{25mm}{t}\right)^{0,2} \qquad kun \;\; t > 25mm \tag{4.23}$$

Rakenneputkien ristikkoliitokset:

Rakenneputkista valmistetun tasoristikon rakenneanalyysi voidaan suorittaa yksinkertaistetulla rakennemallilla, jossa paarteet mallinnetaan jatkuvina mutta uumasauvojen ja paarteiden väliset liitokset oletetaan nivelellisiksi. Liitosten epäkeskeisyyden osalta Eurocoden osan EN 1993-1-9 ohjeet ovat puutteelliset. Tässä käsikirjassa tulkintana on, että liitosten epäkeskeisyys voidaan jättää huomioon ottamatta, kun epäkeskeisyys ei ylitä taulukossa 4.6 ristikkoliitoksille esitettyjä vaatimuksia.

Todellisuudessa liitoksilla kuitenkin on jäykkyyttä, jota yksinkertaistettu nivelmalli ei ota huomioon. Jäykkyydestä puolestaan aiheutuu sauvoihin sekundäärisiä taivutusmomentteja. Niiden huomioon ottamiseksi muunnetun nimellisen jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$ määritetään seuraavasti [8,9,10]:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2} = k_1 \cdot (\gamma_{Ff}\Delta\sigma^{*}_{E.2}) \tag{4.24}$$

missä $\gamma_{Ff}\Delta\sigma^{*}_{E.2}$ on ristikon yksinkertaistetulla nivelmallilla laskettu jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo

γ_{Ff} on väsyttävän kuorman osavarmuusluku (kohta 4.6.2)

k_1 on taulukon 4.3 mukainen suurennuskerroin

Vaihtoehtoisesti suurennuskertoimen k_1 vaikutus voidaan ottaa huomioon kertomalla rakenneanalyysistä saadut sauvavoimat (tai jännitykset) suoraan kyseisellä tekijällä. Taulukossa 4.3 esitetyt suurennuskertoimen k_1 arvot ovat likimääräisiä kokemusperäisiä tai kokeellisia arvoja.

Rakenneputkien ristikkoliitoksissa normaalijännityksen vaihteluväleille käytetään sekä vakioamplitudisella että muuttuva-amplitudisella kuormituksella samaa yksiosaista 1:5 kaltevuudella olevaa S-N-käyrää kuvan 4.12 mukaisesti. Jännityksen vaihteluväleillä on kussakin väsymisluokassa vain yksi väsymisraja $\Delta\sigma_L$ joka asettuu kuormanvaihtoluvun $N = 1 \cdot 10^8$ kohdalle, jossa käyrä kääntyy vaakasuoraksi. Ristikkoliitosten S-N-käyrien väsymisrajat on esitetty taulukossa 4.2, jossa esitetyt arvot voidaan laskea kaavasta:

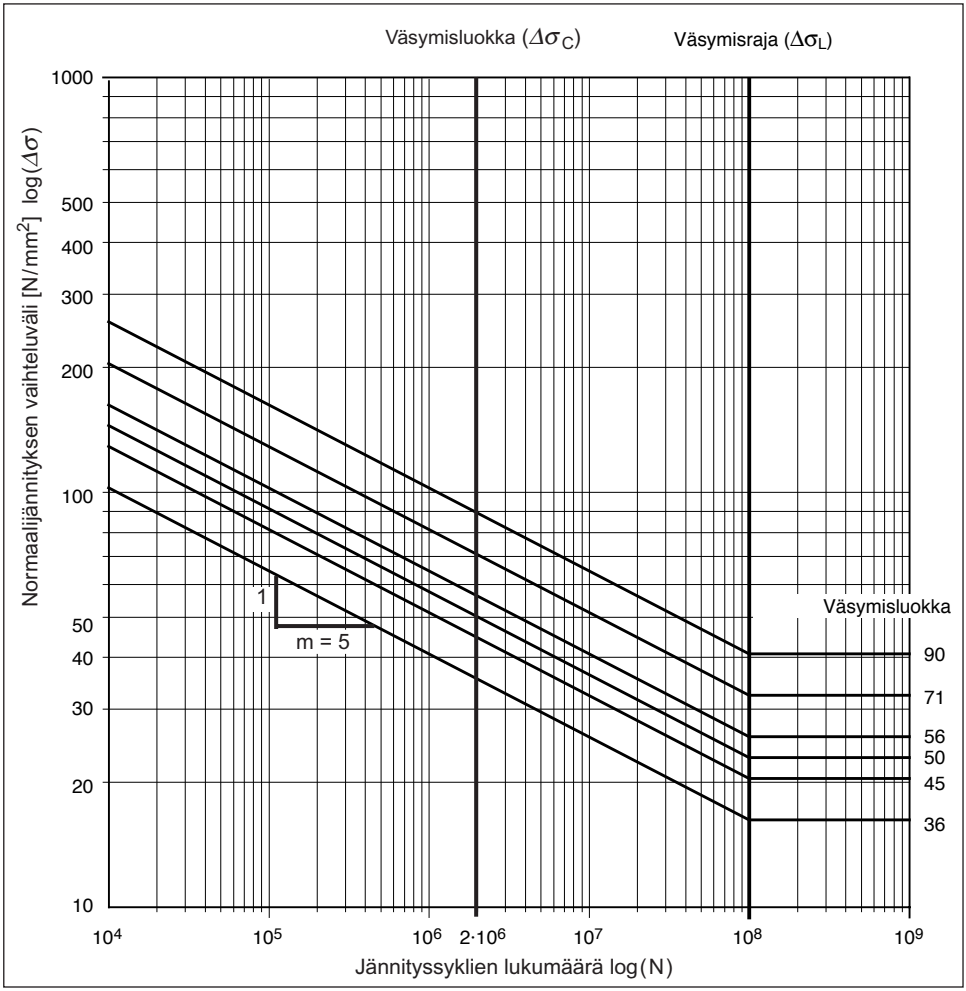
$$\Delta\sigma_L = (2/100)^{1/5}\Delta\sigma_C = 0,457 \cdot \Delta\sigma_C \qquad (4.25)$$

Jännitysvaihteluvälit $\Delta\sigma$ voidaan muuttaa ekvivalentiksi jännitysvaihteluväliksi $\Delta\sigma_{E.2}$ soveltamalla kaavaa (4.8) seuraavasti: kaavan juurena ja potenssina oleva lukuarvo 3 korvataan lukuarvolla 5 vastaamaan ristikkoliitosten kaltevuudella 1:5 olevia yksiosaisia S-N-käyriä. Väsymisrajan $\Delta\sigma_L$ alapuolella olevia jännitysvaihteluvälejä ei oteta huomioon.

Kun muunnetun nimellisen jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$ on määritetty edellä esitetyn mukaisesti, suoritetaan todentaminen normaalisti mitoitusehdolla (4.19).

Väsymistarkastelu suoritetaan erikseen liitoksen kullekin sauvalle [8,9,10].

Nimellisten jännitysten menetelmä antaa ristikkorakenteilla vain karkean arvion rakenteen väsymiskestävyydestä. Esim. paarteen ja uumasauvojen jännitysten todellista yhteisvaikutusta väsymiskestävyyteen on vaikea ottaa huomioon nimellisten jännitysten menetelmässä. Kohdassa 4.6.3.3 on esitetty tarkempi hot spot -jännitysten menetelmä rakenneputkista valmistettujen ristikkorakenteiden liitoksille.



Kuva 4.12 Rakenneputkien ristikkoliitosten yksiosaiset S-N-käyrät nimellisten jännitysten menetelmässä

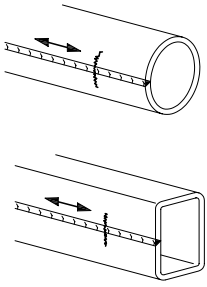
Taulukko 4.2 Nimellisen jännityksen vaihteluvälin väsymisraja $\Delta\sigma_L$ rakenneputkien ristikkoliitosten S-N-käyrissä [7]

Väsymisluokka (N/mm^2)	Väsymisraja $\Delta\sigma_L$ (N/mm^2)
90	41
71	32
56	26
50	23
45	21
36	16

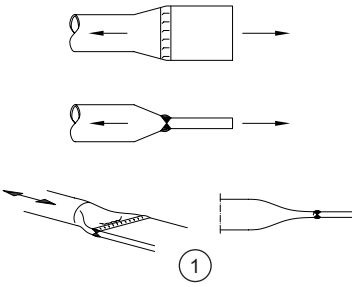
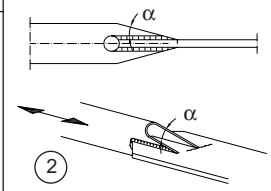
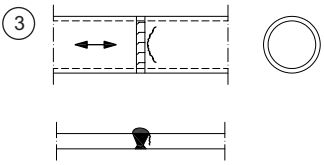
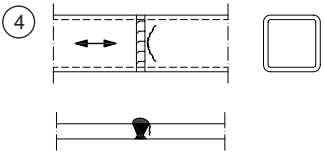
Taulukko 4.3 Rakenneputkien ristikkoliitosten k_1-kertoimet [8,9,10]

Liitoksen tyyppi		Paarteet	Vertikaalit	Diagonaalit
Pyöreät rakenneputket				
Vapaavälinen	K-liitos	1,5	–	1,3
	N-liitos / KT-liitos	1,5	1,8	1,4
Limitetty	K-liitos	1,5	–	1,2
	N-liitos	1,5	1,65	1,25
Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket				
Vapaavälinen	K-liitos	1,5	–	1,5
	N-liitos / KT-liitos	1,5	2,2	1,6
Limitetty	K-liitos	1,5	–	1,3
	N-liitos / KT-liitos	1,5	2,0	1,4

Taulukko 4.4 Rakenneputkien väsymisluokat, pituussaumahitsatut rakenneputket [8,9,10]

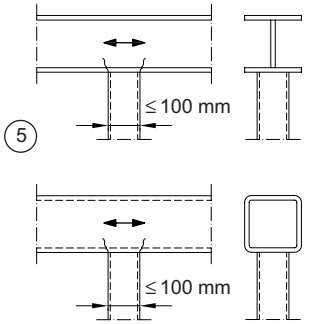
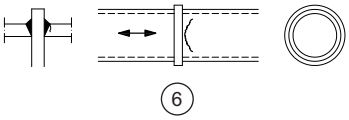
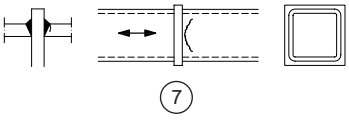
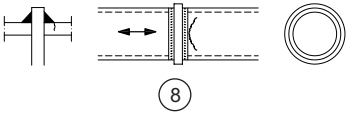
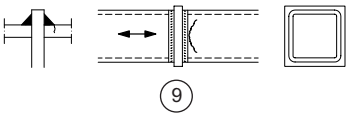
Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
140		Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut rakenneputkien pituushitsit ilman lopetus- tai aloitus-kohtia. [a)]	Seinämänpaksuus $t \leq 12{,}5$ mm
125		Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut rakenneputkien pituushitsit ilman lopetus- tai aloitus-kohtia. [a)]	Seinämänpaksuus $t > 12{,}5$ mm
90		Sisältää hitsien lopetus- tai aloituskohtia. [a)]	
a) SSAB:n pituussaumahitsatut rakenneputket eivät sisällä hitsien lopetus- tai aloituskohtia.			

Taulukko 4.5 Rakenneputkien jatkosliitokset, kun t ≤ 12,5 mm [8,9,10]

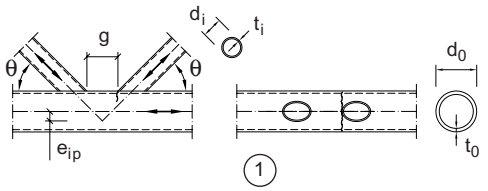
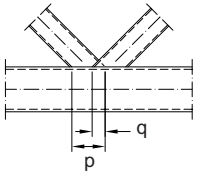
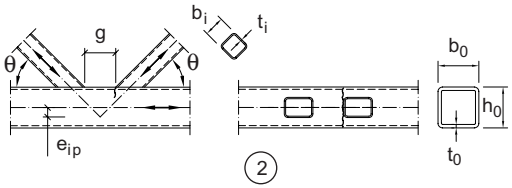
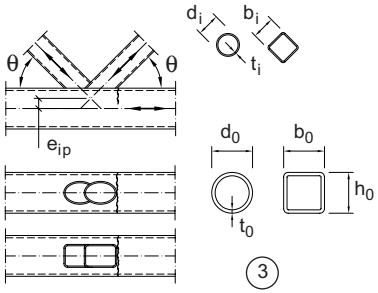
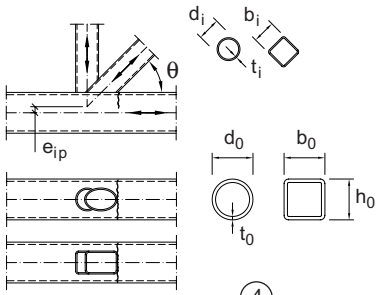
Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
71		1) Rakenneputken ja levyn liitos, rakenneputken pää litistetty (X-railo).	1) $\Delta\sigma$ lasketaan rakenneputkessa. Koskee vain rakenneputkia, joiden halkaisija on pienempi kuin 200 mm.
71 63	$\alpha \leq 45°$ $\alpha > 45°$ 	2) Rakenneputken ja levyn liitos, rakenneputken pää halkaistu ja hitsattu levyyn. Reijät halkaisun päässä.	2) $\Delta\sigma$ lasketaan rakenneputkessa. Leikkaussärö hitsissä tarkistetaan taulukon 4.8 rakenneyksityiskohdan 3) mukaan.
71		Poikittaiset päittäishitsit: 3) Päittäishitsit hitsataan pyöreiden rakenneputkien päiden välille.	Yksityiskohdat 3) ja 4): - Hitsin kuvun korkeus saa olla enintään 10 % hitsin leveydestä, hitsin liittyminen levyn pintaan juohea. - Hitsaus jalkoasennossa. Hitsit tarkistetaan ja todetaan vapaiksi virheistä, jotka eivät täytä standardin EN 1090 mukaisia vaatimuksia. - Luokitellaan kaksi väsymisluokkaa korkeammalle, jos t > 8 mm.
56		4) Päittäishitsit hitsataan suorakaiteen muotoisten rakenneputkien päiden välille.	

(jatkuu)

Taulukko 4.5 Rakenneputkien jatkosliitokset, kun t ≤ 12,5 mm [8,9,10]
(jatkuu)

Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
71		Hitsatut kiinnitykset: 5) Pyöreät tai suorakaiteen muotoiset rakenneputket, hitsattu pienahitsillä toiseen profiiliin.	5) - Ei kuormaa kantavat hitsit. - Hitsin pituus jännityksen suunnassa *l* ≤ 100 mm. - Muut tapaukset, ks. taulukko 4.7.
50		Hitsatut jatkokset: 6) Pyöreät rakenneputket, päittäishitsi päätylevyyn.	<u>Yksityiskohdat 6) ja 7):</u> - Kuormaa kantavat hitsit. - Hitsit tarkistetaan ja todetaan vapaiksi virheistä, jotka eivät täytä standardin EN 1090 mukaisia vaatimuksia. - Luokitellaan yhtä väsymisluokkaa korkeammalle, jos t > 8 mm.
45		7) Suorakaiteen muotoiset rakenneputket, päittäishitsi päätylevyyn.	
40		8) Pyöreät rakenneputket, pienahitsi päätylevyyn.	<u>Yksityiskohdat 8) ja 9):</u> - Kuormaa kantavat hitsit. - Seinämänpaksuus t ≤ 8 mm
36		9) Suorakaiteen muotoiset rakenneputket, pienahitsi päätylevyyn.	

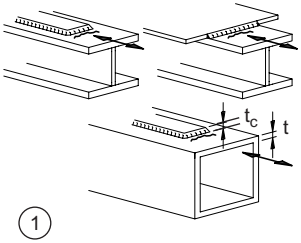
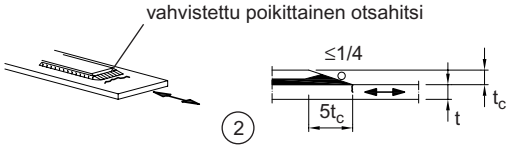
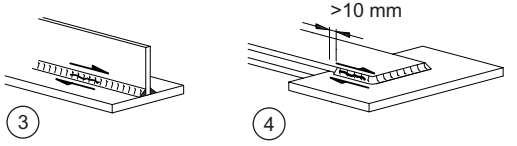
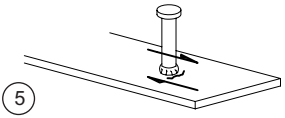
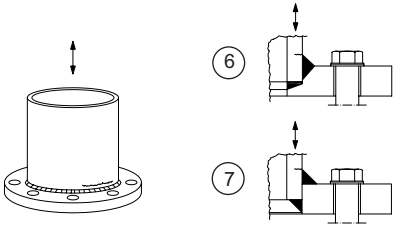
Taulukko 4.6 Rakenneputkien hitsatut ristikkoliitokset, kun t ≤ 8 mm [8,9,10]

Väsymis-luokka		Rakenneyksityiskohta	Vaatimukset
90 m = 5	$t_0 / t_i \geq 2,0$	Vapaaväliset K- ja N-liitokset, pyöreät rakenneputket:  ①	Yksityiskohdat 1)...4): – Paarteet ja uumasauvat tarkistetaan erikseen. – Suhteen t_0 / t_i väliarvoille väsymisluokka interpoloidaan lineaarisesti annettujen väsymisluokkien välillä. – Pienahitsit sallitaan uumasauvoissa, kun seinämänpaksuus t ≤ 8 mm. – t_0 ja $t_i \leq 8$ mm – $35° \leq \theta \leq 50°$ – $(b_0 / t_0) \times (t_0 / t_i) \leq 25$ – $(d_0 / t_0) \times (t_0 / t_i) \leq 25$ – $0,4 \leq b_i / b_0 \leq 1,0$ – $0,25 \leq d_i / d_0 \leq 1,0$ – $b_0 \leq 200$ mm – $d_0 \leq 300$ mm – $-0,5h_0 \leq e_{ip} \leq 0,25h_0$ – $-0,5d_0 \leq e_{ip} \leq 0,25d_0$ – $e_{op} \leq 0,02b_0$ – $e_{op} \leq 0,02d_0$ (e_{op} on ristikon tasosta ulospäin oleva epäkeskeisyys) Yksityiskohta 2): $0,5(b_0 - b_i) \leq g \leq 1,1(b_0 - b_i)$ ja $g \geq 2t_0$ Yksityiskohdat 3) ja 4): – 30% ≤ limitys ≤ 100% – Limitys = (q / p) x 100% p:n ja q:n määritelmä: 
45 m = 5	$t_0 / t_i = 1,0$		
71 m = 5	$t_0 / t_i \geq 2,0$	Vapaaväliset K- ja N-liitokset, suorakaiteen muotoiset rakenneputket:  ②	
36 m = 5	$t_0 / t_i = 1,0$		
71 m = 5	$t_0 / t_i \geq 1,4$	Limitetyt K-liitokset, pyöreät tai suorakaiteen muotoiset rakenneputket:  ③	
56 m = 5	$t_0 / t_i = 1,0$		
71 m = 5	$t_0 / t_i \geq 1,4$	Limitetyt N-liitokset, pyöreät tai suorakaiteen muotoiset rakenneputket:  ④	
50 m = 5	$t_0 / t_i = 1,0$		

Taulukko 4.7 Hitsauskiinnitykset ja jäykisteet [8,9,10]

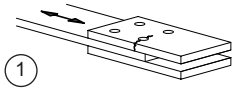
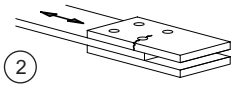
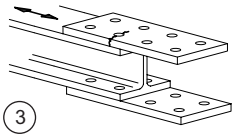
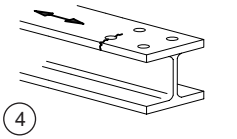
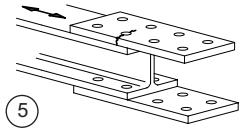
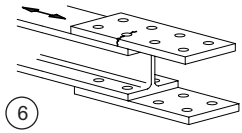
Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
80	L ≤ 50 mm	Pituussuuntaiset kiinnitykset: 1) Väsymisluokka riippuu kiinnitys-pituudesta L	Kiinnityksen paksuus saa olla enintään sen korkeuden suuruinen.
71	50 < L ≤ 80 mm		
63	80 < L ≤ 100 mm		
56	L > 100 mm		
71	L > 100 mm α < 45°	2) Pituussuuntaiset kiinnitykset levyyn tai rakenneputkeen.	
80	r > 150 mm	3) Pituussuuntaisella pienahitsillä kiinnitetty kiinnityslevy, joka liittyy levyyn tai rakenneputkeen pyöristyssäteen avulla, pienahitsin pää on vahvistettu (täysi tunkeuma); vahvistushitsin pituus > r.	3) Juohea pyöristyssäde r, joka valmistetaan aluksi työstämällä tai polttoleikkaamalla nurkkalevy ennen hitsausta ja sen jälkeen hiomalla hitsin pinta levyn pinnan tasoon (yhdensuuntaiseksi nuolen suunnan kanssa) siten, että poikittaishitsin rajaviiva poistetaan kokonaan.
80	*l* ≤ 50 mm	Poikittaiset kiinnitykset: 4) Hitsattu levyyn. 5) Sauvaan tai levyrakenteeseen hitsatut pystyjäykisteet. 6) Koteloprofiiliin joko laippaan tai uumaan hitsattu jäykistyslevy. Jäykistyslevyn hitsaaminen pieniin rakenneputkiin voi olla mahdoton. Nämä arvot ovat voimassa myös ympyrän muotoisille jäykisteille.	Yksityiskohdat 4) ja 5): 4) Hitsien päät hiotaan huolellisesti mahdollisen reunahaavan poistamiseksi. 5) $\Delta\sigma$ lasketaan pääjännitysten mukaan, jos jäykiste loppuu uumassa, ks. vasen puoli.
71	50 < *l* ≤ 80 mm		
80		7) Hitsatun leikkausliittimen vaikutus perusaineeseen.	

Taulukko 4.8 Kantavat hitsausliitokset [8,9,10]

Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta			Kuvaus	Vaatimukset
	$t_c < t$	$t_c \geq t$		Sauvojen ja levyrakenteiden peitelevyt: 1) Yksi- tai monipalko-hitsauksella hitsatut peite-levyn pääty-alueet poikittai-sen otsahitsin kanssa tai ilman sitä.	1) Jos peitelevy on leveämpi kuin laippa, tarvitaan poikittainen otsa-hitsi. Otsahitsi hiotaan huolelli-sesti reunahaavan poistamiseksi. Peitelevyn minimi-pituus on 300 mm.
56*	$t \leq 20$	–			
50	$20 < t \leq 30$	$t \leq 20$			
45	$30 < t \leq 50$	$20 < t \leq 30$			
40	$t > 50$	$30 < t \leq 50$			
36	–	$t > 50$			
56				2) Sauvojen ja levyrakenteiden peitelevyt. $5t_c$ on vahvistus-hitsin minimi-pituus.	2) Poikittainen otsahitsi hiotaan juohevaksi. Jos lisäksi $t_c > 20$ mm, levyn reunan yläosa viistetään kaltevuuteen 1:4.
80 m = 5				3) Leikkausvuota siirtävät jatkuvat pienahitsit, kuten uuman ja laipan väliset hitsit levyrakenteissa. 4) Pienahitsattu päällekkäisliitos.	3) $\Delta\tau$ lasketaan hitsin pinta-alan mukaan. 4) $\Delta\tau$ lasketaan hitsin pinta-alan mukaan käyttäen pituutena hitsin kokonaispituutta.
ks. EN 1994-2 (90 m = 8)				Hitsatut leikkausliittimet: 5) Liittorakenne-sovellutuksissa.	5) $\Delta\tau$ lasketaan leikkausliittimen nimellisen brutto-poikkipinta-alan mukaan.
71				6) Rakenneputken pohjalevyn liitos 80 %:sti läpihitsattu päittäishitsi.	6) Hitsin rajaviiva hiotaan. $\Delta\sigma$ lasketaan rakenneputkessa.
40				7) Rakenneputken pohjalevyn liitos pienahitsejä käytettäessä.	7) $\Delta\sigma$ lasketaan rakenneputkessa.

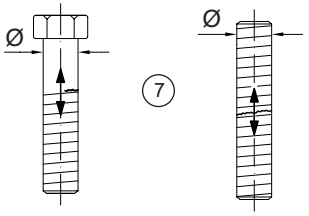
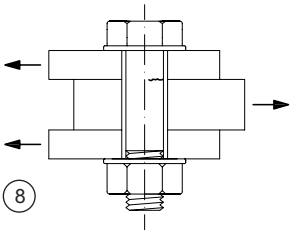
* voidaan käyttää yhdellä väsymisluokalla korotettua arvoa, jos käytetään muunnettua väsymislujuuden käyrää, ks. kuva 4.10

Taulukko 4.9 Ruuvilitosten väsymisluokkia [8,9,10]

Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset	
112	 1	1) Kaksileikkeinen symmetrinen ruuviliitos esijännitettyjä korkealujuuksisia ruuveja käytettäessä.	1) $\Delta\sigma$ lasketaan bruttopoikkileikkauksessa.	Ruuvikiinnityksille (yksityiskohdat 1)...6)) yleensä: Päätyetäisyys: $e_1 \geq 1{,}5\ d$ Reunaetäisyys: $e_2 \geq 1{,}5\ d$ Keskiöväli: $p_1 \geq 2{,}5\ d$ Keskiöväli: $p_2 \geq 2{,}5\ d$ Yksityiskohdat EN 1993-1-8 kuvan 3.1 mukaan.
		1) Kaksileikkeinen symmetrinen ruuviliitos esijännitettyjä injektioruuveja käytettäessä.	1) ... bruttopoikkileikkaus.	
90	 2	2) Kaksileikkeinen ruuviliitos soviteruuveja käytettäessä.	2) ... nettopoikkileikkaus.	
		2) Kaksileikkeinen ruuviliitos esijännittämättömiä injektioruuveja käytettäessä.	2) ... nettopoikkileikkaus.	
	 3	3) Yksileikkeinen ruuviliitos esijännitettyjä korkealujuuksisia ruuveja käytettäessä.	3) ... bruttopoikkileikkaus.	
		3) Yksileikkeinen ruuviliitos esijännitettyjä injektioruuveja käytettäessä.	3) ... bruttopoikkileikkaus.	
	 4	4) Reijällinen rakenneosa, johon kohdistuu taivutus ja aksiaalisia voimia.	4) ... nettopoikkileikkaus.	
80	 5	5) Yksileikkeinen ruuviliitos soviteruuveja käytettäessä.	5) ... nettopoikkileikkaus.	
		5) Yksileikkeinen ruuviliitos esijännittämättömiä injektioruuveja käytettäessä.	5) ... nettopoikkileikkaus.	
50	 6	6) Yksi- tai kaksileikkeinen symmetrinen ruuviliitos, kun käytetään esijännittämättömiä ruuveja reijissä, joiden välys on normaali. Kuorman suunta ei saa vaihtua.	6) ... nettopoikkileikkaus.	

(jatkuu)

Taulukko 4.9 Ruuvilitosten väsymisluokkia [8,9,10]
(jatkuu)

Väsymis-luokka	Rakenneyksityiskohta	Kuvaus	Vaatimukset
50	 Koon vaikutus, kun t > 30 mm: $k_s = (30/t)^{0,25}$	7) Vedetyt ruuvit ja tangot, joiden kierteet on valssattu tai leikattu. Suurilla halkaisijoilla (esim. perustusruuvit) koon vaikutus otetaan huomioon k_s:n avulla.	7) $\Delta\sigma$ lasketaan ruuvin jännityspoikkipinta-alan mukaan. Vipuvaikutuksista aiheutuvat taivutus ja veto sekä muista syistä aiheutuvat taivutusjännitykset otetaan huomioon. Esijännitetyillä ruuveilla jännitysvaihteluvälin pieneneminen voidaan ottaa huomioon.
100 m = 5		<u>Yksi- tai kaksileikkeiset leikkausrasitetut ruuvit:</u> Kierteet eivät ole leikkaustasossa: - soviteruuvit - tavalliset ruuvit, kun kuorman suunta ei muutu (ruuvien lujuusluokat 5.6, 8.8 tai 10.9)	8) $\Delta\tau$ lasketaan ruuvin kierteettömän varren pinta-alan mukaan.

4.6.3.3 Väsymistarkastelu hot spot -menetelmällä

Eurocoden osassa EN 1993-1-9 geometrisen (hot spot) jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2}$ määritetään seuraavasti [8,9,10]:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{E.2} = k_f \cdot (\gamma_{Ff}\Delta\sigma^*_{E.2}) \qquad (4.26)$$

missä tekijä k_f on jännityskonsentraatiokerroin, joka voidaan määrittää käsikirjoista, FEM-tarkasteluista tai venymäliuskamittauksista. Osassa EN 1993-1-9 esitetyt hot spot -menetelmän ohjeet on tarkoitettu siinä esitettyjen 'tavallisten' hitsattujen levyrakenteiden väsymistarkasteluun hitsin vieressä, jolloin normissa niille ilmoitetut väsymisluokat (EN 1993-1-9: Liite B) sisältävät myös jännityskonsentraatiokertoimen vaikutuksen siten, että kyseisille rakenneyksityiskohdille voidaan käyttää suoraan samoja väsymislujuuden S-N-käyriä joita käytetään nimellisten jännitysten menetelmässä.

Osan EN 1993-1-9 ohjeet eivät sellaisenaan sovellu hot spot -tarkasteluun rakenneputkien ristikkoliitoksille, koska putkien ristikkoliitosten hot spot -tarkastelussa käytetään kaltevuuksiltaan hieman erilaisia väsymislujuuden S-N-käyriä (tämän seurauksena mm. nimellisten jännitysten yhteydessä esitetyt ekvivalentin jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{E.2}$ laskentakaavat eivät enää päde).

Rakenneputkien ristikkoliitokset:

Seuraavassa esitetään Eurocoden kanssa yhteensopivat rakenneputkien ristikkoliitosten hot spot -mitoitusohjeet perustuen pääosin lähteisiin [5,6,7].

Hot spot -tarkastelussa ristikon sauvojen jännitykset lasketaan aluksi kuten nimellisten jännitysten menetelmässä, eli ristikon yksinkertaistetulla nivelmallilla lasketut nimelliset jännitykset (tai jännitysvaihteluvälit) kerrotaan taulukon 4.3 suurennuskertoimilla k_1, mutta liitoksen epäkeskeisyyttä ei tarvitse ottaa huomioon kun epäkeskeisyys ei ylitä taulukoissa 4.12 ja 4.13 ristikkoliitoksille esitettyjä vaatimuksia.

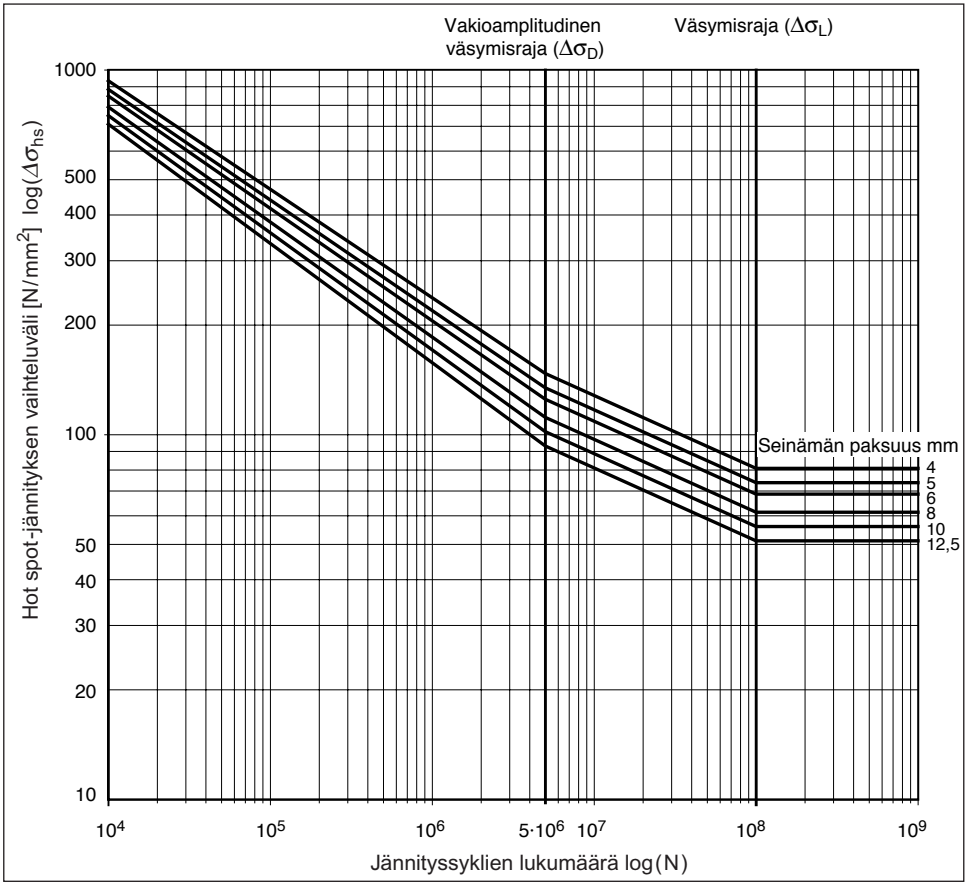
Saadut nimelliset jännitykset (tai jännitysvaihteluvälit) kerrotaan tämän jälkeen tarkasteltavan kohdan hot spot -jännityksen jännityskonsentraatiokertoimella k_f. Hot spot -jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E}$ määritetään seuraavasti:

$$\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E} = k_f \cdot k_1 \cdot (\gamma_{Ff}\Delta\sigma^*_E) \qquad (4.27)$$

missä
- $\Delta\sigma^*_E$ on ristikon yksinkertaistetulla nivelmallilla (ks. kohta 4.6.3.2: Rakenneputkien ristikkoliitokset) laskettu nimellisen jännityksen vaihteluväli
- γ_{Ff} on väsyttävän kuorman osavarmuusluku (kohta 4.6.2)
- k_1 on taulukon 4.3 mukainen suurennuskerroin
- k_f on hot spot -jännityksen jännityskonsentraatiokerroin

Jännityskonsentraatiokertoimen k_f määrittämistä käsitellään tarkemmin hieman jäljempänä.

Rakenneputkien ristikkoliitoksille käytettävät hot spot -jännitysvaihtelun väsymislujuuden S-N-käyrät on esitetty kuvassa 4.13. Kullekin putken seinämänpaksuudelle on oma käyränsä (vrt. koon vaikutus kohdassa 4.6.3.2). Kuten nimellisten jännitysten S-N-käyrissä, myös kuvan 4.13 käyrissä vakioamplitudisen kuormituksen väsymisraja $\Delta\sigma_D$ asettuu kuormanvaihtoluvun $N = 5 \cdot 10^6$ kohdalle, ja muuttuva-amplitudisen kuormituksen väsymisraja $\Delta\sigma_L$ saavutetaan kohdassa $N = 1 \cdot 10^8$. Kuten edellä on todettu, käyrien kaltevuudet kuitenkin poikkeavat nimellisten jännitysten S-N-käyrien kaltevuuksista, joten kuvan 4.13 käyrille ei voi suoraan soveltaa nimellisten jännitysten S-N-käyrien yhteydessä esitettyjä kaavoja.



Kuva 4.13 Hot spot -jännitysten väsymislujuuden S-N-käyrät rakenneputkien ristikkoliitoksille [7]. Seinämänpaksuuksilla 2,5 - 4 mm voidaan käyttää 4 mm:n käyrää

Taulukko 4.10 Hot spot -jännityksen vaihteluvälin väsymisrajat $\Delta\sigma_D$ ja $\Delta\sigma_L$ rakenneputkien ristikkoliitosten S-N-käyrissä [7]

Seinämänpaksuus t (mm)	Vakioamplitudinen kuormitus väsymisraja $\Delta\sigma_D$ (N/mm^2)	Muuttuva-amplitudinen kuormitus väsymisraja $\Delta\sigma_L$ (N/mm^2)
4	147	81
5	134	74
6	125	69
8	111	61
10	102	56
12,5	93	51

Kuvan 4.13 käyrissä väsymislujuuden jännitysvaihteluväli ja sitä vastaava kuormitussyklien lukumäärä lasketaan seuraavista kaavoista [5,6,7]:

- **kun $1 \cdot 10^3 \leq N \leq 5 \cdot 10^6$:**

$$log(\Delta\sigma_{hs.R}) = \frac{1}{3} \cdot \left[12,476 - log(N_R) + 0,18 \cdot log(N_R) \cdot log\left(\frac{16}{t}\right) \right] \quad (4.28)$$

$$log(N_R) = \frac{12,476 - 3 \cdot log(\Delta\sigma_{hs.R})}{1 - 0,18 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right)} \quad (4.29)$$

tai:

$$\Delta\sigma_{hs.R} = 10^{\frac{1}{3} \cdot \left[12,476 - log(N_R) + 0,18 \cdot log(N_R) \cdot log\left(\frac{16}{t}\right) \right]} \quad (4.30)$$

$$N_R = 10^{\frac{12,476 - 3 \cdot log(\Delta\sigma_{hs.R})}{1 - 0,18 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right)}} \quad (4.31)$$

- **kun $5 \cdot 10^6 \leq N \leq 1 \cdot 10^8$:**

$$log(\Delta\sigma_{hs.R}) = \frac{1}{5} \cdot \left[16,327 - log(N_R) + 2,01 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right) \right] \quad (4.32)$$

$$log(N_R) = 16,327 - 5 \cdot log(\Delta\sigma_{hs.R}) + 2,01 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right) \quad (4.33)$$

tai:

$$\Delta\sigma_{hs.R} = 10^{\frac{1}{5} \cdot \left[16,327 - log(N_R) + 2,01 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right) \right]} \quad (4.34)$$

$$N_R = 10^{16,327 - 5 \cdot log(\Delta\sigma_{hs.R}) + 2,01 \cdot log\left(\frac{16}{t}\right)} \quad (4.35)$$

Koska ristikkoliitosten hot spot -jännityksille ei voida määrittää ekvivalenttia jännitysvaihteluvälin mitoitusarvoa $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E.2}$, väsymiskestävyyden todentaminen suoritetaan seuraavasti:

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E}}{\Delta\sigma_{hs.R}/\gamma_{Mf}} \le 1,0 \quad tai \quad \frac{n_E}{N_R} \le 1,0 \quad \textit{vakioamplitudiselle kuormitukselle} \qquad (4.36)$$

$$\sum\frac{n_{Ei}}{N_{Ri}} \le 1,0 \qquad \textit{muuttuva-amplitudiselle kuormitukselle} \qquad (4.37)$$

missä:

- vakioamplitudiselle kuormitukselle:

  jännitysvaihteluvälien perusteella tarkasteltuna:

  $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E}$ on hot spot -jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo kaavan (4.27) mukaisesti (väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ alapuolelle jääviä jännitysheilahduksia ei oteta huomioon, taulukko 4.10)

  γ_{Ff} on väsyttävän kuorman osavarmuusluku (kohta 4.6.2)

  $\Delta\sigma_{hs.R}$ on hot spot -jännitysvaihtelun väsymislujuus kyseeseen tulevalla kuormanvaihtoluvulla n_E kuvassa 4.13 esitettyjen S-N-käyrien mukaisesti

  γ_{Mf} määritetään kohdan 4.6.2 mukaisesti

  tai

  murtumiseen johtavien syklien lukumäärän perusteella tarkasteltuna:

  n_E on tarkasteltavaa jännitysvaihteluväliä $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.E}$ vastaava kuormanvaihtoluku (väsymisrajan $\Delta\sigma_D$ alapuolelle jääviä jännitysheilahduksia ei oteta huomioon, taulukko 4.10)

  N_R on murtumista vastaava käyttöikä (sykleinä), joka määritetään $[(\Delta\sigma_{hs.R}/\gamma_{Mf})\ ,\ N_R]$-käyrästä (ks. laskentaohjeet alla)

- muuttuva-amplitudiselle kuormitukselle:

  murtumiseen johtavien syklien lukumäärän perusteella tarkasteltuna:

  n_{Ei} on kutakin tarkasteltavaa jännitysvaihteluväliä $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.Ei}$ vastaava kuormanvaihtolukuku (jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_L$ alapuolelle jääviä jännitysheilahduksia ei oteta huomioon, taulukko 4.10)

  N_{Ri} on murtumista vastaava käyttöikä (sykleinä), joka määritetään $[(\Delta\sigma_{hs.R}/\gamma_{Mf})\ ,\ N_R]$-käyrästä (ks. laskentaohjeet alla)

Murtumiseen johtavien syklien lukumäärän perusteella tehtävä tarkastelu perustuu Palmgren-Minerin vauriosummaan. Todentamista varten väsymislujuuden S-N-käyrää täytyy kuitenkin 'pudottaa' edellä esitetyn mukaisesti alaspäin osavarmuusluvun γ_{Mf} verran, ja näin saadulta käyrältä lasketaan kutakin osavarmuusluvulla γ_{Ff} kerrottua jännitysvaihteluväliä $\Delta\sigma_{hs.Ei}$ vastaava murtumiseen johtavien syklien lukumäärä N_{Ri}. Osavarmuusluvut on tällöin otettu huomioon sekä kuormien puolella (γ_{Ff}) että kestävyyden puolella (γ_{Mf}) vastaavalla tavalla, kuin jännitysvaihteluvälien perusteella tehtävässä tarkastelussa kaavassa (4.36). S-N-käyrien pudottaminen voidaan suorittaa (riittävällä tarkkuudella) käyttämällä putken seinämänpaksuudelle nimellispaksuuden t sijasta suurennettua mitoituspaksuutta t_d, joka lasketaan kaavasta (4.38). Vauriosummatarkastelussa kukin N_{Ri} lasketaan siis seuraavasti:

- kaavoissa (4.31) ja (4.35) putken seinämänpaksuuden t paikalle sijoitetaan kaavasta (4.38) laskettu suurennettu mitoituspaksuus t_d ja
- jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{hs.R}$ paikalle sijoitetaan kunkin jännitysvaihteluvälin mitoitusarvo $\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.Ei}$.

Putken seinämänpaksuuden mitoitusarvo lasketaan seuraavasti (huom: vain jännityssyklien lukumäärään perustuvassa todentamisessa):

$$t_d = t \cdot (\gamma_{Mf})^3 \qquad (4.38)$$

missä t on seinämänpaksuus

γ_{Mf} määritetään kohdan 4.6.2 mukaisesti

Jännityskonsentraatiokerroin k_f voidaan määrittää käsikirjoista, FEM-tarkasteluista tai venymäliuskamittauksista. Jännityskonsentraatiokertoimelle käytetään lähteestä riippuen myös merkintöjä K_s tai SCF (Stress Concentration Factor).

Lähteissä [5,6] on käsitelty rakenneputkien ristikkoliitosten jännitysten konsentraatiokertoimien laskemista. Konsentraatiokertoimet on saatettu parametriseen muotoon, jolloin parametreina ovat paarteen ja uumasauvan sekä liitoksen mitat (vapaaväli tai limitys ja liitoskulma). Neliön muotoisten rakenneputkien T- , X- ja K-liitosten konsentraatiokertoimien kaavoja on esitetty taulukoissa 4.11 - 4.13 käyttäen lähteessä [6] olevaa merkintää SCF. Lähteessä [6] on esitetty konsentraatiokertoimien parametrisia kaavoja myös pyöreiden rakenneputkien liitoksille.

Jännityskonsentraatiokertoimen arvo vaihtelee saman ristikkoliitoksen eri kohdissa ja saman liitoksen eri puolilla (hitsi – paarre tai hitsi – uuma). Taulukoissa 4.11 - 4.13 on esitetty jännityskonsentraatiokertoimet T- , X- ja K-liitoksille niiden kriittisissä kohdissa. Väsymistarkastelut on tehtävä liitoksen kriittisille kohdille kullekin erikseen.

T- ja X-liitoksen kriittiset kohdat on taulukossa 4.11 esitetty kirjaimin A...E. Uumasauvojen ja paarteiden sauvavoimat lasketaan samaan aikaan vaikuttavista rakenteen kuormista. Kussakin tarkasteltavassa kohdassa A...E vaikuttava hot spot-jännityksen kokonaisarvo ($\Delta\sigma_{hs.0}$ tai $\Delta\sigma_{hs.i}$) lasketaan superponoimalla uumasauvan ja paarteen kyseiseen kohtaan aiheuttamat erilliset hot spot-jännitykset seuraavan periaatteen mukaisesti [5,6]:

paarre (kohta B, C tai D):

$$\Delta\sigma_{hs.0} = \frac{SCF_{0.N} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_0)}{A_0} + \frac{SCF_{0.M(ip)} \cdot (k_1 \cdot \Delta M_{ip.0})}{W_{ip.0}} + \frac{SCF_{i.N} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_i)}{A_i} + \frac{SCF_{i.M(ip)} \cdot (k_1 \cdot \Delta M_{ip.i})}{W_{ip.i}} + \frac{SCF_{i.M(op)} \cdot (k_1 \cdot \Delta M_{op.i})}{W_{op.i}} \quad (4.39)$$

uumasauva (kohta A tai E):

$$\Delta\sigma_{hs.i} = \frac{SCF_{i.N} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_i)}{A_i} + \frac{SCF_{i.M(ip)} \cdot (k_1 \cdot \Delta M_{ip.i})}{W_{ip.i}} + \frac{SCF_{i.M(op)} \cdot (k_1 \cdot \Delta M_{op.i})}{W_{op.i}} \quad (4.40)$$

missä:

k_1	on nimellisten jännitysten suurennuskerroin (taulukko 4.3)
$\Delta\sigma_{hs.0}$	on paarteen hot spot-jännitysvaihteluväli
$SCF_{0.N}$	on paarteen normaalivoiman aiheuttaman jännityksen konsentraatiokerroin tarkasteltavaan kohtaan (A...E)
$SCF_{0.M(ip)}$	on paarteen ristikon tason suuntaisen taivutusmomentin aiheuttaman jännityksen konsentraatiokerroin tarkasteltavaan kohtaan (A...E)
ΔN_0	on paarteen normaalivoiman vaihteluväli
$\Delta M_{ip.0}$	on paarteen ristikon tason suuntaisen taivutusmomentin vaihteluväli
A_0	on paarteen pinta-ala
$W_{ip.0}$	on paarteen taivutusvastus ristikon tason suunnassa
$\Delta\sigma_{hs.i}$	on uumasauvan hot spot-jännitysvaihteluväli
$SCF_{i.N}$	on uumasauvan normaalivoiman aiheuttaman jännityksen konsentraatiokerroin tarkasteltavaan kohtaan (A...E)
$SCF_{i.M(ip)}$	on uumasauvan ristikon tason suuntaisen taivutusmomentin aiheuttaman jännityksen konsentraatiokerroin tarkasteltavaan kohtaan (A...E)
$SCF_{i.M(op)}$	on uumasauvan ristikon tasoa vastaan kohtisuoran taivutusmomentin aiheuttaman jännityksen konsentraatiokerroin tarkasteltavaan kohtaan (A...E)
ΔN_i	on uumasauvan normaalivoiman vaihteluväli
$\Delta M_{ip.i}$	on uumasauvan ristikon tason suuntaisen taivutusmomentin vaihteluväli
$\Delta M_{op.i}$	on uumasauvan ristikon tasoa vastaan kohtisuoran taivutusmomentin vaihteluväli
A_i	on uumasauvan pinta-ala
$W_{ip.i}$	on uumasauvan taivutusvastus ristikon tason suunnassa
$W_{op.i}$	on uumasauvan taivutusvastus ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa

Kuten kaavoista (4.39) ja (4.40) voidaan havaita, paarteen hot spot -jännitykseen vaikuttaa myös uumasauvojen samanaikainen kuormitustila (normaalivoima, taivutusmomentti). Sen sijaan uumasauvan hot spot -jännitykseen ei vaikuta paarteen kuormitustila. Kaavat esittävät vain tarkastelussa sovellettavan perusperiaatteen. Varsinainen tarkastelu on tehtävä erikseen kullekin uumasauvan ja paarteen kriittiselle kohdalla A...E.

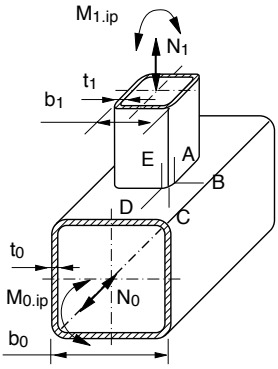
Jännitykset eivät välttämättä vaihtele paarteissa ja uumasauvoissa samaan tahtiin. Paarteen jännitysvaihteluväli lasketaan paarteen voimasuureiden vaihteluvälien maksimien arvoilla. Paarteen jännitysvaihteluväleihin lisätään uumasauvan jännitysvaihteluvälien arvot, jotka lasketaan niistä voimista, jotka vaikuttavat samaan aikaan kuin paarteen maksimivoimat. Uumasauvojen kohdalla menetellään vastaavasti, mutta nyt maksimiarvot annetaan uumasauvojen jännitysvaihteluväleille.

Kaavoista (4.39) ja (4.40) lasketut hot spot -jännitysvaihteluvälit on todentamista varten vielä kerrottava väsyttävän kuorman osavarmuusluvulla γ_{Ff} (ks. kaava 4.27), mutta suurennuskerrointa k_1 ei oteta huomioon enää toistamiseen.

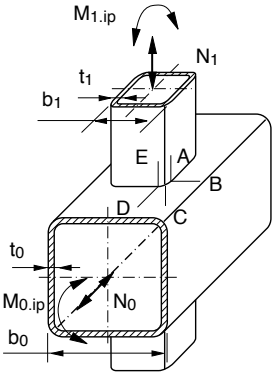
K-liitoksilla laskenta suoritetaan hieman toisin. K-liitoksille on taulukoissa 4.12 ja 4.13 annettu suoraan paarteen ja uumasauvojen konsentraatiokertoimien maksimiarvojen laskentakaavat, joten K-liitoksien jännityksiä ei tarvitse tarkastella kaikissa pisteissä A...E. Aluksi liitoksessa vaikuttava kuormitustila hajautetaan laskentaa varten kahdeksi 'osakuormitukseksi' taulukoissa 4.12 ja 4.13 esitetyllä tavalla. Tämän jälkeen kumpikin osakuormitus tarkastellaan erikseen käyttäen taulukoiden 4.12 ja 4.13 mukaisia jännityskonsentraatiokertoimia (SCF). Hot spot -jännityksen kokonaisarvo lasketaan superponoimalla lopuksi osakuormitusten 1 ja 2 vaikutukset tarkasteltavassa kohdassa (eli sauvassa) samalla periaatteella kuin kaavoissa (4.39) ja (4.40), eli paarteen hot spot -jännitykseen vaikuttaa myös uumasauvojen samanaikainen kuormitustila, mutta uumasauvan hot spot -jännitykseen ei vaikuta paarteen kuormitustila. Hot spot -jännityksiä laskettaessa on muistettava käyttää nimellisten jännitysten suurennuskerrointa k_1 vastaavalla tavalla kuin kaavoissa (4.39) ja (4.40).

Taulukko 4.11 T- ja X-liitosten jännityskonsentraatiokertoimet, kun uumasauvana on neliön muotoinen ja paarteena neliön tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki [6]

T-liitos



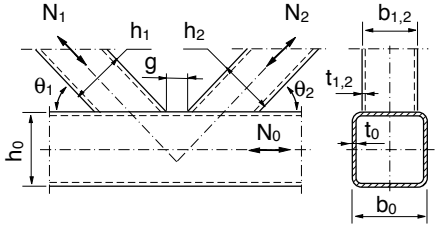
X-liitos



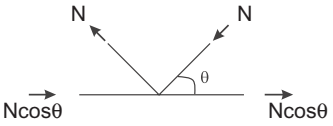
Kuormitus:	**Jännityskonsentraatiokerroin SCF:** - jokaisen konsentraatiokertoimen minimiarvo on 2
Uumasauvassa normaalivoima	Vaikutus paarteen kohtiin B, C, D: $SCF_{i.N.B} = (0,143 - 0,204 \cdot \beta + 0,064 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{1,377 + 1,715 \cdot \beta - 1,103 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$ $SCF_{i.N.C} = (0,077 - 0,129 \cdot \beta + 0,061 \cdot \beta^2 - 0,0003 \cdot 2\gamma) \cdot (2\gamma)^{1,565 + 1,874 \cdot \beta - 1,103 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$ $SCF_{i.N.D} = (0,208 - 0,387 \cdot \beta + 0,209 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{0,925 + 2,389 \cdot \beta - 1,881 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$ X-liitokset, kun β = 1,0: - $SCF_{i.N.C}$ kerrotaan tekijällä 0,65 - $SCF_{i.N.D}$ kerrotaan tekijällä 0,50
	Vaikutus uumasauvan kohtiin A, E: - kun pienahitsit: SCF_A ja SCF_E kerrotaan tekijällä 1,40 $SCF_{i.N.A} = SCF_{i.N.E} = (0,013 + 0,693 \cdot \beta - 0,278 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{0,790 + 1,898 \cdot \beta - 2,109 \cdot \beta^2}$
Uumasauvassa taivutus-momentti ristikon tasossa	Vaikutus paarteen kohtiin B, C, D: $SCF_{i.M(ip).B} = (-0,011 + 0,085 \cdot \beta - 0,073 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{1,722 + 1,151 \cdot \beta - 0,697 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$ $SCF_{i.M(ip).C} = (0,952 - 3,062 \cdot \beta + 2,382 \cdot \beta^2 + 0,0228 \cdot 2\gamma) \cdot (2\gamma)^{-0,690 + 5,817 \cdot \beta - 4,685 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$ $SCF_{i.M(ip).D} = (-0,054 + 0,332 \cdot \beta - 0,258 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{2,084 - 1,062 \cdot \beta + 0,527 \cdot \beta^2} \cdot \tau^{0,75}$
	Vaikutus uumasauvan kohtiin A, E: - kun pienahitsit: SCF_A ja SCF_E kerrotaan tekijällä 1,40 $SCF_{i.M(ip).A} = SCF_{i.M(ip).E} = (0,390 - 1,054 \cdot \beta + 1,115 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{-0,154 + 4,555 \cdot \beta - 3,809 \cdot \beta^2}$
Paarteessa normaalivoima ja / tai taivutus-momentti ristikon tasossa	Vaikutus paarteen kohtiin B, C, D: $SCF_{0.N.B} = SCF_{0.M(ip).B} = 0$ *(ei vaikutusta)* $SCF_{0.N.C} = SCF_{0.M(ip).C} = 0,725 \cdot (2\gamma)^{0,248 \cdot \beta} \cdot \tau^{0,19}$ $SCF_{0.N.D} = SCF_{0.M(ip).D} = 1,373 \cdot (2\gamma)^{0,205 \cdot \beta} \cdot \tau^{0,24}$
	Vaikutus uumasauvan kohtiin A, E: $SCF_{0.N.A} = SCF_{0.M(ip).E} = 0$ *(ei vaikutusta)*

Parametrit:		Voimassaoloehdot:		paarre:
	$\beta = b_1 / b_0$		$0,35 \le \beta \le 1,0$	
	$\gamma = b_0 / (2t_0)$		$12,5 \le 2\gamma \le 25$	$0,75 \le h_0/b_0 \le 1,5$
	$\tau = t_1 / t_0$		$0,25 \le \tau \le 1,0$	

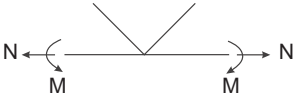
Taulukko 4.12 Vapaavälisen K-liitoksen jännityskonsentraatiokertoimet, kun uumasauvoina on neliön muotoinen ja paarteena neliön tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki [6]



Kuormituksen hajauttaminen tapauksiin 1 ja 2:



Kuormitus 1:
tasapainotetut sauvavoimat
(normaalivoimia uumasauvoissa ja paarteessa)



Kuormitus 2:
pelkät paarrevoimat
(normaalivoimaa ja / tai taivutusmomenttia)

Jännityskonsentraatiokerroin SCF: - jokaisen konsentraatiokertoimen minimiarvo on 2

Kuormitus 1:

Uumasauvan kuorman N maksimivaikutus paarteeseen:

$$SCF_{N.0} = (0,48 \cdot \beta - 0,5 \cdot \beta^2 - 0,012/\beta + 0,012/g') \cdot (2\gamma)^{1,72} \cdot \tau^{0,78} \cdot (g')^{0,2} \cdot (\sin\theta)^{2,09}$$

Uumasauvan kuorman N maksimivaikutus uumasauvaan:

$$SCF_{N.i} = (-0,008 + 0,45 \cdot \beta - 0,34 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{1,36} \cdot \tau^{-0,66} \cdot (\sin\theta)^{1,29}$$

Kuormitus 2:

Paarteen kuorman N,M maksimivaikutus paarteeseen:

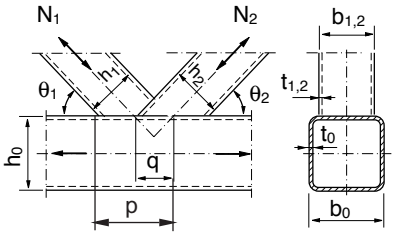
$$SCF_{N.0} = SCF_{M.0} = (2,45 + 1,23 \cdot \beta) \cdot (g')^{-0,27}$$

Paarteen kuorman N,M maksimivaikutus uumasauvaan:

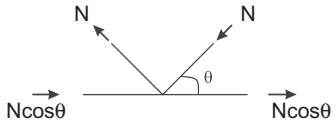
$$SCF_{N.i} = SCF_{M.i} = 0 \quad (ei\ vaikutusta)$$

Parametrit:		Voimassaoloehdot:	
	$\beta = b_1 / b_0$		$0,35 \le \beta \le 1,0$
	$\gamma = b_0 / (2t_0)$		$10 \le 2\gamma \le 35$
	$\tau = t_1 / t_0$		$0,25 \le \tau \le 1,0$
	$g' = g / t_0$		$g' \ge 2\tau$
		- epäkeskeisyys:	$-0,55 \le e / h_0 \le 0,25$
		- paarre:	$0,75 \le h_0 / b_0 \le 1,5$
		- uumasauvat:	$30° \le \theta \le 60°$
			uumasauvat neliön muotoiset, keskenään samanlaiset ja samassa astekulmassa

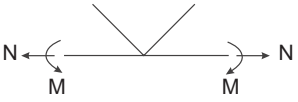
Taulukko 4.13 Limitetyn K-liitoksen jännityskonsentraatiokertoimet, kun uumasauvoina on neliön muotoinen ja paarteena neliön tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki [6]



Kuormituksen hajauttaminen tapauksiin 1 ja 2:



Kuormitus 1:
tasapainotetut sauvavoimat
(normaalivoimia uumasauvoissa ja paarteessa)



Kuormitus 2:
pelkät paarrevoimat
(normaalivoimaa ja / tai taivutusmomenttia)

Jännityskonsentraatiokerroin SCF: - jokaisen konsentraatiokertoimen minimiarvo on 2

Kuormitus 1: Uumasauvan kuorman N maksimivaikutus paarteeseen:

$$SCF_{N.0} = \left(0,5 + 2,38\cdot\beta - 2,87\cdot\beta^2 - 2,18\cdot\beta\cdot O_v + 0,39\cdot O_v - 1,43\cdot \sin\theta\right)\cdot(2\gamma)^{0,29}\cdot\tau^{0,7}\cdot O_v^{0,73 - 5,53\cdot(\sin\theta)^2}\cdot(\sin\theta)^{-0,4 - 0,08\cdot O_v}$$

Uumasauvan kuorman N maksimivaikutus uumasauvaan:

$$SCF_{N.i} = \left(0,15 + 1,1\cdot\beta - 0,48\cdot\beta^2 - 0,14/O_v\right)\cdot(2\gamma)^{0,55}\cdot\tau^{-0,3}\cdot O_v^{-2,57 + 1,62\cdot\beta^2}\cdot(\sin\theta)^{0,31}$$

Kuormitus 2: Paarteen kuorman N,M maksimivaikutus paarteeseen:

$$SCF_{N.0} = SCF_{M.0} = 1,2 + 1,46\cdot\beta - 0,028\cdot\beta^2$$

Paarteen kuorman N,M maksimivaikutus uumasauvaan:

$$SCF_{N.i} = SCF_{M.i} = 0 \quad (ei\ vaikutusta)$$

Parametrit:		Voimassaoloehdot:	
	$\beta = b_1 / b_0$		$0,35 \le \beta \le 1,0$
	$\gamma = b_0 / (2t_0)$		$10 \le 2\gamma \le 35$
	$\tau = t_1 / t_0$		$0,25 \le \tau \le 1,0$
	O_v = (q / p) x 100 % (ks. kuva)		50 % $\le O_v \le$ 100 %
		- epäkeskeisyys:	$-0,55 \le e / h_0 \le 0,25$
		- paarre:	$0,75 \le h_0 / b_0 \le 1,5$
		- uumasauvat:	$30° \le \theta \le 60°$
			uumasauvat neliön muotoiset, keskenään samanlaiset ja samassa astekulmassa

4.7 Väsyttävästi kuormitetun rakenneputkirakenteen suunnittelu

Väsytyskuormitettu rakenne mitoitetaan aina myös staattisille kuormille tavanomaiseen tapaan murtorajatilassa.

Teräksen lujuuden valinta kannattaa kuitenkin tehdä vasta sitten, kun rakenneosa on ensin mitoitettu väsymisen perusteella, jonka jälkeen voidaan laskea suurin staattinen jännitys.

Korkeasta teräslujuudesta ei ole välttämättä hyötyä väsymismitoituksen kannalta, koska hitsatun rakenteen väsymislujuus ei riipu teräslujuudesta, vaan rakenteen jännitysvaihteluista. Poikkileikkauksen kasvattaminen pienentää jännitysvaihteluväliä, mutta lisää rakenteen painoa, kun taas teräslujuuden kasvattaminen pienentää poikkileikkausta ja rakenteen painoa, mutta yleensä kasvattaa jännitysvaihteluväliä.

Väsytyskuormitetussa hitsatussa rakenteessa myötölujuuden kasvattamisesta on hyötyä kuitenkin silloin, jos rakenteen pysyvien kuormien osuus on suuri, tai jos väsyttävään kuormaan sisältyy yksittäisiä suuria maksimikuormia, joiden johdosta alemman lujuusluokan teräksen staattinen kestävyys ei riitä [3].

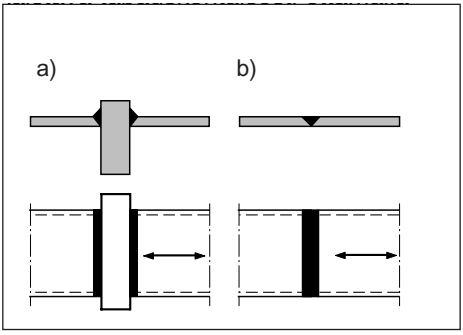
Liitosten huolellisella suunnittelulla ja rakenteen muotoilulla voidaan vaikuttaa merkittävästi koko rakenteen väsymiskestävyyteen. Liitokset kannattaa sijoittaa sellaisiin kohtiin, joissa jännitysvaihteluväli on mahdollisimman pieni.

Tehokkain keino parantaa hitsattujen rakenteiden väsymislujuutta onkin pienentää jännitysvaihteluväliä joko liitosten sijoittelulla tai kasvattamalla rakenneosan poikkileikkausta: jos jännitysvaihteluväli puolittuu, niin rakenteen kestoikä kasvaa 8-kertaiseksi (kun m = 3).

4.7.1 Hitausliitosten suunnittelu

Hitausliitokset kannattaa sijoittaa vähiten rasitettuihin kohtiin rakennetta, jos se on suinkin mahdollista (taulukko 4.14).

Rakenneputkien hitsattu jatkosliitos on väsymisen kannalta edullisempaa toteuttaa kuvan 4.14b mukaisesti ilman välilevyjä, jolloin väsymisluokka on parempi (taulukko 4.5). Hitsin kestävyyden kannalta on oleellista, että hitsi on virheetön erityisesti juuren puolelta, koska juuren puolen tarkastaminen on vaikeaa. Juurituen käyttö on hyödyllistä, jos hitsiin on mahdollista jäädä juurivirheitä (esim. suurilla ainepaksuuksilla). Juurituen käytössä on kuitenkin muistettava, että se aiheuttaa jännityskeskittymän, joka saattaa pienentää väsymiskestävyyttä.



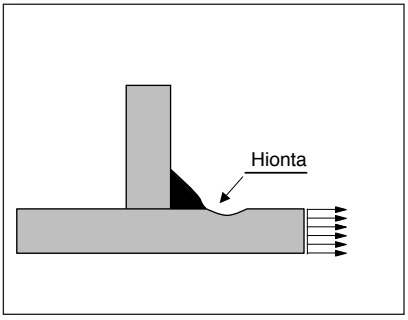
Kuva 4.14 Välilevyllä tehdyn jatkoksen (a) väsymiskestävyys on huonompi kuin ilman välilevyä tehdyllä jatkoksella (b)

Hitsausluokan parantaminen pienentää hitsausvirheiden mahdollisuutta, jolloin väsymiskestävyys paranee. Vaadittava hitsausluokka määräytyy taulukossa 3.6 esitetyn mukaisesti standardissa EN 1090-2 rakenteelle tai rakenneosalle valitun toteutusluokan perusteella. Standardi EN 1090-2 määrittää väsytyskuormitetun rakenteen toteutusluokaksi tapauksesta riippuen EXC2 - EXC4, jolloin taulukon 3.6 perusteella hitsausluokaksi tulee B tai C [12]. Hitsausluokan valinta ei kuitenkaan vaikuta hitsien staattisen kestävyyden tai väsymiskestävyyden laskentaan.

Korkea hitsikupu kasvattaa jännityshuippua hitsin rajaviivalla, joten koveran muotoinen pienahitsi on väsymisen kannalta edullisempi. Hitsin loiva liittymiskulma ja rajaviivan suuri pyöristyssäde ovat hitsin osalta väsymislujuutta parantavia tekijöitä.

Hitsausliitoksen jälkikäsittely

Hitsin väsymiskestävyyttä voidaan parantaa myös jälkikäsittelyllä. Menetelmät voidaan jakaa kahteen päämenetelmään, jotka ovat hitsigeometrian parantaminen sekä jäännösjännitysmenetelmät. Hitsigeometriaa voidaan parantaa mm. hiomalla hitsin rajapinta tai sulattamalla rajapinta uudelleen joko TIG-menetelmällä tai plasmapolttimella. Näillä menetelmillä poistetaan hitsin rajaviivalla olevat alkusäröt ja lisäksi hitsin muotoilu juoheammaksi pienentää jännityskeskittymiä rajaviivalla. Suositeltava hionnan pyöristyssäde on alle 20 mm levyn paksuuksilla 10 mm. Hiontaa ei suositella käytettäväksi alle 10 mm paksuille rakenteille [13].



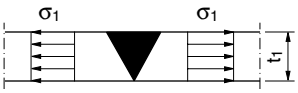
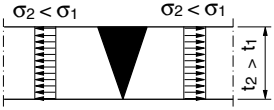
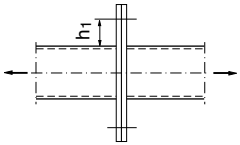
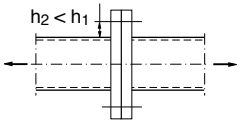
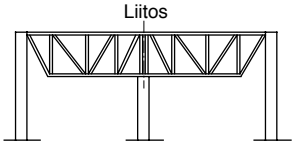
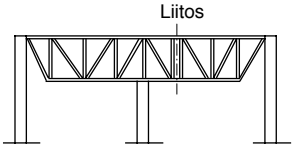
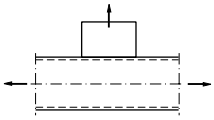
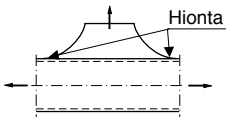
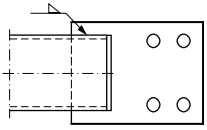
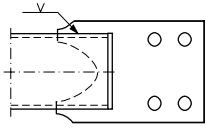
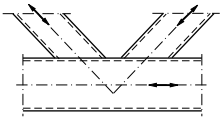
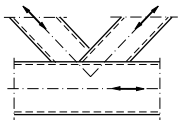
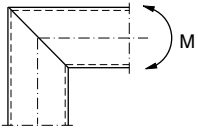
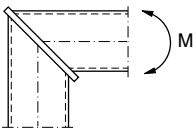
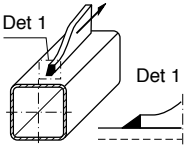
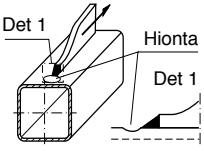
Kuva 4.15 Hitsausliitoksen väsymiskestävyyden parantaminen rajapintaa hiomalla

Jäännösjännitysmenetelmillä vaikutetaan hitsin rajaviivalla vaikuttaviin jäännösjännityksiin. Materiaalin pintakerrokseen saadaan muodostumaan mekaanisella kylmämuokkauksella puristusjäännösjännitys, joka estää särön avautumista ja pienentää tehollista jännitysheilahdusta. Mekaanisia muokkausmenetelmiä ovat mm. kuulapuhallus ja vasarointi. Lisäksi jäännösjännitysten kontrollointiin voidaan käyttää lämpökäsittelyjä. Myöstöhehkutuksella alennetaan materiaalin myötörajaa tilapäisesti lämpötilaa kohottamalla. Kappaleen sisäiset jännitykset laukeavat plastisten muodonmuutosten avulla. Kuumennus ja jäähdytys on tehtävä hitaasti uusien jännitysten syntymisen estämiseksi [13].

Jälkikäsittely on kannattavaa silloin kuin käsiteltävä alue on pieni tai jälkikäsittely voidaan automatisoida konepajalla. Jälkikäsittely on mahdollista myös vanhojen rakenteiden korjaustoimenpiteenä. Jälkikäsittelyn vaikutusta ei ole otettu huomioon Eurocoden osan EN 1993-1-9 mitoitusohjeissa. Käytännössä on todettu hionnan lisäävän väsymislujuutta 30 - 100 % (kun $N = 2 \cdot 10^6$ kuormitussykliä) ja uudelleen sulatuksen 10 - 170 % (kun $N = 2 \cdot 10^6$ kuormitussykliä). Kuulapuhalluksella on saavutettu 30 - 170 % väsymislujuuden parannuksia (kun $N = 2 \cdot 10^6$ kuormitussykliä) [13].

Väsymiskestävyyttä parantavia menetelmiä käsitellään laajemmin mm. lähteissä [2,3,13].

Taulukko 4.14 Rakenteen väsymiskestävyyden parantaminen

Toimenpide	Alkuperäinen rakenne	Väsymiskestävyyden kannalta parempi ratkaisu
Jännityksen pienentäminen		
Liitoslevyjen momentin pienentäminen laippaliitoksessa		
Jatkoskohdan valinta rakenteen vähemmän kuormitettuun kohtaan		
Liitoslevyn muotoilu jouheammaksi		
Liitoslevyn muotoilu jouheammaksi jatkosliitoksessa		
Ristikkoliitoksen limittäminen		
L-liitoksen vahvistaminen välilevyllä		
Hitsausmenetelmän valinta	Manuaalinen hitsaus	Koneellinen hitsaus
Hitsin reunan pyöristys hiomalla		

4.7.2 Ruuviliitosten suunnittelu

Ruuviliitoksissa reikien tekotapa vaikuttaa ruuviliitoksen tai ruuvikiinnityksen väsymiskestävyyteen. Poraamalla tehdyn reijän väsymiskestävyys on parempi kuin stanssaamalla tehdyn reijän väsymiskestävyys. Standardissa EN 1090-2 reijän tekotavan vaikutus otetaan huomioon siten, että stanssaaminen kyllä sallitaan, mutta väsytyskuormitetuissa rakenteissa reijän stanssaamisen jälkeen reikä pitää avartaa lopulliseen mittaansa siten, että valmiin reijän laatu vastaa poraamalla tehdyn reijän laatua [12].

Vedetyissä ruuviliitoksissa esijännitettävien ruuvien käyttö lisää huomattavasti liitoksen väsymiskestävyyttä. Väsyttävä rasitus pienenee, jos esijännitysvoima on suurempi kuin liitoksen vetokuormitus. Pitkät ja joustavat ruuvit ovat väsymiskestävyyden kannalta edullisia, koska liitettävien levyjen jousto ei pienennä oleellisesti pitkien ruuvien esijännitysvoimaa. Vedetyssä laippaliitoksessa ruuvit on syytä sijoittaa mahdollisimman lähelle hitsiä epäkeskeisyyksistä aiheutuvien lisärasitusten pienentämiseksi.

Ruuvien esijännitys on hyödyllistä myös leikkausvoiman kuormittamissa ruuviliitoksissa. Esijännitys pienentää materiaalin jännitystä reijän reunalla, koska osa voimasta siirtyy liitoslevyjen välisen kitkan välityksellä. On kuitenkin tärkeää varmistaa, että liitoslevyjen välinen kitka on riittävä, jotta ruuvi ei luistaisi reijän reunaa vasten. Tällöin menetetään ruuvin esijännityksestä syntyneet edut.

4.7.3 Ristikoiden suunnittelu

Väsyttävästi kuormitetun rakenneputkiristikon väsymiskestävyyttä voidaan tarvittaessa helposti parantaa rakenteellisin keinoin suosimalla suunnittelussa seuraavia käytäntöjä [5,6]:

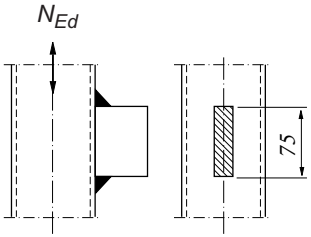
- Mahdollinen ristikon jatkos kannattaa sijoittaa momentin nollakohtaan (taulukko 4.14).
- Limitetty K-liitos on parempi kuin vapaavälinen K-liitos (taulukko 4.6).
- Uumasauvojen astekulman pienentäminen parantaa K-liitoksen väsymiskestävyyttä. Suositeltava arvo on θ = 40°.
- Valitaan paksu paarre ja ohutseinämäiset uumasauvat (eli alhaiset $\tau = t_i / t_0$ sekä $2\gamma = b_0 / t_0$ tai $2\gamma = d_0 / t_0$ arvot, ks. taulukot 4.6 ja 4.11 - 4.13)
- Vältetään arvoja β = 0,5...0,7. Edullisin alue on lähellä arvoa β = 1,0 jolloin saavutetaan alhaisimmat SCF-arvot, mutta valmistettavuus huomioon ottaen suositeltava arvo on β = 0,8.
- Päittäishitsi on parempi kuin pienahitsi (ks. taulukko 4.11: pienahitsin 1,4-kerroin)

Ristikkoliitosten hitsit pitää tehdä siten, että hitsin aloitus- ja lopetuskohdat eivät osu uumasauvojen nurkkiin tai liitoksessa esiintyvien jännityskeskittymien kohtiin, sillä aloitus- ja lopetuskohdat muodostavat epäjatkuvuuskohtia, jotka ovat väsymisen kannalta kriittisiä. Oikea hitsausjärjestys on esitetty luvun 8 kuvissa 8.10 - 8.11. Vaadittavan a-mitan saavuttamiseksi 60° pienemmillä liitoskulmilla uumasauvan pää joudutaan viistämään (kohta 8.5.4). Ristikkoliitosten a-mitan tulee olla riittävä, jotta hitsin juuren puoli ei ole mitoittava väsymiskestävyyden kannalta (ks. kohta 4.6.3.1). Ristikkoliitosten vahvistaminen on harkittava tapauskohtaisesti. Vahvistavat

osat lisäävät liitoksen staattista kestävyyttä, mutta muodostavat myös epäjatkuvuuskohtia, joihin syntyy jännityskeskittymiä. Oikein käytettynä vahvikelevyillä voidaan kuitenkin myös parantaa väsymiskestävyyttä. Yksityiskohtaisempia ohjeita on esitetty lähteessä [6].

Esimerkki 4.1

Lasketaan rakenneputken $200 \times 200 \times 8$ kestävyys väsyttävälle kuormalle ΔN_{Ed}. Tarkasteltavan putken kylkeen on hitsattu kuormittamaton levy.



Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Putken kuormitus vaihtelee seuraavasti:

	ΔN_{Ed} (kN)	Kuormitussyklien lukumäärä (n_i)
1	220	$1{,}5 \cdot 10^6$
2	350	$1 \cdot 10^6$
3	50	$1 \cdot 10^7$
Tässä esitetyt kuormitusvaihtelun ΔN_{Ed} lukuarvot eivät sisällä kuorman osavarmuuslukua γ_{Ff}.		

Oletetaan, että käytetään varman kestämisen periaatetta, ja että murtuminen johtaisi suuriin seurauksiin, jolloin kestävyyden osavarmuusluku on:
$\gamma_{Mf} = 1{,}35$ *(taulukko 4.1)*

Väsymiskestävyyden laskennassa jännitykset lasketaan kimmoteoriaa käyttäen. Lasketaan ensimmäisen kuormitusheilahduksen aiheuttama nimellisen jännityksen vaihteluväli rakenneputkessa:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{\Delta N_{1.Ed}}{A} = \frac{220000}{5924} = 37{,}1 \text{ N/mm}^2$$

Muille kuormitusheilahduksille saadaan vastaavasti:

	ΔN_{Ed} (kN)	Kuormitussyklien lukumäärä (n_i)	$\Delta\sigma$ (N/mm^2)
1	220	$1{,}5 \cdot 10^6$	37,1
2	350	$1 \cdot 10^6$	59,1
3	50	$1 \cdot 10^7$	8,4

Tarkastetaan toteutuuko väsymistarkastelulle asetetut ehdot suurimman jännitysvaihtelun osalta (ehto (4.10)):

$\gamma_{Ff} = 1,0$ *väsyttävän kuorman osavarmuusluku*

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{max} = 1,0 \cdot 59,1 = 59,1\ N/mm^2 \leq 1,5 f_y = 1,5 \cdot 420 = 630\ N/mm^2 \quad OK$$

Suoritetaan väsymistarkastelu nimellisten jännitysten menetelmällä. Väsymisluokka kuormaa kantamattomalle hitsatulle levyosalle on 71, kun levyn pituus on 75 mm (taulukko 4.7).

Väsymisluokassa 71 normaalijännityksen vaihteluvälin väsymisrajat ovat (kuva 4.7):

$\Delta\sigma_D = 0,737 \cdot \Delta\sigma_C = 0,737 \cdot 71 = 52\ N/mm^2$ *vakioamplitudiselle kuormitukselle*

$\Delta\sigma_L = 0,405 \cdot \Delta\sigma_C = 0,405 \cdot 71 = 29\ N/mm^2$ *muuttuva-amplitudiselle kuormitukselle*

Väsymistarkastelu voidaan suorittaa ekvivalentin jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{E.2}$ tai Palmgren-Minerin vauriosumman avulla. Suoritetaan tarkastelu tässä molemmilla tavoilla.

a) väsymistarkastelu Palmgren-Minerin vauriosumman avulla:

Jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_1$ sijaitsee S-N-käyrän loivemmalla alueella (m=5). Vaurioon johtava kuormitussyklien lukumäärä $N_{R.1}$ lasketaan asettamalla nyt kaavassa (4.17) $\Delta\sigma_R = \Delta\sigma_1$ ja ratkaisemalla tätä vastaava $N_{R.1}$. Kun otetaan huomioon myös osavarmuusluvut, kaava saadaan seuraavaan muotoon (kuormituksen osavarmuuslukua ei oteta enää toiseen kertaan huomioon, jos se sisältyy alkuarvoina käytettyihin kuormituksiin tai jännitysvaihteluihin):

$$N_{R.1} = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_1} \right)^5 \quad , \quad kun \quad \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \geq \gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_1 \geq \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}}$$

$$N_{R.1} = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{\sigma_D / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_1} \right)^5 = 5 \cdot 10^6 \left(\frac{52/1,35}{1,0 \cdot 37,1} \right)^5 = 6,03 \cdot 10^6$$

Jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_2$ sijaitsee S-N-käyrän jyrkemmällä alueella (m=3), jolloin siirrytään soveltamaan vastaavalla tavalla kaavaa (4.16):

$$N_{R.2} = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{\sigma_C / \gamma_{Mf}}{\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_2} \right)^3 = 2 \cdot 10^6 \left(\frac{71/1,35}{1,0 \cdot 59,1} \right)^3 = 1,41 \cdot 10^6 \quad \left(\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_2 \geq \frac{\Delta\sigma_D}{\gamma_{Mf}} \right)$$

Jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_3$ sijaitsee S-N-käyrän vaakasuoralla alueella, jolloin sille saadaan:

$$N_{R.3} = \infty \qquad \left(\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_3 < \frac{\Delta\sigma_L}{\gamma_{Mf}} \right)$$

Kestävyys koko kuormituskertymälle tarkastetaan vauriosumma-lausekkeen avulla soveltamalla kaavaa (4.7):

$$\sum \frac{n_i}{N_{Ri}} = \frac{1,5 \cdot 10^6}{6,03 \cdot 10^6} + \frac{1 \cdot 10^6}{1,41 \cdot 10^6} + \frac{1}{\infty} = 0,958 \le 1,0 \quad OK$$

b) väsymistarkastelu ekvivalentin jännitysvaihteluvälin $\Delta\sigma_{E.2}$ avulla:

Lasketaan kuormitussykliä $N = 2 \cdot 10^6$ vastaava ekvivalentti jännitysvaihteluväli. Koska nyt on kyseessä muuttuva-amplitudinen kuormitus, käytetään kaavaa (4.9). Väsymisluokan mukaista vakiota C laskettaessa on kaavaan (4.2) lisättävä myös kestävyyden osavarmuusluku γ_{Mf}. Väsymisrajan $\Delta\sigma_L$ alapuolelle jääviä jännitysvaihteluvälejä ei oteta huomioon:

$$C = 2 \cdot 10^6 \cdot (\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf})^3 = 2 \cdot 10^6 \cdot (71/1,35)^3 = 2,91 \cdot 10^{11}$$

$$\sum (n_i \cdot \Delta\sigma_i^{\,3}) = n_2 \cdot \Delta\sigma_2^{\,3} = (1 \cdot 10^6) \cdot 59,1^3 = 2,06 \cdot 10^{11} \quad \text{jyrkän alueen jännitysvaihtelut}$$

$$\sum (n_j \cdot \Delta\sigma_j^{\,5}) = n_1 \cdot \Delta\sigma_1^{\,5} = (1,5 \cdot 10^6) \cdot 37,1^5 = 1,05 \cdot 10^{14} \text{ loivan alueen jännitysvaihtelut}$$

$$\Delta\sigma_{E.2} = \sqrt[3]{\frac{\sum (n_i \cdot \Delta\sigma_i^{\,3}) + \left(\frac{C}{5 \cdot 10^6}\right)^{-2/3} \cdot \sum (n_j \cdot \Delta\sigma_j^{\,5})}{2 \cdot 10^6}}$$

$$= \sqrt[3]{\frac{2,06 \cdot 10^{11} + \left(\frac{2,91 \cdot 10^{11}}{5 \cdot 10^6}\right)^{-2/3} \cdot (1,05 \cdot 10^{14})}{2 \cdot 10^6}} = 51,7 \text{ N/mm}^2$$

Todentaminen suoritetaan mitoitusehdolla (4.19). Kaavassa olevaa kuormituksen osavarmuuslukua ei oteta enää toiseen kertaan huomioon, jos se sisältyy alkuarvoina käytettyihin kuormituksiin tai jännitysvaihteluihin:

$$\frac{\gamma_{Ff} \Delta\sigma_{E.2}}{\Delta\sigma_C / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 51,7}{71/1,35} = 0,983 \le 1,0 \quad OK$$

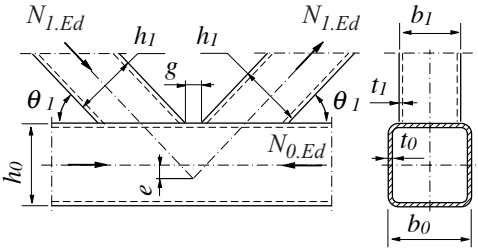
Voidaan siis todeta, että ekvivalentin jännitysvaihteluvälin käyttö ja Palmgren-Minerin vauriosumman mukainen tarkastelu johtavat käytännössä yhteneväiseen lopputulokseen. Ekvivalenttia jännitysvaihteluväliä käyttämällä selvitään kuitenkin hieman lyhyemmin laskutoimituksin.

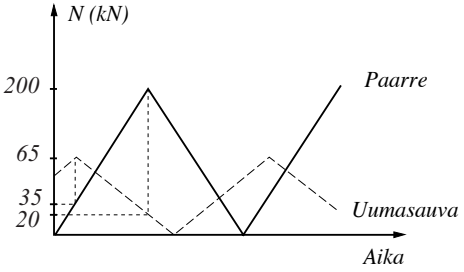
Vertailu S420 vs S355:
Varsinaisen väsymiskestävyyden kannalta materiaalilujuudella ei ole merkitystä Eurocoden mukaisessa mitoituksessa. Liian pieni materiaalilujuus voi kuitenkin myös väsymismitoituksessa aiheuttaa että rakenteen 'väsymiskestävyys' ei riitä:

Eurocode edellyttää että väsymismitoituksessa tavallisista kuormista $\psi_1 Q_k$ aiheutuvat nimelliset, muunnetut nimelliset ja geometriset jännitysvaihteluvälit ovat normaalijännityksille enintään $\Delta\sigma \leq 1,5 f_y$ ja leikkausjännityksille enintään $\Delta\tau \leq 1,5 f_y/\sqrt{3}$.

Esimerkki 4.2

Tarkastetaan vapaavälisen K-liitoksen väsymiskestävyys nimellisten jännitysten menetelmällä. Paarteena on rakenneputki 200×200×8 ja uumasauvoina 140×140×8. Putket ovat teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.





Uumasauvojen normaalivoiman vaihteluväli $\Delta N_{1.Ed}$ on 65 kN ja paarteen $\Delta N_{0.Ed}$ on 200 kN. Paarteen ja uumasauvan normaalivoimat vuorottelevat oheisen kuvan mukaisesti siten, että paarteen normaalivoima on 35 kN, silloin kun uumasauvojen normaalivoima on 65 kN. Vastaavasti uumasauvojen normaalivoima on 20 kN, silloin kun paarteen normaalivoima on 200 kN. Jännityssyklien lukumäärä on $5 \cdot 10^4$.

Liitoksen mitat ovat seuraavat:

θ_1 = 37°
g = 35 mm
e = 0,8 mm (≈ 0 mm)

Suoritetaan liitoksen väsymistarkastelu tässä esimerkissä nimellisten jännitysten menetelmällä.

Liitoksen voimassaoloehdot ovat voimassa (taulukko 4.6), mutta niiden tarkastamista ei esitetä tässä.

Liitoksen epäkeskeisyyden vaikutukset voidaan jättää ottamatta huomioon, koska epäkeskeisyys on liitokselle asetettujen vaatimusten rajoissa.

Ristikkorakenteiden liitosten jäykkyydestä aiheutuvien sekundääristen taivutusmomenttien vaikutus sen sijaan pitää ottaa huomioon, jos sauvavoimat on laskettu käyttäen uuma-

sauvojen päille nivelmallia. Tämä tapahtuu kertomalla nimellisen jännitysvaihteluvälin arvo taulukon 4.3 mukaisella korjauskertoimella k_1:

$$\Delta\sigma_1 = \frac{k_1 \cdot \Delta N_{1.Ed}}{A_1} = \frac{1,5 \cdot 65000}{4004} = 24,4\ N/mm^2 \qquad \text{uumasauva}$$

$$\Delta\sigma_0 = \frac{k_1 \cdot \Delta N_{0.Ed}}{A_0} = \frac{1,5 \cdot 200000}{5924} = 50,6\ N/mm^2 \qquad \text{paarre}$$

Tarkastetaan toteutuuko väsymistarkastelulle asetetut ehdot suurimman jännitysvaihtelun osalta (ehto (4.10)):

$\gamma_{Ff} = 1,0$ *väsyttävän kuorman osavarmuusluku*

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{max} = 1,0 \cdot 50,6 = 50,6\ N/mm^2 \le 1,5 f_y = 1,5 \cdot 420 = 630\ N/mm^2 \quad OK$$

Liitoksen väsymisluokka riippuu paarteen ja uumasauvan seinämän paksuuksien suhteesta (taulukko 4.6):

$t_0 / t_1 = 1,0 \Rightarrow$ *väsymisluokka 36*

Oletetaan, että käytetään varman kestämisen periaatetta, ja koska murtuminen johtaisi suuriin seurauksiin, kestävyyden osavarmuusluku on:
$\gamma_{Mf} = 1,35$ *(taulukko 4.1)*

Väsymislujuuden arvo väsymisluokassa 36 kuormitussyklin $N = 5 \cdot 10^4$ kohdalla saadaan ristikkoliitoksille kuvasta 4.12. Tarkka arvo voidaan laskea kaavasta (4.14) ratkaisemalla, kun muistetaan että ristikkoliitoksille käytetään yksiosaista 1:5 kaltevuudella olevaa S-N-käyrää (m=5):

$$\Delta\sigma_R = \sqrt[5]{\frac{\Delta\sigma_C^5 \cdot 2 \cdot 10^6}{N}} = \sqrt[5]{\frac{36^5 \cdot 2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^4}} = 75,3\ N/mm^2$$

Verrataan väsymislujuutta uumasauvan ja paarteen jännitysvaihteluväleihin:

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_1}{\Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 24,4}{75,3 / 1,35} = 0,437 \le 1,0 \quad OK \quad \text{uumasauva}$$

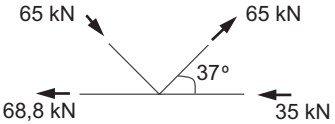
$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_0}{\Delta\sigma_R / \gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 50,6}{75,3 / 1,35} = 0,907 \le 1,0 \quad OK \quad \text{paarre}$$

Vertailu S420 vs S355:
Kuten esimerkki 4.1.

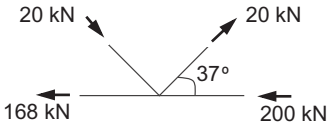
Esimerkki 4.3

Tarkastetaan esimerkin 4.2 liitoksen väsymiskestävyys hot spot -jännitysten menetelmällä. Esimerkissä 4.2 tarkastelu tehtiin uumasauvalle sen oman kuormitusvaihtelun perusteella ja vastaavasti paarteelle sen oman kuormitusvaihtelun perusteella. Hot spot -menetelmässä sen sijaan pitää ottaa huomioon myös sauvojen keskinäinen vaikutus (uumasauvan jännitysvaihtelun vaikutus paarteeseen), joten tarkastelu tehdään uumasauvalle ja paarteelle niissä samaan aikaan vaikuttavien voimasuureiden perusteella. Esimerkissä 4.2 esitettyjen alkuarvojen mukaan samanaikaiset voimasuureet ovat:

- kun uumasauvassa maksimi:
$N_{i.Ed}$ = 65 kN jolloin samanaikaisesti paarteessa $N_{0.Ed}$ = 35 kN



- kun paarteessa maksimi:
$N_{0.Ed}$ = 200 kN jolloin samanaikaisesti uumasauvassa $N_{i.Ed}$ = 20 kN



Uumasauvan tarkastelu:
Määritetään ensin taulukon 4.12 parametrien arvot (taulukon mukaiset liitoksen voimassaoloehdot ovat voimassa, mutta niiden tarkastamista ei esitetä tässä):

$$\beta = \frac{b_i}{b_0} = \frac{140}{200} = 0,7$$

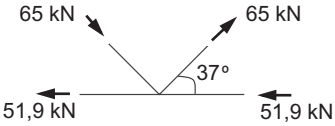
$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{200}{2 \cdot 8} = 12,5$$

$$\tau = \frac{t_i}{t_0} = \frac{8}{8} = 1,0$$

$$g' = \frac{g}{t_0} = \frac{35}{8} = 4,38$$

Hajautetaan vallitseva kuormitustilanne kahdeksi osakuormitukseksi taulukossa 4.12 esitetyn mukaisesti:

Kuormitus 1
(tasapainotetut sauvavoimat, taulukko 4.12):



Uumasauvoissa vaikuttaa niiden sauvavoimat, paarrevoimat lasketaan liitoksen voimatasapainosta:

$N_i = 65\ kN$ *uumasauvat*

$N_0 = N_i \cos\theta_i = 65 \cdot \cos 37 = 51,9\ kN$ *paarre*

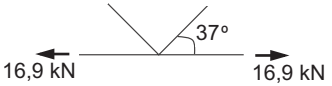
Uumasauvan kuorman N_i vaikutus uumasauvan omaan hot spot -jännitykseen saadaan taulukosta 4.12:

$$SCF_{N.i} = (-0,008 + 0,45 \cdot \beta - 0,34 \cdot \beta^2) \cdot (2\gamma)^{1,36} \cdot \tau^{-0,66} \cdot (\sin\theta_i)^{1,29}$$
$$= (-0,008 + 0,45 \cdot 0,7 - 0,34 \cdot 0,7^2) \cdot (2 \cdot 12,5)^{1,36} \cdot 1,0^{-0,66} \cdot (\sin 37)^{1,29}$$
$$= 5,81$$

Kuormituksesta 1 (= uumasauvan normaalivoima) uumasauvaan aiheutuva hot spot -jännitysvaihteluväli on siis:

$$\Delta\sigma_{hs.i.1} = \frac{SCF_{N.i} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_i)}{A_i} = \frac{5,81 \cdot (1,5 \cdot 65000)}{4004} = 142\ N/mm^2$$

Kuormitus 2
(pelkät paarrevoimat, taulukko 4.12):



Paarteen laskennalliset sauvavoimat määritetään todellisen kuormitustilanteen ja osakuormituksen 1 perusteella seuraavasti:

$N_{0.right} = 35 - 51,9 = -16,9\ kN$ *oikea paarre*

$N_{0.left} = 68,8 - 51,9 = 16,9\ kN$ *vasen paarre*

Saadut tulokset voidaan tarkastaa superponoimalla Kuormitus 1 ja Kuormitus 2, jolloin tulokseksi pitää tulla alkuperäisen tilanteen mukaiset sauvavoimat.

Paarteen kuorman N_0 vaikutus uumasauvan hot spot -jännitykseen saadaan taulukosta 4.12:

$SCF_{N.i} = 0$ *(ei vaikutusta)* $\Rightarrow \Delta\sigma_{hs.i.2} = 0$

Uumasauvan hot spot -jännitysvaihteluvälin kokonaisarvo saadaan superponoimalla Kuormitusten 1 ja 2 vaikutukset:

$$\Delta\sigma_{hs.i} = \Delta\sigma_{hs.i.1} + \Delta\sigma_{hs.i.2} = 142 + 0 = 142\ N/mm^2$$

Tarkastetaan toteutuuko väsymistarkastelulle asetetut ehdot suurimman jännitysvaihtelun osalta (ehto (4.10)):

$\gamma_{Ff} = 1,0$ *väsyttävän kuorman osavarmuusluku*

$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{max} = 1,0 \cdot 142 = 142\ N/mm^2 \le 1,5 f_y = 1,5 \cdot 420 = 630\ N/mm^2$ *OK*

Väsymislujuuden arvo rakenneputkien ristikkoliitosten hot spot -jännityksille saadaan kuvasta 4.13 kuormitussyklin $N = 5 \cdot 10^4$ kohdalta. Tarkka arvo voidaan laskea kaavasta (4.30):

$$\Delta\sigma_{hs.R} = 10^{\frac{1}{3} \cdot \left[12,476 - \log(N_R) + 0,18 \cdot \log(N_R) \cdot \log\left(\frac{16}{t}\right)\right]}$$

$$= 10^{\frac{1}{3} \cdot \left[12,476 - \log(5 \cdot 10^4) + 0,18 \cdot \log(5 \cdot 10^4) \cdot \log\left(\frac{16}{8}\right)\right]}$$

$$= 476\ N/mm^2$$

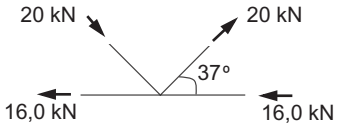
Vakioamplitudisella kuormituksella väsymiskestävyys todennetaan mitoitusehdolla (4.36):

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.i}}{\Delta\sigma_{hs.R}/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 142}{476/1,35} = 0,403 \le 1,0 \quad OK$$

Paarteen tarkastelu:

Hajautetaan vallitseva kuormitustilanne kahdeksi osakuormitukseksi taulukossa 4.12 esitetyn mukaisesti:

Kuormitus 1
(tasapainotetut sauvavoimat, taulukko 4.12):



Uumasauvoissa vaikuttaa niiden sauvavoimat, paarrevoimat lasketaan liitoksen voimatasapainosta:

$N_i = 20\ kN$ *uumasauvat*

$N_0 = N_i \cos\theta_i = 20 \cdot \cos 37 = 16,0\ kN$ *paarre*

Uumasauvan kuorman N_i vaikutus paarteen hot spot -jännitykseen saadaan taulukosta 4.12:

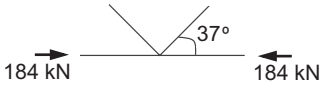
$$SCF_{N.0} = (0,48 \cdot \beta - 0,5 \cdot \beta^2 - 0,012/\beta + 0,012/g') \cdot (2\gamma)^{1,72} \cdot \tau^{0,78} \cdot (g')^{0,2} \cdot (\sin\theta)^{2,09}$$

$$SCF_{N.0} = (0,48 \cdot 0,7 - 0,5 \cdot 0,7^2 - 0,012/0,7 + 0,012/4,38) \cdot (2 \cdot 12,5)^{1,72} \cdot$$
$$1,0^{0,78} \cdot (4,38)^{0,2} \cdot (\sin 37)^{2,09}$$
$$= 9,04$$

Kuormituksesta 1 (= uumasauvan normaalivoima) paarteeseen aiheutuva hot spot -jännitysvaihteluväli on siis:

$$\Delta\sigma_{hs.0.1} = \frac{SCF_{N.0} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_i)}{A_i} = \frac{9,04 \cdot (1,5 \cdot 65000)}{4004} = 220\ N/mm^2$$

Kuormitus 2
(pelkät paarrevoimat, taulukko 4.12):



Paarteen laskennalliset sauvavoimat määritetään todellisen kuormitustilanteen ja osakuormituksen 1 perusteella seuraavasti:

$N_{0.right} = 200 - 16,0 = 184\ kN$ *oikea paarre*

$N_{0.left} = 168 - (-16) = 184\ kN$ *vasen paarre*

Paarteen kuorman N_0 vaikutus paarteen omaan hot spot-jännitykseen saadaan taulukosta 4.12:

$$SCF_{N.0} = (2,45 + 1,23 \cdot \beta) \cdot (g')^{-0,27} = (2,45 + 1,23 \cdot 0,7) \cdot (4,38)^{-0,27} = 2,22$$

Kuormituksesta 2 (= paarteen normaalivoima) paarteeseen aiheutuva hot spot-jännitysvaihteluväli on:

$$\Delta\sigma_{hs.0.2} = \frac{SCF_{N.0} \cdot (k_1 \cdot \Delta N_0)}{A_0} = \frac{2,22 \cdot (1,5 \cdot 200000)}{5924} = 112\ N/mm^2$$

Paarteen hot spot-jännitysvaihteluvälin kokonaisarvo saadaan superponoimalla Kuormitusten 1 ja 2 vaikutukset:

$$\Delta\sigma_{hs.0} = \Delta\sigma_{hs.0.1} + \Delta\sigma_{hs.0.2} = 220 + 112 = 332\ N/mm^2$$

Tarkastetaan toteutuuko väsymistarkastelulle asetetut ehdot suurimman jännitysvaihtelun osalta (ehto (4.10)):

$\gamma_{Ff} = 1,0$ *väsyttävän kuorman osavarmuusluku*

$$\gamma_{Ff} \cdot \Delta\sigma_{max} = 1,0 \cdot 332 = 332\ N/mm^2 \le 1,5 f_y = 1,5 \cdot 420 = 630\ N/mm^2 \quad OK$$

Koska paarteella on tässä sama seinämänpaksuus kuin uumasauvalla (t = 8 mm), sille käytetään samaa S-N-käyrää. Paarteen väsymislujuudelle voidaan siis käyttää suoraan samaa arvoa, joka laskettiin edellä uumasauvalle kuormitussyklin $N = 5 \cdot 10^4$ kohdalla:

$$\Delta\sigma_{hs.R} = 476\ N/mm^2$$

Verrataan hot spot-jännitysvaihteluväliä paarteen väsymiskestävyyteen:

$$\frac{\gamma_{Ff}\Delta\sigma_{hs.0}}{\Delta\sigma_{hs.R}/\gamma_{Mf}} = \frac{1,0 \cdot 332}{476/1,35} = 0,942 \le 1,0 \quad OK$$

Voidaan todeta, että sekä uumasauvan että paarteen osalta hot spot-tarkastelulla saatiin varsin samansuuruiset tulokset, kuin edellisessä esimerkissä samalle liitokselle nimellisten jännitysten menetelmällä. Yleisesti hot spot-menetelmällä saadaan liitoksen eri parametrien vaikutus tarkemmin huomioitua.

Vertailu S420 vs S355:
Kuten esimerkki 4.1.

4.8 Lähdeluettelo

[1] Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus. Eurocode 3 -oppikirja. 2010. Teräsrakenneyhdistys ry. 183 s.

[2] Niemi E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Tekninen tiedotus 2/2003. Teknologiateollisuus ry. Teknologiainfo Teknova Oy. 136 s.
Huom: Eurocoden osien EN 1993-1-5, EN 1993-1-8, EN 1993-1-9 ja EN 1993-1-10 osalta teos perustuu kirjoitushetken työversioihin prEN 1993-1-5:2002, prEN 1993-1-8:2002, prEN 1993-1-9:2002 ja prEN 1993-1-10:2002, mistä johtuen osa julkaisun mitoitusohjeista saattaa poiketa kyseisten Eurocoden osien lopullisista julkaistuista ohjeista.

[3] Eriksson K. 2005. Att konstruera med stål. Läromedel för konstruktörer. Modul 8: Utmattning. Luleå Tekniska Universitet, Kunglika Tekniska Högskolan, Stålbyggnadsinstitutet. 56 s.

[4] Niemi E. 1996. Hitsattujen rakenteiden väsymistarkastelussa käytettävät jännitykset. Tekninen tiedotus 3/96. Metalliteollisuuden kustannus Oy. 45 s.

[5] Wardenier J. 2001. Hollow Sections in Structural Applications. 1st edition. 199 s. CIDECT. [www.cidect.org] (11.4.2012).

[6] CIDECT. 2001. Design guide for circular and rectangular hollow section welded joints under fatigue loading. CIDECT Design Guide No 8. Verlag TÜV Rheinland GmbH. 121 s.

[7] IIW. 1999. Recommended fatigue design procedure for welded hollow section joints, Part 1: Recommendations and Part 2: Commentary. Internationale Institute of Welding, Sub-commission XV-E, IIW Docs. XV-1035-99/XIII-1804-99.

[8] SFS-EN 1993-1-9:2005. (EN 1993-1-9:2005) Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 42 s.

[9] SFS-EN 1993-1-9:2005+AC:2005. (EN 1993-1-9:2005+AC:2005) Sisältää myös korjaukset AC:2005. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 37 s.

[10] SFS-EN 1993-1-9: AC:2009. (EN 1993-1-9: AC:2009) Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-9. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

[11] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-9. 15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[12] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[13] Tarjavuori P. 1995. Hitsin väsymislujuuden parantaminen jälkikäsittelyllä.
Tutkimusraportti nro 9. Lappeenrannan teknillinen korkeakoulu, Konetekniikan osasto.

5. RAKENNEPUTKEN HAURASMURTUMAN JA LAMELLIREPEILYN ESTÄMINEN

5.1 Haurasmurtuma

Haurasmurtuma on äkillistä, jopa äänen nopeudella etenevää murtumista ilman selvästi havaittavaa plastista muodonmuutosta. Haurasmurtuma voi saada alkunsa staattisesti kuormitetussa rakenneosassa olevasta alkusäröstä (esim. hitsin virhe), tai väsymällä kasvaneesta säröstä tai hitsin virheestä, jonka jälkeen murtuma etenee nopeasti myös virheettömässä rakenteessa. Haurasmurtuma johtaa yleensä vakavampiin seurauksiin kuin sitkeä murtuminen. Sitkeän murtumisen aikana rakenteeseen muodostuu plastisia niveliä, jotka muuttavat kuormitusjakaumaa ja vaurio voi rajoittua paikalliseksi.

Haurasmurtuman todennäköisyys riippuu seuraavista seikoista:

- teräksen lujuus
- jännitystaso ja -tila
- ainepaksuus
- kuormitusnopeus
- käyttölämpötila sekä
- teräksen sitkeys.

Korkealujuuksinen ja paksuseinämäinen rakenneosa on alttiimpi haurasmurtumalle kuin matalalujuuksinen ja ohutseinämäinen. Suuri kuormitusnopeus lisää haurasmurtuman riskiä samoin kuin matala käyttölämpötila. Sitkeämpi teräslaji kestää puolestaan paremmin matalissa lämpötiloissa. Haurasmurtuma-alttiutta kuvaavia materiaaliominaisuuksia ovat transitiolämpötila ja iskusitkeys.

Teräksen murtumismuoto muuttuu sitkeästä hauraaksi transitiolämpötila-alueella. Transitiolämpötila ei ole yksikäsitteinen materiaaliominaisuus, vaan se riippuu käytetystä testausmenetelmästä ja hauraudelle asetetuista vaatimuksista. Testausmenetelmänä käytetään yleisesti Charpy-V -koetta. Kokeessa murretaan iskukoesauva, jossa on 2 mm syvyinen V-lovi, heilurivasaran avulla tietyssä lämpötilassa. Standardikoesauvan koko on 10×10 mm. Transitiolämpötilaksi kutsutaan sitä lämpötilaa, jossa koesauvan murtamiseen käytetty energia on vähintään 27 J. Lujilla hienoraeteräksillä käytetään myös mm. 30 J ja 40 J kriteereitä.

5.2 Haurasmurtuman estäminen Eurocoden mukaisesti

Ohjeet haurasmurtuman estämiselle on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-10. Ohjeet soveltuvat vedetyille rakenneosille, sekä hitsatuille ja väsytyskuormitetuille rakenneosille joissa osa jännityssyklistä on vetoa. Ohjeet koskevat kaikkia osan EN 1993-1-9 väsymisluokkien mukaisia väsytyskuormitettuja rakenneosia, kun jännitykset lasketaan nimellisinä jännityksinä [8,9,10].

Rakenneosille, joihin ei kohdistu vetoa, hitsausta tai väsyttävää kuormaa, säännöt voivat olla varmalla puolella [8,9,10].

Standardin EN 1993-1-10 mukaan pelkästään puristetuille rakenneosille ei tarvitse asettaa haurasmurtumasta johtuvia murtumissitkeyttä koskevia vaatimuksia. Rakenneosissa saattaa kuitenkin olla valmistuksesta (valssaus, kylmämuovaus, hitsaus) aiheutuvia jäännösjännityk-

siä, jotka aiheuttavat vetoa myös puristetuissa rakenneosissa. Siksi Eurocoden osa EN 1993-1-1 edellyttää myös puristetuille rakenneosille riittävää murtumissitkeyttä, jonka kriteerit voidaan määrittää kansallisessa liitteessä [4,5,6]. Osassa EN 1993-1-1 suositetaan, että puristetuille rakenneosille käytetään tällöin osan EN 1993-1-10 mukaista menettelyä siten, että rakenneosalle otaksutaan jännitystasoksi $\sigma_{Ed} = 0{,}25 f_y(t)$, ks. taulukko 5.1.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [7]:

Puristetuille rakenneosille käytetään Eurocoden suositusarvoa $\sigma_{Ed} = 0{,}25 f_y(t)$.

Standardissa EN 1993-1-10 esitetty menettely perustuu murtumismekaniikan mukaiseen tarkasteluun ja sen perusteella kehitettyyn laskentamalliin. Aihetta on käsitelty tarkemmin lähteessä [12].

Käytännön suunnittelutyön helpottamiseksi standardissa EN 1993-1-10 on esitetty kyseisen laskentamallin perusteella laadittu taulukko (EN 1993-1-10: Taulukko 2.1), johon on valmiiksi laskettu rakenneosan suurimmat sallitut ainepaksuudet eri referenssilämpötiloille T_{Ed} ja eri teräslajeille niiden nimellisten myötölujuus- ja iskusitkeysarvojen mukaisesti.

Vastaavaan murtumismekaniikan mukaiseen tarkasteluun perustuu myös oheinen lähteeseen [13] pohjautuva taulukko 5.1, jonka laskentamallissa tiettyjä parametreja on kuitenkin Eurocoden osan EN 1993-1-10 [8,9,10] julkaisun jälkeen hieman muutettu. Samalla ainepaksuuden lukuarvot on esitetty 5 mm sijasta 1 mm tarkkuudella (pienillä paksuuksilla 5 mm porrastus on liian karkea). Tarkoitus on, että lähteen [13] mukainen taulukko aikanaan korvaa Eurocodessa nyt (= tätä kirjoitettaessa) esitetyn taulukon.

Kylmämuovaus itsessään ei aiheuta (eikä ole aiheuttanut) muutostarvetta taulukossa esitettyihin ainepaksuuden lukuarvoihin. Kylmämuovauksen vaikutukset otetaan sen sijaan huomioon taulukossa parametrina esitetyn referenssilämpötilan T_{Ed} laskemisessa jäljempänä esitetyn mukaisesti.

Taulukossa esitetyt ainepaksuudet on ryhmitelty kolmelle eri jännitystasolle σ_{Ed} seuraavasti [8,9,10]:

a) $\sigma_{Ed} = 0{,}75 f_y(t)$ *(5.1a)*
b) $\sigma_{Ed} = 0{,}50 f_y(t)$ *(5.1b)*
c) $\sigma_{Ed} = 0{,}25 f_y(t)$ *(5.1c)*

missä σ_{Ed} on potentiaalisessa murtuman alkukohdassa vaikuttava nimellinen jännitys kimmoteorian mukaisesti ja laskettuna käyttörajatilakuormilla tavallisen kuormitusyhdistelmän mukaisesti (ks. kohta 7.1.4), mikä likimääräisesti vastaa onnettomuusrajatilan mukaista kuormayhdistelmää (EN 1993-1-1 Suomen kansallisessa liitteessä ohjeistetaan käyttämään rakenteen siirtymätarkasteluissa käyttörajatilan kuormayhdistelmänä ominaisyhdistelmää, jolla laskettu σ_{Ed} on haurasmurtumatarkasteluja ajatellen varmalla puolella)

$f_y(t)$ on materiaalin nimellinen myötölujuus, missä $f_y(t)$ voidaan määrittää joko kaavasta:

$$f_y(t) = f_{y.nom} - 0,25\frac{t}{t_0} \quad [N/mm^2] \qquad (5.2)$$

missä t on levyn paksuus millimetreinä ja t_0 = 1 mm
tai $f_y(t)$ arvona voidaan käyttää kyseeseen tulevan terässtandardin mukaisia R_{eH} -arvoja (ks. luku 1)

Taulukkoa 5.1 käytettäessä voidaan soveltaa lineaarista interpolointia. Koska jännitystystarkastelu suoritetaan käyttörajatilajännityksillä, σ_{Ed} -arvot ovat käytännössä yleensä välillä σ_{Ed} = (0,50 ... 0,75) x $f_y(t)$ ja tasoa σ_{Ed} = 0,75$f_y(t)$ voidaan käyttää varmalla puolella olevana arvona. Taulukon ääriarvojen ulkopuolelle ulottuva ekstrapolointi ei ole sallittu.

Taulukkoa 5.1 käytettäessä on tunnettava tarkasteltavan rakenneosan referenssilämpötila T_{Ed}, joka määritetään Eurocodessa seuraavasti [8,9,10]:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_\sigma + \Delta T_R + \Delta T_{\dot{\varepsilon}} + \Delta T_{\varepsilon.cf} \qquad (5.3)$$

missä
T_{md} on rakenneosan alin käyttölämpötilan mitoitusarvo, ks. EN 1991-1-5
ΔT_r on säteilyhäviön huomioon ottava korjaustermi, ks. EN 1991-1-5
ΔT_σ on korjaustermi, joka ottaa huomioon materiaalin jännityksen ja myötölujuuden, särön epätarkkuuden sekä rakenneosan muodon ja mitat, ΔT_σ = 0 , kun käytetään taulukkoa 5.1
ΔT_R on varmuutta muuttava termi, jolla tarvittaessa otetaan huomioon erilaisten käyttösovellutusten erilainen luotettavuustaso, ja jonka arvo voidaan valita kansallisessa liitteessä:
Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-10 [11]:
Käytetään Eurocoden suositusarvoa $\Delta T_R = 0$.
$\Delta T_{\dot{\varepsilon}}$ on venymisnopeuden (kuormitusnopeuden) huomioon ottava korjaustermi, kun käytetään muuta kuin referenssivenymisnopeutta (ks. kaava 5.4)
$\Delta T_{\varepsilon.cf}$ on kylmämuovausasteen ε_{cf} huomioon ottava korjaustermi kohdan 5.2.1 mukaisesti

Venymisnopeuden referenssiarvona on käytetty arvoa $\dot{\varepsilon}_0 = 4 \times 10^{-4}/sek$, joka kattaa dynaamiset kuorman vaikutukset useimmissa tilapäisissä ja normaalisti vallitsevissa mitoitustilanteissa. Muilla venymisnopeuden arvoilla $\dot{\varepsilon}$ (esim. iskumaiset kuormitukset) tarvitaan korjaustermi $\Delta T_{\dot{\varepsilon}}$, joka lasketaan seuraavasti [8,9,10]:

$$\Delta T_{\dot{\varepsilon}} = \frac{1440 - f_y(t)}{550} \cdot \left(ln\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0} \right) \quad [°C] \qquad (5.4)$$

Kylmämuovatuilla rakenneputkilla, jos rakenteeseen ei kohdistu iskumaista kuormitusta, lauseke (5.3) supistuu taulukkoa 5.1 käytettäessä edellä esitetyn perusteella Suomessa yksinkertaiseen muotoon:

$$T_{Ed} = T_{md} + \Delta T_r + \Delta T_{\varepsilon.cf} \qquad (5.5)$$

missä rakenneosan alin käyttölämpötila T_{md} määritetään Eurocoden osan EN 1991-1-5 ja sen kansallisen liitteen mukaisesti [1,2,3]. Suomessa ulkoilman alin mitoituslämpötila vaihtelee Oulun eteläpuolisilla alueilla haarukassa -35...-45 °C ja pohjoispuolella vastaavasti -40...-50 °C [3].

Standardi EN 1991-1-5 on kuitenkin sikäli puutteellinen, että siinä ei ole esitetty arvoa lausekkeessa (5.3) esiintyvälle korjaustermille ΔT_r. Kyse on ulkotiloissa kirkkaan tähtitaivaan alla tapahtuvasta säteilyhäviöstä (esim. sillankansi). Lähteessä [12] kyseiselle termille on esitetty arvo ΔT_r = -5 °C.

Eri lämpötiloissa suoritetuille materiaalin Charpy-V -iskusitkeysarvoille voidaan tarvittaessa käyttää seuraavaa korrelaatiota [8,9,10]:

$$T_{40J} = T_{27J} + 10\ [°C] \qquad (5.6)$$

$$T_{30J} = T_{27J} + 0\ [°C] \qquad (5.7)$$

Taulukko 5.1 Kylmämuovattujen rakenneputkien suurin sallittu seinämänpaksuus t (mm) [13]

Teräslaji	Alalaji	Charpy energia KV		Referenssilämpötila T_{Ed} (ºC)													
EN 10219		T (ºC)	(J_{min})	10	0	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90	-100	-110	-120
				$\sigma_{Ed} = 0{,}75\, f_y(t)$													
S235	JRH	20	27	62	51	43	36	30	25	21	18	16	14	12	11	10	9
S275	J0H	0	27	78	65	54	45	37	31	26	22	18	15	13	11	10	9
	J2H	-20	27	112	94	78	65	54	45	37	31	26	22	18	15	13	11
	NH, MH	-20	40	132	111	93	77	64	53	44	37	31	25	21	18	15	13
	NLH, MLH	-50	27	185	158	134	112	94	78	65	54	45	37	31	26	22	18
S355	J0H	0	27	63	52	43	35	29	24	20	16	14	11	10	8	7	6
	J2H	-20	27	92	76	63	52	43	35	29	24	20	16	14	11	10	8
	K2H, NH, MH	-20	40	109	91	75	62	51	42	35	28	23	19	16	13	11	9
	NLH, MLH	-50	27	155	131	110	92	76	63	52	43	35	29	24	20	16	14
S420	MH	-20	40	95	79	65	53	44	36	29	24	19	16	13	11	9	7
	MLH	-50	27	137	115	96	80	66	54	44	36	29	24	20	16	13	11
S460	NH, MH	-20	40	88	73	60	49	40	32	26	21	17	14	12	9	8	6
	NLH, MLH	-50	27	128	107	89	73	60	49	40	33	27	22	18	14	12	10
				$\sigma_{Ed} = 0{,}50\, f_y(t)$													
S235	JRH	20	27	90	77	65	55	47	41	35	31	27	24	21	19	18	16
S275	J0H	0	27	113	96	81	69	58	49	42	36	31	27	24	21	18	17
	J2H	-20	27	156	133	113	96	81	69	58	49	42	36	31	27	24	21
	NH, MH	-20	40	179	154	132	112	95	81	68	58	49	42	36	31	27	23
	NLH, MLH	-50	27	199	199	181	156	133	113	96	81	69	58	49	42	36	31
S355	J0H	0	27	96	80	68	57	48	40	34	29	25	21	18	16	14	13
	J2H	-20	27	133	113	96	80	68	57	48	40	34	29	25	21	18	16
	K2H, NH, MH	-20	40	155	132	112	95	80	67	56	47	40	34	28	24	21	18
	NLH, MLH	-50	27	199	181	156	133	113	96	80	68	57	48	40	34	29	25
S420	MH	-20	40	139	118	99	83	70	58	49	41	34	29	24	20	17	15
	MLH	-50	27	190	164	140	119	100	84	71	59	49	41	34	29	24	21
S460	NH, MH	-20	40	130	110	93	78	65	54	45	37	31	26	22	18	16	14
	NLH, MLH	-50	27	180	155	132	111	94	78	65	54	45	38	31	26	22	19
				$\sigma_{Ed} = 0{,}25\, f_y(t)$													
S235	JRH	20	27	134	116	101	88	77	67	59	53	47	42	39	35	33	31
S275	J0H	0	27	167	145	126	109	95	82	71	62	55	49	43	39	35	32
	J2H	-20	27	199	191	167	145	126	109	95	82	71	62	55	49	43	39
	NH, MH	-20	40	199	199	189	165	144	125	108	94	81	71	62	55	48	43
	NLH, MLH	-50	27	229	202	199	199	191	167	145	126	109	95	82	71	62	55
S355	J0H	0	27	150	130	112	97	83	72	62	54	47	42	37	33	30	27
	J2H	-20	27	198	173	150	130	112	97	83	72	62	54	47	42	37	33
	K2H, NH, MH	-20	40	199	197	172	149	129	111	96	83	71	62	54	47	41	37
	NLH, MLH	-50	27	210	199	199	198	173	150	130	112	97	83	72	62	54	47
S420	MH	-20	40	199	183	159	138	118	102	87	75	64	55	48	42	37	33
	MLH	-50	27	199	199	199	185	160	139	119	103	88	75	65	56	48	42
S460	NH, MH	-20	40	199	176	152	131	113	96	82	71	61	52	45	39	34	30
	NLH, MLH	-50	27	199	199	199	177	153	132	114	97	83	71	61	53	45	39

Taulukkoa käytettäessä voidaan soveltaa lineaarista interpolointia. Ääriarvojen ulkopuolelle ulottuva ekstrapolointi ei ole sallittu.

5.2.1 Kylmämuovauksen vaikutus haurasmurtumaan, referenssilämpötilan korjaustermi $\Delta T_{\varepsilon.cf}$ kylmämuovatuille rakenneputkille

Kylmämuovaus aiheuttaa teräksessä muokkauslujittumista ja iskusitkeyden alenemista.

Kylmämuovauksesta aiheutuva lujuuden nousu ja iskusitkeyden aleneminen lisäävät teräksen haurasmurtuma-alttiutta. Eurocoden osassa EN 1993-1-10 tämä ohjeistetaan ottamaan huomioon määritettäessä referenssilämpötilaa T_{Ed}, jota pitää korjata kylmämuovauksesta aiheutuvalla korjaustermillä $\Delta T_{\varepsilon.cf}$. Eurocode on kuitenkin sikäli puutteellinen, että siinä ei ole esitetty kuinka kyseinen korjaustermi määritetään.

Tässä esitetyt ohjeet perustuvat lähteeseen [13], joka on laadittu nimenomaan täydentämään Eurocoden kyseistä puutteellista ohjeistusta.

Yksinkertaistettu menetelmä:

Seuraavaa ohjetta voidaan soveltaa varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena. Menetelmä on tarkoitettu ainoastaan kylmämuovatuille standardin EN 10219 mukaisille rakenneputkille [13].

- pyöreät rakenneputket:

$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = 0 \qquad kun \;\; d_i / t > 30 \qquad (5.8a)$$

$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = -20\,°C \qquad kun \;\; d_i / t \leq 30 \qquad (5.8b)$$

- neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket:

$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = -35\,°C \qquad kun \;\; t \leq 16\ mm \qquad (5.9a)$$

$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = -45\,°C \qquad kun \;\; 16\ mm < t \leq 40\ mm \qquad (5.9b)$$

missä d_i on sisähalkaisija
t on seinämänpaksuus

Tarkempi menetelmä:

Menetelmä soveltuu yleisesti kaikille kylmämuovatuille profiileille [13].

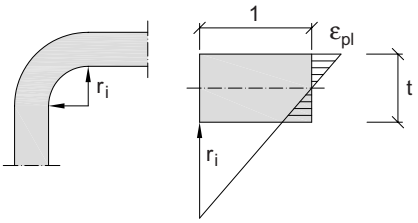
$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = 0 \qquad kun \;\; \varepsilon_{cf} \leq 2\,\% \qquad mutta\ muulloin: \qquad (5.10a)$$

$$\Delta T_{\varepsilon.cf} = -3 \cdot \varepsilon_{cf}\ [°C] \qquad kuitenkin \;\; \Delta T_{\varepsilon.cf} \geq -45\,°C \qquad (5.10b)$$

missä kylmämuovausasteen ε_{cf} sijasta laskelmissa käytetään kylmämuovauksen aiheuttamaa tehollista venymää ε_{eff}, joka saadaan taulukosta 5.2.

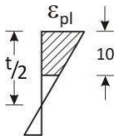
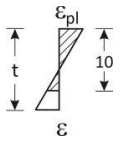
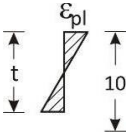
Taulukko 5.2 Kylmämuovatun nurkan plastinen venymä ε_{pl} ja tehollinen venymä ε_{eff} [13]

Plastinen venymä ε_{pl} :



$$\varepsilon_{pl} = \frac{1}{2\left(\frac{r_i}{t}\right) + 1}$$

Tehollinen venymä ε_{eff} :

t [mm]	ε_{pl} -jakauma	ε_{eff}
≥ 20		$\varepsilon_{pl} \cdot \left[1 - \frac{10}{t}\right]$
< 20 ≥ 10		$\frac{\varepsilon_{pl}}{2} \cdot \left[\frac{t}{20} + \frac{(20-t)^2}{20t}\right]$
< 10		$\frac{\varepsilon_{pl}}{2} \cdot \frac{t}{10}$

5.2.2 SSAB:n kylmämuovattujen SSAB Domex Tube rakenneputkien alin käyttölämpötila

Taulukosta 5.1 saadaan kutakin referenssilämpötilaa T_{Ed} vastaava suurin sallittu ainepaksuus eri teräslajeilla. Taulukossa 5.3, joka perustuu taulukkoon 5.1, sama tarkastelu on suoritettu 'toisinpäin': taulukosta saadaan neliön ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille seinämänpaksuutta t = max. 12,5 mm vastaava alin sallittu referenssilämpötila T_{Ed}, ja sitä vastaava lausekkeen (5.3) mukainen käyttölämpötila T_{md}, kun kylmämuovauksen vaikutus otetaan huomioon korjaustermillä $\Delta T_{\varepsilon .cf}$ kohdassa 5.2.1 esitettyyn yksinkertaistettuun menetelmään perustuen, ja kun lausekkeessa (5.3) esiintyviä referenssilämpötilan muita korjaustermejä ei tarvitse ottaa huomioon. Taulukossa 5.4 tarkastelu on sovitettu vastaavasti pyöreille rakenneputkille.

Taulukko 5.3 Alin sallittu referenssilämpötila T_{Ed} ja käyttölämpötila T_{md}. Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket

Neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket [a]									
Teräslaji		**EN 10219 rakenneputket**				**SSAB Domex Tube rakenneputket**			
		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]	
		Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (°C)	T_{md} (°C)	Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (°C)	T_{md} (°C)
S235	JRH	20 °C	27 J	-85	-50	-40 °C	27 J	-145	-110
S355	**J2H**	**-20 °C**	**27 J**	**-95**	**-60**	**-40 °C** [c]	**40 J** [c]	**-125** [d]	**-90** [d]
S420	**MH**	**-20 °C**	**40 J**	**-90**	**-55**	**-40 °C** [e]	**40 J** [e]	**-110** [f]	**-75** [f]
S460	MH	-20 °C	40 J	-85	-50	-40 °C	27 J	-95	-60

a) SSAB:n valmistusmitta-alue:
- neliön ja suorakaiteen muotoiset: t = max. 12,5 mm

b) $T_{md} = T_{Ed} - \Delta T_{\varepsilon.cf}$
missä:
T_{Ed} on taulukon 5.1 mukainen referenssilämpötila
T_{md} on rakenneosan käyttölämpötila, kun referenssilämpötilaa on korjattu kylmämuovaustekijällä $\Delta T_{\varepsilon.cf}$
$\Delta T_{\varepsilon.cf}$ on määritetty käyttäen kohdassa 5.2.1 esitettyä yksinkertaistettua menettelyä [13]

c) SSAB Domex Tube Double Grade.
d) SSAB Domex Tube Double Grade, kun mitoitus suoritetaan lujuusluokkaan S355 perustuen.

e) SSAB Domex Tube Double Grade.
f) SSAB Domex Tube Double Grade, kun mitoitus suoritetaan lujuusluokkaan S420 perustuen.

- Taulukon arvot on laskettu seinämänpaksuudella t = 12,5 mm. Ohuemmilla seinämänpaksuuksilla arvot ovat varmalla puolella.
- Taulukon arvot on laskettu käyttörajatilan jännitystasolla $\sigma_{Ed} = 0{,}75\, f_y$, jolla laskettuja arvoja voidaan käyttää varmalla puolella olevana arvona myös alemmilla jännitystasoilla.

Taulukko 5.4 Alin sallittu referenssilämpötila T_{Ed} ja käyttölämpötila T_{md}.
Pyöreät pituussaumahitsatut rakenneputket

Pyöreät pituussaumahitsatut rakenneputket [a]									
		EN 10219 rakenneputket				**SSAB Domex Tube rakenneputket**			
		Sisähalkaisija $d_i / t \leq 30$							
		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]	
Teräslaji		Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (ºC)	T_{md} (ºC)	Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (ºC)	T_{md} (ºC)
S235	JRH	20 ºC	27 J	-85	-65	-40 ºC	27 J	-145	-125
S355	**J2H**	**-20 ºC**	**27 J**	**-95**	**-75**	**-40 ºC** [c]	**40 J** [c]	**-125** [d]	**-105** [d]
S420	**MH**	**-20 ºC**	**40 J**	**-90**	**-70**	**-40 ºC** [e]	**40 J** [e]	**-110** [f]	**-90** [f]
S460	MH	-20 ºC	40 J	-85	-65	-40 ºC	27 J	-95	-75
		Sisähalkaisija $d_i / t > 30$							
		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]		Iskusitkeys		Lämpötilan alin mitoitusarvo [b]	
Teräslaji		Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (ºC)	T_{md} (ºC)	Testaus-lämpötila	Charpy-V iskuenergia	T_{Ed} (ºC)	T_{md} (ºC)
S235	JRH	20 ºC	27 J	-85	-85	-40 ºC	27 J	-145	-145
S355	**J2H**	**-20 ºC**	**27 J**	**-95**	**-95**	**-40 ºC** [c]	**40 J** [c]	**-125** [d]	**-125** [d]
S420	**MH**	**-20 ºC**	**40 J**	**-90**	**-90**	**-40 ºC** [e]	**40 J** [e]	**-110** [f]	**-110** [f]
S460	MH	-20 ºC	40 J	-85	-85	-40 ºC	27 J	-95	-95

a) SSAB:n valmistusmitta-alue:
- pyöreät pituussaumahitsatut: t = max. 12,5 mm
- pyöreät kierresaumahitsatut: t = max. 20 mm

b) $T_{md} = T_{Ed} - \Delta T_{\varepsilon.cf}$
missä:
T_{Ed} on taulukon 5.1 mukainen referenssilämpötila
T_{md} on rakenneosan käyttölämpötila, kun referenssilämpötilaa on korjattu kylmämuovaustekijällä $\Delta T_{\varepsilon.cf}$
$\Delta T_{\varepsilon.cf}$ on määritetty käyttäen kohdassa 5.2.1 esitettyä yksinkertaistettua menettelyä [13]

c) SSAB Domex Tube Double Grade.
d) SSAB Domex Tube Double Grade, kun mitoitus suoritetaan lujuusluokkaan S355 perustuen.

e) SSAB Domex Tube Double Grade.
f) SSAB Domex Tube Double Grade, kun mitoitus suoritetaan lujuusluokkaan S420 perustuen.

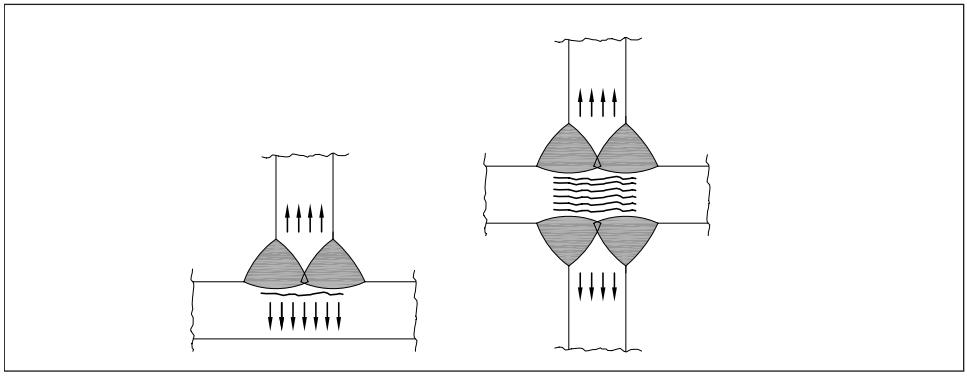
- Taulukon arvot on laskettu seinämänpaksuudella t = 12,5 mm. Ohuemmilla seinämänpaksuuksilla arvot ovat varmalla puolella.
- Taulukon arvot pätevät myös pyöreille kierresaumahitsatuille rakenneputkille (kun t = 12,5 mm), mikäli niille sovitaan iskusitkeyden testaus taulukossa esitetyn mukaisesti.
- Taulukon arvot on laskettu käyttörajatilan jännitystasolla $\sigma_{Ed} = 0{,}75\, f_y$, jolla laskettuja arvoja voidaan käyttää varmalla puolella olevana arvona myös alemmilla jännitystasoilla.

5.3 Lamellirepeily

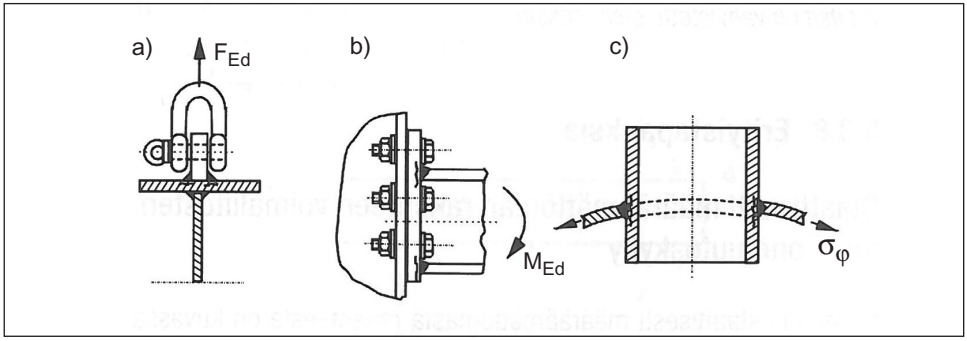
Rakenneputkista valmistettavat rakenteet sisältävät yleensä aina myös erilaisia hitsattuja levyosia (pilareiden pohjalevyt, palkkien ja ristikoiden päätylevyt jne.). Siksi lamellirepeilyä käsitellään seuraavassa yhteisesti sekä rakenneputkien että levymateriaalien kannalta.

Lamellirepeily voi tapahtua hitsatussa liitoksessa, jos levyyn kohdistuu sen pintaa vastaan kohtisuorassa suunnassa vetojännitystä (kuva 5.1). Vetojännityksen aiheuttajana voi olla:
- valmistuksessa hitsauksesta aiheutuvat kutistumisjännitykset
- liitokseen kohdistuvan ulkoisen kuormituksen aiheuttamat vetojännitykset

Lamellirepeilyalttiuteen vaikuttavat:
- materiaalin paksuussuuntaiset ominaisuudet
- liitoksen rakenne ja muotoilu
- liitosta ympäröivän rakenteen jäykkyys (hitsauskutistumisen estyminen)
- hitsauksen suoritus
- liitokseen kohdistuvan kuormituksen suunta ja suuruus (kuva 5.2)



Kuva 5.1 Lamellirepeily perusmateriaalissa hitsausliitoksen alla [8,9,10]



Kuva 5.2 Esimerkkejä liitoksista joissa lamellirepeily on vaarallista:
a) nostokorvakkeet levyn pinnassa, b) palkin tai pilarin päätylevyt ja
c) putkimaisen osan liitos levyyn tai kuoreen [14]

Materiaalin paksuussuuntaiset ominaisuudet

Kuumavalssattujen terästen sitkeys ja muodonmuutoskyky ovat huonoimmillaan levyn paksuussuunnassa. Jos teräksen muodonmuutoskyky ei ole riittävä, varsinkin lujia teräslajeja käytettäessä, saattaa hitsatussa liitoksessa esiintyä lamellirepeilyä. Lamellirepeily ilmenee hitsausliitoksen alaisina pinnansuuntaisina murtumina. Erityisen herkkiä lamellirepeilylle ovat jäykät piena- tai päittäishitsatut L- ja T-liitokset, koska niissä voi esiintyä suuria paksuussuuntaisia jännityksiä [15].

Rakenneputkista valmistettavat rakenteet sisältävät tyypillisesti putken pintaan hitsattuja liitoksia (esim. putkiristikot), jotka itsessään muodostavat siten rakenteellisesti lamellirepeilylle potentiaalisen tilanteen.

Teräksen valmistuksen yhteydessä voidaan lisäkäsittelyillä parantaa tuotteen paksuussuuntaisia ominaisuuksia. Erityisesti korkea rikkipitoisuus, vaikka se olisi tavallisissa teräksen tuotestandardeissa esitettyjen rajojen alapuolella, voi kasvattaa lamellirepeilyherkkyyttä. SSAB Domex Tube rakenneputkien rikkipitoisuus on tiukennettu arvoon $S \leq 0{,}012$ %, mikä on alle puolet standardin EN 10219 sallimasta pitoisuudesta.

Materiaalin paksuussuuntaisia ominaisuuksia ja lamellirepeilyvaaraa voidaan arvioida levyn paksuussuunnassa tehdyssä vetokokeessa mitatun murtokurouman eli Z-arvon perusteella, ks. taulukko 5.5.

Paksuussuunnassa testattuja levyjä kutsutaankin yleisesti Z-levyiksi. Standardin EN 10164 mukaisesti kyseessä on lisäominaisuus, joka voidaan määritellä käytännössä kaikille teräslajeille tilausvaiheessa edellyttäen, että ainepaksuus on $t \geq 15$ mm. Standardi EN 10164 sisältää Z-levyille kolme eri laatuluokkaa, ks. taulukko 5.6.

Koska standardi EN 10164 ei koske alle 15 mm paksuja materiaaleja, Z-vaatimusta ei tarvitse ottaa huomioon SSAB Domex Tube rakenneputkilla. Rakenneputkien seinämänpaksuuksilla $t \geq 15$ mm (eli pyöreät kierresaumahitsatut rakenneputket, kun t = 16 / 18 / 20 mm) voidaan tarvittaessa sopia paksuussuuntaisella vetokokeella suoritettava murtokurouma-arvon (Z-arvon) testaus ja luokitus Eurocoden osassa EN 1993-1-10 esitetyn mukaisesti (Z15 / Z25 / Z35). Paksuussuuntainen vetokoe suoritetaan tällöin standardin EN 10164 mukaisesti, mutta Z-luokitukseen ei sisälly standardin EN 10164 mukaista ultraäänitarkastusta.

Käytännön havaintona on todettu, että rakenneputkien osalta lamellirepeily on erittäin harvinainen ilmiö. Osaltaan asiaan vaikuttaa myös, että yleisesti lamellirepeilyriski pienenee ainepaksuuden pienetessä (ks. taulukko 5.9: tekijä Z_c). Suunnittelussa ja valmistuksessa kannattaa tietysti silti pyrkiä välttämään ratkaisuja, jotka itsessään aiheuttavat tai lisäävät lamellirepeilyriskiä.

Taulukko 5.5 Lamellirepeilyn todennäköisyys [16]

Paksuussuuntainen murtokurouma (%)	Lamellirepeilyn todennäköisyys
$Z < 10$	Mahdollinen jo lievästi levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$10 \leq Z < 15$	Mahdollinen kohtuullisesti levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$15 \leq Z < 20$	Mahdollinen voimakkaasti levyn paksuussuunnassa kuormitettavissa hitsausliitoksissa.
$20 \leq Z < 35$	Erittäin harvinainen.
$Z \geq 35$	Erittäin epätodennäköinen.

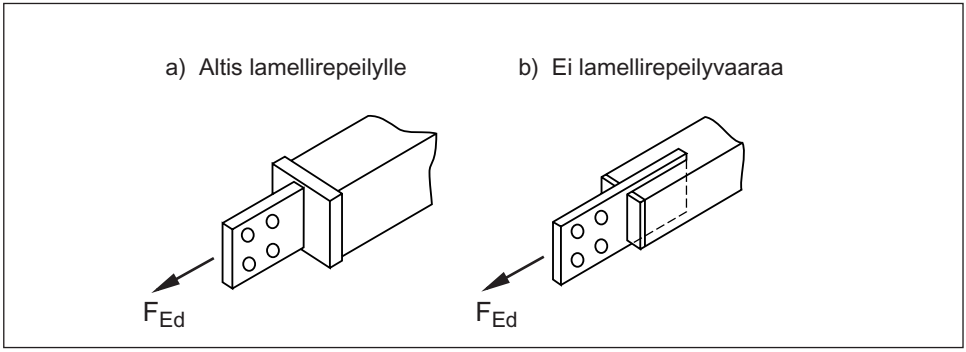
Taulukko 5.6 Z-levyjen laatuluokat [17]

EN 10164:2004 Murtokuroumaluokka	Murtokuroumavaatimukset (Z-arvo)	
	Kolmen kokeen keskiarvon vähimmäisvaatimus (%)	Yksittäisen koearvon vähimmäisvaatimus (%)
Z15	15	10
Z25	25	15
Z35	35	25

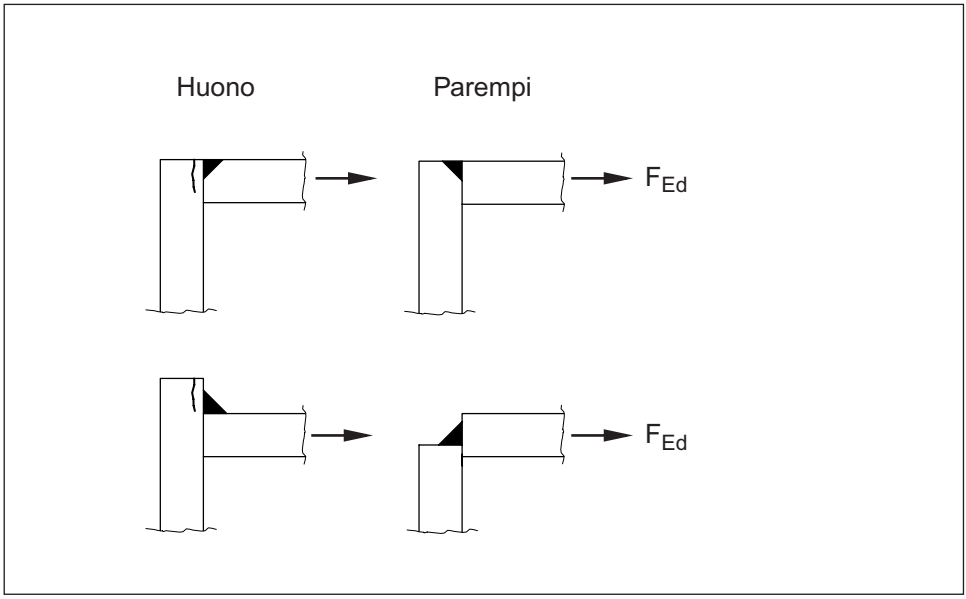
Liitoksen muotoilu ja hitsaus

Materiaaliominaisuuksien ohella lamellirepeilyriskiä voidaan pienentää muuttamalla liitoksen muotoilua ja hitsauksen suoritusta. Hitsattaessa suuremmalla energialla repeilyalttius on yleensä hieman pienempi. Syynä tähän ovat parempi tunkeuma ja leveämpi hitsi, jotka johtavat muodonmuutokset laajemmalle alueelle levyn paksuussuunnassa [15].

Liitosten perusrakenne kannattaa konstruoida siten, että ulkoinen kuormitus ei aiheuta kohtisuoraa vetoa levyn pintaan, esimerkki kuvassa 5.3. Myös liitosten detaljisuunnittelulla voidaan pienentää lamellirepeilyriskiä, esimerkkejä kuvassa 5.4.



Kuva 5.3 Jatkosliitoksen lamellirepeilyvaaran pienentäminen



Kuva 5.4 Hitausliitosten lamellirepeilyvaaran pienentäminen levyrakenteiden nurkkaliitoksissa (ei koske rakenneputkien 'nurkkaliitoksia') [14]

Hitauksesta aiheutuvia kutistumisjännityksiä voidaan pienentää rakenneosan liitosten hitausjärjestyksellä sekä yksittäisten liitosten muotoilulla ja hitauksen suoritustavalla. Yksittäisen liitoksen osalta kutistumisjännityksiä voidaan vähentää mm. seuraavasti [18,19]:

- pienentämällä tarvittavaa hitsiainemäärää
- hitsaamalla mahdollisimman vähän palkoja
- käyttämällä railopinnan välikerroshitsausta
- käyttämällä symmetristä hitsausjärjestystä kaksipuoleisissa railoissa

Hitauksen kutistumisjännityksistä aiheutuva lamellirepeily voidaan havaita hitauksen jälkeisellä NDT-tarkastuksella, ks. luku 8.

5.4 Lamellirepeilyn estäminen Eurocoden mukaisesti

Ohjeet lamellirepeilyn estämiselle on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-10. Siinä ilmoitetaan, että sen lamellirepeilyä koskevia ohjeita sovelletaan kuitenkin vain lujuusluokille S235-S460. Syynä tälle on ilmeisesti se, että osaa EN 1993-1-10 laadittaessa Z-laatuluokituksen sisältävä viitestandardi EN 10164:1993 oli voimassa vain lujuusluokkaan S500 asti. Koska standardin EN 10164 uusi revisio EN 10164:2004 on voimassa lujuusluokkaan S960 asti, ja koska Eurocoden osan EN 1993-1-12 myötä myös lujuusluokat S500-S700 on saatettu Eurocoden piiriin, on tarkoituksenmukaista soveltaa osan EN 1993-1-10 lamellirepeilyohjeita myös lujuusluokkien S500-S700 teräksille.

Käytettävä teräsmateriaali luokitellaan taulukossa 5.7 esitetyn mukaisesti. Taulukon 5.7 mukainen vaadittava luokka voidaan valita kansallisessa liitteessä. Eurocode suosittelee luokkaa 1 [8,9,10].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-10 [11]:
Käytetään luokkaa 1.

Lamellirepeilyvaara estetään taulukon 5.7 mukaisesta luokasta riippuen joko:

- vaatimalla materiaalilta riittävä standardin EN 10164 mukainen Z-arvo (Z15, Z25 tai Z35) tai
- käyttämällä rakenteen valmistuksen jälkeistä tarkastusta sen toteamiseksi onko lamellirepeilyä esiintynyt.

Eurocoden ajatuksena tässä siis on, että (a) käytetään joko Z-terästä tai (b) käytetään rakenteen valmistuksen (hitsauksen) jälkeista tarkastusta sen tarkistamiseksi onko lamellirepeilyä esiintynyt.

Z-arvo voidaan kuitenkin määrittää EN 10164 mukaisesti vain teräksille, joiden ainepaksuus on $t \geq 15$ mm, joten Z-vaatimusta ei tarvitse ottaa huomioon SSAB Domex Tube rakenneputkilla. Rakenneputkien seinämänpaksuuksilla $t \geq 15$ mm (eli pyöreät kierresaumahitsatut rakenneputket, kun t = 16 / 18 / 20 mm) voidaan tarvittaessa sopia paksuussuuntaisella vetokokeella suoritettava murtokurouma-arvon (Z-arvon) testaus ja luokitus Eurocoden osassa EN 1993-1-10 esitetyn mukaisesti (Z15 / Z25 / Z35). Paksuussuuntainen vetokoe suoritetaan tällöin standardin EN 10164 mukaisesti, mutta Z-luokitukseen ei sisälly standardin EN 10164 mukaista ultraäänitarkastusta.

Taulukko 5.7 Laatuluokan valinta [8,9,10]

EN 1993-1-10: Luokka	Ohjeiden soveltaminen
1	Kaikki eurooppalaisten standardien mukaiset terästuotteet ja paksuudet kaikissa sovellutuksissa.
2	Tietyt terästuotteet ja paksuudet, jotka esitetään eurooppalaisissa standardeissa ja / tai tietyt luetellut sovellutukset.

Lamellirepeily voidaan jättää huomioon ottamatta, jos seuraava ehto toteutuu [8,9,10]:

$$Z_{Ed} \leq Z_{Rd} \qquad (5.11)$$

missä Z_{Ed} on Z-vaatimuksen mitoitusarvo, joka riippuu hitsauksen aikaisesta metallin estetystä kutistumisesta johtuvien venymien suuruudesta

Z_{Rd} on standardin EN 10164 mukaan materiaalille käytettävissä oleva Z-arvon mitoitusarvo (Z15, Z25, tai Z35)

Z_{Ed}:n mitoitusarvo voidaan määrittää kaavasta [8,9,10]:

$$Z_{Ed} = Z_a + Z_b + Z_c + Z_d + Z_e \qquad (5.12)$$

missä Z_a , Z_b , Z_c , Z_d ja Z_e määritetään taulukosta 5.9.

Ehtoa (5.11) on Eurocoden osassa EN 1993-1-1 lievennetty talonrakenteiden osalta siten, että rakennuksille suositellaan taulukon 5.8 mukaista Z-arvon valintaa. Lopullinen valinta voidaan määrittää kansallisessa liitteessä [4,5,6].

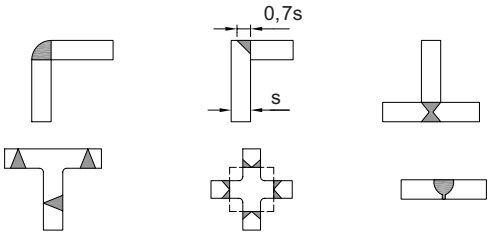
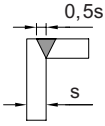
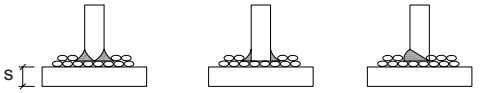
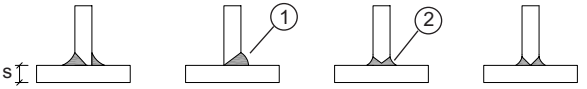
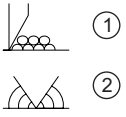
Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [7]:

Rakennuksille käytetään Eurocodessa suositeltuja taulukon 5.8 mukaisia arvoja.

Taulukko 5.8 Standardin EN 10164 mukaisen laatuluokan valinta rakennuksille [4,5,6]

Lausekkeen (5.12) mukainen Z_{Ed}:n mitoitusarvo	Z_{Rd}:n vaadittu mitoitusarvo ilmaistuna standardin EN 10164 mukaisen Z-arvon avulla
$Z_{Ed} \leq 10$	–
$10 < Z_{Ed} \leq 20$	Z 15
$20 < Z_{Ed} \leq 30$	Z 25
$Z_{Ed} > 30$	Z 35

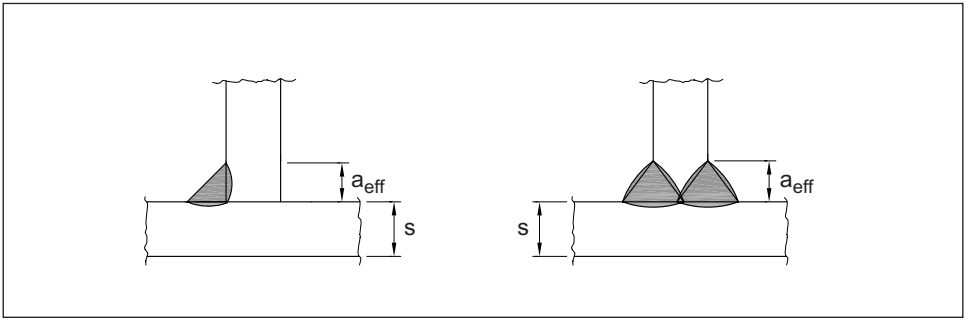
Taulukko 5.9 Z_{Ed}:n määrittämiseen tarvittavat tekijät [8,9,10]

a)	Hitsin korkeus, jota käytetään metallin kutistumisesta aiheutuvan venymän arviointiin.	Hitsin tehollinen korkeus a_{eff} (ks. kuva 5.5)	Pienahitsin a-mitta	Z_i
		$a_{eff} \leq$ 7 mm	a = 5 mm	Z_a = 0
		7 < $a_{eff} \leq$ 10 mm	a = 7 mm	Z_a = 3
		10 < $a_{eff} \leq$ 20 mm	a = 14 mm	Z_a = 6
		20 < $a_{eff} \leq$ 30 mm	a = 21 mm	Z_a = 9
		30 < $a_{eff} \leq$ 40 mm	a = 28 mm	Z_a = 12
		40 < $a_{eff} \leq$ 50 mm	a = 35 mm	Z_a = 15
		50 < a_{eff}	a > 35 mm	Z_a = 15
b)	Hitsin muoto ja sijainti T-, risti- ja nurkkaliitoksissa.			Z_b = -25
		Nurkkaliitokset 		Z_b = -10
		Yksipalkopienahitsit Z_a = 0 tai pienahitsit joille Z_a > 1 välikerros-hitsausta ja alhaisen lujuuden omaavaa lisäainetta käytettäessä 		Z_b = -5
		Monipalkopienahitsit		Z_b = 0
		Osittain läpihitsatut ja läpihitsatut hitsit  Tarkoituksenmukaisella hitsausjärjestyksellä pienennetään kutistumisen vaikutuksia 		Z_b = 3
		Osittain läpihitsatut ja läpihitsatut hitsit		Z_b = 5
		Nurkkaliitokset		Z_b = 8

(*jatkuu)*

Taulukko 5.9 Z_{Ed}:n määrittämiseen tarvittavat tekijät [8,9,10]
(jatkuu)

c)	Ainepaksuuden s vaikutus kutistumista vastaavaan kiinnitysasteeseen.	s ≤ 10 mm		Z_c = 2 *
		10 < s ≤ 20 mm		Z_c = 4 *
		20 < s ≤ 30 mm		Z_c = 6 *
		30 < s ≤ 40 mm		Z_c = 8 *
		40 < s ≤ 50 mm		Z_c = 10 *
		50 < s ≤ 60 mm		Z_c = 12 *
		60 < s ≤ 70 mm		Z_c = 15 *
		70 < s		Z_c = 15 *
d)	Hitsiä ympäröivien osien kiinnitysaste, joka vaikuttaa hitsin kutistumismahdollisuuteen.	Pieni kiinnitysaste:	Vapaa kutistuminen mahdollinen (esim. T-liitokset)	Z_d = 0
		Keskimääräinen kiinnitysaste:	Vapaa kutistuminen rajoitettua (esim. koteloprofiilien poikittaisjäykisteet)	Z_d = 3
		Korkea kiinnitysaste:	Vapaa kutistuminen ei mahdollista (esim. ortotrooppisten kansilevyjen jäykisteet	Z_d = 5
e)	Esikuumennuksen vaikutus.	Ei esikuumennusta		Z_e = 0
		Esikuumennus ≥ 100 °C		Z_e = -8
* Voidaan pienentää 50 %:lla kohdissa, joihin kohdistuu pääasiassa staattisista kuormista aiheutuva levyn paksuussuuntainen puristusjännitys.				



Kuva 5.5 Hitsin tehollinen korkeus a_{eff} kutistumiselle [8,9,10]

5.5 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1991-1-5:2004. (EN 1991-1-5:2003)
Eurocode 1. Rakenteiden kuormat.
Osa 1-5: Yleiset kuormat. Lämpötilakuormat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 69 s.

[2] SFS-EN 1991-1-5: AC:2009. (EN 1991-1-5: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1991-1-5.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 6 s.

[3] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-5.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 4 s.

[4] SFS-EN 1993-1-1:2005. (EN 1993-1-1:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 100 s.

[5] SFS-EN 1993-1-1:2005+AC:2006. (EN 1993-1-1:2005+AC:2006)
Sisältää myös korjaukset AC:2006.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.

[6] SFS-EN 1993-1-1: AC:2009. (EN 1993-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 16 s.

[7] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-1.
15.10.2007 sekä korjaus 14.2.2008. Ympäristöministeriö. 7 s.

[8] SFS-EN 1993-1-10:2005. (EN 1993-1-10:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-10: Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 18 s.

[9] SFS-EN 1993-1-10:2005+AC:2005. (EN 1993-1-10:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 19 s.

[10] SFS-EN 1993-1-10: AC:2009. (EN 1993-1-10: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-10.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 5 s.

[11] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-10.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 2 s.

[12] JRC Scientific and Technical Reports:
Commentary and worked examples to EN 1993-1-10
“Material toughness and through thickness properties”.
Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. First Edition September 2008.
EUR 23510 EN - 2008. 247 s.

[13] JRC Scientific and Technical Reports:
Choice of steel material to avoid brittle fracture for hollow section structures, addition to EN 1993-1-10.
Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. First Edition, December 2010.
EUR xxxxx EN - 2010. 177 s.
Julkaistavaksi toimitettu dokumentti (19.9.2011).

[14] Niemi E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Tekninen tiedotus 2/2003.
Teknologiateollisuus ry. Teknologiainfo Teknova Oy. 136 s.
Huom: Eurocoden osien EN 1993-1-5, EN 1993-1-8, EN 1993-1-9 ja EN 1993-1-10 osalta teos perustuu kirjoitushetken työversioihin prEN 1993-1-5:2002, prEN 1993-1-8:2002, prEN 1993-1-9:2002 ja prEN 1993-1-10:2002, mistä johtuen osa julkaisun mitoitusohjeista saattaa poiketa kyseisten Eurocoden osien lopullisista julkaistuista ohjeista.

[15] Hitsaajan opas. 2003. Rautaruukki Steel. 112 s.

[16] Kuumavalssatut teräslevyt ja -kelat. Rakenneteräkset.
Z-levyt. Ohjelehti HR 2.1.80 (revisio 03.2007).
Rautaruukki Oyj. [www.ruukki.com] (13.4.2012)

[17] SFS-EN 10164:2005. (EN 10164:2004)
Terästuotteet parannetuin paksuussuuntaisin murtokuroumaominaisuuksin.
Tekniset toimitusehdot. Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 25 s.

[18] SFS-EN 1011-2:2001. (EN 1011-2:2001)
Hitsaus. Metallisten materiaalien hitsaussuositukset.
Osa 2: Ferriittisten terästen kaarihitsaus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 114 s.

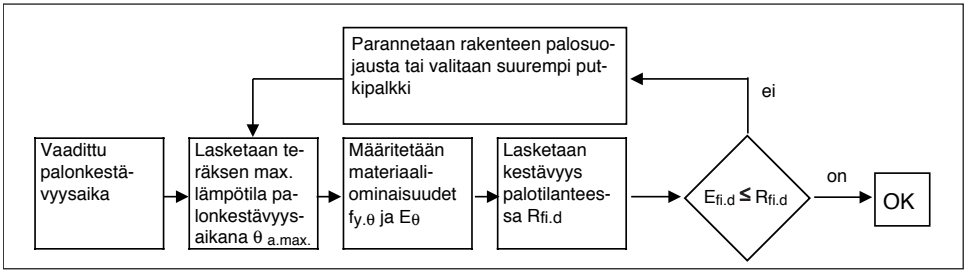
[19] SFS-EN 1011-2: A1:2003. (EN 1011-2: A1:2003)
Muutososa A1:2003 standardiin EN 1011-2.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 5 s.

6. RAKENNEPUTKEN PALOMITOITUS

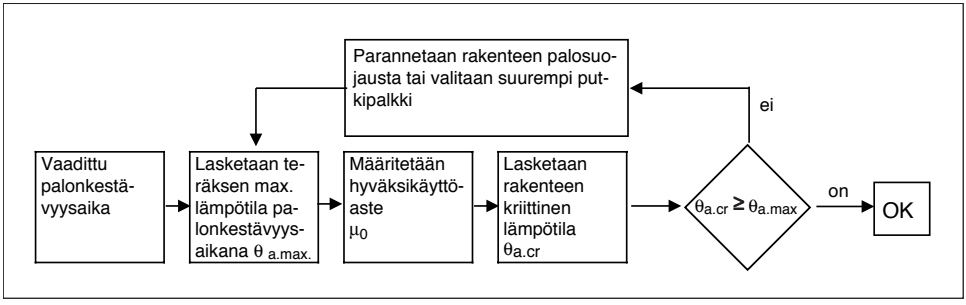
Palotilanteessa teräksen lämpötila nousee palotilan savukaasujen lämpötilan mukana. Teräksen lämpötilan noustessa sen lujuus ja muodonmuutosominaisuudet muuttuvat. Rakenteelle asetetaan sen käyttötarkoituksen mukaan erilaisia palonkestävyysvaatimuksia (esim. kantokyky- ja osastoivuusvaatimuksia).

Teräsosat joudutaan usein suojaamaan palonaikaisen lämpötilan nousun hidastamiseksi. Rakenneputken palosuojaus voidaan toteuttaa monella tavalla esim. mineraalivillalla tai palosuojamaalilla. Rakenneputken lämmönsitomiskykyä voidaan parantaa esim. täyttämällä rakenneputki betonilla. Rakenneputket ovat palosuojauksen kannalta edullisia, koska niiden poikkileikkaustekijä (palolle alttiin pinta-alan suhde tilavuuteen) on pienempi kuin avoprofiileilla. Lisäksi pyöreänurkkainen rakenneputki on erittäin sopiva palosuojamaalaukseen. Palosuojausmenetelmiä on selostettu kohdassa 6.8.

Rakenneputken kestävyys voidaan laskea palotilanteessa kahdella tavalla: Palotilanteen materiaaliominaisuuksien (myötölujuus ja kimmokerroin) mukaan tai laskemalla teräsrakenteen kriittinen lämpötila hyväksikäyttöasteen funktiona. Teräsosan epätasainen lämpötilajakauma voidaan ottaa huomioon, kun palomitoitus suoritetaan palotilanteen materiaaliominaisuuksien mukaan. Kriittisen lämpötilan avulla mitoitettaessa teräsosan lämpötilajakauma oletetaan tasaiseksi. Näitä menetelmiä on havainnollistettu kuvissa 6.1 ja 6.2.



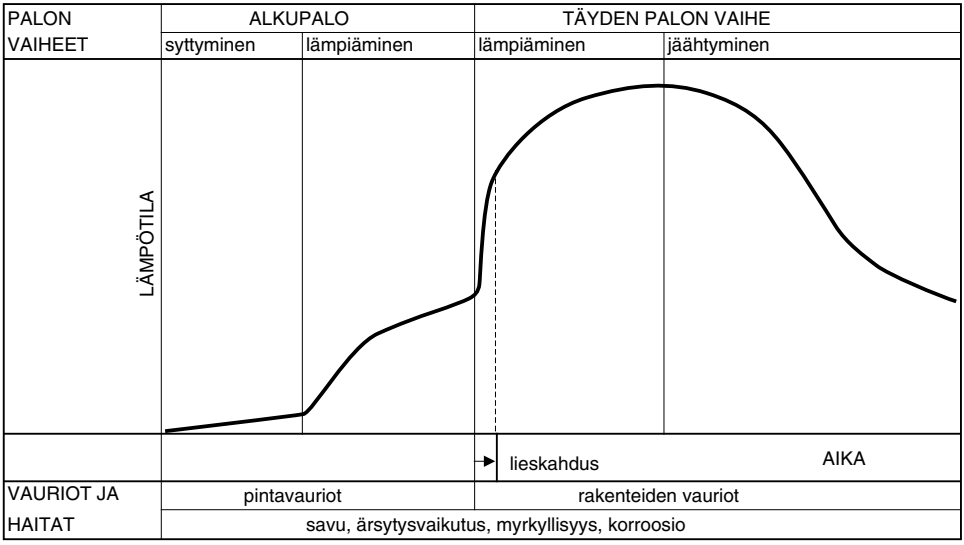
Kuva 6.1 Palomitoitus materiaaliominaisuuksien mukaan



Kuva 6.2 Palomitoitus kriittisen lämpötilan mukaan

6.1 Palotilan lämmönkehitys

Todellisen tulipalon lämpötilan muuttuminen voidaan esittää kuvan 6.3 mukaisesti, kun tulipalo saa kehittyä vapaasti. Palon vaiheiden pituudet eivät ole oikeassa suhteessa toisiinsa nähden, vaan ne voivat vaihdella huomattavasti. Palotilan palavat materiaalit syttyvät palamaan lieskahdusvaiheessa, kun palotilan lämpötila on n. 350 - 550 ºC. Täyden palon aikana palotilan lämpötila voi olla yli 1000 ºC [1].



Kuva 6.3 Todellisen palon vaiheet ja palotilan lämpötilan muuttuminen [2,3]

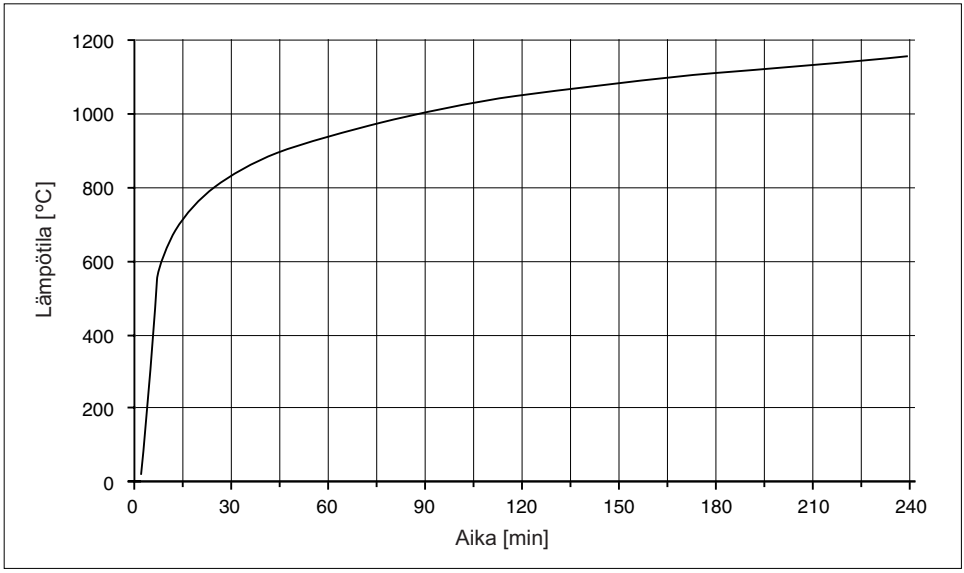
Palotilan lämmönkehitystä palomitoituksessa voidaan kuvata joko nimellisillä lämpötila-aikakäyrillä (esim. standardipalo) jotka on määritelty tietylle ajanjaksolle, tai parametrisilla lämpötila-
aikakäyrillä, jotka ottavat huomioon mm. palokuorman suuruuden, palo-osaston koon ja tuuletusaukkojen määrän [6,7].

6.1.1 Standardipalo

Kuvassa 6.4 on esitetty yleisesti käytetty standardi lämpötila-aikakäyrä. Siinä lämpötila muuttuu ISO 834 -standardin mukaisesti seuraavasti [6,7]:

$$\theta_g = 20 + 345\log(8t + 1) \qquad (6.1)$$

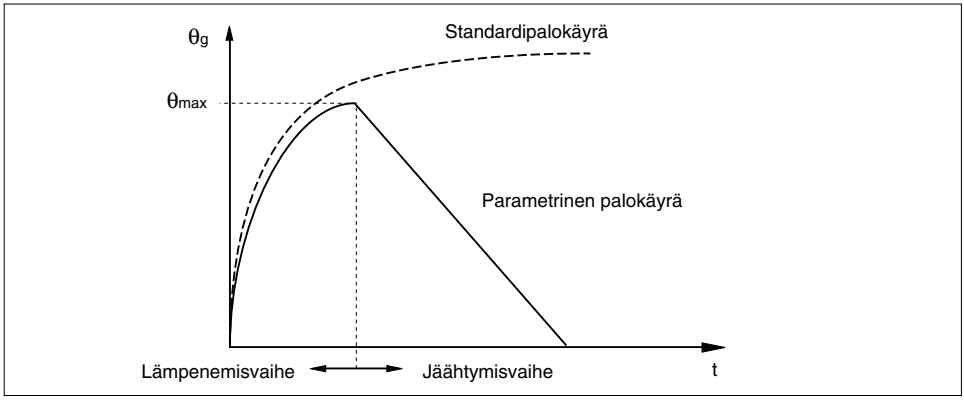
missä θ_g on kaasun lämpötila palotilassa [ºC]
t on aika [min]



Kuva 6.4 ISO 834 -standardin mukainen lämpötila-aikakäyrä

6.1.2 Parametrinen palomalli

Suomen kansallisen liitteen mukaan parametrista palomallia voidaan käyttää Eurocoden osassa EN 1991-1-2 esitetyllä tavalla [8]. Se soveltuu korkeintaan 500 m^2 kokoisiin palo-osastoihin, joiden katossa ei ole aukkoja ja joiden korkeus ei ole yli 4 m [6,7]. Parametriseen lämpötila-aikakäyrään vaikuttavat ajan lisäksi palokuorma, palonaikaiset aukot ja ympäröivien rakenteiden termiset ominaisuudet (esim. seinien lämmönjohtavuus) [2,3]. Myös jäähtymisvaiheen lämpötilan aleneminen otetaan huomioon, jos vaadittu palonkestoaika on laskennallista palamisaikaa pitempi. Standardipalokäyrän ja parametrisen palokäyrän välinen ero on esitetty kuvassa 6.5.



Kuva 6.5 Standardipalon ja parametrisen palon lämpötila-aikakäyrä

6.2 Teräksen lujuus ja kimmokerroin palotilanteessa

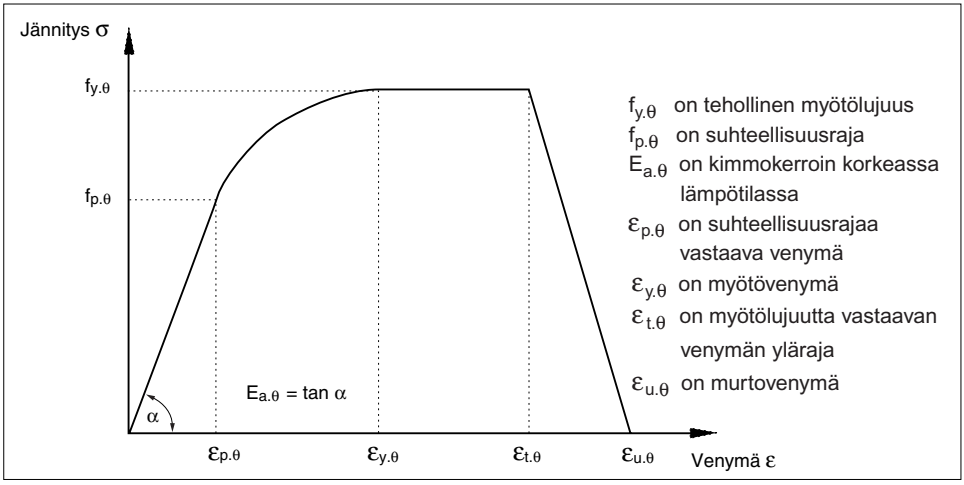
Teräksen lujuus ja kimmokerroin pienenevät, kun lämpötila nousee. Lisäksi teräksen koko poikkileikkaus kuumenee palon aikana. Tavallisesti teräsrakenteet on suojattava tulipaloa vastaan tai on osoitettava laskennallisesti, että rakenteet kestävät vaaditun ajan suojaamatta.

Kylmämuovattujen rakenneputkien materiaalio minaisuuksien muutoksille palotilanteessa käytetään tässä esitettyjä materiaalimalleja ja sääntöjä, jotka ovat samat kuin vastaavilla levyteräksilläkin.

Teräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa on esitetty kuvassa 6.6. Teräksen lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksien muuttumista lämpötilan kasvaessa kuvataan seuraavilla pienennystekijöillä [9,10,11]:

- tehollinen myötölujuus suhteessa myötölujuuteen 20 ºC lämpötilassa: $k_{y.\theta} = f_{y.\theta} / f_y$
- suhteellisuusraja suhteessa myötölujuuteen 20 ºC lämpötilassa:
  - poikkileikkausluokat 1-3: $k_{p.\theta} = f_{p.\theta} / f_y$
  - poikkileikkausluokka 4: $k_{p0,2.\theta} = f_{p0,2.\theta} / f_y$
- kimmokerroin suhteessa kimmokertoimeen 20 ºC lämpötilassa: $k_{E.\theta} = E_{a.\theta} / E_a$

Pienennystekijän $k_{E.\theta}$ avulla saadaan palonaikainen kimmokerroin. Pienennystekijän $k_{p.\theta}$ avulla saadaan määriteltyä suhteellisuusraja. Suhteellisuusrajaa suuremmilla jännityksen arvoilla teräkseen jää tietyn suuruinen pysyvä venymä. Suhteellisuusrajaan perustuvalle lujuuden pienennystekijälle käytetään poikkileikkausluokassa 4 erisuuruista arvoa kuin poikkileikkausluokissa 1-3, ks. taulukko 6.1. Tehollinen myötölujuus saadaan pienennystekijän $k_{y.\theta}$ avulla. Tehollinen myötölujuus vastaa muodonmuutosta $\varepsilon_{y.\theta} = 0{,}02$. Palomitoituksessa sauvan kestävyydet lasketaan poikkileikkausluokissa 1-3 pienennystekijällä $k_{y.\theta}$ ja poikkileikkausluokassa 4 pienennystekijällä $k_{p0,2.\theta}$ sen pienemmästä muodonmuutoskyvystä johtuen (ks. tarkemmin kohta 6.6.3).

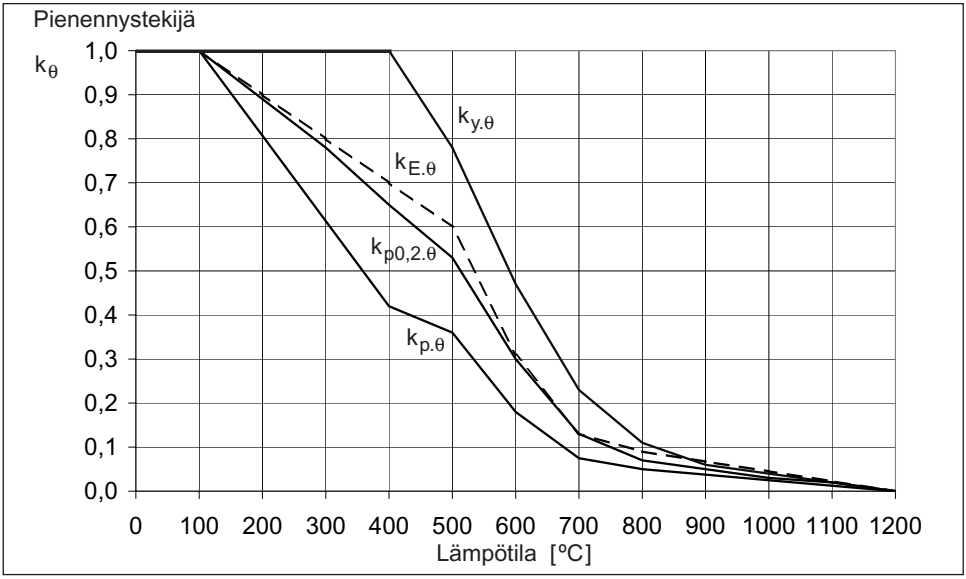


Kuva 6.6 Hiiliteräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa [9,10,11]

Lämpötilan vaikutus pienennystekijöihin on esitetty taulukossa 6.1 ja kuvassa 6.7. Lämpötilojen väliarvot voidaan interpoloida lineaarisesti. Kuvasta 6.7 nähdään, että teräksen tehollinen myötölujuus pienenee, kun lämpötila ylittää 400 ºC. Sen sijaan teräksen kimmokerroin pienenee jo siinä vaiheessa, kun lämpötila ylittää 100 ºC.

Taulukko 6.1 Lämpötilan vaikutus hiiliteräksen lujuuteen ja kimmokertoimeen [9,10,11]

Teräksen lämpötila	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 ºC lämpötilaa vastaaviin arvoihin			
	Tehollisen myötölujuuden pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y)	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y)		Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a)
		PL-luokat 1-3	PL-luokka 4	
θ_a	$k_{y.\theta} = f_{y.\theta} / f_y$	$k_{p.\theta} = f_{p.\theta} / f_y$	$k_{p0,2.\theta} = f_{p0,2.\theta} / f_y$	$k_{E.\theta} = E_{y.\theta} / E_a$
20 ºC	1,000	1,000	1,00	1,000
100 ºC	1,000	1,000	1,00	1,000
200 ºC	1,000	0,807	0,89	0,900
300 ºC	1,000	0,613	0,78	0,800
400 ºC	1,000	0,420	0,65	0,700
500 ºC	0,780	0,360	0,53	0,600
600 ºC	0,470	0,180	0,30	0,310
700 ºC	0,230	0,075	0,13	0,130
800 ºC	0,110	0,050	0,07	0,090
900 ºC	0,060	0,0375	0,05	0,0675
1000 ºC	0,040	0,0250	0,03	0,0450
1100 ºC	0,020	0,0125	0,02	0,0225
1200 ºC	0,000	0,0000	0,00	0,0000
Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarista interpolointia käyttäen.				



Kuva 6.7 Hiiliteräksen lujuuden ja kimmokertoimen pienennystekijät lämpötilan funktiona

6.3 Teräksen lämpötilan kehittyminen

Palon aikana lämpö voi siirtyä palotilasta teräsrakenteeseen säteilemällä, johtumalla tai kuljettumalla. Lämpötilannousuun vaikuttavat mm. palotilan lämpötilankehitys, teräsosan poikkileikkaustekijä (ks. kohta 6.3.4) ja palosuojaus [2,3]. Myös poikkileikkauksen muoto vaikuttaa oleellisesti poikkileikkauksen lämmönkehitykseen. Teräsrakenteiden palomitoitus Eurocoden osassa EN 1993-1-2 perustuu ns. yksinkertaisiin laskentamalleihin, jolloin mm. lämpötilan oletetaan olevan tasan jakautunut koko poikkileikkauksessa. Eurocoden mukaan on myös sallittua käyttää kehittyneempiä laskentamalleja, niiden käytöstä kuitenkin päätetään kansallisessa liitteessä [9,10,11].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-2 [12]:

Kehittyneitä laskentamalleja voidaan käyttää.
Yksityiskohtaisia ohjeita ei esitetä.

6.3.1 Suojaamaton sisällä oleva teräsrakenne

Suojaamattoman teräsrakenteen lämpötilan muutos lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\Delta\theta_{a.t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m / V}{c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net.d} \cdot \Delta t \qquad (6.2)$$

missä
- k_{sh} on varjostusvaikutuksen korjaustekijä
- A_m / V on suojaamattoman terässauvan poikkileikkaustekijä [1/m], vähintään 10 m^{-1}
- A_m on sauvan palolle alttiin vaipan pinta-ala pituusyksikköä kohti [m^2/m]
- V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m^3/m]
- c_a on teräksen ominaislämpökapasiteetti [J / (kgK)]
- $\dot{h}_{net.d}$ on sauvan palolle alttiin vaipan pinta-alaa kohti laskettu nettolämpövuon mitoitusarvo [W/m^2]
- Δt on aikaväli [sekuntia], enintään 5 sekuntia
- ρ_a on teräksen tiheys, ρ_a = 7850 kg/m^3

Poikkileikkauksilla, joiden muoto on kupera (kuten suorakaiteen muotoinen tai pyöreä rakenneputki) ja joihin palo pääsee kohdistumaan joka puolelta, varjostusvaikutuksella ei ole merkitystä ja varjostustekijän arvoksi voidaan valita k_{sh} = 1,0 [9,10,11].

Nettolämpövuon mitoitusarvo lasketaan seuraavasti [6,7]:

$$\dot{h}_{net.d} = \dot{h}_{net.c} + \dot{h}_{net.r} \qquad (6.3)$$

missä
- $\dot{h}_{net.c}$ on kuljettumalla tapahtuva nettolämpövuo [W/m^2]
- $\dot{h}_{net.r}$ on säteilemällä tapahtuva nettolämpövuo [W/m^2]

Kuljettumalla tapahtuva nettolämpövuo [6,7]:

$$\dot{h}_{net.c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) \qquad (6.4)$$

missä α_c on kuljettumisen lämmönsiirtymiskerroin [W / (m^{2}K)],
α_c = 25 W / (m^{2}K) standardipalossa
θ_g on palotilan kaasun lämpötila rakenneosan ympärillä [ºC]
θ_m on rakenneosan pintalämpötila [ºC]

Säteilemällä tapahtuva nettolämpövuo [6,7]:

$$\dot{h}_{net.r} = \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \qquad (6.5)$$

missä Φ on näkyvyyskerroin, Φ = 1,0
ε_m on rakenneosan pinnan säteilykerroin,
hiiliteräkselle ε_m = 0,7 [9,10,11]
ε_f on palon säteilykerroin, ε_f = 1,0 [9,10,11]
σ on Stefan-Boltzmannin vakio, σ = 5,67·10^{-8} W/(m^{2}K^4)
θ_r on paloympäristön tehollinen säteilylämpötila [ºC]
θ_m on rakenneosan pintalämpötila [ºC]

Teräksen ominaislämpökapasiteetin arvoksi voidaan ottaa c_a = 600 J/(kgK), tai se voidaan laskea tarkemmin seuraavasti [9,10,11]:

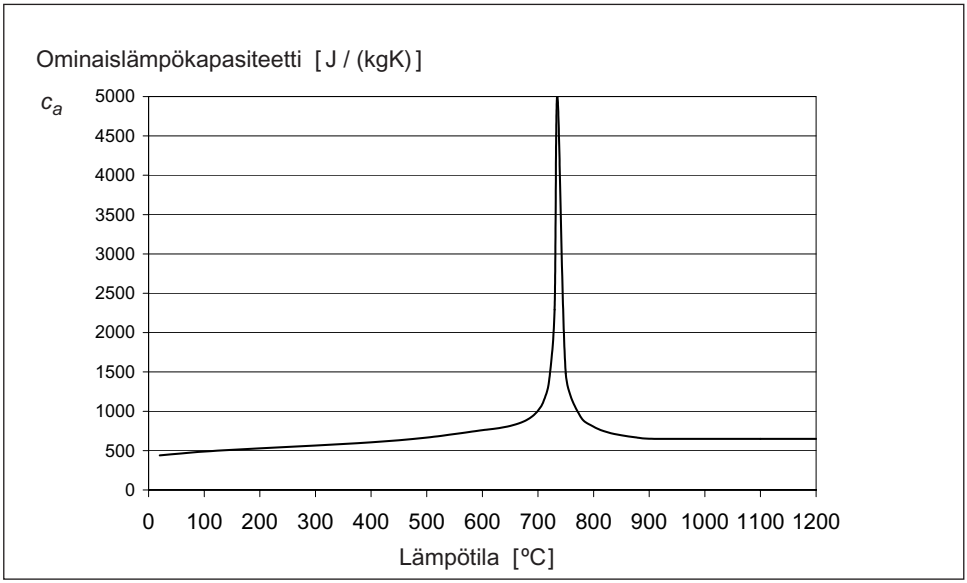
$$c_a = 425 + 7{,}73 \cdot 10^{-1} \cdot \theta_a - 1{,}69 \cdot 10^{-3} \cdot \theta_a^2 + 2{,}22 \cdot 10^{-6} \cdot \theta_a^3 \qquad (6.6a)$$
$$kun \;\; 20°C \le \theta_a < 600°C$$

$$c_a = 666 + \frac{13002}{738 - \theta_a} \qquad kun\ 600\,°C \le \theta_a < 735\,°C \qquad (6.6b)$$

$$c_a = 545 + \frac{17820}{\theta_a - 731} \qquad kun\ 735\,°C \le \theta_a < 900\,°C \qquad (6.6c)$$

$$c_a = 650\ J/(kgK) \qquad kun\ 900°C \le \theta_a \le 1200°C \qquad (6.6d)$$

missä θ_a on teräksen lämpötila [ºC].



Kuva 6.8 Hiiliteräksen ominaislämpökapasiteetti (750 ºC kohdalla oleva piikki aiheutuu hiiliteräksessä tapahtuvista faasimuutoksista)

6.3.2 Palosuojattu sisällä oleva teräsrakenne

Käytettävien palosuojamateriaalien ominaisuudet ja toimivuus arvioidaan esistandardien ENV 13381-1, ENV 13381-2 tai ENV 13381-4 koemenetelmien mukaisesti. Standardit sisältävät vaatimuksen, että palosuojamateriaalin tulee pysyä yhtenäisenä koossa ja kiinni suojattavassa rakenneosassa koko kyseeseen tulevan paloaltistuksen ajan [9,10,11]:

Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilan muutos lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\Delta\theta_{a.t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\theta_{g.t} - \theta_{a.t}}{1 + \phi/3} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g.t} \quad \textit{mutta } \Delta\theta_{a.t} \geq 0 \textit{ jos } \Delta\theta_{g.t} > 0 \quad (6.7)$$

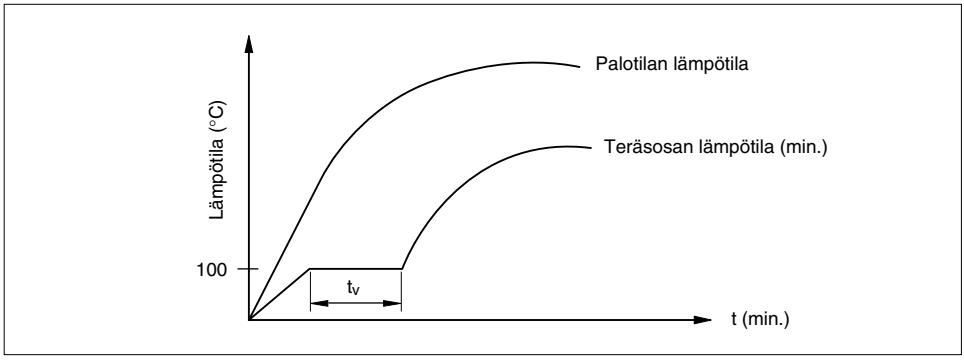
$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} \quad (6.8)$$

missä
- A_p/V on palosuojamateriaalilla eristetyn terässauvan poikkileikkaustekijä
- A_p on palosuojamateriaalilla suojatun pinnan pinta-ala sauvan pituusyksikköä kohti [m^2/m]
- V on sauvan tilavuus pituusyksikköä kohti [m^3/m]
- c_a on lämpötilasta riippuva teräksen ominaislämpökapasiteetti [J / (kgK)]
- c_p on palosuojamateriaalin lämpötilasta riippumaton ominaislämpökapasiteetti [J / (kgK)]

d_p on palosuojamateriaalin paksuus [m]
Δt on aikaväli [sekuntia], enintään 30 sekuntia
$\theta_{a.t}$ on teräksen lämpötila [ºC] ajan hetkellä t
$\theta_{g.t}$ on palotilan lämpötila [ºC] ajan hetkellä t
$\Delta\theta_{g.t}$ on palotilan lämpötilan nousu [K] ajanjakson Δt aikana
λ_p on palosuojausjärjestelmän lämmönjohtavuus [W / (mK)]
ρ_a on teräksen tiheys, ρ_a = 7850 kg/m^3
ρ_p on palosuojamateriaalin tiheys [kg/m^3]

Palosuojamateriaalin pinta-alaksi A_p valitaan yleensä sen sisäpinnan pinta-ala, mutta kotelomaisissa suojauksissa joissa on vapaata tilaa terässauvan ympärillä, voidaan käyttää samaa arvoa kuin kotelomaisessa suojauksessa, jossa terässauvan ympärillä ei ole vapaata tilaa, ks. taulukko 6.2 [9,10,11].

Palosuoja-aineessa oleva kosteus hidastaa teräksen lämpiämistä, kunnes kosteus on haihtunut. Viiveaikana teräksen lämpötilan voidaan otaksua pysyvän 100 ºC:ssa, koska palosuoja-aineessa oleva kosteus poistuu palon vastakkaisen pinnan kautta [2,3]. Viiveaika määritetään esistandardin ENV 13381-4 mukaisella menetelmällä [9,10,11].



Kuva 6.9 Periaatekuva palosuoja-aineen kosteuspitoisuuden vaikutuksesta teräksen lämpötilankehitykseen

6.3.3 Liitokset

Liitoksen lämpötila voidaan arvioida käyttämällä liitoksen muodostavan osan paikallista poikkileikkaustekijän A/V -arvoa. Yksinkertaistuksena voidaan olettaa tasan jakautunut lämpötila kiinnityksessä. Lämpötila voidaan laskea käyttämällä liitettävien rakenneosien suurinta A/V-arvoa kiinnityksen läheisyydessä [9,10,11].

Palkki-pilari- ja palkki-palkkiliitoksissa, joissa mikä tahansa betonista tehty lattia tukeutuu palkkeihin, liitoksen lämpötilana voidaan käyttää arvoa, joka lasketaan palkin alalaipalle jänteen keskellä [9,10,11].

Liitoksen komponenttien lämpötila voidaan laskea seuraavasti [9,10,11]:

- kun palkin korkeus on $D \leq 400$ mm:

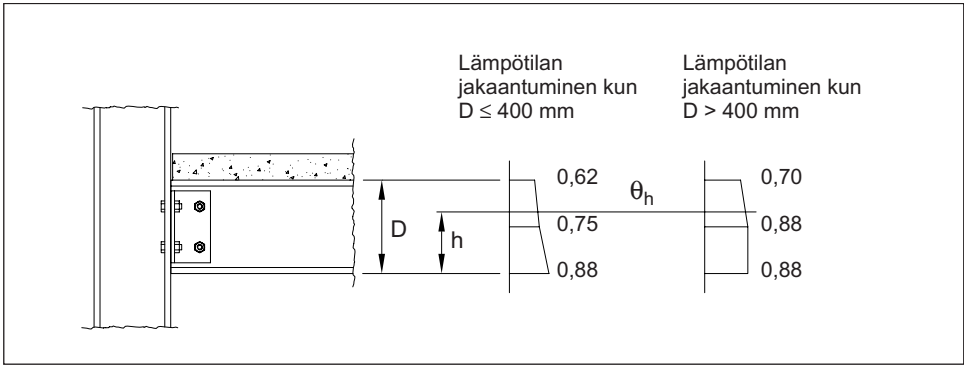
$$\theta_h = 0,88\,\theta_0\,[1 - 0,3\,(h/D)] \qquad (6.9a)$$

- kun palkin korkeus on $D > 400$ mm:

$$\theta_h = 0,88\,\theta_0 \qquad kun\ \ h \leq D/2 \qquad (6.9b)$$

$$\theta_h = 0,88\,\theta_0\,[1 + 0,2\,(1 - 2h/D)] \qquad kun\ \ h > D/2 \qquad (6.9c)$$

missä
- θ_h on teräspalkin lämpötila korkeudella h [mm], ks. kuva 6.10
- θ_0 on teräspalkin alalaipan lämpötila kohdassa, joka on etäällä liitoksesta
- h on palkin alalaipan yläpuolella olevan tarkasteltavan komponentin korkeus [mm]
- D on palkin korkeus [mm]



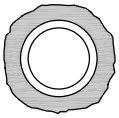
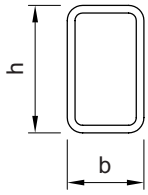
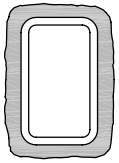
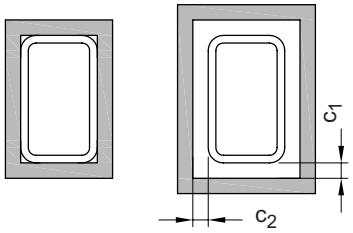
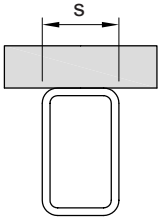
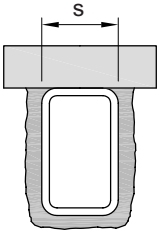
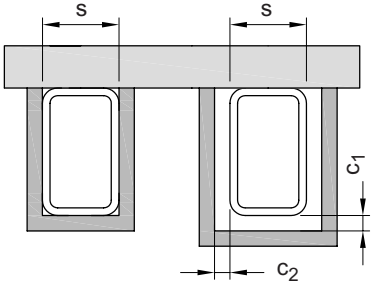
Kuva 6.10 Liittorakenteen lämpötilan jakaantuminen korkeuden funktiona liitoksessa [9,10,11]

6.3.4 Teräsosan poikkileikkaustekijä

Suojaamattoman teräksen poikkileikkaustekijällä tarkoitetaan teräsosan palolle alttiin pinnan suhdetta osan tilavuuteen. Palosuojatun teräsosan tapauksessa käytetään palosuojauksen palolle vastakkaisen pinnan pinta-alaa (eli palosuojauksen sisäpuolista pinta-alaa). Jos poikkileikkaustekijä on vakio rakenteen eri poikkileikkauksissa, voidaan käyttää vaipan pinta-alan sijaan piiriä ja tilavuuden sijaan poikkileikkauksen pinta-alaa.

Taulukossa 6.2 on esitetty poikkileikkaustekijän laskeminen suojaamattomalle ja palosuojatulle rakenneputkelle Eurocoden osan EN 1993-1-2 ohjeita soveltaen.

Taulukko 6.2 Rakenneputken poikkileikkaustekijä palomitoituksessa

Suojaamaton	Palosuojamaali tai ruiskute	Kotelomainen suojaus
Kaikilta sivuilta palolle altistettu poikkileikkaus		
$\frac{A_m}{V} = \frac{A_u}{A \cdot 1m} \approx \frac{1}{t}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{A_u}{A \cdot 1m} \approx \frac{1}{t}$	
 $\frac{A_m}{V} = \frac{A_u}{A \cdot 1m} \approx \frac{1}{t}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{A_u}{A \cdot 1m} \approx \frac{1}{t}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h) \cdot 1m}{A \cdot 1m}$ $c_1 \le h/4$, $c_2 \le h/4$ [a]
Kolmelta sivulta palolle altistettu poikkileikkaus		
 $\frac{A_m}{V} = \frac{A_u - (s \cdot 1m)}{A \cdot 1m}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{A_u - (s \cdot 1m)}{A \cdot 1m}$	 $\frac{A_p}{V} = \frac{[2(b+h) - s] \cdot 1m}{A \cdot 1m}$ $c_1 \le h/4$, $c_2 \le h/4$ [a]

A_u on rakenneputken ulkopuolinen vaipan pinta-ala [m^2/m] (liite 11.1)
A on rakenneputken poikkipinta-ala [m^2] (liite 11.1)

a) Kotelomaisessa suojauksessa, jossa on vapaata tilaa terässauvan ympärillä, voidaan käyttää samaa poikkileikkaustekijän arvoa kuin kotelomaisessa suojauksessa jossa vapaata tilaa ei ole, kun vapaa tila (c_1 ja c_2) toteuttaa esitetyt ehdot.

6.4 Rakenneputken kriittinen lämpötila

Teräksen kriittisellä lämpötilalla tarkoitetaan sitä lämpötilaa, jossa teräksen myötölujuus on alentunut kuormitusten aiheuttaman jännityksen suuruiseksi [2,3].

Jos lämpötilajakauma poikkileikkauksessa on tasainen, ja jos sauvan stabiiliutta ei tarvitse ottaa huomioon, sauvan palomitoitus voidaan suorittaa kestävyystarkastelujen sijasta lämpötilatarkastelulla, jolloin sauvan mitoitusehto on [9,10,11]:

$$\theta_a \leq \theta_{cr} \qquad (6.10)$$

missä θ_a on teräksen lämpötila tarkasteltavana ajan hetkenä t
θ_{cr} on teräksen kriittinen lämpötila

Kriittinen lämpötila riippuu poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteesta ja se voidaan laskea seuraavasti [9,10,11]:

$$\theta_{a.cr} = 39,19\, ln\left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1\right] + 482 \qquad kun\ \ \mu_0 \geq 0,013 \qquad (6.11)$$

missä μ_0 on hyväksikäyttöaste joka lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\mu_0 = \frac{E_{fi.d}}{R_{fi.d.0}} \qquad (6.12)$$

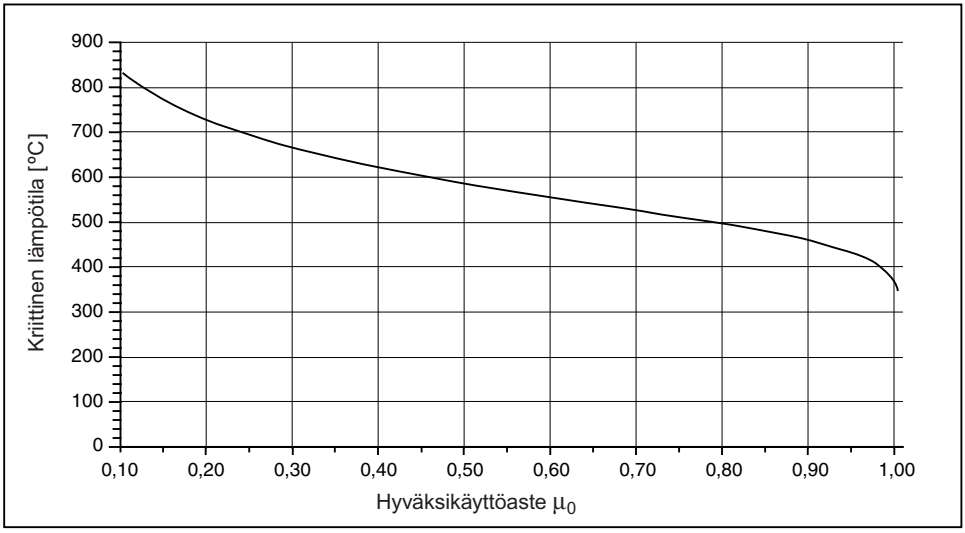
missä $E_{fi.d}$ on voiman tai momentin mitoitusarvo palomitoitustilanteessa
$R_{fi.d.0}$ on teräsrakenneosan vastaava kestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa ajan hetkellä t = 0

Poikkileikkausluokan 4 muiden kuin vedettyjen sauvojen kestävyys palotilanteessa on riittävä, jos tarkasteltavana ajan hetkenä teräksen lämpötila θ_a kaikissa poikkileikkauksen pisteissä on enintään θ_{crit}, jonka arvo voidaan valita kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvo on θ_{crit} = 350 ºC [9,10,11].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-2 [12]:
Voidaan käyttää arvoa θ_{crit} = 450 ºC.

Taulukko 6.3 Poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteen vaikutus teräksen kriittiseen lämpötilaan [9,10,11]

μ_0	θ_{cr}	μ_0	θ_{cr}	μ_0	θ_{cr}	μ_0	θ_{cr}
0,10	829	0,34	645	0,58	560	0,82	490
0,12	802	0,36	636	0,60	554	0,84	483
0,14	779	0,38	628	0,62	549	0,86	475
0,16	759	0,40	620	0,64	543	0,88	467
0,18	741	0,42	612	0,66	537	0,90	458
0,20	725	0,44	605	0,68	531	0,92	448
0,22	711	0,46	598	0,70	526	0,94	436
0,24	698	0,48	591	0,72	520	0,96	421
0,26	685	0,50	585	0,74	514	0,98	398
0,28	674	0,52	578	0,76	508	1,00	349
0,30	664	0,54	572	0,78	502		
0,32	654	0,56	566	0,80	496		



Kuva 6.11 Teräksen kriittinen lämpötila poikkileikkauksen hyväksikäyttöasteen funktiona

6.5 Palotilanteen kuormat

Palotilanne kuuluu onnettomuusmitoitustilanteisiin, jolloin kuormien osavarmuusluvuille käytetään yleisesti arvoa γ_F =1,0, ja kuormien yhdistely suoritetaan Eurocoden osan EN 1990 mukaisesti seuraavalla lausekkeella [4,4a]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k.j} \,''+''\, A_d \,''+''\, (\psi_{1.1} \text{ tai } \psi_{2.1}) Q_{k.1} \,''+''\, \sum_{i>1} \psi_{2.i} Q_{k.i} \qquad (6.13)$$

missä
- $''+''$ tarkoittaa lausekkeen termien yhdistämistä (kuormien samanaikaista vaikuttamista)
- j on pysyvän kuorman indeksi
- i on muuttuvan kuorman indeksi
- $G_{k.j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo
- A_d on onnettomuuskuorman mitoitusarvo (mikäli määritelty)
- $Q_{k.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.i}$ on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $\psi_{1.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_1 (taulukko 2.4)
- $\psi_{2.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_2 (taulukko 2.4)
- $\psi_{2.i}$ on muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin ψ_2 (taulukko 2.4)

Valinta yhdistelykertoimien $\psi_{1.1}$ ja $\psi_{2.1}$ välillä suoritetaan kansallisessa liitteessä.

> *Suomen kansallinen liite standardiin EN 1990 [5]:*
>
> *Käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{1.1}$, paitsi määräävän muuttuvan kuorman ollessa jokin muu kuin lumi-, jää- tai tuulikuorma, jolloin käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{2.1}$.*

Palotilanteessa rakennejärjestelmää voidaan tarkastella jollakin seuraavalla tavalla [9,10,11]:

- rakennejärjestelmän kokonaistarkastelu
- rakenteen osan tarkastelu
- rakenneosan tarkastelu

Todennettaessa standardipalon mukaisia vaatimuksia rakenneosan tarkastelu on riittävä [9,10,11].

Rakenneosa voidaan mitoittaa palotilanteessa palotilanteen erillistä kuormayhdistelyä vaativan lausekkeen (6.13) sijasta yksinkertaisella menetelmällä, jossa normaalilämpötilan voimasuureita pienennetään. Lämpölaajenemisten ja muodonmuutosten vaikutusta ei tarvitse tällöin ottaa huomioon. Voimasuureen arvo palotilanteessa saadaan yksinkertaisella menetelmällä seuraavasta kaavasta [9,10,11]:

$$E_{fi.d} = \eta_{fi} E_d \qquad (6.14)$$

missä
- E_d on voiman tai momentin mitoitusarvo normaalilämpötilassa
- η_{fi} on edellisen pienennystekijä palotilanteessa

Pienennystekijä η_{fi} lasketaan normaalilämpötilassa käytettävästä Eurocoden osan EN 1990 kuormayhdistelmästä riippuen seuraavasti [9,10,11]:

- kun normaalilämpötilassa käytetään luvun 2 lausekkeen (2.3) mukaista kuormayhdistelmää, pienennystekijä η_{fi} lasketaan kaavasta:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}} \qquad (6.15)$$

- kun normaalilämpötilassa käytetään luvun 2 lausekkeiden (2.4a) ja (2.4b) mukaista kuormayhdistelmää, pienennystekijä η_{fi} on pienempi seuraavista:

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k.1}}{\gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} \psi_{0.1} Q_{k.1}} \qquad (6.16a)$$

$$\eta_{fi} = \frac{G_k + \psi_{fi} Q_{k.1}}{\xi \gamma_G G_k + \gamma_{Q.1} Q_{k.1}} \qquad (6.16b)$$

missä
- G_k on pysyvän kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- γ_G on pysyvien kuormien osavarmuusluku (taulukko 2.1)
- $\gamma_{Q.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman osavarmuusluku (taulukko 2.1)
- ψ_{fi} on kuormien yhdistelykerroin $\psi_{1.1}$ tai $\psi_{2.1}$ (taulukko 2.4), joka valitaan kansallisessa liitteessä
- ξ on pienennystekijä epäedulliselle pysyvälle kuormalle (taulukko 2.1)

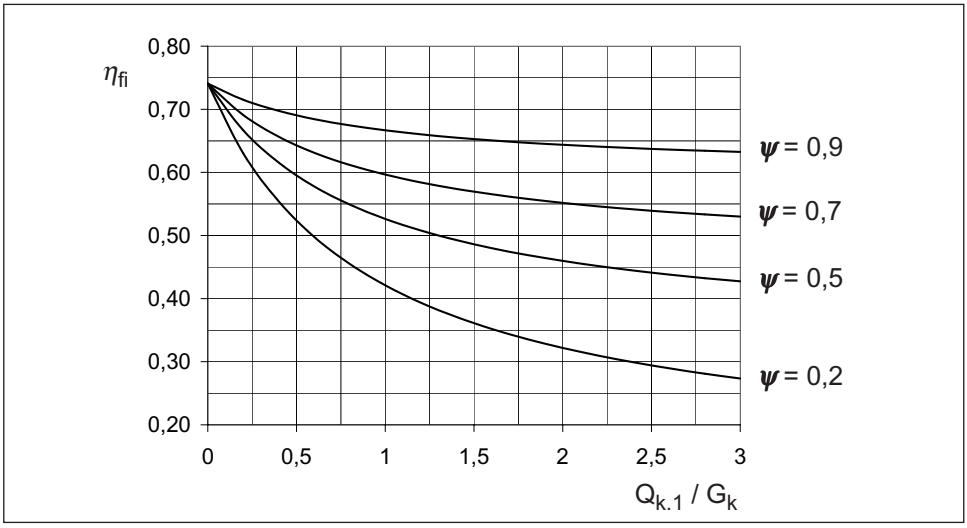
Suomen kansallinen liite standardiin EN 1990 [5]:

- Käytetään lausekkeita (6.16a) ja (6.16b), ja lausekkeessa (6.16a) otetaan huomioon ainoastaan pysyvät kuormat.
- Käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{1.1}$, paitsi määräävän muuttuvan kuorman ollessa jokin muu kuin lumi-, jää- tai tuulikuorma, jolloin käytetään yhdistelykerrointa $\psi_{2.1}$.

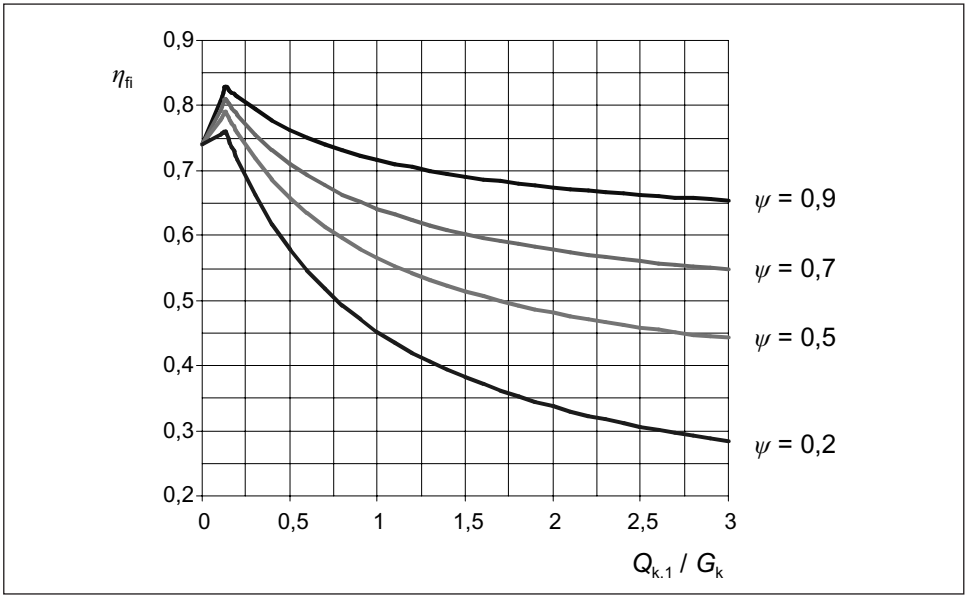
Kuvassa 6.12 on esitetty pienennystekijä η_{fi} lausekkeen (6.15) mukaisesti Eurocoden suositusarvoilla γ_G = 1,35 ja $\gamma_{Q.1}$ = 1,5. **Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**

Kuvassa 6.13 pienennystekijä η_{fi} on esitetty Suomessa käytettävien lausekkeiden (6.16a) ja (6.16b) perusteella Suomen kansallisen liitteen mukaisilla arvoilla.

Pienennystekijälle η_{fi} voidaan yksinkertaistuksena käyttää arvoa η_{fi} = 0,65 lukuun ottamatta taulukon 2.4 kuormaluokan E mukaisia kuormia (alueet joille voi kerääntyä tavaraa, mukaan lukien tavaran vastaanottotilat), joille käytetään arvoa η_{fi} = 0,7 [9,10,11].



Kuva 6.12 Kuorman pienennystekijä palotilanteessa muuttuvan kuorman ja pysyvän kuorman suhteen funktiona, kun käytetään Eurocoden mukaista kuorman perusyhdistelmää ja osavarmuuslukujen arvoja [9,10,11]



Kuva 6.13 Kuorman pienennystekijä palotilanteessa muuttuvan kuorman ja pysyvän kuorman suhteen funktiona, kun käytetään Suomen kansallisen liitteen mukaista kuormayhdistelmää ja osavarmuuslukujen arvoja [12]

6.6 Rakenneputken kestävyys palotilanteessa

Palotilanteen mitoitusehto on [9,10,11]:

$$E_{fi.d} \leq R_{fi.d.t} \qquad (6.17)$$

missä $E_{fi.d}$ on voiman tai momentin mitoitusarvo palomitoitustilanteessa
$R_{fi.d.t}$ on teräsrakenneosan vastaava kestävyyden mitoitusarvo palotilanteessa ajan hetkellä t

Palotilanteessä käytettävä kestävyyden osavarmuusluku valitaan kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvo on $\gamma_{M.fi} = 1{,}0$ [9,10,11].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-2 [12]:
Käytetään Eurocoden suositusarvoa $\gamma_{M.fi} = 1{,}0$.

Eurocoden osa EN 1993-1-2 sisältää eri ohjeet kestävyyden laskemiseksi palotilanteessa, kun lämpötilajakauma poikkileikkauksessa on:

a) tasan jakautunut, tai
b) epätasaisesti jakautunut

Koska Eurocodessa ei kuitenkaan esitetä ohjeitä lämpötilajakauman määrittämiseksi (vaan viitataan vain ns. kehittyneiden laskentamallien käyttöön), seuraavassa esitetyt ohjeet koskevat rakenneosan tarkastelua ja kestävyyden laskentaa Eurocodessa esitetyllä yksinkertaisella laskentamallilla, jolloin lämpötilan voidaan yleensä olettaa olevan tasan jakautunut poikkileikkauksessa, ellei erikseen muuta sanota [9,10,11].

6.6.1 Poikkileikkausluokitus palomitoituksessa

Poikkileikkausluokitus suoritetaan palotilanteessa samojen periaatteiden mukaisesti kuin normaalilämpötilassa, mutta käyttäen pienennettyä apusuureen ε arvoa.

Apusuure ε kuvaa poikkileikkauksen suhteellista muodonmuutoskykyä, jota käytetään eri yhteyksissä. Normaalilämpötilassa sen määritelmä on taulukossa 2.7 esitetyn mukaisesti:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \qquad (6.18)$$

Lauseke (6.18) sisältää oletuksen, että teräksen kimmokerroin on vakio. Palotilanteessa kimmokerroin ja lujuus kuitenkin muuttuvat taulukossa 6.1 esitetyn mukaisesti, jolloin lauseketta (6.18) joudutaan korjaamaan seuraavasti [13]:

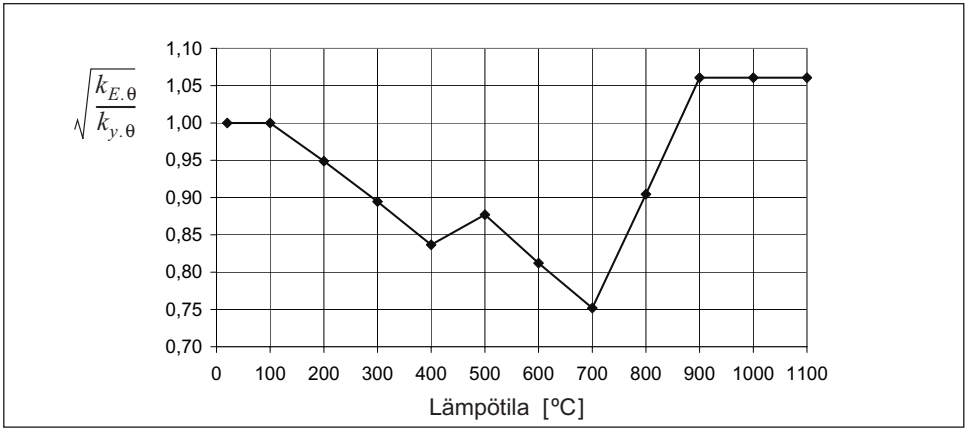
$$\varepsilon_{fi} = \sqrt{\frac{k_{E.\theta}}{k_{y.\theta}}} \cdot \varepsilon = \sqrt{\frac{E_{fi}}{E} \cdot \frac{f_y}{f_{y.fi}}} \cdot \varepsilon \qquad (6.19)$$

Koska kimmokerroin ja lujuus muuttuvat eri tavalla lämpötilan noustessa, vaihtelee ε_{fi} palotilanteessa kuvassa 6.14 esitetyn mukaisesti. Tällöin poikkileikkausluokitusta saatettaisiin laskelmissa joutua muuttamaan kesken palomitoitusta lämpötilan muuttuessa. **Yksinkertaisuuden vuoksi Eurocoden osassa EN 1993-1-2 on esitetty, että poikkileikkausluokka määritetään palotilanteessa käyttäen vakiokertoimella pienennettyä ε:n arvoa seuraavasti [9,10,11]:**

$$\varepsilon = 0,85\sqrt{235/f_y} \qquad (6.20)$$

missä f_y on teräksen normaalilämpötilan mukainen myötölujuus.

Kyseiselle pienennetylle ε-arvolle ei ole Eurocodessa kuitenkaan käytetty palotilannetta vastaavaa omaa merkintää ε_{fi}. Eurocoden kyseistä esitystapaa voidaan tulkita siten, että lausekkeen (6.20) mukaisella pienennetyllä ε-arvolla on tarkoitus korvata normaalilämpötilan kaavoissa eri yhteyksissä esiintyvä ε-arvo silloin, kun kyseisiä laskelmia hyödynnetään palotilanteen tarkasteluissa. Näin menetellen yksinkertaistetaan laskentatyötä ja vältetään kuvassa 6.14 esitetystä pienennystekijän vaihtelusta aiheutuva muiden laskennallisten arvojen 'vaeltelu' teräksen lämpötilan kohotessa.



Kuva 6.14 Apusuureen ε pienennystekijä hiiliteräksille lämpötilan funktiona [13]

6.6.2 Palotilanteen mukaisten poikkileikkausluokkien 1-3 kestävyys

6.6.2.1 Vetokestävyys

Palotilanteessa PL-luokkiin 1-3 kuuluvan sauvan vetokestävyys lasketaan seuraavasta kaavasta, kun poikkileikkauksen lämpötila θ_a on tasan jakautunut [9,10,11]:

$$N_{fi.t.Rd} = k_{y.\theta}\, N_{Rd}\, \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.21)$$

missä $k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
N_{Rd} on poikkileikkauksen plastinen kestävyys $N_{pl.Rd}$ normaalilämpötilassa
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

6.6.2.2 Puristuskestävyys

Palotilanteessa PL-luokkiin 1-3 kuuluvan sauvan puristuskestävyys lasketaan seuraavasti, kun poikkileikkauksen lämpötila θ_a on tasan jakautunut [9,10,11]:

$$N_{b.fi.t.Rd} = \chi_{fi} A k_{y.\theta} f_y / \gamma_{M.fi} \qquad (6.22)$$

missä χ_{fi} on taivutusnurjahduksen pienennystekijä palomitoituksessa
A on poikkileikkauksen pinta-ala
$k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
f_y on teräksen nimellinen myötölujuus normaalilämpötilassa
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Pienennystekijän χ_{fi} arvoksi valitaan pienempi arvoista $\chi_{y.fi}$ ja $\chi_{z.fi}$, jotka lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_\theta + \sqrt{\varphi_\theta^2 - \bar{\lambda}_\theta^2}} \qquad (6.23)$$

$$\varphi_0 = \frac{1}{2}[1 + \alpha\bar{\lambda}_\theta + \bar{\lambda}_\theta^2] \qquad (6.24)$$

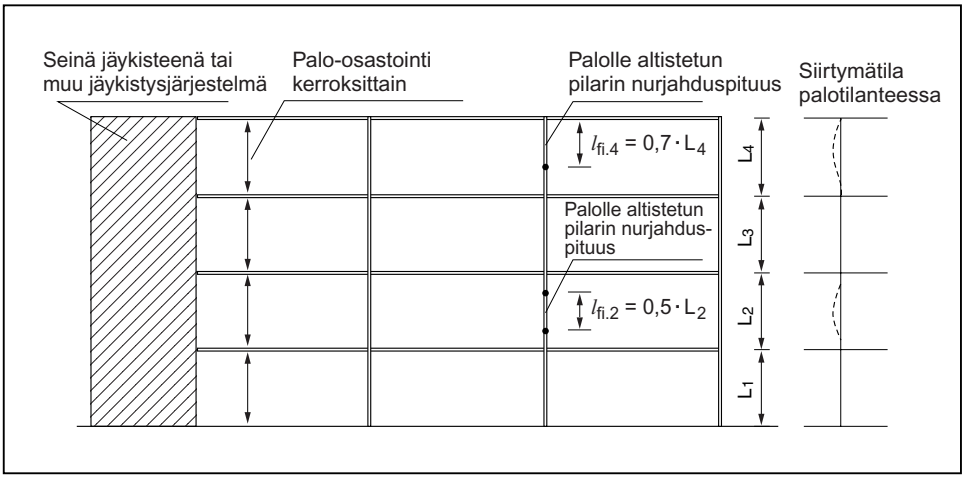
$$\alpha = 0,65\sqrt{235/f_y} \qquad (6.25)$$

$$\bar{\lambda}_\theta = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{k_{y.\theta}/k_{E.\theta}} \qquad (6.26)$$

missä $\bar{\lambda}_\theta$ on sauvan muunnettu hoikkuus kun sauvan lämpötila on θ_a
$\bar{\lambda}$ on sauvan muunnettu hoikkuus normaalilämpötilassa
$k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
$k_{E.\theta}$ on teräksen kimmokertoimen pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
f_y on teräksen nimellinen myötölujuus normaalilämpötilassa
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Pilarin palotilanteen nurjahduspituus l_{fi} määritetään yleensä kuten normaalilämpötilassa. Sivusuunnassa tuetun kehän pilarin nurjahduspituus l_{fi} voidaan kuitenkin määrittää tarkastelemalla pilaria päistään kiinnitettynä (koskee sekä jäykkiä että osittain jäykkiä liitoksia) palo-osaston ylä- ja alapuolella edellyttäen, että niiden nurjahtavien rakenneosien palonkestävyys, jotka erottavat nämä palo-osastot, on vähintään pilarin palonkestävyyden suuruinen [9,10,11].

Sivusuunnassa jäykistetyn kehän tapauksessa, kun jokainen kerros koostuu erillisestä palo-osastosta, joilla on riittävä palonkestävyys, välikerroksessa jatkuvan pilarin nurjahduspituudeksi voidaan valita l_{fi} = 0,5L ja ylimmässä kerroksessa l_{fi} = 0,7L, missä L on kyseisen kerroksen systeemikorkeus, ks. kuva 5.15 [9,10,11].



Kuva 6.15 Pilarin nurjahduspituudet sivusuunnassa tuetuissa kehissä [9,10,11]

6.6.2.3 Taivutuskestävyys

Palotilanteessa PL-luokkiin 1-3 kuuluvan sauvan taivutuskestävyys lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$M_{fi.t.Rd} = k_{y.\theta} \frac{M_{Rd}}{\kappa_1 \kappa_2} \cdot \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M.fi}} \quad mutta \;\; M_{fi.t.Rd} \leq M_{Rd} \qquad (6.27)$$

missä $k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)

M_{Rd} on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen normaalilämpötilan taivutuskestävyys $M_{pl.Rd}$ (tai pienennetty taivutuskestävyys, kun leikkauksen vaikutukset otetaan tarvittaessa mukaan), kun kyseessä on palotilanteen mukainen poikkileikkausluokka 1 tai 2

M_{Rd} on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen normaalilämpötilan

taivutuskestävyys $M_{el.Rd}$ (tai pienennetty taivutuskestävyys, kun leikkauksen vaikutukset otetaan tarvittaessa mukaan), kun kyseessä on palotilanteen mukainen poikkileikkausluokka 3

κ_1 on sovitustekijä, kun poikkileikkauksen lämpötila on epätasainen:
- κ_1 = 1,0 , kun kyseessä on neljältä sivulta palolle altistettu palkki
- κ_1 = 0,7 , kun kyseessä on kolmelta sivulta palolle altistettu palosuojaamaton palkki ja neljännellä sivulla on liittolaatta tai betonilaatta
- κ_1 = 0,85 , kun kyseessä on kolmelta sivulta palolle altistettu palosuojattu palkki ja neljännellä sivulla on liittolaatta tai betonilaatta

κ_2 on sovitustekijä, kun lämpötilan jakauma palkin pituudella on epätasainen:
- κ_2 = 0,85 , kun kyseessä on staattisesti määräämättömän palkin tuet
- κ_2 = 1,0 , kaikissa muissa tapauksissat

γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)

$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Sivuttain tukemattoman sauvan kiepahduskestävyys lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$M_{b.fi.t.Rd} = \chi_{LT.fi} W_y k_{y.\theta} f_y / \gamma_{M.fi} \qquad (6.28)$$

missä $\chi_{LT.fi}$ on kiepahduksen pienennystekijä palomitoituksessa

W_y on poikkileikkauksen plastisuusteorian mukainen normaalilämpötilan taivutusvastus $W_{pl.y}$, kun kyseessä on palotilanteen mukainen poikkileikkausluokka 1 tai 2

W_y on poikkileikkauksen kimmoteorian mukainen normaalilämpötilan taivutusvastus $W_{el.y}$, kun kyseessä on palotilanteen mukainen poikkileikkausluokka 3

$k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)

f_y on teräksen nimellinen myötölujuus normaalilämpötilassa

$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Kiepahduskestävyyden pienennystekijä $\chi_{LT.fi}$ lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\chi_{LT.fi} = \frac{1}{\phi_{LT.\theta} + \sqrt{\phi^2_{LT.\theta} - \bar{\lambda}^2_{LT.\theta}}} \qquad (6.29)$$

$$\phi_{LT.\theta} = \frac{1}{2}[1 + \alpha\bar{\lambda}_{LT.\theta} + \bar{\lambda}^2_{LT.\theta}] \qquad (6.30)$$

$$\alpha = 0,65\sqrt{235/f_y} \qquad (6.31)$$

$$\bar{\lambda}_{LT.\theta} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{k_{y.\theta}/k_{E.\theta}} \qquad (6.32)$$

missä $\bar{\lambda}_{LT.\theta}$ on sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle kun sauvan lämpötila on θ_a
$\bar{\lambda}_{LT}$ on sauvan muunnettu hoikkuus kiepahdukselle normaalilämpötilassa
$k_{y.\theta}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä lämpötilassa θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
$k_{E.\theta}$ on teräksen kimmokertoimen pienennystekijä kun teräksen lämpötila on θ_a, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
f_y on teräksen nimellinen myötölujuus normaalilämpötilassa
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

6.6.2.4 Leikkauskestävyys

Palotilanteessa PL-luokkiin 1-3 kuuluvan sauvan leikkauskestävyys lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$V_{fi.t.Rd} = k_{y.\theta.web} V_{Rd} \frac{\gamma_{M0}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.33)$$

missä $k_{y.\theta.web}$ on teräksen myötölujuuden pienennystekijä kun uuman lämpötila on θ_{web}, joka saavutetaan ajan hetkellä t (taulukko 6.1)
V_{Rd} on profiilin leikkauskestävyys normaalilämpötilassa (Huom. Suomessa noudatetaan kuitenkin tällöin η-tekijän osalta palotilanteessa kyseeseen tulevaa arvoa. Rakenneputkilla η = 1,0 normaalilämpötilassa ja palomitoituksessa.)
γ_{M0} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)

6.6.2.5 Taivutusmomentin ja normaalivoiman yhteisvaikutus, kun sauva voi nurjahtaa tai kiepahtaa

Eurocoden palo-osassa EN 1993-1-2 sauvalle esitetyt (M+N) yhteisvaikutuksen kaavat ovat muodoltaan ENV-Eurocodessa esitetyn kaltaisia, ja poikkeavat EN-Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetyistä normaalilämpötilan vastaavista kaavoista. Syynä on se, että osassa EN 1993-1-1 esitettyjen (M+N) yhteisvaikutuskaavojen soveltuvuutta palomitoitukseen ei ole ehditty varmistaa siinä vaiheessa, kun Eurocoden palo-osaa EN 1993-1-2 on laadittu [13].

Palotilanteessa PL-luokkiin 1-3 kuuluvan sauvan kestävyys tarkastetaan seuraavasti [9,10,11]:

$$\frac{N_{fi.Ed}}{N_{b.fi.t.Rd}} + \frac{k_y M_{y.fi.Ed}}{M_{y.fi.t.Rd}} + \frac{k_z M_{z.fi.Ed}}{M_{z.fi.t.Rd}} \le 1,0 \qquad (6.34)$$

$$\frac{N_{fi.Ed}}{N_{z.b.fi.t.Rd}} + \frac{k_{LT} M_{y.fi.Ed}}{M_{b.fi.t.Rd}} + \frac{k_z M_{z.fi.Ed}}{M_{z.fi.t.Rd}} \le 1,0 \qquad (6.35)$$

missä $N_{fi.Ed}$ on poikkileikkaukseen vaikuttava puristava normaalivoima palotilanteessa

$M_{y.fi.Ed}$ on poikkileikkaukseen vaikuttava taivutusmomentti palotilanteessa y-akselin suhteen

$M_{z.fi.Ed}$ on poikkileikkaukseen vaikuttava taivutusmomentti palotilanteessa z-akselin suhteen

$N_{b.fi.t.Rd}$ on sauvan nurjahduskestävyys palotilanteessa kohdan 6.6.2.2 mukaisesti

$N_{z.b.fi.t.Rd}$ on sauvan nurjahduskestävyys palotilanteessa z-akselin suhteen

$M_{y.fi.t.Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa y-akselin suhteen kohdan 6.6.2.3 mukaisesti

$M_{z.fi.t.Rd}$ on poikkileikkauksen taivutuskestävyys palotilanteessa z-akselin suhteen

$M_{b.fi.t.Rd}$ on sauvan kiepahduskestävyys palotilanteessa kohdan 6.6.2.3 mukaisesti

Ehdoissa (6.34) ja (6.35) tarvittavat tekijät k_y, k_z ja k_{LT} lasketaan seuraavasti [9,10,11]:

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} N_{fi.Ed}}{N_{z.b.fi.t.Rd}} \leq 1 \qquad (6.36)$$

$$\mu_{LT} = 0,15\,\bar{\lambda}_{z.\theta}\,\beta_{M.LT} - 0,15 \leq 0,9 \qquad (6.37)$$

ja:

$$k_y = 1 - \frac{\mu_y N_{fi.Ed}}{N_{y.b.fi.t.Rd}} \leq 3 \qquad (6.38)$$

$$\mu_y = (2\beta_{M.y} - 5)\bar{\lambda}_{y.\theta} + 0,44\beta_{M.y} + 0,29 \leq 1,1 \quad \textit{lisäksi} \quad \bar{\lambda}_{y.20°C} \leq 1,1 \qquad (6.39)$$

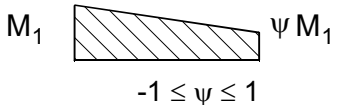
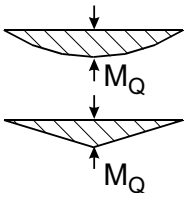
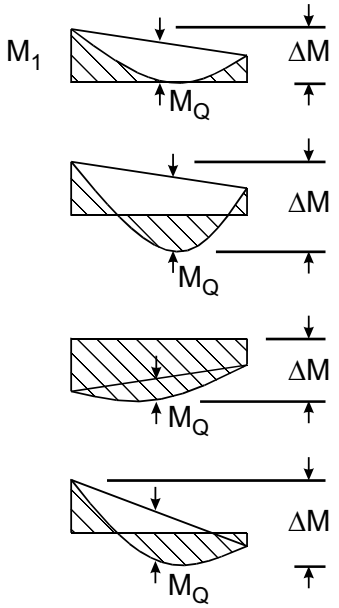
ja:

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{fi.Ed}}{N_{z.b.fi.t.Rd}} \leq 3 \qquad (6.40)$$

$$\mu_z = (1,2\beta_{M.z} - 3)\bar{\lambda}_{z.\theta} + 0,71\beta_{M.z} - 0,29 \leq 0,8 \qquad (6.41)$$

Lausekkeissa (6.36) - (6.41) tarvittavat ekvivalentin tasaisen momentin β_M-tekijät saadaan taulukosta 6.4.

Taulukko 6.4 Ekvivalentin tasaisen momentin tekijät [9,10,11]

Momenttikuvio	Ekvivalentin tasan jaukautuneen momentin tekijä β_M
Sauvanpäämomentit  	$\beta_{M.\psi} = 1,8 - 0,7\psi$
Poikittaisen kuormituksen momentit tasossa  	$\beta_{M.Q} = 1,3$ $\beta_{M.Q} = 1,4$
Poikittaisen kuormituksen momentit tasossa ja sauvanpäämomentit  	$\beta_M = \beta_{M.\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M}(\beta_{M.Q} - \beta_{M.\psi})$ $M_Q = \lvert max\ M \rvert$ *vain poikittaiskuormista* $\Delta M = \lvert max\ M \rvert$ *kun momenttikuvion merkki ei muutu* $\Delta M = \lvert max\ M \rvert + \lvert min\ M \rvert$ *kun momenttikuvion merkki muuttuu*

6.6.3 Palotilanteen mukaisen poikkileikkausluokan 4 kestävyys

Eurocoden osassa EN 1993-1-2 esitetyt ohjeet poikkileikkausluokan 4 kestävyyksille soveltuvat suoraan neliön ja suorakaiteen muotoisille rakenneputkille. Pyöreille PL-luokan 4 rakenneputkille normin ohjeet eivät kuitenkaan sovellu sellaisenaan (tehollista poikkileikkausta ei voida

määrittää pyöreille PL4 putkille), joten niiden osalta normin ohjeita joudutaan sovittamaan seuraavassa esitetyn mukaisesti.

Palotilanteessa PL-luokkaan 4 kuuluvat sauvat mitoitetaan kohdassa 6.6.2 esitettyjä PL-luokkaa 3 koskevia ohjeita soveltaen, mutta seuraavin muutoksin:

- **neliön ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket:**

  - poikkileikkauksen pinta-ala korvataan tehollisella pinta-alalla (vedetyn sauvan tapauksessa koko poikkileikkaus on tehollinen)

  - poikkileikkauksen taivutusvastus korvataan tehollisella taivutusvastuksella

  - palomitoituksessa teräksen lujuutena käytetään pienennettyä lujuutta $k_{p0,2.\theta} \cdot f_y$ (taulukko 6.1), missä f_y on teräksen lujuus normaalilämpötilassa 20 °C

Poikkileikkauksen tehollinen pinta-ala ja tehollinen taivutusvastus lasketaan luvussa 2 esitetyn mukaisesti käyttäen normaalilämpötilan lujuutta ja kimmokerrointa.

- **pyöreät rakenneputket:**

  - normaalilämpötilakestävyydet lasketaan luvussa 2 esitettyjen PL4 pyöreän putken ohjeiden mukaisesti

  - palomitoituksessa teräksen lujuutena käytetään pienennettyä lujuutta $k_{p0,2.\theta} \cdot f_y$ (taulukko 6.1), missä f_y on teräksen lujuus normaalilämpötilassa 20 °C

  - palomitoituksessa taivutuskestävyys ja leikkauskestävyys lasketaan käyttäen kaavoissa (6.27) ja (6.33) osavarmuusluvun γ_{M0} sijasta PL4 pyöreiden putkien EN 1993-1-6 mukaista osavarmuuslukua γ_{M1} (taulukko 2.5). Palotilanteen mitoituskestävyys ei kuitenkaan saa ylittää normaalilämpötilan mitoituskestävyyttä.

  - kaavoja (6.28) ja (6.35) ei oteta huomioon (pyöreä putki ei kiepahda)

6.7 Liitosten kestävyys palotilanteessa

Hitsaus- ja ruuviliitosten palonkestävyyden voidaan katsoa olevan riittävä edellyttäen, että seuraavat ehdot ovat voimassa [9,10,11]:

1) Liitosten palosuojauksen terminen kestävyys $(d_f / \lambda_f)_c$ on vähintään yhtäsuuri kuin tarkasteltavaan liitokseen liittyvän rakenneosan palosuojauksen termisen kestävyyden $(d_f / \lambda_f)_m$ pienin arvo,

   missä d_f on palosuojamateriaalin paksuus (d_f = 0 suojaamattomille rakenneosille)
   λ_f on palosuojamateriaalin tehollinen lämmönjohtavuus.

2) Liitoksen hyväksikäyttöaste on pienempi tai yhtäsuuri kuin liitettävien rakenneosien hyväksikäyttöasteen suurin arvo. Yksinkertaistuksena vertailu voidaan suorittaa normaalilämpötilaa vastaten.

3) Normaalilämpötilassa liitokset mitoitetaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 mukaisesti.

Mikäli edellä esitetyt ehdot eivät toteudu, liitosten kestävyys palotilanteessa tarkastetaan seuraavien ohjeiden mukaisesti.

6.7.1 Ruuviliitosten kestävyys

Nettopoikkileikkauksen murtumista kiinnittimien reikien kohdalla ei tarvitse ottaa huomioon edellyttäen, että jokaisessa reijässä on kiinnitin, koska lisämateriaalin olemassaolon takia liitosten lämpötila on alhaisempi kiinnitysten kohdalla.

6.7.1.1 Leikkauskestävyys ja reunapuristuskestävyys

Kestävyydet eri ruuvikiinnitysluokissa A...C lasketaan seuraavasti:

Ruuvikiinnitysluokka A: Reunapuristustyyppinen kiinnitys:

Ruuvin leikkauskestävyys palotilanteessa on [9,10,11]:

$$F_{v.t.Rd} = k_{b.\theta} F_{v.Rd} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.42)$$

missä $k_{b.\theta}$ on lämpötilasta riippuva ruuvin lujuuden pienennystekijä taulukon 6.5 mukaisesti
$F_{v.Rd}$ on ruuvin leikkauskestävyys leikettä kohden normaalilämpötilassa
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Ruuvin reunapuristuskestävyys palotilanteessa on [9,10,11]:

$$F_{b.t.Rd} = k_{b.\theta} F_{b.Rd} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.43)$$

missä $k_{b.\theta}$ on lämpötilasta riippuva ruuvin lujuuden pienennystekijä taulukon 6.5 mukaisesti
$F_{b.Rd}$ on ruuvin reunapuristuskestävyys normaalilämpötilassa
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)
$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Ruuvikiinnitysluokka B: Käyttörajatilassa liukumisen estävä kiinnitys ja Ruuvikiinnitysluokka C: Murtorajatilassa liukumisen estävä kiinnitys:

Liukumisen kestävien liitosten oletetaan liukuvan palotilanteessa ja yksittäisen ruuvin kestävyys lasketaan kuten kiinnitysluokassa A [9,10,11].

6.7.1.2 Vetokestävyys

Ruuvikiinnitysluokat D ja E: Esijännittämättömät ja esijännitetyt ruuvit:

Ruuvin vetokestävyys palotilanteessa on [9,10,11]:

$$F_{ten.t.Rd} = k_{b.\theta} F_{t.Rd} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.44)$$

missä $k_{b.\theta}$ on lämpötilasta riippuva ruuvin lujuuden pienennystekijä taulukon 6.5 mukaisesti

$F_{t.Rd}$ on ruuvin vetokestävyys normaalilämpötilassa

γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)

$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Taulukko 6.5 Ruuvien lujuuden lämpötilasta riippuva pienennystekijä [9,10,11]

Lämpötila θ_a	Ruuvien pienennystekijä $k_{b.\theta}$
20 °C	1,000
100 °C	0,968
150 °C	0,952
200 °C	0,935
300 °C	0,903
400 °C	0,775
500 °C	0,550
600 °C	0,220
700 °C	0,100
800 °C	0,067
900 °C	0,033
1000 °C	0,000

6.7.2 Hitsausliitosten kestävyys

6.7.2.1 Päittäishitsit

Täysin läpihitsatun päittäishitsin lujuuden mitoitusarvoksi, kun lämpötila on enintään 700 °C, valitaan heikomman liitettävän osan lujuus, johon sovelletaan perusaineen pienennystekijää. Kun lämpötila > 700 °C, päittäishitseille voidaan käyttää pienahitseille seuraavassa esitettyä pienennystekijää [9,10,11].

6.7.2.2 Pienahitsit

Pienahitsin kestävyys yksikköpituutta kohti palotilanteessa on [9,10,11]:

$$F_{w.t.Rd} = k_{w.\theta} F_{w.Rd} \frac{\gamma_{M2}}{\gamma_{M.fi}} \qquad (6.45)$$

missä $k_{w.\theta}$ on lämpötilasta riippuva hitsin lujuuden pienennystekijä taulukon 6.6 mukaisesti

$F_{w.Rd}$ on pienahitsin kestävyys yksikköpituutta kohti normaalilämpötilassa kohdan 3.3.3 mukaisesti

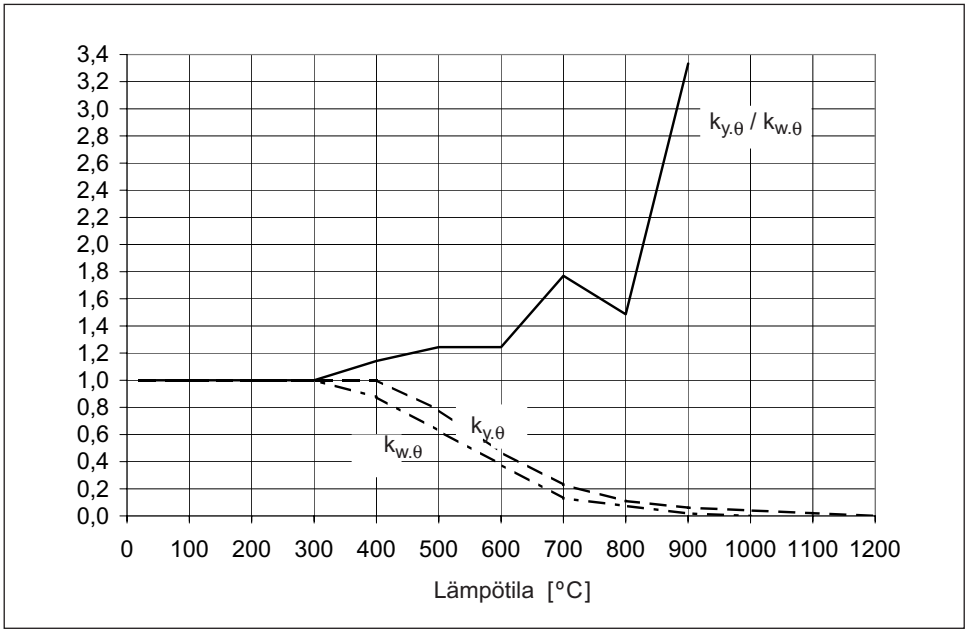
γ_{M2} on kestävyyden osavarmuusluku normaalilämpötilassa (taulukko 2.5)

$\gamma_{M.fi}$ on kestävyyden osavarmuusluku palomitoituksessa (taulukko 2.5)

Pienahitsin pienennystekijä on esitetty taulukossa 6.6. Taulukosta nähdään, että lämpötilan kohotessa pienahitsin lujuus alkaa pienentyä jo 300 °C jälkeen, ja se pienenee nopeammin kuin perusaineen lujuus (taulukko 6.1). Jos pienahitsi on mitoitettu normaalilämpötilassa tasalujaksi perusaineen suhteen (esim. putkiristikon uumasauvojen kiinnityshitsit), ja hitsin halutaan olevan tasaluja myös palotilanteessa, on hitsin a-mittaa suurennettava kuvan 6.16 mukaisesti pienennystekijöiden suhteella $k_{y.\theta} / k_{w.\theta}$. Kun teräsosan ja hitsin lämpötila on (esim. riittävän palosuojauksen ansiosta) enintään 600 °C, a-mitan suurennuskertoimeksi riittää $k_{y.\theta} / k_{w.\theta} = 1{,}25$. Korkeammissa lämpötiloissa suurennuskerroin alkaa nopeasti kasvaa. Jos hitsin lämpötila on enintään 300 °C, a-mitan suurentamista ei tarvita.

Taulukko 6.6 Hitsien lujuuden lämpötilasta riippuva pienennystekijä [9,10,11]

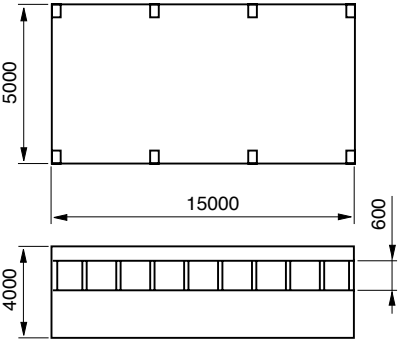
Lämpötila θ_a	Hitsien pienennystekijä $k_{w.\theta}$
20 °C	1,000
100 °C	1,000
150 °C	1,000
200 °C	1,000
300 °C	1,000
400 °C	0,876
500 °C	0,627
600 °C	0,378
700 °C	0,130
800 °C	0,074
900 °C	0,018
1000 °C	0,000



Kuva 6.16 Perusaineen ja pienahitsin lujuuden muuttuminen lämpötilan funktiona

Esimerkki 6.1

Kuvan mukaisessa rakennuksessa reuna- ja nurkkapilareina on rakenneputki 180×180×6. Lasketaan reunapilareiden kestävyys normaalivoimalle. Palotilanteessa reunapilareiden puristuskuorma on $E_{fi.d} = N_{fi.Ed} = 550$ kN.



Rakennukselta vaaditaan 15 min palonkestoaikaa (palonkestoluokka R15). Pilareiden nurjahduspituus on L_{fi} = 4,0 m. Pilarit ovat hieman irti seinästä (orsirakenne), joten palomitoituksessa niitä tarkastellaan kaikilta sivuilta palolle alttiina. Palotilan lämpötilan kehittyminen lasketaan standardipalokäyrää käyttäen (kaava (6.1)).

Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Suojaamattoman rakenneputken lämpötilan kehittyminen:

Teräksen lämpötilan nousu ratkaistaan suojaamattomana kaavasta (6.2):

$$\Delta\theta_{a.t} = k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net.d} \cdot \Delta t$$

Nettolämpövuo pinta-alaa kohti muodostuu konvektiosta ja säteilystä:

$$\dot{h}_{net.c} = \alpha_c(\theta_g - \theta_m) = 25(\theta_g - \theta_m)$$

$$\begin{aligned}\dot{h}_{net.r} &= \Phi \cdot \varepsilon_m \cdot \varepsilon_f \cdot \sigma \cdot [(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \\ &= 1,0 \cdot 0,7 \cdot 1,0 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8}[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4] \\ &= 3,969 \cdot 10^{-8}[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\dot{h}_{net.d} &= \dot{h}_{net.c} + \dot{h}_{net.r} \\ &= 25(\theta_g - \theta_m) + 3,969 \cdot 10^{-8}[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]\end{aligned}$$

Sijoittamalla teräksen materiaalivakiot ja poikkileikkaustekijä kaavaan (6.2) saadaan lauseke muotoon:

$k_{sh} = 1,0$	*varjostustekijän arvo rakenneputkilla*
$A_m/V = 171\ m^{-1}$	*poikkileikkaustekijä (kaikilta sivuilta palolle altistettu, liite 11.1)*
$c_a = 600\ J/(kgK)$	*oletetaan että ominaislämpökapasiteetti on vakio (yksinkertaistus)*
$\rho_a = 7850\ kg/m^3$	*teräksen tiheys*
$\theta_g = \theta_r$	*oletetaan että palon ympäröimän rakenneosan tapauksessa rakenneosan ympärillä palotilan kaasun lämpötila ja tehollinen säteilylämpötila ovat yhtä suuret (yksinkertaistus)*
$\Delta t = 5\ s$	*aikaväli laskelmissa (suurin sallittu)*

$$\begin{aligned}\Delta\theta_{a.t} &= k_{sh} \cdot \frac{A_m/V}{c_a \rho_a} \cdot \dot{h}_{net.d} \cdot \Delta t \\ &= 9,076 \cdot 10^{-4}(\theta_r - \theta_m)\Delta t + 1,441 \cdot 10^{-12}[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]\Delta t\end{aligned}$$

$$\Delta\theta_{a.t} = 4,538 \cdot 10^{-3}(\theta_r - \theta_m) + 7,205 \cdot 10^{-12}[(\theta_r + 273)^4 - (\theta_m + 273)^4]$$

Oheisessa kuvassa on esitetty suojaamattoman rakenneputken 180×180×6 lämpötilan kehittyminen standardipalossa. Kuvan käyrä on laskettu yllä olevan kaavan mukaan 5 sekunnin aika-askelin. Vaaditun palonkestoajan (15 min) mukainen maksimilämpötila on:

$\theta_{a.max} = 683\ °C$

Palosuojatun rakenneputken lämpötilan kehittyminen:

Suojataan pilari 180×180×6 mineraalivillalevyillä, joiden paksuus on 15 mm. Palosuojatun teräsrakenteen lämpötilanmuutos noudattaa yhtälöä (6.7):

$$\Delta\theta_{a.t} = \frac{\lambda_p / d_p}{c_a \rho_a} \cdot \frac{A_p}{V} \cdot \frac{\theta_{g.t} - \theta_{a.t}}{1 + \phi/3} \cdot \Delta t - (e^{\phi/10} - 1) \cdot \Delta\theta_{g.t} \quad \text{mutta } \Delta\theta_{a.t} \geq 0 \text{ jos } \Delta\theta_{g.t} > 0$$

Ylläolevassa lausekkeessa tarvittavat palosuoja-aineen ja teräksen materiaaliominaisuudet ovat:

$$\frac{A_p}{V} = \frac{2(b+h) \cdot 1m}{A \cdot 1m} = \frac{2 \cdot (0,18m + 0,18m) \cdot 1m}{4083 \cdot 10^{-6} m^2 \cdot 1m} = 176,3\ m^{-1}$$

levykotelolla suojatun rakenneputken poikkileikkaustekijä

$c_a = 600\ J/(kgK)$ *oletetaan että ominaislämpökapasiteetti on vakio (yksinkertaistus)*

$d_p = 15\ mm$ *palosuojamateriaalin paksuus*

$\Delta t = 5\ s$ *aikaväli laskelmissa (palosuojatulla suurin sallittu aikaväli 30 s)*

$\lambda_p = 0,25\ W/(mK)$ *oletetaan että lämmönjohtavuus on vakio (yksinkertaistus)*

$\rho_a = 7850\ kg/m^3$ *teräksen tiheys*

Palosuojamateriaalin tiheys ja ominaislämpökapasiteetti ovat:

$c_p = 1000\ J/(kgK)$ *palosuojamateriaalin ominaislämpökapasiteetti*

$\rho_p = 150\ kg/m^3$ *palosuojamateriaalin tiheys*

Parametri ϕ määritetään kaavalla (6.8):

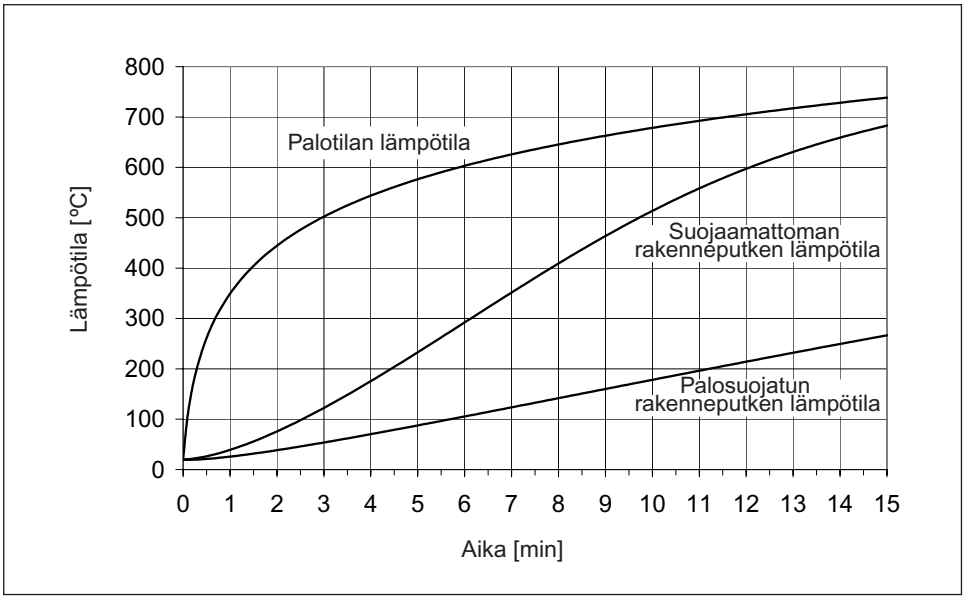
$$\phi = \frac{c_p \rho_p}{c_a \rho_a} \cdot d_p \cdot \frac{A_p}{V} = \frac{1000 \cdot 150}{600 \cdot 7850} \cdot 0,015 \cdot 176,3 = 0,0842$$

Sijoittamalla materiaaliominaisuudet ja parametri ϕ kaavaan (6.7) saadaan seuraava tulos:

$$\Delta\theta_{a.t} = 3,034 \cdot 10^{-3} \cdot (\theta_{g.t} - \theta_{a.t}) - 8,460 \cdot 10^{-3} \cdot \Delta\theta_{g.t}$$

Oheisessa kuvassa on esitetty 15 mm mineraalivillalevyin suojatun rakenneputken 180×180×6 lämpötilan kehittyminen standardipalossa. Kuvan käyrä on laskettu yllä olevan kaavan mukaan 5 sekunnin aika-askelin. Vaaditun palonkestoajan (15 min) mukainen maksimilämpötila on:

$\theta_{a.max} = 267\,°C$



Rakenteen kestävyyden laskenta:

Palomitoituksessa kestävyyden laskennan lähtökohtana on palotilanteen poikkileikkausluokka, joka saattaa erota normaalilämpötilan poikkileikkausluokasta. Tarkastetaan aluksi putken poikkileikkausluokat erikseen normaalilämpötilassa (taulukko 2.7) ja palotilanteessa:

Uuma ja laippa (normaalilämpötila):

$$\frac{\bar{b}}{t} = \frac{(b-3t)}{t} = \frac{(180-3\cdot 6)}{6} = 27,0 \le 38\varepsilon = 38\cdot\sqrt{235/f_y} = 38\cdot\sqrt{235/420} = 28,4$$

$\Rightarrow$ *normaalilämpötilassa poikkileikkausluokka 2 (siis koko poikkileikkaus tehollinen)*

Uuma ja laippa (palotilanne):

palotilanteessa käytettävä pienennetty ε-arvo lasketaan kaavasta (6.20):

$$\varepsilon = 0,85\sqrt{235/f_y} = 0,85\sqrt{235/420} = 0,6358$$

$$\frac{\bar{b}}{t} = \frac{(180-3\cdot 6)}{6} = 27,0 > 42\varepsilon = 42\cdot 0,6358 = 26,7$$

$\Rightarrow$ *palotilanteessa poikkileikkausluokka 4*

Palotilanteen tehollinen poikkileikkaus:

Palotilanteen tehollinen poikkileikkaus lasketaan käyttäen normaalilämpötilan lujuutta ja kimmokerrointa
⇒ palotilanteen tehollinen poikkileikkaus = normaalilämpötilan tehollinen poikkileikkaus

Valitulla putkella koko poikkileikkaus on normaalilämpötilassa tehollinen (PL2), joten ilman laskelmiakin voidaan heti todeta että palotilanteen tehollinen poikkileikkaus on tässä sama kuin bruttopoikkileikkaus:

$$A_{fi.eff} = A_{eff} = A = 4083\ mm^2 \qquad (liite\ 11.1)$$

Puristuskestävyys:

Kestävyyden laskennassa otetaan huomioon teräksen lujuuden ja kimmokertoimen muuttuminen lämpötilan suhteen. Kestävyys lasketaan palonkestoajan maksimilämpötilan suhteen. Poikkileikkausluokan 4 tapauksessa lujuuden ja kimmokertoimen muunnoskertoimina käytetään tekijöitä $k_{p0,2.\theta}$ ja $k_{E.\theta}$, joiden arvot määritetään lineaarisesti interpoloimalla taulukosta 6.1. Saadut tulokset on koottu alla olevaan taulukkoon.

Palotilanne	$\theta_{a.max}$ (°C)	$k_{p0,2.\theta}$	$k_{E.\theta}$	$\bar{\lambda}_\theta$ kaava (6.26)	χ_{fi} kaava (6.23)	$N_{b.fi.t.Rd}$ (kN) kaava (6.22)
Suojaamaton rakenneputki	683	0,1589	0,1606	0,8018	0,6094	166,1
Palosuojattu rakenneputki	267	0,8163	0,8330	0,7980	0,6115	856,0

Suojaamaton pilari ei täytä palonkestävyysvaatimusta, koska:

$$N_{b.fi.t.Rd} = 166,1\ kN < N_{fi.Ed} = 550\ kN \quad ei\ OK$$

Palosuojattu pilari kestää 15 min palon, jos käytetään palosuojauksena 15 mm mineraalivillakerrosta, koska:

$$N_{b.fi.t.Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2.\theta} f_y / \gamma_{M.fi}$$
$$= 0,6115 \cdot 4083 \cdot 0,8163 \cdot 420/1,0 = 856,0\ kN \geq N_{fi.Ed} = 550\ kN \quad OK$$

Kriittinen lämpötila hyväksikäyttöasteen mukaan:

Edellä olevan rakenteen palonkestävyysvaatimuksen toteutuminen voidaan selvittää myös hyväksikäyttöasteen avulla. Sijoittamalla kaavoihin (6.22) ja (6.12) saadaan:

$$N_{b.fi.t.Rd} = \chi_{fi} A_{eff} k_{p0,2.\theta} f_y / \gamma_{M.fi}$$
$$= 0,6070 \cdot 4083 \cdot 1,0 \cdot 420/1,0 = 1041\ kN \quad (palotilanne\ ajanhetkellä\ t = 0)$$

$$\mu_0 = \frac{E_{fi.d}}{R_{fi.d.0}} = \frac{550}{1041} = 0,5283$$

Kriittinen lämpötila ratkaistaan yhtälöstä (6.11):

$$\theta_{a.cr} = 39,19 \ln\left[\frac{1}{0,9674 \cdot \mu_0^{3,833}} - 1\right] + 482$$

$$= 39,19 \ln\left[\frac{1}{0,9674 \cdot 0,5283^{3,833}} - 1\right] + 482 = 576°C$$

Kriittisen lämpötilan mukaan laskien päästään vastaavaan tulokseen kuin edellä:

Suojaamaton rakenneputki: $\theta_{a.max} = 683\,°C > \theta_{a.cr} = 576\,°C$ *ei OK*
Palosuojattu rakenneputki: $\theta_{a.max} = 267\,°C \leq \theta_{a.cr} = 576\,°C$ *OK*

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, puristuskestävyydeksi saataisiin suojaamattomalla putkella 195,1 kN ja palosuojatulla putkella 852,6 kN. Havaitaan siis, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa palosuojatun putken puristuskestävyyttä (joskin vain vähäisessä määrin), kun taas suojaamattoman putken puristuskestävyys pienenee. Tulosten epäloogisuus johtuu siitä, että palotilanteessa tämän esimerkin putki sattuu kuulumaan S355-mitoituksessa poikkileikkausluokkaan 3, kun taas S420-mitoituksessa sama putki kuuluukin poikkileikkausluokkaan 4, jolloin kestävyyden pienennyskerroin joudutaan määrittämään epäedullisemman $k_{p0,2.\theta}$ *-tekijän perusteella. Tekijöiden* $k_{p0,2.\theta}$ *ja* $k_{y.\theta}$ *keskinäinen suhde puolestaan vaihtelee voimakkaasti riippuen tarkastelun perustana olevasta lämpötilasta (tässä suojaamattoman 683 °C tai palosuojatun 267 °C).*

Tässä saatuja tuloksia ei siis voi yleistää. Yleisessä tapauksessa lujempana mitoitetun putken kestävyys on myös palotilanteessa parempi kuin alemman lujuusluokan putkella, edellyttäen että putket kuuluvat samaan poikkileikkausluokkaan.

6.8 Palosuojausmenetelmät

Teräsrakenne voidaan palosuojata joko eristämällä tai nostamalla sen kykyä varastoida lämpöä. Myös rakenteellisilla ratkaisuilla on mahdollista vaikuttaa palonkestävyysaikaan. Palosuojausmenetelmän valinnassa on syytä kiinnittää huomiota materiaalikustannusten lisäksi palosuojauksen asennus- ja huoltokustannuksiin.

Taulukko 6.7 Palosuojausmenetelmät

Periaate	Menetelmät
Lämmöneristäminen	- eristelevyt - palosuojamaalit - ruiskutettavat eristeet
Lämmönsitomiskyvyn parantaminen	- betonitäyttö - vesitäyttö - sprinklaus
Rakenteellinen palosuojaus	- alaslasketut katot - pilareiden sijoittaminen palotilan ulkopuolelle - pilareiden sijoittaminen seinän sisään

Taulukossa 6.7 esitetyt lämmöneristämiseen perustuvat menetelmät voidaan vielä jakaa niiden toteutustavan perusteella kuiviin ja märkiin menetelmiin. Kuiviin menetelmiin kuuluvat tuotteet kiinnitetään yleensä mekaanisilla kiinnikkeillä suojattavan rakenteen ympärille. Kuivia menetelmiä ovat mm. [2,3]:

- mineraalivillalevyt
- vermikuliittilevyt
- kalsiumsilikaattilevyt
- kipsilevyt ja -elementit
- puukipsilevyt sekä
- sementti-selluloosalevyt.

Märkiä palosuojausmenetelmiä ovat mm. [2,3]:

- mineraalikuituruiskutus
- vermikuliittiruiskutus
- palosuojamaali
- betoni ja
- vesi.

6.8.1 Palosuojaus eristämällä

Eristetty rakenne lämpenee hitaammin ja saavuttaa kriittisen lämpötilan myöhemmin kuin palosuojaamaton rakenne. Eristys voidaan toteuttaa joko levyillä tai ruiskutettavilla materiaaleilla. Palosuojamateriaalin lämmönjohtavuus λ_p riippuu palosuojamateriaalin lämpötilasta, mikä otetaan huomioon teräsosan lämpötilan laskennassa. Palosuojamateriaalin lämmönjohtavuuden lämpötilafunktioita on esitetty palosuojamateriaalien valmistajien esitteissä. Seuraavassa on kuvattu yleisimpien palosuojamateriaalien ominaisuuksia ja käyttöä.

Mineraalivillalevyt

Mineraalivillalevyt ovat tehokkaita lämmöneristeitä. Levyt soveltuvat palosuojaukseen, jos niiden sintraantumislämpötila on riittävän korkea, n. 800-1100 ºC. Palosuojaukseen käytettävien mineraalivillalevyjen tiheys on 100-400 kg/m^3 ja niiden paksuus vaihtelee välillä 10-120 mm.

Levyt kiinnitetään mekaanisesti tai liimaamalla. Mekaanisia kiinnikkeitä ovat teräspiikit, jotka hitsataan rakenneputken pintaan. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää ammuttavia nauloja. Levyt painetaan piikkien tai naulojen läpi putken pintaan ja ne kiinnitetään lukituslevyillä. Asennuksen yhteydessä on kiinnitettävä huomiota saumojen tiiviyteen. Jos levyt kiinnitetään liimaamalla, teräspinnan on oltava kuiva ja se on puhdistettava liasta ja öljystä.

Vermikuliittilevyt

Vermikuliittilevyjen perusaineena on paisutettu kiille ja sideaineena silikaattipitoinen materiaali kuten sementti. Levyjen palosuojakestävyys perustuu niiden sisältämään suureen vesimäärään sekä hyvään lämmöneristävyyteen myös korkeissa lämpötiloissa. Tulipalon alkuvaiheessa lämpöenergiaa kuluu levyjen sisältämän veden höyrystämiseen kuten kipsilevyissä.

Vermikuliittilevyjen tiheys on 350-500 kg/m^3 ja paksuus on 16-80 mm. Levyt kiinnitetään suojattavan rakenneputken ympärille koteloksi lämpöä kestävän laastin ja naulojen tai ruuvien avulla. Mekaanisessa kiinnityksessä jätetään suojakotelon ja putken väliin n. 3 mm ilmarako. Levyt voidaan kiinnittää myös liimaamalla. Tällöin alustan on oltava kuiva ja se on puhdistettava. Lämpötilan on oltava yli 0 ºC.

Kalsiumsilikaattilevyt

Kalsiumsilikaattilevyt ovat kuituvahvistettuja ja niiden paksuus on 6-65 mm. Levyjen tiheys on 430-950 kg/m^3 ja niitä voidaan työstää tavallisilla puuntyöstövälineillä. Kalsiumsilikaattilevyt kiinnitetään yleensä ruuveilla koteloksi rakenneputken ympärille.

Kipsilevyt ja -elementit

Kipsilevyn palosuojaominaisuudet perustuvat sen sisältämään suureen kidevesimäärään. Kideveden höyrystymisen aikana teräksen lämpötila pysyy 100 ºC:ssa. Kideveden haihduttua vahvistamaton kipsilevy rikkoutuu. Levyjä voidaan vahvistaa lisäämällä lasikuituja sideaineeksi.

Kipsilevyjen tiheys on 770-980 kg/m^3. Suojauksessa käytetään normaalisti 13 tai 15 mm levyjä, jotka voivat olla useampana kerroksena.

Levyt kiinnitetään rakenneputkeen ruuveilla. Kerroksia voi olla yhdestä neljään.

Kipsielementtejä valmistetaan kipsin, perliitin ja lasikuidun seoksesta. Elementtejä voidaan valmistaa esim. puoliympyrän muotoisina, jolloin niitä voidaan käyttää pyöreiden pilareiden palosuojaukseen. Elementit liimataan toisiinsa työmaalla.

Puukipsilevyt

Puukipsilevyt valmistetaan puukuidun ja kipsin seoksesta. Levyn tiheys on n. 1200 kg/m^3 ja sen paksuus on 15 tai 22 mm. Levyt kiinnitetään ruuveilla tai nauloilla.

Sementti-selluloosalevyt

Sementti-selluloosalevyn valmistuksessa käytetään sementin ja selluloosan lisäksi erilaisia mineraalisia aineosia. Levyn tiheys on n. 1100 kg/m^3. Levyjä käytetään kevyissä osastoivissa seinissä. Ne kiinnitetään suoraan teräsrunkoon ruuveilla tai vaihtoehtoisesti kiinnityslistojen avulla.

Mineraalikuituruiskutus

Mineraalivillakuidut ja sementti ruiskutetaan veden kanssa rakenneputken pintaan. Kiinnitysalustana voidaan käyttää myös sinkittyä teräsverkkoa, joka toimii samalla tukiraudoituksena. Valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10-60 mm.

Mineraalikuituruiskutuksen tiheys on 220-500 kg/m^3. Pinnoitteena voidaan käyttää esim. ruiskumaalausta tai rappausta. Koska palosuojauksen pinta on huokoinen, se on suojattava mekaanista kulutusta vastaan. Suojaukseen voidaan käyttää kovaa rappausta, lasikuitukangasta tai sopivaa levyrakennetta.

Vermikuliittiruiskutus

Vermikuliittiruiskutuksen runkoaineena käytetään vermikuliittia ja sideaineena sementtiä, kalkkia tai kipsiä sekä vettä. Massa ruiskutetaan suoraan teräspinnalle tai tukiverkolle. Valmiin kerroksen paksuus on yleensä 10-60 mm. Jotkut massat voidaan levittää myös rappaamalla käsin. Ruiskutuksen tiheys on 300-800 kg/m^3. Pinta voidaan suojata mekaaniselta kulutukselta samoilla menetelmillä kuin mineraalikuituruiskutus.

Palosuojamaalit

Palosuojamaalit soveltuvat yleensä käytettäviksi kuivissa sisätiloissa (rasitusluokka C1) [14].

Palosuojamaalit paisuvat ja muuttuvat vaahdoksi, kun lämpötila ylittää n. 250-300 ºC. Reaktiossa syntyvä usean senttimetrin paksuinen vaahtokerros hiiltyy palon aikana ja suojaa teräsrakennetta. Normaalissa käyttölämpötilassa palosuojamaali on kuten tavallinen maali. Kaikki maalityypit eivät kestä pitkäaikaista paloa, vaan hiiltynyt maalikerros voi alkaa kuoriutumaan teräsrakenteen pinnalta jo alle puolen tunnin kuluttua vaahdonmuodostuksesta. Palosuojamaalia voidaan käyttää, kun palonkestovaatimus on R15-R120 [2,3,14].

Palosuojamaali levitetään teräksen pinnalle siveltimellä, telalla tai ruiskulla. Kuivakalvonpaksuus on yleensä 0,2-3 mm. Maalaus voidaan tehdä joko konepajassa tai asennustyömaalla. Suojattavat profiilit on helpompi maalata konepajassa, mutta ne on suojattava hyvin kuljetuksen ajaksi, koska palosuojamaali vaurioituu helposti [3].

Palosuojamaaleja käytetään maalausjärjestelmänä, johon kuuluu teräsrakenteen esikäsittely, pohjamaalaus, palosuojamaalaus ja pintamaalaus. Maalausjärjestelmän kokonaispaksuus on tavallisesti 0,2-5,0 mm. Pintamaalin tulee olla palosuojamaalin kanssa käytettäväksi soveltuva, ja sille on käytettävä palosuojamaalin valmistajan suosittelemaa kalvonpaksuutta. Pintamaalaus voidaan uusia enintään neljä kertaa. Pintamaalikerroksen yhteenlaskettu paksuus saa olla korkeintaan 300 µm [14].

Palosuojamaalauksen etuna on pieni suojapaksuus. Lisäksi rakenteen ulkonäkö on samanlainen kuin tavanomaisessa korroosionestomaalauksessa. Palosuojamaalaus on kuitenkin huomattavasti kalliimpi kuin tavanomainen korroosionestomaalaus.

6.8.2 Palosuojaus teräsrakenteen lämmönsitomiskykyä nostamalla

Rakenneputken täyttäminen betonilla

Betonitäytteinen pilari on luonteva ja tehokas palosuojausmenetelmä. Rakenneputken ulkonäkö ja mitat eivät muutu betonitäytössä. Raudoituksen käyttö parantaa merkittävästi rakenneputken palonkestoaikaa. Raudoituksen määrällä voidaan säädellä pilarin kestävyyttä normaalilämpötilassa ja palotilanteessa. Monikerroksisessa rakennuksessa voidaan näin käyttää samaa pilarikokoa alhaalta ylös asti.

Asennuksessa voidaan hyödyntää rakenneputken keveyttä ja nopeaa asennettavuutta, sillä betonitäyttö tehdään yleensä vasta työmaalla. Normaalilämpötilassa betonitäytteinen rakenneputki toimii liittorakenteena ja palotilanteessa pääosa kuormista siirtyy betonitäytteen ja raudoituksen välityksellä.

Palotilannetta varten rakenneputkeen on tehtävä höyrynpoistoreijät. Palon aikana höyrynpaine pääsee purkautumaan reijistä eikä vahingoita putkea. Betonointi on suoritettava riittävän matalin valukerroksin ja massan tiivistäminen on tehtävä huolellisesti.

Betonitäytteisen liittopilarin mitoitusohjeet normaalilämpötilassa ja palotilanteessa on esitetty Eurocoden liittorakenneosissa EN 1994-1-1 ja EN 1994-1-2. Käsikirjamuodossa betonitäytteisen liittopilarin mitoitusohjeet on esitetty lähteessä [15]. Betonitäytteisen putkipilarin mitoittamiseksi on myös olemassa **ColGraph** mitoitusohjelma. Ohjelma laskee Teräsrakenneyhdistyksen julkaisun [15] mukaiset keskeisesti kuormitetun betonitäytteisen teräsliittopilarin kapasiteettikäyrät parametrisoituina. Tarkemmat tiedot ohjelmasta on esitetty liitteessä 11.7.

Rakenneputken täyttäminen vedellä

Vesitäyttö toimii rakenneputkessa jäähdyttävänä materiaalina. Tulipalon tuottama lämpöenergia kuluu rakenneputken sisällä olevan veden lämmittämiseen ja höyrystämiseen. Vesijäähdytyksen tehoa voidaan nostaa yhdistämällä rakenneputket yläpuoliseen vesisäiliöön. Palotilanteessa höyrystynyt vesi nousee säiliöön ja jäähtynyt vesi palaa säiliöstä rakenneputkiin. Jäätymisen estämiseksi jäähdytysveteen lisätään esim. kalsiumkarbonaattia tai kalsiumnitraattia.

Vesijäähdytys on tehokas palosuojausmenetelmä. Järjestämällä vedelle kierto rakenneputkien lämpötila pysyy yleensä 200 - 250 ºC koko palon ajan. Vesijäähdytys sopii vain pilareiden palosuojaukseen. Pilareihin liittyvien vedenkiertoputkien liitosten tiiviyteen on kiinnitettävä erityistä huomiota, jotta vuotoja ei esiintyisi. Vesijäähdytys ei muuta rakenneputken ulkonäköä, jos kiertoputkisto viedään rakenneputken sisäpuolella.

Sprinklaus

Sprinkleri on automaattinen palonsammutusjärjestelmä, joka alkaa toimia lämpötilan kohotessa palotilanteessa. Sprinklauksen ansiosta palotilan lämpötila ei nouse, kun sammutusjärjestelmä on alkanut toimia. Kansallisissa määräyksissä on ohjeita sprinklauksen huomioon ottamisesta palomitoituksessa. Sprinklausjärjestelmän asentamisen kannattavuus riippuu sen asennuskustannusten suhteesta palosuojauksen kustannuksiin.

Suomessa teräsrakenteiden palosuojaus voidaan tehdä vesiprinklauksella aina palonkestoluokkaan R90 asti VTT sertifikaatin [16] mukaisesti.

6.8.3 Palosuojaus rakenteellisin keinoin

Rakenneputkirakenteiden palosuojausta voidaan vähentää tai sitä ei tarvita, jos käytetään sopivia rakenteellisia ratkaisuja. Parantamalla rakenneosien ja liitosten palonkestävyyttä rakenteellisin keinoin, vältytään mahdolliselta palosuojamateriaalien käytöltä, joka nostaa materiaali- ja asennuskustannuksia. Rakenteellisen palosuojauksen soveltaminen on selvitettävä tapauskohtaisesti ja se on otettava huomioon jo suunnitteluvaiheessa.

Alaslaskettu katto

LVIS -asennusten vaatiman tilan vuoksi lasketaan huonekorkeutta alaslasketulla katolla. Alaslaskettu katto peittää putkiasennukset ja muut rakenteet. Alaslaskettua kattoa voidaan käyttää välitilassa olevien rakenteiden (esim. välipohjapalkit) palosuojaukseen. Alaslaskettu katto on silloin suunniteltava ja mitoitettava asianmukaisesti. Myös alakaton kiinnityksen yläpohjan on kestettävä palonaikaiset rasitukset. Käytännössä kiinnitysrakenne on usein mitoittava rakenneosa palotilanteessa.

Pilareiden sijoittaminen palotilan ulkopuolelle

Sijoittamalla pilarit ulkoseinien ulkopuolelle, voidaan palotilan lämpötilan nousu jättää huomioimatta pilarin mitoituksessa. Edellytyksenä on pilarin sijoittaminen riittävän etäälle ikkuna-aukoista. Palotilanteessa ikkuna-aukkojen kautta poistuvat kuumat savukaasut ja liekit nostavat myös lähellä olevien teräspilareiden lämpötilaa. Ikkuna-aukkoja on yleensä niin tiheässä, että pilarit on suojattava liekkisuojalla. Liekkisuojan materiaalina voidaan käyttää esim. teräsohutlevyä.

Pilareiden sijoittaminen seinän sisään

Pilarin palolle altis pinta-ala pienenee, jos se voidaan sijoittaa osittain tai kokonaan seinärakenteen palosuojamateriaalin sisään. Seinärakenteessa pilareiden kohdalla käytettävien materiaalien on oltava palonkestäviä, jotta niiden suojavaikutus voidaan ottaa huomioon. Ongelmana voi olla jäykistävien rakenneosien liittäminen seinän sisällä olevaan pilariin.

6.9 Lähdeluettelo

[1] Inha T., Kallioniemi P. 1991. Teräsrakenteiden palosuunnittelu.
Teräsrakenneyhdistys ry. 224 s.

[2] Inha T., Iso-Mustajärvi P. 1997. Teräsrakenteiden palosuojaus. Julkaisu 72.
Tampereen teknillinen korkeakoulu. Rakennustekniikan osasto. 71 s.

[3] Inha T., Iso-Mustajärvi P. 1999. Kantavien teräsrakenteiden palosuojaus.
Rakennustieto Oy. 114 s.

[4] SFS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008. (EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008)
Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
Sisältää myös muutokset A1:2005 ja korjaukset AC:2008.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 185 s.

[4a] SFS-EN 1990: AC:2010. (EN 1990: AC:2010)
Korjausosa AC:2010 standardiin EN 1990.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 22 s.

[5] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 7 s.

[6] SFS-EN 1991-1-2:2003. (EN 1991-1-2:2002)
Eurocode 1. Rakenteiden kuormat.
Osa 1-2: Yleiset kuormat. Palolle altistettujen rakenteiden kuormat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 103 s.

[7] SFS-EN 1991-1-2: AC:2009. (EN 1991-1-2: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1991-1-2.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 3 s.

[8] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-2.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[9] SFS-EN 1993-1-2:2005. (EN 1993-1-2:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 76 s.

[10] SFS-EN 1993-1-2:2005+AC:2005. (EN 1993-1-2:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 81 s.

[11] SFS-EN 1993-1-2: AC:2009. (EN 1993-1-2: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-2.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 3 s.

[12] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-2.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 3 s.

[13] Kouhi J. 20xx. “Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu:
Osa 1-2: Rakenteen palomitoitus.
Sovellutusohjeita, taustatietoja, kommentteja, tulkintoja, selvennyksiä,
kansallinen liite ja sen taustoja, oppi- ja opetusaineistoa, esimerkkejä.”
Teräsrakenneyhdistys ry. Työversio 2009.

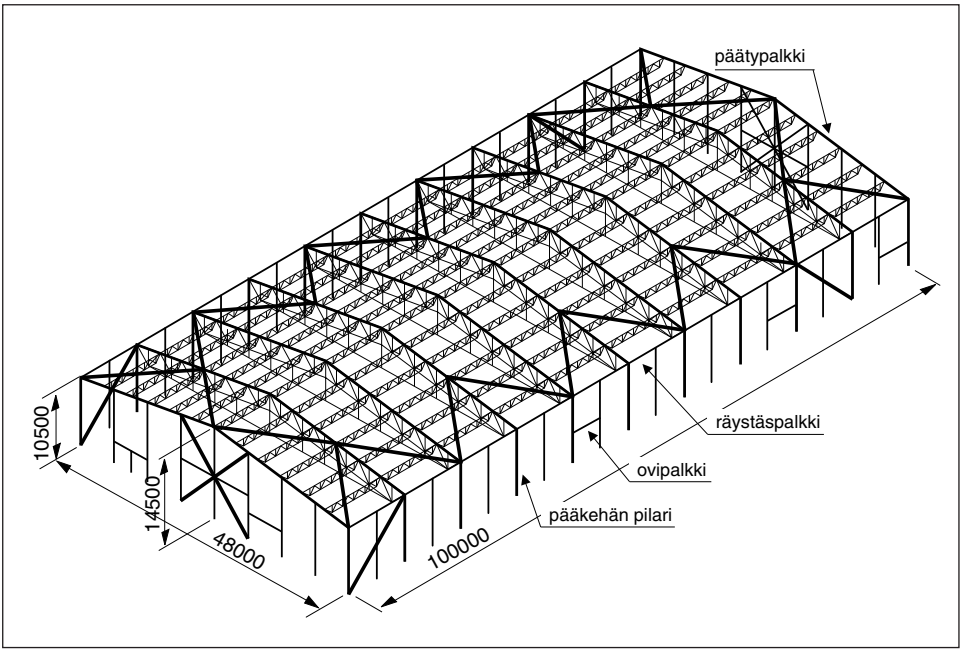
[14] Teräsrakenteiden palosuojamaalaus. 2007.
Teräsrakenneyhdistys ry. 18 s.

[15] Betonitäytteisen teräsliittopilarin suunnitteluohje. 2004.
Teräsrakenneyhdistys ry. 232 s.

[16] VTT-sertifikaatti Nro VTT-C-4921-10:
Tuotteen nimi: Vesisprinklerijärjestelmällä palosuojattu teräsrakenne.
Valmistaja: Ruukki Construction Oy.
Myöntämispäivä 14.1.2010. Päivitetty 29.4.2011. VTT.

7. RAKENNEPUTKIRAKENTEEN SUUNNITTELU

Rakenneputki on monipuolinen komponentti, jota voidaan käyttää useissa kohdissa rakennusta. Parhaimmillaan rakenneputket ovat pilareissa ja ristikoissa. Rakenneputkirakenteen suunnittelu on yksinkertaista ja helppoa, koska hyvän vääntöjäykkyyden vuoksi kiepahdus ja vääntönurjahdus ovat harvoin mitoittavia. Tämä mahdollistaa myös laskentaohjelmien tehokkaan soveltamisen rakenneputkien mitoitukseen. Tässä luvussa tarkastellaan rakenneputkirakenteen suunnitteluprosessia kokonaisuudessaan. Suunnittelun kannalta tärkeitä asioita käsitellään ensin laajemmin ja sitten esitetään esimerkkikohteen suunnitteluratkaisu.



Kuva 7.1 Esimerkkikohde

Esimerkkikohde on kuvan 7.1 mukainen näyttelyrakennus. Rakennuksessa järjestetään messu- ja kokoustilaisuuksia.

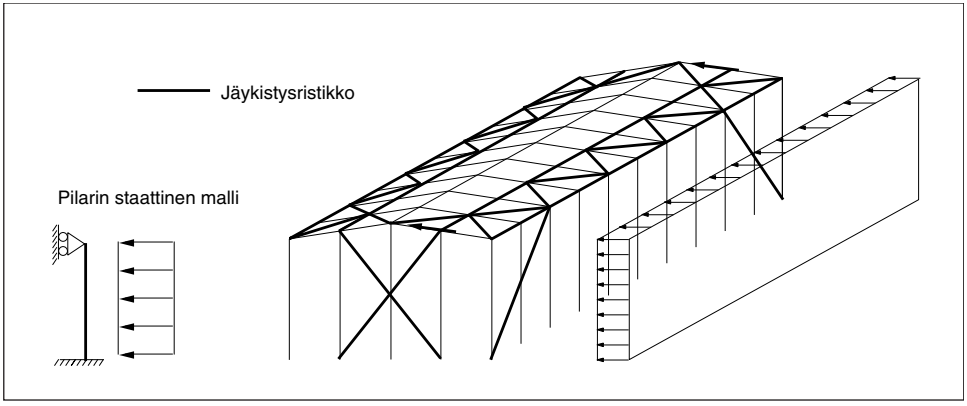
Rakennuksen runko muodostuu rakenneputkista valmistetuista pilareista sekä primääri- ja sekundääriristikoista. Rakennus on jäykistetty katossa olevalla vaakaristikolla sekä seinien tuulijäykistysristikoilla.

Kohteen pilareina käytetään rakenneputkia, koska seinärakenne on toteutettu kevyillä villaelementeillä. Villaelementit eivät tue pilareita heikomman akselin suhteen. Rakenneputkella on riittävästi vääntöjäykkyyttä ja taivutusjäykkyyttä heikomman akselin suunnassa, joten se on edullinen vaihtoehto tässä tapauksessa.

Kattokannattajaksi kannattaa yleensä valita normaali K-, N- tai KT-tyyppinen putkiristikko (kohta 7.4). Näissä ristikoissa paarteet ja uumasauvat ovat rakenneputkia ja uumasauvojen liitokset ovat yksinkertaisia. Tässä suunnitteluesimerkissä kattokannattajaksi on kuitenkin valittu vetotangollinen ristikkorakenne, koska kohde sijaitsee hankalien kuljetusolosuhteiden takana. Kuljetuksen takia rakenne-elementin korkeus saa tässä esimerkkikohteessa olla korkeintaan 2,5 m. Vetotankoratkaisussa voidaan koko rakenteen korkeus ottaa huomioon mitoituksessa ja näin rakenteesta saadaan kevyempi. Ristikko on jaettu asennuslohkoiksi siten, että asennusliitos on katon harjan kohdalla.

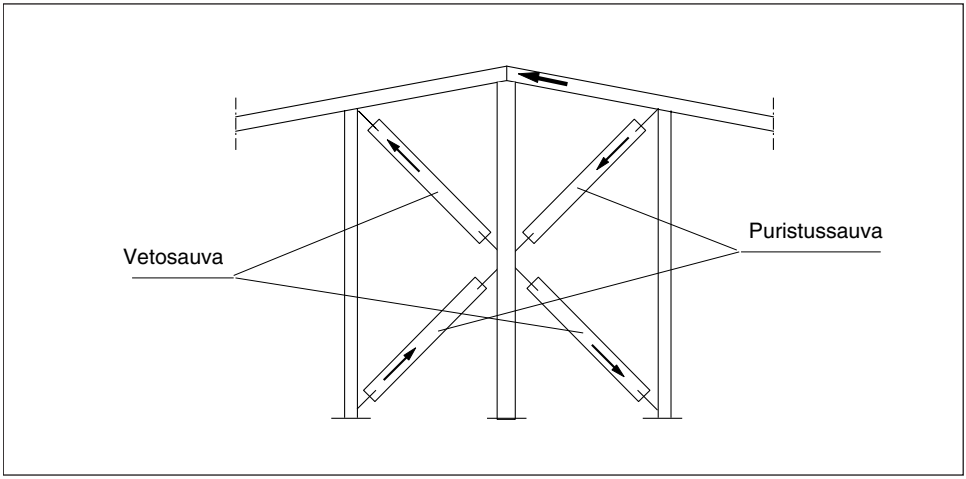
Kehäjaoksi on valittu 10 m, koska se johtaa esimerkkikohteen mittasuhteilla edulliseen ratkaisuun. Pääkehien väliin on suunniteltu pituussuuntaiset orsiristikot 4 m:n jaolla, jolloin katon kantavaksi muotolevyksi voidaan valita matala profiili. Lisäksi orsiristikoilla pystytään helposti tukemaan pääristikon ylä- ja alapaarre.

Rakennus on jäykistetty kattotasossa sijaisevilla vaakasuuntaisilla jäykistysristikoilla (kuva 7.2). Tällä ratkaisulla on saatu perustuksia sekä pilareiden ulkomittoja pienemmiksi. Jäykisteissä on käytetty rakenneputkia, koska niiden puristuskestävyys on erinomainen.



Kuva 7.2 Esimerkkikohteen vaakasuuntainen jäykistys (kaikkia pilareita ei ole esitetty)

Ulkoseinillä on rakenneputkista valmistetut jäykistyselementit, jotka toimivat vedettyinä rakenteina. Rakenneputki on tässäkin edullinen, koska sen jäykkyyden vuoksi asennus helpottuu ja jäykistyselementti säilyttää hyvin muotonsa. Perustusten kannalta kannattaisi jäykisteet kuitenkin mitoittaa sekä veto- että puristussauvoina, jolloin perustuksille tuleva kuormitus voidaan jakaa kahteen osaan (kuva 7.3).



Kuva 7.3 Lyhyen sivun seinän jäykisteet (harjalla oleva kuorma siirtyy vetodiagonaalille)

Pitkän sivun tuulipilarit on tuettu yläpäästään sivusiirtymättömäksi kattojäykisteiden avulla. Tuulipilareiden yläpäiden tukivoima siirretään pääkehille katon muotolevyn välityksellä.

7.1 Rakenteen kuormat

Rakenteiden kuormat käsitellään Eurocoden osissa EN 1990 ja EN 1991 seuraavasti:

EN 1990 Suunnittelun perusteet
EN 1991-1-1 Yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat
EN 1991-1-2 Palolle altistettujen rakenteiden rasitukset
EN 1991-1-3 Lumikuormat
EN 1991-1-4 Tuulikuormat
EN 1991-1-5 Lämpötilakuormat
EN 1991-1-6 Toteuttamisen aikaiset kuormat
EN 1991-1-7 Onnettomuuskuormat
EN 1991-2 Siltojen liikennekuormat
EN 1991-3 Nostureiden ja muiden koneiden aiheuttamat kuormat
EN 1991-4 Siilojen ja säiliöiden kuormat

Aiheen laajuuden takia tässä käsikirjassa ei varsinaisesti käsitellä kuormien määrittämistä, vaan asiaa tarkastellaan vain hyvin pintapuolisesti edellä esitettyyn esimerkkikohteeseen tarvittavilta osin.

Rakenteiden kuormitukset jaetaan lähteessä [1,1a] pysyviin kuormiin (G), muuttuviin kuormiin (Q) ja onnettomuuskuormiin (A). Pysyviä kuormia ovat rakenteiden oma paino sekä rakennukseen kiinteästi liittyvien laitteiden paino. Muuttuvia kuormia ovat hyötykuormat, lumikuormat sekä tuulikuormat. Onnettomuuskuormia ovat mm. palokuorma ja maanjäristyskuorma.

Tässä käsikirjassa ei käsitellä palotilanteen lisäksi muita onnettomuustilanteita (palotilanne, ks. luku 6). Vientiprojekteissa saattaa tulla eteen tilanteita, jolloin joudutaan käsittelemään maanjäristyskuormia. Maanjäristysmitoitus käsitellään Eurocoden osassa EN 1998, ja lähdeaineistoa kyseiseen Eurocoden osaan löytyy verkosta osoitteista [www.eurocodes.fi] ja [http://eurocodes.jrc.ec.europa.eu].

7.1.1 Oma paino ja hyötykuormat

Talonrakenteiden oma paino ja hyötykuormat käsitellään pääosin Eurocoden osassa EN 1991-1-1 [3,4].

Rakenteiden oman painon aiheuttama kuormitus lasketaan yleensä nimellisten tiheyksien ja nimellisten mittojen (piirustuksissa esitettävien mittojen) avulla. Esimerkiksi teräksen tiheytenä käytetään 7850 kg/m^3 ja normaaliraudoitetun teräsbetonin tiheytenä 2500 kg/m^3.

Ihmisten, koneiden ja liikuteltavien tavaroiden aiheuttama kuormitus katsotaan hyötykuormaksi. Myös teollisuuslaitteiden oma paino katsotaan yleensä hyötykuormaksi. Lähteessä [3,4] rakennusten tilat on jaettu viiteen eri luokkaan (luokat A...E), jotka voivat vielä jakautua alaluokkiin. Näille luokille on määritelty lattioiden hyötykuormat, joita käytetään rakenneosien mitoituksessa. Joissakin tapauksissa kuormituksia voi pienentää lähteessä [3,4] ja sen kansallisessa liitteessä [5] esitetyllä tavalla. Palkkien kuormituksen pienennyskertoimeen vaikuttaa kuormituspinta-ala ja pilareiden kuormituksen pienennyskerroin riippuu kerrosten lukumäärästä. Teollisuusrakennusten hyötykuorma määräytyy rakennuksessa käytettävien koneiden ja laitteiden sekä rakennuksessa liikuteltavien tavaroiden painosta.

7.1.2 Lumikuorma

Rakennusten kattojen lumikuormat käsitellään Eurocoden osassa EN 1991-1-3 [6,7].

Katon lumikuorma määritetään pystysuorana kuormana katon vaakaprojektiota kohti seuraavasti [6,7]:

$$s = \mu_i C_e C_t s_k \qquad (7.1)$$

missä
- μ_i on lumikuorman muotokerroin
- C_e on tuulensuojaisuuskerroin
- C_t on lämpökerroin
- s_k on maassa olevan lumikuorman ominaisarvo

Taulukossa 7.1 on esitetty Eurocoden suositusarvot tuulensuojaisuuskertoimelle eri maastotyyppien yhteydessä. Lopulliset arvot määritetään kansallisessa liitteessä.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-3 [8]:

Suomessa käytetään tuulensuojaisuuskertoimelle C_e taulukon 7.1 mukaisia arvoja.

Katon lämpökertoimelle käytetään yleensä arvoa C_t = 1,0. Lopullinen arvo määritetään kansallisessa liitteessä.

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-3 [8]:

Mikäli kattorakenteen lämmöneristys on vähäinen, voidaan lämpökerrointa C_t pienentää tarkemman selvityksen perusteella. Lumikuormana s_k tulee käyttää kuitenkin vähintään arvoa 0,5 kN/m^2.

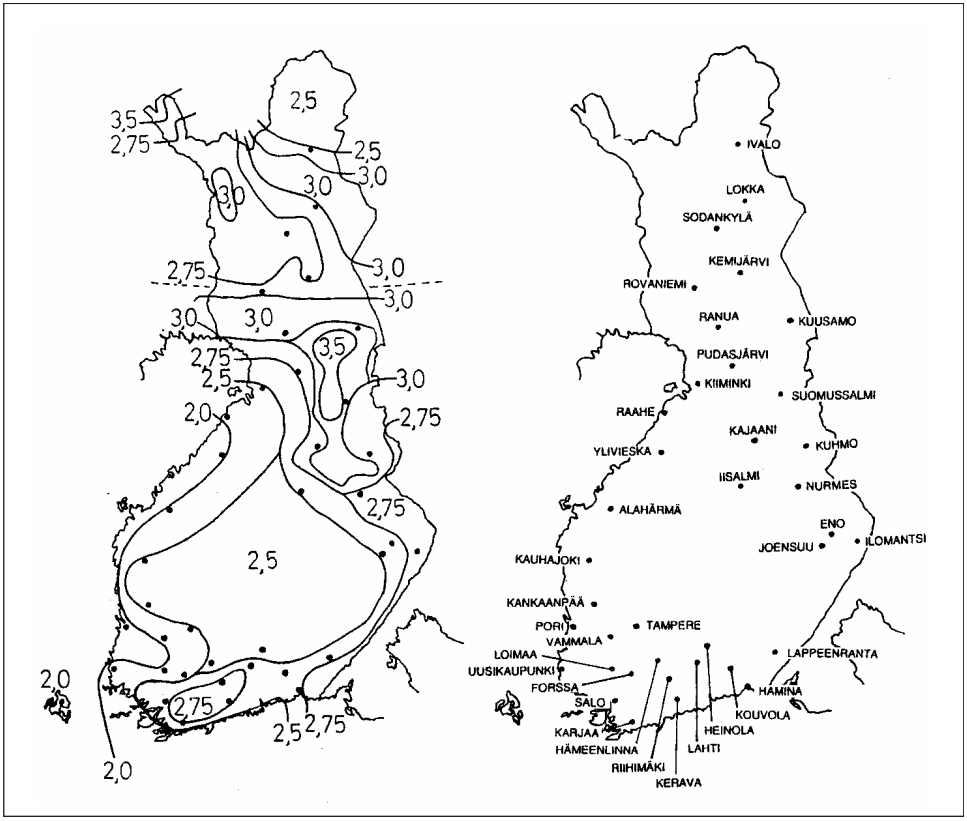
Taulukko 7.1 Tuulensuojaisuuskerroin C_e [6,7,8]

Maastotyyppi	Eurocode	Suomi
	C_e	C_e
Tuulinen [a]	0,8	0,8 [*]
Normaali [b]	1,0	1,0
Suojainen [c]	1,2	1,0
a) **Tuulinen maasto:** laakea, esteetön, joka puolelle avoin alue, jolloin maasto, korkeat rakennuskohteet tai puut eivät suojaa tai suojaavat vain vähän b) **Normaali maasto:** alue, jolla rakennuskohteeseen vaikuttava tuuli ei maaston, muiden rakennuskohteiden tai puiden takia huomattavasti poista lunta c) **Suojainen maasto:** alue, jolla tarkasteltava rakennuskohde on huomattavasti alempana kuin ympäröivä maasto tai se on korkeiden puiden tai itseään korkeampien rakennuskohteiden ympäröimä		
*) Katoilla, joiden lyhyempi sivumitta on yli 50 m, kerroin C_e on kuitenkin 1,0		
Taulukossa on esitetty Eurocoden osan EN 1991-1-3 mukaiset arvot ja Suomen kansallisen liitteen mukaiset arvot. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**		

Maassa olevan lumikuorman ominaisarvot s_k esitetään Eurocoden osan EN 1991-1-3 kunkin maan kansallisessa liitteessä. Eurocoden osan EN 1991-1-3 liitteessä C esitetyt eri maiden lumikartat ovat ainoastaan viitteellisiä.

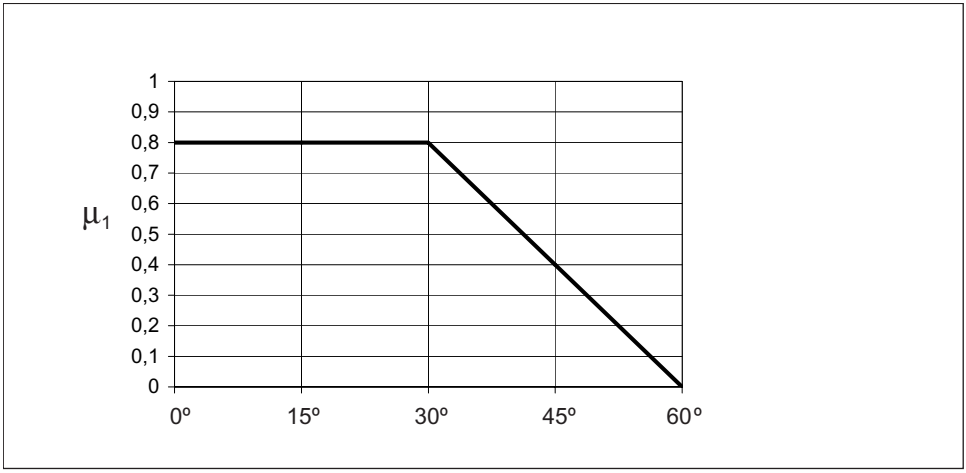
Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-3 [8]:

Maassa olevan lumikuorman ominaisarvot s_k määritetään kuvasssa 7.4 esitetystä lumikartasta. Kuvassa esitetyt arvot ovat minimiarvoja. Tapauskohtaisesti voidaan sopia suurempien arvojen käytöstä.



Kuva 7.4 Lumen ominaisarvot maan pinnalla Suomessa (kN/m^2).
Väliarvot interpoloidaan lineaarisesti suhteessa etäisyyksiin lähimmistä käyristä [8]

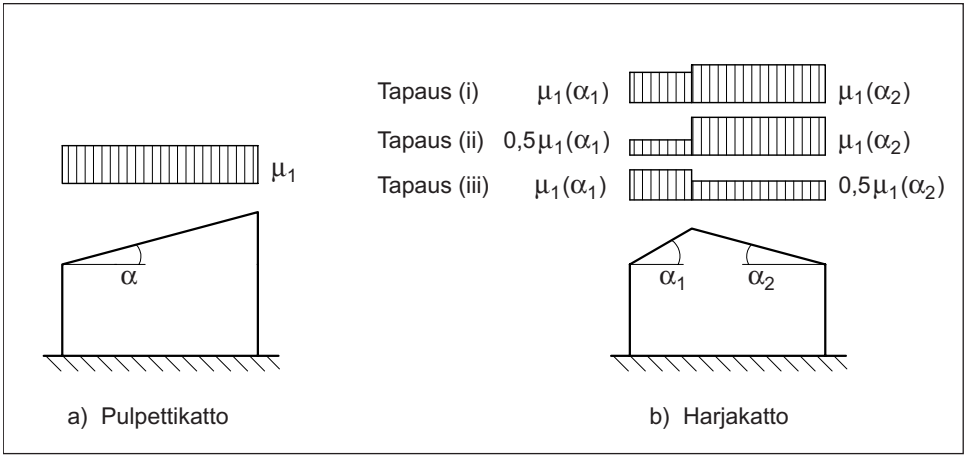
Lumikuorman muotokertoimen μ_i arvoon vaikuttaa katon muoto ja tarkasteltava kuormitusjärjestely. Pulpetti- ja harjakatoille käytetään muotokerrointa μ_1, jonka arvot on esitetty kuvassa 7.5 ja taulukossa 7.2. Pulpetti- ja harjakatoille suoritettavat kuormitusjärjestelyt on esitetty kuvassa 7.6. Muut kattomuodot, ks. EN 1991-1-3.



Kuva 7.5 Lumikuorman muotokerroin pulpetti- ja harjakatoille [6,7]

Taulukko 7.2 Lumikuorman muotokerroin pulpetti- ja harjakatoille [6,7]

Katon kaltevuuskulma α	$0° \le \alpha \le 30°$	$30° < \alpha < 60°$	$\alpha \ge 60°$
μ_1	0,8	$0{,}8(60 - \alpha)/30$	0,0
Taulukon arvot ovat voimassa, kun lunta ei estetä liukumasta katolta. Jos katolla on lumieste tai muu liukumiseste, tai jos katon alaräystäällä on kaide, lumikuorman muotokertoimelle käytetään vähintään arvoa 0,8.			



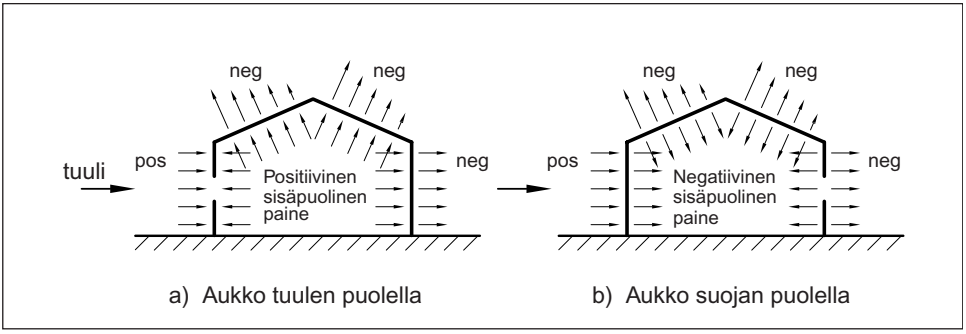
Kuva 7.6 Tarkasteltavat kuormitusjärjestelyt pulpetti- ja harjakatoille [6,7]

7.1.3 Tuulikuorma

Tuulikuormat käsitellään Eurocoden osassa EN 1991-1-4 [9...12].

Tuulikuormat vaikuttavat rakenteen pintaan sitä vastaan kohtisuorina voimina. Tuulikuormat vaikuttavat suoraan suljettujen rakenteiden ulkopintoihin, mutta voivat vaikuttaa myös suoraan tai epäsuorasti rakenteiden sisäpintoihin (kuva 7.7). Lisäksi, tuulen pyyhkäistessä suuria rakennepintoja, pinnan suuntaiset kitkavoimat voivat olla merkittäviä [9...12].

Seinään, kattoon tai rakenneosaan vaikuttava nettopaine on vastakkaisiin pintoihin vaikuttavien paineiden erotus, kun paineiden etumerkit otetaan huomioon. Kuvan 7.7 mukaisesti pintaa kohti suuntautuvaa painetta pidetään positiivisena ja pinnasta pois päin suuntautuvaa imua negatiivisena [9...12].



Kuva 7.7 Pintoihin vaikuttavat paineet [9...12]

Pintoihin vaikuttava paine lasketaan seuraavasti [9...12]:

$$w_e = q_p(z_e) \cdot c_{pe} \qquad \textit{ulkopintoihin vaikuttava paine} \qquad (7.2)$$

$$w_i = q_p(z_i) \cdot c_{pi} \qquad \textit{sisäpintoihin vaikuttava paine} \qquad (7.3)$$

missä
- $q_p(z_e)$ on puuskanopeuspaine (ulkopuolinen)
- z_e on ulkopuolisen paineen nopeuspainekorkeus
- c_{pe} on ulkopuolisen paineen painekerroin (taulukko 7.4)
- $q_p(z_i)$ on puuskanopeuspaine (sisäpuolinen)
- z_i on sisäpuolisen paineen nopeuspainekorkeus
- c_{pi} on sisäpuolisen paineen painekerroin

Kaavoissa (7.2) ja (7.3) tarvittava puuskanopeuspaine lasketaan seuraavasti [9...12]:

$$q_p(z) = c_e(z) \cdot q_b \qquad (7.4)$$

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 \qquad (7.5)$$

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b.0} \qquad (7.6)$$

missä $c_e(z)$ on altistuskerroin, joka riippuu tarkasteltavan pinnan maasta mitatusta korkeudesta sekä ympäröivän maaston muodosta ja rosoisuudesta (maastoluokasta), ks. taulukko 7.3 ja kuva 7.8

q_b on nopeuspaineen perusarvo

ρ on ilman tiheys, ρ = 1,25 kg/m^3

v_b on tuulennopeuden perusarvo

c_{dir} on eri tuulensuuntia vastaava suuntakerroin, jonka arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvo on c_{dir} = 1,0.

c_{season} on vuodenaikakerroin, jonka arvo voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Eurocoden suositusarvo on c_{season} = 1,0.

$v_{b.0}$ on kansallisessa liitteessä esitettävä tuulennopeuden modifioimaton perusarvo, joka on ominaisarvo joka määritetään tuulennopeuden 10 minuutin keskiarvona riippumatta tuulen suunnasta ja vuodenajasta 10 m korkeudella maastoluokassa II (aukea maaseutumaasto), ja jonka vuotuinen ylittymistodennäköisyys on 2 % (= keskimääräinen toistumisjakso on 50 vuotta).

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-4 [13]:

Tuulennopeuden modifioimaton perusarvo on Suomessa $v_{b.0}$ = 21 m/s. Tämä arvo pätee koko maassa meri- ja tunturialueet mukaan lukien.

Kansallisessa liitteessä ei ole esitetty arvoja suuntakertoimelle ja vuodenaikakertoimelle, joten niille voidaan käyttää Eurocoden suositusarvoja c_{dir} = 1,0 ja c_{season} = 1,0.

Kaavoissa (7.2) ja (7.3) tarvittavat puuskanopeuspaine $q_p(z)$ ja painekertoimet c_p vaihtelevat saman rakennuksen eri kohdissa ja korkeuksilla, joten käytännössä rakennuksen pinnat joudutaan tarkastelemaan eri vyöhykkeisiin ja korkeuskaistoihin jaettuna jäljempänä esitetyn mukaisesti.

Rakenteeseen vaikuttava tuulikuorma F_w voidaan määrittää muodostamalla vektorisumma seuraavista ulkopuolisista ja sisäpuolisista paineista sekä kitkakuormista lasketuista kuormista $F_{w.e}$ ja $F_{w.i}$ ja F_{fr} [9...12]:

$$F_{w.e} = c_s c_d \cdot \sum_{pinnat} (w_e \cdot A_{ref}) \qquad \textit{ulkopuoliset kuormat} \qquad (7.7)$$

$$F_{w.i} = \sum_{pinnat} (w_i \cdot A_{ref}) \qquad \textit{sisäpuoliset kuormat} \qquad (7.8)$$

$$F_{fr} = c_{fr} \cdot q_p(z_e) \cdot A_{fr} \qquad \textit{kitkakuormat} \qquad (7.9)$$

missä $c_s c_d$ on rakennekerroin, jolle voidaan käyttää yksinkertaistettua arvoa $c_s c_d$ = 1,0. Tarkemmat arvot, ks. EN 1991-1-4

A_{ref} on yksittäisen pinnan tuulta vastaan kohtisuora pinta-ala

c_{fr} on kitkakerroin, ks. EN 1991-1-4

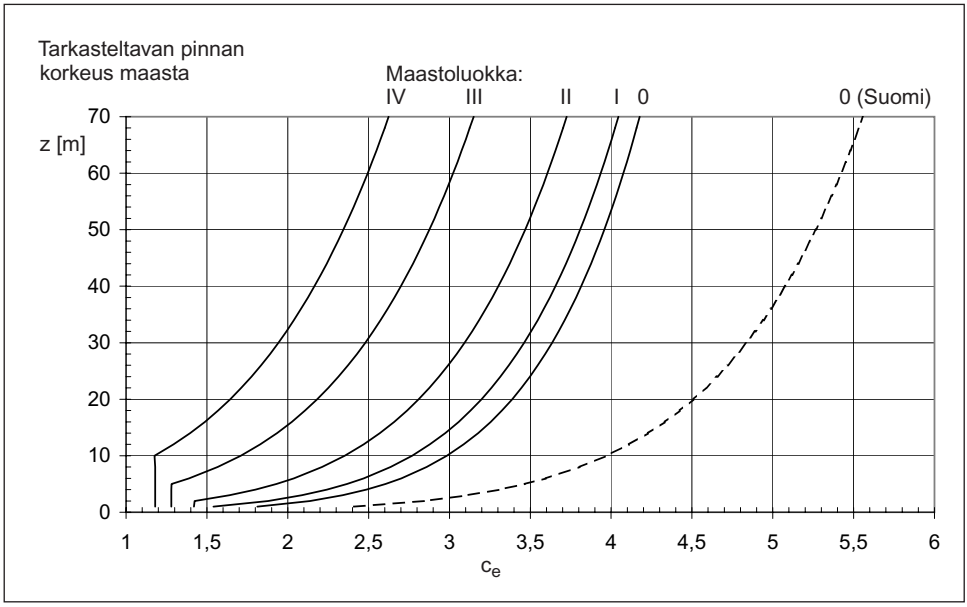
A_{fr} on tuulen suuntainen ulkopinta

w_e, w_i ja $q_p(z_e)$ lasketaan kaavojen (7.2) - (7.6) mukaisesti

Tuulesta syntyvän kitkan (kaava (7.9)) vaikutukset pintaan voidaan jättää huomioon ottamatta, kun kaikkien tuulen suuntaisten (tai lähes tuulen suuntaisten) pintojen kokonaisala on enintään 4 kertaa kaikkien tuulta vastaan kohtisuorien (tuulenpuoleisten ja suojanpuoleisten) ulkopintojen kokonaisala [9...12].

Taulukko 7.3 Maastoluokat [9...12]

Maastoluokka	Maastoluokan kuvaus
0	Avomeri tai merelle avoin rannikko
I	Järvet, tai tasanko jolla on enintään vähäistä kasvillisuutta eikä tuuliesteitä
II	Alue, jolla on matalaa heinää tai siihen verrattavaa kasvillisuutta ja erillisiä esteitä (puita, rakennuksia), joiden etäisyys toisistaan on vähintään 20 kertaa esteen korkeus
III	Alueet, joilla on säännöllinen kasvipeite tai rakennuksia tai erillisiä tuuliesteitä, joiden keskinäinen etäisyys on enintään 20 kertaa esteen korkeus (kuten kylät, esikaupunkialueet, pysyvä metsä)
IV	Alueet, joiden pinta-alasta vähintään 15 % on rakennusten peitossa ja niiden keskimääräinen korkeus ylittää 15 m



Kuva 7.8 Altistuskerroin c_e , kun rakennus sijaitsee tasamaalla jolloin c_0 **= 1,0** (pinnanmuotokerroin) ja k_I **= 1,0** (pyörteisyyskerroin) [9...13]

Ulkopuolisen painekertoimen c_{pe} arvot voidaan esittää kansallisessa liitteessä. Taulukossa 7.4 on esitetty Eurocoden suositusarvot, kun rakennus on pohjaltaan suorakaiteen muotoinen, ja kun seinän pinta-ala A_{ref} on suurempi kuin 10 m^2. Eurocoden osassa EN 1991-1-4 on annettu painekertoimen c_{pe} arvot, kun A_{ref} on pienempi kuin 10 m^2. Painekertoimen c_{pe} määrittämistä varten rakennuksen eri sivut jaetaan vyöhykkeisiin A...E kuvassa 7.9 esitetyn mukaisesti [9...12].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-4 [13]:

Kansallisessa liitteessä ei ole esitetty painekertoimen c_{pe} arvoja, joten sille käytetään taulukossa 7.4 esitettyjä Eurocoden suositusarvoja.

Kattojen painekertoimet eri kattomuodoille, ks. EN 1991-1-4.

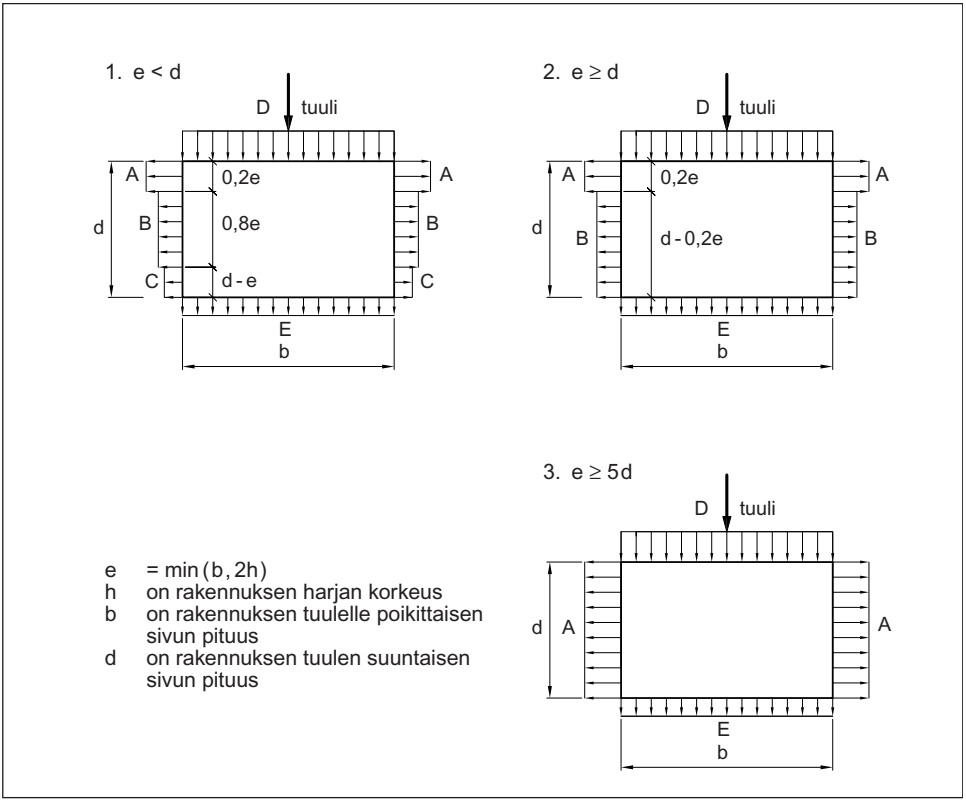
Taulukko 7.4 Ulkopuolisen painekertoimen c_{pe} suositusarvot pohjaltaan suorakaiteen muotoisten rakennusten pystyseinille, kun $A_{ref} \geq 10$ m^2 [9...13]

h/d [a]	Vyöhyke				
	A	B	C	D	E
5	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,7
1	-1,2	-0,8	-0,5	+0,8	-0,5
≤ 0,25	-1,2	-0,8	-0,5	+0,7	-0,3

a) Mittasuhteen h/d väliarvoja vastaavat arvot saadaan lineaarisesti interpoloimalla. Mitat h ja d, ks. kuva 7.9.

Taulukon arvot soveltuvat myös sellaisten rakennusten seinille, joiden vesikatto on kalteva, kuten harjakatto tai pulpettikatto.

Taulukossa on esitetty Eurocoden osan EN 1991-1-4 mukaiset suositusarvot, joita voidaan käyttää myös Suomessa. **Maakohtaiset vaatimukset on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).**



Kuva 7.9 Pystyseiniä koskevat vyöhykkeet A...E ylhäältä katsottuna [9...12]

Pohjaltaan suorakaiteen muotoisten rakennusten tuulenpuoleinen seinä (vyöhyke D, ks. kuva 7.9) jaetaan tarkastelua varten lisäksi pystysuunnassa eri tuulikuormakaistoihin seuraavasti (kuva 7.10):

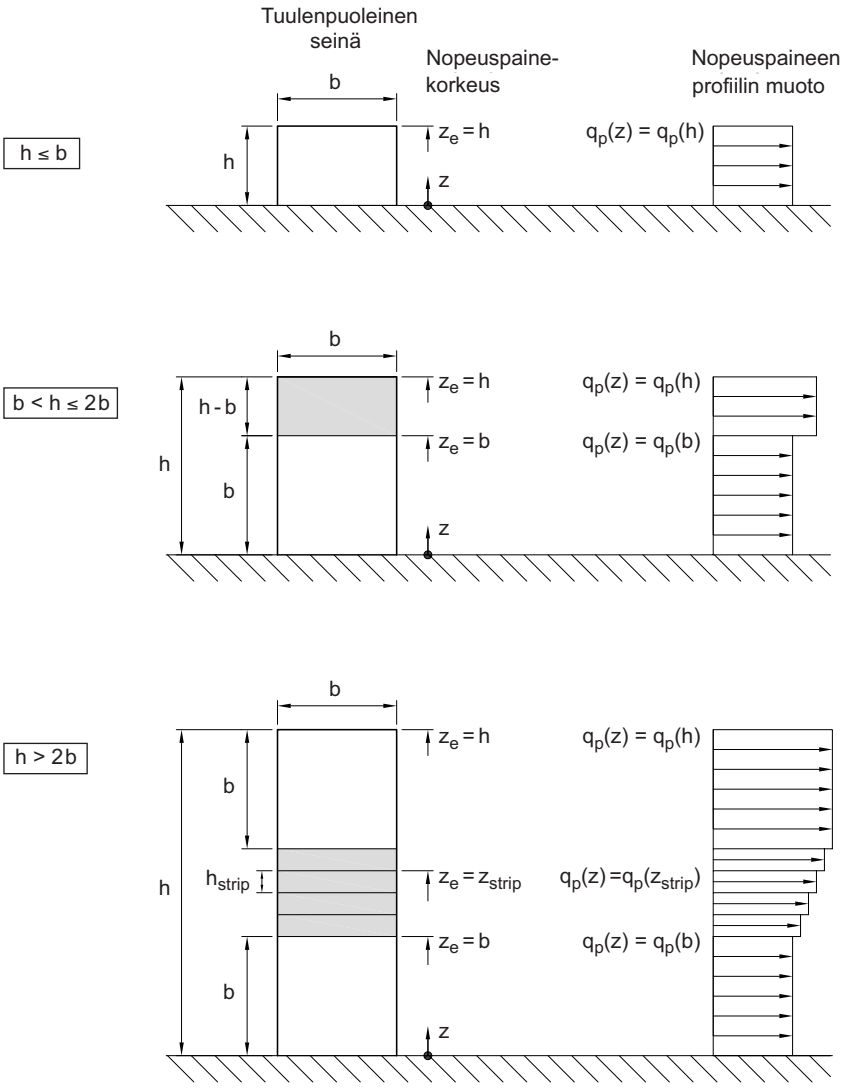
- **kun h ≤ b:**
  rakennuksen tuulenpuoleista seinää tarkastellaan pystysuunnassa yhtenä kaistana

- **kun b < h ≤ 2b:**
  rakennuksen tuulenpuoleista seinää voidaan tarkastella kahtena kaistana, joista
  - alempi ulottuu maanpinnasta korkeudelle b ja
  - yläkaista tästä ylöspäin

- **kun h > 2b:**
  rakennuksen tuulenpuoleista seinää voidaan tarkastella useina kaistoina, joista
  - alin ulottuu maanpinnasta korkeudelle b
  - yläkaista ulottuu räystäältä mitan b verran alaspäin ja
  - ylimmän ja alimman kaistan välinen alue voidaan jakaa vaakakaistoihin, joiden korkeus on h_{strip} kuvan 7.10 mukaisesti

Suojanpuoleisen seinän ja sivuseinien (kuvan 7.9 mukaisten vyöhykkeiden A, B, C ja E) nopeuspaineen jakautumista koskevat säännöt voidaan esittää kansallisessa liitteessä, tai ne voidaan määritellä hankekohtaisesti. Eurocodessa suositellaan käyttämään nopeuspainekorkeutena rakennuksen korkeutta [9...12].

Suomen kansallinen liite standardiin EN 1991-1-4 [13]:
Kansallisessa liitteessä ei ole esitetty tätä koskevia ohjeita.



HUOM: Nopeuspaineen oletetaan olevan vakio kullakin tarkasteltavalla vaakakaistalla.

Kuva 7.10 Rakennuksen tuulenpuoleisen seinän (vyöhyke D) jakaminen tarkasteltaviin vaakakaistoihin, ja niiden nopeuspainekorkeuden z_e määrittäminen [9...12]

7.1.4 Kuormayhdistelmät

Murtorajatilan kuormayhdistelmät on esitetty luvussa 2. Käyttörajatilassa määritellään seuraavat kuormayhdistelmät [1,1a]:

$$\sum_{j \geq 1} G_{k.j} \,''+''\, Q_{k.1} \,''+''\, \sum_{i > 1} \psi_{0.i} Q_{k.i} \qquad \textit{ominaisyhdistelmä (characteristic)} \qquad (7.10)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k.j} \,''+''\, \psi_{1.1} Q_{k.1} \,''+''\, \sum_{i > 1} \psi_{2.i} Q_{k.i} \qquad \textit{tavallinen yhdistelmä (frequent)} \qquad (7.11)$$

$$\sum_{j \geq 1} G_{k.j} \,''+''\, \sum_{i \geq 1} \psi_{2.i} Q_{k.i} \qquad \textit{pitkäaikaisyhdistelmä (quasi-permanent)} \qquad (7.12)$$

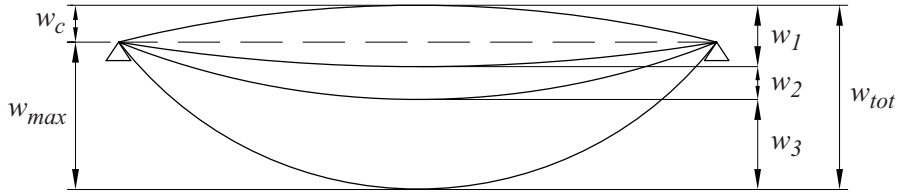
missä
- $''+''$ tarkoittaa lausekkeen termien yhdistämistä (kuormien samanaikaista vaikuttamista)
- j on pysyvän kuorman indeksi
- i on muuttuvan kuorman indeksi
- $G_{k.j}$ on pysyvän kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $Q_{k.i}$ on muun muuttuvan kuorman ominaisarvo
- $\psi_{0.1}$ on määräävän muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (taulukko 2.4)
- $\psi_{0.i}$ on muun muuttuvan kuorman yhdistelykerroin (taulukko 2.4)

7.1.5 Käyttörajatilan vaatimukset

Murtorajatilan lisäksi rakenteen toimivuus on tarkastettava myös käyttörajatilan kuormituksilla. Rakenteen taipumat ja siirtymät eivät saa haitata rakenteen toimivuutta tai ulkonäköä. Eurocodessa ei kuitenkaan esitetä yksikäsitteisesti mitä käyttörajatilan kuormayhdistelmää tällöin tulee käyttää (ks. lausekkeet (7.10) - (7.12)). Myöskään taipumien lukuarvoja ei esitetä Eurocodessa.

Suomessa asia on ohjeistettu teräsrakenteiden osalta osan EN 1993-1-1 kansallisessa liitteessä seuraavasti:

> *Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [17]:*
>
> *Käyttörajatilassa kuormien yhdistely suoritetaan käyttäen ominaisyhdistelmää, lauseke (7.10).*
>
> *Lopputaipumien ja -siirtymien (w_{max}, ks. kuva 7.11) käyttörajatilat staattisella kuormituksella, kun taipumista on haittaa, ovat taulukon 7.5 mukaiset, ellei rakenteen tyypistä, käyttötarkoituksesta tai toiminnan luonteesta johtuen muiden arvojen voida katsoa soveltuvan paremmin.*
>
> *Esikorotuksella (w_c, ks. kuva 7.11) voidaan kompensoida pysyvästä kuormasta aiheutuvaa taipumaa, ellei siitä aiheudu haittaa.*



w_c Esikorotus kuormittamattomassa rakenneosassa.

w_1 Taipuman alkuarvo lausekkeiden (7.10) - (7.12) mukaisen kuormayhdistelmän pysyvien kuormien vaikuttaessa.

w_2 Taipuman pitkäaikaisosuus pysyvien kuormien vaikuttaessa.

w_3 Lausekkeiden (7.10) - (7.12) mukaisen kuormayhdistelmän muuttuvien kuormien aiheuttama taipuman lisäosuus.

w_{tot} Kokonaistaipuma taipumien w_1 , w_2 ja w_3 summana.

w_{max} Kokonaistaipumasta näkyvä osuus, kun esikorotus otetaan huomioon.

Kuva 7.11 Pystysuuntainen taipuma

Taulukko 7.5 Eurocoden osan EN 1993-1-1 Suomen kansallisen liitteen mukaiset taipumien ja siirtymien käyttörajatilat [17]

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Pääkannattajat: - vesikatoissa ja katoksissa - välipohjissa Ulokkeet	 L / 300 L / 400 L / 150
Katto-orret	L / 200
Seinäorret	L / 150
Muotolevyt: - katoissa, joissa ei ole vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaaraa - katoissa, joissa vesikeräytymien tai katteen vaurioitumisen vaara on olemassa - kun $L \leq 4{,}5$ m - kun $4{,}5 \text{ m} < L \leq 6{,}0$ m - kun $L > 6{,}0$ m - välipohjissa - seinissä - ulokkeissa	 L / 100 L / 150 30 mm L / 200 L / 300 L / 100 L / 100
Rakenteen vaakasiirtymän rajatila: - 1 ja 2 kerroksiset rakennukset - muut rakennukset	 H / 150 H / 400
L = jänneväli H = rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	
Rakennukset, joissa on nosturirata, ks. Eurocoden osa EN 1993-6 ja sen kansallinen liite.	

Käytettäessä plastisuusteorian mukaista kokonaisanalyysiä murtorajatilassa, myös käyttörajatilassa voi esiintyä voimien ja momenttien uudelleen jakautumista. Jos niin tapahtuu, sen vaikutukset tulee ottaa huomioon [14,15,16].

7.1.6 Lisävaakavoimat

Eurocoden osassa EN 1993-1-1 esitetään erilaisia laskelmissa käytettäviä epätarkkuuksia, jotka ovat eri asia kuin standardissa EN 1090-2 esitetyt rakenteiden toleranssit. Eurocodessa esitetyt erilaiset epätarkkuudet tarkoittavat kuormittamattomaan tilaan liittyviä arvoja, eli kyse on laskennan ‘alkuarvoista’. Niillä otetaan huomioon kuormittamattoman rakenteen itsensä alkujännitykset ja geometriset epätarkkuudet, kuten alkuvinous, alkukäyryys jne. Eurocodessa niitä kutsutaan ekvivalenteiksi geometrisiksi epätarkkuuksiksi. Usein puhutaan myös lisävaakavoimista, vaikka kyseistä termiä ei Eurocodessa esiinnykään [22].

Kehän epätarkkuuden aiheuttamat vaakavoimat:

Kehä voidaan luokitella sivusiirtyväksi (sway) tai sivusiirtymättömäksi (non-sway). Sivusiirtyvä kehä on herkkä toisen kertaluvun kokonaisvaikutuksille (ns. P-Δ -vaikutus). Kun toisen kertaluvun vaikutukset ovat vähämerkityksellisiä, rakenne voidaan luokitella sivusiirtymättömäksi.

Kehän epätarkkuudet tarvitsee ottaa huomioon kehän rakenneanalyysissä vain sivusiirtyvän kehän tapauksessa [14,15,16].

Aihetta on käsitelty tarkemmin Eurocoden osassa EN 1993-1-1 ja lähteissä [22,23].

Esimerkkikohteen kehien sivusiirtyminen on estetty jäykistysristikoin / vinositein.

Jäykistettävän rakenteen aiheuttamat fiktiiviset lisävaakavoimat jäykistysjärjestelmälle:

Alkuepätarkkuuksien vaikutukset otetaan huomioon jäykistysjärjestelmien analyysissä, kun jäykistysjärjestelmä stabiloi palkkeja tai puristettuja sauvoja poikittaissuunnassa. Tämä otetaan huomioon käyttämällä tuettaviin sauvoihin liittyviä ekvivalentteja geometrisia epätarkkuuksia.

Sivusuunnassa tuetun kehän tapauksessa itse kehä ja siihen liittyvä jäykistysjärjestelmä voidaan mitoittaa erikseen seuraavasti [24]:

- kehä mitoitetaan kaikille pystykuormille
- jäykistysjärjestelmä mitoitetaan kaikille vaakakuormille.

Aihetta on käsitelty tarkemmin Eurocoden osassa EN 1993-1-1 ja lähteissä [22,23].

7.1.7 Kuormien laskenta esimerkkikohteessa

Laskuesimerkkien yleispätevyyden säilyttämiseksi esimerkkirakennusta ei kohdisteta mihinkään tiettyyn maahan, joten suoritetut tarkastelut eivät vastaa minkään yksittäisen maan kansallisen liitteen mukaisia valintoja, ja kuormien arvot ovat kuvitteellisia.

Oma paino:
Arvioidaan orsiristikoiden ja katon omaksi painoksi $g_k = 0{,}5\ kN/m^2$.

Lumikuorma:
Maassa olevan lumikuorman ominaisarvo on kohteen alueella $s_k = 1{,}5\ kN/m^2$. *Lumikuorman kannalta kohteen maastotyyppi on 'normaali', joten tuulensuojaisuuskerroin on* $C_e = 1{,}0$ *(taulukko 7.1). Katon lämpökerroin on* $C_t = 1{,}0$. *Kattokulma on 1:6* ($\alpha = 9{,}5°$). *Harjakaton tapauksessa muotokerroin on* $\mu_1 = 0{,}8$, *kun* $0° \le \alpha_1 = \alpha_2 \le 30°$ *(kuva 7.5). Tutkittavat kuormitusjärjestelyt on esitetty harjakaton osalta kuvassa 7.6b. Tarkastetaan tässä niistä tapaus (i), jolloin kummallakin lappeella vaikuttaa täysi lumikuorma:*

$$s = \mu_1 C_e C_t s_k = 0,8 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,5 = 1,2\ kN/m^2$$

Tuulikuorma:
Kohteen alueella tuulennopeuden modifioimaton perusarvo on $v_{b.0}$ = 23 m/s. Tuulen suuntakerroin on c_{dir} = 1,0 ja vuodenaikakerroin c_{season} = 1,0. Tuulennopeuden perusarvoksi saadaan:

$$v_b = c_{dir} \cdot c_{season} \cdot v_{b.0} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 23 = 23 \text{ m/s}$$

Tuulen nopeuspaineen perusarvo q_b lasketaan kaavasta:

$$q_b = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_b^2 = \frac{1}{2} \cdot 1,25 \cdot 23^2 = 0,33 \text{ kN/m}^2$$

Maastoluokassa III altistuskerroin c_e saa seuraavan arvon, kun hallin harjan korkeus on h = 14,5 m (kuva 7.8): c_e = 1,957

Kun rakennekertoimelle käytetään arvoa $c_s c_d$ = 1,0, saadaan tuulikuorman ominaisarvo kaavojen (7.2) & (7.4) & (7.7) avulla:

$$q_{wk} = \frac{F_{w.e}}{A_{ref}} = c_s c_d \cdot c_e \cdot q_b \cdot c_{pe} = 1,0 \cdot 1,957 \cdot 0,33 \cdot c_{pe} = 0,65 c_{pe} \text{ kN/m}^2$$

Esimerkkikohteessa saadaan painekertoimille c_{pe} seuraavat arvot (kuva 7.9 ja taulukko 7.4):

Tuuli pitkän sivun suuntainen:
h = 14,5 m
b = 48 m
d = 100 m
e = min(b , 2h) = min(48 m , 29 m) = 29 m

h ≤ b ⇒ myös rakennuksen tuulenpuoleinen sivu voidaan tarkastella yhtenä vaakakaistana (kuva 7.10)
e < d ⇒ kuva 7.9: tapaus 1
h/d = 0,145 ≤ 0,25 ⇒ A = -1,2 B = -0,8 C = -0,5 D = +0,7 E = -0,3

Tuuli lyhyen sivun suuntainen:
h = 14,5 m
b = 100 m
d = 48 m
e = min(b , 2h) = min(100 m , 29 m) = 29 m

h ≤ b ⇒ myös rakennuksen tuulenpuoleinen sivu voidaan tarkastella yhtenä vaakakaistana (kuva 7.10)
e < d ⇒ kuva 7.9: tapaus 1
h/d = 0,30 ≅ 0,25 ⇒ A = -1,2 B = -0,8 C = -0,5 D = +0,7 E = -0,3

Eurocoden osassa EN 1991-1-4 on esitetty myös kattorakenteille omat painekertoimet. ***Laskelmien lyhentämiseksi esimerkkikohteen suunnittelussa ei ole tarkasteltu katon imu-/painekuormien aiheuttamia pystysuuntaisia kuormituksia. Käytännön suunnittelussa myös ne on otettava huomioon.***

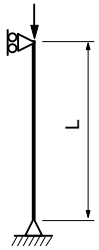
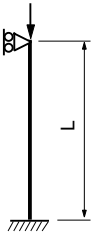
7.2 Pilarin suunnittelu

Kuten jo luvussa 2 todettiin, rakenneputki on erittäin hyvä poikkileikkaus pilarille. Putken massa sijaitsee kaukana keskipisteestä, joten rakenneputken neliömomentti on suuri kaikissa suunnissa. Pilarin suunnittelussa tärkeimpiä asioita ovat nurjahduspituudet, liitosten jäykkyyden vaikutus ja pilarin liitos perustuksiin.

7.2.1 Pilarin nurjahduspituus

Pilarin nurjahduspituuteen vaikuttavat pilarin todellinen pituus ja päiden kiinnitystapa, sekä rakenteen sivusuuntainen tuenta. Pilarin teoreettisia nurjahduspituuksia on esitetty taulukossa 7.6.

Taulukko 7.6 Pilareiden teoreettisia nurjahduspituuksia perustapauksille

Molemmista päistä nivelöity pilari	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari	Molemmista päistä jäykästi kiinnitetty pilari, toinen kiinnityskohta sivusiirtyvä	Toisesta päästä jäykästi kiinnitetty ja toisesta päästä nivelöity pilari
				
L_{cr} = 1,0 L	L_{cr} = 2,0 L	L_{cr} = 0,5 L	L_{cr} = 1,0 L	L_{cr} = 0,7 L

Kehärakenteissa joissa liitokset ovat jäykkiä, voidaan pilareiden nurjahduspituuden määrityksessä käyttää hyväksi palkkien jäykistävää vaikutusta. Kehissä nurjahduspituus riippuu myös kehän sivusuuntaisesta tuennasta. Kehä voidaan luokitella sivusiirtyväksi (sway) tai sivusiirtymättömäksi (non-sway). Sivusiirtymätön rakenne on jäykistetty joko ristikoilla tai tuettu jäykkään rakenneosaan (hissitorni tai porrashuone). Sivusiirtymättömän kehän vaakasuuntaisista siirtymistä aiheutuvat lisävoimat ja -momentit (eli toisen kertaluvun vaikutukset) ovat niin pieniä, ettei niitä tarvitse ottaa laskelmissa huomioon. Kehä on sivusiirtymätön, jos seuraava ehto on voimassa [14,15,16]:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \qquad \textit{kimmoteorian mukaisessa analyysissä} \qquad (7.13)$$

missä
- α_{cr} on tekijä, jolla mitoituskuorma F_{Ed} kerrotaan, jotta saavutetaan kimmoteorian mukainen kokonaisstabiiliuden menetys
- F_{Ed} on rakenteen mitoituskuorma
- F_{cr} on rakenteen kimmoiseen alkujäykkyyteen perustuva kimmoteorian mukainen kriittinen kuorma, joka vastaa rakenteen kokonaisstabiiliuden menetystä

Sivusiirtyvän rakenteen jäykkyys perustuu mastoina toimiviin pilareihin jotka on kiinnitetty jäykästi perustuksiin, tai liitosten jäykkyyteen.

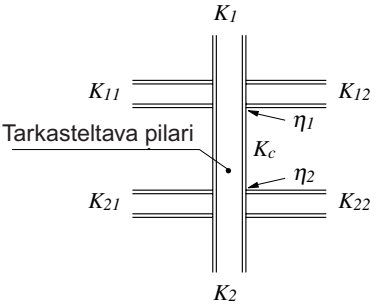
Jatkuvan pilarin tapauksessa pilarin nurjahduspituus voidaan määrittää kuvista 7.12 ja 7.13. Kuvaajien käyrien arvot ovat nurjahduspituuden suhteita pilarin todelliseen pituuteen. Kuvissa tarvittavat momentin jakaantumistekijät η_1 ja η_2 lasketaan seuraavista kaavoista [24,25]:

$$\eta_1 = \frac{K_c + K_1}{K_c + K_1 + K_{11} + K_{12}} \qquad \textit{yläpuolinen kiinnityskohta} \qquad (7.14)$$

$$\eta_2 = \frac{K_c + K_2}{K_c + K_2 + K_{21} + K_{22}} \qquad \textit{alapuolinen kiinnityskohta} \qquad (7.15)$$

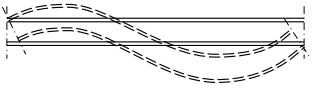
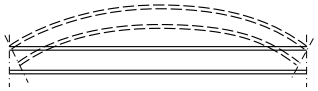
missä

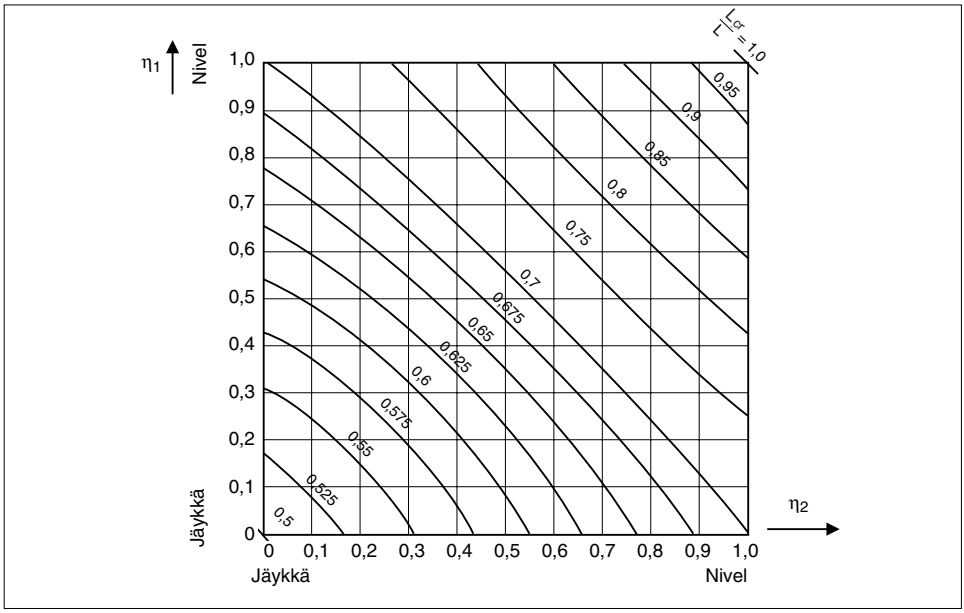
- $K_c = I / L$ on tarkasteltavan pilarin jäykkyystekijä
- $K_1 = I_1 / L_1$ on yläpuolisen pilarin jäykkyystekijä
- $K_2 = I_2 / L_2$ on alapuolisen pilarin jäykkyystekijä
- I, I_1 ja I_2 ovat vastaavien pilareiden neliömomentteja kehän suunnassa
- L, L_1 ja L_2 ovat vastaavien pilareiden pituuksia
- K_{11}, K_{12}, K_{21} ja K_{22} ovat vastaavien palkkien tehollisia jäykkyystekijöitä (taulukko 7.7)



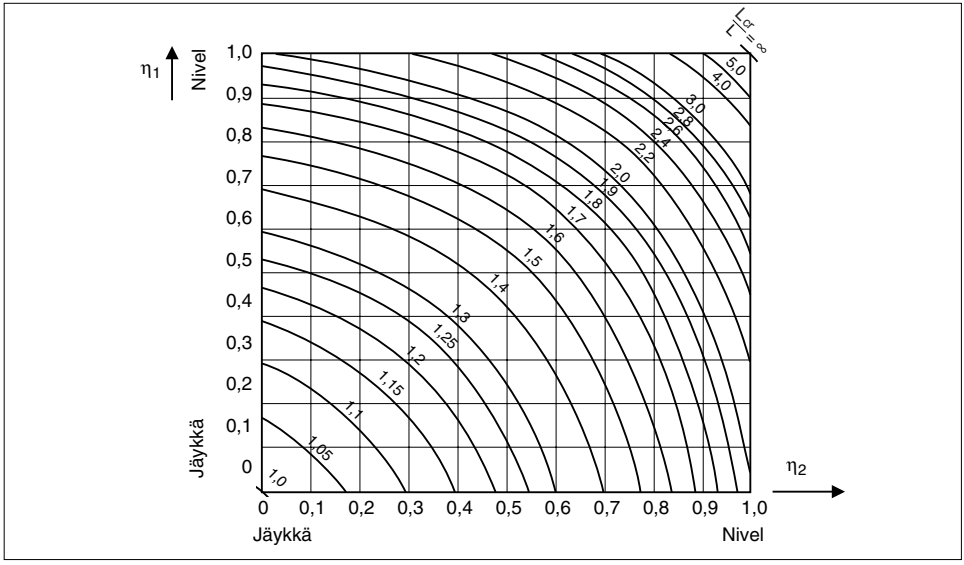
Taulukon 7.7 käyttö edellyttää, että palkissa vaikuttavat jännitykset pysyvät kimmoisella alueella ($M_{Ed} \leq W_{el} \cdot f_y / \gamma_{M0}$). Palkki oletetaan nivelellisesti tuetuksi, jos siinä vaikuttava suurin taivutusmomentti ylittää kimmoteorian mukaisen taivutuskestävyyden [24,25].

Taulukko 7.7 Palkkien tehollinen jäykkyystekijä K [24,25]

Kiertymisehto palkin vastakkaisessa päässä	Palkin tehollinen jäykkyyskerroin
Jäykkä kiinnitys	$1{,}0\,(I_b / L_b)(1 - 0{,}4\,N / N_e)$
Nivelellinen kiinnitys	$0{,}75\,(I_b / L_b)(1 - 1{,}0\,N / N_e)$
Kiertyminen tapahtuu toiseen suuntaan kuin tarkasteltavassa päässä 	$1{,}5\,(I_b / L_b)(1 - 0{,}2\,N / N_e)$
Kiertyminen tapahtuu samaan suuntaan kuin tarkasteltavassa päässä 	$0{,}5\,(I_b / L_b)(1 - 1{,}0\,N / N_e)$
I_b on palkin neliömomentti kehän suunnassa L_b on palkin pituus N on palkin puristusvoima $N_e = \pi^2 \cdot E \cdot I_b / L_b^2$	



Kuva 7.12 Pilarin nurjahduspituussuhde L_{cr}/L sivusiirtymättömässä tapauksessa [24,25]



Kuva 7.13 Pilarin nurjahduspituussuhde L_{cr}/L sivusiirtyvässä tapauksessa [24,25]

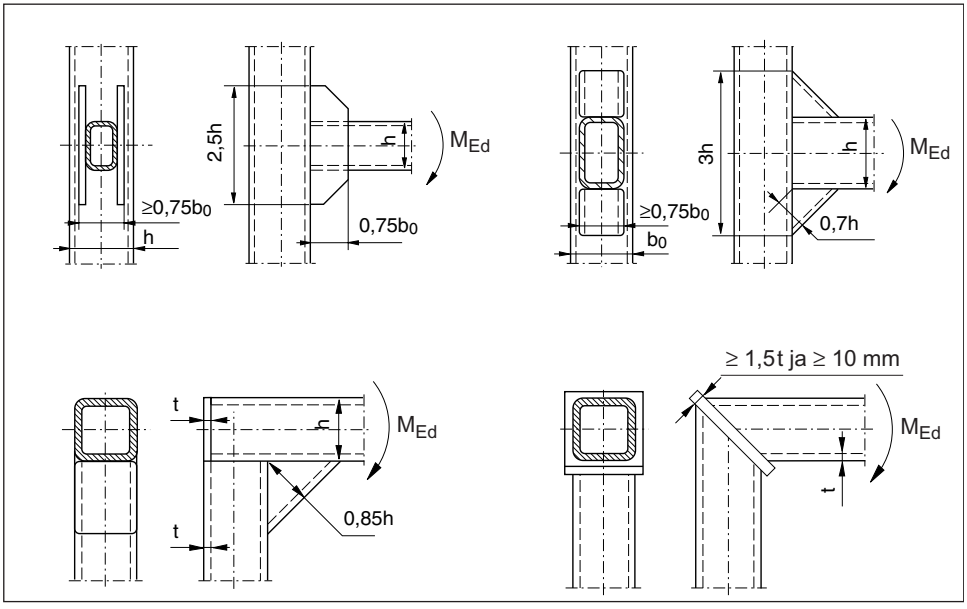
7.2.2 Liitoksen jäykkyyden vaikutus pilarin nurjahduspituuteen

Kehärakenteen liitoksia voidaan pitää jäykkinä (rigid, fixed), jos liitokset on jäykistetty kuvan 7.14 mukaisesti. Jäykistämätön liitos on otettava huomioon osittain jäykkänä (semi-rigid) tai nivelellisenä (pinned, simple) pilarin nurjahduspituutta määritettäessä. Rakenneputkien jäykistämättömien kehäliitosten jäykkyyden laskemista on käsitelty liitteessä 11.4. Osittain jäykän liitoksen vaikutus pilarin nurjahduspituuteen (kaavat 7.14 ja 7.15) otetaan huomioon palkin tehollisessa neliömomentissa, joka lasketaan seuraavasta yhtälöstä [26]:

$$I_{b.eff} = \frac{1}{1 + \dfrac{3EI_b}{S_j L_b}} \cdot I_b \qquad (7.16)$$

missä
- S_j on liitoksen kiertymisjäykkyys [Nm/rad]
- I_b on palkin neliömomentti kehän suunnassa
- L_b on palkin pituus
- E on kimmokerroin

Liitoksen jäykkyys vaihtelee momentin suhteen, koska momentin kasvaessa liitoksen eniten kuormitetut osa-alueet alkavat plastisoitua. Osittain jäykän liitoksen momentti-kiertymä -yhteys pitäisi siten tuntea kokonaisuudessaan, jotta osittain jäykkien liitoksien vaikutusta voidaan hyödyntää pilarin nurjahduspituuden laskennassa. Tämän tiedon puuttuessa on varmalla puolella olettaa pilarin tuenta liitoksen kohdalla nivelelliseksi.



Kuva 7.14 Jäykistettyjä rakenneputkien kehäliitoksia

7.2.3 Pilarin liitos perustuksiin

Pilarin liitosta perustuksiin on käsitelty kohdassa 3.5. Pilarin perustuksiin siirtämät momentit pitää ottaa huomioon perustusruuveja ja pohjalevyä mitoitettaessa, jos rakennemallissa pilareille on oletettu jäykkä kiinnitys. Momentteja ei tarvitse ottaa huomioon, jos rakennemallissa pilarin kiinnitys perustuksiin on nivelellinen.

Asennusaikaisessa tilanteessa perustusruuvit on mitoitettava kantamaan pilarin asennusaikaiset kuormat. Perustusruuvien nurjahduspituutena käytetään jälkivalukerroksen paksuutta (taulukko 7.6: tapaus 4).

7.2.4 Pilarin mitoitus esimerkkikohteessa

Mitoitetaan pääkehien pilarit, joiden liitos perustuksiin oletetaan jäykäksi. Pilarista perustuksiin siirtyvä momentti on siten otettava huomioon pilarin liitosta perustuksiin mitoitettaessa. Hallin vaakakuormat otetaan vastaan jäykistysristikoilla, joten pilarit ovat yläpäästään sivusiirtymättömiä ja nivelellisesti tuettuja. Pilarin nurjahduspituus voidaan siten määrittää suoraan taulukosta 7.6, jolloin saadaan $L_{cr,y} = L_{cr,z} = 0{,}7 \cdot 10{,}3 = 7{,}21$ *m.*

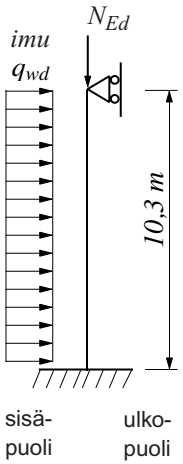
Voimasuureet:
Pilarin voimasuureet lasketaan yksinkertaisesti rakennuksen seinän vaikutuspinta-alan suhteen.

Suomen ja tiettyjen muiden maiden kansallisen liitteen mukaan kuormayhdistelmä määritetään luvussa 2 esitetyillä lausekkeilla (2.4a) ja (2.4b), joista valitaan kulloinkin määräävä [2]. Tässä esimerkissä murtorajatilan kuormayhdistelmä määritetään kuitenkin tarkastelujen lyhentämiseksi lausekkeella (2.3).

Kuormien osavarmuusluvut saadaan taulukosta 2.1. Koska kyseessä on näyttelyrakennus jossa järjestetään messu- ja kokoustilaisuuksia, rakennus kuuluu seuraamusluokkaan CC3, jolloin kuormakerroin $K_{FI} = 1{,}1$ *(taulukot 2.2 ja 2.3).*

Kuormayhdistelmä ja kestävyys täytyy tarkastaa kahdessa eri tapauksessa, koska ennakolta ei tiedetä onko lumi- vai tuulikuorma määräävä.

<u>Tuulikuorman ollessa määräävä saadaan</u>:
(tuuli pitkän sivun suuntainen, imuvyöhyke B):



$\gamma_{Q.1} = 1,5 \cdot K_{FI}$ *tuuli*

$q_{wk} = 0,65 c_{pe.B} = 0,65 \cdot (-0,8) = -0,52\ kN/m^2$ *imu*

$q_{wd} = \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} \cdot L_f = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,52 \cdot 5 = 4,29\ kN/m$

$M_{Ed} = 4,29 \cdot \frac{10,3^2}{8} = 56,9\ kNm$ *pilarin alapäässä*

$V_{Ed} = \frac{5}{8} \cdot 4,29 \cdot 10,3 = 27,6\ kN$ *pilarin alapäässä*

$\gamma_{Q.2} = 1,5 \cdot K_{FI}$ *lumi*

$s_d = \gamma_{Q.2} \cdot \psi_{0.2} \cdot s = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 1,39\ kN/m^2$

$\gamma_G = 1,35 \cdot K_{FI}$ *oma paino*

$g_d = \gamma_G \cdot g_k = (1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,5 = 0,743\ kN/m^2$

$N_{Ed} = 0,5(g_d + s_d) L_f \cdot B = 0,5 \cdot (0,743 + 1,39) \cdot 10 \cdot 48 = 511,9\ kN$

missä

L_f *on kehäväli*
B *on rakennuksen leveys*

<u>Lumikuorman ollessa määräävä saadaan</u>:

$q_{wd} = \gamma_{Q.2} \cdot \psi_{0.2} \cdot q_{wk} \cdot L_f = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,6 \cdot 0,52 \cdot 5 = 2,57\ kN/m$ *tuulikuorma*

$M_{Ed} = 2,57 \cdot \frac{10,3^2}{8} = 34,1\ kNm$ *pilarin alapäässä*

$V_{Ed} = \frac{5}{8} \cdot 2,57 \cdot 10,3 = 16,5\ kN$ *pilarin alapäässä*

$s_d = \gamma_{Q.1} \cdot s = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 1,2 = 1,98\ kN/m^2$ *lumikuorma*

$g_d = \gamma_G \cdot g_k = (1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,5 = 0,743\ kN/m^2$ *oma paino*

$N_{Ed} = 0,5(g_d + s_d) L_f \cdot B = 0,5 \cdot (0,743 + 1,98) \cdot 10 \cdot 48 = 653,5\ kN$

Kestävyydet murtorajatilassa lumikuorman ollessa määräävä:
$N_{Ed} = 653,5\ kN$ *puristusta*
$M_{Ed} = 34,1\ kNm$ *pilarin alapäässä*
$V_{Ed} = 16,5\ kN$ *pilarin alapäässä*

Kokeillaan rakenneputkea $300 \times 200 \times 6$. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Poikkileikkauksen ja sauvan kestävyystarkastelut eri yhteisvaikutuksineen on käsitelty luvussa 2, joten tässä esitetään laskennan kulku vain pääpiirteissään sekä saadut tulokset.

Poikkileikkauksen kestävyys:

Leikkauskestävyys:

$$\frac{h}{t} = \frac{300}{6} = 50,0 \le \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72 \cdot \sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,9 \quad \text{(kohta 2.7.1)}$$

$\Rightarrow$ *leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä joten leikkauskestävyys määritetään plastisen leikkauskestävyyden perusteella:*

$V_{pl.Rd} = 838,5\ kN$ *(liite 11.1)*

$V_{Ed} = 16,5\ kN \le V_{pl.Rd} = 838,5\ kN$ *OK*

$V_{Ed} = 16,5\ kN \le 0,5 V_{pl.Rd} = 0,5 \cdot 838,5 = 419,3\ kN \Rightarrow$ *leikkausvoima ei pienennä taivutuskestävyyttä*

Koska leikkausvoima ei pienennä taivutuskestävyyttä (kohta 2.9.1.6.1), poikkileikkauksen kestävyys voimasuureiden yhteisvaikutuksille voidaan tarkastaa pelkän (M+N) yhteisvaikutuksen perusteella kohdan 2.9.1.5 mukaisesti.

Yhteisvaikutukset tarkastellaan usein yksittäisten voimakomponenttien (N_{Ed}, $M_{y.Ed}$ jne.) ja vastaavien yksittäisten kestävyyksien (N_{Rd}, $M_{y.Rd}$ jne.) interaktiona, jolloin poikkileikkausluokka määritetään kunkin yksittäisen voimakomponentin suhteen vain kyseisen voimakomponentin vaikuttaessa (ks. esim. mitoitusehto (2.1.35)).

Tarkastellaan putken poikkileikkausluokkia ja taso-osien tehollisuuksia eri voimakomponenttien (eli taso-osien jännitystilojen) suhteen:

Pelkälle puristukselle:
laippa:

$b/t = 200/6 = 33,3 \le 34,4 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 3*

uuma:

$h/t = 300/6 = 50,0 > 34,4 \quad \Rightarrow$ *poikkileikkausluokka 4*

$\Rightarrow$ *poikkileikkausluokka on 4*

Uuma 300 mm on kuitenkin täysin tehollinen taivutuksessa y-akselin suhteen, koska $h/t = 300/6 = 50,0 \le 95,8$ (taulukko 2.9). Tästä nähdään heti, että laippa 200 mm (< 300 mm) on vastaavasti täysin tehollinen taivutuksessa z-akselin suhteen.

(M+N) yhteisvaikutus kohdan 2.9.1.5.3 mukaisesti:

$A_{eff} = 4830\ mm^2$ *kun pelkkä puristus (kohta 2.4.1)*
$W_{eff.y} = W_{el.y} = 491{,}4 \cdot 10^3\ mm^3$ *kun pelkkä taivutus (liite 11.1)*
$f_y = 420\ N/mm^2$
$\gamma_{M0} = 1{,}0$

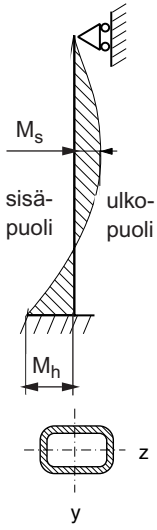
$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y.Ed} + N_{Ed}\, e_{Ny}}{W_{eff.y} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{z.Ed} + N_{Ed}\, e_{Nz}}{W_{eff.z} \cdot f_y / \gamma_{M0}} =$$

$$\frac{653{,}5 \cdot 10^3}{4830 \cdot 420/1{,}0} + \frac{34{,}1 \cdot 10^6 + 0}{491{,}4 \cdot 10^3 \cdot 420/1{,}0} + 0 = 0{,}3221 + 0{,}1652 + 0 = 0{,}4873 \le 1{,}0 \quad OK$$

<u>*Sauvan kestävyys*</u>*:*

$N_{b.y.Rd} = 1304\ kN$ *(y-akselin suhteen,* $\chi_y = 0{,}6427$*)*
$N_{b.z.Rd} = 947{,}8\ kN = N_{b.Rd}$ *(z-akselin suhteen,* $\chi_z = 0{,}4672$*)*

Koska edellä poikkileikkauksen (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa käytettiin poikkileikkauksen kimmoteorian mukaista täysin tehollista taivutuskestävyyttä (eli PL3), arvioidaan myös sauvan kiepahduskestävyys vastaavasti PL3 mukaisena. Taulukosta 2.18 voidaan todeta, että PL3 mukaisena kiepahdus ei pienennä poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä. Tällöin sauvan (M+N) yhteisvaikutustarkasteluissa voidaan kiepahduskestävyyden pienennystekijälle käyttää arvoa $\chi_{LT} = 1{,}0$*:*



$\psi = 0$ *(taulukko 2.25)*

$M_h = 34{,}1\ kNm$

$$M_s = \frac{9}{128} \cdot q_{wd} L^2 = \frac{9}{128} \cdot 2{,}57 \cdot 10{,}3^2 = 19{,}2\ kNm \quad \text{(yksinkertaistus)}$$

$$\alpha_s = \frac{M_s}{M_h} = -\frac{19{,}2}{34{,}1} = -0{,}5630$$

$$C_{my} = 0{,}1 - 0{,}8\,\alpha_s = 0{,}1 - 0{,}8 \cdot (-0{,}5630) = 0{,}5504 \ge 0{,}4$$

taulukosta 2.23 saadaan:

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + 0{,}6\,\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0{,}5504 \cdot \left[1 + 0{,}6 \cdot 0{,}8309 \cdot \frac{653{,}5 \cdot 10^3}{0{,}6427 \cdot 4830 \cdot 420/1{,}0}\right]$$

$$= 0{,}6879$$

$$k_{yy} \le C_{my}\left[1 + 0{,}6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0{,}5504 \cdot \left[1 + 0{,}6 \cdot \frac{653{,}5 \cdot 10^3}{0{,}6427 \cdot 4830 \cdot 420/1{,}0}\right] = 0{,}7159$$

$\Rightarrow k_{yy} = 0{,}6879$

$$k_{zy} = 0,8 k_{yy} = 0,8 \cdot 0,6879 = 0,5503$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{653,5 \cdot 10^3}{0,6427 \cdot \frac{4830 \cdot 420}{1,0}} + 0,6879 \cdot \frac{34,1 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{491,4 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0}} + 0 =$$

$$0,5012 + 0,1137 = 0,6149 \leq 1,0 \quad OK$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy} \frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{653,5 \cdot 10^3}{0,4672 \cdot \frac{4830 \cdot 420}{1,0}} + 0,5503 \cdot \frac{34,1 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{491,4 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0}} + 0 =$$

$$0,6895 + 0,0909 = 0,7804 \leq 1,0 \quad OK$$

Rakenneputken 300×200×6 kestävyys on siis riittävä, kun lumikuorma on määräävä.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, laskentamenettely säilyisi samana ja viimeisessä (M+N) yhteisvaikutustarkastelussa saataisiin tulokseksi 0,8365 (S420: 0,7804). Yhteisvaikutuksen 'käyttöasteita' vertaamalla nähdään, että materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa kokonaiskestävyyttä tässä noin 7 %.

Kestävyydet murtorajatilassa tuulikuorman ollessa määräävä:
Poikkileikkauksen ja sauvan kestävyydet täytyy tarkastaa tällä kuormayhdistelmällä vastaavasti.

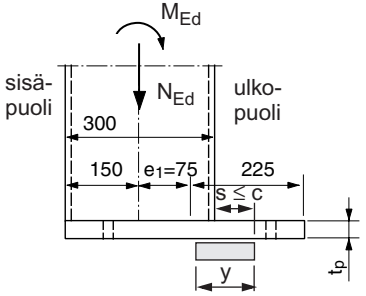
7.2.5 Pilarin perustusliitoksen mitoitus esimerkkikohteessa

Pilarin liitos perustuksiin toteutetaan oheisen kuvan mukaisesti. Pilarin liitos perustuksiin lasketaan kohdan 3.5.2 mukaisesti, koska liitos oletettiin jäykäksi.

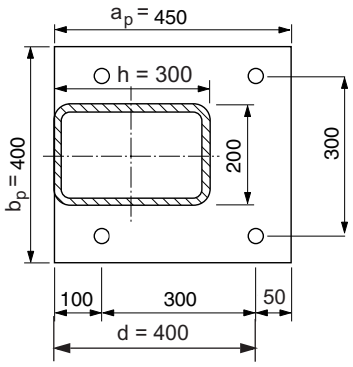
Voimasuureet lumikuorman ollessa määräävä:

Perustusliitokseen kohdistuvat voimasuureet ovat (laskettu edellä):

N_{Ed} = 653,5 kN puristusta
M_{Ed} = 34,1 kNm pilarin alapäässä
V_{Ed} = 16,5 kN pilarin alapäässä



Tarkastetaan lisäksi asennusaikainen tilanne erikseen:



asennusaikainen mitoituskuorma
$N_{Ed.min} = 162$ kN *(puristusta)*

Pohjalevyn mitoitus:

Perustusten betonilaatu on C25/30, jolle pintapaineen mitoituslujuus on $f_{jd} = 11{,}3$ N/mm^2 *(esimerkki 3.17). Kokeillaan pohjalevyä* $t_p = 30$ mm *(S355).*

Kantavan pinnan ulottuma saadaan kaavasta (3.74):

$$c = t_p\sqrt{\frac{f_{yp}/\gamma_{M0}}{3f_{jd}}} = 30 \cdot \sqrt{\frac{355/1{,}0}{3 \cdot 11{,}3}} = 97{,}1 \text{ mm} \quad \Rightarrow \text{pyöristetään } c = 100 \text{ mm}$$

$$b - 2t = 200 - 2 \cdot 6 = 188 \text{ mm} \le 2c = 2 \cdot 100 = 200 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *putken sisään jäävällä alueella pohjalevy on täysin tehollinen*

$$b_p = 400 \text{ mm} \le b + 2c = 200 + 2 \cdot 100 = 400 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *putken ulkopuolella mitan* b_p *suunnassa pohjalevy on täysin tehollinen*
$\Rightarrow l_{eff} = b_p = 400$ mm

$$a_p - h = 450 - 300 = 150 \text{ mm} > c = 100 \text{ mm}$$

$\Rightarrow$ *putken ulkopuolella mitan* a_p *suunnassa pohjalevy on tehollinen vain mitan* $c = 100$ mm *alueella*

Tarkastetaan pohjalevyn kestävyys puristuksen ja betonin pintapaineen mitoituslujuuden perusteella. Pintapaineen oletetaan jakautuvan pohjalevyn alla tasaisesti (varmalla puolella oleva oletus) koko tehollisen ulottuman c alueella. Betonin pintapaineesta pohjalevyyn kohdistuva taivutus pilarin laipan linjalla lasketaan kaavasta (3.68):

$s = c = 97{,}1$ mm *(pohjalevyn tehollinen ulottuma, laskettu edellä)*

$$M_{p.Ed} = \frac{l_{eff}s^2 f_{jd}}{2} = \frac{400 \cdot 97{,}1^2 \cdot 11{,}3}{2} = 21{,}3 \text{ kNm}$$

$$t_p \ge \sqrt{\frac{6M_{p.Ed}}{l_{eff} \cdot f_{yp}/\gamma_{M0}}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 21{,}3 \cdot 10^6}{400 \cdot 355/1{,}0}} = 30{,}0 \quad \Rightarrow t_p = 30 \text{ mm} \quad OK$$

Siis pohjalevyn paksuus $t_p = 30$ mm *(S355) on riittävä.*

Perustusruuvien mitoitus:
Lasketaan ensin tuleeko perustusruuveille vetoa otaksutussa murtotilassa.

Betonin puristusalueen korkeus y ratkaistaan muodostamalla momenttitasapainoyhtälö oletetun vetopuolen, eli tässä sisäpuolen ruuvilinjan suhteen (vrt. kaava (3.79)):

$$M_{Ed} + N_{Ed}(300/2 - 100) = l_{eff}\, y\, f_{jd}[(300 - 100) + 100 - 0,5y] \quad \Rightarrow$$

$$y = \frac{l_{eff} f_{jd} \cdot 300 \pm \sqrt{(-l_{eff} f_{jd} \cdot 300)^2 - 2 l_{eff} f_{jd}[M_{Ed} + N_{Ed} \cdot 50]}}{l_{eff} f_{jd}}$$

$$= \frac{400 \cdot 11,3 \cdot 300 \pm \sqrt{(-400 \cdot 11,3 \cdot 300)^2 - 2 \cdot 400 \cdot 11,3 \cdot [34,1 \cdot 10^6 + 653,5 \cdot 10^3 \cdot 50]}}{400 \cdot 11,3}$$

$$= 54,1 \text{ mm (tai } 545,9 \text{ mm)}$$

Ruuvien normaalivoima lasketaan pystysuuntaisesta voimatasapainosta kaavalla (3.77):

$N_c = l_{eff} \cdot y \cdot f_{jd} = 400 \cdot 54,1 \cdot 11,3 = 244,5 \text{ kN}$ *(puristusta)*

$N_s = N_c - N_{Ed} = 244,5 - 653,5 = -409,0 \text{ kN}$ *(puristusta)*

$\Rightarrow$ *perustusruuveissa ei ole vetoa*

Jos perustusruuveissa olisi vetoa, täytyisi ruuvinreikien sijoittelu toteuttaa niin, että kohdassa 3.5.2 esitetyt geometriavaatimukset täyttyvät.

Koska perustusruuveissa ei ole vetoa, riittää että ne mitoitetaan vain leikkausvoiman suhteen. Perustusruuvien koko on normaalisti välillä M24 - 36 mm, kuitenkin vähintään M20. Valitaan A500HW-harjateräsruuvit 4×M30 valmistajan taulukon mukaan. Valmistajan ilmoittama normaalivoimakestävyys huomioi myös ankkurointikestävyyden. Betonilaadun poiketessa valmistajan taulukossa käytetystä laadusta pitää käyttää korjauskerrointa. Perustuksen suunnittelija huolehtii perustuksen raudoituksesta, ruuvityypin valinta vaikuttaa kuitenkin tähän.

Valmistajan taulukko on laadittu betonilaadulle C25/30, joten ruuvien kestävyydet voidaan ottaa suoraan taulukon mukaan.

Ruuvien vetokestävyys:
Valmistajan taulukon mukaan ruuvin vetokestävyys on:

$N_{t.Rd} = 222,1 \text{ kN}$ *OK (ruuveissa ei ole vetoa)*

Ruuvien leikkauskestävyys:
Leikkausvoima V_{Ed} jakautuu tasan kaikille neljälle ruuville. Yhden ruuville tuleva leikkausvoima on siten:

$V_{Ed} = 16,5/4 = 4,1 \text{ kN}$

Valitun ruuvin leikkausvoimakestävyys on valmistajan taulukon mukaan:

$F_{v.Rd} = 27,2 \text{ kN} \geq 4,1 \text{ kN}$ *OK*

Normaali- ja leikkausvoiman yhteisvaikutus:
Lopputilanteen yhteisvaikutusta ei tarvitse erikseen tarkistaa.

Ruuvien keskiöetäisyys 300 mm täyttää valmistajan ilmoittaman minimietäisyyden. Minimireunaetäisyydet tulee myös tarkastaa ja kapasiteetit vähennetään tarvittaessa valmistajan ohjeiden mukaan.

Lisäksi tulee tarkastaa, että asennusaikaiset kuormat eivät ylitä perustusruuvien kestävyyttä (mahdollinen ruuvien nurjahdus).

Perustusruuvien asennusaikainen kestävyys:

Asennusaikana perustusruuvit kantavat yksinään pilarin kaikki kuormat. Ulkopuolen ruuvien (= eniten rasitetut ruuvit) pystykuorma per ruuvi ratkaistaan muodostamalla momenttitasapainoyhtälö sisäpuolisen ruuvilinjan suhteen, jolloin asennusaikaiselle tilanteelle saadaan:

$$2 \cdot N_{b.Ed} \cdot 300 = M_{Ed} + N_{Ed.min} \cdot (h/2 - 100) \quad \Rightarrow$$

$$N_{b.Ed} = \frac{M_{Ed} + N_{Ed.min} \cdot (h/2 - 100)}{2 \cdot 300} = \frac{34,1 \cdot 10^6 + 162 \cdot 10^3 \cdot (300/2 - 100)}{2 \cdot 300} = 70,3 \text{ kN}$$

Valitaan jälkivalukerroksen paksuudeksi u = 70 mm. Määräävän ruuvin voimasuureet ovat tällöin:

$N_{b.Ed} = 70,3 \text{ kN}$ *(puristusta)*

$V_{b.Ed} = 4,1 \text{ kN}$

$$M_{b.Ed} = \frac{V_{b.Ed} \cdot u}{2} = \frac{4,1 \cdot 0,07}{2} = 0,14 \text{ kNm}$$ *(nurjahtavan pituuden ala- ja yläpäässä)*

Ruuvin kierteellisen osan leikkauskestävyys:

$f_{yb} = 500 \text{ N/mm}^2$ *(harjateräs A500HW)*

$f_{ub} = 550 \text{ N/mm}^2$ *(harjateräs A500HW)*

$A_s = 561 \text{ mm}^2$ *M30 ruuvin jännityspinta-ala (eli kierteellisen osan pinta-ala)*

$$F_{v.Rd} = \frac{0,5 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \cdot 550 \cdot 561}{1,25} = 123,4 \text{ kN} \geq V_{b.Ed} = 4,1 \text{ kN}$$ *OK*

Ruuvin taivutuskestävyys:

$$d_s = 2 \cdot \sqrt{\frac{A_s}{\pi}} = 2 \cdot \sqrt{\frac{561}{\pi}} = 26,7 \text{ mm}$$

$$I_b = \frac{\pi d_s^4}{64} = \frac{\pi \cdot 26,7^4}{64} = 2,49 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$$

$$W_{b.el} = \frac{I_b}{d_s/2} = \frac{2,49 \cdot 10^4}{26,7/2} = 1,87 \cdot 10^3$$

$$M_{b.Rd} = \frac{W_{b.el} f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{1,87 \cdot 10^3 \cdot 500}{1,0} = 0,94 \text{ kNm} \geq M_{b.Ed} = 0,14 \text{ kNm} \quad OK$$

Ruuvin jännitystarkastelu:

$$\sigma = \frac{N_{b.Ed}}{A_s} + \frac{M_{b.Ed}}{W_{b.el}} = \frac{70 \cdot 10^3}{561} + \frac{0,14 \cdot 10^6}{1,87 \cdot 10^3} = 200 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yb} = 500 \text{ N/mm}^2 \quad OK$$

$$\tau = \frac{V_{b.Ed}}{A_s} = \frac{4,1 \cdot 10^3}{561} = 7,3 \text{ N/mm}^2 \leq \frac{f_{yb}}{\sqrt{3}} = 289 \text{ N/mm}^2 \quad OK$$

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = \sqrt{200^2 + 3 \cdot 7,3^2} = 200,4 \text{ N/mm}^2 \leq f_{yb} = 500 \text{ N/mm}^2 \quad OK$$

Ruuvin nurjahduskestävyys:
ruuvin nurjahduspituus on:

$$L_{cr} = 1,0 \cdot u = 1,0 \cdot 70 = 70 \text{ mm} \quad \text{(taulukko 7.6: tapaus 4)}$$

$$I_b = 2,49 \cdot 10^4 \text{ mm}^4 \quad \Rightarrow \bar{\lambda} = 0,1632 \leq 0,2 \quad \Rightarrow \chi = 1,0$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A_s f_{yb}}{\gamma_{M1}} = \frac{1,0 \cdot 561 \cdot 500}{1,0} = 280,5 \text{ kN} \geq N_{b.Ed} = 70,3 \text{ kN} \quad OK$$

Nurjahduksen ja taivutuksen yhteisvaikutus:

$\psi = -1$ *(taulukko 2.25)*

$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0,4 \cdot (-1) = 0,2$ *mutta* $C_{my} \geq 0,4$

$\Rightarrow C_{my} = 0,4$

Taulukosta 2.23 saadaan (pyöreä poikkileikkaus ei ole altis vääntömuodonmuutoksille):

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + 0,6\bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,4 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot 0,1632 \cdot \frac{70,3 \cdot 10^3}{1,0 \cdot 561 \cdot 500/1,0}\right]$$

$$= 0,4098$$

$$k_{yy} \leq C_{my}\left[1 + 0,6 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,4 \cdot \left[1 + 0,6 \cdot \frac{70,3 \cdot 10^3}{1,0 \cdot 561 \cdot 500/1,0}\right] = 0,4601$$

$\Rightarrow k_{yy} = 0,4098$

$$k_{zy} = 0,8\,k_{yy} = 0,8 \cdot 0,4098 = 0,3278$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{70,3 \cdot 10^3}{1,0 \cdot \frac{561 \cdot 500}{1,0}} + 0,4098 \cdot \frac{0,14 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{1,87 \cdot 10^3 \cdot 500}{1,0}} + 0 =$$

$$0,2506 + 0,0614 = 0,3120 \le 1,0 \quad OK$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \le 1,0$$

$$\frac{70,3 \cdot 10^3}{1,0 \cdot \frac{561 \cdot 500}{1,0}} + 0,3278 \cdot \frac{0,14 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{1,87 \cdot 10^3 \cdot 500}{1,0}} + 0 =$$

$$0,2506 + 0,0491 = 0,2997 \le 1,0 \quad OK$$

Hitsien mitoitus:

Pilarin laipan hitsit:
Lasketaan tuleeko pilarin hitseille vetoa. Taivutusmomentin vetopuolella pilarin seinämän keskilinjan jännitys on:

$$\sigma_x = \frac{M_{Ed}}{I_y} \cdot \frac{h-t}{2} - \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{34,1 \cdot 10^6}{7370 \cdot 10^4} \cdot \frac{300-6}{2} - \frac{653,5 \cdot 10^3}{5763} = 68,0 - 113,4 = -45,4\ kN$$

⇒ taivutusmomentti ei ole riittävän suuri aiheuttamaan pilariin ja sen hitseihin vetojännitystä.

Puristusjännitykset voidaan välittää perustuksiin kosketuspaineen kautta, jolloin hitsejä ei tarvitse mitoittaa kuin veto- ja leikkausvoimille. Pohjalevyn ja pilarin alapään välillä on tällöin oltava tiivis kosketus. Tämä on mainittava pilarin kokoonpanopiirustuksessa.

Pilarin uuman hitsit:
Kun puristusjännitykset välitetään kosketuspaineen kautta, riittää että uuman hitsit mitoitetaan kantamaan leikkausvoimat.

Hitsien mitoituksessa hitsin murtolujuutena käytetään liitettävistä osista heikomman murtolujuutta ja kyseisen osan mukaista β_w-tekijää [18,19,20]:

$f_{uw} = min[f_u ; f_{up}] = min[500 ; 490] = 490\ N/mm^2$ *(= S355)*

$\beta_w = 0,9$ *(hitsin lujuuskerroin, taulukko 3.8)* *(= S355)*

Kokeillaan a-mittaa 3 mm joka on pienin sallittu a-mitta kantavalle pienahitsille (ks. kohta 3.3.3):

$$\tau_{||} = \frac{V_{Ed}}{2ah} = \frac{16,5 \cdot 10^3}{2 \cdot 3 \cdot 300} = 9,2\ N/mm^2$$

Kun hitsiin kohdistuu pelkkää leikkausta, hitsin mitoitusehto on (murtolujuutena käytetään liitettävistä osista heikomman murtolujuutta):

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{||}^2)} = \sqrt{0 + 3 \cdot (0 + 9,2^2)} = 15,9\ N/mm^2$$

$$\leq \frac{f_{uw}}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{490}{0,9 \cdot 1,25} = 435,6\ N/mm^2 \quad OK$$

Hitsin jäähtymisnopeuden kannalta tarvitaan (ks. kohta 3.3.3):

$a \geq \sqrt{t}\ mm - 0,5\ mm = \sqrt{30} - 0,5 = 5,0\ mm$ *(t = paksumpi liitettävistä osista)*

$\Rightarrow$ *valitaan a = 5 mm koko pilarin ympäri. Pohjalevyn sisäreunan puolella hitsiliitos joudutaan toteuttamaan pienahitsin sijasta puoli-V-hitsinä.*

Betoniperustus suunnitellaan Eurocoden osan EN 1992-1-1 mukaisesti.

Vertailu S420 vs S355:
Tässä esimerkissä on tarkasteltu lähinnä pohjalevyn ja perustusruuvien kestävyyttä, eikä pilarin itsensä kestävyyttä, joten putkipilarin teräslajilla voi olla merkitystä ainoastaan pilarin ja pohjalevyn välisten hitsien mitoituksessa. Hitsien osalta pohjalevy on kuitenkin tämän esimerkin laskentamenettelyssä määräävä riippumatta siitä, valitaanko putkipilarin mitoitusperusteeksi S355J2H tai S420MH.

Kestävyystarkastelut tuulikuorman ollessa määräävä:
Perustusruuvien ja pohjalevyn kestävyydet täytyy tarkastaa tällä kuormayhdistelmällä vastaavasti.

7.3 Palkin suunnittelu

Palkin suunnittelussa kannattaa käyttää hyväksi plastisuusteoriaa aina kun se on mahdollista. Plastisuusteoriaa voidaan käyttää kestävyyksiä laskettaessa poikkileikkausluokissa 1 ja 2. Voimasuureita laskettaessa plastisuusteoriaa voidaan käyttää ainoastaan poikkileikkausluokassa 1. Voimasuureiden laskeminen plastisuusteorialla on tosin työläämpää kuin kimmoteorialla.

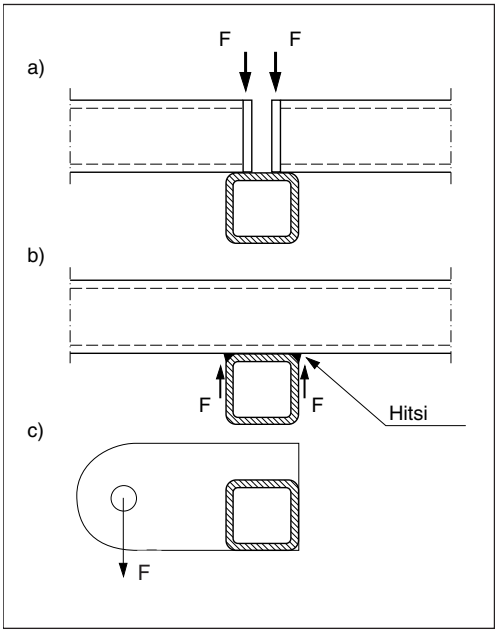
On taloudellisempaa käyttää suorakaiteen muotoisia rakenneputkia, kun palkin normaalivoima on pieni taivutusmomenttiin verrattuna ja taivutusmomentti vaikuttaa vain yhden akselin suhteen. Korkeillakaan rakenneputkien poikkileikkauksilla kiepahduskestävyys on harvoin mitoittava (ks. kohta 2.6.5).

Palkin jatkuvuuden huomioon ottaminen pienentää kenttämomentteja, jolloin usein voidaan valita pienempi putkikoko. Kannattaa siis käyttää mahdollisimman pitkiä yhtenäisiä palkkeja. Konepajavalmistuksen, kuljetuksen ja työmaa-asennuksen vaikutus rakenneosien pituuteen on

kuitenkin otettava huomioon. Sopivalla jatkoskohtien sijoittelulla saadaan liitoksissa vaikuttavat voimat pidettyä pieninä, jolloin myös nivelellinen liitos on mahdollinen.

Palkin pää on suositeltavaa jäykistää päätylevyllä, jotta tukireaktio siirtyisi uumilta tuelle ilman poikkileikkauksen muodonmuutosta (kuva 7.15a). Rakenneputken kulmanpyöristys aiheuttaa taivutuslommahduksen vaaran myös välituella, jos kulmanpyöristyksen alle jäävää rakoa ei täytetä hitsillä (kuva 7.15b). Putken poikkileikkaus pyrkii vinoutumaan, jos sitä rasittaa vääntömomentti. Poikkileikkauksen vinoutuminen estyy, jos vääntömomentti tuodaan palkkiin kuvan 7.15c mukaisesti.

Liitoksien osittainen jäykkyys voidaan ottaa huomioon mitoitettaessa kehärakenteen palkkeja. Tällöin pitää kuitenkin olla tiedossa liitoksen momentti-kiertymä -yhteys, koska liitoksen jäykkyys vaihtelee liitosmomentin mukaan. Lähteessä [26] ja liitteessä 11.4 on esitetty lausekkeet molemmista päistä osittain jäykästi kiinnitetyn palkin momenteille, kun palkkia kuormittaa tasaisesti jakautunut kuorma. Liitteessä 11.4 on käsitelty myös rakenneputkien liitosten jäykkyyden arviointia.



Kuva 7.15 Putken poikkileikkauksen vinoutumisen estäminen

7.3.1 Päätypalkin mitoitus esimerkkikohteessa

Mitoitetaan hallirakennuksen päätypalkit. Hallin leveys on 48 m ja päädyn pilarijako on 6 m. Jaetaan päätypalkki neljään osaan (48m/4 = 12 m), jotka asennetaan työmaalla päätypilareihin ruuviliitoksilla. Päätypalkkia kuormittavat pystysuunnassa orsiristikoiden tukireaktiot. Päätypalkki siirtää hallin poikittaissuuntaisen tuulikuorman jäykistysristikoille, joten siihen kohdistuu myös normaalivoimaa.

Kuten edellä, tarkastellaan kuormayhdistelmää jossa lumikuorma on määräävä. Tuulensuunnaksi valitaan 'tuuli lyhyen sivun suuntainen', jolloin pitkään sivuun kohdistuu tuulen painevyöhyke D (ks. kuva 7.9) aiheuttaen päätypalkkiin puristusta, mikä on päätypalkin kannalta määräävä tilanne. (Puristuksesta aiheutuu palkin nurjahdusvaara, mikä yhdessä taivutuksen kanssa on oletettavasti kriittisempi kuin hieman suurempi vetorasitus, joka syntyisi jos tuuli vaikuttaa pitkän sivun suuntaisesti, jolloin pitkään sivuun kohdistuu lyhyellä alueella imuvyöhyke A ja valtaosalla hallin sivua imuvyöhyke B.)

Voimasuureet lumikuorman ollessa määräävä:

Päätypalkin puristusvoima oletetaan vakioksi koko palkin pituudella. (Päätypalkin puristuskuorma painepuolella lasketaan tässä esimerkissä pelkän painekuorman perusteella, sillä samanaikainen imupuolen imukuorman vaikutus ei ulotu painepuolelle, koska välissä olevat vinositeet vievät imukuormat perustuksiin.) Kuormakerroin $K_{FI} = 1{,}1$:

$$q_{wk} = 0,65 c_{pe.D} = 0,65 \cdot 0,7 = 0,455 \text{ kN/m}^2 \qquad \text{tuuli (painevyöhyke D)}$$

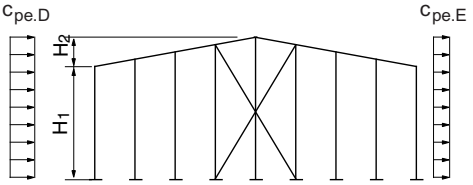
$$q_{wd} = \gamma_{Q.2} \cdot \Psi_{0.2} \cdot q_{wk} = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,6 \cdot 0,455 = 0,450 \text{ kN/m}^2$$

$$N_{Ed} = q_{wd}\left(\frac{3}{8}H_1 + H_2\right)\frac{L}{2} = 0,450 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 10,5 + 4\right) \cdot \frac{100}{2} = 178,6 \text{ kN}$$

missä

L *on rakennuksen pituus*

Katon osuus on laskettu kokonaisuudessaan mukaan vaakakuorman arvoon (varmalla puolella oleva yksinkertaistus). Tarkempaan tulokseen päästään, jos otetaan huomioon katon tuulikuorman painekertoimien vaikutus.



Orsiristikon tukivoimaksi saadaan, kun lumikuorma on määräävä:

$$F_{y.Ed} = 0,5 \cdot (\gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q.1} \cdot q_{k.1}) \cdot L_p \cdot L_f \qquad \text{oma paino ja lumikuorma}$$

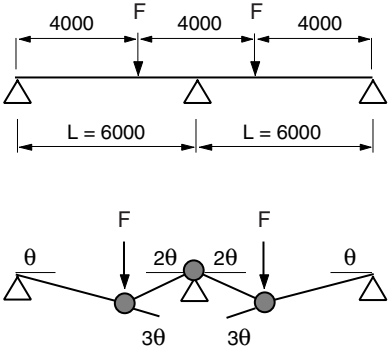
$$= 0,5 \cdot [(1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,4 + (1,5 \cdot 1,1) \cdot 1,2] \cdot 4 \cdot 10 = 51,5 \text{ kN}$$

missä

L_p *on orsiväli*
L_f *on kehäväli*

Oma paino g_k voidaan tässä olettaa pienemmäksi (0,4 kN/m^2), koska primääriristikon painoa ei tarvitse ottaa huomioon.

Lasketaan voimasuureet plastisuusteoriaa käyttäen. Pystysuunnassa saadaan seuraava staattinen malli:



Merkitsemällä sisäinen ja ulkoinen työ yhtäsuuriksi saadaan ratkaistuksi rajakuorma, jolla plastinen mekanismi muodostuu:

$$M_{pl}(3\theta + 2\theta) = F\left(\frac{2}{3}L \cdot \theta\right) \quad \Rightarrow F = \frac{15M_{pl}}{2L}$$

Plastisen nivelen kohdalla vaikuttava leikkausvoima saadaan ratkaistua muodostamalla momenttisumma voiman F kohdalla olevan nivelen suhteen:

$$M_{pl} + V \cdot \frac{L}{3} = -M_{pl} \quad \Rightarrow V = \frac{6M_{pl}}{L} = \frac{12}{15} \cdot F$$

Mekanismi (plastiset nivelet) ei saa syntyä ennen rajakuormaa $F = F_{y.Ed} = 51{,}5$ kN, joten palkin plastisen taivutuskestävyyden tulee siis olla vähintään:

$$M_{pl.y.Rd} \geq \frac{2F_{y.Ed}L}{15}$$

Edelleen, jotta mekanismi ei synny ennen rajakuormaa $F = F_{y.Ed} = 51{,}5$ kN, tulee ottaa huomioon myös normaalivoiman ja leikkausvoiman vaikutus, jos ne pienentävät poikkileikkauksen plastista taivutuskestävyyttä, joten poikkileikkauksen mitoitusehdot saadaan lopulta seuraavaan muotoon:

$$M_{N.V.y.Rd} \geq \frac{2F_{y.Ed}L}{15} = \frac{2 \cdot 51{,}5 \cdot 6}{15} = 41{,}2 \text{ kNm}$$

$$V_{y.Rd} \geq V_{Ed} = \frac{12}{15} \cdot F_{y.Ed} = \frac{12}{15} \cdot 51{,}5 = 41{,}2 \text{ kN}$$

$$N_{c.Rd} \geq N_{Ed} = 178{,}6 \text{ kN}$$

Koska edellä esitetyt voimasuureet perustuvat plastisuusteorian mukaiseen mekanismiin, tulee valita palkki joka kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Kestävyydet murtorajatilassa:

Poikkileikkauksen kestävyys:

Kokeillaan rakenneputkea 150×100×8. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Putken poikkileikkausluokka on PL1 pelkälle puristukselle (liite 11.1), joten ei ole tarpeen suorittaa PL-luokan tarkempaa tarkastelua (M+N) yhteisvaikutukselle (vrt. kohta 2.9.1.5.1).

Poikkileikkauksen puristuskestävyys (liite 11.1):

$$N_{c.Rd} = N_{pl.Rd} = 1480 \text{ kN} \geq N_{Ed} = 178{,}6 \text{ kN} \quad OK$$

Leikkauskestävyys:

$$\frac{h}{t} = \frac{150}{8} = 18,8 \le \frac{72\varepsilon}{\eta} + 3 = \frac{72 \cdot \sqrt{235/420}}{1,0} + 3 = 56,9 \quad \text{(kohta 2.7.1)}$$

$\Rightarrow$ leikkauslommahdus ei pienennä leikkauskestävyyttä joten leikkauskestävyys määritetään plastisen leikkauskestävyyden perusteella:

$V_{pl.Rd} = 512,8\ kN$ *(liite 11.1)*

$V_{Ed} = 41,2\ kN \le V_{pl.Rd} = 512,8\ kN$ *OK*

$V_{Ed} = 41,2\ kN \le 0,5 V_{pl.Rd} = 0,5 \cdot 512,8 = 256,4\ kN \Rightarrow$ *leikkausvoima ei pienennä taivutuskestävyyttä*

Taivutuskestävyys (liite 11.1):

$M_{pl.y.Rd} = 71,1\ kNm \ge 41,2\ kNm$ *OK*

Koska leikkausvoima ei pienennä taivutuskestävyyttä (kohta 2.9.1.6.1), poikkileikkauksen kestävyys voimasuureiden yhteisvaikutuksille voidaan tarkastaa pelkän (M+N) yhteisvaikutuksen perusteella kohdan 2.9.1.5 mukaisesti:

$$N_{Ed} = 178,6\ kN \le \frac{0,5(A - 2bt)f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \cdot (3524 - 2 \cdot 100 \cdot 8) \cdot 420}{1,0} = 404,0\ kN$$

ja:

$N_{Ed} = 178,6\ kN \le 0,25 N_{pl.Rd} = 0,25 \cdot 1480 = 370,0\ kN$

$\Rightarrow$ koska molemmat em. ehdot toteutuvat, saadaan:

$M_{N.y.Rd} = M_{pl.y.Rd} = 71,1\ kNm \ge 41,2\ kNm$ *OK*

Poikkileikkauksen kestävyys on siis riittävä.

<u>Sauvan kestävyys</u>:

Tarkastetaan, että palkki ei nurjahda ennen kuin mekanismi on muodostunut. Päätypalkki on tuettu vaakasuunnassa katon muotolevyn avulla, joten vaakasuuntaista nurjahdusta ei tarvitse tarkastaa. Pystysuuntaiselle nurjahdukselle nurjahduspituus on $L_{cr} = L = 6$ m (varmalla puolella oleva yksinkertaistus). Nurjahduskestävyydeksi saadaan (liite 11.2):

$N_{b.y.Rd} = 422,1\ kN \ge N_{Ed} = 178,6\ kN$ *OK*

Taivutusmomentin vaikutusta nurjahduksessa ei tarvitse tässä tapauksessa ottaa huomioon, koska pystysuuntainen nurjahdus johtaa oletettuun murtomekanismiin.

Jännitykset ja taipuma käyttörajatilassa:
Koska murtorajatilatarkastelussa on käytetty plastisuusteoriaa, on käyttörajatilatarkastelussa ensin tutkittava ylittyykö materiaalin myötölujuus käyttörajatilan kuormilla (myötö-

lujuuden mahdollinen ylittyminen vaikuttaa taipumien laskentaan). Kuormien osavarmuusluvut ovat kaavan (7.10) mukaiset (kuormakerrointa K_{FI} ei sovelleta käyttörajatilatarkasteluissa):

$$F_{Ed} = 0,5(g_k + q_{k.1}) \cdot L_p \cdot L_f = 0,5 \cdot (0,4 + 1,2) \cdot 4 \cdot 10 = 32\ kN \quad \textit{oma paino ja lumikuorma}$$

$$M_{el.y.Ed} = \frac{5}{27} F_{Ed} L = \frac{5}{27} \cdot 32 \cdot 6 = 35,6\ kNm = M_{max} \quad \textit{momentti välituella}$$

$$N_{Ed} = \psi_{0.2} \cdot q_{wk} \cdot \left(\frac{3}{8} H_1 + H_2\right) \frac{L}{2} = 0,6 \cdot 0,455 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 10,5 + 4\right) \cdot \frac{100}{2} = 108,3\ kN \quad \textit{tuulikuorma}$$

$$\sigma_{max} = \frac{M_{el.y.Ed}}{W_{el.y}} + \frac{N_{Ed}}{A} = \frac{35,6 \cdot 10^6}{134,4 \cdot 10^3} + \frac{108,3 \cdot 10^3}{3524} = 295,6\ N/mm^2 \le f_y = 420\ N/mm^2$$

Koska käyttörajatilan jännitykset pysyvät kimmoisella alueella, palkin taipuma voidaan laskea kimmoteoriaa käyttäen:

$$\delta_{max} = \frac{F_{Ed} \cdot a(L-a)^2}{6EI} \sqrt{\frac{a}{2L+a}} = \frac{32 \cdot 10^3 \cdot 4(6-4)^2 \cdot 10^9}{6 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 1008 \cdot 10^4} \sqrt{\frac{4}{2 \cdot 6 + 4}} = 20,2\ mm \approx \frac{L}{300}$$

$$\delta_{max} \le \frac{L}{300} \quad OK \quad \textit{(taulukko 7.5)}$$

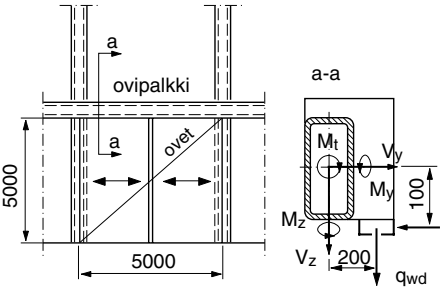
Rakenneputken 150×100×8 kestävyys ja jäykkyys on siis riittävä, kun lumikuorma on määräävä.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, laskentamenettely säilyisi samana. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa nurjahduskestävyyttä tässä noin 4 % ja muita kestävyyksiä täysimääräisesti myötölujuuden nousun verran (= + 18 %). Käyttörajatilan taipumaan materiaalilujuuden muuttaminen ei vaikuta, kun käyttörajatilan jännitykset pysyvät kimmoisella alueella.

Kestävyydet murtorajatilassa tuulikuorman ollessa määräävä:
Vastaavat tarkastelut täytyy tehdä myös tällä kuormayhdistelmällä.

7.3.2 Ovipalkin mitoitus esimerkkikohteessa

Mitoitetaan pitkän sivun ovipalkki, joka on kiinnitetty tuulipilariin ja pääkehän pilariin. Oven korkeus on 5 m ja omapaino 0,75 kN/m^2. Ovi on liukuva ja kiinnityskisko sijaitsee 200 mm etäisyydellä palkin z-akselista ja 100 mm etäisyydellä y-akselista. Ovipalkkia kuormittaa oven omapaino ja tuulikuorma. Oletetaan oven tukeutuvan alareunastaan lattiaan, jolloin ovipalkille siirtyy vain puolet tuulikuormasta.



Voimasuureet:
Palkkia rasittaa taivutusmomentit kahden akselin suhteen sekä vääntömomentti. Normaalivoimaa ei ole. Voimasuureet lasketaan kimmoteoriaa käyttäen.

Kokeillaan rakenneputkea 180×100×6. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Lasketaan vääntökuorma oven painosta ja tuulikuormasta (määräväksi muodostuu painevyöhyke D, jolloin tuuli ja omapaino vääntävät palkkia samaan suuntaan). Kuormakerroin K_{FI} = 1,1:

$$q_{wk} = 0,65 c_{pe.D} = 0,65 \cdot 0,7 = 0,455 \text{ kN/m}^2 \quad \text{tuuli (painevyöhyke D)}$$

$$q_{xd} = \gamma_G \cdot g_k \cdot e_1 + 0,5 \cdot \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} \cdot H \cdot e_2 \quad \text{vääntö palkin pituusakselin suhteen}$$

$$= (1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,75 \cdot 5 \cdot 0,2 + 0,5 \cdot (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,455 \cdot 5 \cdot 0,1 = 1,30 \text{ kNm/m}$$

missä

- e_1 *on pystykuorman epäkeskeisyys*
- e_2 *on tuulikuorman epäkeskeisyys*
- H *on oven korkeus*

$M_{x.Ed} = 3,25\ kNm$ *vääntömomentti tuella*

$g_d = \gamma_G \cdot g_k \cdot H_d$ *pystysuuntainen taivutuskuorma oven painosta*

$= (1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,75 \cdot 5$

$= 5,57\ kN/m$

$M_{y.Ed} = 17,4\ kNm$ *pystysuuntainen taivutusmomentti kentän keskellä*

$V_{z.Ed} = 13,9\ kN$ *pystysuuntainen leikkausvoima tuella*

$q_{wd} = 0,5 \cdot \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} \cdot H$ *vaakasuuntainen taivutuskuorma tuulesta*

$= 0,5 \cdot (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,455 \cdot 5$

$= 1,88\ kN/m$

$M_{z.Ed} = 5,88\ kNm$ *vaakasuuntainen taivutusmomentti kentän keskellä*

$V_{y.Ed} = 4,70\ kN$ *vaakasuuntainen leikkausvoima tuella*

Kestävyydet murtorajatilassa:

Poikkileikkaus kuuluu taivutuksen osalta y-akselin suhteen poikkileikkausluokkaan 1 ja z-akselin suhteen poikkileikkausluokkaan 2, joten voidaan käyttää plastisuusteorian mukaisia taivutuskestävyyksiä. Väännön ja leikkauksen osuus tarkastetaan erikseen, koska ne saavat maksimiarvonsa eri kohdassa kuin taivutusmomentit.

Taivutuskestävyydet (liite 11.1):

$M_{pl.y.Rd} = 76,0\ kNm \geq M_{y.Ed}$ *OK*

$M_{pl.z.Rd} = 50,5\ kNm \geq M_{z.Ed}$ *OK*

Tarkastetaan taivutusmomenttien yhteisvaikutus (kohta 2.6.4.1):

$$\left[\frac{M_{y.Ed}}{M_{pl.y.Rd}}\right]^{1,66} + \left[\frac{M_{z.Ed}}{M_{pl.z.Rd}}\right]^{1,66} = \left[\frac{17,4}{76,0}\right]^{1,66} + \left[\frac{5,88}{50,5}\right]^{1,66} = 0,1147 \leq 1,0 \quad OK$$

Leikkauksen ja väännön osalta voidaan käyttää plastisia kestävyyksiä (liite 11.1), sillä lommahdus ei muodostu määrääväksi (kohta 2.7.1 ja 2.8.1).

$M_{pl.x.Rd} = 43,4\ kNm \geq M_{x.Ed}$ *OK*

$V_{pl.z.Rd} = 486,9\ kN \geq V_{z.Ed}$ *OK*

$V_{pl.y.Rd} = 270,5\ kN \geq V_{y.Ed}$ *OK*

Leikkaus ja vääntö saavat maksiminsa palkin päissä. Väännöstä aiheutuva leikkausjännitys on palkin päissä:

$$\tau_{t.Ed} = \frac{M_{t.Ed}}{W_t} = \frac{M_{x.Ed}}{W_t} = \frac{3,25 \cdot 10^6}{178,9 \cdot 10^3} = 18,2\ N/mm^2 \quad \text{(kaava (2.99))}$$

Tarkastetaan väännön ja leikkauksen yhteisvaikutus (kohta 2.9.1.2.1):

$V_{pl.T.z.Rd} = 468{,}3\ kN \geq V_{z.Ed}$ *OK (väännön pienentämä leikkauskestävyys z-suunnassa)*
$V_{pl.T.y.Rd} = 260{,}2\ kN \geq V_{y.Ed}$ *OK (väännön pienentämä leikkauskestävyys y-suunnassa)*

Jännitykset ja taipuma käyttörajatilassa:
Tarkastetaan ylittyykö materiaalin myötölujuus käyttörajatilan kuormilla (myötölujuuden mahdollinen ylittyminen vaikuttaa taipumien laskentaan). Kuormien osavarmuusluvut ovat kaavan (7.10) mukaiset (kuormakerrointa K_{FI} ei sovelleta käyttörajatilatarkasteluissa). Saadaan:

$g_k = 3{,}75\ kN/m$ *oma paino*
$M_{el.y.Ed} = 11{,}7\ kNm$ *pystysuuntainen taivutusmomentti kentän keskellä*
$q_{wk} = 1{,}14\ kN/m$ *tuuli*
$M_{el.z.Ed} = 3{,}56\ kNm$ *vaakasuuntainen taivutusmomentti kentän keskellä*

$$\sigma_{max} = \frac{M_{el.y.Ed}}{W_{el.y}} + \frac{M_{el.z.Ed}}{W_{el.z}} = \frac{11{,}7 \cdot 10^6}{145{,}5 \cdot 10^3} + \frac{3{,}56 \cdot 10^6}{104{,}8 \cdot 10^3} = 114{,}4\ N/mm^2 \leq f_y = 420\ N/mm^2$$

Koska käyttörajatilan jännitykset pysyvät kimmoisella alueella, palkin taipuma voidaan laskea kimmoteoriaa käyttäen:

$$\delta_{z.max} = \frac{5}{384}\frac{g_k L^4}{EI_y} = \frac{5}{384} \cdot \frac{3{,}75 \cdot 5000^4}{2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 1310 \cdot 10^4} = 11{,}1\ mm = \frac{L}{450} \quad \text{pystysuunnassa}$$

$$\delta_{z.max} \leq \frac{L}{400} \quad OK \quad \text{(taulukko 7.5)}$$

$$\delta_{y.max} = \frac{5}{384}\frac{q_{wk} L^4}{EI_z} = \frac{5}{384} \cdot \frac{1{,}14 \cdot 5000^4}{2{,}1 \cdot 10^5 \cdot 523{,}8 \cdot 10^4} = 8{,}4\ mm = \frac{L}{595} \quad \text{vaakasuunnassa}$$

$$\delta_{y.max} \leq \frac{L}{400} \quad OK \quad \text{(taulukko 7.5)}$$

Rakenneputken $180 \times 100 \times 6$ kestävyys ja jäykkyys on siis riittävä ovipalkkina. Ovipalkin taipuma on usein syytä rajoittaa pieneksi, jotta ovikoneisto toimisi moitteettomasti.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, poikkileikkausluokat ja laskentamenettely säilyisivät samoina. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa tässä kaikkia kestävyyksiä täysimääräisesti myötölujuuden nousun verran (= + 18 %). Käyttörajatilan taipumaan materiaalilujuuden muuttaminen ei vaikuta, kun käyttörajatilan jännitykset pysyvät kimmoisella alueella.

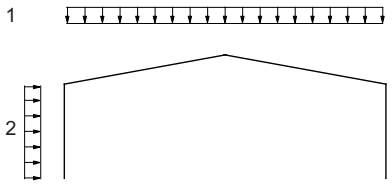
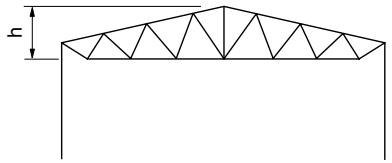
7.4 Ristikon suunnittelu

Ristikoiden suunnittelussa uumasauvojen ja paarteiden väliset liitokset oletetaan yleensä nivelellisiksi, jolloin uumasauvoissa on vain normaalivoimaa. Ristikon liitoksien ja uumasauvojen mitoituksessa ei tarvitse tarkastella taivutusmomentteja, jos liitteen 11.3 laskentataulukoiden niissä esitetyt voimassaoloehdot täyttyvät. Paarteissa on sen sijaan myös taivutusrasituksia, koska paarre on jatkuva rakenne (ks. taulukko 3.4). Paarteen momentti pienenee, jos kuormitus (esim. orsikuormat) saadaan kohdistettua ristikon liitoskohtiin. Rakenneputki toimii tehokkaasti puristettuna ja vedettynä sauvana, joten ristikko on kevyt rakenne kantokykyynsä nähden.

Ristikon suunnittelussa kannattaa käyttää valmiita laskentaohjelmia, joissa on myös mukana rakenneputkien kestävyystiedot (esim. WinRami, liite 11.6).

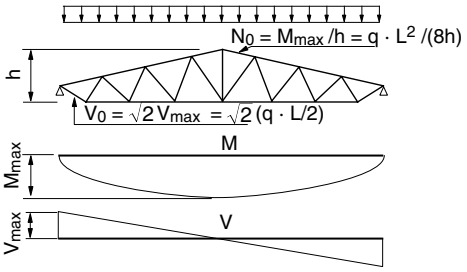
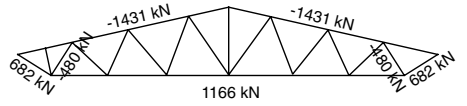
Ristikon kustannukset eivät muodostu pelkästään teräksen painosta, vaan myös konepajavalmistuksesta ja työmaa-asennuksesta. Ristikko, jossa on vapaaväliset liitokset ja vähän sauvoja saattaa olla kustannuksiltaan edullisempi kuin kevyempi ristikko, jossa on paljon sauvoja ja limitetyt liitokset. Ristikon edullisin tyyppi ja liitosten muoto on ratkaistava tapauskohtaisesti.

Taulukko 7.8 Ristikon suunnittelun vaiheet

Toimenpide	
1. Selvitetään rakenteen kuormat. Etsitään vaaralisin kuormayhdistelmä. Kuorman suunta on tärkeä, koska rakenneputken veto- ja nurjahduskestävyydet eroavat toisistaan.	
2. Määritetään ristikon korkeus. Lähteen [27] mukaan optimikorkeus on h = L / 9 ... L / 12. Lähteen [28] mukaan optimikorkeus on hieman matalampi, h = L / 10 ... L / 16. Mitä raskaampi kuormitus, sitä suurempi korkeus valitaan. Korkeus on ratkaisevin tekijä ristikon teräsmenekin kannalta. Kattokaltevuudella sen sijaan ei ole teräsmenekkiin kovin suurta merkitystä (optimi kaltevuus pelkästään ristikon kannalta on noin 1:8...1:10). Usein ristikon korkeus määräytyy kohteen tilantarpeesta ja toiminnallisista vaatimuksista sekä kuljetuksen ja asennuksen aiheuttamista vaatimuksista. Valitaan ristikon tyyppi ja orsijako. Näiden tietojen avulla voidaan muodostaa ristikon staattinen rakennemalli.	

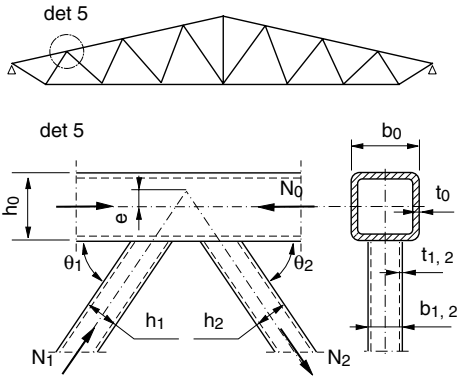
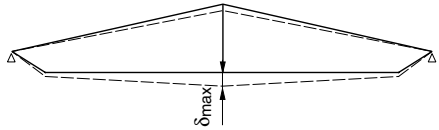
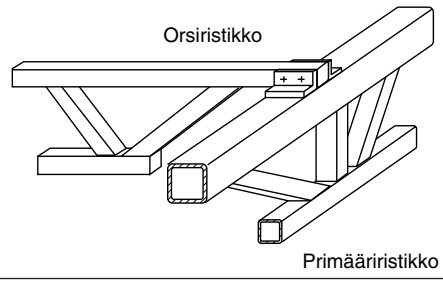
(jatkuu)

Taulukko 7.8 Ristikon suunnittelun vaiheet
(jatkuu)

3. Valitaan sauvat alustavasti laskemalla ristikon momentti olettamalla ristikko palkiksi. Momentin maksimiarvo jaetaan ristikon korkeudella, jolloin saadaan alkuarvo paarrevoimille ($N_0 \approx M_{max}/h$). Uumasauvojen kuorman alkuarvo lasketaan palkin leikkausvoiman avulla ($V_0 \approx V_{max}$). Tarkastetaan raskaimmin kuormitettujen liitosten kestävyydet (yleensä lähinnä tukea olevien uumasauvojen liitokset ylä- ja alapaarteeseen). Käytetään ainoastaan poikkileikkausluokkiin 1 - 2 kuuluvia sauvoja (tarkemmat vaatimukset esitetty liitteen 11.3 liitoskohtaisissa taulukoissa). Sovitetaan uumasauvojen ja paarteiden mitat siten, että uumasauvojen ja paarteen leveyksien suhde on noin 0,7 - 0,8. Ristikon kokonaispaino jakautuu karkeasti seuraavasti: - puristettu paarre n. 50 % - vedetty paarre n. 30 % - uumasauvat n. 20 % Liitosten kestävyyden kannalta on edullista valita suhteellisen paksuseinämäiset paarteet. Uumasauvojen eri kokojen määrä kannattaa rajoittaa 2 - 4:ään (yksittäisten uumasauvojen ylimitoitus ei juurikaan vaikuta koko ristikon teräsmenekkiin).	
4. Lasketaan sopivalla laskentaohjelmalla todelliset sauvavoimat. Sauvavoimat lasketaan kaikilla kuormayhdistelmillä. Laskentamallissa paarre oletetaan jatkuvaksi ja uumasauvat nivelellisesti kiinnitetyiksi. Tarkastetaan valittujen sauvojen kestävyys todellisille sauvavoimille. Uumasauvojen kestävyys lasketaan joko veto- tai nurjahduskestävyytenä. Vetopaarteen kestävyys lasketaan vetokestävyytenä (ks. taulukko 3.4). Puristuspaarteen kestävyys lasketaan momentin ja normaalivoiman yhteisvaikutusehdosta. Mikäli sauvojen kokoa joudutaan muuttamaan, lasketaan sauvavoimat uudestaan käyttäen uusien sauvojen mittoja. Tarkastetaan että sauvojen mitat ja liitosten epäkeskeisyydet täyttävät liitteen 11.3 laskentataulukoissa kyseiselle liitostyypille esitetyt voimassaoloehdot.	

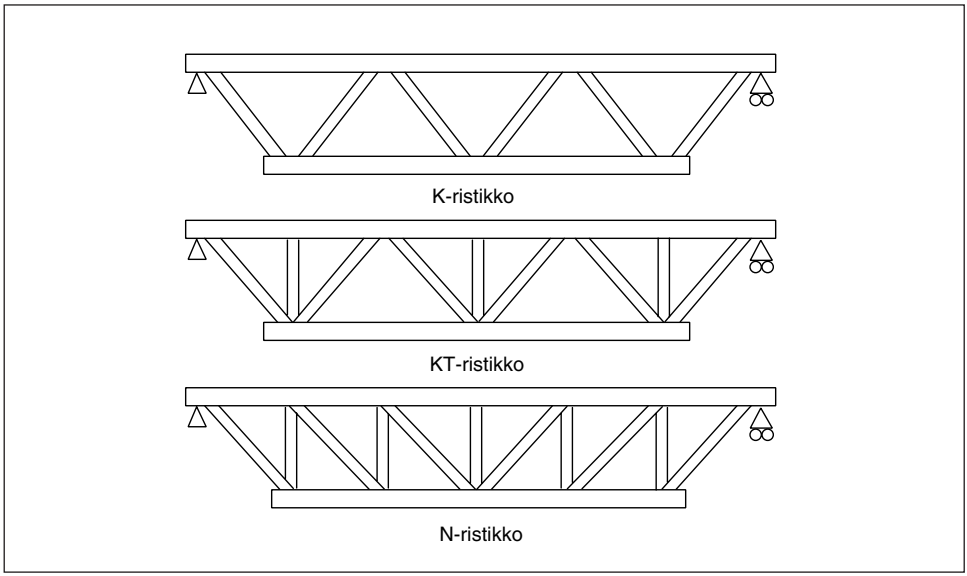
(jatkuu)

Taulukko 7.8 Ristikon suunnittelun vaiheet
(jatkuu)

5. Lasketaan liitosten paikalliset kestävyydet ja mitoitetaan hitsit. Harkitaan kannattaako vahvistaa eniten kuormitettuja liitoksia vai vaihdetaanko sauvat vahvempiin. Liitosten vahvistaminen kannattaa, jos vahvistamisesta aiheutuvat valmistuskustannukset ovat pienemmät kuin vahvempien sauvojen lisääntyneet materiaalikustannukset.	
6. Lasketaan taipuma ja verrataan sitä sallittuun arvoon.	
7. Suunnitellaan ristikon poikittaissuuntainen tukeminen ja orsien liitokset ristikkoon. Suunnitellaan ristikon asennusjatkokset ottaen myös kuljetus huomioon.	

7.4.1 Ristikkotyypin valinta

Yleisemmin käytetyt ristikkotyypit ovat K-, KT- ja N-ristikot.



Kuva 7.16 Erilaiset ristikkotyypit

K-ristikko sopii pitkille jänneväleille, kun kuormat saadaan siirrettyä suoraan ristikon liitoskohtiin. K-tyypin ristikossa sauvojen määrä on pieni ja liitokset yksinkertaisia. Harva sauvajako antaa myös tilaa esim. LVI-putkistojen läpivienneille. Yläpaarteen nurjahduspituus on kuitenkin suuri, mikä voi johtaa muita ristikkotyyppejä raskaampaan paarteeseen. K-ristikko on kuitenkin yksinkertainen ja edullinen valmistuskustannuksiltaan.

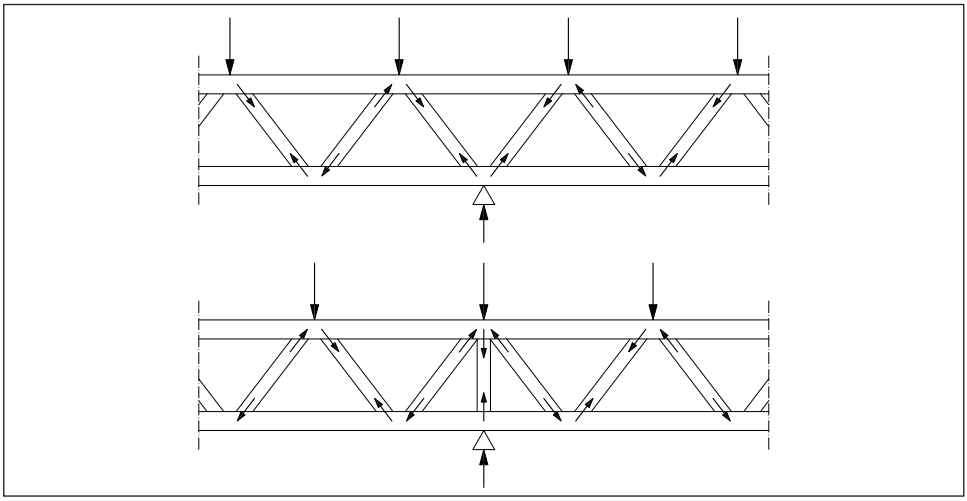
KT-ristikossa yläpaarre on tuettu tiheämmin, joten paarteen nurjahduskestävyys on parempi kuin K-ristikossa. Liitokset tulevat kuitenkin vaikeammaksi toteuttaa. Alapaarteen liitokset joudutaan useimmiten tekemään limitettyinä, mikä lisää valmistuskustannuksia.

N-ristikossa sauvojen lukumäärä kasvaa K-ristikkoon verrattuna. Korkeissa ja lyhyissä ristikoissa uumasauvojen voimat ovat suuria paarrevoimiin verrattuna. Tällöin N-ristikko on edullinen, koska puristetut uumasauvat ovat lyhyempiä kuin KT-ristikoissa. Liitokset on yleensä tehtävä limitettyinä, jotta epäkeskeisyydet eivät olisi suuria.

Pitkillä jänneväleillä uumasauvojen kuormissa on suuria eroja. Tuen lähellä uumasauvan kuormat ovat suurempia kuin ristikon keskialueella. Painon säästämiseksi voidaan vähemmän rasitetuiksi uumasauvoiksi valita kevyemmät rakenneputket. Konepajavalmistuksen helpottamiseksi ei kuitenkaan kannata käyttää 2 - 4:ää useampaa uumasauvan kokoa. Saman ulkomitan rakenneputkilla pitäisi käyttää vain yhtä seinämän paksuutta yhdessä ristikossa, jotta rakenneputket eivät sekaannu valmistusvaiheessa. Paarre tehdään yleensä yksinkertaisuuden vuoksi samasta putkesta, vaikka normaalivoima vaihtelee paarteen pituuden matkalla. Paarreputki

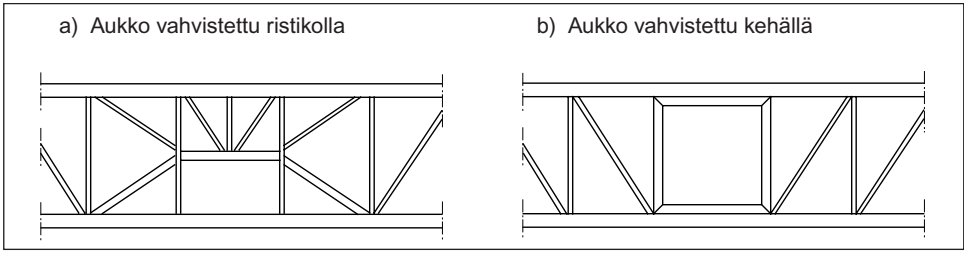
voidaan tehdä erikokoisista rakenneputkista, jos ristikko jaetaan asennuslohkoihin. Paarteen koko muuttuu tällöin asennusliitoksen kohdalla.

Jatkuvan ristikkopalkin välituella tukivoima ja momentti saavat maksimiarvonsa. Sijoittamalla vertikaalisauva tuen kohdalle saadaan puristetun alapaarteen nurjahduspituus pienemmäksi. Tukivoima on edullista ottaa vastaan vertikaalisauvalla, koska pidemmät diagonaalit ovat vedettyjä. Seuraavissa puristusdiagonaaleissa normaalivoima on jo pienempi kuin tuen kohdalla (kuva 7.17).



Kuva 7.17 Jatkuvan ristikkopalkin välituki

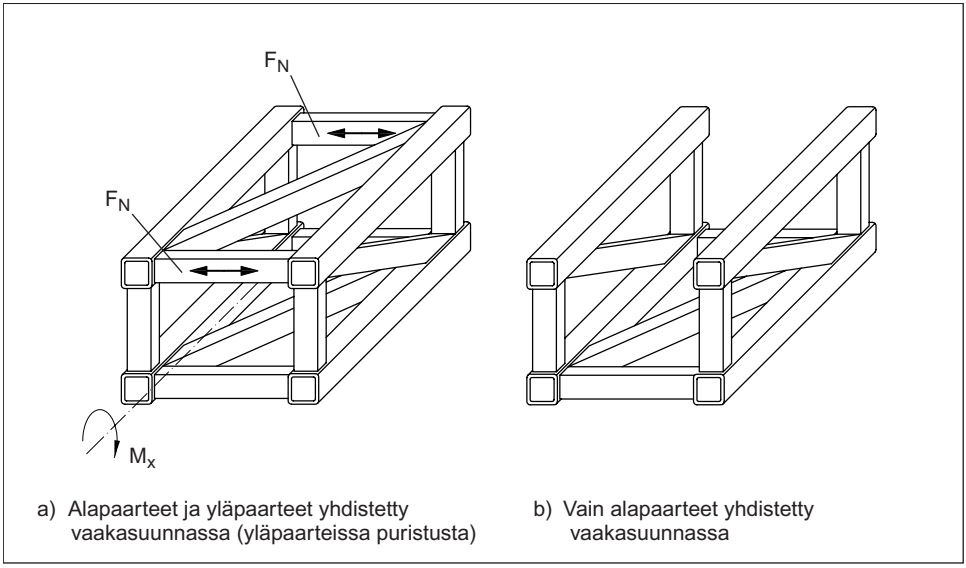
Erilaisten putkistojen läpiviennin vuoksi ristikkoon joudutaan joskus tekemään aukkoja. Aukon kohdalla ristikkoa täytyy vahvistaa, jotta leikkauskestävyys olisi riittävä. Yläpaarteen ja aukon väliin voidaan tehdä matalampi ristikko, jos aukon korkeus on ristikon korkeutta pienempi (kuva 7.18a). Aukko joudutaan vahvistamaan kehällä, jos aukolla on sama korkeus kuin ristikolla (kuva 7.18b). Leikkausvoiman aiheuttama taivutusmomentti otetaan huomioon kehän ja paarteiden mitoituksessa. Yleensä aukot kannattaa sijoittaa alueille, joissa leikkausvoima on mahdollisimman pieni.



Kuva 7.18 Aukon vahvistaminen ristikossa

Sivusuunnassa toisiinsa yhdistetyt ristikot

Putkisto-, kuljetin- ja hoitotasokannattimet konstruoidaan yleensä sillaksi yhdistämällä primääriristikot vaakasuuntaisilla tuuliristikoilla (kuva 7.19). Yhdistäminen voidaan tehdä myös levyillä, joiden kiinnitys mitoitetaan vaakakuormien mukaan. Kahdesta ristikosta koottu rakenne on suositeltavaa jäykistää ristikoiden tasoa vastaan kohtisuorilla vinositeillä kuvan 7.19a mukaisesti, jos ristikoilla on myös vääntökuormaa. Kuvan 7.19a tapauksessa puristetun yläpaarteen aiheuttama poikittainen voima on otettava huomioon vaakasuuntaisen ristikon (tai puristetun yläpaarteen poikittaistukien ja niiden kiinnitysten) mitoituksessa. Poikittaisen voiman F_N suuruudeksi voidaan alustavasti olettaa 2,5 % tuettavassa paarteessa vaikuttavasta normaalivoimasta N_{Ed}. Poikittaisen voiman tarkempi laskenta on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-1 ja lähteissä [22,23]. Puristetun yläpaarteen nurjahduspituus määritetään kuvan 7.19 molemmissa tapauksissa kohdan 7.4.2 mukaisesti, ellei tehdä tarkempaa tarkastelua.



a) Alapaarteet ja yläpaarteet yhdistetty vaakasuunnassa (yläpaarteissa puristusta)

b) Vain alapaarteet yhdistetty vaakasuunnassa

Kuva 7.19 Vaakasuunnassa yhdistetyt ristikot (F_N on nurjahduksen estävä poikittainen voima)

7.4.2 Paarreputken valinta

Paarreputken valintaan vaikuttavat ratkaisevasti nurjahduspituudet eri akseleiden suhteen. Neliön muotoinen putkipalkki on edullisin, kun nurjahduspituudet ovat lähes samoja molempiin suuntiin. Suorakaiteen muotoisen putkipalkin käyttö on perusteltua, jos nurjahduspituudet poikkeavat huomattavasti toisistaan. Leveä ja matala paarre ei ole kuitenkaan hyvä paarteen pinnan paikallisen lujuuden ja leikkauskestävyyden kannalta. Korkean paarteen valinta on paikallaan, jos paarteella on paljon taivutuskuormaa ristikon solmupisteiden välillä.

Putkiristikon paarteen nurjahduspituudeksi voidaan valita L_{cr} = 0,9L sekä ristikon tasossa että ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa tapahtuvassa nurjahduksessa. Ristikon tasossa

tapahtuvassa nurjahduksessa L on uumasauvojen solmupisteväli (systeemipituus). Ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa tapahtuvassa nurjahduksessa L on paarteen poikittaisten tukien välinen etäisyys, ellei pienemmän arvon käyttö ole perusteltu analyysiin perustuen [14,15,16]. Sivusuuntaiset jäykiste-elementit mitoitetaan sivusuuntaisille kuormille ja puristettujen paarteiden aiheuttamille poikittaisille voimille. Poikittaisen voiman suuruudeksi voidaan alustavasti olettaa 2,5 % tuettavassa paarteessa vaikuttavasta normaalivoimasta. Poikittaisen voiman tarkempi laskenta on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-1 ja lähteissä [22,23].

Liitosten epäkeskeisyydestä syntyvät taivutusmomentit täytyy ottaa huomioon puristetun paarteen mitoituksessa, joten paarre mitoitetaan puristettuna ja taivutettuna sauvana kohtien 2.9.1.5 ja 2.10 mukaisesti. Vedetyn paarteen mitoituksessa epäkeskeisyydestä aiheutuvia momentteja ei tarvitse ottaa huomioon, jos taulukossa 3.4 esitetut ehdot toteutuvat.

Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien liitokset ovat yksinkertaisempia tehdä kuin pyöreiden rakenneputkien liitokset. Poikkeuksena ovat kolmion muotoiset ristikkopalkit ja avaruusristikot, joissa pyöreiden rakenneputkien käyttö on perusteltua.

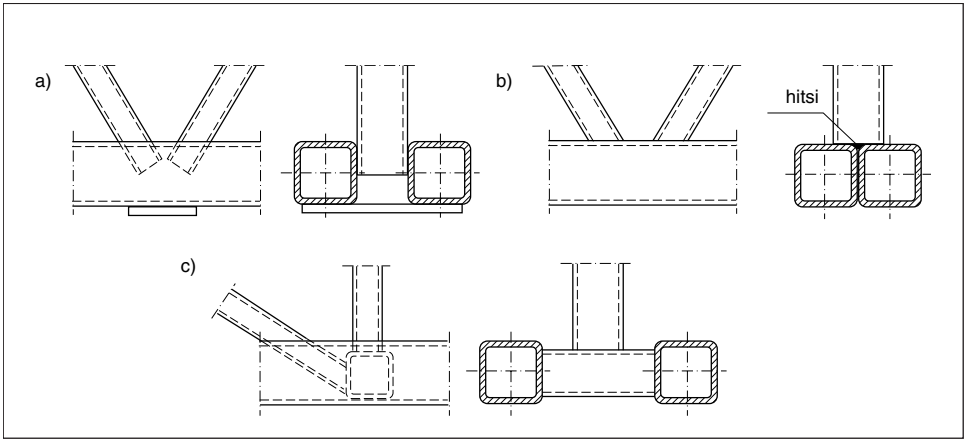
Paarteen suuri seinämän paksuus on edullinen liitosten lujuuden kannalta, mutta paarteen nurjahduskestävyyden osalta tilanne on päinvastainen (materiaali tulee tehokkaammin hyödynnettyä, kun seinämän paksuntamisen sijasta suurennetaan poikkileikkauksen ulkomittoja). Suunnittelussa on löydettävä sopiva kompromissi tai paarteen pintaa on vahvistettava lisälevyillä.

Raskaasti kuormitetut ristikot, joilla puristuspaarteen sivusuuntainen tuenta on harva, voidaan toteuttaa käyttäen kaksoispaarretta. Kaksoispaarreristikossa paarteet liitetään toisiinsa suoraan (kuva 7.20b) tai uumasauvojen välityksellä (kuvat 7.20a ja c). Paarteen vaakasuuntainen jäyhyys kasvaa huomattavasti, jos paarteet liitetään uumasauvojen välityksellä. Liitoksen kestävyyden osalta paarteen pinnan myötö ei pääse muodostumaan kriittiseksi, koska uumasauvojen voimat siirtyvät suoraan paarteen uumille. Kuvan 7.20c liitoksen mitoituksessa pitää ottaa huomioon kolmiulotteisuudesta aiheutuvat voimat. Kuvan 7.20b liitoksen mitoituksessa voidaan käyttää samoja kaavoja kuin I-profiilista valmistetun paarteen tapauksessa, kun nurkan pyöristysten väli hitsataan liitoksien kohdilta kuvassa esitetyn mukaisesti. I-profiilin uuman paksuus t_w korvataan paarteiden uumien yhteisellä paksuudella $2t_0$ ja pyöristyssäteenä käytetään paarteen nurkan sisäpuolista pyöristyssädettä. Kuvan 7.20a liitoksen mitat on valittava siten, että uumasauvojen hitsien luoksepäästävyys varmistetaan. Kaikkien uumasauvojen on lisäksi oltava saman levyiset, mutta seinämänpaksuutta ja poikkileikkauksen korkeutta voidaan varioida. Kuvan 7.20a paarteiden leikkauskestävyyden osalta käytetään seuraavia leikkauspinta-aloja [29]:

$$A_V = 2,6 h_0 t_0 \qquad kun\ h_0/b_0 \geq 1 \qquad (7.17a)$$

$$A_V = 2,0 h_0 t_0 \qquad kun\ h_0/b_0 < 1 \qquad (7.17b)$$

missä h_0 on paarteen korkeus
b_0 on paarteen leveys



Kuva 7.20 Kaksoispäarre

7.4.3 Uumasauvojen valinta

Uumasauvojen osalta sauvan valinta on selkeämpi, koska ohutseinäinen ja ulkomitoiltaan suuri uumasauva on parempi sekä liitoksen lujuuden että sauvan kestävyyden kannalta. Ohutseinäinen uumasauva on edullinen myös liitoshitsin a-mitan kannalta. Uumasauvan poikkileikkauksen hoikkuus on kuitenkin pidettävä liitteen 11.3 laskentataulukoiden sallimissa rajoissa. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että ristikon sauvojen tulee kuulua poikkileikkausluokkaan 1 - 2. Paarteen ja uumasauvan väliseen hitsiin on kiinnitettävä erityistä huomiota silloin, kun paarre ja uumasauva ovat lähes tasalevyisiä (ks. luku 8, kuvat 8.15 - 8.18). Yleensä on suositeltavaa valita uumasauvan mitat siten, että uumasauvan leveyden suhde paarteen leveyteen on välillä 0,7 - 0,8.

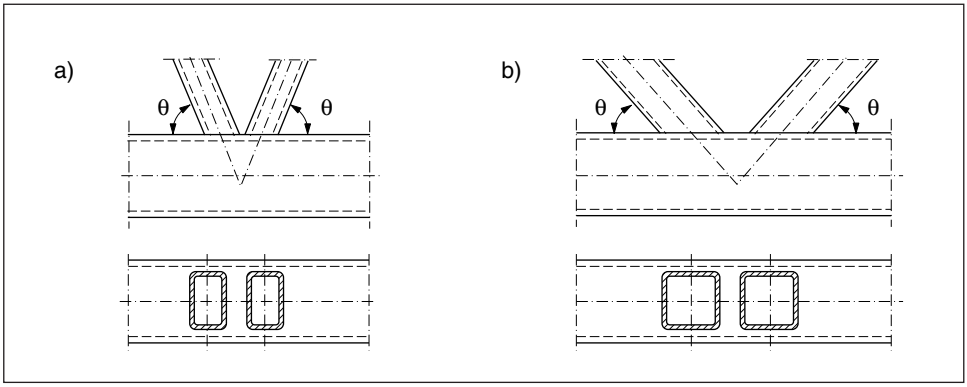
On aina varmalla puolella olettaa uumasauvan nurjahduspituudeksi sauvan systeemipituus. Joka sivulta hitsatuilla liitoksilla on kuitenkin jäykkyyttä, jolloin nurjahduspituudeksi voidaan Eurocoden osan EN 1993-1-1 mukaan ottaa L_{cr} = 0,75L missä L on uumasauvan systeemipituus (solmupisteväli) [14,15,16]. Kansallisessa liitteessä voidaan antaa lisäohjeita uumasauvojen nurjahduspituuden määrittämisestä.

> *Suomen kansallinen liite standardiin EN 1993-1-1 [17]:*
>
> *Käytetään Eurocodessa esitettyä ohjetta. Pienempiä nurjahduspituuksia voidaan käyttää kokeisiin tai laskelmiin perustuen.*

Suomen kansallisen liitteen perusteella uumasauvojen nurjahduspituus voidaan täten laskea myös lähteen [31] kaavoilla, jotka ovat voimassa jos suhde b_1 / b_0 on pienempi kuin 0,6. Täysin limitettyjen (λ_{ov} = 100 %) tai litistettyjen uumasauvojen liitoksissa nurjahduspituus on kuitenkin aina sauvan systeemipituus.

Suurilla liitoskulman θ_i arvoilla kannattaa käyttää suorakaiteen muotoisia uumasauvoja, jotta liitoksen epäkeskeisyydet pysyisivät pieninä (kuva 7.21a). Pienillä liitoskulmilla tai lähellä tukea voidaan käyttää neliön muotoisia uumasauvoja, jos ristikkopalkki on yksiaukkoinen (kuva

7.21b). Tuen lähellä paarteen normaalivoimat ovat pieniä, joten paarre kestää liitoksen epäkeskeisyyksien aiheuttamat taivutusmomentit paremmin.



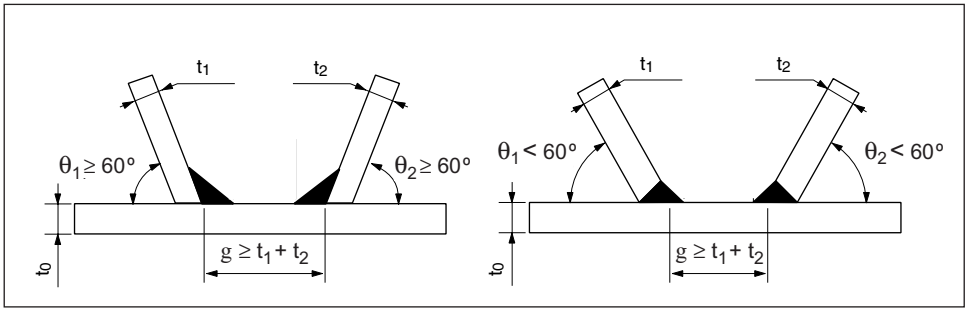
Kuva 7.21 Uumasauvan muodon vaikutus

7.4.4 Ristikkoliitosten suunnittelu

Ristikon liitokset voidaan jakaa kahteen pääryhmään; vapaavälisiin ja limitettyihin liitoksiin. Vapaaväliset liitokset ovat helpompia valmistaa, koska uumasauvat katkaistaan kerralla sopivaan kulmaan. Ristikon kokoonpanossa on myös hieman paremmin sovitusvaraa. Vapaavälisessä liitoksessa neliön muotoisilla uumasauvoilla epäkeskeisyys muodostuu kuitenkin yleensä suureksi. Epäkeskeisyys puolestaan lisää paarteen taivutuskuormaa. Samoin liitoksen leikkauskestävyys saattaa muodostua vapaavälisessä liitoksessa mitoittavaksi. Limitetty liitos on työläämpi valmistaa, koska päälle asennettava sauva on leikattava kahdessa kulmassa. Osien sovitustoleranssit ovat tiukemmat kuin vapaavälisissä liitoksissa. Vastaavasti liitoksen kestävyys on parempi ja epäkeskeisyys voidaan sopivalla limityksellä poistaa kokonaan.

Liitosten laskentataulukoissa uumasauvojen pienin sallittu kulma on 30°. Käytännössä kannattaa välttää pieniä liitoskulmia, koska terävän kulman puoleisen sivun hitsaaminen on pienillä kulmilla vaikeaa. Loivilla kulmilla pienetkin virheet putkipalkin katkaisussa aiheuttavat suuria ilmarakoja liitoksissa. Uumasauvojen päät pitää viistää, jos liitoskulma θ_i on pienempi kuin 60° (kuva 7.22 sekä luku 8, kuvat 8.15 - 8.18).

Vapaavälisissä liitoksissa uumasauvojen välisen vapaavälin tulee olla vähintään $g \geq (t_1 + t_2)$, jotta varmistetaan riittävä tila tarvittavien hitsien aikaansaamiseksi, sekä paarteen pinnan riittävä plastinen muodonmuutoskyky (kuva 7.22 ja taulukko 3.5). Joissakin liitostyypeissä tarvitaan tätä suurempi vapaaväli. Liitostyyppikohtaiset tarkemmat vaatimukset on esitetty liitteen 11.3 laskentataulukoissa.



Kuva 7.22 Vapaavälin minimiarvo

Putkiristikoiden liitoksissa muodostuu liitoksen alueelle paikallisia jännityshuippuja. Uumasauvojen ja paarteiden myötääminen tasaa kuitenkin jännityshuippuja. Tämän vuoksi liitosten hitsit mitoitetaan yleensä tasalujiksi sauvojen kanssa. **Uumasauvan ympäri hitsattu pienahitsi on tasaluja uumasauvan kanssa, kun sen a-mitta on vähintään taulukossa 3.9 esitetyn mukainen.** Uumasauvan päittäishitsi voidaan olettaa tasalujaksi, kun se on täysin läpihitsattu (ks. tarkemmin kohta 3.3.4).

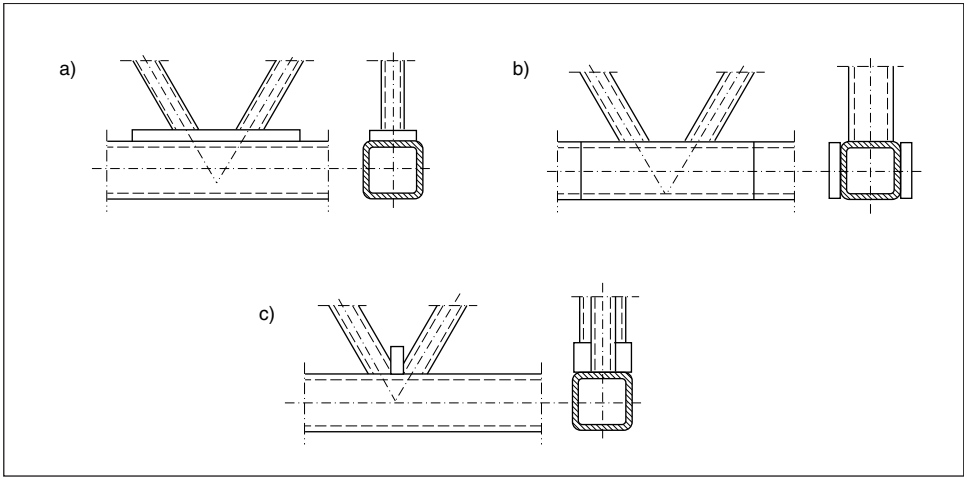
Ristikkoliitoksen vahvistaminen

Liitoksen vahvistaminen on kannattavaa, jos vahvistettavia liitoksia on vähän suhteessa ristikon sauvojen lukumäärään. Liitoksien vahvistaminen lisää valmistuskustannuksia, mutta samalla säästetään painoa ja vältytään liian monien kokojen käytöltä. Vahvistettujen liitosten mitoitusohjeet on esitetty Eurocoden osassa EN 1993-1-8 ja tämän käsikirjan taulukoissa 11.3.17 - 11.3.21.

Paarteen pintaa voidaan vahvistaa lisälevyllä (kuva 7.23a). Tämä on tehokas vahvistusmenetelmä, kun uumasauvat ovat selvästi kapeampia kuin paarre. Vahvikelevyn paksuuden on oltava vähintään kaksi kertaa uumasauvan seinämän paksuus ($t_p \geq 2t_i$). Liitoksen kestävyyden laskennassa paarteen pinnan paksuus t_0 korvataan vahvikelevyn paksuudella t_p ja paarteen leveys korvataan vahvikelevyn leveydellä b_p. Paarteen pinnan suhteen vahvistettujen liitosten kestävyyksiä on käsitelty taulukoissa 11.3.17 ja 11.3.19. Vahvikelevy on altis lamellirepeilylle, mikä on otettava huomioon levyn materiaalia valittaessa (lamellirepeilyä koskevat ohjeet, ks. luku 5).

Paarteen leikkauskestävyyttä voidaan parantaa sivulevyillä, jotka hitsataan paarteen kylkeen (kuva 7.23b). Levyjen korkeus on sama kuin paarteen. Leikkauspinta-alaa laskettaessa paarteen uuman paksuus t_0 korvataan summalla $t_0 + t_p$. Paarteen uumien suhteen vahvistettujen liitosten kestävyyksiä on käsitelty taulukoissa 11.3.18 ja 11.3.20. Liitoksen leikkauskestävyys on usein mitoittava, kun uumasauva ja paarre ovat tasalevyisiä.

Uumasauvojen välissä voidaan käyttää lisälevyä, jos normaalina limiliitoksena limitys jäisi kestävyystaulukoiden vaatimusta pienemmäksi, tai limitettävien uumasauvojen keskinäinen leveysero on niin suuri, että kestävyystaulukoissa sille asetetut vaatimukset eivät toteudu (kuva 7.23c). Lisälevyn paksuus on vähintään kaksi kertaa uumasauvan seinämänpaksuus ($t_p \geq 2t_i$). Lisälevyllä vahvistettujen limitettyjen liitosten kestävyyksiä on käsitelty taulukossa 11.3.21.

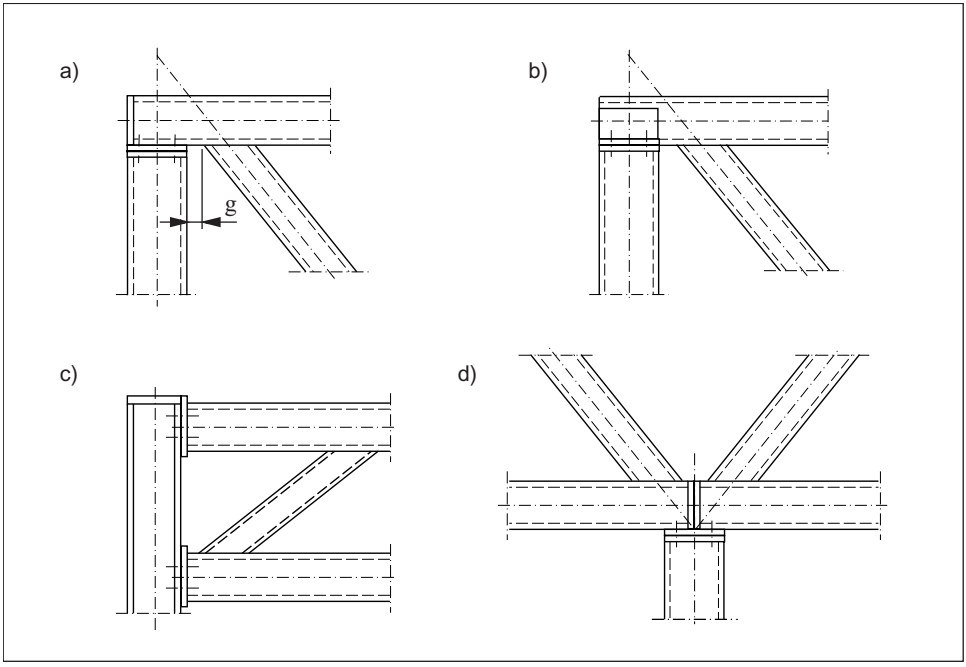


Kuva 7.23 Ristikon liitosten vahvistaminen

7.4.5 Ristikon liitos tuella

Ristikon leikkausvoiman siirtäminen pilarille on syytä tutkia huolellisesti. Leikkausvoima siirtyy pilarin taivutusmomentiksi, jos diagonaalisauvan, paarteen ja pilarin painopisteakselit eivät leikkaa samassa pisteessä. Käytännössä on usein edullista sallia pieni epäkeskeisyys, jos liitos tulee helpommaksi valmistaa. Paarteen pää suljetaan (jäykistetään) yleensä aina levyllä, jotta pistekuormakestävyys olisi riittävä. Liitoskohdassa paarre mitoitetaan normaali- ja leikkausvoiman sekä taivutusmomentin yhteisvaikutukselle. Erityisesti jatkuvan ristikkopalkin välituella normaalivoiman vaikutus on huomattava.

Erilaisia liitostapoja on esitetty kuvassa 7.24. Kuvan 7.24a tapauksessa uumasauvan ja paarteen välinen liitos mitoitetaan K / N -liitoksena, kun vapaaväli g on kestävyystaulukoissa K / N -liitokselle asetettujen vaatimusten mukainen. Suuremmilla vapaavälin arvoilla liitos mitoitetaan kahtena erillisenä Y-liitoksena.



Kuva 7.24 Ristikon liitos tuella

7.4.6 Ristikon liitos harjalla

Ristikon harjalla uumasauvojen normaalivoimat vaikuttavat kuvan 7.25 mukaisesti yleensä samaan suuntaan (molemmissa vetoa tai molemmissa puristusta). Kuvien 7.25a ja b tapauksessa liitos mitoitetaan tällöin X-liitoksena. Uumasauvojen 1 ja 2 liitoskestävyydet tarkastetaan ensin normaaliin tapaan sauvakohtaisesti. Lisäksi tarkastetaan liitoksen kestävyys uumasauvojen sauvavoimien yhteenlasketulle pystykomponentille seuraavasti [18,19,20]:

$$N_{1.Ed}\,sin\theta_1 + N_{2.Ed}\,sin\theta_2 \le N_{x.Rd}\,sin\theta_x \qquad (7.18)$$

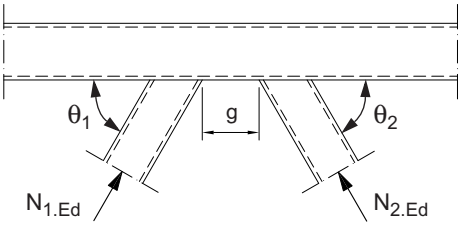
missä $N_{x.Rd}\,sin\theta_x$ on suurempi X-liitoksen kestävyystaulukon mukaan lasketuista arvoista $|\,N_{1.Rd}\,sin\theta_1\,|$ ja $|\,N_{2.Rd}\,sin\theta_2\,|$.

Jos liitoksessa käytetään välilevyä kuvan 7.25c mukaisesti, liitoksen kumpikin puoli mitoitetaan vastaavasti kuin tuella (ks. kohta 7.4.5): käytetään K / N -liitoksen kaavoja kun vapaaväli g on kestävyystaulukoissa K / N -liitokselle asetettujen vaatimusten mukainen, mutta suuremmilla vapaavälin arvoilla liitos mitoitetaan kahtena erillisenä Y-liitoksena.

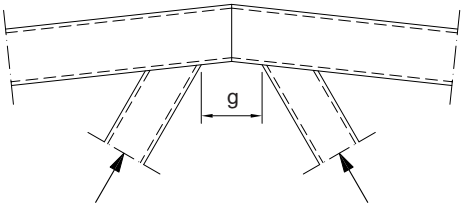
Jos paarresauvassa on lisäksi samalla kuvien 7.25b tai c mukainen taite, pitää liitoksen kestävyys tarkastaa edellä esitetyn lisäksi myös polviliitoksena. Polviliitoksen kestävyyksiä on käsitelty taulukossa 11.3.14. Välilevyn käyttö parantaa polviliitoksen kestävyyttä huomattavasti.

Välilevyn paksuuden tulee olla $t_p \geq 1{,}5\, t_0$ (missä t_0 on paarteen seinämänpaksuus), kuitenkin vähintään $t_p \geq 10$ mm.

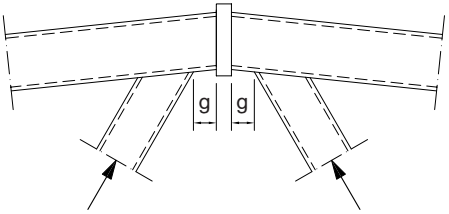
a) Suora yläpaarre:



b) Yläpaarteessa polviliitos ilman välilevyä:



c) Yläpaarteessa välilevyllä vahvistettu polviliitos:



Kuva 7.25 Ristikon liitos harjalla

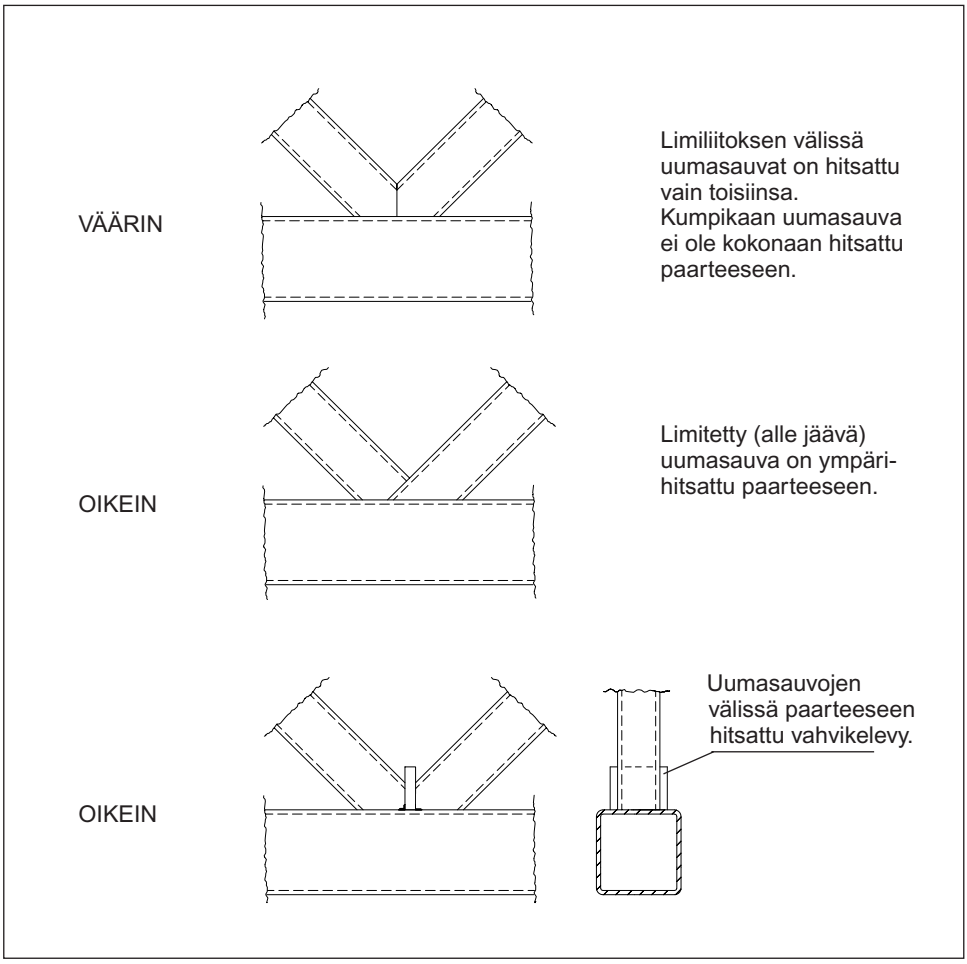
7.4.7 Ristikon limitetyt liitokset

Limitetyissä liitoksissa limityksen tulee olla vähintään $\lambda_{ov} \geq 25$ % että varmistetaan leikkausvoiman siirtyminen uumasauvasta toiseen. Limitettyjä liitoksia koskevia yleisiä ohjeita on esitetty luvun 3 taulukossa 3.5. Liitostyyppikohtaiset tarkemmat vaatimukset on esitetty liitteen 11.3 laskentataulukoissa.

Taulukossa 3.5 limitetyille uumasauvoille esitettyjen ohjeiden perusajatus on, että ensin hitsataan paarteeseen 'vahvempi' uumasauva, johon sitten (osittaisella tai täydellisellä limityksellä) hitsataan 'heikompi' uumasauva. Jos limitettävät uumasauvat ovat taulukossa esitettyjen kriteerien suhteen samanarvoiset, suositellaan että vedetty uumasauva hitsataan ensin paarteeseen, ja puristettu uumasauva limitetään sen päälle [30].

Limitetyissä N-liitoksissa vertikaalisauva hitsataan yleensä ensin parteeseen. Jos kuitenkin diagonaalisauva joudutaan valitsemaan ulkomitoiltaan vertikaalia suuremmaksi (diagonaalin kuormitus on tyypillisesti suurempi kuin vertikaalin), joudutaan diagonaali asettamaan liitoksessa alimmaiseksi [30].

Osittain limitetyissä K-liitoksissa limitetyn (eli alle jäävän) uumasauvan pää katkaistaan yhdellä vinolla katkaisulla, ja limittävän (eli päälle tulevan) uumasauvan pää katkaistaan kahdella vinolla katkaisulla. **Kyseisiä liitoksia ei saa toteuttaa siten, että molemmat uumasauvat katkaistaisiin kahdella vinolla katkaisulla, jolloin uumasauvat päädyttäisiin hitsaamaan limiliitoksen väliin jäävältä sivulta vain toisiinsa (kuva 7.26). Tällöin kumpikaan uumasauvoista ei ole kokonaan hitsattu paarteeseen. Tällaisen limiliitoksen kestävyys on olennaisesti huonompi, kuin oikein toteutetun.**

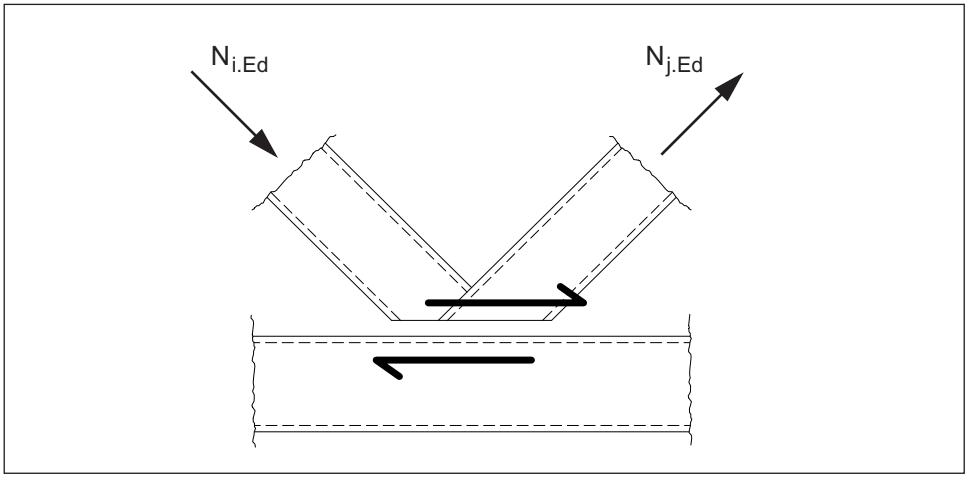


Kuva 7.26 Limitetty K-liitos. Väärä ja oikea toteutustapa

Limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu voidaan tietyin ehdoin jättää hitsaamatta paarteeseen (ks. taulukko 3.5). SSAB kuitenkin suosittelee, että limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu hitsataan aina paarteeseen liitoksen kestävyyden varmistamiseksi.

Eurocoden osaan EN 1993-1-8 julkaistun korjausosan [20] mukaan limitettyjen liitosten tapauksessa tulee liitoksen kestävyydelle suorittaa seuraava lisätarkastus:

Kun $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ (pyöreät tai neliön tai suorakaiteen muotoiset uumasauvat) tai kun suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_i < b_i$ tai $h_j < b_j$, tulee tarkastaa uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta (kuva 7.27).



Kuva 7.27 Limitetty liitos. Uumasauvojen leikkautuminen paarteesta

Limityksen raja-arvo $\lambda_{ov.lim}$ määritetään tällöin seuraavasti:

- $\lambda_{ov.lim}$ = 60 % , kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu parteeseen
- $\lambda_{ov.lim}$ = 80 % , kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu parteeseen.

Eurocodessa ei ole kuitenkaan esitetty ohjeita kuinka kyseinen leikkautumiskestävyys tarkastetaan. Tässä käsikirjassa suositellaan seuraavaa menettelyä, joka tultanee aikanaan julkaisemaan Eurocoden osan EN 1993-1-8 Suomen kansallisessa liitteessä:

Uumasauvoina pyöreät rakenneputket:

- Kun: 60 % < λ_{ov} < 100 % kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen
- tai: 80 % < λ_{ov} < 100 % kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen

tarkastetaan ehto:

$$N_{i.Ed}\cos\theta_i + N_{j.Ed}\cos\theta_j \le N_{s.Rd} \qquad (7.19)$$

missä:

$$N_{s.Rd} = \frac{\pi}{4}\cdot\left[\frac{f_{ui}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{\left[\left(\frac{100-\lambda_{ov}}{100}\right)\cdot 2d_i + d_{eff.i}\right]\cdot t_i}{\sin\theta_i} + \frac{f_{uj}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{(2d_j + c_s d_{eff.j})\cdot t_j}{\sin\theta_j}\right]\cdot\frac{1}{\gamma_{M5}} \qquad (7.20)$$

• Kun: λ_{ov} = 100 %

tarkastetaan ehto:

$$N_{i.Ed}\cos\theta_i + N_{j.Ed}\cos\theta_j \le N_{s.Rd} \qquad (7.21)$$

missä:

$$N_{s.Rd} = \frac{\pi}{4}\cdot\frac{f_{uj}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{(3d_j + d_{eff.j})\cdot t_j}{\sin\theta_j}\cdot\frac{1}{\gamma_{M5}} \qquad (7.22)$$

Uumasauvoina neliön tai suorakaiteen muotoiset rakenneputket:

• Kun: 60 % < λ_{ov} < 100 % kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen
• tai: 80 % < λ_{ov} < 100 % kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen
• tai: $h_i < b_i$ ja λ_{ov} < 100 %
• tai: $h_j < b_j$ ja λ_{ov} < 100 %

tarkastetaan ehto:

$$N_{i.Ed}\cos\theta_i + N_{j.Ed}\cos\theta_j \le N_{s.Rd} \qquad (7.23)$$

missä:

$$N_{s.Rd} = \left[\frac{f_{ui}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{\left[\left(\frac{100-\lambda_{ov}}{100}\right)\cdot 2h_i + b_{eff.i}\right]\cdot t_i}{\sin\theta_i} + \frac{f_{uj}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{(2h_j + c_s b_{eff.j})\cdot t_j}{\sin\theta_j}\right]\cdot\frac{1}{\gamma_{M5}} \qquad (7.24)$$

• Kun: λ_{ov} = 100 %

tarkastetaan ehto:

$$N_{i.Ed}\cos\theta_i + N_{j.Ed}\cos\theta_j \le N_{s.Rd} \qquad (7.25)$$

missä:

$$N_{s.Rd} = \frac{f_{uj}}{\sqrt{3}}\cdot\frac{(2h_j + b_j + b_{eff.j})\cdot t_j}{\sin\theta_j}\cdot\frac{1}{\gamma_{M5}} \qquad (7.26)$$

Lausekkeissa (7.19) - (7.26) alaindeksi i tarkoittaa limittävää ja alaindeksi j limitettyä uumasauvaa.

Muut tekijät määritetään seuraavasti:

$N_{s.Rd}$ on uumasauvaliitoksen leikkauskestävyys, jota pienennetään taulukon 3.1 mukaisella lujuusluokkakohtaisella korjauskertoimella

f_u on uumasauvan nimellinen murtolujuus
c_s on tehollisen leikkauspinta-alan tekijä:
c_s = 1 , kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen
c_s = 2 , kun limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen
b_{eff} on uumasauvan tehollinen leveys taulukon 7.9 mukaisesti
d_{eff} on uumasauvan tehollinen halkaisija taulukon 7.9 mukaisesti

Taulukko 7.9 Uumasauvojen leikkautuminen limitetyissä liitoksessa. Tehollliset mitat

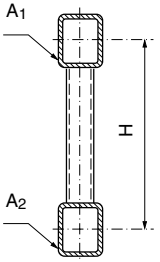
		Uumasauvat	
		Pyöreä (CHS)	Neliö tai suorakaide (RHS)
Paarre	Pyöreä (CHS)	Limittävä CHS-uumasauva CHS-paarteessa $d_{eff.i} = \frac{12}{d_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot d_i \le d_i$	–
		Limitetty CHS-uumasauva CHS-paarteessa $d_{eff.j} = \frac{12}{d_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yj} \cdot t_j} \cdot d_j \le d_j$	–
	Neliö tai suorakaide (RHS)	Limittävä CHS-uumasauva RHS-paarteessa $d_{eff.i} = \frac{10}{d_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot d_i \le d_i$	Limittävä RHS-uumasauva RHS-paarteessa $b_{eff.i} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$
		Limitetty CHS-uumasauva RHS-paarteessa $d_{eff.j} = \frac{10}{d_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yj} \cdot t_j} \cdot d_j \le d_j$	Limitetty RHS-uumasauva RHS-paarteessa $b_{eff.j} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yj} \cdot t_j} \cdot b_j \le b_j$
	I-profiili	Limittävä CHS-uumasauva I-paarteessa $d_{eff.i} = t_w + 2r + 7t_0 \cdot \frac{f_{y0}}{f_{yi}} \le d_i$	Limittävä RHS-uumasauva I-paarteessa $b_{eff.i} = t_w + 2r + 7t_0 \cdot \frac{f_{y0}}{f_{yi}} \le b_i$
		Limitetty CHS-uumasauva I-paarteessa $d_{eff.j} = t_w + 2r + 7t_0 \cdot \frac{f_{y0}}{f_{yj}} \le d_j$	Limitetty RHS-uumasauva I-paarteessa $b_{eff.j} = t_w + 2r + 7t_0 \cdot \frac{f_{y0}}{f_{yj}} \le b_j$

7.4.8 Ristikon jäykkyyden arviointi

Tavallisesti ristikon taipuma saadaan suoraan ristikkolaskentaohjelman tulostuksena. Ristikot voidaan mallintaa laskentaohjelmassa siten, että paarteet ovat jatkuvia ja uumasauvat nivelellisesti paarteeseen kiinnitettyjä. Liitoksien jouston vuoksi vapaavälisillä liitoksilla todellinen taipuma voi olla 12 - 15 % suurempi kuin laskettu taipuma [30]. Esisuunnitteluvaiheessa saattaa olla tarpeellista arvioida ristikon taipumaa käsinlaskukaavoilla. Ristikon jäykkyys voidaan laskea likimääräisesti ottaen huomioon vain paarteiden vaikutus:

$$I = A_1 \cdot H^2 \left[\frac{\frac{A_2}{A_1}}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2 + A_2 \cdot H^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2 \qquad (7.27)$$

missä A_1 ja A_2 ovat paarteiden poikkipinta-alat
H on paarteiden painopisteakseleiden etäisyys



7.4.9 Ristikon mitoitus esimerkkikohteessa

Kuormat:

Mitoitetaan esimerkkikohteen primääriristikot. Ristikon kuormat koostuvat omasta painosta ja lumikuormasta. Orsijako on 4 m, joten uumasauvojen liitokset kannattaa tehdä samalla jaolla. Kuormakerroin K_{FI} = 1,1. Primääriristikoiden jaolla 10 m ristikon kuormaksi saadaan:

$$q_d = [\gamma_G \cdot g_k + \gamma_{Q.1} \cdot q_{k.1}] L_f = [(1{,}35 \cdot 1{,}1) \cdot 0{,}5 + (1{,}5 \cdot 1{,}1) \cdot 1{,}2] \cdot 10 = 27{,}2 \text{ kN/m}$$

$$F_{Ed} = q_d \cdot L_p = 27{,}2 \cdot 4 = 108{,}8 \text{ kN} \quad \textit{(solmupisteen kuorma)}$$

missä

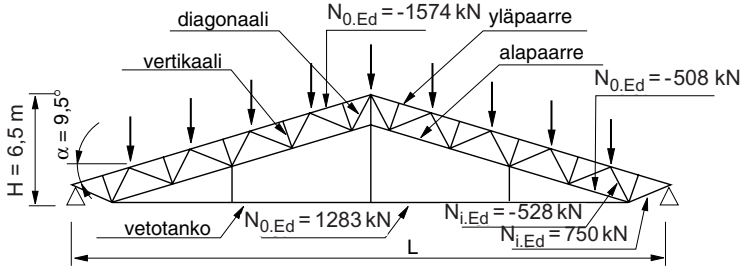
L_f *on kehäväli*
L_p *on orsiväli*

Ristikon muoto:

Kattoristikossa alapaarre voidaan tehdä joko suorana tai taitettuna. Normaalivoimat ovat suurempia taitetussa alapaarteessa. Suorassa alapaarteessa ristikon korkeus on suurempi keskellä jänneväliä, jossa momenttikin on suurin. Suoran alapaarteen normaalivoima jää tällöin pienemmäksi. Suoran alapaarteen vuoksi uumasauvojen pituus (ja nurjahduspituus)

kasvaa, joten ristikon paino saattaa nousta taitetun alapaarteen omaavan ristikon painoon verrattuna. Esimerkkikohteessa alapaarre on tehty taitettuna, mutta alapaarteen normaalivoima otetaan vastaan vetotangolla. Vetotangon käyttö vähentää uumasauvojen teräsmäärää, mutta lisää ristikon liitosten lukumäärää.

Jänneväli on pitkä, joten leikkausvoima on pieni taivutusmomenttiin verrattuna. N-ristikko on siten tarpeettoman raskasrakenteinen esimerkkikohteeseen. Valitaan yläpaarteen kestävyyden vuoksi KT-ristikko, koska orsijako on harva. Ristikon korkeus arvioidaan jännevälin suhteen. Esimerkkikohteessa ristikon korkeudeksi valitaan 6,5m (vetotangollisesta rakenneratkaisusta johtuen korkeudessa poiketaan taulukon 7.8 ohjeista).



Sauvavoimien laskeminen:
Paarteiden ja uumasauvojen alustavat sauvavoimat saadaan laskemalla ristikon voimasuureet vapaasti tuetun palkin kaavoilla:

$$N_{0.Ed} \approx \frac{q_d \cdot L^2}{8H} = \frac{27,2 \cdot 48^2}{8 \cdot 6,5} = 1205\ kN$$ *yläpaarteen normaalivoima*

$$N_{i.Ed} \approx 0,5 q_d \cdot L\sqrt{2} = 0,5 \cdot 27,2 \cdot 48\sqrt{2} = 923,2\ kN$$ *tuen viereisen uumasauvan normaalivoima (vetoa)*

Yläpaarteen nurjahduspituudeksi voidaan ottaa 90 % orsien välisestä etäisyydestä vaakasuunnassa ja samoin 90 % ristikon solmupisteiden etäisyydestä pystysuunnassa (kohta 7.4.2). Yläpaarteen nurjahduspituudeksi saadaan siten:

$$L_{cr.y} = 0,9 \cdot \frac{2}{\cos 9,5} = 1,83\ m$$

$$L_{cr.z} = 0,9 \cdot \frac{4}{\cos 9,5} = 3,65\ m$$

Ristikon kaikkien putkien teräslaji on SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan.

Näiden tietojen perusteella voidaan alustavasti valita yläpaarteeksi nurjahduskestävyyksien perusteella (liite 11.2) rakenneputki 200×200×8. Uumasauvoiksi valitaan alustavasti tuen viereisen uumasauvan vedon perusteella liitteestä 11.1 putki 120×120×5 (seuraavassa diagonaalissa vaikuttava puristus on lukuarvoltaan jo paljon pienempi).

Alapaarteen kokoa on vaikeampi määrittää käsinlaskien tässä tapauksessa, joten valitaan alapaarteeksi uumasauvan liitoksen vuoksi 140×140×5. Vetotangon normaalivoima voidaan olettaa yläpaarteen normaalivoiman suuruiseksi. Valitaan vetotangoksi Ø 80 mm (f_y = 345 N/mm^2). Laskentaohjelman tulostuksena saadaan seuraavat voimien maksimiarvot:

Yläpaarre:	$N_{0.Ed}$ = - 1574 kN	*(puristusta)*
	$M_{0.Ed}$ = 11,4 kNm	*(solmupisteissä epäkeskeisyydestä aiheutuva taivutus)*
Alapaarre:	$N_{0.Ed}$ = - 508 kN	*(puristusta)*
Vetotanko	$N_{0.Ed}$ = 1283 kN	*(vetoa)*
Uumasauvat:	$N_{i.Ed}$ = - 528 kN	*(puristusta)*
	$N_{i.Ed}$ = 750 kN	*(vetoa)*

Yläpaarteen kestävyys:
Tarkastetaan ensin yläpaarteen kestävyys, kun käytetään rakenneputkea 200×200×8. Putki kuuluu poikkileikkausluokkaan 1.

Poikkileikkauksen kestävyydet:
$N_{c.Rd} = 2488\ kN \geq 1574\ kN$ *(liite 11.1) OK*
$M_{pl.y.Rd} = 176,8\ kNm \geq 11,4\ kNm$ *(liite 11.1) OK*

(M+N) yhteisvaikutus:
normaalivoima on niin suuri, että se pienentää taivutuskestävyyttä (lausekkeet (2.123a) ja (2.123b)):

$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} = \frac{1574}{2488} = 0,6326$$

$$a_w = \frac{A - 2bt}{A} = \frac{5924 - 2 \cdot 200 \cdot 8}{5924} = 0,4598 \leq 0,5$$

$$M_{N.y.Rd} = M_{pl.y.Rd} \frac{1-n}{1 - 0,5\,a_w} = 176,8 \cdot \frac{1 - 0,6326}{1 - 0,5 \cdot 0,4598} = 84,3\ kNm \leq M_{pl.y.Rd}$$

$M_{N.y.Rd} = 84,3\ kNm \geq 11,4\ kNm$ *OK*

Nurjahduskestävyys:
$N_{b.y.Rd} = 2316\ kN$ *(L_{cr} = 1,83 m , $\bar{\lambda}_y$ = 0,3358 , χ_y = 0,9307)*
$N_{b.Rd} = N_{b.z.Rd} = 1850\ kN$ *(L_{cr} = 3,65 m , $\bar{\lambda}_z$ = 0,6697 , χ_z = 0,7434)*

Nurjahduksen ja taivutuksen yhteisvaikutus:

Neliöputkella kiepahdus ei pienennä poikkileikkauksen taivutuskestävyyttä. Tällöin sauvan (M+N) yhteisvaikutustarkasteluissa voidaan kiepahduskestävyyden pienennystekijälle käyttää arvoa $\chi_{LT} = 1,0$:

$\psi = 0$ *(taulukko 2.25, varmalla puolella oleva yksinkertaistus)*

$M_{Ed} = 11,4\ kNm$

$C_{my} = 0,6 + 0,4\psi = 0,6 + 0 = 0,6 \geq 0,4$

Taulukosta 2.23 saadaan (poikkileikkausluokka 1):

$$k_{yy} = C_{my}\left[1 + (\bar{\lambda}_y - 0,2) \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right]$$

$$= 0,6 \cdot \left[1 + (0,3358 - 0,2) \cdot \frac{1574 \cdot 10^3}{0,9307 \cdot 5924 \cdot 420/1,0}\right] = 0,6554$$

$$k_{yy} \leq C_{my}\left[1 + 0,8 \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}/\gamma_{M1}}\right] = 0,6\left[1 + 0,8 \cdot \frac{1574 \cdot 10^3}{0,9307 \cdot 5924 \cdot 420/1,0}\right] = 0,9263$$

$\Rightarrow k_{yy} = 0,6554$

$$k_{zy} = 0,6k_{yy} = 0,6 \cdot 0,6554 = 0,3932$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} =$$

$$\frac{1574 \cdot 10^3}{0,9307 \cdot \frac{5924 \cdot 420}{1,0}} + 0,6554 \cdot \frac{11,4 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{420,9 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0}} + 0 =$$

$0,6797 + 0,0423 = 0,7220 \leq 1,0$ *OK*

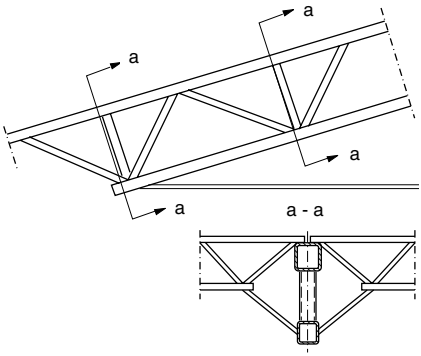
$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \frac{N_{Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zy}\frac{M_{y.Ed} + \Delta M_{y.Ed}}{\chi_{LT}\frac{M_{y.Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz}\frac{M_{z.Ed} + \Delta M_{z.Ed}}{\frac{M_{z.Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0$$

$$\frac{1574 \cdot 10^3}{0,7434 \cdot \frac{5924 \cdot 420}{1,0}} + 0,3932 \cdot \frac{11,4 \cdot 10^6 + 0}{1,0 \cdot \frac{420,9 \cdot 10^3 \cdot 420}{1,0}} + 0 =$$

$0,8510 + 0,0254 = 0,8764 \leq 1,0$ *OK*

Alapaarteen ja vetotangon mitoitus:

Vetotangon käyttö aiheuttaa alapaarteeseen puristusvoimaa. Puristusvoima esiintyy vain ensimmäisessa diagonaalivälissä, jonka jälkeen alapaarre on vedetty. Tuetaan alapaarteen puristettu osa sivusuunnassa vinositeillä orteen. Alapaarteen 140×140×5 nurjahduspituus on sama molempiin suuntiin:



$$L_{cr} = 0,9 \cdot \frac{4}{\cos 9,5} = 3,65\ m$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,5706 \cdot 2636 \cdot 420}{1,0}$$

$$= 631,7\ kN \geq 508\ kN \quad OK$$

Vetotangon (Ø 80 mm) kestävyys lasketaan suoraan pinta-alan suhteen:

$$N_{t.Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{\pi \cdot 40^2 \cdot 345}{1,0} \quad (\varnothing > 16\ mm \Rightarrow f_y = 345\ N/mm^2)$$

$$= 1734\ kN \geq 1283\ kN \quad OK$$

Uumasauvojen kestävyys:

Vedetyn uumasauvan 120×120×5 kestävyys lasketaan samalla tavalla kuin vetotangon kestävyys:

$$N_{t.Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2236 \cdot 420}{1,0} = 939,1\ kN \geq 750\ kN$$

Puristetun uumasauvan 120×120×5 nurjahduspituus on 0,75L (kohta 7.4.3):

$L_{cr} = 0,75 \cdot 3,54 = 2,66\ m$

Nurjahduskestävyys lasketaan käyttäen tätä nurjahduspituutta:

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,6541 \cdot 2236 \cdot 420}{1,0} = 614,3\ kN \geq 528\ kN$$

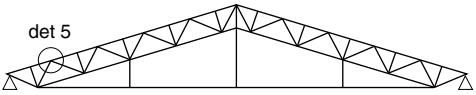
Kevyemmin kuormitetuissa uumasauvoissa voidaan käyttää pienempää rakenneputkea.

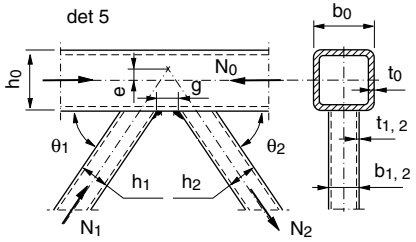
Ristikkoliitosten kestävyydet:
Tehdään esimerkkikohteen ristikon yläpaarteen liitokset vapaavälisinä konepajavalmistuksen yksinkertaistamiseksi ja alapaarteen liitokset limitettyinä, jotta epäkeskeisyydet pysyisivät pieninä.

Ristikkoliitosten hitsien a-mitat valitaan taulukon 3.9 mukaan.

Kaksitukisella ristikkopalkilla leikkausvoima on suurin tukien läheisyydessä, joten myös uumasauvojen voimat ovat siellä suurimpia. Tarkastetaan tämän vuoksi kahden reunimmaisen orren kohdalla olevien liitosten kestävyydet (laskentamallissa liitokset 1 ja 5). ***Käytännön suunnittelussa on tarkastettava kaikkien liitosten kestävyydet.***

Ristikon liitos no 5:





Liitos 5 on vapaavälinen K-liitos. Tämän tyyppisen liitoksen laskentakaavat on esitetty taulukossa 11.3.2. Liitoksen geometria ja voimasuureet ovat seuraavat:

Paarre: $200 \times 200 \times 8$ $(A_0 = 5924\ mm^2)$
Uumasauvat: $120 \times 120 \times 5$ $(A_i = 2236\ mm^2)$

$N_{0.Ed} = -945\ kN$ *(puristusta)*
$N_{1.Ed} = -528\ kN$ *(puristusta)*
$N_{2.Ed} = 528\ kN$ *(vetoa)*

$\theta_1 = \theta_2 = 54^o$
$g = 50\ mm$ *(vapaaväli)*

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{120 + 120 + 120 + 120}{4 \cdot 200} = 0,6$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{200}{2 \cdot 8} = 12,5$$

Tarkastetaan liitoksen vapaavälin ehdot:

$g = 50\ mm \geq t_1 + t_2 = 5 + 5 = 10\ mm \quad OK$

$g/b_0 = 50/200 = 0,25 \geq 0,5(1-\beta) = 0,5 \cdot (1-0,6) = 0,2 \quad OK$

$g/b_0 = 0,25 \leq 1,5(1-\beta) = 1,5 \cdot (1-0,6) = 0,6 \quad OK$

$\Rightarrow$ *liitoksen vapaaväli on sallituissa rajoissa*

Tarkastetaan liitoksen epäkeskeisyyden ehdot:

$$e = \left(\frac{h_1}{2\sin\theta_1} + \frac{h_2}{2\sin\theta_2} + g\right)\frac{\sin\theta_1 \cdot \sin\theta_2}{\sin(\theta_1+\theta_2)} - \frac{h_0}{2} = 36,5mm$$

$-0,55h_0 = -110\ mm \leq e = 36,5\ mm \leq 0,25h_0 = 50\ mm \quad OK$

$\Rightarrow$ *liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa*

Sekä paarre että uumasauvat kuuluvat poikkileikkausluokkaan 1, joten poikkileikkausluokan osalta liitoksen geometriavaatimuksia ei tarvitse tutkia tarkemmin. Myös muut liitoksen geometriavaatimukset toteutuvat, mutta niitä ei esitetä tässä.

Lasketaan liitoksen kestävyys vain uumasauvan 1 suhteen, koska uumasauvat ovat samankokoisia ja samassa kaltevuuskulmassa, ja koska niiden kuormitus on yhtä suuri.

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$n = \frac{\sigma_{0.Ed}}{f_{y0}/\gamma_{M5}} = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} f_{y0}/\gamma_{M5}}$$

$$= \frac{945 \cdot 10^3}{5924 \cdot 420/1,0} + 0 = 0,3798$$

(kun liitoksen epäkeskeisyys on sallituissa rajoissa, siitä aiheutuvaa momenttia ei oteta lausekkeessa huomioon)

$$k_n = 1,3 - \frac{0,4|n|}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,3798}{0,6} = 1,047 > 1,0 \quad \Rightarrow k_n = 1,0$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot \frac{8,9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_1} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0}\right)/\gamma_{M5} \quad (S420: kerroin = 0,9)$$

$$= 0,9 \cdot \frac{8,9 \cdot 1,0 \cdot 420 \cdot 8^2 \cdot \sqrt{12,5}}{\sin 54} \cdot \left(\frac{120+120+120+120}{4 \cdot 200}\right)/1,0$$

$$= 564,6\ kN \geq 528\ kN \quad OK$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen pitää tarkastaa koska $\beta = 0{,}6 \le 1 - (1/\gamma) = 0{,}92$:

$$b_{e.p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1 = \frac{10}{200/8} \cdot 120 = 48\ mm \le b_1 = 120\ mm$$

$$N_{1.Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin\theta_1} + b_1 + b_{e.p}\right) / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0{,}9 \cdot \frac{420 \cdot 8}{\sqrt{3}\sin 54} \cdot \left(\frac{2 \cdot 120}{\sin 54} + 120 + 48\right) / 1{,}0 = 1003\ kN \ge 528\ kN \quad OK$$

Paarteen leikkautuminen:
Koko paarteen leikkauskestävyydeksi <u>liitoksen kohdalla</u> saadaan:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 50^2}{3 \cdot 8^2}}} = 0{,}1373$$

$$A_{v0} = (2h_0 + \alpha b_0)t_0 = (2 \cdot 200 + 0{,}1373 \cdot 200) \cdot 8 = 3420\ mm^2$$

$$N_{1.Rd} = 0{,}9 \cdot \frac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3}\sin\theta_1} / \gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0{,}9 \cdot \frac{420 \cdot 3420}{\sqrt{3}\sin 54} / 1{,}0 = 922{,}6\ kN \ge 528\ kN \quad OK$$

Paarteen kestävyys normaalivoimalle liitoksen <u>vapaavälin</u> kohdalla:

$$N_{0.gap.Ed} = N_{0.Ed} - N_{2.Ed}\cos\theta_2 = 945 - 528 \cdot \cos 54 = 634{,}6\ kN$$

$$V_{0.gap.Ed} = N_{1.Ed}\sin\theta_1 = 528 \cdot \sin 54 = 427{,}2\ kN$$

$$A_{V0} = A_0 \cdot \frac{h_0}{b_0 + h_0} = 5924 \cdot \frac{200}{200 + 200} = 2962\ mm^2$$

$$V_{pl.Rd} = A_{V0} \cdot \frac{f_{y0}/\sqrt{3}}{\gamma_{M0}} = 2962 \cdot \frac{420/\sqrt{3}}{1{,}0} = 718{,}2\ kN$$

$$N_{0.gap.Rd} = 0{,}9 \cdot [(A_0 - A_{v0})f_{y0} + A_{v0}f_{y0}\sqrt{1 - (V_{0.gap.Ed}/V_{pl.Rd})^2}]/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420 = 0,9)}$$

$$= 0{,}9 \cdot [(5924 - 3420) \cdot 420 + 3420 \cdot 420 \cdot \sqrt{1 - (427{,}2/718{,}2)^2}]/1{,}0 = 1986\ kN$$

$$N_{0.gap.Rd} = 1986\ kN \ge N_{0.gap.Ed} = 634{,}6\ kN \quad OK$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Uumasauvan tehollinen leveys on:

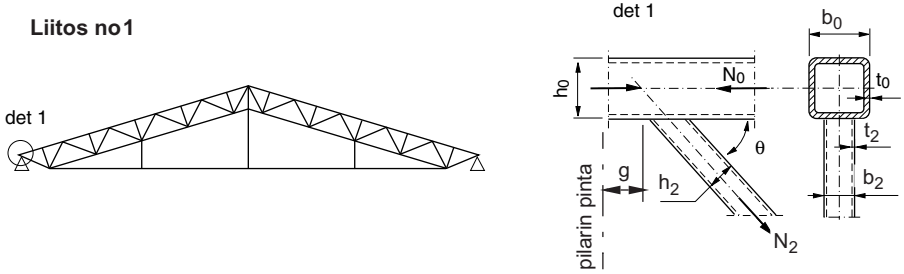
$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{200/8} \cdot \frac{420 \cdot 8}{420 \cdot 5} \cdot 120 = 76,8 \text{ mm} \le b_1 = 120 \text{ mm}$$

$$N_{1.Rd} = 0,9 \cdot f_{y1} t_1 (2h_1 - 4t_1 + b_1 + b_{eff}) / \gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 5 \cdot (2 \cdot 120 - 4 \cdot 5 + 120 + 76,8) / 1,0 = 787,8 \text{ kN} \ge 528 \text{ kN} \quad OK$$

Liitoksen kestävyys:
Paarteen pinnan myötö on siis mitoittavin murtumismuoto:
$N_{1.Rd} = 564,6 \text{ kN} \ge N_{1.Ed} = 528 \text{ kN}$ *OK*

Ristikon liitos no 1 (ristikon liitos tuella):



Ristikon liitos tuella toimii K/N-liitoksena, jossa pilari vastaa kuvitteellista uumasauvaa 1 (puristettu uumasauva). Pilarin yläpää varustetaan päätylevyllä johon ristikko kiinnitetään. Putkiristikoiden liitoksia koskevat vaatimukset eivät tällöin koske pilaria, joten ristikon osalta liitoksen no 1 kestävyys määritetään vain todellisen uumasauvan 2 mukaan.

Tarkastetaan ensin liitoksen kestävyys ilman ylimääräisiä vahvikelevyjä. Liitoksen geometria ja voimasuureet ovat seuraavat:

Paarre: $200 \times 200 \times 8$ *(poikkileikkausluokka 1,* $A_0 = 5924 \text{ mm}^2$*)*
Uumasauva: $120 \times 120 \times 5$ *(poikkileikkausluokka 1,* $A_i = 2236 \text{ mm}^2$*)*
Pilari (='uumasauva 1'): $300 \times 200 \times 6$

$N_{0.Ed} = -527 \text{ kN}$ *(puristusta)*
$N_{1.Ed} = 27,2 \cdot 24 = 653 \text{ kN}$ *(pilarin puristuskuorma)*
$N_{2.Ed} = 750 \text{ kN}$ *(vetoa)*

$\theta = 54°$

$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} = \frac{200 + 120 + 300 + 120}{4 \cdot 200} = 0,925$

$\gamma = \frac{b_0}{2t_0} = \frac{200}{2 \cdot 8} = 12,5$

$g = 65\ mm$

Liitos mitoitetaan K/N-liitoksena tai Y-liitoksena riippuen vapaavälin suuruudesta (kohta 7.4.5):

$g = 65\ mm \geq t_1 + t_2 = 6 + 5 = 11\ mm$ OK (t_1 on tässä pilarin seinämänpaksuus)

$g = 65\ mm \geq 0,5(1 - \beta)b_0 = 0,5 \cdot (1 - 0,925) \cdot 200 = 7,5\ mm$ OK

$g = 65\ mm < 1,5(1 - \beta)b_0 = 1,5 \cdot (1 - 0,925) \cdot 200 = 22,5\ mm$ ei OK

$\Rightarrow$ *K/N-liitoksen vapaavälin vaatimukset ei toteudu* $\Rightarrow$ *liitos on mitoitettava Y-liitoksena*

Tarkastelu Y-liitoksena (taulukko 11.3.1):
Liitoksen geometrian voimassaoloehdot toteutuvat, mutta niiden tarkastamista ei esitetä tässä.

Paarteen pinnan normaalijännitys $\sigma_{0.Ed}$ *vaikuttaa liitoksen kestävyyteen termin* k_n *muodossa, jota laskettaessa otetaan nyt huomioon pilarin tukireaktion (653 kN) ja liitoksen vaakasuuntaisen epäkeskeisyyden (200 mm) aiheuttama momentti. Lasketaan paarteen pinnassa vaikuttava jännitys:*

$\frac{N_{0.Ed}}{A_0} = \frac{527 \cdot 10^3}{5924} = 89,0\ N/mm^2$ *normaalivoimasta aiheutuva puristusjännitys*

$\frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0}} = \frac{653 \cdot 10^3 \cdot 200}{356,6 \cdot 10^3} = 366\ N/mm^2$ *taivutusmomentista aiheutuva vetojännitys*

$\sigma_{0.Ed} = 366 - 89 = 277\ N/mm^2$ *vetoa* $\Rightarrow k_n = 1,0$

$\beta = \frac{b_2}{b_0} = \frac{120}{200} = 0,6$

$\eta = h_2/b_0 = 120/200 = 0,6$

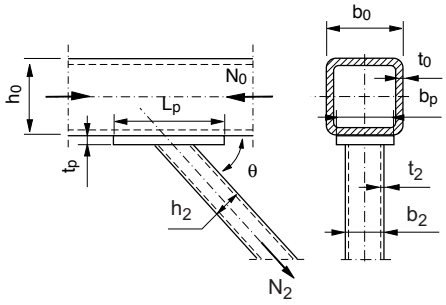
$\beta \leq 0,85$ $\Rightarrow$ *paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:*

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot \frac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1 - \beta)\sin\theta_2} \cdot \left(\frac{2\eta}{\sin\theta_2} + 4\sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5} \quad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{1,0 \cdot 420 \cdot 8^2}{(1 - 0,6) \cdot \sin 54} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,6}{\sin 54} + 4\sqrt{1 - 0,6} \right) / \gamma_{M5}$$

$$= 300,0\ kN < 750\ kN \quad ei\ OK$$

Liitoksen kestävyys ei ole riittävä, koska $N_{2.Ed} = 750\ kN > N_{2.Rd}$. Paarteen pinnan ollessa mitoittava, auttaa paarteen pintaan hitsattava vahvikelevy parantamaan liitoksen kestävyyttä. Liitoksen vahvistaminen on esimerkkikohteessa edullista, koska joudutaan vahvistamaan vain reunimmaiset liitokset.



Paarteen pinnan osalta vahvistetun liitoksen kestävyys (taulukko 11.3.17):
Lasketaan liitoksen kestävyys, kun paarteen pintaan on hitsattu levy $275 \times 185 \times 15$ jonka lujuusluokka on S420 ($f_y = 420\ N/mm^2$):

$$f_{yp} = 420\ N/mm^2 \geq f_{y0} = 420\ N/mm^2 \quad OK$$

$$b_p = 185\ mm \geq b_0 - 2t_0 = 200 - 2 \cdot 8 = 184\ mm \quad OK$$

$$t_p = 15\ mm \geq 2t_2 = 2 \cdot 5 = 10\ mm \quad OK$$

$$L_p = 275\ mm \geq \frac{h_2}{\sin\theta_2} + \sqrt{b_p(b_p - b_2)} = \frac{120}{\sin 54} + \sqrt{185(185 - 120)} = 258\ mm \quad OK$$

$\Rightarrow$ *vahvikelevyyn kohdistuvat geometriavaatimukset OK*

$$\beta_p = \frac{b_2}{b_p} = \frac{120}{185} = 0,6486$$

$$\eta_p = \frac{h_2}{b_p} = \frac{120}{185} = 0,6486$$

Paarteen pinnan murtuminen myötäämällä:

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p^2}{(1 - \beta_p)\sin\theta_2} \cdot \left(\frac{2\eta_p}{\sin\theta_2} + 4\sqrt{1 - \beta_p} \right) / \gamma_{M5} \quad (S420: \text{kestävyyskerroin} = 0,9)$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420 \cdot 15^2}{(1 - 0,6486) \cdot \sin 54} \cdot \left(\frac{2 \cdot 0,6486}{\sin 54} + 4\sqrt{1 - 0,6486} \right) / 1,0$$

$$= 1189\ kN \geq 750\ kN \quad OK$$

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen:

$$b_{e.p} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot b_2 = \frac{10}{185/15} \cdot 120 = 97,3\ mm \le b_2 = 120\ mm$$

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{\sqrt{3}\sin\theta_2} \cdot \left(\frac{2h_2}{\sin\theta_2} + 2b_{e.p}\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420 \cdot 15}{\sqrt{3}\sin 54} \cdot \left(\frac{2 \cdot 120}{\sin 54} + 2 \cdot 97,3\right)/1,0 = 1988\ kN \ge 750\ kN \quad OK$$

Paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen:
$N_{2.Ed}$ *aiheuttaa vetoa paarteen uumaan* $\Rightarrow$

$$f_b = f_{y0} = 420\ N/mm^2$$

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot \frac{f_b \cdot t_0}{\sin\theta_2} \cdot \left(\frac{2h_2}{\sin\theta_2} + 10t_0\right)/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot \frac{420 \cdot 8}{\sin 54} \cdot \left(\frac{2 \cdot 120}{\sin 54} + 10 \cdot 8\right)/1,0 = 1408\ kN \ge 750\ kN \quad OK$$

Uumasauvan murtuminen myötäämällä:
Uumasauvan tehollinen leveys on:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{f_{y2} \cdot t_2} \cdot b_2 = \frac{10}{185/15} \cdot \frac{420 \cdot 15}{420 \cdot 5} \cdot 120 = 292\ mm > b_2 = 120\ mm$$

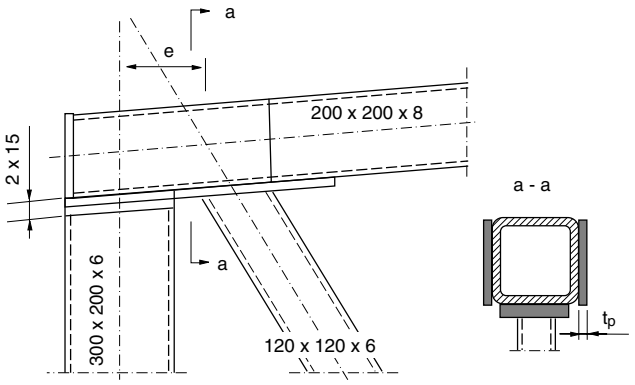
$\Rightarrow b_{eff} = b_2 = 120\ mm$

$$N_{2.Rd} = 0,9 \cdot f_{y2}\, t_2 (2h_2 - 4t_2 + 2b_{eff})/\gamma_{M5} \qquad \text{(S420: kestävyyskerroin = 0,9)}$$

$$= 0,9 \cdot 420 \cdot 5 \cdot (2 \cdot 120 - 4 \cdot 5 + 2 \cdot 120)/1,0 = 869,4\ kN \ge 750\ kN \quad OK$$

Liitoksen kestävyys:
Uumasauvan murtuminen myötäämällä on siis mitoittavin murtumismuoto:
$N_{2.Rd} = 869,4\ kN \ge N_{2.Ed} = 750\ kN$ *OK*

Yläpaarteen kestävyys tuella:



Tehdään ristikon liitos pilariin päätylevyn välityksellä. Liitoksen valmistuksen helpottamiseksi sallitaan epäkeskeisyys pilarin neutraaliakseliin nähden. Tämän seurauksena yläpaarteen pitää välittää ristikon leikkausvoima pilarille. Epäkeskeisyydestä aiheutuu myös taivutusmomenttia yläpaarteelle. Yläpaarteen päätä diagonaalin kohdalla rasittavat voimat ovat seuraavat, kun epäkeskeisyys on vaakasuunnassa 200 mm:

V_{Ed} = 653 kN
M_{Ed} = 653 · 0,2 = 130,6 kNm
N_{Ed} = 527 - 750 cos54 = 86,2 kN puristusta (liitoksen 1 vasemmalla puolella)

<u>Paarteen pään kestävyys yhteisvaikutukselle</u>:

Paarteen leikkauskestävyys $V_{pl.Rd}$ = 718,2 kN on riittävä leikkausvoimalle V_{Ed} = 653 kN. Myös paarteen poikkileikkauksen taivutuskestävyys $M_{pl.Rd}$ = 176,8 kNm ja kestävyys (M+N+V) yhteisvaikutukselle ovat riittävät (jätetään lukijan tarkastettavaksi). Myöhemmin kuitenkin osoittautuisi, että paarteen pään kestävyys <u>pistekuormalle</u> ei ole riittävä, ja paarteen sivuja on sen takia vahvistettava sivulevyillä. Otetaan kyseiset sivulevyt sen vuoksi huomioon jo seuraavissa tarkasteluissa.

Vahvistetaan paarretta kylkeen hitsatuilla täyskorkeilla levyillä, joiden paksuus on t_p = 5 mm ja laskelmien yksinkertaistamiseksi sama lujuusluokka S420 (f_y = 420 N/mm^2) kuin paarteellakin. Vahvikelevyjen paksuudessa ei nyt tarvitse ottaa huomioon vahvistettuja ristikkoliitoksia koskevia vaatimuksia, koska vahvistamistarve ei aiheudu liitoskestävyyksistä vaan putken omasta leikkauskestävyydestä. Vahvikelevyt ulottuvat diagonaalisauvan liitok-

sen yli. Kylkiin hitsatut levyt lasketaan mukaan paarteen pään kestävyyden laskennassa. Vahvistetun yläpaarteen kestävyydet ovat:

$$V_{pl.Rd} = \left[A \cdot \frac{h}{b+h} + 2(t_p \cdot h_p)\right] \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}}$$

$$= \left[5924 \cdot \frac{200}{200+200} + 2 \cdot (5 \cdot 200)\right] \frac{420}{\sqrt{3} \cdot 1,0} = 1203\ kN \geq 653\ kN \quad OK$$

$$N_{pl.Rd} = [A + 2(t_p \cdot h_p)] \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = [5924 + 2 \cdot (5 \cdot 200)] \frac{420}{1,0} = 3328\ kN \geq 86,2\ kN \quad OK$$

$$M_{pl.Rd} = \left[W_{pl} + 2\frac{t_p h_p^2}{4}\right] \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \left[420,9 \cdot 10^3 + 2 \cdot \frac{5 \cdot 200^2}{4}\right] \frac{420}{1,0} = 218,8\ kNm$$

Nyt leikkausvoima ylittää puolet leikkauskestävyydestä, joten sen vaikutus pitää ottaa huomioon taivutuskestävyydessä:

$$\rho = \left[\frac{2V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} - 1\right]^2 = \left[\frac{2 \cdot 653}{1203} - 1\right]^2 = 0,0073$$

$$M_{V.Rd} = \left(W_{pl} - \frac{\rho \cdot A_V^2}{8t}\right) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \left(520,9 \cdot 10^3 - \frac{0,0073 \cdot 4962^2}{8 \cdot 13}\right) \cdot \frac{420}{1,0}$$

$$= 218,1\ kNm \leq M_{c.Rd} = M_{pl.Rd} = 218,8\ kNm$$

Tarkastetaan lisäksi normaalivoiman vaikutus taivutuskestävyyteen kohtaa 2.9.1.6.1.1 soveltaen (sivulevyjen vaikutus otettava huomioon):

$$A_{w.red} = (1-\rho)(A-2bt) = (1-0,0073)(7924-2 \cdot 200 \cdot 8) = 4690\ mm^2$$

$$A_{tot.red} = A - \rho(A-2bt) = 7924 - 0,0073 \cdot (7924 - 2 \cdot 200 \cdot 8) = 7890\ mm^2$$

$$N_{V.Rd} = A_{tot.red} f_y / \gamma_{M0} = 7890 \cdot 420 / 1,0 = 3314\ kN$$

$$N_{Ed} = 86,2\ kN \leq \frac{0,5 A_{w.red} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \cdot 4690 \cdot 420}{1,0} = 984,9\ kN$$

ja:

$$N_{Ed} = 86,2\ kN \leq 0,25 N_{V.Rd} = 0,25 \cdot 3314 = 828,5\ kN$$

$\Rightarrow$ *normaalivoima on niin vähäinen, että se ei vaikuta taivutuskestävyyteen:*

$$M_{N.V.Rd} = M_{V.Rd} = 218,1\ kNm \geq 130,6\ kNm \quad OK$$

Paarteen pään kestävyys pistekuormalle:

Seuraavaksi lasketaan yläpaarteen uumien kestävyys tukivoimalle. Käytetään kohdan 2.11 mukaisia kaavoja. Yläpaarteen pää on suljettu levyllä ja kulmanpyöristyksen ja liitoslevyn välinen rako on täytetty hitsillä. Paarteen alle hitsatun liitoslevyn ja pilarin päätylevyn paksuudet ovat $t_p = 15$ mm.

Pistekuorman suuruus yhtä uumaa kohti on:

$$F_{Ed} = \frac{V_{Ed}}{2} = \frac{653}{2} = 326,5 \text{ kN}$$

Oletetaan, että ristikon taipumisesta johtuen tukireaktio paikallistuu pilarin $300 \times 200 \times 6$ sisäsivulle (varmalla puolella oleva yksinkertaistus). Pilarilta liitoslevyjen läpi 45° kulmassa leviävän tukireaktion kuormituspituus on tällöin:

$$s_s = 6 + 2(t_p + t_p) = 6 + 2 \cdot (15 + 15) = 66 \text{ mm}$$

Koska paarteen pää on jäykistetty sulkemalla se levyllä, pistekuormaa voidaan tarkastella 'kaukana palkin päästä sijaitsevana kuormana' riippumatta siitä toteutuuko vaadittava etäisyys palkin päähän (taulukko 2.26, tyyppi 1b). Taulukosta 2.26 saadaan nyt:

$$\frac{s_s}{t} = \frac{66}{8+5} = 5,08 \le 60$$

$$\Rightarrow$$

$$k = f_y / 228 = 420 / 228 = 1,842$$

$$k_3 = 1,0$$

$$k_4 = 1,22 - 0,22k = 1,22 - 0,22 \cdot 1,842 = 0,8148$$

$$\frac{r_i}{t} = \frac{12}{8+5} = 0,9231 \quad (r_i \text{ on paarreputken nurkan sisäpuolinen pyöristyssäde})$$

$$k_5 = 1,06 - 0,06 \cdot (r_i / t) = 1,06 - 0,06 \cdot 0,9231 = 1,005 \quad \text{mutta } k_5 \le 1,0 \Rightarrow k_5 = 1,0$$

$$C_F = k_3 k_4 k_5 \left[14,7 - \frac{(h-t)/t}{49,5}\right]\left[1 + 0,007 \cdot \frac{s_s}{t}\right]$$

$$= 1,0 \cdot 0,8148 \cdot 1,0 \cdot \left[14,7 - \frac{(200-8)/13}{49,5}\right]\left[1 + 0,007 \cdot \frac{66}{13}\right] = 12,15$$

$$F_{1w.Rd} = C_F \cdot \frac{t^2 f_y}{\gamma_{M1}} = 12,15 \cdot \frac{13^2 \cdot 420}{1,0} = 862,4 \text{ kN} \ge 326,5 \text{ kN} \quad OK$$

Edellä lasketuissa kestävyyksissä uumien lisälevyt on laskettu mukaan uumien paksuuteen. Uuman laskennallinen paksuus on tällöin t = 8 + 5 = 13 mm.

Ristikon taipuma:

Arvioidaan ristikon jäyhyys kaavalla (7.18):

$$I = A_1 \cdot H^2 \left[\frac{\frac{A_2}{A_1}}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2 + A_2 \cdot H^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{A_2}{A_1}} \right]^2$$

$$= 5924 \cdot 6500^2 \left[\frac{\frac{5027}{5924}}{1 + \frac{5027}{5924}} \right]^2 + 5027 \cdot 6500^2 \left[\frac{1}{1 + \frac{5027}{5924}} \right]^2 = 0,1149\ m^4$$

missä

A_1 *on yläpaarteen pinta-ala*
A_2 *on vetotangon pinta-ala*

Käyttörajatilassa kuormien osavarmuusluvut ovat kaavan (7.10) mukaiset, jolloin ristikon kuormaksi tulee (kuormakerrointa K_{FI} ei sovelleta käyttörajatilatarkasteluissa):

$$q_{d.SLS} = (g_k + q_k)L_f = (0,5 + 1,2) \cdot 10 = 17,0\ kN/m \quad \text{oma paino + lumi}$$

missä

L_f *on kehäväli*

Taipuma lasketaan olettaen ristikkopalkki vapaasti tuetuksi:

$$\delta = \frac{5q_{d.SLS} \cdot L^4}{384EI} = \frac{5 \cdot 17,0 \cdot 10^3 \cdot 48^4}{384 \cdot 2,1 \cdot 10^{11} \cdot 0,1149} = 49\ mm = \frac{L}{980} \leq \frac{L}{300} \quad OK\ \text{(taulukko 7.5)}$$

Vertailu S420 vs S355:

Jos mitoitus suoritettaisiin lujuusluokkaan S355 perustuen, ristikon kestävyys ei olisi riittävä nyt valituilla putkilla.

Todettakoon, että yksityiskohtaisempaa vertailua ei ole mahdollista suorittaa pelkästään ristikon yksittäisten sauvojen ja yksittäisten liitosten tarkastelun kautta, sillä käytännön suunnitteluprosessissa ristikkoa joudutaan tarkastelemaan kokonaisuutena, jossa ristikon sisäinen geometria (eli ristikon rakennekorkeus sekä diagonaali- ja vertikaalisauvojen lukumäärä/jaottelu) suhteutetaan annettujen lähtöarvojen (ulkoinen kuormitus ja ristikon jänneväli) perusteella käytettävissä oleviin putkikokoihin ja valittuun teräslajiin/lujuusluokkaan. Jos vaihdetaan teräksen lujuusluokkaa, päädytään siis samalla yleensä muuttamaan myös ristikon geometriaa, jos halutaan löytää edullisin mahdollinen ratkaisu. Vasta silloin nähdään eri lujuusluokkien välinen hyöty ristikon kokonaisteräsmäärän ja kokonaiskustannusten kannalta. Yleispätevää vertailua on siksi mahdoton suorittaa.

7.5 Rakenteen jäykistäminen

Teräsrungon jäykistämiseksi voidaan käyttää seuraavia jäykistysmenetelmiä tai niiden yhdistelmiä:

- ristikkojäykistys
- levyjäykistys
- kehäjäykistys
- mastojäykistys
- sydänmastojäykistys.

Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistystä käytetään yleisesti esimerkiksi teollisuusrakennusten jäykistysmenetelmänä tai jäykistyksen osana. Se soveltuu myös erittäin hyvin korkeiden rakennusten jäykistykseen. Jäykistysristikon muodonmuutoksia voidaan pienentää kasvattamalla ristikon leveyttä. Osa ristikon taipumasta aiheutuu kuitenkin ristikon sauvojen pituuden muutoksista. Sitä voidaan pienentää alentamalla ristikkosauvojen jännityksiä, eli valitsemalla isommat poikkileikkaukset ristikkosauvoihin.

Levyjäykistys

Rakennus voidaan jäykistää sopivasti valituilla jäykistysseinillä, jotka ulottuvat alhaalta ylös asti. Jäykästi teräsrunkoon kiinnitetyt seinät voivat olla paikallavalettuja tai elementtirakenteisia. Joissakin tapauksissa jäykistyselementteinä voidaan käyttää muotolevyjä. Jäykistäviä seiniä käytetään esimerkiksi liike- ja toimistorakennuksissa sekä asuinrakennuksissa yhdessä jäykistävien porraskuilujen kanssa.

Kehäjäykistys

Kehäjäykistystä käytetään pääasiassa matalissa yksikerroksisissa rakennuksissa. Rakennuksen siirtymät ovat suuremmat kuin esimerkiksi ristikkojäykistetyssä rakennuksessa, koska rakennuksen vaakasuuntaiset kuormat siirretään perustuksille kehän jäykkien nurkkien avulla.

Mastojäykistys

Mastopilarit toimivat rakennuksen jäykistävänä osana. Tämä menetelmä sopii vain mataliin rakennuksiin, koska perustuksille tuleva taivutusmomentti kasvaa nopeasti korkeammissa rakennuksissa ja lisäksi rakennuksen yläpään siirtymät ovat suuria.

Sydänmastojäykistys

Rakennuksen hissi- tai porraskuilut toimivat jäykistävinä rakenteina joko yksin tai yhdessä jäykistysseinien kanssa. Tätä jäykistystä käytetään yleisesti sekä asuinrakennuksissa että liike- ja toimistorakennuksissa.

7.5.1 Jäykistyselementtien mitoitus esimerkkikohteessa

Esimerkkihallissa jäykistys on hoidettu ristikkojäykistyksellä. Esimerkkikohteesta käsitellään tässä kirjassa vain poikittaissuuntaisten jäykistyselementtien mitoitus. Pitkän sivun jäykistyselementit mitoitetaan samalla periaatteella. Lopuksi tarkastellaan pääpiirteissään katossa olevan vaakasuuntaisen jäykistysristikon mitoitusta.

Poikittaissuuntainen jäykistys:
Pitkän sivun tuulikuormat kuormittavat pilareita, joilta osa kuormasta siirtyy suoraan perustuksiin ja loput viedään katossa olevan pitkän sivun suuntaisen vaakaristikon avulla lyhyen sivun jäykistysristikoille. Pitkän sivun tuulipilareiden vaakavoima on kuitenkin viety pääpilareille katon muotolevyn välityksellä, jolloin pitkän sivun räystäspalkki on voitu tehdä kevyemmäksi. Vastaavasti jäykistävä muotolevyn kiinnitys täytyy tarkistaa vaakavoimien aiheuttamille rasituksille.

Pystykuormista puolestaan aiheutuu kehiin pilareiden alkuepätarkkuuksien (ekvivalentin alkuvinouden) takia vaakasuuntaista rasitusta (fiktiivinen lisävaakavoima, kohta 7.1.6). Myös tämä kuormitus viedään katossa olevan pitkän sivun suuntaisen vaakaristikön avulla lyhyen sivun jäykistysristikoille.

Lyhyen sivun jäykistysristikko:
Mitoitetaan lyhyen sivun jäykistyselementit. Tarkastellaan kuormayhdistelmää jossa tuulikuorma on määräävä. Jäykistysristikon kannalta mitoittavaksi muodostuu tilanne, jossa tuuli on rakennuksen lyhyen sivun suuntainen. Tällöin pitkän sivun painekuorma (vyöhyke D) ja vastakkaisen sivun imukuorma (vyöhyke E) kuormittavat jäykistysristikkoa samaan suuntaan.

Vaakakuorma jaetaan lyhyille sivuille tasan, koska rakennus on symmetrinen ja myös lyhyiden sivujen jäykisteet ovat samanlaisia. Lyhyen sivun vaakavoimaksi ja siitä päätypalkin normaalivoimaksi saadaan kohtien 7.1.7 ja 7.3.1 kaavoja käyttäen:

$$q_{wk} = c_s c_d \cdot c_e \cdot q_b \cdot c_{pe} = 1,0 \cdot 1,957 \cdot 0,33 \cdot c_{pe} = 0,65 c_{pe}$$

$$= 0,65 \cdot (0,7 + 0,3) = 0,65 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{wd} = \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,65 = 1,07 \text{ kN/m}^2$$

$$F_{Ed} = q_{wd} \cdot \left(\frac{3}{8} H_1 + H_2\right) \frac{L}{2} = 1,07 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 10,5 + 4\right) \cdot \frac{100}{2} = 424,7 \text{ kN}$$

missä

- H_1 *on räystäskorkeus*
- H_2 *on rakennuksen päätykolmion korkeus (ks. kuva sivulla 417)*
- L *on rakennuksen pituus*

Tuulikuorman ollessa määräävä saadaan omasta painosta ja lumikuormasta aiheutuvaksi pystysuuntaiseksi kuormaksi:

$\gamma_G = 1,35 \cdot K_{FI}$ *oma paino*

$g_d = \gamma_G \cdot g_k = (1,35 \cdot 1,1) \cdot 0,5 = 0,743\ kN/m^2$ *oma paino*

$s_d = \gamma_{Q.2} \cdot \psi_{0.2} \cdot s = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,7 \cdot 1,2 = 1,39\ kN/m^2$ *lumikuorma*

Pystykuormasta aiheutuu pääkehän pilareille fiktiivinen lisävaakavoima, jonka laskentaa käsitellään Eurocoden osassa EN 1993-1-1 ja lähteissä [22,23]. Kun pääkehän pilareiden korkeus on 10,3 m saadaan pilareiden ekvivalentiksi alkuvinoudeksi:

$\alpha_m = \sqrt{0,5\left(1+\frac{1}{m}\right)} = \sqrt{0,5\left(1+\frac{1}{2}\right)} = 0,8660$ *(m on pääkehän pilareiden määrä)*

$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}} = \frac{2}{\sqrt{10,3}} = 0,6232$ *mutta* $\frac{2}{3} \le \alpha_h \le 1,0 \Rightarrow \alpha_h = 0,6667$

$\phi = \alpha_h \alpha_m / 200 = 0,6667 \cdot 0,8660 / 200 = \frac{1}{346}$ *pääkehän pilareiden alkuvinous*

Fiktiivinen lisävaakavoima jaetaan tuulikuorman tapaan lyhyille sivuille tasan, koska rakennus on symmetrinen ja myös lyhyiden sivujen jäykisteet ovat samanlaisia:

$V_{Ed} = (g_d + s_d) \cdot B \cdot \frac{L}{2} = (0,743 + 1,39) \cdot 48 \cdot \frac{100}{2} = 5119\ kN$ *oma paino + lumi*

$H_{fic} = \phi \cdot \left[(g_d + s_d) \cdot B \cdot \frac{L}{2}\right] = \frac{1}{346} \cdot 5119 = 14,8\ kN$

missä

B on rakennuksen leveys
L on rakennuksen pituus

Lisävaakavoima voidaan jättää huomioon ottamatta, jos vaakasuuntainen kokonaiskuorma (mukaan lukien fiktiivinen lisävaakavoima) on riittävän suuri pystysuuntaisiin kuormiin nähden:

$H_{Ed} = F_{Ed} + H_{fic} = 424,7 + 14,8 = 439,5\ kN < 0,15\, V_{Ed} = 0,15 \cdot 5119 = 767,9\ kN$

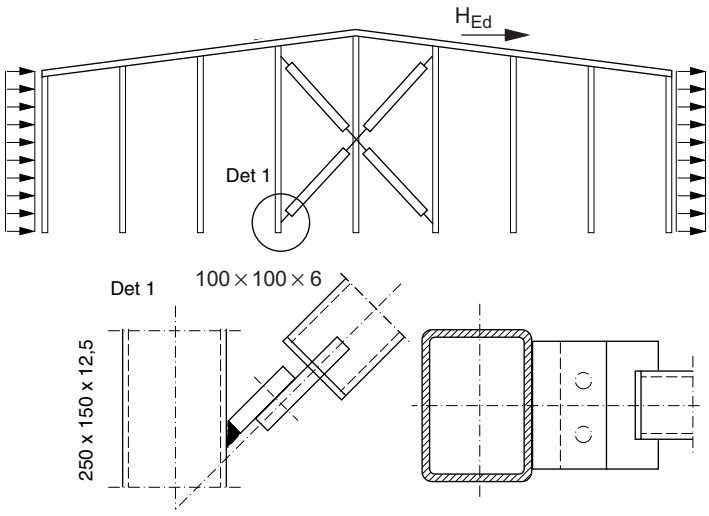
⇒ fiktiivinen lisävaakavoima joudutaan ottamaan huomioon

Suoritetaan jäykistys kahdella vinositeellä, jolloin toinen on puristettu ja toinen vedetty. Siirretään vaakavoimat kokonaisuudessaan vedetyllä vinositeellä. Vetovoimaksi saadaan:

$$N_{Ed} = 439,5 / \cos 48 = 656,8 \text{ kN}$$

Kokeillaan rakenneputkea $100 \times 100 \times 5$. Putki on teräslajia SSAB Domex Tube Double Grade, joka täyttää standardissa EN 10219 molemmille teräslajeille S420MH ja S355J2H asetetut vaatimukset. Mitoitus voidaan tällöin suorittaa suunnittelijan valinnan mukaan joko lujuusluokkaan S420 perustuen tai lujuusluokkaan S355 perustuen. Suoritetaan mitoitus tässä esimerkissä lujuusluokan S420 mukaan:

$$N_{t.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1836 \cdot 420}{1,0} = 771,1 \text{ kN} \geq 656,8 \text{ kN} \quad OK$$



Vinositeen liitos pilariin tehdään levyn välityksellä. Liitos on yksileikkeinen ja liitoslevyjen (S355J2) paksuus on 20 mm ja leveys 230 mm. Ruuvit M30 ovat lujuusluokkaa 10.9 (2kpl). Tarkastetaan ruuvien leikkauskestävyys (oletetaan että kierteet eivät sijaitse leikkautumistasossa):

$$F_{v.Rd} = 0,6 f_{ub} A / \gamma_{M2} = 0,6 \cdot 1000 \cdot 707 / 1,25 = 339,4 \text{ kN} \geq \frac{656,8}{2} = 328,4 \text{ kN} \quad OK$$

Tarkastetaan ruuvien reunapuristuskestävyys, kun ruuvien päätyetäisyys on $e_1 = 60$ mm, reunaetäisyys $e_2 = 65$ mm ja reikien halkaisija $d_0 = 33$ mm (kohta 3.4.1.2). Kumpikin ruuvi

on voiman suunnassa päätyruuvi ja kumpikin ruuvi on poikittaisessa suunnassa reunaruuvi. Molemmilla ruuveilla on tällöin sama reunapuristuskestävyys:

$$e_1 = 60\ mm \geq 1,2d_0 = 1,2 \cdot 33 = 39,6\ mm \quad OK$$

$$e_2 = 65\ mm \geq 1,2d_0 = 1,2 \cdot 33 = 39,6\ mm \quad OK$$

$$p_2 = 230 - 2 \cdot 65 = 100\ mm \geq 2,4d_0 = 2,4 \cdot 33 = 79,2\ mm \quad OK$$

$$\alpha_b = min\left[1,0\ ;\ \frac{f_{ub}}{f_{up}}\ ;\ \frac{e_1}{3d_0}\right] = min\left[1,0\ ;\ \frac{1000}{490}\ ;\ \frac{60}{3 \cdot 33}\right] = 0,606$$

$$k_1 = min\left[2,5\ ;\ \left(2,8\frac{e_2}{d_0} - 1,7\right)\ ;\ \left(1,4\frac{p_2}{d_0} - 1,7\right)\right] = min[2,5\ ;\ 3,82\ ;\ 2,54] = 2,5$$

$$F_{b.Rd} = k_1 \alpha_b f_u dt/\gamma_{M2} = 2,5 \cdot 0,606 \cdot 490 \cdot 30 \cdot 20/1,25 = 356,3\ kN$$

Yksileikkeisissä päällekkäisliitoksissa, joissa on vain yksi ruuvirivi, reunapuristuskestävyys ruuvia kohti rajoitetaan kuitenkin arvoon [18,19,20]:

$$F_{b.Rd} = 1,5 f_u dt/\gamma_{M2} = 1,5 \cdot 490 \cdot 30 \cdot 20/1,25 = 352,8\ kN \geq \frac{656,8}{2} = 328,4\ kN \quad OK$$

Pilarin ja liitoslevyn välisen liitoksen kestävyys lasketaan taulukon 11.3.15 kaavoilla. Pilarin (= paarteen) pinnan murtuminen ei muodostu tässä kriittiseksi, koska $\beta = 0,92 > 0,85$. Liitoslevyn leveys on kuitenkin niin lähellä taulukossa eri murtumismuodoille esitettyä rajaarvoa $b_0 - 2t_0$, että tarkastetaan molemmat seuraavat kestävyydet:

Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen: $N_{1.Rd} = 736,6\ kN$
Paarteen uuman myötääminen: $N_{1.Rd} = 779,6\ kN$

Liitoksen kestävyys on riittävä, koska vinositeen normaalivoiman vaakakomponetti on:

$$N_{Ed} = 439,5\ kN \leq N_{1.Rd} \quad OK$$

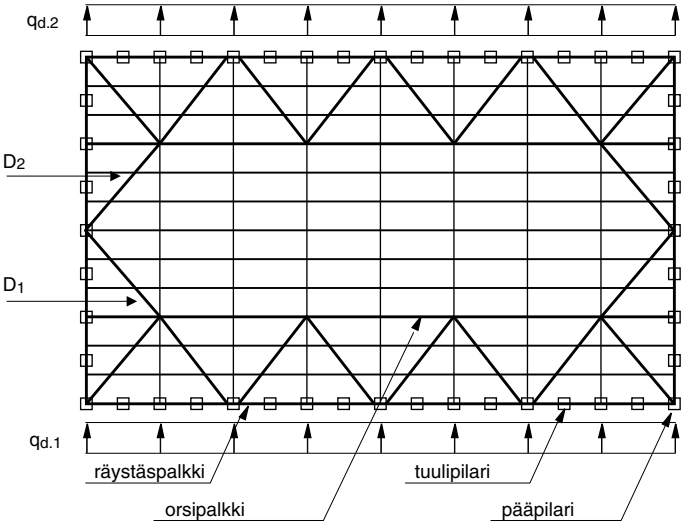
Tarkastetaan vielä liitoslevyjen itsensä vetokestävyys bruttoleikkauksessa ja reikien kohdalla nettoleikkauksessa:

$$N_{t.Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} = \frac{230 \cdot 20 \cdot 355}{1,0} = 1633\ kN \geq 656,8\ kN \quad OK$$

$$N_{t.Rd} = \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot (230 - 2 \cdot 33) \cdot 20 \cdot 490}{1,25} = 1157\ kN \geq 656,8\ kN \quad OK$$

Pitkän sivun jäykistyselementit (vinositeet):
Pitkän sivun jäykistyselementit mitoitetaan samalla periaatteella. Pystykuormista aiheutuvaa fiktiivistä lisävaakavoimaa varten tarvittava pilareiden ekvivalentti alkuvinous lasketaan käyttäen nyt tekijälle m arvoa m = 9 (pitkän sivun tuettavien pilareiden lukumäärä).

Katossa oleva vaakasuuntainen jäykistysristikko:



Jäykistysristikkoa kuormittaa poikittaissuuntainen tuulikuorma. Tuulipilareiden kuormat siirtyvät tukivoimina, joten osa tuulikuormasta menee suoraan perustuksiin. Katon osuus tuulikuormasta siirtyy kokonaisuudessaan jäykistysristikolle. Tuulikuorman määrityksessä täytyy erotella imun ja paineen vaikutukset, koska rakenneputkien puristus- ja vetokestävyydet eroavat toisistaan. Tuulikuormaksi pitkälle sivulle saadaan:

$$q_{wk} = 0,65\,c_{pe} = 0,65\,c_{pe.D} = 0,65 \cdot 0,7 = 0,455\ kN/m^2 \quad (paine)$$

$$q_{wd} = \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,455 = 0,751\ kN/m^2$$

$$q_{d1} = q_{wd} \cdot \left(\frac{3}{8}H_1 + H_2\right) = 0,751 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 10,5 + 4\right) = 5,96\ kN/m$$

$$q_{wk} = 0,65\,c_{pe} = 0,65\,c_{pe.E} = 0,65 \cdot 0,3 = 0,195\ kN/m^2 \quad (imu)$$

$$q_{wd} = \gamma_{Q.1} \cdot q_{wk} = (1,5 \cdot 1,1) \cdot 0,195 = 0,322\ kN/m^2$$

$$q_{d2} = q_{wd} \cdot \left(\frac{3}{8}H_1 + H_2\right) = 0,322 \cdot \left(\frac{3}{8} \cdot 10,5 + 4\right) = 2,56\ kN/m$$

missä

H_1 *on räystäskorkeus*
H_2 *on rakennuksen päätykolmion korkeus (ks. kuva sivulla 417)*

Diagonaalisauvojen D1 ja D2 (ks. kuva) normaalivoimat saadaan lyhyen sivun tuuliristikon tukivoimasta (otetaan huomioon myös edellä laskettu pystykuormista aiheutuva fiktiivinen lisävaakavoima, joka symmetrian johdosta jaetaan tasan diagonaaleille D1 ja D2):

$$D1: \quad N_{1.Ed} = \frac{q_{d1} \cdot \frac{L}{2} + \frac{H_{fic}}{2}}{\cos 40} = \frac{5,96 \cdot \frac{100}{2} + \frac{14,8}{2}}{\cos 40} = 398,7\ kN \quad \textit{(vetoa)}$$

$$D2: \quad N_{2.Ed} = \frac{q_{d2} \cdot \frac{L}{2} + \frac{H_{fic}}{2}}{\cos 40} = \frac{2,56 \cdot \frac{100}{2} + \frac{14,8}{2}}{\cos 40} = 176,8\ kN \quad \textit{(puristusta)}$$

Diagonaali on tuettu orsiristikoiden kohdalla, joten nurjahduspituudeksi saadaan (nurjahduskertoimena käytetään varmalla puolella olevana yksinkertaistuksena $L_{cr} = 1,0L$):

$$L_{cr.y} = L_{cr.z} = \frac{\sqrt{20^2 + 24^2}}{6} = 5,2\ m$$

Kokeillaan rakenneputkea 120×120×4. Veto- ja nurjahduskestävyyksiksi saadaan:

$$N_{t.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1815 \cdot 420}{1,0} = 762,3\ kN \geq 398,7\ kN \qquad OK$$

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0,2922 \cdot 1815 \cdot 420}{1,0} = 222,7\ kN \geq 176,8\ kN \qquad OK$$

Lisäksi on mitoitettava orsiristikot ja räystäspalkki.

Vertailu S420 vs S355:
Jos mitoitus suoritettaisiin putkien osalta lujuusluokkaan S355 perustuen, laskentamenettely säilyisi samana. Materiaalilujuuden nostaminen S355 → S420 parantaa nurjahduskestävyyttä tässä noin 4 % ja vetokestävyyttä täysimääräisesti myötölujuuden nousun verran (= + 18 %).

7.6 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008. (EN 1990:2002+A1:2005+AC:2008)
Eurocode. Rakenteiden suunnitteluperusteet.
Sisältää myös muutokset A1:2005 ja korjaukset AC:2008.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 185 s.

[1a] SFS-EN 1990: AC:2010. (EN 1990: AC:2010)
Korjausosa AC:2010 standardiin EN 1990.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 22 s.

[2] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1990.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 7 s.

[3] SFS-EN 1991-1-1:2002. (EN 1991-1-1:2002)
Eurocode 1. Rakenteiden kuormat.
Osa 1-1: Yleiset kuormat. Tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 72 s.

[4] SFS-EN 1991-1-1: AC:2009. (EN 1991-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1991-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 7 s.

[5] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-1.
Sisältää muutoksen 1 (5.11.2010).
5.11.2010. Ympäristöministeriö. 5 s.

[6] SFS-EN 1991-1-3:2004. (EN 1991-1-3:2003)
Eurocode 1. Rakenteiden kuormat.
Osa 1-3: Yleiset kuormat. Lumikuormat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 80 s.

[7] SFS-EN 1991-1-3: AC:2009. (EN 1991-1-3: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1991-1-3.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 4 s.

[8] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-3.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 7 s.

[9] SFS-EN 1991-1-4:2005. (EN 1991-1-4:2005)
Eurocode 1. Rakenteiden kuormat.
Osa 1-4: Yleiset kuormat. Tuulikuormat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 254 s.

[10] SFS-EN 1991-1-4: AC:2009. (EN 1991-1-4: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1991-1-4.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 12 s.

[11] SFS-EN 1991-1-4: AC:2010. (EN 1991-1-4: AC:2010)
Korjausosa AC:2010 standardiin EN 1991-1-4.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 11 s.

[12] SFS-EN 1991-1-4: A1:2010. (EN 1991-1-4: A1:2010)
Muutososa A1:2010 standardiin EN 1991-1-4.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 7 s.

[13] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1991-1-4.
Sisältää muutoksen 1 (5.11.2010).
5.11.2010. Ympäristöministeriö. 4 s.

[14] SFS-EN 1993-1-1:2005. (EN 1993-1-1:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 100 s.

[15] SFS-EN 1993-1-1:2005+AC:2006. (EN 1993-1-1:2005+AC:2006)
Sisältää myös korjaukset AC:2006.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.

[16] SFS-EN 1993-1-1: AC:2009. (EN 1993-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 16 s.

[17] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-1.
15.10.2007 sekä korjaus 14.2.2008. Ympäristöministeriö. 7 s.

[18] SFS-EN 1993-1-8:2005. (EN 1993-1-8:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-8: Liitosten mitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 149 s.

[19] SFS-EN 1993-1-8:2005+AC:2005. (EN 1993-1-8:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 137 s.

[20] SFS-EN 1993-1-8: AC:2009. (EN 1993-1-8: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-8.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

[21] Suomen kansallinen liite standardiin SFS-EN 1993-1-8.
15.10.2007. Ympäristöministeriö. 2 s.

[22] Kouhi J. 20xx. “Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu:
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Sovellutusohjeita, taustatietoja, kommentteja, tulkintoja, selvennyksiä,
kansallinen liite ja sen taustoja, oppi- ja opetusaineistoa, esimerkkejä.”
Teräsrakenneyhdistys ry. Työversio 2009.

[23] Ongelin P., Valkonen I. 2010. Hitsatut profiilit. EN 1993 -käsikirja.
Rautaruukki Oyj. 608 s.

[24] ECCS. 2006. Rules for Member Stability in EN 1993-1-1.
Background documentation and design guidelines.
ECCS Technical Committee 8 - Stability. ECCS Publication No 119. 259 s.

[25] Access Steel. 2006. NCCI:
Buckling lengths of columns: rigorous approach.
Document SN008a-EN-EU. [www.access-steel.com] (3.5.2012)

[26] ECCS. 1992. Analysis and Design of Steel frames with Semi-Rigid Joints.
ECCS Technical Committee 8 - Structural Stability.
Technical Working Group 8.1/8.2 Skeletal Structures.
ECCS No 67. First edition. 80 s.

[27] RIL 167-2 Teräsrakenteet II. 1992.
Suomen Rakennusinsinöörien liitto RIL ry. 471 s.

[28] Wardenier J. 2001. Hollow Sections in Structural Applications.
1st edition. 199 s. CIDECT. [www.cidect.org] (11.4.2012).

[29] CIDECT. 1992. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No 3.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 102 s.

[30] CIDECT. 1998. Design guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures. CIDECT Design Guide No 7.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 171 s.

[31] Access Steel. 2006. NCCI:
Effective lengths of columns and truss elements in truss portal frame construction.
Document SN031a-EN-EU. [www.access-steel.com] (3.5.2012)

8. KONEPAJAVALMISTUS JA ASENNUS

8.1 Yleistä

Rakenteen suunnitteluun kuuluvat rakenteen mitoituksen lisäksi myös konepajavalmistus ja työmaa-asennus. Mitoituksessa pyritään minimoimaan rakenteen painoa, koska rakenneputken hinta on lähes suoraan verrannollinen painoon. Mahdollisimman kevyt rakenne ei ole kuitenkaan aina koko rakennusprojektin kannalta edullisin. Äärimmilleen optimoitu rakenne saattaa olla kallis valmistaa ja asentaa, jolloin materiaalisäästöt menetetään kohonneisiin valmistus- ja asennuskustannuksiin. Edulliseen lopputulokseen pääsemiseksi on tärkeää, että suunnittelija, konepaja ja työmaa toimivat yhteistyössä ja kaikilla osapuolilla on riittävä tietotaito koskien koko rakennusprojektia.

Periaatteena on tehdä kaikki vaativimmat ja vaikeimmat työvaiheet konepajalla, jolloin työmaalla rakenteen asennus voidaan suorittaa nopeasti ja edullisesti. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että kaikki hitsiliitokset pyritään tekemään konepajalla ja työmaalla yhdistetään valmiit asennuslohkot toisiinsa ruuviliitoksilla. Erityisesti on kiinnitettävä huomiota siihen, että nosturiajat saadaan minimoitua (etenkin jos joudutaan käyttämään mobiilinostureita).

8.1.1 Yleiset vaatimukset valmistajalle

Standardin EN 1090-1 mukaan valmistajan on laadittava ja ylläpidettävä konepajavalmistuksesta valmistuksen valvontajärjestelmää (FPC, Factory Production Control). Valmistuksessa noudatetaan eri standardeja, joista merkittävä osa löytyy standardien EN 1090-1 ja EN 1090-2 viitestandardeista.

8.1.2 Toteutuseritelmä

Teräsrakennesuunnittelijan on esitettävä valmistusta ja asennusta koskevat vaatimukset toteutuseritelmässä, joka perustuu standardiin EN 1090-2.

8.1.3 Toteutusluokat

Standardissa EN 1090-2 on esitetty neljä toteutusluokkaa EXC1-EXC4, joiden vaatimukset kasvavat siirryttäessä luokasta 1 luokkaan 4. Toteutusluokka määritellään viimeistään suunnitteluvaiheessa, mutta siitä olisi hyvä olla käsitys jo tarjousvaiheessa, koska toteutusluokan vaatimuksilla on kustannusvaikutus mikä luonnollisesti vaikuttaa projektin hinnoitteluun.

Standardin EN 1090-2 liite B, eli toteutusluokan valinta, tullaan kokonaisuudessaan siirtämään Eurocodeen osan EN 1993-1-1 liitteeksi. Samalla myös seuraavassa esitetyt standardin EN 1090-2 ohjeisiin perustuvat toteutusluokan (EXC) valintaa koskevat ohjeet saattavat muuttua.

Toteutusluokka voi koskea koko rakennetta, osaa tai yksityiskohtaa. Rakenteella voi olla useita toteutusluokkia, kun taas yksityiskohdalla on yleensä yksi toteutusluokka. Jos mitään toteutusluokkaa ei ole esitetty, sovelletaan toteutusluokkaa EXC2. Toteutusluokkien vaatimukset on esitetty standardin EN 1090-2 liitteessä A, joka on velvoittava.

Toteutusluokan valintaan vaikuttavat seuraamusluokat CC1-CC3, käyttöluokat SC1-SC2 sekä tuotantoluokat PC1-PC2. Seuraamusluokat on esitetty Eurocoden osan EN 1990 liitteessä B ja tämän kirjan luvussa 2. Hitsatut teräsrakenteet kuuluvat tuotantoluokkaan PC2, kun käytetään lujuusluokan S355 teräksiä tai lujempia teräksiä. Käyttöluokat, tuotantoluokat, toteutusluokan valinta ja eri toteutusluokkien sisältämät vaatimukset on esitetty standardin EN 1090-2 liitteessä B ja tämän kirjan taulukoissa 8.1 - 8.4.

Toteutusluokka vaikuttaa mm. vaadittaviin toleransseihin, hitsausluokkiin, tarkastusmenetelmiin ja tarkastuslaajuuksiin. Toteutusluokkien vaatimukset on syytä selvittää viimeistään ennen suunnittelutyön aloitusta.

Taulukko 8.1 Käyttöluokan valinta standardin EN 1090-2 liitteen B mukaan [1]

Luokka	Kriteerit
SC1	• Rakenteet ja kokoonpanot, jotka suunnitellaan pääosin vain staattisille kuormituksille (esimerkiksi rakennukset) • Rakenteet ja kokoonpanot ja niiden liitokset, jotka suunnitellaan seismisille vaikutuksille matalan seismisen aktiviteetin perusteella ja luokassa DCL [a)] • Rakenteet ja kokoonpanot, jotka suunnitellaan nostureista aiheutuville väsytyskuormille (luokka S_0) [b)]
SC2	• Rakenteet ja kokoonpanot, jotka suunnitellaan standardin EN 1993 mukaisille väsytyskuormille. (Esimerkkejä: maantie- ja rautatiesillat, nosturit (luokat S_1-S_9) [b)], rakenteet, jotka ovat alttiina tuulesta, väkijoukosta tai pyörivästä laitteesta aiheutuville värähtelyille. • Rakenteet ja kokoonpanot ja niiden liitokset, jotka suunnitellaan seismisille vaikutuksille keskimääräisen tai korkean seismisen aktiviteetin perusteella ja luokissa DCM [a)] ja DCH [a)]
a) DCL, DCM, DCH; sitkeysluokat standardin EN 1998-1 mukaan b) Katso nostureista aiheutuvien väsytyskuormitusten luokittelu standardeista EN 1991-3 ja EN 13001-1.	

Taulukko 8.2 Tuotantoluokan valinta standardin EN 1090-2 liitteen B mukaan [1]

Luokka	Kriteerit
PC1	• Terästuotteista valmistetut kokoonpanot, joissa ei ole hitsejä • Hitsatut kokoonpanot, jotka on valmistettu terästuotteista, joiden lujuusluokka on alempi kuin S355
PC2	• Hitsatut kokoonpanot, jotka on valmistettu terästuotteista, joiden lujuusluokka on S355 tai korkeampi • Rakenteellisuuden toimivuuden kannalta tärkeät kokoonpanot, jotka kootaan hitsaamalla työmaalla • Kokoonpanot, jotka valmistetaan kuumamuovaamalla tai joita lämpökäsitellään tai joihin kohdistetaan termistä käsittelyä valmistuksen aikana • Pyöreistä rakenneputkista valmistetut ristikot, joissa putken päät leikataan erityiseen muotoon

Taulukko 8.3 Toteutusluokan valinta standardin EN 1090-2 liitteen B mukaan [1]

Seuraamusluokka		CC1		CC2		CC3	
Käyttöluokka		SC1	SC2	SC1	SC2	SC1	SC2
Tuotantoluokka	PC1	EXC1	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 a)	EXC3 a)
	PC2	EXC2	EXC2	EXC2	EXC3	EXC3 a)	EXC4

a) Toteutusluokkaa EXC4 käytetään kansallisten sääntöjen edellyttämällä tavalla erityisrakenteille tai rakenteille, joiden vaurio voi aiheuttaa äärimmäisen vakavia seuraamuksia

Taulukko 8.4 Toteutusluokkien vaatimukset standardin EN 1090-2 mukaan [1]

	EXC1	EXC2	EXC3	EXC4
Eritelmät ja asiakirjat				
Laatuasiakirjat	Ei vaatimuksia	Oltava	Oltava	Oltava
Käytettävät tuotteet; tunnistaminen, ainestodistukset ja jäljitettävyys				
Ainestodistukset	ks. taulukko 1.8			
Jäljitettävyys	Ei vaatimuksia	Osittainen	Täydellinen	Täydellinen
Merkintä	Ei vaatimuksia	Oltava	Oltava	Oltava
Rakenneterästuotteet				
Paksuustoleranssit	Luokka A	Luokka A	Luokka A	Luokka B
Pinnan laadut	Levyt: Luokka A2 Pitkät tuotteet: Luokka C1	Levyt: Luokka A2 Pitkät tuotteet: Luokka C1	Tiukempia vaatimuksia, jos erikseen vaaditaan	
Erityisominaisuudet	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Laatuluokka S1 sisäisille epäjatkuvuuksille hitsatuissa ristiliitoksissa (Lamellirepeämän välttäminen).	
Esivalmistus ja kokoaminen				
Tunnistaminen	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Valmiit kokoonpanot / Ainestodistukset	
Polttoleikkaus	Ei merkittäviä epätasaisuuksia Kovuus taulukon 8.5 mukaisesti, jos vaaditaan	EN ISO 9013 u = luokka 4 Rz5 = luokka 4 Kovuus taulukon 8.5 mukaisesti, jos vaaditaan	EN ISO 9013 u = luokka 4 Rz5 = luokka 4 Kovuus taulukon 8.5 mukaisesti, jos vaaditaan	EN ISO 9013 u = luokka 3 Rz5 = luokka 3 Kovuus taulukon 8.5 mukaisesti, jos vaaditaan
Kuumilla oikaisu	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Kehitettävä soveltuva menettelytapa	
Reikien tekeminen	Lävistäminen	Lävistäminen	Ainepaksuus $t \leq 3$ mm: lävistäminen täyteen mittaan sallitaan Ainepaksuus $t > 3$ mm: lävistäminen + avartaminen (lävistetään 2 mm alimittaan) Termisesti leikatut reijät; leikattujen reunojen kovuus taulukon 8.5 mukaisesti.	

(jatkuu)

Taulukko 8.4 Toteutusluokkien vaatimukset standardin EN 1090-2 mukaan [1] *(jatkuu)*

Aukot	Ei vaatimuksia	Minimi pyöristyssäde 5 mm		Minimi pyöristyssäde 10 mm, lävistäminen kielletty
Kokoaminen	Sovittaminen: Reikien pidentäminen Toiminnallinen toleranssi, luokka 1		Sovittaminen: Reikien pidentäminen: Toiminnallinen toleranssi, luokka 2	
Hitsaus				
Yleistä	EN ISO 3834-4	EN ISO 3834-3	EN ISO 3834-2	EN ISO 3834-2
Hitsausmenetelmien hyväksyminen	Ei vaatimuksia	ks. EN 1090-2 taulukot 12 ja 13		
Hitsaajat ja hitsausoperaattorit	Hitsaajat: EN 287-1.Operaattorit: EN 1418			
Hitsauksen koordinointi	Ei vaatimuksia	Tekninen tietämys: ks. EN 1090-2 taulukot 14 ja 15		
Railot	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Konepajapohjamaalia ei sallita	
Tilapäiset kiinnitykset	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Käyttö on esitettävä Leikkaaminen ja lastuaminen eivät ole sallittuja	
Siltahitsit	Ei vaatimuksia	Hyväksytty hitsausmenetelmä		
Päittäishitsit	Ei vaatimuksia	Aloitus- ja lopetuspalat jos vaaditaan	Aloitus- ja lopetuspalat Yhdeltä puolelta hitsatuille hitseille pysyvä jatkuva juurituki	
Hitsaus			Roiskeiden poisto	
Hyväksymiskriteerit	EN ISO 5817 Hitsiluokka D	EN ISO 5817 Yleensä hitsiluokka C	EN ISO 5817 Hitsiluokka B	EN ISO 5817 Hitsiluokka B+ [a]
Asentaminen ja työskentely rakennuspaikalla				
Käsittely ja varastointi työmaalla	Ei vaatimuksia	Dokumentoitu korjausmenetelmä		
Sovitus ja linjaus	Ei vaatimuksia	Ei vaatimuksia	Edellä kohdassa **Hitsaus** esitetyt vaatimukset koskevat täytelevyjen hitsaamalla tapahtuvaa varmistamista.	
Tarkastus, testaus ja korjaaminen				
Tarkastuslaajuus	Silmämääräinen tarkastus	NDT taulukon 8.13 mukaisesti		
Hitsien korjaus	Ei vaadita hyväksyttyä hitsausohjetta	Hyväksytyn hitsausohjeen mukaisesti		
Työkokeet	Ei vaatimuksia		Erikseen vaadittaessa	
Esijännitettyjen ruuviliitosten tarkastaminen ja testaaminen	Ei vaatimuksia	Tarkastusmenettely: ks. EN 1090-2 kohta 12.5.2		

(jatkuu)

Taulukko 8.4 Toteutusluokkien vaatimukset standardin EN 1090-2 mukaan [1] *(jatkuu)*

Kuumaniittien tarkastus, testaus ja korjaus	Ei vaatimuksia	Sointikoe: Niitin kannan kilautus kevyesti 0,5 kg vasaralla Tarkastussekvenssi A (EN 1090-2 liite M)	Sointikoe: Niitin kannan kilautus kevyesti 0,5 kg vasaralla Tarkastussekvenssi B (EN 1090-2 liite M)
Liitosnurkkien geometrisen sijainnin tarkastus	Ei vaatimuksia	Tallenne tarkastuksesta	
a) EN ISO 5817 hitsiluokka B + lisävaatimukset EN 1090-2 taulukko 17.			

8.1.4 Osien ja kokoonpanojen jäljitettävyys

Osien ja kokoonpanojen tunnistamiseksi jokaisen osan tai samanlaisia osia sisältävän pakkauksen on oltava merkitty riittävän hyvin osien tunnistamiseksi. Lisäksi toteutusluokissa EXC3 ja EXC4 on oltava jäljitettävyys ainestodistuksiin.

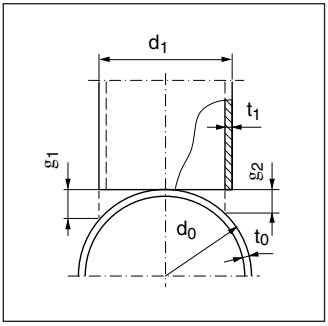
Jos käytetty teräs on lujuusluokaltaan yli S355, kovaa leimasinta, stanssausta, porausta tai muuta vastaavaa materiaalia työstävää tai poistavaa merkkausmenetelmää ei saa käyttää [1].

8.2 Rakenneputken katkaisu

Rakenneputket voidaan tilata joko vakiopituisina (6, 12 tai 18 m) tai määrämittaisina (jopa 24 m). Hukkapaloja ei synny, jos putket tilataan määrämittaisina. Katkaisu tehdään usein konepajalla, jos rakenne edellyttää vinoja katkaisupintoja (esim. ristikot). Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien katkaisu on yksinkertaista, koska katkaisu voidaan tehdä tasopintaa pitkin. Tosin esim. limitetyissä liitoksissa esiintyy useita katkaisupintoja. Pyöreiden rakenneputkien katkaisu on monimutkaisempaa, jos kyseessä on pyöreiden rakenneputkien keskinäinen liitos. Tällöin pyöreän rakenneputken pää joudutaan usein muotoilemaan.

8.2.1 Pyöreän rakenneputken katkaisu

Yksinkertaisimmillaan pyöreä rakenneputki voidaan liittää toisen pyöreän rakenneputken kylkeen katkaisemalla putki suorana tai vinona katkaisuna yhtä tasopintaa pitkin. Tämä edellyttää kuitenkin, että liitettävien putkien ulkomitat eroavat toisistaan riittävän paljon, jotta pienemmän putken reunoille jäävä ilmarako (kuva 8.1) on tarpeeksi pieni hitsaamisen kannalta. Vaatimukset ilmaraon suuruudelle ja putkien väliselle sovitteelle on esitetty kohdassa 8.5.4.2.



Kuva 8.1 Pienemmän putken reunoille jäävät ilmaraot, kun putki katkaistaan vain yhtä tasopintaa pitkin

Käytännössä useimmat pyöreistä rakenneputkista valmistetut rakenteet eivät täytä kohdan 8.5.4.2 sovitevaatimuksia, jos katkaisu on tehty pelkkänä tasopintakatkaisuna. Paras sovite saadaan leikkaamalla pienemmän putken pää vaadittuun muotoon termisillä leikkausmenetelmillä levityskuvan avulla, tai hyödyntäen nykyaikaisempia menetelmiä kuten 3D-laserleikkausta (ks. kohta 8.2.2).

Pyöreiden rakenneputkien liitosten ilmarakoa voidaan pienentää ja sovitetta parantaa myös edellä esitettyjen menetelmien 'välimuotona' katkaisemalla putki useammassa tasossa kuvan 8.2 mukaisesti. Liitoksen geometriaa määrittelevät tällöin katkaisukulmat α_g ja α_d, joille saadaan seuraavat yhtälöt [2,3]:

$$\alpha_g = 90° - \theta + arctan\left(\frac{h \cdot sin\theta}{r_1 + h \cdot cos\theta - L \cdot sin\theta}\right) \qquad (8.1)$$

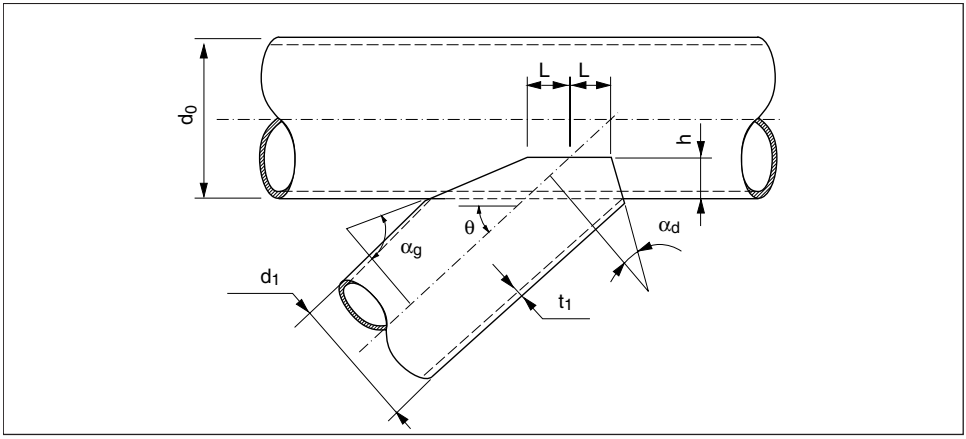
$$\alpha_d = -90° + \theta + arctan\left(\frac{h \cdot sin\theta}{r_1 - h \cdot cos\theta - L \cdot sin\theta}\right) \qquad (8.2)$$

missä $L = \sqrt{r_1^2 - (r_1 - t_1)^2}$

$$h = \frac{d_0}{2} - \sqrt{\frac{d_0^2}{4} - (r_1 - t_1)^2}$$

$$r_1 = \frac{d_1 - 2t_1}{2}$$

d_0 on suuremman rakenneputken halkaisija
d_1 on pienemmän rakenneputken halkaisija
t_1 on pienemmän rakenneputken seinämänpaksuus



Kuva 8.2 Pyöreän rakenneputken katkaiseminen kolmea tasopintaa pitkin

8.2.2 Katkaisumenetelmät

Sahaus

Sahaus on rakenneputkien yleisin katkaisumenetelmä. Sahat ovat joko pyörö- tai vannesahoja. Suurempi sahausnopeus aiheuttaa yleensä huonomman katkaisutarkkuuden ja poistettavia sahauspurseita. Sahausnopeuden lisäksi on syytä kiinnittää huomiota rakenneputkien sujuvaan siirtämiseen sahauspaikalle ja sieltä pois. Rakenneputken molemmat päät on myös mahdollista katkaista samanaikaisesti, jolloin säästetään aikaa. Sahanterän tylsyminen kasvattaa mittapoikkeamaa ja huonontaa katkaisujäljen laatua, joten terät on vaihdettava riittävän usein.

Muut katkaisumenetelmät

a) Polttoleikkaus

Polttoleikkaus on käsivaraisesti tehtynä sahausta epätarkempi katkaisumenetelmä. Polttoleikkaus sopii hyvin esim. pyöreiden rakenneputkien päiden muotoiluun ristikkoliitoksissa.

b) Katkaiseminen lävistämällä

Katkaiseminen lävistämällä sopii ainoastaan ohutseinäisille rakenneputkille. Menetelmän etuna on monimutkaistenkin katkaisupintojen aikaansaaminen. Pyöreiden rakenneputkien liitoksissa saadaan lävistämällä muotoiltua kerralla valmis rakenneputken pää.

c) Laserleikkaus

Laserleikkaus on tarkka katkaisumenetelmä. Laserleikkauksen etuna on myös pieni lämmönmuutosalue katkaisukohdan läheisyydessä. Haittana on tarvittavan laitteiston kalleus.

Nykyisillä 3D-lasereilla rakenneputken pää voidaan muotoilla suoraan liitoksen vaatimusten mukaisesti, mikä vähentää erillisen kustannuksia lisäävän käsityön osuutta. Tästä on hyötyä erityisesti pyöreiden rakenneputkien liitoksissa.

Esimerkiksi SSAB:n palvelukeskuksissa on käytettävissä 3D-lasereita, joilla voidaan leikata ainepaksuuksia maksimissaan noin 16 mm saakka, maksimi ulkomitan ollessa pyöreällä putkella 508 mm, neliöputkella 400 × 400 mm ja suorakaiteen muotoisilla 300 × 500 mm. Tiedonsiirtoon käy IGES- ja STEP- formaatit, joita kaikki yleiset 3D CAD-ohjelmistot tukevat.

Standardissa EN 1090-2 on annettu leikatun reunan kovuudelle taulukossa 8.5 esitetyt maksimiarvot, jotka ovat voimassa jos ruuvin reijät tehdään termisesti leikkaamalla.

Muissa tapauksissa taulukko on voimassa, jos toteutuseritelmässä niin vaaditaan.

Leikatut reunat on tarkastettava ja käsiteltävä, jos leikkauspinnassa on merkittäviä vikoja. Jos leikattua reunaa koneistetaan tai hiotaan, on poistettava ainepaksuus oltava vähintään 0,5 mm.

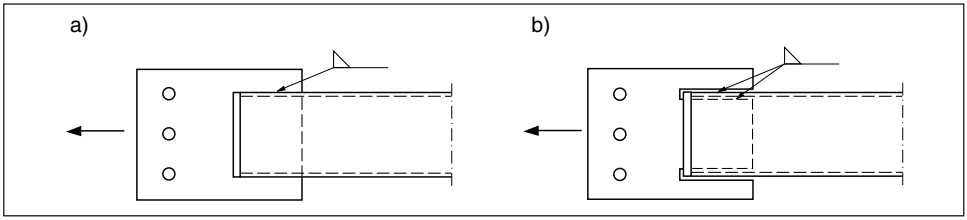
Taulukko 8.5 Termisesti leikatun reunan maksimikovuudet standardin EN 1090-2 mukaan [1]

Tuotestandardit	Teräslajit	Kovuusarvot (HV 10)
EN 10025-2...5	S235 - S460	380
EN 10210-1, EN 10219-1		
EN 10149-2, EN 10149-3	S260 - S700	450
EN 10025-6	S460 - S690	
HUOM: Arvot ovat standardin EN ISO 15614-1 mukaisia standardissa ISO/TR 20172 esitetyille teräslajeille.		

8.2.3 Rakenneputken pään loveaminen

Ruuviliitosten levyjen kiinnitys saattaa edellyttää lovien tekemistä rakenneputken seinämään (kuva 8.3a). Kevyesti kuormitetuissa liitoksissa on kuitenkin edullisempi leikata liitoslevyä kuin rakenneputkea (kuva 8.3b). Raskaasti kuormitettujen liitosten voimien siirtämiseksi on vastaavasti edullisempi leikata rakenneputki ja säilyttää levy kokonaisena, koska riittävän pitkän hitsin tekeminen rakenneputken sisäpuolelle on vaikeaa. Samoin pienikokoisten rakenneputkien liitoksissa joudutaan leikkaamaan rakenneputkea, koska sisäpuolinen hitsaaminen on lähes mahdotonta.

Lovet voidaan tehdä samoilla menetelmillä kuin katkaisu.



Kuva 8.3 Levyn liittäminen rakenneputkeen

8.3 Rakenneputken taivuttaminen

Rakenneputken taivuttaminen voidaan tehdä joko kylmätaivutuksena tai kuumataivutuksena.

Kuumana taivuttaminen

Eri terästuotteet ja teräslajit reagoivat kuumentamiseen eri tavoin. Väärin suoritettu kuumentaminen voi heikentää teräksen ominaisuuksia sekä alentaa teräksen lujuutta huomattavastikin. Siksi standardissa EN 1090-2 on teräslajikohtaisia ohjeita, rajoituksia ja kieltoja koskien kuumamuovausta ja siinä käytettäviä lämpötila-alueita. Mikäli rakenneputkien kuumana taivuttamista tarvitaan, on syytä ottaa yhteyttä rakenneputkien tekniseen neuvontaan.

Kylmänä taivuttaminen

Kylmätaivutus on halvempi ja yksinkertaisempi menetelmä, joten sitä käytetään yleisemmin. Pyöreän rakenneputken taivuttaminen on helpompaa kuin neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien taivutus, joissa poikkileikkauksen muoto pyrkii vääristymään.

Taivutuksen onnistumiseen vaikuttavia tekijöitä ovat:

- materiaalin murto- ja myötölujuudet
- materiaalin kemiallinen koostumus ja murtovenymä
- seinämänpaksuuden suhde rakenneputken korkeuteen ja leveyteen (t/h, t/b, t/d)
- taivutussäteen suhde rakenneputken korkeuteen ja leveyteen (r/h, r/d, r/b)

Neliön ja suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla pitää arvioida tapauskohtaisesti poikkileikkauksen muodon vääristymisen vaikutus rakenteen ulkonäköön. Standardin EN 1090-2 mukaan taivuttaminen kylmänä on sallittua edellyttäen, että taivutettujen rakenneputkien kovuus ja geometria tarkastetaan [1]. Mitä parempi ulkonäkö rakenteelta vaaditaan, sitä suurempi tulee olla taivutussäde. Taivuttaminen on helpompaa rakenneputkilla, joilla murto- ja myötölujuus ovat matalampia. Myös suurempi seinämänpaksuus suhteessa rakenneputken korkeuteen ja leveyteen parantaa taivutettavuutta. Pieni taivutussäde on aina vaikeammin toteutettavissa kuin suuri taivutussäde.

Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaussuureet pienenevät taivutuksessa. Redusoituja neliömomentteja on esitetty liitteessä 11.5. Puristetun rakenneputken seinämän vääristyminen taivutuksessa on otettava huomioon myös rakenneputken puristuskestävyyttä laskettaessa.

Pyöreiden rakenneputkien taivuttaminen kylmänä on standardin EN 1090-2 mukaan sallittua, kun noudatetaan seuraavia vaatimuksia, ellei toisin esitetä [1]:

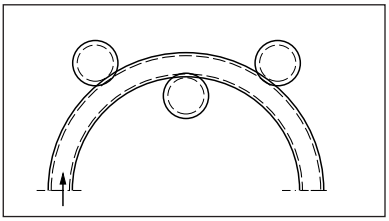
- putken ulkohalkaisijan ja seinämänpaksuuden suhteen tulee olla $d/t \leq 15$
- taivutussäde putken keskilinjalla ei saa alittaa arvoa max [1,5d ; d+100 mm] missä d on putken ulkohalkaisija
- poikkileikkauksen hitsausliitos (pituussaumahitsatut putket) tulee sijoittaa lähelle neutraaliakselia hitsin taivutusjännitysten pienentämiseksi.

Vaativimmat taivutukset edellyttävät yleensä kokemusperäistä tietoa ja taivutukseen erikoistuneen konepajan, jolla on taivustyöhön soveltuvat laitteet. Taivutustyön onnistumiseksi suunnittelijan ja valmistajan välinen yhteistyö ja asiantuntemus on tärkeää.

8.3.1 Rakenneputken taivutusmenetelmät

Rullataivutus

Rakenneputki kulkee rullataivutuksessa kolmen tai neljän muotoillun rullan läpi. Rullien koko vaihtelee rakenneputkien koon mukaan. Keskimmäisillä rullilla säädetään taivutussäteen suuruus. Rullista yksi on tavallisesti vapaasti pyörivä. Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien minimitaivutussäteitä on esitetty liitteessä 11.5.

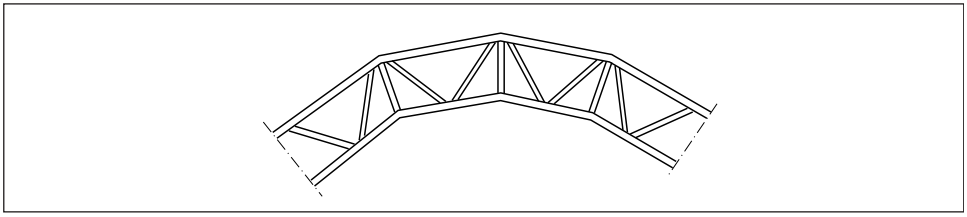


Kuva 8.4 Rakenneputken taivuttaminen 3-rullataivutuksena

Induktiotaivutus

Induktiotaivutuksessa rakenneputkea kuumennetaan induktiokelalla taivutuksen aikana. Kerralla lämmitetään vain pientä osaa rakenneputkesta, jota samalla taivutetaan. Näin jatketaan kunnes koko rakenneputki on käynyt prosessin läpi. Induktiotaivutus on kalliimpi menetelmä kuin rullataivutus, mutta minimitaivutussäteet ovat pienempiä.

Ristikkokaaret voidaan tehdä suorista osista. Kaareva muoto saadaan aikaan liittämällä suorat paarresauvan osat toisiinsa taivutussädettä vastaavassa kulmassa (kuva 8.5).



Kuva 8.5 Kaarevan muotoinen rakenneputkirakenne

8.4 Ruuviliitokset

Rakenneputkien ruuviliitoksissa reijät sijoitetaan yleensä rakenneputkeen liittyvään rakenneosaan, tavallisesti levyyn. Yksinkertaisinta olisi porata reijät suoraan rakenneputkeen, mutta käytännössä rakenneputkien hoikat seinämät eivät kestä paljonkaan kuormaa. Käyttämällä erityismenetelmiä reikien poraamisessa tai erikoisruuveja, voidaan kuitenkin tehdä rakenneputkien liitokset suoraan rakenneputken seinämän välityksellä. Kyseisiä menetelmiä voidaan hyödyntää kevyemmin kuormitetuissa liitoksissa. Niitä käsitellään lyhyesti jäljempänä kohdassa 8.4.3.

8.4.1 Käytettävät ruuvit, mutterit ja aluslaatat

Ruuvin nimellishalkaisijan tulee olla vähintään 12 mm, ellei toisin esitetä. Muotosauvoille ja muotolevyrakenteille kiinnittimien vähimmäishalkaisijat esitetään tyypeittäin. Ruuvin pituus tulee valita niin, että vähintään yksi kierre tulee kiristämisen jälkeen mutterin ulkopuolelle (esijännitetyt sekä esijännittämättömät ruuvikokoonpanot). Samalla on myös varmistettava, että esijännittämättömillä ruuveilla mutterin kantopinnan ja ruuvin kierteettömän varren väliin jää vähintään yksi täysi kierre kierteen päätteen lisäksi. Esijännitetyillä ruuveilla mutterin kantopinnan ja ruuvin kierteettömän varren väliin tulee jäädä vähintään neljä täyttä kierrettä kierteen päätteen lisäksi [1].

Mutterin tulee vapaasti kiertyä yhteenkuuluvassa ruuvissa. Kaikki ruuvi-mutterikokoonpanot, joissa mutteri ei kierry vapaasti tulee hylätä. Mutterit pitää asentaa siten, että niiden merkinnät ovat näkyvissä asennuksen jälkeisessä tarkastuksessa.

Standardin EN 1090-2 mukaan aluslaattoja ei tarvita esijännittämättömissä liitoksissa, kun ruuvit asennetaan tavallisiin pyöreisiin reikiin. Jos aluslaattoja edellytetään käytettäväksi, tulee esittää, laitetaanko aluslaatta vain kierrettävän osan, joka on yleensä mutteri, vai ruuvin ja mutterin kannan alle. Yksileikkeisissä päällekkäisliitoksissa, joissa on vain yksi ruuvirivi, tulee aluslaattojen olla sekä ruuvin, että mutterin kannan alla.

Esijännitetyissä ruuviliitoksissa pyöreitä aluslaattoja, tai tarvittaessa kovuudeltaan vastaavia 300 HV karkaistuja vinoja aluslaattoja, tulee käyttää lujuusluokan 8.8 ruuvien kanssa kierrettävän osan (mutteri tai ruuvin kanta) alla. Esijännitettyjen lujuusluokan 10.9 ruuvien kanssa aluslaattoja tulee käyttää sekä mutterin että ruuvin kannan alla [1].

Esijännitettyjen ruuvien kannan alla käytetään standardin EN 14399-6 mukaisia viistettyjä aluslaattoja ja viisteen tulee olla ruuvin kannan puolella. Standardin EN 14399-5 mukaisia (viisteettömiä) aluslaattoja saa käyttää vain mutterin alla. Puristevälin säätämiseksi voidaan käyttää yhtä ylimääräistä levyaluslaattaa tai enintään kolmea aluslaattaa, joiden yhteenlaskettu paksuus on korkeintaan 12 mm. Jos kiristysmenelmänä on vääntömomenttimenetelmä tai HRC-menetelmä, yksi ylimääräinen aluslaatta voidaan sijoittaa sen osan alle jota käännetään, vaihtoehtoisesti ylimääräinen aluslaatta (tai ylimääräiset aluslaatat) voidaan sijoittaa sen osan alle jota ei käännetä. Muussa tapauksessa (esijännitetyt sekä esijännittämättömät ruuvikokoonpanot) yksi ylimääräinen aluslaatta (tai ylimääräiset aluslaatat) voidaan sijoittaa joko sen osan alle jota käännetään tai sen osan alle jota ei käännetä [1].

Taulukossa 8.6 on esitetty ruuvien reikien nimellisvälykset standardin EN 1090-2 mukaan. Soviteruuveilla reijän nimellishalkaisijan tulee olla sama kuin ruuvin varren nimellishalkaisija.

Reijät voidaan tehdä poraamalla tai lävistämällä. Väsytyskuormitettujen rakenteiden liitoksien reijät on kuitenkin tehtävä aina poraamalla (lävistämistä voidaan tällöin hyödyntää siten, että ensin lävistetään halkaisijaltaan vähintään 2 mm alimittainen esireikä, joka sitten avarretaan lopulliseen mittaansa).

Taulukko 8.6 Ruuvien reikien nimellisvälykset (mm) [1]

Ruuvin koko	M12	M16	M20	M22	M24	M27 ja suuremmat
Normaalit pyöreät reijät [a]	1 [b) c)]	2				3
Ylisuuret pyöreät reijät	3	4			6	8
Lyhyet pidennetyt reijät (pituudelle) [d]	4	6			8	10
Pitkät pidennetyt reijät (pituudelle) [d]	1,5d					

a) Soviteruuvin vapaareijän halkaisijaksi valitaan ruuvin varren nimellishalkaisija (EN 14399-8 soviteruuveilla varren halkaisija on 1 mm suurempi kuin kierteellisen osan).

b) Pinnoitetuille kiinnittimille 1 mm:n nimellisvälystä voidaan suurentaa kiinnittimen pinnoitteen paksuuden verran

c) Ruuveilla M12 - M14 ja uppokantaruuveilla voidaan käyttää myös 2 mm nimellisvälystä edellyttäen, että reunapuristuskestävyyteen perustuva ruuvin tai ruuviryhmän kestävyys on pienempi tai yhtäsuuri kuin ruuvien leikkauskestävyyteen perustuva ruuvin tai ruuviryhmän kestävyys. Lisäksi lujuusluokkien 4.8, 5.8, 6.8, 8.8 ja 10.9 leikkauskestävyyden mitoitusarvoa $F_{v.Rd}$ pienennetään Eurocoden osassa EN 1993-1-8 esitetyn mukaisesti.

d) Pidennetyissä reijissä ruuvien nimellisvälyksen tulee leveyssuunnassa olla sama kuin normaaleilla pyöreillä reijillä.

Taulukon alaviite c) on korjattu lähteen [EN 1993-1-8:AC:2009] mukaisesti.

8.4.2 Ruuviliitosten asentaminen

8.4.2.1 Esijännittämättömien ruuvien asentaminen

Esijännittämättömien ruuvien kanssa on suositeltavaa käyttää aluslaattaa sillä puolella ruuvia (normaalisti mutterin alla), mistä kiristetään. Muuten liitettävän osan pinnoite voi vaurioitua.

Saman kerroksen muodostavien erillisten levyosien välinen paksuusero saa olla enintään 2 mm ja esijännitettäviä ruuveja käytettäessä enintään 1 mm. Sovitukseen voidaan käyttää täytelevyä, jolloin täytelevyn paksuuden tulee olla vähintään 2 mm. Täytelevyjen paksuus tulee valita siten, että niiden lukumäärä on enintään kolme. Liitettävät osat liitetään tiiviisti yhteen. Kun kiinnitetään levyjä, joiden ainepaksuus on $t \geq 4$ mm, ja profiileja joiden ainepaksuus on $t \geq 8$ mm, voidaan liitoksen reunoilla hyväksyä 4 mm raot edellyttäen, että liitoksen keskellä saavutetaan tiivis kosketus, ellei vaadita täyttä kosketuspainetta [1].

Ruuvi kiristetään sopivalla työkalulla siten, että liitospintojen välillä on tiivis kosketus. Tarvittava ns. 'tiukka kiristys' voidaan yleensä katsoa saavutetuksi, kun asentaja käyttää tavallisen kokoista ruuviavainta ilman lisävartta tai, kun iskevä momenttiavain alkaa vasaroida.

Normaalisti ruuvi kiristetään kiertämällä mutteria. Ruuviryhmän ruuvit kiristetään aloittaen liitoksen jäykimmästä kohdasta ja edeten kohti vähiten jäykkää kohtaa. Tasaisen kiristyksen saavuttaminen voi vaatia useamman kuin yhden kiristyskierroksen. Suuret ruuviryhmät kiristetään keskeltä alkaen ja edeten reunoihin vuorotellen keskikohdan molemmin puolin.

Standardissa EN 1090-2 ei edellytetä muttereiden lukitsemista (paitsi merkittäville värähtelyille alttiissa ohutlevykokoonpanojen pienen puristevälin liitoksissa kuten esim. varastohyllyissä),

vaan lukitsemisen tarpeellisuus jää suunnittelijan päätettäväksi. Erikseen tulee esittää, jos muttereiden varmistamiseksi on kiristämisen lisäksi käytettävä muita toimenpiteitä tai välineitä. Asiasta on mainittava toteutuseritelmässä. Muttereita ei saa lukita hitsaamalla, ellei toisin esitetä [1].

8.4.2.2 Esijännitettävien ruuvien asentaminen

Esijännitettävien ruuvien kanssa käytetään aluslaattoja siten, että lujuusluokassa 8.8 aluslaattaa on käytettävä sillä puolella ruuvia (normaalisti mutterin alla), mistä kiristetään ja lujuusluokassa 10.9 aluslaattaa käytetään sekä mutterin että kannan puolella [1].

Esijännitettävien ruuvien kanssa ei käytetä kiristämisen lisäksi muttereiden varmistamiseksi muita toimenpiteitä tai välineitä, ellei toisin esitetä.

Esijännitettävien ruuvien esijännitysvoiman $F_{p.C}$ vähimmäisarvo on esitetty taulukossa 8.7. Tätä esijännitysvoimaa tulee käyttää kaikissa esijännitettävissä liukumisen kestävissä kiinnityksissä ja muissakin esijännitettävissä kiinnityksissä, ellei pienempää esijännitysvoimaa erikseen esitetä. Jälkimmäisessä tapauksessa tulee esittää myös tarkoitetut ruuvikokoonpanot, kiristysmenetelmä, kiristysparametrit ja tarkastusvaatimukset.

Kiristäminen aloitetaan liitoksen jäykimmästä kohdasta, josta edetään vähitellen kohti liitoksen vähiten jäykkää kohtaa. Tasainen esijännitys saattaa edellyttää useamman kuin yhden kiristyskierroksen.

Esijännitettyjen ruuvien kiristämisessä on standardissa EN 1090-2 esitetty neljä eri menetelmää [1]:

- vääntömomenttimenetelmä
- yhdistetty menetelmä
- HRC-kiristysmenetelmä ja
- vedon ilmaisuun perustuva (DTI, direct tension indicator) menetelmä.

Vedon ilmaisuun perustuva menetelmä perustuu esijännitysvoiman ilmaiseviin aluslaattoihin standardissa EN 14399-9 esitetyn mukaisesti.

HRC-menetelmässä käytetään standardin EN 14399-10 mukaisia erityisiä HRC-ruuveja ja erikoisväännintä. Ruuvikokoonpanon asennus on valmis kun ruuvin varresta irtileikkautuva pää irtoaa varren murtumiskohdassa. HRC-menetelmä kontrolloi esijännitystä automaattisesti ruuvin geometristen ja vääntömekaanisten ominaisuuksien ja voitelutilan avulla. Sitä ei tarvitse kalibroida.

Vääntömomenttimenetelmässä tulee käyttää kalibroitua momenttiavainta, jonka tarkkuus on ±4 % standardin EN ISO 6789 mukaisesti. Momenttiavaimen tarkkuus tulee tarkastaa vähintään kerran viikossa. Jos momenttiavainta käytetään yhdistetyn menetelmän yhteydessä ainoastaan ensimmäisessä kiristysvaiheessa, riittää että tarkkuus on ±10 % ja tarkkuus tarkastetaan kerran vuodessa. Tarkastaminen tulee aina uusia avaimeen kohdistuvan häiriötilanteen jälkeen (merkittävä tärähdys, putoaminen, ylikuormitus jne). Kiristäminen tulee suorittaa kahdessa vaiheessa seuraavasti:

a) ensimmäinen vaihe:
ruuvit tulee kiristää momenttiin, jonka arvo on 75 % momentista joka lasketaan kaavasta:

$$M_{r.2} = k_m \cdot d \cdot F_{p.C} \qquad (8.3)$$

missä k_m on luokan K2 mukainen k-kertoimen keskiarvo (ruuvin valmistaja ilmoittaa)
d on ruuvin nimellishalkaisija
$F_{p.C}$ on ruuvin esijännitysvoiman vähimmäisarvo,
$F_{p.C}$ = 0,7$f_{ub}A_s$ (taulukko 8.7)

Kaikki liitoksen ruuvit tulee kiristää ensimmäiseen vaiheeseen, ennen kuin toinen vaihe aloitetaan.

b) toinen vaihe:
ruuvit kiristetään momenttiin, jonka arvo on 1,1 × $M_{r.2}$.

Yhdistetyssä menetelmässä ruuvit kiristetään kahdessa vaiheessa seuraavasti:

a) ensimmäinen vaihe:
ruuvit kiristetään 75 % momenttiin kuten vääntömomenttimenetelmässä.

b) toinen vaihe:
kierrettävää osaa kierretään taulukossa 8.8 esitetyn kulman verran, jolloin saavutetaan lopullinen esijännitysvoima. Mutterin asema (jos kierrettävä osa on mutteri) ruuvin kierteiden suhteen tulee merkitä ensimmäisen vaiheen jälkeen väriliidulla tai maalimerkinnällä niin, että mutterin lopullinen kiertymä ruuvin suhteen toisessa vaiheessa voidaan helposti määrittää.

Taulukko 8.7 Ruuvien esijännitysvoiman $F_{p.C}$ vähimmäisarvot (kN) [1]

Lujuus-luokka	Ruuvin koko							
	M12	M16	M20	M22	M24	M27	M30	M36
8.8	47	88	137	170	198	257	314	458
10.9	59	110	172	212	247	321	393	572

Taulukko 8.8 Yhdistetty menetelmä, vaiheen 2 lisäkiertymä (8.8 ja 10.9 ruuveille) [1]

Kiinnitettävien osien kokonaisnimellispaksuus t (kaikki säätölevyt ja aluslaatat mukaan lukien) d=ruuvin halkaisija	Lisäkiertymä kiristämisen toisessa vaiheessa	
	Astetta	Kierroksen osa
t < 2 d	60°	1/6
2 d ≤ t < 6 d	90°	1/4
6 d ≤ t ≤ 10 d	120°	1/3
Jos ruuvin tai mutterin alla oleva pinta ei ole kohtisuorassa ruuvin akseliin nähden (sallittua vinoaluslaattojen yhteydessä), vaadittava kiertokulma määritetään kokeellisesti.		

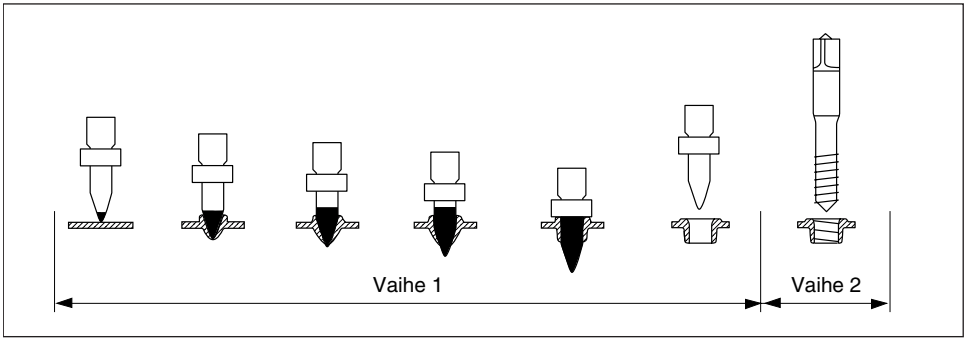
8.4.3 Erityiskiinnittimien ja -menetelmien käyttö

8.4.3.1 Itsekierteittävät ruuvit ja poraruuruuvit

Kevyemmin kuormitetuissa liitoksissa voidaan käyttää itsekierteittäviä ruuveja tai poraruuveja, joilla yleisimmin käytetyt ruuvikoot ovat 5,5 ja 6,3 mm. Poraruuviliitoksissa ruuvi kiinnitetään aina ohuemman osan puolelta. Itsekierteittävän ruuvin esireikä tulee olla hiukan ruuvin nimellishalkaisijaa pienempi (ruuvinvalmistajan ilmoittama arvo). Poraruuvin käyttö on yksinkertaisempaa ja nopeampaa, koska ruuville ei tarvitse porata esireikää. Itsekierteittäviä ja poraruuveja käytettäessä on noudatettava ruuvinvalmistajan ohjeita.

8.4.3.2 Rakenneputken seinämän kitkaporaus

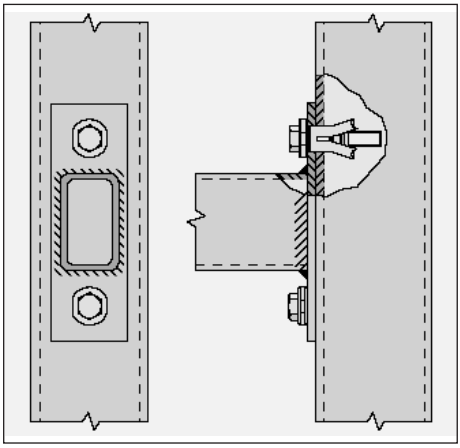
Kitkaporauksessa reijän poraaminen tapahtuu erillisellä kovametallisella työkalulla, joka kitkan vaikutuksesta kuumentaa rakenneputken seinämää. Tällöin lämpenevä materiaali pursottuu ensin pinnan yläpuolelle ja terän läpäistyä materiaalin sen alapuolelle. Näin perusaineesta itsestään muodostuu alapuolelle holkki, johon voidaan tehdä kierteet joko perinteisellä lastuavalla menetelmällä tai valssaamalla kierteytystapilla (erillinen työvaihe). Kierrepituus kasvaa holkin ansiosta suunnilleen kaksinkertaiseksi alkuperäiseen materiaalinpaksuuteen verrattuna. Menetelmää on testattu ruuvin kokoon M24 ja ainepaksuuteen 12,5 mm asti [3]. Menetelmällä ei ole Suomessa hyväksyntää rakenteellisiin liitoksiin.



Kuva 8.6 Flowdrill -kitkaporauksen työvaiheet

8.4.3.3 Liitokset kiila-ankkureilla

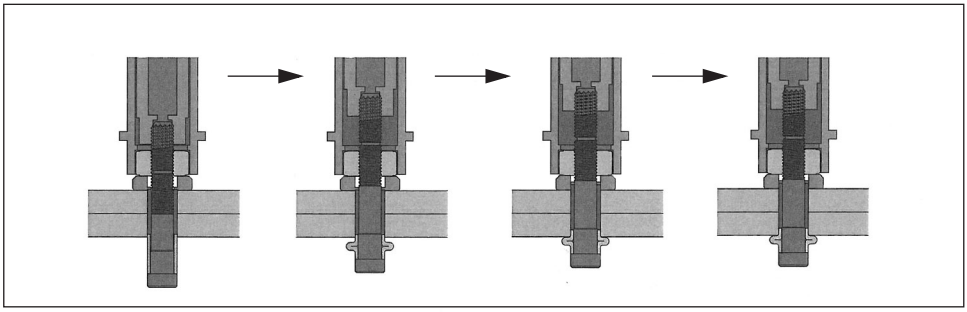
Kiila-ankkuriliitoksissa putken seinämään porataan reikä tavanomaisilla menetelmillä. Reikään sijoitetaan kiila-ankkuri, joka toimii samaan tapaan kuin betonirakenteen liitoksissa. Kiila-ankkurin sisällä on kierteytetty reikä, johon ruuvi asennetaan. Ruuvia kiristettäessä kiila-ankkurin kartiomainen pää kiristyy putken seinämää vasten. Kartio levittää samalla kiila-ankkurin vaippaa, jolloin ruuviin saadaan tarvittava kiristysmomentti. Menetelmä sopii ruuveille M8 - M16 ja kaikille seinämänpaksuuksille [3,4]. Menetelmällä ei ole Suomessa hyväksyntää rakenteellisiin liitoksiin.



Kuva 8.7 Hollo-Bolt kiila-ankkuri-liitos

8.4.3.4 Liitokset vetoniiteillä

Perinteisten pienikokoisten vetoniittien (‘pop-niitit’) lisäksi markkinoilla on myös erikoisempia ratkaisuja järeämpiin sovelluksiin, kuten kuvassa 8.8 esitetty Huck Ultra-Twist kiinnike. Kiinnikkeen varren halkaisijakoot ovat d = 20 / 24 / 27 mm. Kiinnikettä varten putken seinämään tarvitaan reikä, joka porataan perinteisin menetelmin. Menetelmällä ei ole Suomessa hyväksyntää rakenteellisiin liitoksiin.



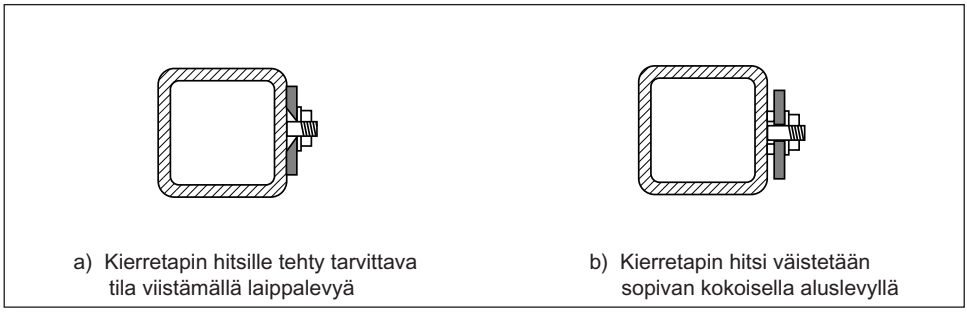
Kuva 8.8 Huck Ultra-Twist kiinnikkeen asennusvaiheet

8.4.3.5 Liitokset kierretapeilla

Kevyesti kuormitetut liitokset voidaan tehdä myös putken seinämään hitsattujen kierretappien välityksellä. Liitettävän osan reikää on avarrettava putken seinämän puolelta, jotta kierretapin hitsi ei jää kantamaan ruuvien kiristyksen jälkeen. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää aluslevyjä

liitettävän osan ja putken välillä. Erityistä huomiota on syytä kiinnittää kierretappien suojaamiseen kuljetuksen ja asennuksen aikana.

Väsytyskuormitetuissa rakenteissa on muistettava, että varusteluosien hitsaus heikentää yleensä väsymislujuutta, joten niitä ei saa suorittaa ilman suunnittelijan lupaa.



a) Kierretapin hitsille tehty tarvittava tila viistämällä laippalevyä

b) Kierretapin hitsi väistetään sopivan kokoisella aluslevyllä

Kuva 8.9 Kierretappiliitos

8.5 Rakenneputken hitsaaminen

SSAB Domex Tube rakenneputkissa käytetyt rakenneteräkset ovat hyvin hitsattavia kaikilla yleisillä hitsausmenetelmillä. Työlämpötilaa ei normaaleissa konepajaolosuhteissa tarvitse korottaa rakenneputkilla kyseeseen tulevilla ainepaksuuksilla.

Hitsattavuus riippuu hitsausmenetelmästä ja materiaalin kemiallisesta koostumuksesta. Teräksen hitsattavuutta arvioidaan yleensä teräksen kemiallisen koostumuksen perusteella lasketun hiiliekvivalentin (CEV) avulla. Mitä pienempi hiiliekvivalentti, sitä paremmin teräs on hitsattavaa. Yleisin hiiliekvivalentin kaava on IIW:n (International Institute of Welding) kaava:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \qquad (8.4)$$

Teräs on kylmähalkeilualttiuden kannalta hyvin hitsattavaa tavallisilla menetelmillä, kun CEV-arvo on alle 0,41. SSAB:n pituussaumahitsattujen rakenneputkien normaaleilla seinämänpaksuuksilla (≤ 12,5 mm) ja vakioteräslajilla SSAB Domex Tube Double Grade ei tarvita mitään erityistoimenpiteitä hitsauksen suhteen (CEV ≤ 0,39). Esilämmitys on tarpeen, kun hiiliekvivalentti on suurempi kuin 0,45. Hitsattavien kappaleiden tulee olla kuivia ja puhtaita rasvasta ja öljystä.

SSAB:n kylmämuovatut SSAB Domex Tube rakenneputket ovat hyvin hitsattavia myös nurkan alueella. Kylmämuovatun rakenneputken nurkan hitsaamiselle on esitetty ohjeita ja vaatimuksia Eurocoden osassa EN 1993-1-8. SSAB:n kylmämuovatut SSAB Domex Tube rakenneputket täyttävät kyseiset vaatimukset, joten niiden nurkkaa voidaan hitsata ilman erityistoimenpiteitä (ks. tarkemmin luku 3, taulukko 3.7).

Hitsausaineen valintaa on käsitelty luvun 3 kohdassa 3.3.5.1.

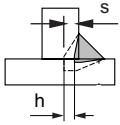
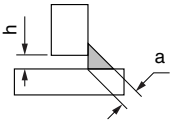
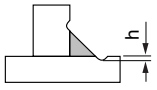
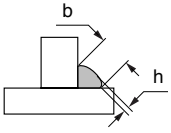
8.5.1 Hitsausluokat ja hitsausvirheiden toleranssit

Standardi EN ISO 5817 määrittelee hitsausluokat, joita sovelletaan valmistettaviin hitsausliitoksiin. Hitsausluokkia on kolme, ja ne merkitään tunnuksilla D (tyydyttävä), C (hyvä) tai B (vaativa). Vaadittava hitsausluokka määräytyy rakenneosan EXC-toteutusluokan perusteella standardin EN 1090-2 liitteen A mukaisesti (tämän kirjan taulukko 8.4). Yleensä päädytään käyttämään hitsausluokkaa B tai C.

Taulukossa 8.9 on esitetty standardiin EN ISO 5817 perustuvat pienahitsien toleranssit hitsausluokissa B...D.

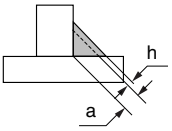
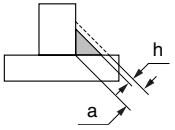
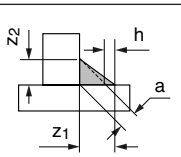
Standardi EN 1090-2 ja Eurocoden osat EN 1993-1-8 ja EN 1993-1-9, jotka viittaavat hitsausluokkien osalta standardiin EN ISO 5817, määräävät perustason laatuvaatimuksille väsyttävän kuormituksen tapauksissa. Kyseisten vaatimusten lisäksi voi olla tarpeen määrittää hitseille ylimääräisiä laatuvaatimuksia lähteessä [5] esitetyn mukaisesti, kun kyseessä on väsytyskuormitetut rakenteet.

Taulukko 8.9 Pienahitsien sallitut hitsausvirheet [1,6]

Virhetyyppi ISO 6520-1		Hitsausluokka (EN ISO 5817)		
		D [a] Tyydyttävä	C Hyvä	B Vaativa
402 Vajaa hitsautumissyvyys t > 0,5 mm		Lyhyet virheet [b] h ≤ 0,2s max 2 mm	Lyhyet virheet [b] h ≤ 0,1s max 2 mm	Ei sallita
617 Sovitusvirhe t > 3 mm		h ≤ 1 mm + 0,3a max 4 mm	h ≤ 0,5 mm + 0,2a max 3 mm	h ≤ 0,5 mm + 0,1a max 2 mm
		Systemaattinen virhe h-mitassa sallitaan tietyissä tilanteissa, joissa virhe voidaan kompensoida vastaavasti a-mittaa kasvattamalla, ks. EN 1090-2: kohta 7.5.8.1		
5011 ja 5012 Jatkuva ja katkonainen reunahaava t > 3 mm		h ≤ 0,2 t max 1 mm	h ≤ 0,1 t max 0,5 mm	h ≤ 0,05 t max 0,5 mm
		Juoheva liittyminen vaaditaan, jota ei katsota systemaattiseksi virheeksi.		
503 Korkea kupu t ≥ 0,5 mm		h ≤ 1 mm + 0,25b max 5 mm	h ≤ 1 mm + 0,15b max 4 mm	h ≤ 1 mm + 0,1b max 3 mm

(jatkuu)

Taulukko 8.9 Pienahitsien sallitut hitsausvirheet [1,6]
(jatkuu)

Virhetyyppi ISO 6520-1		Hitsausluokka (EN ISO 5817)		
		D [a] Tyydyttävä	C Hyvä	B Vaativa
5214 Ylisuuri a-mitta $t \geq 0,5$ mm		Sallitaan	$h \leq 1$ mm + 0,2a max 4 mm	$h \leq 1$ mm + 0,15a max 3 mm
5213 Vajaa a-mitta $t > 3$ mm Ei sovelleta hitsausprosesseille, joille on näyttö suuresta tunkeumasta		Lyhyet virheet [b] $h \leq 0,3$ mm + 0,1a max 2 mm	Lyhyet virheet [b] $h \leq 0,3$ mm + 0,1a max 1 mm	Ei sallita
512 Kateettipoikkeama $t \geq 0,5$ mm		$h \leq 2$ mm + 0,2a	$h \leq 2$ mm + 0,15a	$h \leq 1,5$mm + 0,15a

a) Systemaattinen hitsausvirhe sallitaan. Systemaattisella virheellä tarkoitetaan hitsausvirhettä, jossa virhe esiintyy toistuvasti tarkastettavalla pituudella, yksittäisen virheen koon ollessa annettujen rajojen sisäpuolella.
b) Lyhyt hitsausvirhe on yksi tai useampi hitsausvirhe , joiden kokonaispituus on enintään 25 mm milla tahansa 100 mm hitsin pituudella tai enintään 25 % hitsin pituudesta, kun hitsin pituus on alle 100 mm. Valitaan alue, jossa on eniten hitsausvirheitä.

8.5.2 Hitsausmenetelmät

Rakenneputkien hitsauksessa käytetään pääasiassa kahta hitsausmenetelmää: puikkohitsausta ja kaasukaarihitsausta. Puikkohitsaus on etupäässä työmaa-asennuksessa käytetty hitsausmenetelmä. Sen etuina on kevyt ja helposti siirreltävä laitteisto sekä tunteettomuus tuulelle.

Kaasukaarihitsaus (MIG/MAG -hitsaus) on konepajavalmistuksessa eniten käytetty hitsausmenetelmä. Sen etuina ovat parempi tuottavuus ja hitsauksen mahdollinen automatisoiminen.

Hitsatuissa rakenteissa on otettava huomioon standardin EN 1090-2 asettamat vaatimukset hitsaajan ammattitaidolle. Standardi 1090-2 edellyttää hitsaajan pätevöittämistä erityisellä kokeella, jos rakenneputkista valmistettavissa ristikkorakenteissa paarteen ja uumasauvojen astekulma on $\theta < 60°$.

Hitsaus suoritetaan standardien EN ISO 3834 tai EN ISO 14554 soveltuvien osien mukaisesti. Toteutusluokan mukaan sovelletaan seuraavia EN ISO 3834 osia:

- EXC 1 : Osa 4. Peruslaatuvaatimukset
- EXC 2 : Osa 3. Vakiolaatuvaatimukset
- EXC 3 ja EXC 4 : Osa 2. Kattavat laatuvaatimukset

Osana tuotannon suunnittelua tulee laatia hitsaussuunnitelma, joka sisältää tarpeen mukaan:

- Hitsausohjeet, lisäaineet, mahdollisen esikuumennuksen, välipalkolämpötilan ja hitsauksen jälkeistä lämpökäsittelyä koskevat vaatimukset;
- Toimenpiteet hitsauksen aikana ja sen jälkeen tapahtuvien vetelyiden välttämiseksi;
- Hitsausjärjestys ja mahdolliset aloitus- ja lopetuskohtia koskevat rajoitukset ja hyväksyttävät alueet mukaan lukien väliaikaiset aloitus- ja lopetuskohdat, kun hitsin geometria estää jatkuvan hitsauksen;
- Hitsauksen aikana tehtäviä tarkastuksia koskevat vaatimukset;
- Osakokoonpanojen kääntäminen hitsausprosessissa ja hitsausjärjestys
- Tuentajärjestelyjen yksityiskohdat;
- Toimenpiteet lamellirepeilyn välttämiseksi;
- Hitsausaineille tarkoitetut erityislaitteet ja -vaatimukset (alhainen vetypitoisuus, kosteuden ja lämpötilan säätäminen jne.);
- Hitsin muoto ja viimeistely;
- Hitsien hyväksymiskriteereihin liityvät vaatimukset, sekä tarkastus- ja testaus-suunnitelmaa koskevat viittaukset;
- Hitsien tunnistamista koskevat vaatimukset;
- Pintakäsittelyä koskevat vaatimukset

Työssä tulee käyttää hyväksyttyjä hitsausmenetelmiä käyttäen hitsausohjetta (WPS, Welding Procedure Specification) kyseeseen tulevan standardin EN ISO 15609, EN ISO 14555 tai EN ISO 15620 sovellettavien osien mukaisesti. Hyväksymistavat on esitetty taulukossa 8.10. Siihen vaikuttavat toteutusluokka, perusaine ja mekanisointiaste taulukon 8.10 mukaisesti.

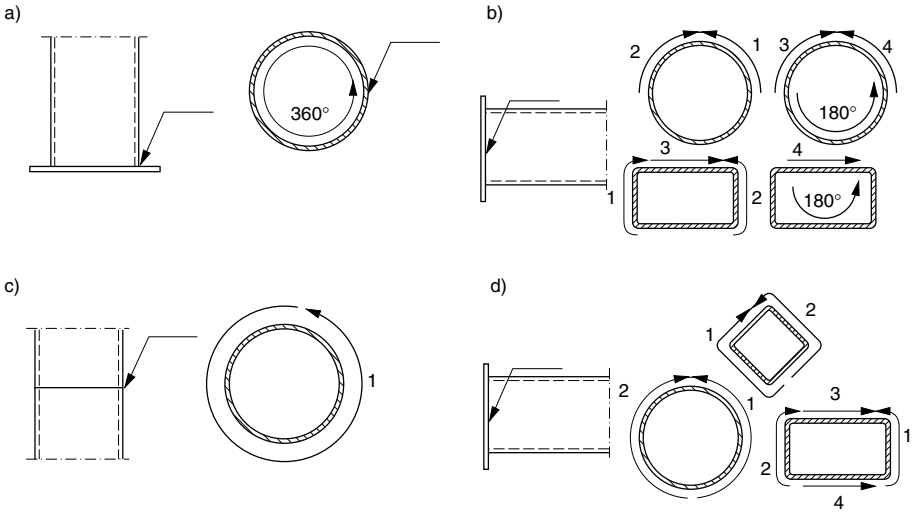
Taulukko 8.10 Hitsauksen hyväksymistavat puikko-, täytelanka-, jauhekaari-, MIG/MAG- ja TIG-hitsaukselle [1]

Hyväksymismenetelmä	Standardi	Toteutusluokka		
		EXC2	EXC3	EXC4
Menetelmäkoe	EN ISO 15614-1	X	X	X
Esituotannollinen koe	EN ISO 15613	X	X	X
Standardimenetelmä	EN ISO 15612	X a)	–	–
Aikaisempi kokemus	EN ISO 15611	X b)	–	–
Testatut lisäaineet	EN ISO 15610			
X Sallittu – Ei sallittu				
a) Vain materiaaleille ≤S355 ja vain käsin hitsauksessa tai osittain mekanisoidussa hitsauksessa. b) Vain materiaaleille ≤S275 ja vain käsin hitsauksessa tai osittain mekanisoidussa hitsauksessa.				

8.5.3 Hitsausjärjestys

Hitsauksen aiheuttamien jännitysten ja liitettävien osien muodonmuutosten vuoksi oikea hitsausjärjestys on tärkeä. Rakenneputkien hitsaamista ei saisi aloittaa rakenneputken nurkasta eikä lopettaa nurkkaan. Putkirakenteissa nurkkiin kerääntyy luonnostaan jännityshuippuja, joita hitsauksen aloitus- ja lopetuskohtien lovivaikutus kasvattaa entisestään. Samalla myös liitoksen väsymiskestävyys heikkenee.

Hitsausjärjestys riippuu myös putken siirrettävyydestä ja hitsausasennosta. Kuvassa 8.10a putkea voidaan kiertää vaakasuunnassa. Hitsauspiste siis pysyy paikallaan ja kappaletta kierretään täysi kierros. Kuvassa 8.10b kappale on vaakasuunnassa ja sitä voidaan myös kiertää akselinsa ympäri. Hitsaussuunta on ensin alhaalta ylöspäin. Alapuolinen sivu hitsataan vasta käännön jälkeen. Kuvassa 8.10c putki on kiinteästi pystyasennossa. Hitsaus tapahtuu yhtäjaksoisesti ympäri koko putken. Kuvassa 8.10d putki on kiinteästi vaaka-asennossa. Nyt alapuolinen sauma joudutaan hitsaamaan altapäin.



HUOM: Neliö- ja suorakaideputkilla hitsien aloitus- ja lopetuskohtia ei sijoiteta putken nurkan kohdalle, vaan ne viedään hieman nurkan ohi.

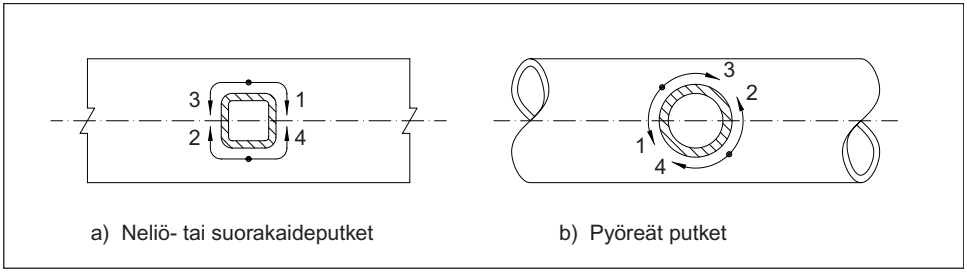
Kuva 8.10 Esimerkkejä rakenneputkiliitosten hitsausjärjestyksestä eri asennoissa ja tilanteissa

Standardin EN 1090-2 liitteessä E on esitetty yleisiä ohjeita hitsausjärjestyksestä rakenneputkiliitoksissa. Rakenneputkien jatkosliitokset (esim. ristikkorakenteissa paarteen jatkos) tulee toteuttaa seuraavasti:

- paarteen jatkosliitosten hitsien aloitus- ja lopetuskohdat valitaan siten, että ne eivät osu paarteen ja uumasauvan välisen hitsin kohdalle
- neliö- tai suorakaideputkien välisten hitsien aloitus- ja lopetuskohtia ei sijoiteta putken nurkkiin tai niiden lähelle

Rakenneputkien muille liitostyypeille käytetään standardin EN 1090-2 mukaan seuraavia yleisiä ohjeita:

- rakenneputkien väliset hitsit hitsataan ympäri, vaikka hitsin koko pituutta ei tarvittaisi kestävyyden vuoksi
- neliö- tai suorakaideputkien paarteen ja uumasauvan välisen liitoksen aloitus- ja lopetuskohtia ei sijoiteta nurkkiin tai niiden läheisyyteen
- kahden pyöreän rakenneputken välisen liitoksen aloitus- ja lopetuskohtia ei sijoiteta liitoksen satula- tai kylkipisteisiin tai niiden läheisyyteen vaan kuvan 8.11b mukaisesti
- kuvassa 8.11 on esitetty suositeltava hitsausjärjestys paarteen ja uumasauvan välisten liitosten hitsaamiseen



Kuva 8.11 Hitsausjärjestys standardin EN 1090-2 mukaan [1]

8.5.4 Railomuodot

Rakenneputkien liitokset pyritään suunnittelemaan siten, että hitsit voidaan tehdä pienahitseinä. Yhdellä palkokerroksella saadaan aikaan korkeintaan 5 mm a-mitta. Pienahitsi on yksinkertaisin ja edullisin hitsityyppi, koska railoja ei tarvitse tehdä. Liitoksen geometriasta riippuen on kuitenkin joissakin tapauksissa tehtävä railo, jotta hitsillä olisi riittävä a-mitta. Hitsi kannattaa tehdä mahdollisimman symmetriseksi, jotta minimoitaisiin hitsiaineen menekki.

8.5.4.1 Railomuodot rakenneputkien jatkosliitoksissa

Standardin EN 1090-2 mukaan, kun rakenneputkien liitoksia hitsataan yhdeltä puolelta, tulee käyttää standardin EN ISO 9692 mukaisia railomuotoja soveltuvin osin.

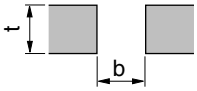
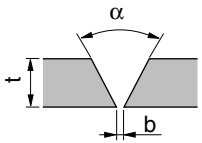
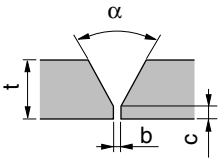
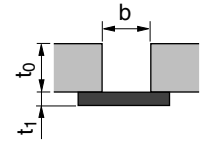
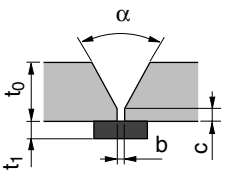
Standardi EN ISO 9692 ei ole kuitenkaan tarkoitettu erityisesti rakenneputkien liitoksille, vaan siinä esitetyt railojen mittaohjeet ovat luonteeltaan kokemusperäisiä ja yleisiin sovellutuksiin tarkoitettuja. Rakenneputkien mitta-aluetta ajatellen niissä annetut ohjeet ovat paikoin puutteelliset. Taulukossa 8.11 on esitetty nimenomaan rakenneputkille ja niiden mitta-alueeseen paremmin sopivia kokemusperäisiä ohjeita jatkosliitoksen railomuodoille perustuen lähteeseen [2].

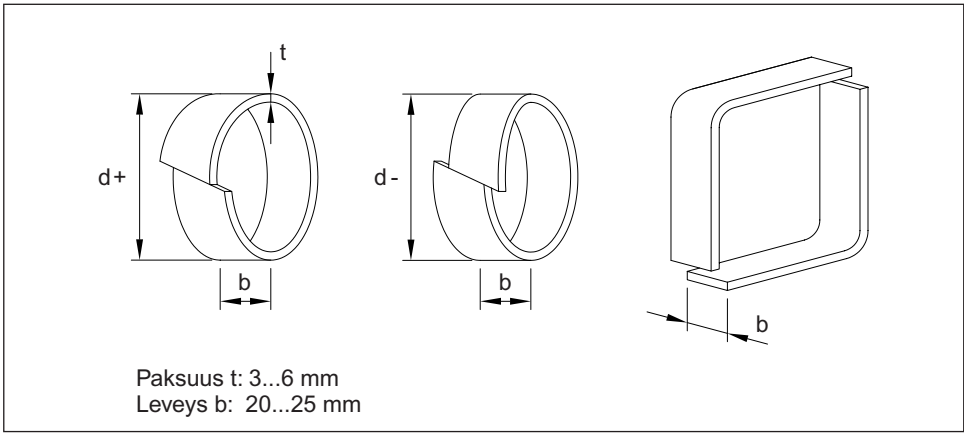
Rakenneputkien jatkosliitoksissa voidaan tarvittaessa käyttää juuritukena standardissa EN 1090-2 esitettyä juuritukirengasta tai -nauhaa (kuva 8.12).

Kuvassa 8.13 on esitetty standardin EN 1090-2 ohjeita seinämältään eripaksuisten rakenneputkien jatkosliitoksille.

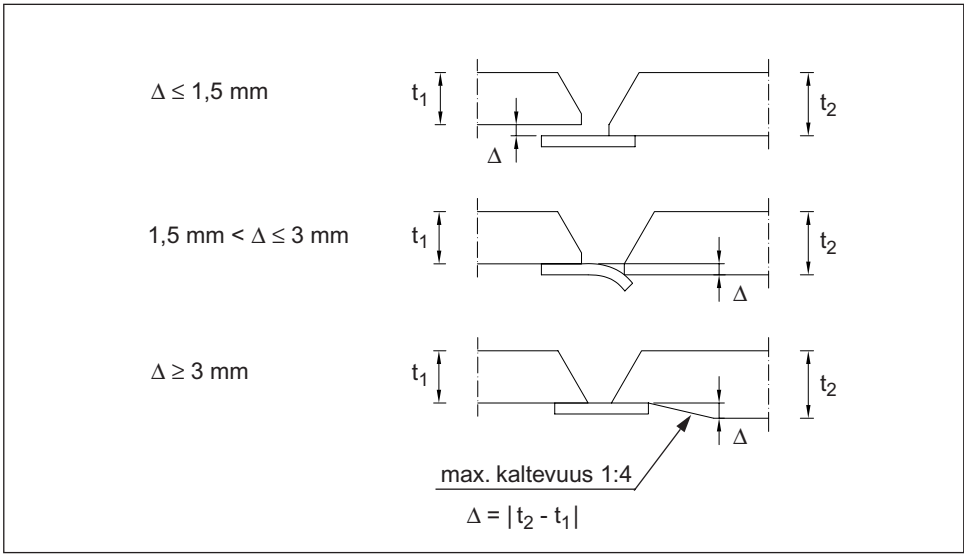
Kulmaliitoksen railomuotoja ja sovitusta koskevat paikallisesti samat ohjeet kuin edellä on esitetty yhdensuuntaisten rakenneputkien jatkosliitokselle. Kulmaliitoksessa vaaditaan sisäpuolella viisteen kasvattamista ja ulkopuolella viisteen pienentämistä kuvan 8.14 mukaisesti.

Taulukko 8.11 Rakenneputkien hitsattu jatkosliitos MIG/MAG -hitsaukselle, kun putkien seinämänpaksuudet ovat yhtä suuret [2]

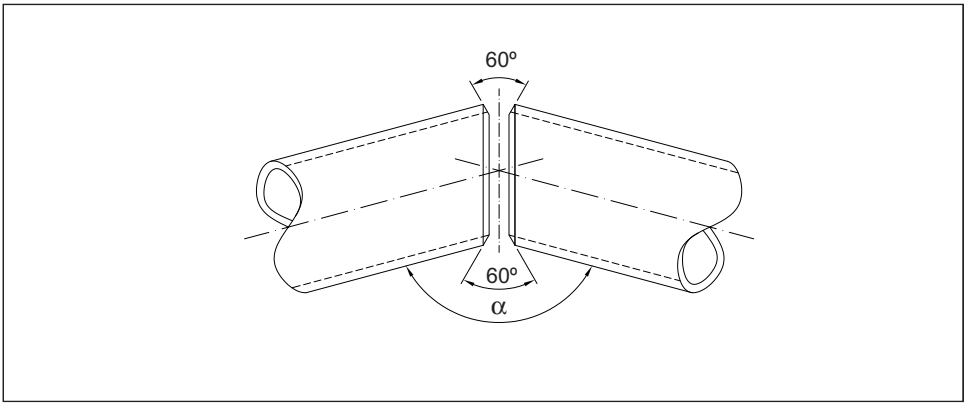
Railotyyppi	Seinämän paksuus	α	b	c	Juurituen paksuus
Ilman juuritukea					
	$t \le 3$ mm	0°	t	-	-
	$3 \le t \le 20$ mm	$\approx 60°$	$0 \le b \le 3$ mm	-	-
	$t \le 20$ mm	$\approx 60°$	$0 \le b \le 4$ mm	$1{,}5 \le c \le 4$ mm	-
Juurituella					
	$t_0 = 3$ mm $t_0 = 5$ mm $t_0 = 6$ mm	0° 0° 0°	$3 \le b \le 5$ mm $5 \le b \le 6$ mm $6 \le b \le 8$ mm	- - -	$t_1 = 3$ mm $3 < t_1 \le 5$ mm $3 < t_1 \le 6$ mm
	$t_0 < 20$ mm	> 60°	$5 \le b \le 8$ mm	$1 \le c \le 2{,}5$ mm	$3 < t_1 \le 6$ mm



Kuva 8.12 Rakenneputkien jatkosliitoksiin sopivat juuritukirenkaiden tai -nauhojen muodot [1]



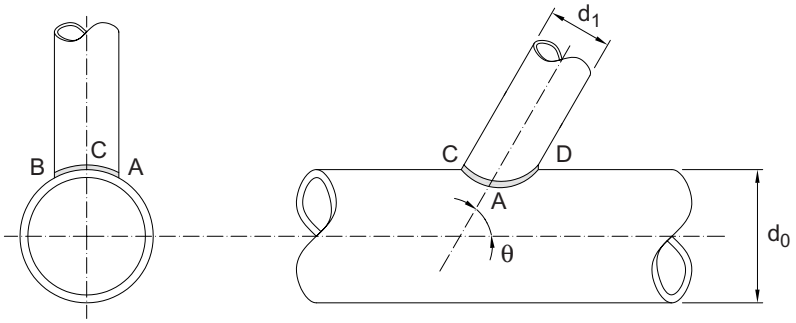
Kuva 8.13 Eri paksuisten rakenneputkien jatkosliitos juuritukea käyttäen [1]



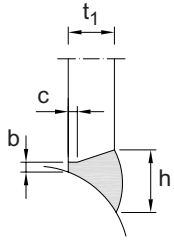
Kuva 8.14 Rakenneputkien viisteellisen kulmaliitoksen railomuoto [1]

8.5.4.2 Railomuodot rakenneputkien ristikkoliitoksissa

Uumasauvojen ja paarteen välisissä hitsatuissa liitoksissa railon paikallinen muotoilu valitaan siten, että varmistetaan juoheva siirtyminen päittäishitseistä pienahitseihin. Päittäishitseinä käytetään standardin EN 1090-2 mukaisia kuvissa 8.15 (pyöreät putket) ja 8.17 (neliö- ja suoraikaideputket) esitettyjä hitsejä. Pienahitseinä käytetään kuvissa 8.16 (pyöreät putket) ja 8.18 (neliö- ja suoraikaideputket) esitettyjä hitsejä.



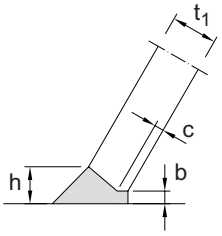
Det. A ja B:



Kun $d_1 < d_0$ $\theta = 60°...90°$

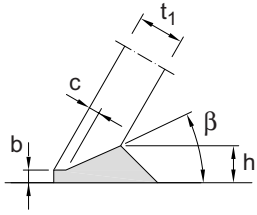
b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm

Det. C:



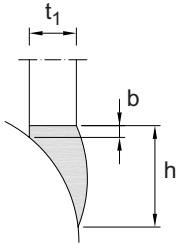
b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm

Det. D:



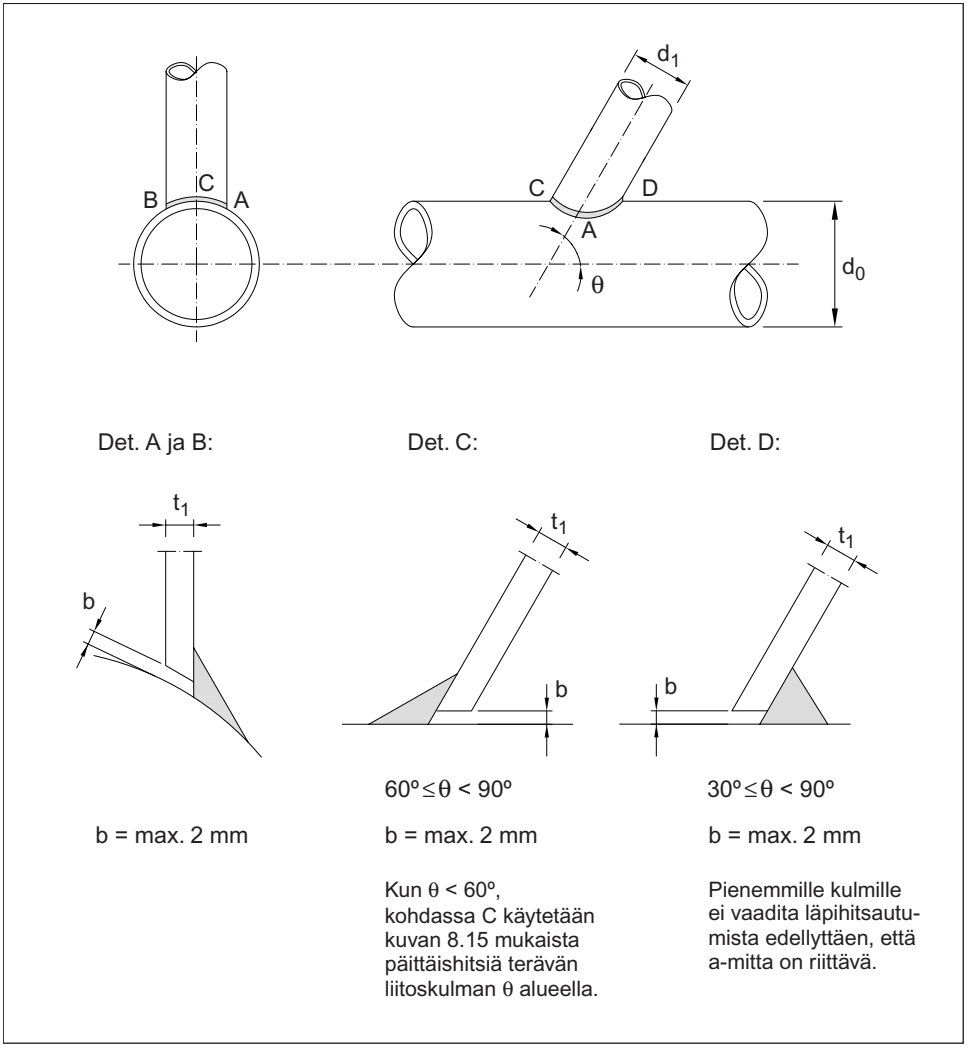
b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm

Kun $\theta < 60°$, kohdassa D käytetään kuvan 8.16 mukaista pienahitsiä terävän liitoskulman θ alueella.

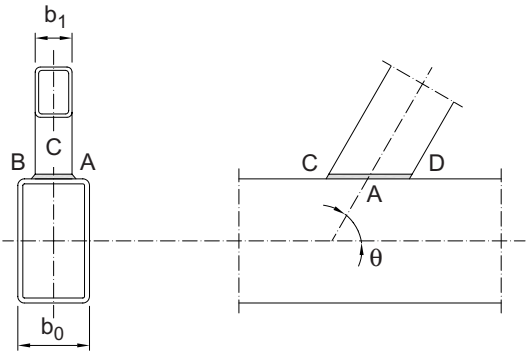


Kun $d_1 = d_0$
b = max. 2 mm

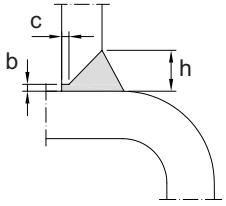
Kuva 8.15 Päittäishitsit pyöreiden rakenneputkien ristikkoliitoksissa. Railomuodot ja sovitteet [1]



Kuva 8.16 Pienahitsit pyöreiden rakenneputkien ristikkoliitoksissa. Railomuodot ja sovitteet [1]

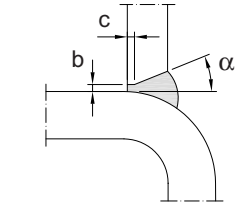


Det. A ja B:



Kun $b_1 < b_0$

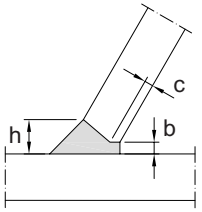
b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm



Kun $b_1 = b_0$

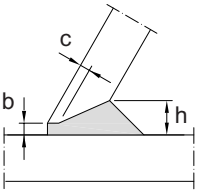
b = max. 2 mm
c = 1 mm ... 2 mm
α = 20º...25º

Det. C:



b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm

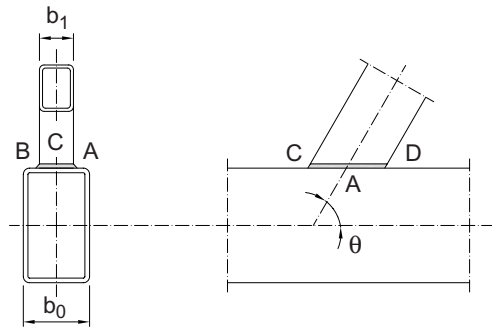
Det. D:



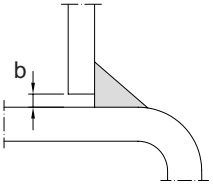
b = 2 mm ... 4 mm
c = 1 mm ... 2 mm

Kun θ < 60º, kohdassa D käytetään kuvan 8.18 mukaista pienahitsiä terävän liitoskulman θ alueella.

Kuva 8.17 Päittäishitsit neliö- ja suorakaiderakenneputkien ristikkoliitoksissa. Railomuodot ja sovitteet [1]



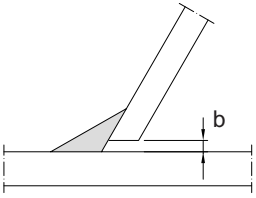
Det. A ja B:



Kun $b_1 < b_0$

b = max. 2 mm

Det. C:

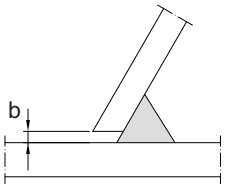


$60° \leq \theta < 90°$

b = max. 2 mm

Kun $\theta < 60°$, kohdassa C käytetään kuvan 8.17 mukaista päittäishitsiä tylpän liitoskulman θ alueella.

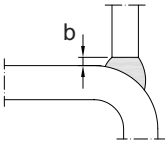
Det. D:



$30° \leq \theta < 90°$

b = max. 2 mm

Pienemmille kulmille ei vaadita läpihitsautumista edellyttäen, että a-mitta on riittävä.



Kun $b_1 = b_0$

b = max. 2 mm

Kuva 8.18 Pienahitsit neliö- ja suorakaiderakenneputkien ristikkoliitoksissa. Railomuodot ja sovitteet [1]

8.5.5 Esilämmitys

Rakenneputkissa käytetyt rakenneteräkset eivät yleensä tarvitse esilämmitystä eivätkä korotettua työlämpötilaa. Jos kuitenkin putken pinta on kostea tai hitsattavan teräksen lämpötila on alle 5 ºC, saatetaan tarvita sopivaa esilämmitystä. Lujuusluokan ollessa yli S355, tulee käyttää sopivaa esilämmitystä teräksen lämpötilan ollessa alle 5 ºC [1].

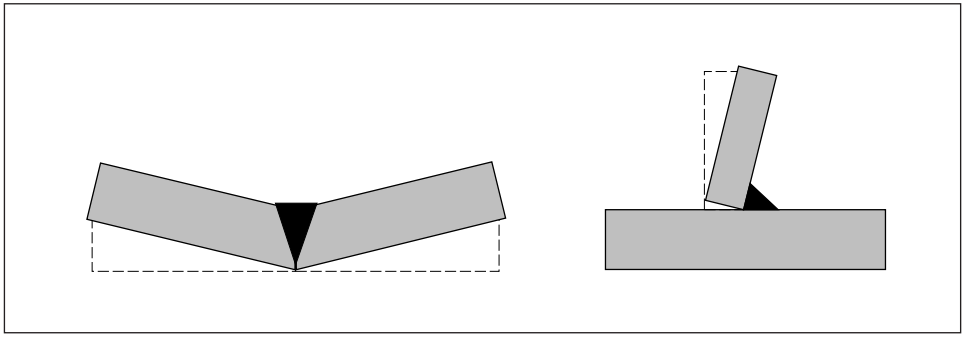
Polttoleikkauksessa esilämmitystä ei yleensä tarvita, jos teräksen hiiliekvivalentti on pienempi kuin 0,45 [7].

8.5.6 Jäännösjännitykset

Hitsauksessa teräkseen syntyy aina lämpötilan aiheuttamia jäännösjännityksiä. Rakenteeseen saattaa siten syntyä pysyviä muodonmuutoksia.

Muodonmuutoksia syntyy hitsin suuntaan ja hitsiä vastaan kohtisuoraan suuntaan. Muodonmuutoksen suuruus riippuu hitsattavasta materiaalista, hitsauspalkojen lukumäärästä ja rakenteen jäykkyydestä. Muodonmuutoksen lisäksi tapahtuu myös kulmanmuutosta, jossa hitsattujen kappaleiden välinen kulma muuttuu hitsausjännitysten vaikutuksesta.

Kuvassa 8.19 on esitetty hitsauksen aiheuttamat kulmanmuutokset, kun ne pääsevät tapahtumaan vapaasti.



Kuva 8.19 Hitsauksen aiheuttamat kulmanmuutokset

Käytännössä kappaleet tuetaan hitsauksen aikana usein niin, että muodonmuutokset eivät pääse tapahtumaan vapaasti, jolloin materiaaliin syntyy jännityksiä. Muodonmuutos vähenee huomattavasti, jos pienahitsi tehdään kaksipuoleisena tai V-railon sijasta käytetään X-railoa. Hitsaus suoritetaan tällöin vuorotellen kummaltakin puolelta. Yksipuoleinen V-hitsi voidaan tehdä myös siten, että hitsattavat kappaleet asetetaan sellaiseen kulmaan, joka eliminoi hitsauksen aiheuttaman muodonmuutoksen. Kulman suuruus arvioidaan kokemusperäisesti.

Kokonaisen rakenneosan hitsaaminen (esim. ristikko) kannattaa tehdä siten, että ensin silloitetaan liitokset ja sen jälkeen hitsataan pienahitsit ja lopuksi läpihitsatut V-hitsit [3].

Jännityksen poisto lämpökäsittelyllä on yleensä tarpeen vain erikoistapauksissa. Jännityksenpoistolämpötila on normaalisti 550 - 600 °C. Sopiva pitoaika tällä lämpötila-alueella on 2 x t [minuuttia] (t = suurin ainepaksuus [mm]), kuitenkin vähintään 30 minuuttia [7].

Esimerkiksi seuraavat tekijät lisäävät hitsauksen aiheuttamia jäännösjännityksiä:

- hitsin suuri a-mitta
- hitsin suuri etäisyys rakenneputken neutraaliakselista
- hitsattavien rakenneputkien tukeminen hitsauksen aikana
- hitsattavien rakenneputkien suuri jäykkyys
- väärä hitsausjärjestys
- hitsausmenetelmät, joissa lämmöntuonti on suuri.

8.5.7 Hitsien tarkastukset

Ennen hitsausta ja hitsauksen aikana tehtävät tarkastukset tulee esittää tarkastussuunnitelmassa standardin EN ISO 3834 vaatimuksia noudattaen.

Standardissa EN 1090-2 on määritelty yleensä noudatettava vähimmäisjäähtymisaika, joka riippuu hitsin koosta, lämmöntuonnista ja teräslajista.

Taulukko 8.12 Hitsien vähimmäisjäähtymisajat ennen NDT-tarkastusta [1]

Hitsin koko (mm) [a]	Lämmöntuonti Q (kJ/mm) [b]	Jäähdytysajat (tunti) [c]	
		S235 - S460	yli S460
a tai s ≤ 6	Ei määritelty	Vain jäähtymisaika [d]	24
6 < a tai s ≤ 12	≤3	8	24
	>3	16	40
a tai s > 12	≤3	16	40
	>3	24	48

a) Hitsin kokona käytetään nimellistä a-mittaa tai täysin läpihitsatuille hitseille materiaalin nimellispaksuutta s. Yhdeltä puolelta osittain läpihitsatulle hitsille hitsin nimellispaksuutta a, molemmin puolin osittain läpihitsatuille päittäishitseille osahitsien a-mittojen summaa.
b) Lämmöntuonti lasketaan standardin EN 1011-1:1998 kohdan 19 mukaisesti.
c) Hitsin valmistumisen ja NDT-tarkastuksen aloittamisen välinen aika esitetään NDT-pöytäkirjassa.
d) Tapauksella “Vain jäähtymisaika” tarkoitetaan aikaa, joka kuluu, kunnes hitsi on riittävästi jäähtynyt NDT-tarkastuksen aloittamiseen.

8.5.7.1 Ainetta rikkomattomat menetelmät

Hitsausliitokset tarkastetaan konepajassa normaalisti ainetta rikkomattomilla, eli NDT-menetelmillä (Non-destructive testing). Näitä menetelmiä ovat [1]:

- silmämääräinen tarkastus (VT, visual testing)
- magneettijauhetarkastus (MT, magnetic particle inspection)
- tunkeumanestetarkastus (PT, penetrant testing)
- ultraäänitarkastus (UT, ultrasonic testing) ja
- radiografinen tarkastus (RT, radiographic testing).

Yleisimmät konepajoissa käytössä olevat tarkastusmenetelmät ovat silmämääräinen tarkastus, magneettijauhetarkastus ja ultraäänitarkastus.

Silmämääräinen tarkastus (EN ISO 17637)

Standardi EN ISO 17637 on korvannut standardin EN 970.

Kaikki hitsit tarkastetaan heti hitsauksen jälkeen koko pituudeltaan silmämääräisesti. Tarkastukseen osallistuvat sekä hitsaajat että työnjohtajat ja tarkastajat. Tarkastaminen ei vaadi toistaiseksi muodollista pätevyyttä, mutta tarkastajalta vaaditaan kokemusta ja tietämystä hitsauksen tarkastamisesta ja hitsaustyöstä. Tarkastajan vaatimukset on esitetty EN ISO 17637 standardissa. Apuvälineinä voidaan käyttää taskulamppua ja peiliä. Silmämääräiseen tarkastukseen kuuluu hitsien sijainnin, koon ja muodon tarkastus, pienahitsin a-mitan tarkastus, pintojen tarkastus sekä pintavirheiden (esim. reunahaava), sytytysjälkien ja roiskeiden havaitseminen [8].

Magneettijauhetarkastus (EN ISO 17638, EN ISO 23278)

Standardi EN ISO 17638 on korvannut standardin EN 1290, ja standardi EN ISO 23278 on korvannut standardin EN 1291.

Magneettijauhetarkastuksessa havaitaan hitsin pinnassa ja lähellä pintaa olevat virheet, kuten huokoset, halkeamat, säröt ja liitosvirheet. Tarkastajalta vaaditaan pätevyys menetelmän käyttöön (EN 473, taso 2).

Hitsin pinnan puhdistuksen jälkeen saumaan ruiskutetaan kontrastiväriä. Sauma magnetoidaan ja samalla levitetään magneettijauhe. Ylimääräinen magneettijauhe puhalletaan pois. Jauhe kerääntyy vikapaikkojen ympärille, jolloin pintaviat havaitaan kontrastiväriä vasten [8].

Tunkeumanestetarkastus (EN 571, EN ISO 23277)

Standardi EN ISO 23277 on korvannut standardin EN 1289.

Edellä mainittujen menetelmien lisäksi myös tunkeumanestetarkastus on tarkoitettu pintavikojen havaitsemiseen. Menetelmää käytetään pääasiassa ei-magneettisten materiaalien tarkastukseen (alumiini, ruostumaton teräs). Tarkastajalta vaaditaan pätevyys menetelmän käyttöön (EN 473, taso 2).

Hitsin pinta puhdistetaan puhdistusnesteellä ja tunkeumaväri ruiskutetaan hitsin pinnalle. Ylimääräinen tunkeumaväri pyyhitään pois ja hitsin pintaan ruiskutetaan kehitettä. Kehite reagoi tunkeumavärin kanssa ja väri nousee kehitteen pintaan. Pintavirheet värjäytyvät, koska tunkeumaväri kerääntyy epäjatkuvuuskohtiin [8].

Ultraäänitarkastus (EN ISO 11666, EN ISO 17640, EN ISO 23279)

Standardi EN ISO 11666 on korvannut standardin EN 1712, standardi EN ISO 23279 on korvannut standardin EN 1713, ja standardi EN ISO 17640 on korvannut standardin EN 1714.

Ultraäänitarkastus soveltuu hitsin ja materiaalin sisäisten virheiden havaitsemiseen. Sisäisiä virheitä ovat mm. juurivirheet, halkeamat, huokoset ja säröt. Menetelmä soveltuu parhaiten läpihitsattujen saumojen tarkastukseen. Tarkastajalta vaaditaan pätevyys menetelmän käyttöön (EN 473, taso 2).

Mittalaite kalibroidaan ja säädetään kyseiselle materiaalipaksuudelle. Tarkastettavalle pinnalle levitetään kytkentäaine, jotta saavutetaan hyvä kontakti. Laite lähettää materiaaliin ääniaallon, joka heijastuu virhekohdasta tai materiaalin pinnasta takaisin. Jos ääni heijastuu vasta pinnasta, kyseisessä kohdassa ei ole virheitä. Tarkastuskohtaa on syytä luodata useassa kulmassa, koska ääniaaltojen suuntaisia virheitä on vaikea havaita.

Utraäänitarkastus ei sovellu ohuille materiaalipaksuuksille. Standardissa EN ISO 17640 on ilmoitettu pätevyysalueen alarajaksi 8 mm. Ultraäänitarkastus on erittäin vaativaa ja käytännön toiminnan kannalta on suositeltavaa käyttää kokeneita tarkastajia.

Radiografinen tarkastus (EN 1435, EN 12517)

Sisäiset virheet ja pintavirheet voidaan havaita myös radiografisessa tarkastuksessa. Menetelmä soveltuu etupäässä päittäisliitosten tarkastukseen. Materiaalin paksuus voi olla alle 1 mm paksuisesta n. 30 mm ainevahvuuteen asti. Paksummilla materiaaleilla valotusaika pitenee huomattavasti [8]. Tarkastajalta vaaditaan pätevyys menetelmän käyttöön (EN 473, taso 2).

Filmi asetetaan tarkastettavan kappaleen toiselle puolelle. Vastakkaiselta puolelta suunnataan röntgensäteilyä kohteen läpi ja kuva projisoituu filmille. Filmi kehitetään, jonka jälkeen voidaan tarkastella mahdollisia virheitä. Tutkimuksen aikana kohteen läheisyydessä ei voi työskennellä säteilyvaaran takia ja tämä voi keskeyttää tuotannon tarkastuksen ajaksi.

8.5.7.2 NDT-menetelmien tarkastuslaajuus

Hitsien tarkastuslaajuudet ja vaatimukset on esitetty standardissa EN 1090-2. Toteutusluokassa EXC1 vaaditaan ainoastaan silmämääräinen tarkastus, jollei muuta esitetä. Taulukossa 8.13 on esitetty standardin EN 1090-2 määrittelemät tarkastuslaajuudet muulle kuin silmämääräiselle NDT-tarkastukselle.

Taulukko 8.13 Muun kuin silmämääräisen NDT:n tarkastuslaajuus [1]

Hitsin tyyppi	Konepaja- ja asennushitsit		
	EXC2	EXC3	EXC4
Poikittaiset päittäishitsit ja osittain läpihitsatut päittäishitsit, joihin kohdistuu vetojännitys:			
Hyväksikäyttöaste staattisluontoisille kuormille: $U \geq 50$ %	10 %	20 %	100 %
Hyväksikäyttöaste staattisluontoisille kuormille: $U < 50$ %	0 %	10 %	50 %
Poikittaiset päittäishitsit ja osittain läpihitsatut hitsit:			
Ristiliitoksissa	10 %	20 %	100 %
T-liitoksissa	5 %	10 %	50 %
Poikittaiset pienahitsit, joihin kohdistuu vetoa tai leikkausta			
$a > 12$ mm tai $t > 20$ mm	5 %	10 %	20 %
$a \leq 12$ mm ja $t \leq 20$ mm	0 %	5 %	10 %
Nosturipalkkien uuman ja ylälaipan väliset täysin läpihitsatut pitkittäiset hitsit	10 %	20 %	100 %
Muut pitkittäiset hitsit ja jäykisteiden hitsit	0 %	5 %	10 %
Kokoonpanon akselin suuntaiset hitsit katsotaan pitkittäisiksi. Kaikki muut katsotaan poikittaishitseiksi.			
Hyväksikäyttöasteella tarkoitetaan hyväksikäyttöastetta kvasistaattisluontoisille kuormille. Hyväksikäyttöaste on $U = E_d/R_d$, missä E_d on hitsin suurin kuormavaikutus ja R_d on hitsin kestävyys murtorajatilassa.			
Suureet a ja t viittaavat pienahitsin a-mittaan ja liitettävien materiaalien enimmäispaksuuteen.			

Silmämääräinen tarkastus tulee suorittaa standardin EN 1090-2 mukaan koko hitsauspituudelta. Havaittaessa pintavirheitä, tarkastetulle hitsille tulee suorittaa tunkeumaneste tai magneettijauhetarkastus [1].

Hitsattaessa uutta hitsausohjetta (WPS) käyttäen, viiden ensimmäisen hitsin on täytettävä seuraavat vaatimukset:

- hitsiluokka B vaaditaan osoittamaan, että hitsausohje (WPS) toimii tuotanto-olosuhteissa
- tarkastuslaajuus on kaksinkertainen taulukon 8.13 arvoihin verrattuna (vähintään 5 %, enintään 100 %)
- vähimmäistarkastuspituus on 900 mm.

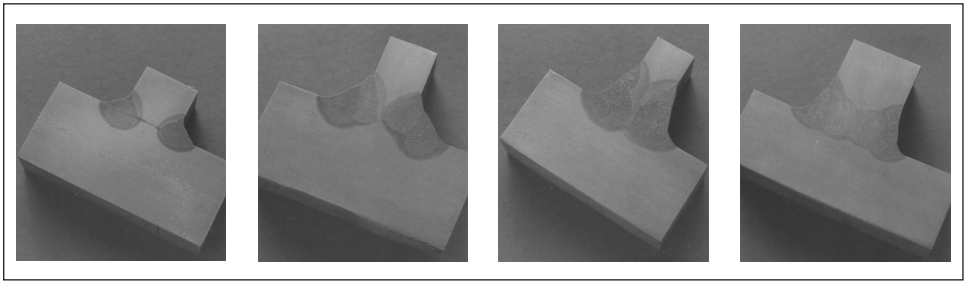
Jos tarkastus antaa hylättyjä tuloksia, tulee syyt selvittää ja tarkastaa uusi viiden liitoksen sarja [1].

8.5.7.3 Ainetta rikkovat menetelmät

Ainetta rikkovia menetelmiä käytetään lähinnä hitsaus- ja menetelmäkokeissa eivätkä ne kuulu varsinaisesti jokapäiväiseen tarkastustoimintaan konepajassa.

Näytekappaleet

Hitsatusta kappaleesta leikataan pala kohtisuoraan hitsauspintaa vastaan. Hiomisen ja kiillotuksen jälkeen leikkauspinta hapotetaan. Perusaine ja hitsialue pystytään erottamaan hapotuksen jälkeen selvästi. Menetelmä soveltuu hyvin tunkeuman määrittelyyn menetelmäkokeiden yhteydessä [8].



Kuva 8.20 Hitsisauman näytekappaleita

Murtokokeet

Murtokokeita käytetään esim. hitsaajien pätevyyskokeiden yhteydessä. Hitsauksen jälkeen kappale murretaan hitsialueelta. Murtokohdasta ja -pinnasta voidaan tutkia hitsiaineen lujuutta suhteessa perusaineeseen tai hitsin liittymistä perusaineeseen [8].

8.6 Toleranssit

8.6.1 Valmistustoleranssit

Standardi EN 1090-2 määrittelee valmistettaville rakenteille ja rakenneosille kahdet erityyppiset geometriset toleranssit:

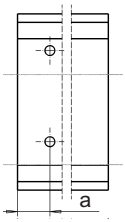
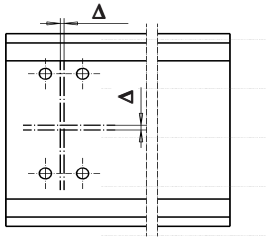
- olennaiset geometriset toleranssit (taulukot 8.14 - 8.16) ja
- toiminnalliset geometriset toleranssit (taulukot 8.17 - 8.20).

Olennaiset geometriset toleranssit varmistavat rakenteen lujuujen ja stabiiliuden, mutta eivät varmista toiminnallisuutta. **Toiminnalliset geometriset toleranssit**, jotka on yleensä jaoteltu kahteen toleranssiluokkaan, varmistavat rakenteen käytettävyyden. Käytännössä jaottelu ei ole näin selkeä. Rakenteen on toteutettava samanaikaisesti olennaiset toleranssit ja toiminnallisista toleransseista toleranssiluokka 1 tai 2 toteutuseritelmän mukaan. Taulukoissa 8.14 - 8.20 on esitetty keskeisimmät rakenneputkista valmistettavia rakenteita koskevat valmistustoleranssit. Täydelliset toleranssitaulukot, ks. EN 1090-2.

Standardi EN 1090-2 antaa lisäksi hitsatuille rakenteille mahdollisuuden käyttää toiminnallisten toleranssien sijasta standardissa EN 1090-2 määriteltyjä EN ISO 13920 mukaisia luokkia.

Taulukoista poikkeavat toleranssivaatimukset on esitettävä toteutuseritelmässä ja konepaja-piirustuksissa. Samalla on esitettävä myös alue, johon poikkeavaa vaatimusta sovelletaan.

Taulukko 8.14 Olennaiset valmistustoleranssit – Kiinnitysreijät ja lovet [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Yksittäisen reijän keskilinjan poikkeama:	Yksittäisten reikien keskilinjojen poikkeama Δ tarkoitetusta sijainnista reikäryhmän sisällä	Δ = ± 2 mm
Kiinnitysreikien paikka: 	Poikkeama Δ yksittäisen reijän etäisyydessä a profiilin päästä	- Δ = 0 mm (positiivista arvoa ei ole annettu)
Reikäryhmän sijainti: 	Reikäryhmän poikkeama Δ tarkoitetusta sijainnista	Δ = ± 2 mm

Taulukko 8.15 Olennaiset valmistustoleranssit – Sylinterinmuotoiset ja kartiomaiset kuoret [1]

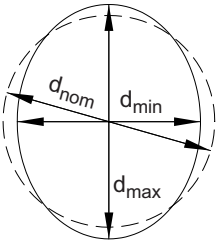
Valmistustoleranssin laatuluokka	Sallittu pyöreyspoikkeama Δ [a)]		
	Sisähalkaisija		
	$d_i \leq 0{,}50$ m [b)]	$0{,}5\text{ m} < d_i < 1{,}25$ m [b)]	$d_i \geq 1{,}25$ m [b)]
Luokka A	$\Delta = \pm 0{,}014$	$\Delta = \pm [0{,}007 + 0{,}0093(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm 0{,}007$
Luokka B	$\Delta = \pm 0{,}020$	$\Delta = \pm [0{,}010 + 0{,}0133(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm 0{,}010$
Luokka C	$\Delta = \pm 0{,}030$	$\Delta = \pm [0{,}015 + 0{,}0200(1{,}25 - d_i)]$	$\Delta = \pm 0{,}015$

a) Pyöreyspoikkeama:
Sisähalkaisijan mitattujen maksimi- ja minimiarvojen erotus suhteessa sisähalkaisijan nimellisarvoon:

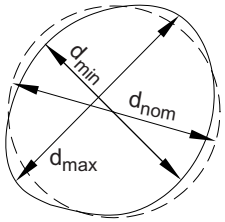
$$\Delta = \frac{d_{max} - d_{min}}{d_{nom}}$$

b) d_i on sisähalkaisijan nimellisarvo metreissä

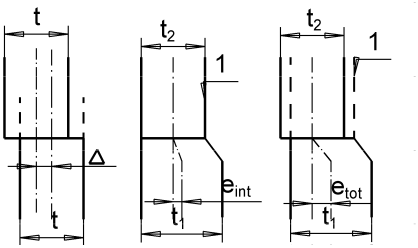
litistyminen:



epäsymmetrisyys:

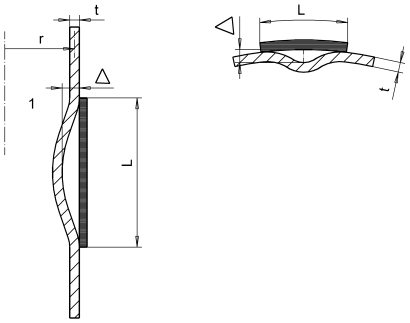


Valmistustoleranssin laatuluokka	Sallittu sovitusvirhe Δ
	Sallittu poikkeama
Luokka A	$\Delta = \pm 0{,}14$ t kuitenkin enintään $\lvert\Delta\rvert \leq 2$ mm
Luokka B	$\Delta = \pm 0{,}20$ t kuitenkin enintään $\lvert\Delta\rvert \leq 3$ mm
Luokka C	$\Delta = \pm 0{,}30$ t kuitenkin enintään $\lvert\Delta\rvert \leq 4$ mm

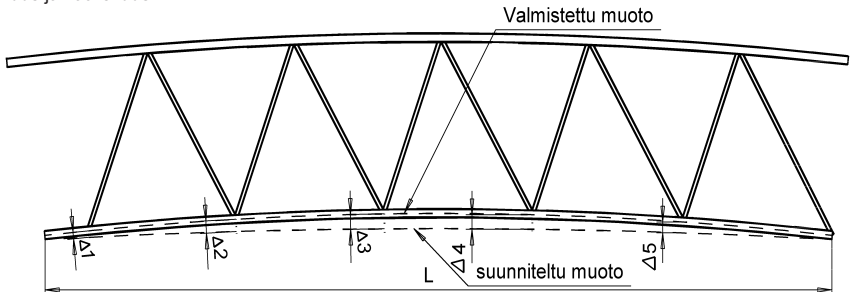
Sovitusvirhe: Levyjen tahaton epäkeskeisyys vaakaliitoksessa. Levynpaksuuden muuttuessa tarkoitettua epäkeskeisyyden osaa ei sisällytetä epäkeskeisyyteen.	Levynpaksuuden vaihtuessa: $t = (t_1 + t_2)/2$ $\Delta = e_{tot} - e_{int}$ missä: t_1 on suurempi paksuus t_2 on pienempi paksuus	 Selite: 1 = tarkoitettu liitosgeometria

(jatkuu)

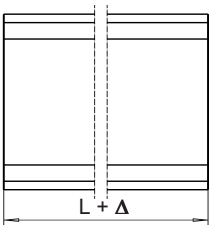
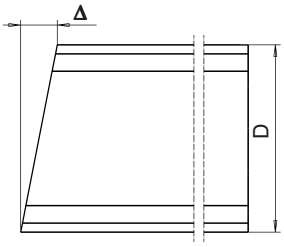
Taulukko 8.15 Olennaiset valmistustoleranssit – Sylinterinmuotoiset ja kartiomaiset kuoret [1] *(jatkuu)*

	Sallitut painumat (lommot) **Δ**
Valmistustoleranssin laatuluokka	Sallittu poikkeama
Luokka A	**Δ** = ± 0,006 L
Luokka B	**Δ** = ± 0,010 L
Luokka C	**Δ** = ± 0,016 L
Painumat (lommot) : a) Kylkiviivaa pitkin: $L = 4\,(rt)^{0,5}$ b) Kehäympyrää pitkin (sädemitta = r) : $L = 4\,(rt)^{0,5}$ $L = 2{,}3\,(h^2rt)^{0,25}$ mutta $L \leq r$ missä h on kuorisegmentin aksiaalinen pituus c) Lisäksi hitsauskohdan yli: $L = 25t$ mutta $L \leq 500$ mm Paksuuden vaihtuessa $t = t_2$	 Selite: 1 = sisäänpäin
HUOM: standardin EN 1993-1-6 valmistustoleranssin laatuluokkiin viitaten, Luokka A = Erinomainen, Luokka B = Korkea ja Luokka C = Normaali.	

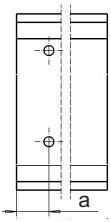
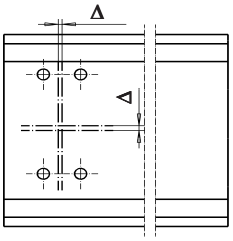
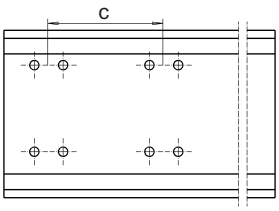
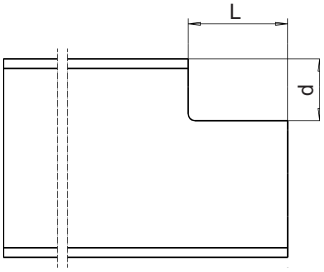
Taulukko 8.16 Olennaiset valmistustoleranssit – Ristikkorakenteet [1]

Poikkeaman tyyppi	**Mittauskohde**	**Sallittu poikkeama Δ**
Suoruus ja kaarevuus: 		
Solmupisteiden sijainti:	Jokaisen solmupisteen poikkeama **Δ** tarkoitetusta linjasta	**Δ** = ± L/500 mutta |**Δ**| ≥ 12 mm
Uumasauvojen suoruus:	Suoruuspoikkeama jokaisen uumasauvan pituudella L_i	**Δ** = ± L_i/750 mutta |**Δ**| ≥ 6 mm
Huom: Merkintä esim. **Δ** = ± L/500 mutta |**Δ**| ≥ 12 mm tarkoittaa, että |**Δ**| on suurempi arvoista L/500 tai 12 mm.		

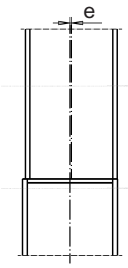
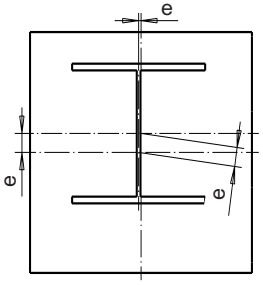
Taulukko 8.17 Toiminnalliset valmistustoleranssit – Kokoonpanot [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Pituus:  	Poikkeama Δ keskilinjalta mitattuna; L-teräksillä nurkasta mitattuna. Hitsatut päätylevyt mukana mitassa	Δ = ± (L/5000 + 2) mm Kosketuspaineelle tarkoitetut päät: Δ = ± 1 mm	Δ = ± (L/10000 + 2) mm Kosketuspaineelle tarkoitetut päät: Δ = ± 1 mm
Pituus, kun riittävä tasaus voidaan tehdä vierekkäisessä kokoonpanossa:	Pituus keskilinjalta mitattuna	Δ = ± 50 mm	Δ = ± 50 mm
Suoruus:	Ks. tuotestandardi EN 10219 rakenneputkille.		
Päiden suorakulmaisuus:  	Poikkeama Δ pituusakselin suhteen: - kosketuspaineelle tarkoitetut päät - päät joita ei ole tarkoitettu kosketuspaineelle	 Δ = ± D/1000 Δ = ± D/100	 Δ = ± D/1000 Δ = ± D/300 mutta |Δ| ≤ 10 mm
Kiertymä:	Ks. tuotestandardi EN 10219 rakenneputkille.		
Huom: Merkintä esim. Δ = ± d/100 mutta |Δ| ≥ 5 mm tarkoittaa, että |Δ| on suurempi arvoista d/100 tai 5 mm.			

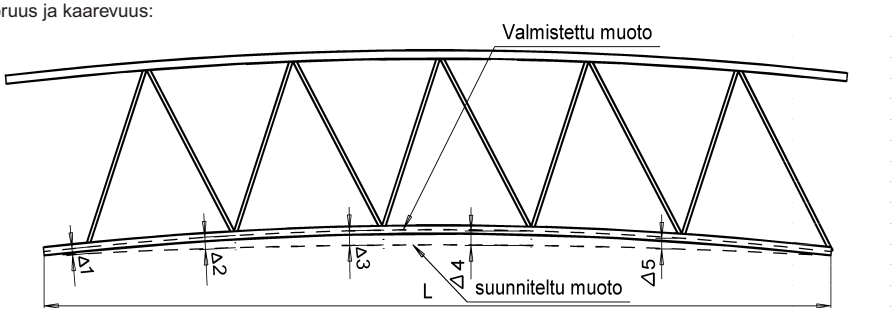
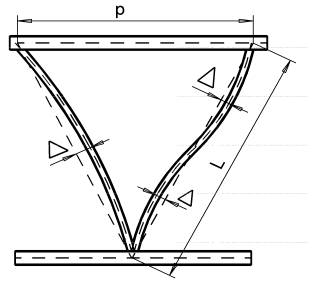
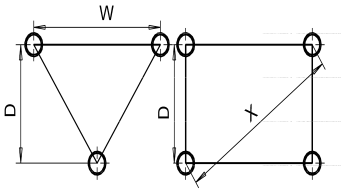
Taulukko 8.18 Toiminnalliset valmistustoleranssit – Kiinnitysreijät ja lovet [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Yksittäisen reijän keskilinjan poikkeama:	Yksittäisten reikien keskilinjojen poikkeama **Δ** tarkoitetusta sijainnista reikäryhmän sisällä	**Δ** = ± 2 mm	**Δ** = ± 1 mm
Kiinnitysreikien paikka: 	Poikkeama **Δ** yksittäisen reijän etäisyydessä a profiilin päästä	- **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 3 mm	- **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 2 mm
Reikäryhmän sijainti: 	Reikäryhmän poikkeama **Δ** tarkoitetusta sijainnista	**Δ** = ± 2 mm	**Δ** = ± 1 mm
Reikäryhmien välimatka: 	Poikkeama **Δ** reikäryhmien välille c: - yleinen tapaus - yksi osa on kiinnitetty kahdella reikäryhmällä	**Δ** = ± 5 mm **Δ** = ± 2 mm	**Δ** = ± 2 mm **Δ** = ± 1 mm
Lovet: 	Poikkeama **Δ** lovien pituudelle ja syvyydelle: - syvyys d - pituus L	- **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 3 mm - **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 3 mm	- **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 2 mm - **Δ** = 0 mm + **Δ** ≤ 2 mm

Taulukko 8.19 Toiminnalliset valmistustoleranssit – Pilarin jatkokset ja pohjalevyt [1]

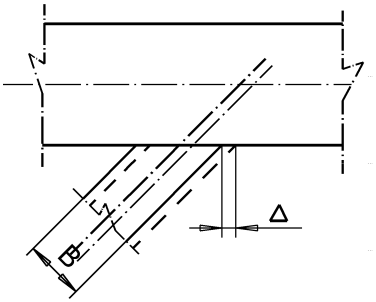
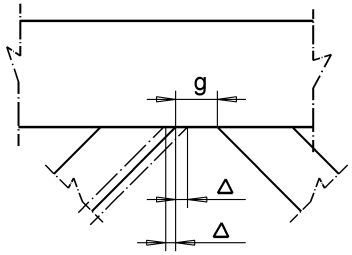
Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Pilarin jatkos: 	Suunnitttelematon epäkeskeisyys e (molempien akselien suhteen)	5 mm	3 mm
Perustuslevy: 	Perustuslevyn ja pilarin keskilinjan suunnittelematon epäkeskeisyys e (kaikkiin suuntiin)	5 mm	3 mm

Taulukko 8.20 Toiminnalliset valmistustoleranssit – Ristikkokokoonpanot [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Suoruus ja kaarevuus:  			
Solmupisteiden sijainti:	Jokaisen solmupisteen poikkeama Δ tarkoitetusta linjasta	Δ = ± L/500 mutta |Δ| ≥ 12 mm	Δ = ± L/500 mutta |Δ| ≥ 6 mm
Osien mitat:  	Keskilinjojen leikkauspisteiden yksittäisten etäisyyksien p poikkeama solmupisteissä Solmupisteen paikan kumulatiivinen poikkeama Σp	Δ = ± 5 mm Δ = ± 10 mm	Δ = ± 3 mm Δ = ± 6 mm
Uumasauvojen suoruus:	Suoruuspoikkeama jokaisen uumasauvan pituudella L_i	Δ = ± L_i/500 mutta |Δ| ≥ 6 mm	Δ = ± L_i/1000 mutta |Δ| ≥ 3 mm
Poikkileikkausmitat:  	Mittojen D, W ja X poikkeama, kun: s ≤ 300 mm 300 < s < 1000 mm s ≥ 1000 mm	 Δ = ± 3 mm Δ = ± 5 mm Δ = ± 10 mm	 Δ = ± 2 mm Δ = ± 4 mm Δ = ± 6 mm

(jatkuu)

Taulukko 8.20 Toiminnalliset valmistustoleranssit – Ristikkokokoonpanot [1] *(jatkuu)*

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Risteävät liitokset: 	Epäkeskeisyys (suhteessa suunniteltuun epäkeskeisyyteen)	$\Delta = \pm (B/20 + 5)$ mm	$\Delta = \pm (B/40 + 3)$ mm
Vapaaväliset liitokset: 	Uumasauvojen vapaaväli g: $g \geq (t_1 + t_2)$ missä: t_1 ja t_2 ovat uumasauvojen seinämänpaksuudet	$\lvert\Delta\rvert \leq 5$ mm	$\lvert\Delta\rvert \leq 3$ mm
Huom: Merkintä esim. $\Delta = \pm L/500$ mutta $\lvert\Delta\rvert \geq 6$ mm tarkoittaa, että $\lvert\Delta\rvert$ on suurempi arvoista $L/500$ tai 6 mm.			

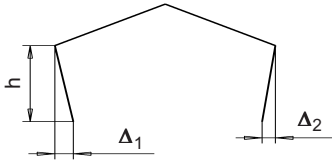
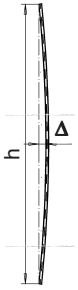
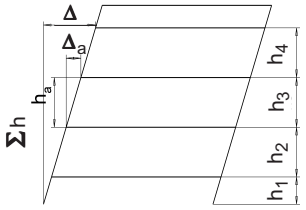
8.6.2 Asennustoleranssit

Kuten valmistustoleranssit, myös asennuksen osalta rakenteiden toleranssit on standardissa EN 1090-2 jaoteltu **olennaisiin** ja **toiminnallisiin** geometrisiin toleransseihin:

- olennaiset geometriset toleranssit (taulukot 8.21 - 8.22) ja
- toiminnalliset geometriset toleranssit (taulukot 8.23 - 8.26).

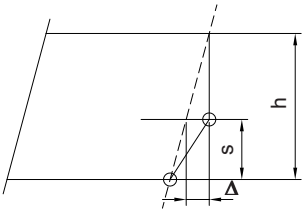
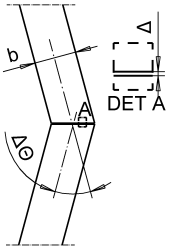
Taulukoissa 8.21 - 8.26 on esitetty keskeisimmät rakenneputkista valmistettavia rakenteita koskevat asennustoleranssit. Täydelliset toleranssitaulukot, ks. EN 1090-2.

Taulukko 8.21 Olennaiset asennustoleranssit – Yksikerroksiset ja monikerroksiset pilarit ja rakennukset [1].

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Pilareiden vinous yksikerroksissa portaalikehissä:  	Vinous, yleinen tapaus Saman kehän pilareiden keskimääräinen vinous Δ [kahdelle pilarille $\Delta = (\Delta_1 + \Delta_2)/2$]	$\Delta = \pm h/300$ $\Delta = \pm h/500$
Yksikerroksisen pilarin suoruus:  	Pilarin sijainti pohjan ja huipun sijaintipisteitä yhdistävän suoran linjan suhteen: - yleensä - rakenneputkille	 $\Delta = \pm h/750$ $\Delta = \pm h/750$
Pilareiden vinous, monikerrosrakennukset:  	Pilarin vinous Δ pohjatasolla olevan keskiönsä kautta kulkevan pystysuoran linjan suhteen Pilarin vinous Δ_a seuraavan alemman kerroksen tasossa olevan keskiönsä kautta kulkevan pystysuoran linjan suhteen Pilarin suoruuspoikkeama tasojen välillä	$\lvert\Delta\rvert = \Sigma h/(300\cdot\sqrt{n})$ $\Delta_a = \pm h/500$ $\Delta = \pm h/750$

(jatkuu)

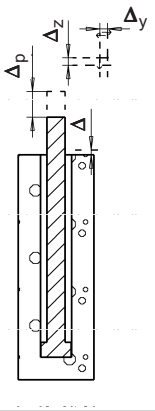
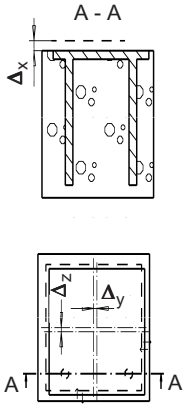
Taulukko 8.21 Olennaiset asennustoleranssit – Yksikerroksiset ja monikerroksiset pilarit ja rakennukset [1].
(jatkuu)

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Jatketun pilarin suoruus peräkkäisten kerrostasojen välillä: 	Pilarin sijainti jatkoskohdassa peräkkäisissä kerrostasoissa olevien sijaintipisteiden kautta kulkevan suoran linjan suhteen	**Δ** = ±s/750 missä s ≤h/2
Tukipinnat kosketuspainetta hyväksikäytettäessä: 	Paikallinen kulmapoikkeama **Δθ** kun kohdassa “X” on samanaikaisesti rako **Δ**	**Δθ** = ±1/500 rad sekä samalla: • **Δ** = 0,5 mm vähintään kahdella kolmasosalla kosketuspinnasta • **Δ** = 1,0 mm, suurin arvo paikallisesti

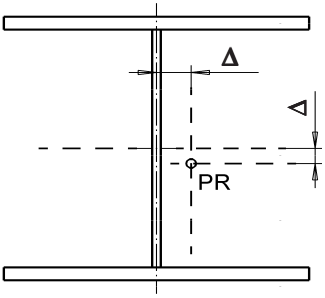
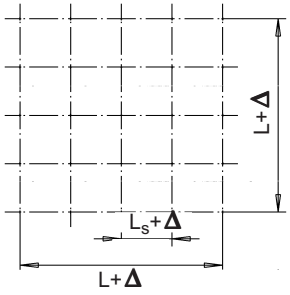
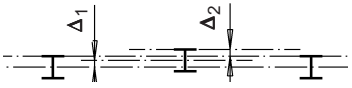
Taulukko 8.22 Olennaiset asennustoleranssit – Taivutetut palkit ja puristetut kokoonpanot [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Taivutettujen palkkien ja puristettujen kokoonpanojen suoruus, kun niitä ei ole tuettu	Suoruuspoikkeama **Δ**	**Δ** = L/750

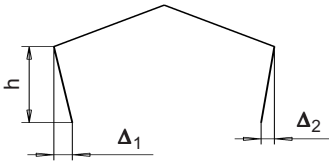
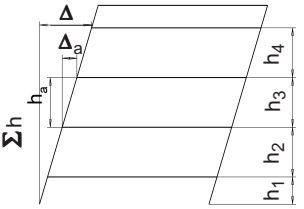
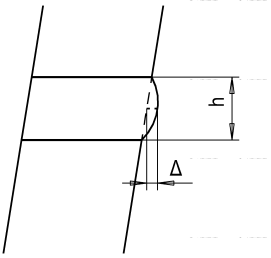
Taulukko 8.23 Toiminnalliset asennustoleranssit – Betoniperustukset ja tuet [1]

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ
Perustustaso ja perustusruuvi: 	Perustustason poikkeama **Δ** suunnitellusta tasosta Pystysuoran seinän sijainti vaakatason suuntaisesti teräsrakenteen tuen kohdalla Säädettävä perustusruuvi: - kärjen sijainti - pystysuora ulkonema Δ_p Esiasennettu perustusruuvi, jota ei säädetä: - kärjen sijainti - pystysuora ulkonema Δ_p - vaakasuora ulkonema Δ_x	$-15\text{ mm} \le \Delta \le +5\text{ mm}$ $\Delta = \pm 25$ mm Δ_y , $\Delta_z = \pm 10$ mm $-5\text{ mm} \le \Delta_p \le +25\text{ mm}$ Δ_y, $\Delta_z = \pm 3$ mm $-5\text{ mm} \le \Delta_p \le +45\text{ mm}$ $-5\text{ mm} \le \Delta_x \le +45\text{ mm}$
Betoniin valettu ankkurilevy (teräksestä): 	Poikkeama Δ_x, Δ_z, Δ_y suunnitellusta sijainnista	Δ_x , Δ_z , $\Delta_y = \pm 10$ mm

Taulukko 8.24 Toiminnalliset asennustoleranssit – Pilareiden sijainti [1]

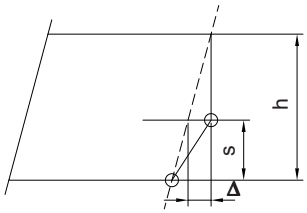
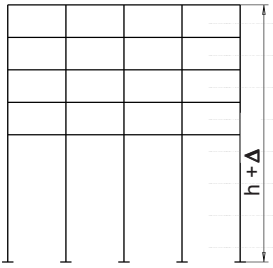
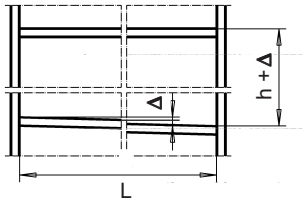
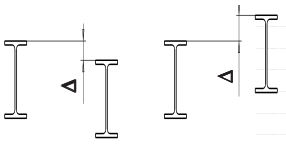
Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Sijainti: 	Pilarin keskiön sijainti perustuslevynsä tasossa olevan sijaintipisteen (PR) suhteen	$\Delta = \pm 10$ mm	$\Delta = \pm 5$ mm
Rakennuksen kokonaispituus ja pilareiden välimatka: 	Päätypilareiden välimatka jokaisella linjalla perustustasolla: L ≤ 30 m 30 m < L < 250 m L ≥ 250 m Yksittäinen pilariväli: $L_s \leq 5$ m $L_s > 5$ m	 $\Delta = \pm 20$ mm $\Delta = \pm 0{,}25 \cdot (L + 50)$ mm $\Delta = \pm 0{,}1 \cdot (L + 500)$ mm (L metreinä) $\Delta = \pm 10$ mm $\Delta = \pm 0{,}2 \cdot (L + 45)$ mm (L_s metreinä)	 $\Delta = \pm 16$ mm $\Delta = \pm 0{,}2 \cdot (L + 50)$ mm $\Delta = \pm 0{,}1 \cdot (L + 350)$ mm (L metreinä) $\Delta = \pm 7$ mm $\Delta = \pm 0{,}2 \cdot (L + 30)$ mm (L_s metreinä)
Pilareiden linjaus: 	Pilareiden keskilinjan sijainti perustustasolla suhteessa teoreettiseen pilarilinjaan (ECL) Pilareiden ulkopinnan sijainti viereisten pilareiden pintoja yhdistävän linjan suhteen	$\Delta_1 = \pm 10$ mm $\Delta_2 = \pm 10$ mm	$\Delta_1 = \pm 7$ mm $\Delta_2 = \pm 7$ mm

Taulukko 8.25 Toiminnalliset asennustoleranssit – Yksikerroksiset ja monikerroksiset pilarit ja rakennukset [1].

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Pilareiden vinous yksikerroksissa portaalikehissä: 	Vinous, yleinen tapaus	$\Delta = \pm h/300$	$\Delta = \pm h/500$
	Yksittäisen pilarin vinous Δ_1 tai Δ_2	$\Delta = \pm h/150$	$\Delta = \pm h/300$
	Saman kehän pilareiden keskimääräinen vinous Δ [kahdelle pilarille $\Delta = (\Delta_1 + \Delta_2)/2$]	$\Delta = \pm h/500$	$\Delta = \pm h/500$
Pilareiden vinous, monikerrosrakennukset: 	Pilarin vinous Δ pohjatasolla olevan keskiönsä kautta kulkevan pystysuoran linjan suhteen	$\lvert\Delta\rvert = \Sigma h/(300\cdot\sqrt{n})$	$\lvert\Delta\rvert = \Sigma h/(500\cdot\sqrt{n})$
	Pilarin vinous Δ_a seuraavan alemman kerroksen tasossa olevan keskiönsä kautta kulkevan pystysuoran linjan suhteen sekä suoruuspoikkeama tasojen välillä	$\Delta_a = \pm h/500$	$\Delta_a = \pm h/1000$
Jatkuvan pilarin suoruus peräkkäisten kerrostasojen välillä: 	Pilarin sijainti peräkkäisissä kerrostasoissa olevien sijaintipisteiden kautta kulkevan suoran linjan suhteen	$\Delta = \pm h/750$	$\Delta = \pm h/1000$

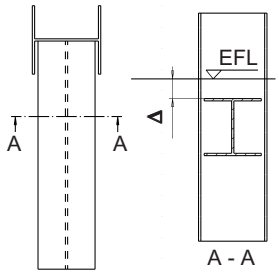
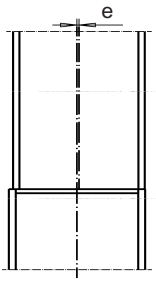
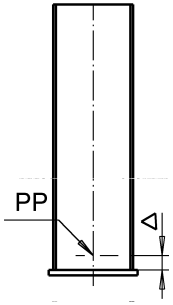
(jatkuu)

Taulukko 8.25 Toiminnalliset asennustoleranssit – Yksikerroksiset ja monikerroksiset pilarit ja rakennukset [1]
(jatkuu)

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Jatketun pilarin suoruus peräkkäisten kerrostasojen välillä: 	Pilarin sijainti jatkoskohdassa peräkkäisissä kerrostasoissa olevien sijaintipisteiden kautta kulkevan suoran linjan suhteen	$\Delta = \pm s/750$ missä $s \leq h/2$	$\Delta = \pm s/1000$ missä $s \leq h/2$
Korkeus: 	Kokonaiskorkeus perustustasosta: $h \leq 20$ m 20 m $< h <$ 100 m $h \geq 100$ m	$\Delta = \pm 20$ mm $\Delta = \pm 0{,}5 \cdot (h + 20)$ mm $\Delta = \pm 0{,}2 \cdot (h + 200)$ mm (h metreinä)	$\Delta = \pm 10$ mm $\Delta = \pm 0{,}25 \cdot (h + 20)$ mm $\Delta = \pm 0{,}1 \cdot (h + 200)$ mm (h metreinä)
Kerroskorkeus ja vaakapalkin kaltevuus: 	Peräkkäisten tasojen välinen korkeus Vaakapalkin kaltevuus (päiden korkeusero)	$\Delta = \pm 10$ mm $\Delta = \pm L/500$ mutta $\lvert\Delta\rvert \leq 10$ mm	$\Delta = \pm 5$ mm $\Delta = \pm L/1000$ mutta $\lvert\Delta\rvert \leq 5$ mm
Suhteelliset korkeusasemat: 	Vierekkäisten palkkien korkeusasemat	$\Delta = \pm 10$ mm	$\Delta = \pm 5$ mm

(jatkuu)

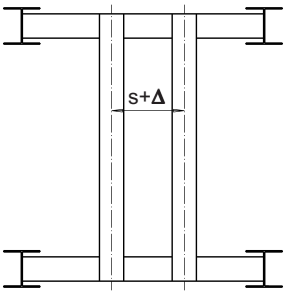
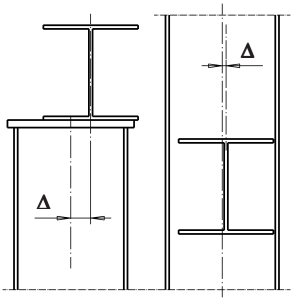
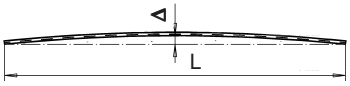
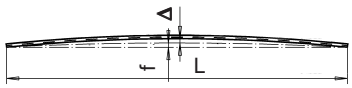
Taulukko 8.25 *(jatkuu)* Toiminnalliset asennustoleranssit – Yksikerroksiset ja monikerroksiset pilarit ja rakennukset [1].

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Kiinnitysten korkeusasemat: 	Palkin korkeusasema palkin ja pilarin kiinnityskohdassa teoreettisen lattiatason (EFL) suhteen mitattuna	**Δ** = ±10 mm	**Δ** = ±5 mm
Pilarin jatkos: 	Suunnittelematon epäkeskeisyys e (jomman kumman akselin suhteen)	5 mm	3 mm
Pilarin pohjalevy: 	Pilarin rungon alapään korkeusasema sen sijaintipisteelle (PP) annetun korkeusaseman suhteen.	**Δ** = ±5 mm	**Δ** = ±5 mm

Huom 1: Korkeusasemat mitataan teoreettisen lattiatason suhteen (esitettyjen lattiatasojen par as sovitus pilarin pituuksien toleransseille sovitettuna).

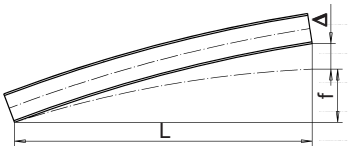
Huom 2: Merkintä esim. **Δ** = ±L/500 mutta |**Δ**| ≤ 5 mm tarkoittaa, että |**Δ**| on pienempi arvoista L/500 tai 5 mm.

Taulukko 8.26 Toiminnalliset asennustoleranssit – Rakennusten palkit [1].

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Välimatka: 	Viereisten asennettujen palkkien etäisyyden poikkeama **Δ** molemmissa päissä mitattuna	**Δ** = ±10 mm	**Δ** = ±5 mm
Sijainti pilareiden kohdalla: 	Palkin ja pilarin välisen kiinnityksen sijainnin poikkeama pilarin suhteen mitattuna	**Δ** = ±5 mm	**Δ** = ±3 mm
Suoruus tasossa: 	Asennetun L:n pituisen palkin tai ulokkeen suoruuden poikkeama **Δ**	**Δ** = ±L/500	**Δ** = ±L/1000
Kaarevuus: 	Asennetun L:n pituisen palkin tai ristikon sauvan keskikohdan kaarevuuden poikkeama **Δ** tarkoitetusta esikorotuksesta f	**Δ** = ±L/300	**Δ** = ±L/500

(jatkuu)

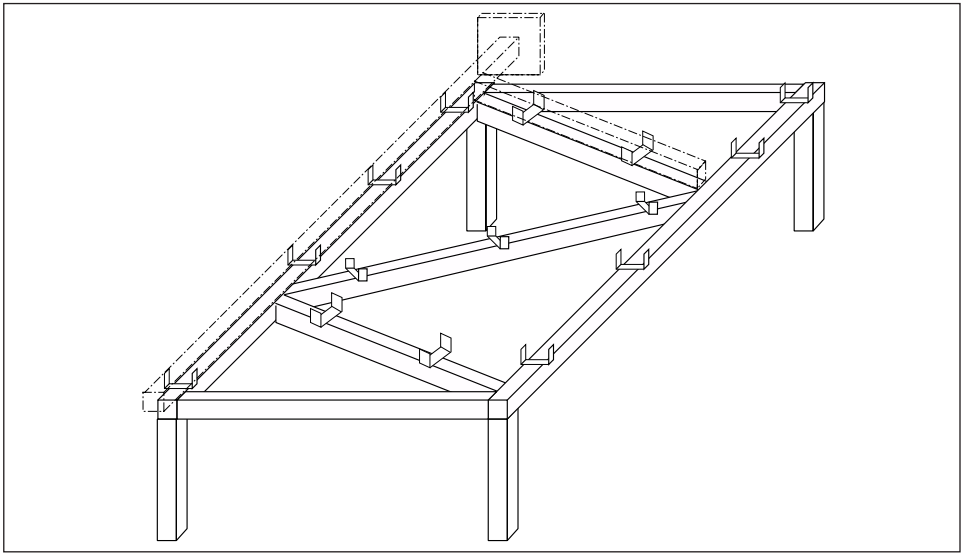
Taulukko 8.26 Toiminnalliset asennustoleranssit – Rakennusten palkit [1]
(jatkuu)

Poikkeaman tyyppi	Mittauskohde	Sallittu poikkeama Δ	
		Luokka 1	Luokka 2
Ulokkeen esiasetus: 	Asennetun L:n pituisen ulokkeen pään poikkeama **Δ** tarkoitetusta esiasetuksesta f	**Δ** = ±L/200	**Δ** = ±L/300

8.7 Ristikon kokoaminen konepajalla

Ristikon kokoamisessa tärkeä näkökohta on valmistettavien ristikoiden lukumäärä. Suurilla sarjoilla kannattaa kokoonpanojigin suunnitteluun ja valmistukseen käyttää enemmän aikaa. Myös asetetut tarkkuusvaatimukset ratkaisevat millainen on edullinen kokoonpanojigi kussakin tapauksessa. Konepajakustannusten kannalta on tärkeää, että rakenneputket pystytään varastoimaan mahdollisimman lähelle kokoonpanopaikkaa, jolloin säästetään aikaa materiaalien siirroissa.

Kokoonpanojigi pitää olla valmistettu riittävän lujista osista, jotta kokoonpanotyössä syntyvät termiset ja mekaaniset rasitukset eivät muuttaisi jigin mittoja. Ristikon sauvat tuetaan riittävän tiheästi hitsauksen aiheuttamien muodonmuutosten välttämiseksi. Ristikon ruuviliitosten laippalevyt kannattaa kiinnittää kokoonpanojigissä ruuvien välityksellä jigiin hitsattuihin vastalevyihin (kuva 8.21).



Kuva 8.21 Ristikon kokoonpanojigi

Konepajavalmistuksen nopeuttamiseksi voidaan kokoonpanojigissä silloittaa sauvat yhteen ja suorittaa lopullinen hitsaus toisessa työpisteessä. Tällöin pitää huolehtia siitä, että silloitus on riittävän tukeva, jotta lopullisessa hitsauksessa ei syntyisi suuria muodonmuutoksia.

Vapaavälisissä liitoksissa on huolehdittava vapaavälin säilymisestä piirustusten ja taulukossa 8.20 esitettyjen toleranssien mukaisina. Limitetyissä liitoksissa suurempi alle jäävä uumasauva on aina hitsattava ensin.

8.8 Palosuojaus

Palosuojauksen tekeminen konepajalla ei useinkaan ole kannattavaa. Palosuojamateriaalit eivät pysy kuljetuksen aikana ehjinä, jolloin työmaalla joudutaan korjailemaan palosuojausta. Parhaiten konepajalla tehtäväksi soveltuva palosuojausmenetelmä on palosuojamaalaus. Tällöin rakenneputkien kuljetuksessa on huolehdittava siitä, että maalipinnan vauriot jäisivät mahdollisimman vähäisiksi. Vaurioituneet kohdat on korjattava työmaalla sekä levitettävä mahdollisesti kokonaan uusi maalikerros, jotta päästään vaadittuun palonkestoaikaan. Palosuojamaalaukseen liittyviä ohjeita ja käytännön suorittamista on käsitelty tarkemmin lähteessä [9].

Betonitäytteisiä rakenneputkia käytettäessä betonitäytteen valaminen on mahdollista jo konepajalla, mutta se lisää rakenneputkien kuljetuspainoa ja vaikeuttaa asentamista. Betonointi suoritetaankin yleensä vasta työmaalla.

8.9 Asennus

Rakenneputkirakenteiden työmaa-asennus ei poikkea muiden teräsrakenteiden asentamisesta. Kuitenkin rakenneputkien suuri vääntöjäykkyys ja hyvä taivutusjäykkyys molempien akseleiden suhteen tekevät nostot ja asennuksen helpommiksi. Asennuksen aikaisten poikittaistukien tarve on siten rakenneputkirakenteilla vähäisempi. Rakenneputkirakenteet ovat myös vähemmän herkkiä tuulen vaikutuksille asennusaikana kuin avoimet profiilit.

Rakenneputkirakenteen asennus tehdään asennussuunnitelman mukaan. Asennussuunnitelmassa on otettava huomioon kuljetuskaluston ja nosturin kulkumahdollisuudet. Ensimmäinen kehä tai pilari on tuettava vaakasuunnassa jäykistävillä elementeillä. Tämän jälkeen asennusta jatketaan etenemällä seuraavaan kehään tai pilariin, joka liitetään tuettuun rakenteeseen. Asennuslohkot (esim. ristikot) liitetään ruuviliitoksilla.

Rakenneputkirakenteet ovat kevyitä, joten suuretkin asennuslohkot pystytään painonsa puolesta nostamaan ja asentamaan helposti työmaalla. Ruuveja ei kannata kiristää täyteen momenttiin ennen kuin rakenteen osien oikeat asemat on tarkistettu. Tämän jälkeen ruuvit kiristetään oikeaan momenttiin ja tarvittaessa lukitaan (kohta 8.4.2). Suurten ristikkorakenteiden (etenkin avaruusristikoiden) kokoaminen on yleensä edullista suorittaa työmaalla maanpinnan tasossa. Tämän jälkeen valmis ristikko nostetaan paikalleen.

Asennusystävällinen ristikko tulee suunnitella siten, että nosturit voi poistaa mahdollisimman nopeasti varsinaisen noston tapahduttua, koska nosturikustannus saattaa olla merkittävä osa asennustyömaan kokonaiskustannuksista. Nostettavien lohkojen tulisi olla suunniteltuja siten, että molemmat päät ovat välittömästi tuettuja noston jälkeen, jolloin nosturin voi siirtää muihin tehtäviin.

8.10 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[2] CIDECT. 1995. Design guide for structural hollow sections in mechanical applications. CIDECT Design Guide No 6. Verlag TÜV Rheinland GmbH. 157 s.

[3] CIDECT. 1998. Design guide for fabrication, assembly and erection of hollow section structures. CIDECT Design Guide No 7.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 171 s.

[4] CIDECT. 1996. Hollofast and hollobolt system for hollow section connections.
Report 6G-14(A)/96.

[5] Jonsson B. 2007. A proposal for new weld class system.
Proceedings of Fatigue Design 2007, Senlis France 2007. 9 s.

[6] SFS-EN ISO 5817:2006. (EN ISO 5817:2003)
Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin ja niiden seosten sulahitsaus (patsi sädehitsaus). Hitsiluokat.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 64 s.

[7] Hitsaajan opas. 2003. Rautaruukki Steel. 112 s.

[8] Hirsimäki, H. 1996. Hitsaussaumojen laadunvarmistus.
Teräsrakenteiden pääsuunnittelijan kurssi 16.-18.10.1996. Kurssiaineisto.
Teräsrakenneyhdistys ry.

[9] Teräsrakenteiden palosuojamaalaus. 2007.
Teräsrakenneyhdistys ry. 18 s.

9. PINTAKÄSITTELYT

9.1 Yleistä

Teräsrakenteet on suojattava korroosion vaikutusta vastaan. Korroosion vaikutus alkaa ilmassa, kun ilman suhteellinen kosteus on yli 60 %. Eurocoden osa EN 1993-1-1 ei edellytä korroosiosuojausta sisätiloissa olevissa rakenteissa, jos suhteellinen kosteus on enintään 80 % [1,2,3]. Korroosion aikana teräksen valmistuksessa metalliin varastoitunut energia vapautuu ja metalli pyrkii palautumaan luonnolliseen stabiiliin tilaansa. Teräksen korroosiota voidaan estää sopivilla pintakäsittelyillä. Yleisimpiä ilman kanssa kosketuksessa olevien teräsrakenteiden suojausmenetelmiä ovat korroosionestomaalaus ja kuumasinkitys.

Rakenteet on suunniteltava siten, että korroosioalttiita paikkoja ei pääse muodostumaan.

Joissakin tapauksissa saattaa tilaajalla olla käytössä standardin EN 1090-2 lisäksi lisävaatimuksia pintakäsittelyyn, jotka käytännössä vaikuttavat rakennesuunnitteluun. Niiden huomiotta jättäminen saattaa aiheuttaa projektissa kalliita jälkitöitä.

9.2 Ympäristöluokat

Ilmastoympäristöt luokitellaan kuuteen ilmastorasitusluokkaan taulukon 9.1 mukaisesti. Veteen upotetut ja maanalaiset rakenteet voidaan jakaa lisäksi kolmeen ympäristöluokkaan (Im1-Im3).

Taulukko 9.1 Ilmastorasitusluokat standardin EN ISO 12944-2 mukaan [5]

Rasitus-luokka	Painohäviö pinta-alayksikköä kohden / paksuushäviö (ensimmäinen koestusvuosi)				Rasitusluokan kuvaus (Opastava)	
	Niukkahiilinen teräs		Sinkki		Ulkona	Sisällä
	Paino-häviö (g/m^2)	Paksuus-häviö (μm)	Paino-häviö (g/m^2)	Paksuus-häviö (μm)		
C1 Hyvin lievä	≤10	≤1,3	≤0,7	≤0,1		Lämmitetyt rakennukset, joissa puhtaat ilmatilat, esim. toimistot, kaupat, koulut, hotellit.
C2 Lievä	>10-200	>1,3-25	>0,7-5	>0,1-0,7	Maaseutuilmasto, jossa epäpuhtauksien määrä on alhainen	Lämmittämättömät rakennukset, joissa voi esiintyä kondensoitumista, esim. varastot, urheiluhallit.
C3 Kohtalainen	>200-400	>25-50	>5-15	>0,7-2,1	Kaupunki- ja teollisuusilmastot, joissa on kohtalainen rikkidioksidikuormitus. Rannikkoalueet, joissa on alhainen suolapitoisuus.	Tuotantotilat, joissa on korkea kosteuspitoisuus ja jossain määrin epäpuhtauksia ilmassa, esim. elintarviketehtaat, pesulat, panimot, meijerit.

(jatkuu)

Taulukko 9.1 Ilmastorasitusluokat standardin EN ISO 12944-2 mukaan [5]
(jatkuu)

Rasitus-luokka	Painohäviö pinta-alayksikköä kohden / paksuushäviö (ensimmäinen koestusvuosi)				Rasitusluokan kuvaus (Opastava)	
	Niukkahiilinen teräs		Sinkki		Ulkona	Sisällä
	Paino-häviö (g/m^2)	Paksuus-häviö (μm)	Paino-häviö (g/m^2)	Paksuus-häviö (μm)		
C4 Ankara	>400-650	>50-80	>15-30	>2,1-4,2	Teollisuusalueet ja rannikkoalueet, joilla on kohtalainen suolapitoisuus.	Kemianteollisuuden tuotantolaitokset, uima-altaat, rannikolla sijaitsevat telakat ja veneveistämöt.
C5-I Hyvin ankara (teollisuus)	>650-1500	>80-200	>30-60	>4,2-8,4	Teollisuusalueet, joissa on korkea kosteuspitoisuus ja syövyttävä ilma.	Rakennukset tai alueet, jotka ovat jatkuvasti kosteita ja joissa saasteiden määrä on korkea.
C5-M Hyvin ankara (meri)	>650-1500	>80-200	>30-60	>4,2-8,4	Rannikkoalueet ja rannikon ulkopuoliset alueet, joissa on korkea suolapitoisuus.	Rakennukset tai alueet, jotka ovat jatkuvasti kosteita ja joissa saasteiden määrä on korkea.
Kuumien ja kosteiden vyöhykkeiden rannikkoalueilla paino- ja paksuushäviöt voivat ylittää luokan C5-M rajat. Suojamaaliyhdistelmään on kiinnitettävä erityisesti huomiota.						

9.3 Esikäsittely

Rakenneputket toimitetaan tehtaalta sopimuksen mukaan joko suojaamattomina (toimitustila 'kuiva') tai kevyesti suojaöljyttyinä. Pinnan puhdistamisella ennen maalausta on tällöin ratkaiseva merkitys rakenneputken pintakäsittelyn onnistumiselle. Puhdistusmenetelmä valitaan epäpuhtauden määrän, laadun sekä rakenteen muodon ja koon mukaan. Tarvittaessa teräksen pinta karhennetaan, jolloin maali tarttuu siihen paremmin.

Pinnat tulee esikäsitellä standardin EN ISO 12944-4 mukaisesti. Yleisimmät esikäsittelyasteet on esitetty taulukossa 9.2 Normaalisti konepajassa käytetään esikäsittelymenetelmänä suihkupuhdistusta. Yleisin puhdistusaste on Sa $2^1/_2$. Happopeittausta käytetään kuumasinkityksen yhteydessä. Terästharjausta käytetään asennustyömaalla, jos joudutaan tekemään asennushitsauksia. Hitsauksen jälkeen pinta on harjattava ja paikkamaalattava.

Jos sinkitty rakenne maalataan, pinnan puhdistus vaatii erityistä huomiota: pinnat tulee puhdistaa (pölyn ja rasvan poisto) ja mahdollisesti käsitellä sopivalla peittausmaalilla tai standardin EN ISO 12944-4 mukaisella pyyhkäisysuihkupuhdistuksella standardin EN ISO 8503-2 mukaiseen pinnan karheuteen "hieno". Esikäsittely tulee tarkastaa ennen maalausta.

Hitsien, leikkaussärmien ja muiden pintavirheellisten alueiden esikäsittelyasteet määritetään standardin EN ISO 8501-3 mukaisina P-luokkina. Jos korroosionestolle on esitetty odotettu käyttöikä ja rasitusluokka, pinnan P-luokan tulee olla olla taulukon 9.3 mukainen. Toteutusluokissa EXC2 - EXC4 pinnan esikäsittelyasteen tulee olla P1, ellei toisin esitetä [4].

Taulukko 9.2 Teräspintojen esikäsittelyasteet standardin EN ISO 12944-4 mukaan [6]

Esikäsittelyaste [a]	Esikäsittelymenetelmä	Käsiteltyjen pintojen olennaiset ominaisuudet
Sa 2	Suihkupuhdistus standardissa ISO 8504-2 määritellyllä menetelmällä	Suurin osa valssihilseestä, ruosteesta, maalipinnoitteista ja vieraasta aineesta on poistettu. Jäljellejäävien epäpuhtauksien on oltava tiukasti kiinni alustassa.
Sa 2½		Valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aine on poistettu. Jäljelläolevien epäpuhtausjäämien tulee näkyä ainoastaan lievänä täplien tai raitojen muotoisena värjääntymisenä.
Sa 3		Valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aine on poistettu. Pinnan oltava kauttaaltaan metallin värinen.
St 2	Puhdistus käsityökaluilla tai koneellisesti (Esim. teräsharjaus). Lisätietoja standardissa ISO 8504-3	Irtonainen valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aine on poistettu.
St 3		Irtonainen valssihilse, ruoste, maalipinnoitteet ja vieras aine on poistettu. Pinta käsitellään selkeästi huolellisemmin, kuin esikäsittelyasteessa St 2, tuloksena metallialustan mukainen hohde.
Be	Happopeittaus	Valssihilse, ruoste ja maalipinnoitejäämät poistettu täydellisesti. Maalipinnoitteet poistettava sopivalla menetelmällä ennen peittausta.

a) Käytetyt lyhenteet:
Sa = suihkupuhdistus (ISO 8501-1)
St = puhdistus käsityökaluilla tai koneellisesti (ISO 8501-1)
Be = happopeittaus

Taulukko 9.3 Hitsien, leikkaussärmien ja muiden pintavirheellisten alueiden standardin EN ISO 8501-3 mukaiset esikäsittelyasteet korroosioneston odotetun käyttöiän mukaan [4]

Korroosioneston odotettu käyttöikä [a]	Ilmastorasitusluokka [b]	Esikäsittelyaste
> 15 vuotta	C1	P1
	C2...C3	P2
	Yli C3	P2 tai P3 ilmoitetun mukaisesti
5...15 vuotta	C1...C3	P1
	Yli C3	P2
< 5 vuotta	C1...C4	P1
	C5...Im	P2

a,b) Korroosioneston odotetun käyttöiän ja rasitusluokan osalta viitataan standardeihin EN ISO 12944 ja EN ISO 14713-1

9.4 Korroosionestomaalaus

Korroosionestomaalaus on yleisin teräsrakenteiden korroosiosuojamenetelmä. Maalauskäsittely koostuu pohjamaalista, välimaalista ja pintamaalista. Maaliyhdistelmän valinnassa on kiinnitettävä huomiota välittömien maalauskustannusten lisäksi rakenteen koko elinkaaren hoitokustannuksiin, jotka riippuvat rakenteeseen kohdistuvista rasituksista (ilmasto, syövyttävät aineet, mekaaninen rasitus).

Maalattavien metallipintojen on oltava mahdollisimman tasaisia ja pyöreänurkkaisia. Rakenneputket soveltuvat tässä suhteessa erinomaisesti myös ruiskumaalaukseen, koska ne ovat luonnostaan pyöreänurkkaisia. Hitsausroiskeet ja muut epätasaisuudet on poistettava ennen maalausta. Myös hitsien on oltava mahdollisimman sileäpintaisia, jotta niihin ei jäisi maalaamattomia kohtia. Liitokset on suunniteltava siten, että rakenne pystytään maalaamaan joka puolelta. Siveltimellä maalattaessa liitoslevyjen välisen tilan on oltava vähintään siveltimen levyinen. Kierteytettyjä osia ei maalata, vaan ne suojataan maalauksen ajaksi. Ruuvien ja muttereiden korroosiokestävyys pitää olla vähintään yhtä hyvä kuin perusmateriaalin.

Rakenneputkien sisäpuolinen maalaus ei ole käytännössä mahdollista. Toisaalta rakenneputkien sisäpuolinen korroosio on normaaliolosuhteissa vähäistä. Lähteen [9] mukaan sisäpuolista korroosioriskiä ei ole, jos rakenneputki on suljettu molemmista päistä. On pyrittävä varmistamaan, että sadevesi ei pääse rakenneputken sisälle. Käytännössä tämä ei kuitenkaan aina ole mahdollista. Vesi voi päästä rakenneputken sisälle esimerkiksi itseporautuvien ruuvien reijistä, vaikka niiden voisi olettaa olevan tekotavastaan johtuen vesitiiviitä. Sadevesi tai lumen sulamisvesi voi myös päästä rakenneputken sisään esim. asennustyön aikana, kun runko on vielä sateelle alttiina. Pidemmällä aikavälillä rakenneputken sisälle voi lämpötilan vaihteluiden seurauksena tiivistyä kondenssivettä. **Edellä mainituista syistä johtuen rakenneputkirakenteisiin on ehdottomasti tehtävä vedenpoistoreijät etenkin, jos rakenteeseen joutunut vesi voi jäätyä.**

Standardissa EN ISO 12944-5 on esitetty eri rasitusluokkiin soveltuvia maaliyhdistelmiä ja niillä saavutettava odotettavissa oleva käyttöikä eri ilmastorasitusluokissa [8]. Sopivan maaliyhdistelmän valitsemiseksi voidaan käyttää hyväksi maalivalmistajien taulukoita. Taulukossa 9.4 on esitetty maalien ominaisuuksia standardin EN ISO 12944-5 aikaisemman revision [7] mukaan. Standardin uudesta revisiosta kyseinen taulukko on poistettu.

Suomessa teräsrakentamisessa käytettäviä maalausjärjestelmiä ovat mm. alkydi-, epoksi-, polyuretaani-, akryyli-, sinkkiepoksi- ja sinkkisilikaattijärjestelmät. Teräsrungoissa käytetään yleisimmin alkydi- ja epoksijärjestelmiä. Maalausjärjestelmistä saa tietoa maalivalmistajien järjestelmätaulukoista.

Taulukko 9.4 Maalien ominaisuudet [7]

	AY	**AK**	**PUR,** alifaattinen	**EP**	**ESI**
Kiillon pysyvyys	3	2	3	1	0
Värisävyn pysyvyys	3	2	3	1	0
Kemikaalien kestävyys:					
Vesiupotus	1	1	2 / 1 a)	3	2
Sade/kondensoituminen	3	2	3	3	3
Liuotteet	1	1	1	2	3
Liuoteroiskeet	1	2	3 / 2 a)	3	3
Hapot	1	1	1	1	1
Happoroiskeet	2	1	2 / 1 a)	2	1
Emäkset	3	1	1	3	1
Emäsroiskeet	2	1	3	3	1
Kuivan kuumuuden kestävyys:					
70 ºC:een saakka	3	3	3	3	3
70 ºC...120 ºC	3 / 2 a)	2	3	3	3
120 ºC...150 ºC	1	1	2	2	3
yli 150 ºC	1	1	1	1	3
Fysikaaliset ominaisuudet:					
Kulutuskestävyys	1	2	2	3	3
Iskun kestävyys	2	1	3	2	1
Joustavuus	2	1	3	3 / 2 a)	1
Kovuus	2	3	2	3 / 2 a)	3
AY = Akryyli AK = Alkydi PUR = Polyuretaani EP = Epoksi ESI = Etyylisinkkisilikaatti			3 = Erinomainen 2 = Hyvä 1 = Huono 0 = Merkityksetön		
a) Luokitus voi vaihdella saman maalityypin puitteissa riippuen sen koostumuksesta. Molemmat merkinnät voivat soveltua.					

Maaliyhdistelmä merkitään EN ISO 12944-5 -standardissa [8] ilmoittamalla maaliyhdistelmän numero standardin jälkeen, esim. EN ISO 12944-5/A1.20. Tunnisteeseen on merkittävä pohja- ja pintamaalin sideaineen tunnus, jos ne voivat vaihdella, esim. EN ISO 12944-5/A1.20-EP/PUR. Standardin EN ISO 12944-5 aikaisemmassa revisiossa [7] oli Suomessa tehty kansallinen lisäys, jonka mukaan merkintää täydennetään siten, että sulkeisiin merkitään maalityyppitunnus, kokonaiskalvon nimellispaksuus, maalikerrosten lukumäärä, alustamateriaali, ja alustan esikäsittely seuraavasti [7]:

esim. **SFS-EN ISO 12944-5/S2.10-AK/AY (AKAY 160/3 - FeSa 2½)**

standardin tunnus
maaliyhdistelmä
pohja- ja pintamaalin sideaineet
kansallinen lisäys

Edellä esitettyä lähteen [7] mukaista vanhaa merkintätapaa on suositeltavaa käyttää edelleenkin sen informatiivisuuden vuoksi.

Jos maaliyhdistelmä ei ole mikään standardin EN ISO 12944-5 mukainen yhdistelmä, on annettava kaikki tiedot (mm. esikäsittely, pinnoitteen tyyppi, kerrosten lukumäärä jne.) lähteessä [8] esitetyllä tavalla.

Maalausmenetelmänä käytetään normaalisti ruiskumaalausta. Sivellintä ja telaa käytetään lähinnä paikkamaalauksessa. Tästä syystä rakenteet on suunniteltava siten, että maalausmenetelmänä voidaan käyttää pelkästään ruiskutusta.

Konepajapohjamaalia käytetään suihkupuhdistettujen pintojen väliaikaisena korroosiosuojauksena valmistuksen, kuljetuksen, pystytyksen ja varastoinnin aikana. Maali levitetään ruiskulla tasaiseksi kerrokseksi jonka kalvonpaksuus on 15-30 µm. Konepajapohjamaali ei saa vaikuttaa haitallisesti valmistusmenetelmiin, kuten hitsaukseen ja polttoleikkaukseen. Tavallisesti konepajapohjamaali ei ole osa maalausyhdistelmää ja se voidaan joutua poistamaan [8].

Rasitusluokan ollessa C3 tai sitä vaativampi ja korroosiosuojauksen kestoiän ollessa yli viisi vuotta, reunojen on oltava pyöristettyjä tai viistettyjä standardin EN ISO 12944-3 mukaisesti, ja reunoissa käytetään ylimääräistä pinnoitekaistaa, joka ulottuu 25 mm päähän reunan molemmille puolille. Ylimääräisen kaistan paksuutena käytetään pinnoitusjärjestelmään sopivaa kalvonpaksuutta [4].

Maalaustyön lopputuloksen onnistumiseen vaikuttavat erittäin oleellisesti maalattavan pinnan esikäsittely sekä maalausolosuhteet (lämpötila, ilman suhteellinen kosteus, ilman puhtaus). Olosuhteiden on täytettävä maalinvalmistajan vaatimukset, jotka selviävät valmistajan maalausjärjestelmistä. Maalattavien pintojen lämpötilan on oltava vähintään 3 ºC kastepisteen yläpuolella, jollei maalinvalmistajan ohjeissa ole muuta arvoa [4].

Maalausta suunniteltaessa kannattaa selvittää valmistusmaan VOC-vaatimukset (Volatile Organic Compound, haihtuvat orgaaniset aineet), jotka saattavat vaikuttaa valittavaan maaliyhdistelmään.

9.5 Kuumasinkitys

Sinkityksen suojaava vaikutus perustuu siihen, että sinkki epäjalompana metallina syöpyy ennen terästä. Suojauksen teho on suoraan verrannollinen sinkkikerroksen paksuuteen. Toisaalta paksu sinkkikerros on arka mekaanisille kolhuille. Kerroksen paksuus on normaalisti 50-100 µm, yläpiiteräksillä jopa 250 µm.

Sinkityksen etuna on lisäksi se, että se suojaa naarmuissa tai leikkausreunoissa paljastunutta teräspintaa katodisesti eli syöpyy teräksen sijasta.

Yleisin ja tehokkain sinkitysmenetelmä on kuumasinkitys. Menetelmää käsitellään standardeissa EN ISO 1461 [10] ja EN ISO 14713 [11,12]. Sinkittävä kappale upotetaan sinkkikylpyyn ja sinkki tarttuu teräksen pintaan. Kappale on muotoiltava siten, että sinkki pääsee tunkeutumaan sinkittävän kappaleen joka pintaan. Lisäksi sinkkipadan koko rajoittaa sinkittävän kappaleen maksimikokoa. Maksimimitat on selvitettävä rakenteet valmistavalta konepajalta.

Teräsrakenteen muoto ja mitat vaikuttavat kuumasinkityskaston suoritustapaan ja sitä kautta lopputulokseen. Teräksen lujuusluokalla ei ole suoraa vaikutusta sinkkipinnoitteen ulkonäköön tai paksuuteen.

Kuumasinkityn teräsrakenteen **sinkkipinnan ulkonäköön, pinnoitteen paksuuteen ja kiinnipysyvyyteen** vaikuttaa oleellisimmin kaksi tekijää:

- käytettävän teräksen Si+P pitoisuus ja
- kastoaika (ks. luku 1, kuva 1.4).

Alapiiteräs (Si + P ≤ 0,04 %) (vastaa EN 10025-2, luokka 1)**:**
Jos sinkityn teräsrakenteen ulkonäkö on tärkeä tai rakenne maalataan sinkityksen jälkeen, suositellaan valitsemaan alapiiteräs, jossa Si + P ≤ 0,04 %. Tällöin rakenteen sinkkipinta on kirkas, tasavärinen ja hyvin kiinnipysyvä. Sinkkipinnoitteen kerrospaksuus on tyypillisesti < 90 µm. Jos tarvitaan suurempaa kerrospaksuutta, tulee valita keskipii- tai yläpiiteräs.

Keskipiiteräs (Si = 0,15 - 0,25 %) (vastaa EN 10025-2, luokka 3)**:**
Jos sinkkipinnoitteen paksuus on riittävän korroosiokestävyyden saavuttamiseksi määräävä tekijä, suositellaan valittavaksi keskipiiteräs (Si = 0,15 - 0,25 %). Keskipiiterästen sinkkipinnoite on paksumpi, mutta pinnoitteen kiinnipysyvyys on heikompi kuin alapiiteräksillä ja pinnoitteessa saattaa esiintyä värieroja ja tummempia alueita. Teräsrakenteet ovat maalattavissa sinkityksen jälkeen, mutta hyvä pinnanlaatu on vaikeampi saavuttaa kuin alapiiteräksillä. Fosforin (P) vähäisellä määrällä ei ole vaikutusta keskipiiterästen sinkitykseen.

Yläpiiteräs (Si = 0,25 - 0,35 %) (vastaa EN 10025-2, luokka 2)**:**
Jos teräksen sinkkipinnoitteesta halutaan erityisen paksu (esimerkikiksi upotettavat rakenteet), tulee valita yläpiiteräs (Si = 0,25 - 0,35 %). Sinkkipinnoitteet ovat paksuja, karkeita, hauraita ja ne tummuvat nopeasti. Pinnoitteen laadukas esikäsittely ja maalaus on vaikeaa.

Koska piipitoisuus vaikuttaa oleellisesti teräksen sinkittävyyteen, tämä on otettava huomioon jo terästilauksen yhteydessä. Taulukossa 9.5 on esitetty levyterässtandardin EN 10025-2 mukaiset teräksen kuumasinkittävyysluokat perustuen teräksen pii- ja fosforipitoisuuksiin. Taulukossa 9.6 on puolestaan esitetty lähes samansisältöisesti valmiin sinkkipinnoitteen tyypilliset ominaisuudet teräksen koostumuksen perusteella kuumasinkitysstandardin EN 14713-2 mukaan.

Taulukko 9.5 Teräksen kuumasinkittävyyden luokat levyterässtandardin EN 10025-2 mukaan [13]

Luokat	Alkuaineet (p-%)		
	Si	Si + 2,5 P	P
Luokka 1	≤ 0,030	≤ 0,090	–
Luokka 2 [a)]	≤ 0,35	–	–
Luokka 3	0,14 ≤ Si ≤ 0,25	–	≤ 0,035
a) Luokka 2 koskee vain erikoissinkkiseoksia.			

Taulukko 9.6 Teräksen koostumuksesta johtuvat sinkkipinnoitteen ominaisuudet kuumasinkitysstandardin EN ISO 14713-2 mukaan [12]

Luokka	Tyypilliset reagoivat alkuaineet	Lisätietoa	Tyypilliset pinnoiteen ominaisuudet
A	Si ≤ 0,04 % ja P < 0,02 %	Ks. huomautus 1.	Pinnoitteella on kiiltävä ulkonäkö ja hieno pintarakenne. Pinnoitteen rakenne sisältää ulomman sinkkikerroksen.
B	0,14 % ≤ Si ≤ 0,25 %	Rauta-sinkkiseos voi ulottua pinnoitteen läpi. Kerrospaksuus kasvaa lisääntyvän piipitoisuuden mukana. Muut alkuaineet voivat myös vaikuttaa teräksen reaktiivisuuteen. Erityisesti yli 0,035 % fosforipitoisuudet lisäävät reaktiivisuutta.	
C	0,04 % < Si ≤ 0,14 %	Liian suurien kerrospaksuuksien muodostuminen on mahdollista.	Pinnoitteen ulkonäkö on tummempi ja pintarakenne karkea. Rauta/sinkkiseokset hallitsevat pinnoitteen rakennetta ja ulottuvat usein pinnoitteen pintaan ja niillä on heikompi käsittelyn kestävyys.
D	Si > 0,25 %	Kerrospaksuus kasvaa lisääntyvän piipitoisuuden mukana.	

Huom 1:
Teräksillä, joiden kemiallinen koostumus on alueella (Si + 2,5 P) ≤ 0,09 % on myös nämä ominaisuudet. Kylmävalssatuilla teräksillä esiintyy näitä ominaisuuksia kun teräksen koostumus on alueella (Si + 2,5 P) ≤ 0,04 %.

Huom 2:
Seosaineiden (esim. nikkeli) läsnäolo sulassa sinkissä voi vaikuttaa merkittävästi taulukossa esitettyihin pinnoitteen ominaisuuksiin. Tässä taulukossa ei esitetä ohjeita korkeassa lämpötilassa tehtävään kuumasinkitykseen (so. upotus sulaan sinkkiin lämpötilassa 530....560 °C).
(Kirjoittajan kommentti: Normaalissa kuumasinkityksessä sinkkipadan lämpötila on noin. 460 °C.)

Huom 3:
Tässä taulukossa esitetyt teräksen kemialliset koostumukset vaihtelevat muiden tekijöiden vaikutuksesta ja kunkin alueen rajat vaihtelevat vastaavasti.

SSAB:n rakenneputkien vakioteräslajille SSAB Domex Tube Double Grade taataan piipitoisuus 0,15 - 0,25 % Si. Tällä piipitoisuudella saavutetaan useimpiin käyttökohteisiin riittävä yli 100 µm paksuinen sinkkikerros, kun käytetään asianmukaista kuumasinkitystä (ks. luku 1, kuva 1.4). Muiden teräslajien piipitoisuus on teräslajikohtainen. Joillakin teräslajeilla pii- ja fosforipitoisuus on Si+P ≤ 0,04 %, jolloin asianmukaisessa kuumasinkityksessä tuotteeseen voidaan saavuttaa ohut sinkkikerros (alle 100 µm). Vaatimus teräksen pii- ja fosforipitoisuudelle sovitaan kyselyn ja tilauksen yhteydessä.

SSAB Domex Tube rakenneputket lujuusluokissa S235 - S460 soveltuvat hyvin kuumasinkitykseen. Lujempien rakenneputkien kuumasinkityksestä on syytä keskustella ensin valmistajan kanssa.

Sinkittävät rakenneputkirakenteet on suunniteltava siten, että sinkki pääsee virtaamaan vapaasti rakenneputken sisälle ja sieltä pois. Kappaleeseen ei saa jättää umpinaisia tiloja, koska kappaleen sisälle jäävä kosteus höyrystyy sinkityksen aikana ja kappale voi räjähtää. Räjäh-

dyksen välttämiseksi kappaleeseen on tehtävä tarvittaessa sinkitysreikiä. Sinkitysreikien avulla varmistetaan myös sinkin tehokas leviäminen suojattavan teräksen pinnalle ja ylimääräisen sinkin poisvaluminen, joka on tärkeää koska hinnoittelu usein perustuu punnittuun massaan ennen ja jälkeen sinkityksen. Sinkitysreijät on tarkastettava sinkityksen jälkeen, jotta niihin ei olisi jäänyt ylimääräistä sinkkiä joka tukkii reijät. Tällöin rakenneputkeen saattaa kerääntyä ylimääräisen sinkin lisäksi vettä, joka jäätyessään halkaisee putken.

Kuumasinkittävissä rakenteissa saattaa sinkityksen yhteydessä esiintyä ns. LMAC-halkeilua (Liquid Metal Assisted Cracking). Halkeilualttiuteen vaikuttavat teräksen mikrorakenteen ja pinnanlaadun lisäksi ensisijaisesti seuraavat osatekijät:

- rakenteen ainepaksuudet ja niiden keskinäiset suhteet (t_{max} / t_{min})
- rakenteessa olevat jäännösjännitykset (esim. hitsaus)
- sinkityksessä rakenteen epätasaisista lämpötilamuutoksista aiheutuvat jännitykset
- sinkkikylvyn kemiallinen koostumus
- upotusaika

Aihetta on käsitelty yksityiskohtaisesti lähteissä [14,15].

Kuumasinkitys ja sitä edeltävä peittaus eivät tavallisesti aiheuta rakenneteräksillä vetyhaurautta (vetyhalkeilua). Mahdolliset peittauksessa absorboituneen vedyn jäämät poistuvat yleensä kuumassa sinkkikylvyssä. Jos teräksen kovuus on yli 340 HV (murtolujuus $R_m > 1100$ MPa), on kuitenkin syytä kiinnittää erityistä huomiota peittauksessa tapahtuvaan vedyn absorboitumisen minimointiin [12].

Kuumasinkitty teräspinta voidaan joutua maalaamaan, kun [16]:

- kuumasinkitys ei riitä yksinään korroosiosuojaksi
- sinkin väri ei sovellu ympäristöön tai
- rakenteen on oltava tietyn värinen.

Korroosionestomaalauksen ja kuumasinkityksen yhdistelmä on tehokas korroosiosuoja, koska maalikalvon vioittuessa tai halkeillessa maalikalvon alla olevan sinkin korroosiotuotteet täyttävät halkeamat. Sinkin korroosiotuotteet eivät irrota maalia, koska ne eivät vaadi yhtä paljon lisätilaa kuin ruoste [15]. Kuumasinkitty pinta soveltuu maalausalustaksi, kun sinkitty pinta puhdistetaan huolellisesti sinkin korroosiotuotteista ja muista epäpuhtauksista välittömästi ennen maalausta. Sopiva puhdistusmenetelmä on pyyhkäisysuihkupuhdistus, jossa ei käytetä metallista puhdistusmateriaalia [8]. Kuumasinkitylle pinnalle soveltuvia maaliyhdistelmiä on esitetty standardissa EN ISO 12944-5 [8].

9.6 Pintakäsittelyn tarkastukset

Esikäsiteltyjen pintojen puhtaus ja karheus tarkastetaan standardien EN ISO 8501 ja EN ISO 8503-2 mukaisesti.

Maalattujen pintojen jokainen maalikalvo tarkastetaan standardin ISO 19840 mukaisesti, tai jos varsinaisena korroosiosuojauksena käytetään sinkitystä, maalikalvo tarkastetaan EN ISO 2808 mukaisesti. Silmämääräisellä tarkastuksella varmistetaan, että maalaus täyttää standardin EN ISO 12944-7 vaatimukset.

Kuumasinkitys tarkastetaan standardin EN ISO 1461 mukaisesti. Standardin EN 1090-2 mukaan kuumasinkityt osat tulee aina tarkastaa sulametallihaurausvaaran vuoksi (LMAC-halkeilu), ellei toteutuseritelmässä toisin esitetä.

Toteutuseritelmässä tulee määrittää eri rasitusluokissa työn hyväksyttävän minimilaatutason vahvistamiseen käytettävät vertailualueet standardin EN ISO 12944-7 mukaisesti. Vertailualueet tulee määrittää rasitusluokissa C1 - C3 ja lm1 - lm3 käytettäville korroosionestojärjestelmille, ellei toisin esitetä.

Tarkastuksissa kohteena ovat kalvojen lukumäärä ja yksittäisten kalvojen paksuus sekä muut pintakäsittelyyn liittyvät seikat. Kustannusten pienentäminen levittämällä ylipaksuja kalvoja ei ole kannattavaa, koska tarkastaja voi havaita sen helposti ja tuloksena saattaa olla uusi pintakäsittely, jolloin tavoiteltu kustannussäätö muuttuu selkeäksi lisäkuluksi.

9.7 Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1993-1-1:2005. (EN 1993-1-1:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 100 s.

[2] SFS-EN 1993-1-1:2005+AC:2006. (EN 1993-1-1:2005+AC:2006)
Sisältää myös korjaukset AC:2006.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 99 s.

[3] SFS-EN 1993-1-1: AC:2009. (EN 1993-1-1: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-1.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 16 s.

[4] SFS-EN 1090-2:2008+A1:2011. (EN 1090-2:2008+A1:2011)
Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus.
Osa 2: Teräsrakenteita koskevat tekniset vaatimukset.
Sisältää myös muutokset A1:2011.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 210 s.

[5] SFS-EN ISO 12944-2:1998. (EN ISO 12944-2:1998)
Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.
Osa 2: Ympäristöolosuhteiden luokittelu.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 20 s.

[6] SFS-EN ISO 12944-4:1998. (EN ISO 12944-4:1998)
Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.
Osa 4: Pintatyypit ja pinnan esikäsittely.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 38 s.

[7] SFS-EN ISO 12944-5:1998. (EN ISO 12944-5:1998)
Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.
Osa 5: Suojamaaliyhdistelmät.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 59 s.
Standardin vanha revisio.

[8] SFS-EN ISO 12944-5:2008. (EN ISO 12944-5:2007)
Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä.
Osa 5: Suojamaaliyhdistelmät.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 39 s.

[9] CIDECT. 1979. La résistance à la corrosion de l'interieur des profils creux en acier.
CIDECT programme 10 B. Final report 10 B-78/3.

[10] SFS-EN ISO 1461:2009. (EN ISO 1461:2009)
Valurauta- ja teräskappaleiden kuumasinkkipinnoitteet.
Spesifikaatiot ja testausmenetelmät.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 36 s.

[11] SFS-EN ISO 14713-1:2010. (EN ISO 14713-1:2009)
Zinc coatings. Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures.
Part 1: General principles of design and corrosion resistance.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

[12] SFS-EN ISO 14713-2:2010. (EN ISO 14713-2:2009)
Zinc coatings. Guidelines and recommendations for the protection against corrosion of iron and steel in structures.
Part 2: Hot dip galvanizing.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 22 s.

[13] SFS-EN 10025-2:2004. (EN 10025-2:2004)
Kuumavalssatut rakenneteräkset.
Osa 2: Seostamattomat rakenneteräkset. Tekniset toimitusehdot.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 66 s.

[14] JRC Scientific and Technical Reports:
Commentary and worked examples to EN 1993-1-10
“Material toughness and through thickness properties”.
Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. First Edition September 2008.
EUR 23510 EN - 2008. 247 s.

[15] JRC Scientific and Technical Reports:
Hot-dip-zinc-coating of prefabricated structural steel components.
Background documents in support to the implementation, harmonization and further development of the Eurocodes. Joint Report. 2010.
EUR 24286 EN - 2010. 102 s.

[16] Kinnunen J., Saarinen E., Tiira S., Ulvinen S., Väänänen E. 1989.
Teräsrakenteiden suunnittelu. Rakentajain kustannus Oy. 183 s.

10. KULJETUS JA VARASTOINTI

Rakennesuunnitteluvaiheessa on otettava huomioon myös rakenneosien ja osakokonaisuuksien kuljetus. Suuret asennuslohkot nopeuttavat työmaa-asennusta, mutta saattavat nostaa kuljetuskustannuksia, varsinkin jos joudutaan turvautumaan erikoiskuljetuksiin. Erikoiskuljetuksen suunnittelussa on muistettava ottaa huomioon siltojen ja työmaan lähiteiden asettamat rajat kuljetuksen koolle. Kansainvälisissä projekteissa kansalliset säännöt kuljetusten maksimipainoista ja -mitoista vaihtelevat maittain. Maantiekuljetus on luontevin materiaalinsiirtomuoto, kun konepaja ja työmaa sijaitsevat suhteellisen lähellä toisiaan.

Rakenneputkirakenteiden kuljetuksessa on muistettava ainakin seuraavat asiat [1]:

- kuorman peittämiseen käytettävien suojapeitteiden on oltava kuivia, puhtaita, ehjiä ja riittävän isoja
- rakenneputket on sijoitettava kuljetusvälineen lavalle siten, että ne eivät joudu alttiiksi kolhuille, hankaukselle tai muille vaurioille
- päällekkäin kuormatessa paksuseinäisimmät, pisimmät ja painavimmat tuotteet sijoitetaan alimmaisiksi
- rakenneputkien päälle ei saa kuormata mitään niin painavia tuotteita, jotka aiheuttavat vaurioita rakenneputkiin
- kuormalavan on oltava puhdas, kuiva ja tasainen
- **kuorma on kiinnitettävä siten, että se ei pääse kuljetuksen aikana siirtymään**
- kuorma sidotaan liinoilla siten, että se ei kosketa kuormalavan sivu- tai päätypylväitä
- sidontaliinat tai ketjut eivät saa olla niin kireällä että rakenneputkiin syntyy lommoja, ja kiinnityskohdat on tarvittaessa suojattava
- rakenneputkien kuljetuksessa on käytettävä sopivia aluspuita

Rakenneputkien varastoinnissa on muistettava seuraavat asiat [1]:

- varaston on oltava puhdas, kuiva ja riittävän hyvin ilmastoitu
- varastorakennuksessa on estettävä kondenssiveden pääsy putkiin
- varastoissa on käytettävä riittävä määrä alus- ja välipuita

10.1 Eri kuljetusmuodot

Teräsrakenteet kuljetetaan Suomessa konepajasta työmaalle yleensä tiekuljetuksena. Tieverkon rajoitusten vuoksi vaihtoehtona tiekuljetukselle voidaan käyttää esimerkiksi rautatiekuljetusta. Rakenteet voidaan kuljettaa ulkomaille tie- ja rautatiekuljetuksen lisäksi meri- tai ilmakuljetuksena. Ilmakuljetus on kallis ja se soveltuu harvoin isojen rakenteiden kuljetukseen.

Teräsrakenteet saattavat olla niin suuria, että esimerkiksi maantiekuljetuksessa joudutaan käyttämään erikoiskuljetusta, vaikka suunnittelija pyrkii suunnittelemaan rakenteet normaalikuljetuksen mitta- ja painorajojen mukaan. Tie- ja rautatiekuljetusten mittojen ja painojen rajat normaali- ja erikoiskuljetukselle vaihtelevat maittain.

10.2 Tiekuljetuksen mitta- ja painorajat sekä kuljetusluvat

Tiekuljetus voi olla joko yleisesti teillä sallituissa rajoissa, erikoiskuljetus vapaissa mittarajoissa tai erikoiskuljetus luvan perusteella. Tiekuljetuksen mittarajat ajoneuvoyhdistelmällä kuljetettaessa ovat (mitat kuormattuna):

	YL (m)	EK (m)
Korkeus:	4,2	4,4
Leveys:	2,55	4,0
Pituus:		
• kuorma-auto ja puoliperävaunu	16,5	30,0
• moduuliyhdistelmät Suomessa	25,25	27,0

YL = enintään yleisesti tielle sallitut mitat
EK = erikoiskuljetukselle enintään tielle sallitut vapaat mitat (ei vaadi erillistä lupaa)

Erikoiskuljetuksissa on huomioitava esimerkiksi se, että leveyden ylittäessä 3,5 metriä, vaaditaan varoitusauto edessä, joka lisää selkeästi kuljetuskustannuksia. Suunnittelussa on siis huomioitava kestävyyden, valmistuksen ja asennuksen lisäksi myös rakenteen tai sen osien kuljetukseen liittyvät näkökohdat.

Erikoiskuljetuksessa pituuden rajoissa kuorman ylitykset takana saavat olla enintään varsinaisen perävaunun yhdistelmässä 4 metriä ja puoliperävaunun yhdistelmässä 6 metriä. Vapaita mittoja suuremmalle kuljetukselle voidaan myöntää erikoiskuljetuslupa. Erikoiskuljetusluvan voi Suomeen Ahvenanmaata lukuun ottamattta myöntää Pirkanmaan ELY-keskus (vuoden 2010 alusta toistaiseksi) yleisten teiden lisäksi kuntien kaduille. Yksityistielle riittää suostumus tienpitäjältä. Poliisi ei enää myönnä erikoiskuljetuslupia.

Kaikki yliraskaat kuljetukset tarvitsevat erikoiskuljetusluvan. Lupa voidaan myöntää, jos kuormana on yksi esine. Tielle yleisesti sallittujen painojen tärkeimmät rajat ovat:

• yksittäinen akseli	10 to
• vetävä yksittäinen akseli	11,5 to
• kaksiakselinen teli (akselivälistä riippuen)	11,5, 16 tai 18 to
• kolmeakselinen teli (akselivälistä riippuen)	21 tai 24 to
• ajoneuvo kaksiakselisena	18 to
• ajoneuvo kolmeakselisena	25 tai 26 to
• ajoneuvo neliakselisena	31 tai 32 to
• ajoneuvo viisiakselisena	38 to
• ajoneuvoyhdistelmä, auto ja puoliperävaunu	48 to
• ajoneuvoyhdistelmä neliakselisena	36 to
• ajoneuvoyhdistelmä viisiakselisena	44 to
• ajoneuvoyhdistelmä kuusiakselisena	53 to
• ajoneuvoyhdistelmä seitsemän tai useampiakselisena	60 to

Muiden kuin EU- tai ETA- valtiossa rekisteröityjen tai käyttöön otettujen ajoneuvoyhdistelmien painot ovat enimmillään 40 tonnia. Yksityiskohtaiset tiedot löytyvät asetuksesta ajoneuvojen käytöstä tiellä [2].

10.3 Rautatiekuljetus

Kuljetusvaunujen kuormauksessa noudatetaan VR Transpointin (ent. VR Cargo) julkaisemaa Tavaran kuormausohjeita, jotka löytyvät verkosta osoitteesta [www.vrtranspoint.fi]. Jos kyseistä ohjetta ei voida soveltaa, kyseessä on erikoiskuljetus, joka vaatii kuljetusluvan. Luvan laatii VR Transpointin kotimaan tavarankuljetusyksikkö [3].

Rautatiekuljetusta käsitellään lähteessä [3]. Siinä esitetään kuljetuksessa käytettävät tavarankuljetusvaunut sekä vaunujen kuormausalat ja maksimikuormat. Kuljetukseen valittavan vaunun tyyppi riippuu rakenteen muodosta sekä painosta.

10.4 Lähdeluettelo

[1] Rautaruukin terästuotteiden käsittelyohje 1995.
(The Handling Manual of Rautaruukki's Steel Products 1995, in finnish).
Rautaruukki, Raahen terästehdas. 1994. 208 s.

[2] Suomen säädöskokoelma. Asetus ajoneuvojen käytöstä tiellä:
Asetukset 1257/1992, 670/1997, 230/2002, 326/2004.

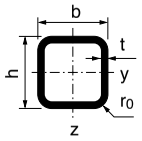
[3] VR Transpoint (aikaisemmin VR Cargo),
verkkosivut [www.vrtranspoint.fi] (7.5.2012)

11. LIITTEET

Liite 11.1 Rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajeille S355J2H ja S420MH

Taulukko	Teräslaji		Rakenneputken muoto
11.1.1	S355J2H		Neliö
11.1.2	S355J2H		Suorakaide
11.1.3	S355J2H		Pyöreä pituussaumahitsattu
11.1.4	S355J2H		Pyöreä kierresaumahitsattu
11.1.5		S420MH	Neliö
11.1.6		S420MH	Suorakaide
11.1.7		S420MH	Pyöreä pituussaumahitsattu
11.1.8		S420MH	Pyöreä kierresaumahitsattu

Taulukko 11.1.1 Neliön muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

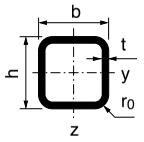
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
25	25	2	1,36	1,74	0,093	536	2,53	1,80	1,48	1,19	1,47	0,92	1	61,66	0,52	17,80
25	25	2,5	1,64	2,09	0,091	438	2,97	2,07	1,69	1,35	1,71	0,90	1	74,16	0,61	21,41
25	25	3	1,89	2,41	0,090	372	3,33	2,27	1,84	1,47	1,91	0,87	1	85,49	0,68	24,68
30	30	2	1,68	2,14	0,113	529	4,54	2,75	2,72	1,82	2,21	1,13	1	75,86	0,78	21,90
30	30	2,5	2,03	2,59	0,111	430	5,40	3,20	3,16	2,10	2,61	1,10	1	91,91	0,93	26,53
30	30	3	2,36	3,01	0,110	365	6,15	3,58	3,50	2,34	2,96	1,08	1	106,8	1,05	30,83
40	40	2	2,31	2,94	0,153	521	11,28	5,23	6,94	3,47	4,13	1,54	1	104,3	1,47	30,10
40	40	2,5	2,82	3,59	0,151	422	13,61	6,21	8,22	4,11	4,97	1,51	1	127,4	1,76	36,78
40	40	3	3,30	4,21	0,150	356	15,75	7,07	9,32	4,66	5,72	1,49	1	149,4	2,03	43,13
40	40	4	4,20	5,35	0,146	273	19,44	8,48	11,07	5,54	7,01	1,44	1	189,9	2,49	54,81
50	50	2	2,93	3,74	0,193	517	22,63	8,51	14,15	5,66	6,66	1,95	1	132,7	2,37	38,30
50	50	2,5	3,60	4,59	0,191	417	27,53	10,22	16,94	6,78	8,07	1,92	1	162,9	2,87	47,03
50	50	3	4,25	5,41	0,190	351	32,13	11,76	19,47	7,79	9,39	1,90	1	192,0	3,33	55,42
50	50	4	5,45	6,95	0,186	268	40,42	14,43	23,74	9,49	11,73	1,85	1	246,7	4,16	71,20
50	50	5	6,56	8,36	0,183	219	47,46	16,56	27,04	10,82	13,70	1,80	1	296,6	4,86	85,63
60	60	2	3,56	4,54	0,233	514	39,79	12,59	25,14	8,38	9,79	2,35	2	161,1	3,48	46,49
60	60	2,5	4,39	5,59	0,231	414	48,66	15,22	30,34	10,11	11,93	2,33	1	198,4	4,24	57,28
60	60	3	5,19	6,61	0,230	348	57,09	17,65	35,13	11,71	13,95	2,31	1	234,6	4,95	67,72
60	60	4	6,71	8,55	0,226	265	72,64	21,97	43,55	14,52	17,64	2,26	1	303,5	6,26	87,60
60	60	5	8,13	10,36	0,223	215	86,42	25,61	50,49	16,83	20,88	2,21	1	367,6	7,41	106,1
70	70	2,5	5,17	6,59	0,271	412	78,49	21,22	49,41	14,12	16,54	2,74	1	233,9	5,87	67,52
70	70	3	6,13	7,81	0,270	345	92,42	24,74	57,53	16,44	19,42	2,71	1	277,2	6,89	80,02
70	70	4	7,97	10,15	0,266	262	118,5	31,11	72,12	20,61	24,76	2,67	1	360,3	8,79	104,0
70	70	5	9,70	12,36	0,263	213	142,2	36,65	84,63	24,18	29,56	2,62	1	438,6	10,49	126,6

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
80	80	2,5	5,96	7,59	0,311	410	118,5	28,22	75,15	18,79	21,90	3,15	2	269,4	7,77	77,77
80	80	3	7,07	9,01	0,310	344	139,9	33,02	87,84	21,96	25,78	3,12	1	319,8	9,15	92,32
80	80	4	9,22	11,75	0,306	261	180,4	41,84	111,0	27,76	33,07	3,07	1	417,1	11,74	120,4
80	80	5	11,3	14,36	0,303	211	217,8	49,68	131,4	32,86	39,74	3,03	1	509,6	14,11	147,1
80	80	6	13,2	16,83	0,299	178	252,1	56,59	149,2	37,29	45,79	2,98	1	597,6	16,25	172,5
90	90	2,5	6,74	8,59	0,351	409	170,3	36,23	108,6	24,12	28,00	3,56	3	304,9	8,56	88,02
90	90	3	8,01	10,21	0,350	343	201,4	42,51	127,3	28,29	33,04	3,53	2	362,4	11,73	104,6
90	90	4	10,5	13,35	0,346	259	260,8	54,17	161,9	35,98	42,58	3,48	1	473,9	15,12	136,8
90	90	5	12,8	16,36	0,343	210	316,3	64,70	192,9	42,87	51,41	3,43	1	580,6	18,25	167,6
90	90	6	15,1	19,23	0,339	176	367,8	74,16	220,5	49,00	59,54	3,39	1	682,8	21,14	197,1
100	100	3	8,96	11,41	0,390	342	278,7	53,19	177,0	35,41	41,21	3,94	2	405,0	14,63	116,9
100	100	4	11,7	14,95	0,386	258	362,0	68,10	226,4	45,27	53,30	3,89	1	530,7	18,92	153,2
100	100	5	14,4	18,36	0,383	209	440,5	81,72	271,1	54,22	64,59	3,84	1	651,6	22,93	188,1
100	100	6	17,0	21,63	0,379	175	514,2	94,12	311,5	62,29	75,10	3,79	1	768,0	26,66	221,7
100	100	7,1	19,4	24,65	0,370	150	589,2	105,6	340,1	68,03	83,59	3,71	1	875,2	29,67	252,6
100	100	8	21,4	27,24	0,366	134	644,5	114,2	365,9	73,19	91,05	3,67	1	967,1	32,32	279,2
100	100	10	25,6	32,57	0,357	110	749,8	130,1	411,1	82,22	105,3	3,55	1	1156	37,36	333,7
110	110	2,5	8,31	10,59	0,431	407	314,9	55,23	202,4	36,80	42,47	4,37	4	320,5	11,86	108,5
110	110	3	9,90	12,61	0,430	341	373,5	65,07	238,3	43,33	50,27	4,35	3	447,6	15,38	129,2
110	110	4	13,0	16,55	0,426	258	486,5	83,63	305,9	55,62	65,21	4,30	1	587,5	23,15	169,6
110	110	5	16,0	20,36	0,423	208	593,6	100,7	367,9	66,90	79,27	4,25	1	722,6	28,14	208,6
110	110	6	18,9	24,03	0,419	175	694,9	116,5	424,6	77,19	92,46	4,20	1	853,2	32,82	246,3
120	120	3	10,8	13,81	0,470	340	487,7	78,15	312,3	52,06	60,24	4,76	4	445,7	17,44	141,5
120	120	4	14,2	18,15	0,466	257	636,6	100,8	402,3	67,05	78,33	4,71	2	644,3	27,81	186,0
120	120	5	17,5	22,36	0,463	207	778,5	121,8	485,5	80,91	95,45	4,66	1	793,6	33,88	229,1
120	120	5,6	19,5	24,82	0,461	186	860,3	133,6	532,3	88,71	105,3	4,63	1	881,0	37,37	254,3
120	120	6	20,7	26,43	0,459	174	913,5	141,2	562,2	93,69	111,6	4,61	1	938,4	39,62	270,9
120	120	7,1	23,8	30,33	0,450	148	1056	160,1	623,5	103,9	125,7	4,53	1	1077	44,62	310,9
120	120	8	26,4	33,64	0,446	132	1163	174,6	676,9	112,8	137,8	4,49	1	1194	48,92	344,8
120	120	8,8	28,6	36,48	0,442	121	1252	186,5	719,9	120,0	147,9	4,44	1	1295	52,50	373,9
120	120	10	31,8	40,57	0,437	108	1376	202,5	776,8	129,5	161,8	4,38	1	1440	57,44	415,7
140	140	4	16,8	21,35	0,546	256	1023	139,8	651,6	93,09	108,2	5,52	3	757,9	33,05	218,8
140	140	5	20,7	26,36	0,543	206	1256	169,8	790,6	112,9	132,3	5,48	1	935,6	46,97	270,1
140	140	5,6	23,0	29,30	0,541	185	1391	186,9	869,6	124,2	146,3	5,45	1	1040	51,92	300,2
140	140	6	24,5	31,23	0,539	173	1479	197,9	920,4	131,5	155,3	5,43	1	1109	55,14	320,1
140	140	7,1	28,3	36,01	0,530	147	1719	226,0	1032	147,4	176,3	5,35	1	1278	62,59	369,1
140	140	8	31,4	40,04	0,526	131	1901	247,7	1127	161,0	194,2	5,30	1	1422	68,93	410,4
140	140	8,8	34,2	43,52	0,522	120	2055	265,8	1205	172,1	209,2	5,26	1	1545	74,28	446,0
140	140	10	38,1	48,57	0,517	106	2274	290,9	1312	187,4	230,4	5,20	1	1724	81,79	497,7

Taulukko 11.1.1 Neliön muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

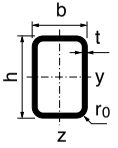
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
150	150	4	18,0	22,95	0,586	255	1265	161,7	807,8	107,7	124,9	5,93	4	771,4	36,97	235,2
150	150	5	22,3	28,36	0,583	206	1554	196,8	982,1	130,9	153,0	5,89	2	1007	54,31	290,6
150	150	6	26,4	33,63	0,579	172	1833	229,8	1146	152,8	179,9	5,84	1	1194	63,86	344,7
150	150	7,1	30,5	38,85	0,570	147	2134	263,2	1290	172,0	204,8	5,76	1	1379	72,71	398,2
150	150	8	33,9	43,24	0,566	131	2364	289,0	1412	188,2	226,0	5,71	1	1535	80,21	443,2
150	150	8,8	36,9	47,04	0,562	120	2560	310,7	1513	201,7	243,9	5,67	1	1670	86,57	482,1
150	150	10	41,3	52,57	0,557	106	2839	341,0	1653	220,3	269,2	5,61	1	1866	95,55	538,7
150	150	12,5	48,7	62,04	0,536	86	3321	389,3	1817	242,3	305,6	5,41	1	2203	108,5	635,8
160	160	4	19,3	24,55	0,626	255	1542	185,3	987,2	123,4	142,8	6,34	4	792,3	41,33	251,6
160	160	5	23,8	30,36	0,623	205	1896	225,8	1202	150,3	175,2	6,29	2	1078	62,18	311,1
160	160	6	28,3	36,03	0,619	172	2239	264,2	1405	175,7	206,2	6,25	1	1279	73,22	369,3
160	160	7,1	32,7	41,69	0,610	146	2611	303,2	1587	198,4	235,5	6,17	1	1480	83,59	427,3
160	160	8	36,5	46,44	0,606	130	2897	333,6	1741	217,7	260,1	6,12	1	1649	92,35	475,9
160	160	8,8	39,7	50,56	0,602	119	3141	359,2	1870	233,7	281,1	6,08	1	1795	99,80	518,2
160	160	10	44,4	56,57	0,597	106	3490	395,1	2048	256,0	311,0	6,02	1	2008	110,4	579,7
160	160	12,5	52,6	67,04	0,576	86	4114	454,6	2275	284,4	355,7	5,83	1	2380	126,3	687,1
180	180	5	27,0	34,36	0,703	205	2724	289,8	1737	193,0	224,0	7,11	3	1220	68,51	352,1
180	180	6	32,1	40,83	0,699	171	3223	340,1	2037	226,3	264,4	7,06	2	1450	93,85	418,5
180	180	7,1	37,2	47,37	0,690	146	3768	391,7	2313	257,0	303,1	6,99	1	1682	107,6	485,5
180	180	8	41,5	52,84	0,686	130	4189	432,2	2546	282,9	335,7	6,94	1	1876	119,2	541,5
180	180	8,8	45,2	57,60	0,682	118	4551	466,6	2742	304,6	363,6	6,90	1	2045	129,1	590,3
180	180	10	50,7	64,57	0,677	105	5074	515,3	3017	335,2	403,5	6,84	1	2292	143,3	661,7
180	180	12,5	60,5	77,04	0,656	85	6050	600,1	3406	378,5	467,1	6,65	1	2735	165,8	789,5

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
200	200	5	30,1	38,36	0,783	204	3763	361,8	2410	241,0	278,9	7,93	4	1238	80,72	393,1
200	200	6	35,8	45,63	0,779	171	4459	425,5	2833	283,3	329,7	7,88	2	1620	117,0	467,6
200	200	7,1	41,6	53,05	0,770	145	5223	491,6	3232	323,2	379,3	7,81	1	1883	134,7	543,7
200	200	8	46,5	59,24	0,766	129	5815	543,6	3566	356,6	420,9	7,76	1	2103	149,4	607,1
200	200	8,8	50,7	64,64	0,762	118	6328	588,1	3850	385,0	456,6	7,72	1	2295	162,1	662,5
200	200	10	57,0	72,57	0,757	104	7072	651,5	4251	425,1	508,1	7,65	1	2576	180,4	743,7
200	200	12,5	68,3	87,04	0,736	85	8502	765,5	4859	485,9	593,5	7,47	1	3090	210,7	892,0
220	220	6	39,6	50,43	0,859	170	5976	520,6	3813	346,7	402,2	8,70	3	1790	123,1	516,8
220	220	7,1	46,1	58,73	0,850	145	7010	602,9	4367	397,0	464,0	8,62	2	2085	164,7	601,9
220	220	8	51,5	65,64	0,846	129	7815	667,9	4828	438,9	515,6	8,58	1	2330	183,1	672,7
220	220	8,8	56,3	71,68	0,842	117	8514	723,6	5221	474,7	560,2	8,53	1	2545	198,9	734,6
220	220	10	63,2	80,57	0,837	104	9533	803,6	5782	525,7	624,7	8,47	1	2860	221,8	825,6
220	220	12,5	76,2	97,04	0,816	84	11530	950,8	6674	606,7	734,9	8,29	1	3445	260,9	994,5
250	250	6	45,2	57,63	0,979	170	8843	681,2	5672	453,8	524,5	9,92	4	1811	149,6	590,6
250	250	7,1	52,8	67,25	0,970	144	10387	791,0	6523	521,8	607,1	9,85	3	2387	185,2	689,2
250	250	8	59,1	75,24	0,966	128	11598	878,2	7229	578,3	675,8	9,80	2	2671	239,9	771,1
250	250	8,8	64,6	82,24	0,962	117	12653	953,3	7835	626,8	735,3	9,76	1	2920	261,0	842,8
250	250	10	72,7	92,57	0,957	103	14197	1062	8707	696,5	822,0	9,70	1	3286	291,8	948,6
250	250	12,5	88,0	112,0	0,936	84	17283	1266	10161	812,9	975,2	9,52	1	3978	346,2	1148
260	260	6	47,1	60,03	1,019	170	9970	739,5	6405	492,7	568,8	10,33	4	1836	159,8	615,2
260	260	7,1	55,0	70,09	1,010	144	11716	859,4	7374	567,2	659,0	10,26	3	2488	201,4	718,3
260	260	8	61,6	78,44	1,006	128	13087	954,7	8178	629,1	734,0	10,21	2	2785	260,6	803,9
260	260	8,8	67,3	85,76	1,002	117	14283	1037	8869	682,2	799,0	10,17	1	3045	283,6	878,9
260	260	10	75,8	96,57	0,997	103	16035	1156	9865	758,8	893,8	10,11	1	3428	317,3	989,6
260	260	12,5	91,9	117,0	0,976	83	19553	1381	11548	888,3	1063	9,93	1	4155	377,3	1199
300	300	6	54,7	69,63	1,179	169	15434	996,8	9964	664,2	764,2	11,96	4	1921	203,0	713,6
300	300	7,1	63,9	81,45	1,170	144	18160	1161	11516	767,7	888,0	11,89	4	2533	251,5	834,7
300	300	8	71,6	91,24	1,166	128	20312	1293	12801	853,4	990,7	11,84	4	3066	292,9	935,1
300	300	8,8	78,4	99,84	1,162	116	22195	1406	13911	927,4	1080	11,80	3	3544	329,2	1023
300	300	10	88,4	112,6	1,157	103	24966	1572	15519	1035	1211	11,74	2	3996	429,9	1154
300	300	12,5	108,0	137,0	1,136	83	30601	1892	18348	1223	1451	11,57	1	4865	515,0	1404

Taulukko 11.1.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

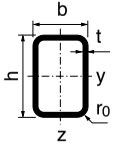
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
																	h	b					
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10			kN	kNm	kNm	kN	kN
40	20	2	1,68	2,14	0,113	529	3,45	2,36	4,05	2,02	2,61	1,38	1,34	1,34	1,60	0,79	1	1	75,86	0,93	0,57	14,60	29,20
40	20	2,5	2,03	2,59	0,111	430	4,06	2,72	4,69	2,35	3,09	1,35	1,54	1,54	1,88	0,77	1	1	91,91	1,10	0,67	17,69	35,38
40	20	3	2,36	3,01	0,110	365	4,57	3,00	5,21	2,60	3,50	1,32	1,68	1,68	2,12	0,75	1	1	106,8	1,24	0,75	20,55	41,10
40	30	2	1,99	2,54	0,133	525	7,07	3,79	5,49	2,75	3,37	1,47	3,51	2,34	2,77	1,18	1	1	90,06	1,20	0,98	22,28	29,71
40	30	2,5	2,42	3,09	0,131	425	8,47	4,46	6,45	3,23	4,03	1,45	4,10	2,74	3,30	1,15	1	1	109,7	1,43	1,17	27,13	36,18
40	30	3	2,83	3,61	0,130	359	9,72	5,03	7,27	3,63	4,61	1,42	4,60	3,07	3,77	1,13	1	1	128,1	1,64	1,34	31,69	42,26
50	30	2	2,31	2,94	0,153	521	9,77	4,84	9,54	3,81	4,74	1,80	4,29	2,86	3,33	1,21	1	1	104,3	1,68	1,18	22,57	37,62
50	30	2,5	2,82	3,59	0,151	422	11,74	5,72	11,30	4,52	5,70	1,77	5,05	3,37	3,98	1,19	1	1	127,4	2,02	1,41	27,59	45,98
50	30	3	3,30	4,21	0,150	356	13,53	6,49	12,83	5,13	6,57	1,75	5,70	3,80	4,58	1,16	1	1	149,4	2,33	1,63	32,34	53,91
50	30	4	4,20	5,35	0,146	273	16,53	7,71	15,25	6,10	8,05	1,69	6,69	4,46	5,58	1,12	1	1	189,9	2,86	1,98	41,10	68,51
60	40	2	2,93	3,74	0,193	517	20,70	8,12	18,41	6,14	7,47	2,22	9,83	4,92	5,65	1,62	2	1	132,7	2,65	2,01	30,64	45,96
60	40	2,5	3,60	4,59	0,191	417	25,14	9,72	22,07	7,36	9,06	2,19	11,74	5,87	6,84	1,60	1	1	162,9	3,21	2,43	37,62	56,43
60	40	3	4,25	5,41	0,190	351	29,28	11,17	25,38	8,46	10,53	2,17	13,44	6,72	7,94	1,58	1	1	192,0	3,74	2,82	44,34	66,51
60	40	4	5,45	6,95	0,186	268	36,67	13,65	30,99	10,33	13,16	2,11	16,28	8,14	9,89	1,53	1	1	246,7	4,67	3,51	56,96	85,44
60	40	5	6,56	8,36	0,183	219	42,85	15,60	35,33	11,78	15,38	2,06	18,43	9,21	11,52	1,48	1	1	296,6	5,46	4,09	68,51	102,8
70	50	2	3,56	4,54	0,233	514	37,45	12,20	31,48	8,99	10,80	2,63	18,76	7,50	8,58	2,03	3	1	161,1	3,83	2,66	38,75	54,24
70	50	2,5	4,39	5,59	0,231	414	45,75	14,72	38,01	10,86	13,16	2,61	22,59	9,04	10,45	2,01	1	1	198,4	4,67	3,71	47,73	66,82
70	50	3	5,19	6,61	0,230	348	53,62	17,06	44,05	12,59	15,40	2,58	26,10	10,44	12,21	1,99	1	1	234,6	5,47	4,33	56,43	79,01
70	50	4	6,71	8,55	0,226	265	68,07	21,19	54,67	15,62	19,48	2,53	32,22	12,89	15,41	1,94	1	1	303,5	6,91	5,47	73,00	102,2
70	50	5	8,13	10,36	0,223	215	80,77	24,64	63,46	18,13	23,06	2,48	37,20	14,88	18,20	1,90	1	1	367,6	8,19	6,46	88,44	123,8
80	40	2	3,56	4,54	0,233	514	30,88	11,00	37,36	9,34	11,61	2,87	12,72	6,36	7,17	1,67	4	1	151,2	4,12	2,10	31,00	61,99
80	40	2,5	4,39	5,59	0,231	414	37,58	13,24	45,11	11,28	14,15	2,84	15,26	7,63	8,72	1,65	2	1	198,4	5,02	3,09	38,18	76,37
80	40	3	5,19	6,61	0,230	348	43,88	15,28	52,25	13,06	16,54	2,81	17,56	8,78	10,16	1,63	1	1	234,6	5,87	3,61	45,15	90,29
80	40	4	6,71	8,55	0,226	265	55,24	18,84	64,79	16,20	20,91	2,75	21,49	10,74	12,77	1,59	1	1	303,5	7,42	4,54	58,40	116,8
80	40	5	8,13	10,36	0,223	215	64,97	21,74	75,11	18,78	24,74	2,69	24,59	12,30	15,02	1,54	1	1	367,6	8,78	5,33	70,75	141,5

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
80	60	2,5	5,17	6,59	0,271	412	75,07	20,73	60,13	15,03	18,02	3,02	38,61	12,87	14,81	2,42	2	1	233,9	6,40	5,26	57,88	77,17
80	60	3	6,13	7,81	0,270	345	88,35	24,14	70,05	17,51	21,16	3,00	44,89	14,96	17,37	2,40	1	1	277,2	7,51	6,17	68,59	91,45
80	60	4	7,97	10,15	0,266	262	113,1	30,32	87,92	21,98	26,99	2,94	56,12	18,71	22,12	2,35	1	1	360,3	9,58	7,85	89,14	118,9
80	60	5	9,70	12,36	0,263	213	135,5	35,67	103,3	25,82	32,24	2,89	65,66	21,89	26,38	2,31	1	1	438,6	11,44	9,36	108,5	144,7
90	50	2,5	5,17	6,59	0,271	412	65,30	19,24	70,26	15,61	19,25	3,27	28,24	11,29	12,82	2,07	3	1	233,9	6,83	4,01	48,23	86,82
90	50	3	6,13	7,81	0,270	345	76,67	22,36	81,85	18,19	22,60	3,24	32,74	13,10	15,03	2,05	2	1	277,2	8,02	5,33	57,16	102,9
90	50	4	7,97	10,15	0,266	262	97,70	27,96	102,7	22,82	28,82	3,18	40,71	16,28	19,09	2,00	1	1	360,3	10,23	6,78	74,28	133,7
90	50	5	9,70	12,36	0,263	213	116,5	32,75	120,6	26,80	34,41	3,12	47,37	18,95	22,70	1,96	1	1	438,6	12,22	8,06	90,45	162,8
100	40	2,5	5,17	6,59	0,271	412	50,52	16,76	79,32	15,86	20,23	3,47	18,78	9,39	10,59	1,69	4	1	218,5	7,18	3,09	38,59	96,46
100	40	3	6,13	7,81	0,270	345	59,05	19,39	92,34	18,47	23,75	3,44	21,67	10,84	12,38	1,67	2	1	277,2	8,43	4,40	45,72	114,3
100	40	4	7,97	10,15	0,266	262	74,53	24,04	115,7	23,14	30,26	3,38	26,69	13,35	15,65	1,62	1	1	360,3	10,74	5,56	59,43	148,6
100	40	5	9,70	12,36	0,263	213	87,92	27,90	135,6	27,12	36,09	3,31	30,76	15,38	18,52	1,58	1	1	438,6	12,81	6,58	72,36	180,9
100	50	2,5	5,56	7,09	0,291	411	75,39	21,49	91,20	18,24	22,67	3,59	31,06	12,42	14,01	2,09	4	1	236,2	8,05	4,11	48,43	96,86
100	50	3	6,60	8,41	0,290	345	88,56	25,01	106,5	21,29	26,66	3,56	36,06	14,42	16,44	2,07	2	1	298,5	9,46	5,84	57,44	114,9
100	50	4	8,59	10,95	0,286	261	113,0	31,35	134,1	26,83	34,10	3,50	44,95	17,98	20,93	2,03	1	1	388,7	12,11	7,43	74,80	149,6
100	50	5	10,5	13,36	0,283	212	134,9	36,80	158,2	31,64	40,84	3,44	52,45	20,98	24,95	1,98	1	1	474,1	14,50	8,86	91,25	182,5
100	50	6	12,3	15,63	0,279	179	154,2	41,43	178,8	35,75	46,90	3,38	58,67	23,47	28,52	1,94	1	1	555,0	16,65	10,12	106,8	213,6
100	60	2,5	5,96	7,59	0,311	410	103,3	26,23	103,1	20,62	25,11	3,69	46,88	15,63	17,68	2,49	4	1	254,0	8,91	5,18	58,33	97,22
100	60	3	7,07	9,01	0,310	344	121,7	30,64	120,6	24,11	29,57	3,66	54,65	18,22	20,79	2,46	2	1	319,8	10,50	7,38	69,24	115,4
100	60	4	9,22	11,75	0,306	261	156,3	38,68	152,6	30,52	37,94	3,60	68,68	22,89	26,60	2,42	1	1	417,1	13,47	9,44	90,29	150,5
100	60	5	11,3	14,36	0,303	211	187,9	45,75	180,8	36,15	45,59	3,55	80,83	26,94	31,88	2,37	1	1	509,6	16,18	11,32	110,3	183,9
100	60	6	13,2	16,83	0,299	178	216,4	51,92	205,3	41,06	52,54	3,49	91,20	30,40	36,64	2,33	1	1	597,6	18,65	13,01	129,4	215,6
100	80	2,5	6,74	8,59	0,351	409	165,8	35,73	126,9	25,37	29,98	3,84	90,17	22,54	25,77	3,24	4	2	289,5	10,64	7,52	78,24	97,80
100	80	3	8,01	10,21	0,350	343	196,1	41,91	148,8	29,76	35,39	3,82	105,6	26,41	30,40	3,22	2	1	362,4	12,56	10,79	92,99	116,2
100	80	4	10,5	13,35	0,346	259	253,8	53,38	189,5	37,89	45,62	3,77	134,2	33,54	39,15	3,17	1	1	473,9	16,19	13,90	121,6	152,0
100	80	5	12,8	16,36	0,343	210	307,6	63,72	225,9	45,19	55,09	3,72	159,6	39,90	47,24	3,12	1	1	580,6	19,56	16,77	149,0	186,2
100	80	6	15,1	19,23	0,339	176	357,4	72,98	258,4	51,68	63,82	3,67	182,1	45,53	54,67	3,08	1	1	682,8	22,66	19,41	175,2	219,0
120	40	2,5	5,96	7,59	0,311	410	63,77	20,27	126,7	21,12	27,32	4,09	22,30	11,15	12,47	1,71	4	1	228,5	9,70	3,31	38,89	116,7
120	40	3	7,07	9,01	0,310	344	74,56	23,51	148,0	24,67	32,16	4,05	25,79	12,89	14,60	1,69	4	1	297,5	11,42	4,24	46,16	138,5
120	40	4	9,22	11,75	0,306	261	94,23	29,24	186,9	31,15	41,21	3,99	31,90	15,95	18,53	1,65	2	1	417,1	14,63	6,58	60,20	180,6
120	40	5	11,3	14,36	0,303	211	111,4	34,05	220,8	36,80	49,45	3,92	36,93	18,46	22,02	1,60	1	1	509,6	17,55	7,82	73,56	220,7
120	40	6	13,2	16,83	0,299	178	126,0	38,02	250,0	41,66	56,89	3,85	40,97	20,49	25,08	1,56	1	1	597,6	20,20	8,90	86,25	258,8
120	50	2,5	6,35	8,09	0,331	410	96,03	26,01	144,0	23,99	30,26	4,22	36,70	14,68	16,39	2,13	4	1	246,2	10,74	4,39	48,76	117,0
120	50	3	7,54	9,61	0,330	343	112,9	30,32	168,6	28,10	35,67	4,19	42,69	17,08	19,26	2,11	4	1	318,8	12,66	5,63	57,92	139,0
120	50	4	9,85	12,55	0,326	260	144,2	38,13	213,8	35,64	45,85	4,13	53,43	21,37	24,61	2,06	2	1	445,5	16,28	8,74	75,64	181,5
120	50	5	12,1	15,36	0,323	210	172,4	44,92	253,9	42,32	55,20	4,07	62,62	25,05	29,45	2,02	1	1	545,1	19,60	10,46	92,57	222,2
120	50	6	14,2	18,03	0,319	177	197,6	50,76	289,0	48,16	63,73	4,00	70,36	28,14	33,80	1,98	1	1	640,2	22,63	12,00	108,7	260,9
120	60	2,5	6,74	8,59	0,351	409	132,6	31,75	161,2	26,87	33,20	4,33	55,15	18,38	20,56	2,53	4	1	264,0	11,79	5,54	58,68	117,4
120	60	3	8,01	10,21	0,350	343	156,3	37,14	189,1	31,52	39,18	4,30	64,40	21,47	24,21	2,51	4	1	340,1	13,91	7,10	69,74	139,5
120	60	4	10,5	13,35	0,346	259	201,1	47,05	240,7	40,12	50,49	4,25	81,25	27,08	31,08	2,47	2	1	473,9	17,92	11,03	91,19	182,4
120	60	5	12,8	16,36	0,343	210	242,2	55,85	287,0	47,83	60,95	4,19	95,99	32,00	37,38	2,42	1	1	580,6	21,64	13,27	111,7	223,5
120	60	6	15,1	19,23	0,339	176	279,7	63,60	328,0	54,67	70,57	4,13	108,8	36,26	43,12	2,38	1	1	682,8	25,05	15,31	131,4	262,8

Taulukko 11.1.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

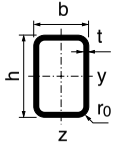
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
120	80	2,5	7,53	9,59	0,391	408	215,8	43,23	195,8	32,63	39,07	4,52	105,2	26,30	29,65	3,31	4	2	299,5	13,87	8,02	78,61	117,9
120	80	3	8,96	11,41	0,390	342	255,5	50,80	230,2	38,37	46,20	4,49	123,4	30,86	35,02	3,29	4	1	382,7	16,40	10,25	93,53	140,3
120	80	4	11,7	14,95	0,386	258	331,2	64,93	294,6	49,10	59,77	4,44	157,3	39,32	45,23	3,24	2	1	530,7	21,22	16,06	122,6	183,8
120	80	5	14,4	18,36	0,383	209	402,3	77,77	353,1	58,86	72,45	4,39	187,8	46,94	54,74	3,20	1	1	651,6	25,72	19,43	150,5	225,7
120	80	6	17,0	21,63	0,379	175	468,5	89,40	406,1	67,68	84,25	4,33	215,0	53,76	63,55	3,15	1	1	768,0	29,91	22,56	177,4	266,0
120	80	7,1	19,4	24,65	0,369	150	535,1	99,99	442,1	73,68	93,59	4,24	234,4	58,60	70,68	3,08	1	1	875,0	33,22	25,09	202,1	303,1
120	80	8	21,4	27,24	0,366	134	584,0	108,0	475,8	79,31	102,0	4,18	251,7	62,92	76,93	3,04	1	1	967,1	36,20	27,31	223,3	335,0
120	80	8,8	23,1	29,44	0,362	123	623,5	114,3	501,8	83,63	108,8	4,13	264,8	66,21	81,97	3,00	1	1	1045	38,61	29,10	241,4	362,1
120	80	10	25,6	32,57	0,357	110	675,6	122,4	534,1	89,02	117,8	4,05	281,1	70,29	88,68	2,94	1	1	1156	41,82	31,48	267,0	400,5
120	100	2,5	8,31	10,59	0,431	407	309,4	54,73	230,3	38,38	44,95	4,66	174,4	34,88	39,73	4,06	4	4	319,5	12,90	10,75	98,65	118,4
120	100	3	9,90	12,61	0,430	341	367,0	64,47	271,3	45,21	53,22	4,64	205,3	41,06	47,03	4,04	4	2	425,3	18,89	13,70	117,5	141,0
120	100	4	13,0	16,55	0,426	258	477,8	82,83	348,4	58,07	69,05	4,59	263,2	52,65	60,98	3,99	2	1	587,5	24,51	21,65	154,2	185,0
120	100	5	16,0	20,36	0,423	208	582,9	99,75	419,3	69,88	83,95	4,54	316,3	63,25	74,09	3,94	1	1	722,6	29,80	26,30	189,6	227,6
120	100	6	18,9	24,03	0,419	175	682,0	115,3	484,1	80,68	97,93	4,49	364,6	72,91	86,38	3,89	1	1	853,2	34,77	30,67	223,9	268,7
140	60	2,5	7,53	9,59	0,391	408	162,7	37,26	236,6	33,79	42,29	4,97	63,43	21,14	23,43	2,57	4	1	271,0	15,01	5,81	58,96	137,6
140	60	3	8,96	11,41	0,390	342	191,9	43,64	278,1	39,73	49,98	4,94	74,16	24,72	27,63	2,55	4	1	352,5	17,74	7,52	70,15	163,7
140	60	4	11,7	14,95	0,386	258	247,1	55,42	355,6	50,80	64,63	4,88	93,81	31,27	35,56	2,51	3	1	530,7	22,95	11,10	91,91	214,5
140	60	5	14,4	18,36	0,383	209	298,0	65,94	425,9	60,84	78,30	4,82	111,2	37,05	42,88	2,46	1	1	651,6	27,80	15,22	112,9	263,4
140	60	6	17,0	21,63	0,379	175	344,5	75,29	489,2	69,88	91,01	4,76	126,3	42,11	49,60	2,42	1	1	768,0	32,31	17,61	133,0	310,4
140	70	2,5	7,92	10,09	0,411	408	213,1	44,00	260,2	37,17	45,72	5,08	89,30	25,51	28,35	2,98	4	1	288,7	16,23	7,07	68,93	137,9
140	70	3	9,43	12,01	0,410	341	252,0	51,66	306,2	43,75	54,09	5,05	104,7	29,91	33,49	2,95	4	1	373,8	19,20	9,15	82,04	164,1
140	70	4	12,4	15,75	0,406	258	326,0	65,94	392,6	56,09	70,07	4,99	133,2	38,05	43,24	2,91	3	1	559,1	24,88	13,51	107,6	215,2
140	70	5	15,2	19,36	0,403	208	395,1	78,88	471,5	67,35	85,05	4,94	158,7	45,35	52,31	2,86	1	1	687,1	30,19	18,57	132,2	264,5
140	70	6	17,9	22,83	0,399	175	459,1	90,54	543,1	77,59	99,05	4,88	181,4	51,84	60,71	2,82	1	1	810,6	35,16	21,55	156,0	312,0
140	80	3	9,90	12,61	0,430	341	317,1	59,69	334,4	47,77	58,20	5,15	141,2	35,31	39,64	3,35	4	1	395,1	20,66	10,85	93,97	164,5
140	80	4	13,0	16,55	0,426	258	411,6	76,48	429,6	61,37	75,51	5,10	180,4	45,10	51,31	3,30	3	1	587,5	26,81	16,01	123,3	215,8
140	80	5	16,0	20,36	0,423	208	500,5	91,83	517,1	73,87	91,80	5,04	215,9	53,99	62,24	3,26	1	1	722,6	32,59	22,09	151,7	265,5
140	80	6	18,9	24,03	0,419	175	583,8	105,8	597,0	85,29	107,1	4,98	248,0	61,99	72,43	3,21	1	1	853,2	38,02	25,71	179,1	313,5

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
150	50	2,5	7,53	9,59	0,391	408	127,7	32,78	254,1	33,88	43,52	5,15	45,17	18,07	19,95	2,17	4	1	256,0	15,45	4,69	49,13	147,4
150	50	3	8,96	11,41	0,390	342	150,2	38,28	298,6	39,81	51,43	5,12	52,65	21,06	23,49	2,15	4	1	336,1	18,26	6,11	58,46	175,4
150	50	4	11,7	14,95	0,386	258	192,1	48,30	381,4	50,85	66,47	5,05	66,16	26,47	30,13	2,10	4	1	509,0	23,60	8,99	76,59	229,8
150	50	5	14,4	18,36	0,383	209	230,1	57,11	456,3	60,84	80,48	4,99	77,87	31,15	36,20	2,06	2	1	651,6	28,57	12,85	94,06	282,2
150	50	6	17,0	21,63	0,379	175	264,0	64,77	523,5	69,80	93,48	4,92	87,89	35,16	41,72	2,02	1	1	768,0	33,19	14,81	110,9	332,5
150	100	3	11,3	14,41	0,490	340	507,2	81,40	460,6	61,42	73,48	5,65	247,6	49,53	55,76	4,15	4	2	442,6	26,08	14,81	118,1	177,2
150	100	4	14,9	18,95	0,486	257	661,6	104,9	594,6	79,28	95,67	5,60	318,6	63,71	72,50	4,10	4	1	651,0	33,96	21,77	155,3	233,0
150	100	5	18,3	23,36	0,483	207	808,7	126,8	719,2	95,89	116,7	5,55	384,0	76,80	88,34	4,05	2	1	829,1	41,44	31,36	191,5	287,2
150	100	6	21,7	27,63	0,479	173	948,3	147,1	834,7	111,3	136,7	5,50	444,2	88,84	103,3	4,01	1	1	981,0	48,52	36,67	226,5	339,8
150	100	7,1	24,9	31,75	0,470	148	1096	166,8	926,9	123,6	154,1	5,40	493,6	98,72	116,6	3,94	1	1	1127	54,70	41,38	260,3	390,5
150	100	8	27,7	35,24	0,466	132	1206	181,9	1008	134,4	169,2	5,35	535,7	107,1	127,9	3,90	1	1	1251	60,05	45,39	288,9	433,4
150	100	8,8	30,0	38,24	0,462	121	1298	194,2	1074	143,2	181,7	5,30	569,5	113,9	137,3	3,86	1	1	1358	64,51	48,72	313,5	470,3
150	100	10	33,4	42,57	0,457	107	1426	211,0	1162	154,9	199,2	5,22	614,4	122,9	150,3	3,80	1	1	1511	70,70	53,34	349,0	523,5
160	70	4	13,6	17,35	0,446	257	389,7	75,90	549,0	68,63	86,62	5,63	150,6	43,04	48,52	2,95	4	1	576,3	30,75	14,20	108,2	247,4
160	70	5	16,8	21,36	0,443	207	472,5	90,96	661,6	82,70	105,4	5,57	179,9	51,39	58,81	2,90	2	1	758,1	37,42	20,88	133,2	304,5
160	70	6	19,8	25,23	0,439	174	549,6	104,6	764,8	95,60	123,1	5,51	206,1	58,88	68,39	2,86	1	1	895,8	43,69	24,28	157,4	359,8
160	70	8	25,2	32,04	0,426	133	683,7	126,7	908,7	113,6	150,7	5,33	243,3	69,50	83,55	2,76	1	1	1138	53,50	29,66	199,9	456,9
160	80	3	10,8	13,81	0,470	340	380,3	68,59	463,8	57,98	71,41	5,80	159,0	39,76	44,26	3,39	4	1	404,2	25,35	11,32	94,34	188,7
160	80	4	14,3	18,15	0,466	257	494,1	88,03	597,7	74,71	92,86	5,74	203,5	50,89	57,39	3,35	4	1	604,7	32,97	16,82	124,0	248,0
160	80	5	17,6	22,36	0,463	207	601,3	105,9	721,7	90,21	113,2	5,68	244,1	61,03	69,74	3,30	2	1	793,6	40,17	24,76	152,7	305,5
160	80	6	20,8	26,43	0,459	174	702,1	122,3	836,0	104,5	132,3	5,62	280,9	70,22	81,31	3,26	1	1	938,4	46,97	28,86	180,6	361,2
160	80	7,1	23,8	30,33	0,449	148	805,5	137,8	922,6	115,3	148,6	5,52	310,1	77,53	91,39	3,20	1	1	1077	52,74	32,44	207,2	414,4
160	80	8	26,4	33,64	0,446	132	882,3	149,5	1001	125,2	162,9	5,46	335,0	83,74	99,97	3,16	1	1	1194	57,81	35,49	229,8	459,7
160	80	10	31,8	40,57	0,437	108	1031	171,6	1146	143,3	191,0	5,32	379,8	94,95	116,7	3,06	1	1	1440	67,79	41,42	277,2	554,3
160	90	3	11,3	14,41	0,490	340	465,4	77,82	500,8	62,60	76,12	5,90	206,8	45,95	51,31	3,79	4	2	425,5	27,02	13,17	106,3	189,0
160	90	4	14,9	18,95	0,486	257	606,2	100,2	646,4	80,80	99,10	5,84	265,5	59,01	66,66	3,74	4	1	633,1	35,18	19,54	139,8	248,6
160	90	5	18,3	23,36	0,483	207	739,7	120,9	781,8	97,72	120,9	5,79	319,5	71,00	81,16	3,70	2	1	829,1	42,92	28,81	172,3	306,4
160	90	6	21,7	27,63	0,479	173	866,0	140,0	907,2	113,4	141,6	5,73	368,9	81,98	94,82	3,65	1	1	981,0	50,25	33,66	203,9	362,5
160	90	7,1	24,9	31,75	0,470	148	997,9	158,4	1006	125,8	159,5	5,63	409,3	90,96	106,9	3,59	1	1	1127	56,61	37,96	234,3	416,5
160	90	8	27,7	35,24	0,466	132	1097	172,4	1094	136,7	175,0	5,57	443,5	98,55	117,2	3,55	1	1	1251	62,13	41,60	260,0	462,3
160	90	8,8	30,0	38,24	0,462	121	1178	183,9	1165	145,6	188,0	5,52	470,8	104,6	125,7	3,51	1	1	1358	66,73	44,63	282,2	501,7
180	100	4	16,8	21,35	0,546	256	853,9	127,1	926,0	102,9	125,9	6,59	373,9	74,78	84,02	4,18	4	1	678,6	44,69	23,38	156,3	281,3
180	100	5	20,7	26,36	0,543	206	1045	153,9	1124	124,9	154,0	6,53	451,8	90,35	102,6	4,14	3	1	935,6	54,68	32,08	192,9	347,3
180	100	5,6	23,0	29,30	0,541	185	1155	169,1	1237	137,4	170,3	6,50	495,7	99,14	113,3	4,11	2	1	1040	60,44	40,21	214,5	386,0
180	100	6	24,5	31,23	0,539	173	1227	178,9	1310	145,5	180,8	6,48	523,8	104,8	120,2	4,10	2	1	1109	64,20	42,68	228,6	411,5
180	100	7,1	28,3	36,01	0,530	147	1420	203,5	1464	162,7	204,9	6,38	585,7	117,1	136,4	4,03	1	1	1278	72,75	48,41	263,6	474,5
180	100	8	31,4	40,04	0,526	131	1565	222,5	1598	177,6	225,6	6,32	637,5	127,5	149,9	3,99	1	1	1422	80,10	53,23	293,1	527,6
180	100	8,8	34,2	43,52	0,522	120	1688	238,2	1709	189,9	243,1	6,27	679,7	135,9	161,3	3,95	1	1	1545	86,28	57,27	318,6	573,5
180	100	10	38,1	48,57	0,517	106	1859	259,6	1859	206,6	267,5	6,19	736,4	147,3	177,3	3,89	1	1	1724	94,97	62,92	355,5	639,9

Taulukko 11.1.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus
(käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys
(ilman leikkauslommahdusta)

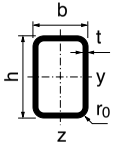
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
180	120	4	18,0	22,95	0,586	255	1160	154,6	1050	116,7	140,0	6,76	563,8	93,97	106,2	4,96	4	2	735,4	49,69	29,56	188,1	282,2
180	120	5	22,3	28,36	0,583	206	1424	187,8	1277	141,9	171,5	6,71	684,0	114,0	130,0	4,91	3	1	1007	60,89	40,47	232,5	348,7
180	120	6	26,4	33,63	0,579	172	1677	219,1	1491	165,7	201,7	6,66	796,3	132,7	152,7	4,87	2	1	1194	71,61	54,19	275,7	413,6
180	120	7,1	30,5	38,85	0,570	147	1949	250,5	1676	186,3	229,5	6,57	895,4	149,2	173,8	4,80	1	1	1379	81,46	61,69	318,5	477,8
180	120	8	34,0	43,24	0,566	131	2156	274,8	1835	203,9	253,1	6,51	978,4	163,1	191,6	4,76	1	1	1535	89,86	68,01	354,5	531,8
180	120	8,8	36,9	47,04	0,562	120	2332	295,1	1967	218,6	273,2	6,47	1047	174,5	206,6	4,72	1	1	1670	96,98	73,35	385,7	578,5
180	120	10	41,3	52,57	0,557	106	2582	323,3	2149	238,8	301,5	6,39	1141	190,1	227,8	4,66	1	1	1866	107,0	80,87	431,0	646,4
180	120	12,5	48,7	62,04	0,536	86	3001	367,5	2352	261,4	341,5	6,16	1252	208,7	258,5	4,49	1	1	2203	121,2	91,75	508,7	763,0
200	80	4	16,8	21,35	0,546	256	663,6	111,1	1046	104,6	132,4	7,00	249,8	62,45	69,55	3,42	4	1	635,4	46,99	18,24	125,0	312,5
200	80	5	20,7	26,36	0,543	206	808,4	134,1	1269	126,9	161,9	6,94	300,4	75,11	84,74	3,38	4	1	873,8	57,46	24,74	154,3	385,9
200	80	6	24,5	31,23	0,539	173	944,8	155,2	1477	147,7	190,0	6,88	346,7	86,69	99,07	3,33	2	1	1109	67,44	35,17	182,9	457,3
200	80	7,1	28,3	36,01	0,529	147	1086	175,6	1646	164,6	214,9	6,76	385,8	96,45	112,1	3,27	1	1	1278	76,29	39,79	210,9	527,1
200	80	8	31,4	40,04	0,526	131	1192	191,1	1796	179,6	236,5	6,70	418,2	104,6	123,0	3,23	1	1	1422	83,97	43,67	234,5	586,2
200	80	8,8	34,2	43,52	0,522	120	1279	203,8	1918	191,8	254,7	6,64	444,2	111,1	132,1	3,19	1	1	1545	90,41	46,89	254,9	637,2
200	80	10	38,1	48,57	0,517	106	1399	220,8	2083	208,3	280,1	6,55	478,5	119,6	144,7	3,14	1	1	1724	99,43	51,36	284,4	711,0
200	100	4	18,0	22,95	0,586	255	985,4	141,8	1200	120,0	148,00	7,23	410,8	82,16	91,70	4,23	4	1	692,2	52,55	24,22	156,8	313,6
200	100	5	22,3	28,36	0,583	206	1206	171,9	1459	145,9	181,40	7,17	496,9	99,39	112,1	4,19	4	1	944,8	64,39	32,85	193,7	387,5
200	100	6	26,4	33,63	0,579	172	1417	200,1	1703	170,3	213,30	7,12	576,9	115,4	131,5	4,14	2	1	1194	75,71	46,68	229,8	459,6
200	100	7,1	30,5	38,85	0,570	147	1641	228,1	1911	191,1	242,40	7,01	647,1	129,4	149,6	4,08	1	1	1379	86,03	53,09	265,4	530,9
200	100	8	34,0	43,24	0,566	131	1811	249,6	2091	209,1	267,30	6,95	705,4	141,1	164,7	4,04	1	1	1535	94,88	58,45	295,4	590,9
200	100	8,8	36,9	47,04	0,562	120	1954	267,5	2240	224,0	288,30	6,90	753,1	150,6	177,4	4,00	1	1	1670	102,4	62,97	321,4	642,8
200	100	10	41,3	52,57	0,557	106	2154	292,1	2444	244,4	318,10	6,82	817,7	163,6	195,3	3,94	1	1	1866	112,9	69,31	359,1	718,3
200	100	12,5	48,7	62,04	0,536	86	2474	328,8	2659	265,9	359,10	6,55	892,2	178,4	220,8	3,79	1	1	2203	127,5	78,38	423,9	847,8

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	i_y	I_z	$W_{el,z}$	$W_{pl,z}$	i_z	PL		$N_{c,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$	$V_{pl,y,Rd}$	$V_{pl,z,Rd}$
																	h	b					
mm	mm	mm	kg/m	mm^2	m^2/m	1/m	mm^4	mm^3	mm^4	mm^3	mm^3	mm	mm^4	mm^3	mm^3	mm			kN	kNm	kNm	kN	kN
				x 10^2			x 10^4	x 10^3	x 10^4	x 10^3	x 10^3	x 10	x 10^4	x 10^3	x 10^3	x 10							
200	120	5	23,8	30,36	0,623	205	1652	209,9	1649	164,9	200,90	7,37	750,1	125,0	141,5	4,97	4	1	1016	71,31	41,45	233,3	388,9
200	120	6	28,3	36,03	0,619	172	1947	245,1	1929	192,9	236,60	7,32	874,4	145,7	166,3	4,93	2	1	1279	83,97	59,05	277,0	461,6
200	120	7,1	32,7	41,69	0,610	146	2265	280,7	2175	217,5	269,70	7,22	986,0	164,3	189,8	4,86	1	1	1480	95,76	67,39	320,5	534,1
200	120	8	36,5	46,44	0,606	130	2507	308,3	2386	238,6	298,00	7,17	1079	179,8	209,5	4,82	1	1	1649	105,8	74,37	357,0	594,9
200	120	8,8	39,7	50,56	0,602	119	2714	331,4	2562	256,2	322,00	7,12	1156	192,7	226,2	4,78	1	1	1795	114,3	80,29	388,6	647,7
200	120	10	44,4	56,57	0,597	106	3007	363,7	2806	280,6	356,10	7,04	1262	210,4	249,8	4,72	1	1	2008	126,4	88,68	434,8	724,6
200	120	12,5	52,6	67,04	0,576	86	3514	415,7	3099	309,9	406,00	6,80	1397	232,9	285,3	4,57	1	1	2380	144,1	101,3	515,3	858,8
220	120	5	25,4	32,36	0,663	205	1885	231,9	2082	189,3	232,20	8,02	816,3	136,1	153,0	5,02	4	1	1038	82,44	43,00	234,1	429,1
220	120	6	30,2	38,43	0,659	172	2222	271,1	2439	221,7	273,80	7,97	952,4	158,7	180,0	4,98	3	1	1364	97,19	56,35	278,0	509,7
220	120	7,1	35,0	44,53	0,650	146	2586	310,8	2757	250,7	312,90	7,87	1077	179,4	205,9	4,92	2	1	1581	111,1	73,08	322,1	590,6
220	120	8	39,0	49,64	0,646	130	2864	341,7	3029	275,4	346,00	7,81	1179	196,6	227,4	4,87	1	1	1762	122,8	80,73	359,1	658,4
220	120	8,8	42,5	54,08	0,642	119	3102	367,7	3258	296,1	374,30	7,76	1265	210,9	245,8	4,84	1	1	1920	132,9	87,24	391,2	717,3
220	120	10	47,5	60,57	0,637	105	3440	404,1	3576	325,1	414,70	7,68	1383	230,6	271,8	4,78	1	1	2150	147,2	96,49	438,1	803,2
250	100	5	26,2	33,36	0,683	205	1620	217,1	2554	204,3	258,50	8,75	609,9	122,0	135,8	4,28	4	1	992,7	91,77	35,62	195,3	488,3
250	100	6	31,1	39,63	0,679	171	1905	253,2	2992	239,4	304,90	8,69	709,6	141,9	159,7	4,23	4	1	1289	108,2	45,79	232,1	580,2
250	100	8	40,2	51,24	0,666	130	2439	317,4	3714	297,1	385,40	8,51	875,1	175,0	201,5	4,13	2	1	1819	136,8	71,51	300,1	750,2
250	100	10	49,1	62,57	0,657	105	2910	373,3	4384	350,7	462,00	8,37	1021	204,2	240,3	4,04	1	1	2221	164,0	85,29	366,4	916,0
250	150	5	30,1	38,36	0,783	204	3285	336,9	3304	264,3	319,80	9,28	1508	201,1	225,5	6,27	4	2	1170	113,5	59,79	294,8	491,3
250	150	6	35,8	45,63	0,779	171	3886	395,7	3886	310,8	378,10	9,23	1768	235,8	266,3	6,23	4	1	1502	134,2	76,70	350,7	584,6
250	150	7,1	41,7	53,05	0,770	145	4543	456,3	4428	354,2	434,60	9,14	2015	268,7	306,3	6,16	3	1	1883	154,3	95,39	407,8	679,6
250	150	8	46,5	59,24	0,766	129	5050	504,0	4886	390,9	482,20	9,08	2219	295,9	339,6	6,12	2	1	2103	171,2	120,5	455,3	758,9
250	150	8,8	50,8	64,64	0,762	118	5488	544,5	5274	422,0	523,10	9,03	2392	318,9	368,1	6,08	1	1	2295	185,7	130,7	496,9	828,1
250	150	10	57,0	72,57	0,757	104	6121	602,1	5825	466,0	582,00	8,96	2634	351,2	409,2	6,02	1	1	2576	206,6	145,3	557,7	929,6
250	150	12,5	68,3	87,04	0,736	85	7315	704,1	6633	530,6	678,30	8,73	3002	400,3	477,5	5,87	1	1	3090	240,8	169,5	669,0	1115
260	140	6	35,8	45,63	0,779	171	3646	382,5	4082	314,0	385,90	9,46	1567	223,9	251,8	5,86	4	1	1473	137,0	71,27	327,4	607,9
260	140	7,1	41,7	53,05	0,770	145	4258	440,8	4648	357,6	443,50	9,36	1785	255,0	289,6	5,80	3	1	1883	157,5	90,52	380,6	706,8
260	140	8	46,5	59,24	0,766	129	4731	486,5	5129	394,5	492,00	9,30	1964	280,6	320,9	5,76	2	1	2103	174,7	113,9	425,0	789,3
260	140	8,8	50,8	64,64	0,762	118	5138	525,3	5536	425,9	533,70	9,25	2115	302,2	347,8	5,72	1	1	2295	189,5	123,5	463,7	861,2
260	140	10	57,0	72,57	0,757	104	5724	580,4	6113	470,2	593,80	9,18	2328	332,5	386,4	5,66	1	1	2576	210,8	137,2	520,6	966,8
260	140	12,5	68,3	87,04	0,736	85	6821	677,2	6950	534,6	691,50	8,94	2648	378,3	450,5	5,52	1	1	3090	245,5	159,9	624,4	1160
260	180	6	39,6	50,43	0,859	170	5566	501,4	4856	373,5	446,90	9,81	2763	307,1	347,9	7,40	4	2	1643	158,6	98,45	422,9	610,8
260	180	7,1	46,1	58,73	0,850	145	6522	580,3	5557	427,5	515,30	9,73	3163	351,4	401,3	7,34	3	1	2085	182,9	124,8	492,5	711,3
260	180	8	51,5	65,64	0,846	129	7267	642,4	6145	472,7	572,70	9,68	3493	388,1	445,8	7,29	2	1	2330	203,3	158,3	550,4	795,0
260	180	8,8	56,3	71,68	0,842	117	7912	695,6	6647	511,3	622,20	9,63	3774	419,4	484,1	7,26	1	1	2545	220,9	171,9	601,0	868,2
260	180	10	63,2	80,57	0,837	104	8850	771,9	7363	566,4	693,80	9,56	4174	463,8	539,5	7,20	1	1	2860	246,3	191,5	675,5	975,8

Taulukko 11.1.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus
(käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

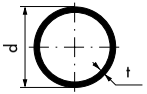
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys
(ilman leikkauslommahdusta)

r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
																	h	b					
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10			kN	kNm	kNm	kN	kN
300	100	5	30,1	38,36	0,783	204	2044	262,2	4065	271,0	348,2	10,29	722,8	144,6	159,6	4,34	4	1	1024	123,6	37,56	196,5	589,6
300	100	6	35,8	45,63	0,779	171	2403	306,2	4777	318,5	411,4	10,23	842,4	168,5	187,9	4,30	4	1	1344	146,1	48,87	233,8	701,5
300	100	7,1	41,7	53,05	0,770	145	2787	350,8	5424	361,6	472,1	10,11	954,1	190,8	215,5	4,24	4	1	1704	167,6	60,85	271,8	815,5
300	100	8	46,5	59,24	0,766	129	3080	385,2	5978	398,5	523,5	10,05	1045	209,0	238,3	4,20	4	1	2017	185,8	70,93	303,6	910,7
300	100	8,8	50,8	64,64	0,762	118	3329	414,2	6446	429,7	567,6	9,99	1120	224,0	257,6	4,16	3	1	2295	201,5	79,53	331,2	993,7
300	100	10	57,0	72,57	0,757	104	3681	454,5	7106	473,7	630,9	9,90	1224	244,9	285,3	4,11	2	1	2576	224,0	101,3	371,8	1115
300	100	12,5	68,3	87,04	0,736	85	4292	521,2	8010	534,0	731,9	9,59	1374	274,8	330,2	3,97	1	1	3090	259,8	117,2	446,0	1338
300	150	6	40,5	51,63	0,879	170	4988	478,6	6074	404,9	499,6	10,85	2080	277,3	309,5	6,35	4	1	1557	177,4	81,75	352,8	705,5
300	150	7,1	47,2	60,15	0,870	145	5834	553,0	6947	463,1	576,1	10,75	2378	317,1	357,0	6,29	4	1	1956	204,5	101,9	411,0	821,9
300	150	8	52,8	67,24	0,866	129	6491	611,5	7684	512,2	640,3	10,69	2623	349,7	396,4	6,25	4	1	2301	227,3	119,1	459,4	918,8
300	150	10	64,8	82,57	0,857	104	7879	732,8	9209	614,0	775,9	10,56	3125	416,7	479,2	6,15	2	1	2931	275,5	170,1	564,1	1128
300	150	12,5	78,1	99,54	0,836	84	9452	861,8	10590	706,3	911,5	10,32	3595	479,3	563,4	6,01	1	1	3534	323,6	200,0	680,1	1360
300	200	6	45,2	57,63	0,979	170	8115	651,2	7370	491,4	587,8	11,31	3962	396,2	446,1	8,29	4	2	1770	208,7	118,5	472,5	708,7
300	200	7,1	52,8	67,25	0,970	144	9524	755,7	8470	564,7	680,1	11,22	4554	455,4	516,3	8,23	4	1	2208	241,4	147,4	551,4	827,0
300	200	8	59,1	75,24	0,966	128	10630	838,4	9389	626,0	757,1	11,17	5042	504,2	574,5	8,19	4	1	2585	268,8	172,2	616,9	925,3
300	200	8,8	64,6	82,24	0,962	117	11590	909,5	10178	678,6	823,8	11,12	5459	545,9	624,9	8,15	3	1	2920	292,5	193,8	674,3	1011
300	200	10	72,7	92,57	0,957	103	12990	1012	11313	754,2	920,9	11,05	6058	605,8	698,1	8,09	2	1	3286	326,9	247,8	758,9	1138
300	200	12,5	88,0	112,0	0,936	84	15770	1204	13179	878,6	1091	10,85	7060	706,0	827,9	7,94	1	1	3978	387,4	293,9	918,6	1378
400	200	6	54,7	69,63	1,179	169	12069	877,1	14789	739,5	906,0	14,57	5092	509,2	562,5	8,55	4	2	1837	321,6	128,2	475,7	951,5
400	200	7,1	63,9	81,45	1,170	144	14169	1020	17070	853,5	1052	14,48	5875	587,5	653,2	8,49	4	1	2321	373,4	162,0	556,5	1113
400	200	8	71,6	91,24	1,166	128	15820	1133	18974	948,7	1173	14,42	6517	651,7	728,1	8,45	4	1	2749	416,5	191,9	623,4	1247
400	200	8,8	78,4	99,84	1,162	116	17260	1231	20619	1031	1279	14,37	7069	706,9	793,1	8,41	4	1	3143	454,1	218,9	682,1	1364
400	200	10	88,4	112,6	1,157	103	19368	1373	23003	1150	1434	14,30	7864	786,4	888,1	8,36	4	1	3749	509,0	259,8	769,1	1538
400	200	12,5	108	137,0	1,136	83	23594	1644	27101	1355	1714	14,06	9260	926,1	1062	8,22	2	1	4865	608,5	377,1	936,3	1873

Taulukko 11.1.3 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

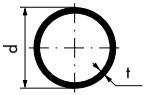
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
26,9	2	1,23	1,56	0,085	540	2,44	1,81	1,22	0,91	1,24	0,88	1	55,54	0,44	20,41
26,9	2,5	1,50	1,92	0,085	441	2,88	2,14	1,44	1,07	1,49	0,87	1	68,03	0,53	25,01
26,9	2,6	1,56	1,98	0,085	426	2,96	2,20	1,48	1,10	1,54	0,86	1	70,46	0,55	25,90
33,7	2	1,56	1,99	0,106	532	5,02	2,98	2,51	1,49	2,01	1,12	1	70,71	0,71	25,99
33,7	2,5	1,92	2,45	0,106	432	6,00	3,56	3,00	1,78	2,44	1,11	1	86,99	0,87	31,97
33,7	2,6	1,99	2,54	0,106	417	6,19	3,67	3,09	1,84	2,52	1,10	1	90,18	0,89	33,15
33,7	3	2,27	2,89	0,106	366	6,88	4,08	3,44	2,04	2,84	1,09	1	102,7	1,01	37,75
33,7	3,2	2,41	3,07	0,106	345	7,21	4,28	3,60	2,14	2,99	1,08	1	108,9	1,06	40,01
42,4	2	1,99	2,54	0,133	525	10,38	4,90	5,19	2,45	3,27	1,43	1	90,11	1,16	33,12
42,4	2,5	2,46	3,13	0,133	425	12,52	5,91	6,26	2,95	3,99	1,41	1	111,3	1,41	40,89
42,4	2,6	2,55	3,25	0,133	410	12,93	6,10	6,46	3,05	4,12	1,41	1	115,4	1,46	42,42
42,4	2,9	2,82	3,60	0,133	370	14,11	6,66	7,06	3,33	4,53	1,40	1	127,8	1,61	46,96
42,4	3	2,91	3,71	0,133	359	14,49	6,84	7,25	3,42	4,67	1,40	1	131,8	1,66	48,45
42,4	3,2	3,09	3,94	0,133	338	15,24	7,19	7,62	3,59	4,93	1,39	1	139,9	1,75	51,42
42,4	4	3,79	4,83	0,133	276	17,98	8,48	8,99	4,24	5,92	1,36	1	171,3	2,10	62,96
48,3	2	2,28	2,91	0,152	522	15,62	6,47	7,81	3,23	4,29	1,64	1	103,3	1,52	37,96
48,3	2,5	2,82	3,60	0,152	422	18,92	7,83	9,46	3,92	5,25	1,62	1	127,7	1,86	46,94
48,3	2,6	2,93	3,73	0,152	406	19,55	8,10	9,78	4,05	5,44	1,62	1	132,5	1,93	48,71
48,3	3	3,35	4,27	0,152	355	22,00	9,11	11,00	4,55	6,17	1,61	1	151,6	2,19	55,71
48,3	3,2	3,56	4,53	0,152	335	23,17	9,59	11,59	4,80	6,52	1,60	1	161,0	2,31	59,16
48,3	4	4,37	5,57	0,152	273	27,54	11,40	13,77	5,70	7,87	1,57	1	197,6	2,79	72,64

d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
60,3	2	2,88	3,66	0,189	517	31,16	10,34	15,58	5,17	6,80	2,06	1	130,0	2,41	47,80
60,3	2,5	3,56	4,54	0,189	417	37,99	12,60	18,99	6,30	8,36	2,05	1	161,2	2,97	59,23
60,3	2,9	4,11	5,23	0,189	362	43,18	14,32	21,59	7,16	9,56	2,03	1	185,7	3,39	68,24
60,3	3	4,24	5,40	0,189	351	44,45	14,74	22,22	7,37	9,86	2,03	1	191,7	3,50	70,47
60,3	3,2	4,51	5,74	0,189	330	46,94	15,57	23,47	7,78	10,44	2,02	1	203,8	3,71	74,90
60,3	4	5,55	7,07	0,189	268	56,35	18,69	28,17	9,34	12,70	2,00	1	251,2	4,51	92,31
60,3	5	6,82	8,69	0,189	218	66,95	22,21	33,48	11,10	15,33	1,96	1	308,4	5,44	113,3
76,1	2	3,65	4,66	0,239	513	63,96	16,81	31,98	8,40	10,98	2,62	2	165,3	3,90	60,75
76,1	2,5	4,54	5,78	0,239	414	78,37	20,60	39,19	10,30	13,55	2,60	1	205,2	4,81	75,43
76,1	2,9	5,24	6,67	0,239	358	89,48	23,52	44,74	11,76	15,55	2,59	1	236,8	5,52	87,02
76,1	3	5,41	6,89	0,239	347	92,19	24,23	46,10	12,11	16,04	2,59	1	244,6	5,69	89,90
76,1	4	7,11	9,06	0,239	264	118,1	31,04	59,06	15,52	20,81	2,55	1	321,6	7,39	118,2
76,1	5	8,77	11,17	0,239	214	141,8	37,28	70,92	18,64	25,32	2,52	1	396,5	8,99	145,7
76,1	6	10,4	13,21	0,239	181	163,5	42,97	81,76	21,49	29,56	2,49	1	469,1	10,49	172,4
76,1	6,3	10,8	13,81	0,239	173	169,6	44,58	84,82	22,29	30,78	2,48	1	490,4	10,93	180,3
88,9	2	4,29	5,46	0,279	512	103,1	23,20	51,57	11,60	15,11	3,07	2	193,8	5,36	71,24
88,9	2,5	5,33	6,79	0,279	412	126,8	28,51	63,37	14,26	18,67	3,06	2	240,9	6,63	88,54
88,9	3	6,36	8,10	0,279	345	149,5	33,64	74,76	16,82	22,15	3,04	1	287,4	7,86	105,6
88,9	3,2	6,76	8,62	0,279	324	158,4	35,64	79,21	17,82	23,51	3,03	1	305,9	8,35	112,4
88,9	4	8,38	10,67	0,279	262	192,7	43,35	96,34	21,67	28,85	3,00	1	378,7	10,24	139,2
88,9	5	10,4	13,18	0,279	212	232,8	52,36	116,4	26,18	35,24	2,97	1	467,9	12,51	172,0
88,9	6	12,3	15,63	0,279	179	269,9	60,72	134,9	30,36	41,31	2,94	1	554,7	14,66	203,9
88,9	6,3	12,8	16,35	0,279	171	280,5	63,10	140,2	31,55	43,07	2,93	1	580,4	15,29	213,3
101,6	2	4,91	6,26	0,319	510	155,3	30,56	77,63	15,28	19,84	3,52	3	222,2	5,43	81,66
101,6	2,5	6,11	7,78	0,319	410	191,2	37,64	95,61	18,82	24,56	3,50	2	276,3	8,72	101,6
101,6	3	7,29	9,29	0,319	343	226,1	44,50	113,0	22,25	29,17	3,49	2	329,9	10,36	121,3
101,6	3,6	8,70	11,08	0,319	288	266,5	52,46	133,2	26,23	34,59	3,47	1	393,5	12,28	144,6
101,6	4	9,63	12,26	0,319	260	292,6	57,59	146,3	28,80	38,12	3,45	1	435,4	13,53	160,0
101,6	5	11,9	15,17	0,319	210	354,9	69,87	177,5	34,93	46,70	3,42	1	538,7	16,58	198,0
101,6	6	14,2	18,02	0,319	177	413,4	81,37	206,7	40,68	54,91	3,39	1	639,7	19,49	235,1
101,6	6,3	14,8	18,86	0,319	169	430,1	84,67	215,1	42,34	57,30	3,38	1	669,6	20,34	246,1
108	2	5,23	6,66	0,339	509	187,2	34,66	93,58	17,33	22,47	3,75	3	236,4	6,15	86,90
108	2,5	6,50	8,29	0,339	409	230,7	42,72	115,4	21,36	27,83	3,73	2	294,2	9,88	108,1
108	3	7,77	9,90	0,339	343	273,0	50,55	136,5	25,28	33,08	3,71	2	351,3	11,74	129,1
108	3,6	9,27	11,81	0,339	287	322,1	59,65	161,1	29,83	39,25	3,69	1	419,2	13,93	154,1
108	4	10,3	13,07	0,339	260	353,9	65,54	177,0	32,77	43,29	3,68	1	464,0	15,37	170,5
108	5	12,7	16,18	0,339	210	430,1	79,65	215,1	39,83	53,09	3,65	1	574,4	18,85	211,1
108	6	15,1	19,23	0,339	176	501,8	92,93	250,9	46,46	62,50	3,61	1	682,5	22,19	250,9
108	6,3	15,8	20,13	0,339	169	522,5	96,75	261,2	48,38	65,24	3,60	1	714,6	23,16	262,6

Taulukko 11.1.3 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



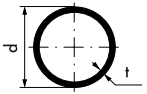
M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
114,3	2	5,54	7,06	0,359	509	222,5	38,94	111,3	19,47	25,23	3,97	3	250,5	6,91	92,07
114,3	2,5	6,89	8,78	0,359	409	274,5	48,03	137,3	24,02	31,25	3,95	2	311,7	11,09	114,6
114,3	3	8,23	10,49	0,359	342	325,1	56,88	162,6	28,44	37,17	3,94	2	372,4	13,20	136,9
114,3	3,6	9,83	12,52	0,359	287	384,0	67,19	192,0	33,59	44,13	3,92	1	444,5	15,67	163,4
114,3	4	10,9	13,86	0,359	259	422,1	73,86	211,1	36,93	48,69	3,90	1	492,1	17,28	180,9
114,3	5	13,5	17,17	0,359	209	513,8	89,91	256,9	44,96	59,77	3,87	1	609,5	21,22	224,0
114,3	6	16,0	20,41	0,359	176	600,4	105,1	300,2	52,53	70,45	3,83	1	724,7	25,01	266,4
114,3	6,3	16,8	21,38	0,359	168	625,4	109,4	312,7	54,72	73,57	3,82	1	758,8	26,12	278,9
127	2	6,17	7,85	0,399	508	306,9	48,33	153,4	24,16	31,25	4,42	4	223,7	6,88	102,5
127	2,5	7,68	9,78	0,399	408	379,1	59,70	189,5	29,85	38,76	4,40	3	347,1	10,60	127,6
127	3	9,17	11,69	0,399	341	449,5	70,79	224,8	35,39	46,14	4,39	2	414,9	16,38	152,5
127	4	12,1	15,46	0,399	258	585,2	92,16	292,6	46,08	60,54	4,35	1	548,7	21,49	201,7
127	5	15,0	19,16	0,399	208	714,3	112,5	357,1	56,24	74,46	4,32	1	680,3	26,43	250,1
127	6	17,9	22,81	0,399	175	836,9	131,8	418,4	65,90	87,92	4,28	1	809,7	31,21	297,6
127	6,3	18,8	23,89	0,399	167	872,4	137,4	436,2	68,70	91,86	4,27	1	848,1	32,61	311,7
133	2	6,46	8,23	0,418	508	353,2	53,11	176,6	26,56	34,32	4,63	4	232,7	7,51	107,4
133	2,5	8,05	10,25	0,418	408	436,5	65,64	218,3	32,82	42,58	4,61	3	363,9	11,65	133,7
133	3	9,62	12,25	0,418	341	517,9	77,88	259,0	38,94	50,71	4,60	2	435,0	18,00	159,9
133	4	12,7	16,21	0,418	258	675,1	101,5	337,5	50,76	66,59	4,56	2	575,5	23,64	211,5
133	5	15,8	20,11	0,418	208	824,8	124,0	412,4	62,02	81,96	4,53	1	713,8	29,10	262,4
133	6	18,8	23,94	0,418	175	967,4	145,5	483,7	72,74	96,85	4,50	1	849,8	34,38	312,4
133	6,3	19,7	25,08	0,418	167	1009	151,7	504,4	75,85	101,2	4,49	1	890,2	35,93	327,2

139,7	3	10,1	12,88	0,439	341	602,2	86,21	301,1	43,11	56,07	4,83	3	457,4	15,30	168,1
139,7	4	13,4	17,05	0,439	257	785,7	112,5	392,9	56,24	73,68	4,80	2	605,4	26,16	222,5
139,7	5	16,6	21,16	0,439	207	961,1	137,6	480,5	68,80	90,76	4,77	1	751,1	32,22	276,1
139,7	6	19,8	25,20	0,439	174	1129	161,6	564,3	80,78	107,3	4,73	1	894,7	38,10	328,8
139,7	6,3	20,7	26,40	0,439	166	1177	168,5	588,6	84,27	112,2	4,72	1	937,3	39,83	344,5
139,7	8	26,0	33,10	0,439	133	1441	206,2	720,3	103,1	138,9	4,66	1	1175	49,32	431,9
139,7	10	32,0	40,75	0,439	108	1724	246,8	861,9	123,4	168,6	4,60	1	1447	59,84	531,7
152,4	3	11,1	14,08	0,479	340	786,0	103,2	393,0	51,58	66,97	5,28	3	499,9	18,31	183,7
152,4	4	14,6	18,65	0,479	257	1027	134,8	513,7	67,42	88,11	5,25	2	662,0	31,28	243,3
152,4	5	18,2	23,15	0,479	207	1259	165,2	629,5	82,62	108,7	5,21	1	822,0	38,58	302,1
152,4	6	21,7	27,60	0,479	173	1481	194,4	740,6	97,19	128,7	5,18	1	979,7	45,68	360,1
152,4	6,3	22,7	28,92	0,479	166	1546	202,9	773,0	101,4	134,6	5,17	1	1027	47,77	377,3
159	3	11,5	14,70	0,500	340	894,8	112,6	447,4	56,28	73,02	5,52	3	521,9	19,98	191,8
159	4	15,3	19,48	0,500	256	1171	147,3	585,3	73,63	96,12	5,48	2	691,5	34,12	254,2
159	5	19,0	24,19	0,500	206	1436	180,6	717,9	90,30	118,6	5,45	1	858,8	42,11	315,6
159	6	22,6	28,84	0,500	173	1690	212,6	845,2	106,3	140,5	5,41	1	1024	49,89	376,3
159	6,3	23,7	30,22	0,500	165	1765	222,0	882,4	111,0	147,0	5,40	1	1073	52,18	394,4
168,3	3	12,2	15,58	0,529	339	1065	126,5	532,3	63,25	81,98	5,85	3	553,1	22,46	203,3
168,3	3,2	13,0	16,60	0,529	319	1131	134,5	565,7	67,23	87,24	5,84	3	589,2	23,87	216,6
168,3	4	16,2	20,65	0,529	256	1394	165,7	697,1	82,84	108,0	5,81	2	733,0	38,34	269,4
168,3	4,5	18,2	23,16	0,529	228	1554	184,7	777,2	92,36	120,8	5,79	2	822,1	42,87	302,2
168,3	5	20,1	25,65	0,529	206	1712	203,4	855,9	101,7	133,4	5,78	2	910,6	47,35	334,7
168,3	6	24,0	30,59	0,529	173	2017	239,7	1009	119,9	158,1	5,74	1	1086	56,13	399,2
168,3	6,3	25,2	32,06	0,529	165	2107	250,4	1053	125,2	165,4	5,73	1	1138	58,72	418,4
168,3	8	31,6	40,29	0,529	131	2595	308,3	1297	154,2	205,7	5,67	1	1430	73,04	525,7
168,3	10	39,0	49,73	0,529	106	3128	371,7	1564	185,9	250,9	5,61	1	1765	89,08	648,9
193,7	4	18,7	23,84	0,609	255	2146	221,5	1073	110,8	144,0	6,71	3	846,3	39,32	311,1
193,7	5	23,3	29,64	0,609	205	2640	272,6	1320	136,3	178,1	6,67	2	1052	63,22	386,8
193,7	6	27,8	35,38	0,609	172	3119	322,1	1560	161,1	211,5	6,64	1	1256	75,07	461,7
193,7	6,3	29,1	37,09	0,609	164	3260	336,6	1630	168,3	221,3	6,63	1	1317	78,57	484,0
193,7	8	36,6	46,67	0,609	130	4031	416,2	2016	208,1	276,1	6,57	1	1657	98,00	609,0
193,7	10	45,3	57,71	0,609	105	4883	504,2	2442	252,1	337,8	6,50	1	2049	119,9	753,0
193,7	12,5	55,9	71,16	0,609	86	5869	606,0	2934	303,0	411,1	6,42	1	2526	145,9	928,5
d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN

Taulukko 11.1.3 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

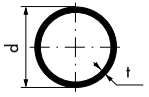
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
219,1	4	21,2	27,03	0,688	255	3128	285,5	1564	142,8	185,1	7,61	3	959,6	50,68	352,7
219,1	4,5	23,8	30,34	0,688	227	3494	319,0	1747	159,5	207,3	7,59	3	1077	56,62	395,9
219,1	5	26,4	33,63	0,688	205	3856	352,0	1928	176,0	229,2	7,57	2	1194	81,38	438,8
219,1	6	31,5	40,17	0,688	171	4564	416,6	2282	208,3	272,5	7,54	2	1426	96,75	524,1
219,1	6,3	33,1	42,12	0,688	163	4772	435,6	2386	217,8	285,4	7,53	2	1495	101,3	549,6
219,1	8	41,7	53,06	0,688	130	5919	540,3	2960	270,2	356,7	7,47	1	1883	126,6	692,3
219,1	10	51,6	65,69	0,688	105	7197	657,0	3598	328,5	437,6	7,40	1	2332	155,3	857,1
219,1	12,5	63,7	81,13	0,688	85	8689	793,2	4345	396,6	534,2	7,32	1	2880	189,6	1059
244,5	6	35,3	44,96	0,768	171	6397	523,3	3199	261,6	341,4	8,43	2	1596	121,2	586,6
244,5	8	46,7	59,44	0,768	129	8321	680,7	4160	340,3	447,6	8,37	1	2110	158,9	775,6
244,5	10	57,8	73,67	0,768	104	10150	830,0	5073	415,0	550,2	8,30	1	2615	195,3	961,3
244,5	12,5	71,5	91,11	0,768	84	12290	1006	6147	502,9	673,5	8,21	1	3234	239,1	1189
273	4	26,5	33,80	0,858	254	6117	448,1	3058	224,1	289,5	9,51	4	951,9	63,09	441,1
273	5	33,1	42,10	0,858	204	7562	554,0	3781	277,0	359,2	9,48	3	1494	98,33	549,3
273	6	39,5	50,33	0,858	170	8974	657,5	4487	328,7	427,8	9,44	2	1787	151,9	656,7
273	6,3	41,4	52,79	0,858	162	9392	688,0	4696	344,0	448,2	9,43	2	1874	159,1	688,8
273	8	52,3	66,60	0,858	129	11703	857,4	5852	428,7	562,0	9,37	2	2364	199,5	869,0
273	10	64,9	82,62	0,858	104	14308	1048	7154	524,1	692,0	9,31	1	2933	245,7	1078
273	12,5	80,3	102,3	0,858	84	17395	1274	8697	637,2	848,9	9,22	1	3632	301,4	1335
323,9	4	31,6	40,20	1,018	253	10286	635,2	5143	317,6	409,4	11,31	4	1099	86,80	524,5
323,9	5	39,3	50,09	1,018	203	12739	786,6	6369	393,3	508,5	11,28	4	1422	111,7	653,6
323,9	6	47,0	59,92	1,018	170	15145	935,2	7572	467,6	606,4	11,24	3	2127	166,0	781,9
323,9	6,3	49,3	62,86	1,018	162	15858	979,2	7929	489,6	635,6	11,23	3	2232	173,8	820,2
323,9	8	62,3	79,39	1,018	128	19820	1224	9910	611,9	798,5	11,17	2	2819	283,5	1036
323,9	10	77,4	98,61	1,018	103	24317	1501	12158	750,8	985,7	11,10	1	3501	349,9	1287
323,9	12,5	96,0	122,3	1,018	83	29693	1833	14847	916,7	1213	11,02	1	4341	430,5	1596

Taulukko 11.1.4 Pyöreiden kierresaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)
(Tekniset toimitusehdot sovittava tilauskohtaisesti)



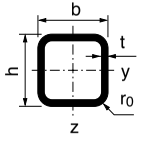
M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
406,4	6,3	62,2	79,19	1,277	161	31699	1560	15849	780,0	1009	14,15	4	2250	221,6	1033
406,4	8	78,6	100,1	1,277	128	39748	1956	19874	978,1	1270	14,09	3	3555	347,2	1306
406,4	10	97,8	124,5	1,277	103	48952	2409	24476	1205	1572	14,02	2	4421	557,9	1625
406,4	12,5	121	154,7	1,277	83	60061	2956	30031	1478	1940	13,93	1	5491	688,7	2018
457	6,3	70,0	89,20	1,436	161	45308	1983	22654	991,4	1280	15,94	4	2487	276,4	1164
457	8	88,6	112,9	1,436	127	56893	2490	28446	1245	1613	15,88	3	4006	442,0	1472
457	10	110	140,4	1,436	102	70183	3071	35091	1536	1998	15,81	2	4985	709,4	1832
457	12	132	167,8	1,436	86	83113	3637	41556	1819	2377	15,74	2	5956	843,8	2189
457	12,5	137	174,6	1,436	82	86290	3776	43145	1888	2470	15,72	2	6197	877,0	2278
508	6,3	78,0	99,30	1,596	161	62493	2460	31246	1230	1586	17,74	4	2716	336,5	1296
508	8	98,7	125,7	1,596	127	78560	3093	39280	1546	2000	17,68	4	3579	440,4	1640
508	10	123	156,5	1,596	102	97040	3820	48520	1910	2480	17,61	3	5554	678,1	2041
508	12,5	153	194,6	1,596	82	119511	4705	59755	2353	3070	17,52	2	6908	1090	2539
559	6,3	85,9	109,4	1,756	161	83552	2989	41776	1495	1925	19,54	4	2937	401,3	1427
559	8	109	138,5	1,756	127	105130	3761	52565	1881	2429	19,48	4	3885	527,5	1807
559	10	135	172,5	1,756	102	130002	4651	65001	2326	3014	19,41	3	6123	825,6	2250
559	12,5	168	214,6	1,756	82	160324	5736	80162	2868	3734	19,33	2	7619	1326	2800
610	8	119	151,3	1,916	127	137103	4495	68551	2248	2899	21,29	4	4181	621,1	1974
610	10	148	188,5	1,916	102	169693	5564	84847	2782	3600	21,22	4	5401	797,1	2460
610	12,5	184	234,6	1,916	82	209509	6869	104755	3435	4463	21,13	3	8330	1219	3062
610	14,2	209	265,8	1,916	72	236008	7738	118004	3869	5042	21,07	2	9436	1790	3468

660	8	129	163,9	2,073	127	174176	5278	87088	2639	3401	23,05	4	4463	718,8	2138
660	10	160	204,2	2,073	102	215741	6538	107870	3269	4225	22,98	4	5781	925,4	2664
660	12,5	200	254,3	2,073	82	266613	8079	133306	4040	5241	22,90	3	9027	1434	3318
660	14,2	226	288,1	2,073	72	300526	9107	150263	4553	5923	22,84	3	10227	1616	3759
711	8	139	176,7	2,234	126	218324	6141	109162	3071	3954	24,86	4	4742	824,2	2305
711	10	173	220,2	2,234	101	270603	7612	135301	3806	4914	24,79	4	6160	1065	2874
711	12,5	215	274,3	2,234	81	334686	9415	167343	4707	6099	24,70	3	9738	1671	3579
711	14,2	244	310,9	2,234	72	377470	10618	188735	5309	6895	24,64	3	11035	1885	4056
762	8	149	189,5	2,394	126	269366	7070	134683	3535	4548	26,66	4	5013	935,1	2473
762	10	185	236,3	2,394	101	334057	8768	167028	4384	5655	26,59	4	6529	1212	3083
762	12,5	231	294,3	2,394	81	413462	10852	206731	5426	7023	26,50	4	8434	1555	3840
762	14,2	262	333,6	2,394	72	466542	12245	233271	6123	7942	26,44	3	11843	2174	4353
813	8	159	202,3	2,554	126	327801	8064	163901	4032	5184	28,46	4	5275	1051	2640
813	10	198	252,3	2,554	101	406728	10006	203364	5003	6448	28,39	4	6890	1366	3292
813	12,5	247	314,4	2,554	81	503721	12392	251860	6196	8011	28,31	4	8920	1758	4102
813	14,2	280	356,4	2,554	72	568630	13988	284315	6994	9062	28,25	3	12650	2483	4650
813	16	314	400,6	2,554	64	636443	15657	318222	7828	10165	28,18	3	14222	2779	5227
914	10	223	284,0	2,871	101	580294	12698	290147	6349	8172	31,96	4	7579	1694	3706
914	12,5	278	354,0	2,871	81	719417	15742	359708	7871	10159	31,88	4	9855	2191	4619
914	14,2	315	401,4	2,871	72	812689	17783	406344	8892	11498	31,82	4	11409	2527	5238
914	16	354	451,4	2,871	64	910283	19919	455142	9959	12904	31,75	3	16024	3536	5890
1016	10	248	316,0	3,192	101	799699	15742	399850	7871	10121	35,57	4	8241	2052	4124
1016	12,5	309	394,1	3,192	81	992246	19532	496123	9766	12588	35,48	4	10763	2667	5142
1016	14,2	351	446,9	3,192	71	1121520	22077	560762	11039	14252	35,42	4	12487	3084	5831
1016	16	395	502,7	3,192	64	1256959	24743	628479	12372	16001	35,36	4	14316	3524	6559
1219	10	298	379,8	3,830	101	1388029	22773	694014	11387	14617	42,75	4	9461	2836	4956
1219	12,5	372	473,8	3,830	81	1724362	28291	862181	14146	18196	42,66	4	12469	3723	6182
1219	14,2	422	537,5	3,830	71	1950668	32004	975334	16002	20613	42,60	4	14526	4325	7013
1219	16	475	604,7	3,830	63	2188182	35901	1094091	17951	23157	42,54	4	16712	4961	7890
d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c,Rd}$	$M_{c,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN

Taulukko 11.1.5 Neliön muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys ilman nurjahdusta
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (leikkauslommahduskestävyys tarkasteltava tarvittaessa erikseen, ks. kohta 2.7)

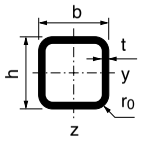
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
25	25	2	1,36	1,74	0,093	536	2,53	1,80	1,48	1,19	1,47	0,92	1	72,95	0,62	21,06
25	25	2,5	1,64	2,09	0,091	438	2,97	2,07	1,69	1,35	1,71	0,90	1	87,74	0,72	25,33
25	25	3	1,89	2,41	0,090	372	3,33	2,27	1,84	1,47	1,91	0,87	1	101,2	0,80	29,20
30	30	2	1,68	2,14	0,113	529	4,54	2,75	2,72	1,82	2,21	1,13	1	89,75	0,93	25,91
30	30	2,5	2,03	2,59	0,111	430	5,40	3,20	3,16	2,10	2,61	1,10	1	108,7	1,10	31,39
30	30	3	2,36	3,01	0,110	365	6,15	3,58	3,50	2,34	2,96	1,08	1	126,4	1,24	36,47
40	40	2	2,31	2,94	0,153	521	11,28	5,23	6,94	3,47	4,13	1,54	1	123,4	1,74	35,61
40	40	2,5	2,82	3,59	0,151	422	13,61	6,21	8,22	4,11	4,97	1,51	1	150,7	2,09	43,51
40	40	3	3,30	4,21	0,150	356	15,75	7,07	9,32	4,66	5,72	1,49	1	176,8	2,40	51,02
40	40	4	4,20	5,35	0,146	273	19,44	8,48	11,07	5,54	7,01	1,44	1	224,6	2,95	64,84
50	50	2	2,93	3,74	0,193	517	22,63	8,51	14,15	5,66	6,66	1,95	1	157,0	2,80	45,31
50	50	2,5	3,60	4,59	0,191	417	27,53	10,22	16,94	6,78	8,07	1,92	1	192,7	3,39	55,64
50	50	3	4,25	5,41	0,190	351	32,13	11,76	19,47	7,79	9,39	1,90	1	227,2	3,94	65,57
50	50	4	5,45	6,95	0,186	268	40,42	14,43	23,74	9,49	11,73	1,85	1	291,8	4,93	84,24
50	50	5	6,56	8,36	0,183	219	47,46	16,56	27,04	10,82	13,70	1,80	1	351,0	5,75	101,3
60	60	2	3,56	4,54	0,233	514	39,79	12,59	25,14	8,38	9,79	2,35	2	190,6	4,11	55,01
60	60	2,5	4,39	5,59	0,231	414	48,66	15,22	30,34	10,11	11,93	2,33	1	234,7	5,01	67,76
60	60	3	5,19	6,61	0,230	348	57,09	17,65	35,13	11,71	13,95	2,31	1	277,6	5,86	80,12
60	60	4	6,71	8,55	0,226	265	72,64	21,97	43,55	14,52	17,64	2,26	1	359,0	7,41	103,6
60	60	5	8,13	10,36	0,223	215	86,42	25,61	50,49	16,83	20,88	2,21	1	435,0	8,77	125,6
70	70	2,5	5,17	6,59	0,271	412	78,49	21,22	49,41	14,12	16,54	2,74	2	276,7	6,95	79,89
70	70	3	6,13	7,81	0,270	345	92,42	24,74	57,53	16,44	19,42	2,71	1	328,0	8,15	94,67
70	70	4	7,97	10,15	0,266	262	118,5	31,11	72,12	20,61	24,76	2,67	1	426,2	10,40	123,0
70	70	5	9,70	12,36	0,263	213	142,2	36,65	84,63	24,18	29,56	2,62	1	519,0	12,41	149,8

80	80	2,5	5,96	7,59	0,311	410	118,5	28,22	75,15	18,79	21,90	3,15	3	318,7	7,89	92,01
80	80	3	7,07	9,01	0,310	344	139,9	33,02	87,84	21,96	25,78	3,12	1	378,4	10,83	109,2
80	80	4	9,22	11,75	0,306	261	180,4	41,84	111,0	27,76	33,07	3,07	1	493,4	13,89	142,4
80	80	5	11,3	14,36	0,303	211	217,8	49,68	131,4	32,86	39,74	3,03	1	603,0	16,69	174,1
80	80	6	13,2	16,83	0,299	178	252,1	56,59	149,2	37,29	45,79	2,98	1	707,0	19,23	204,1
90	90	2,5	6,74	8,59	0,351	409	170,3	36,23	108,6	24,12	28,00	3,56	4	334,0	9,66	104,1
90	90	3	8,01	10,21	0,350	343	201,4	42,51	127,3	28,29	33,04	3,53	2	428,8	13,88	123,8
90	90	4	10,5	13,35	0,346	259	260,8	54,17	161,9	35,98	42,58	3,48	1	560,6	17,89	161,8
90	90	5	12,8	16,36	0,343	210	316,3	64,70	192,9	42,87	51,41	3,43	1	687,0	21,59	198,3
90	90	6	15,1	19,23	0,339	176	367,8	74,16	220,5	49,00	59,54	3,39	1	807,8	25,01	233,2
100	100	2,5	7,53	9,59	0,391	408	235,2	45,23	150,6	30,13	34,86	3,96	4	347,7	11,58	116,3
100	100	3	8,96	11,41	0,390	342	278,7	53,19	177,0	35,41	41,21	3,94	3	479,2	14,87	138,3
100	100	4	11,7	14,95	0,386	258	362,0	68,10	226,4	45,27	53,30	3,89	1	627,8	22,39	181,2
100	100	5	14,4	18,36	0,383	209	440,5	81,72	271,1	54,22	64,59	3,84	1	771,0	27,13	222,6
100	100	6	17,0	21,63	0,379	175	514,2	94,12	311,5	62,29	75,10	3,79	1	908,6	31,54	262,3
100	100	7,1	19,4	24,65	0,370	150	589,2	105,6	340,1	68,03	83,59	3,71	1	1035	35,11	298,9
100	100	8	21,4	27,24	0,366	134	644,5	114,2	365,9	73,19	91,05	3,67	1	1144	38,24	330,3
100	100	10	25,6	32,57	0,357	110	749,8	130,1	411,1	82,22	105,3	3,55	1	1368	44,20	394,9
110	110	2,5	8,31	10,59	0,431	407	314,9	55,23	202,4	36,80	42,47	4,37	4	358,7	13,59	128,4
110	110	3	9,90	12,61	0,430	341	373,5	65,07	238,3	43,33	50,27	4,35	4	484,6	17,24	152,9
110	110	4	13,0	16,55	0,426	258	486,5	83,63	305,9	55,62	65,21	4,30	1	695,0	27,39	200,6
110	110	5	16,0	20,36	0,423	208	593,6	100,7	367,9	66,90	79,27	4,25	1	855,0	33,29	246,8
110	110	6	18,9	24,03	0,419	175	694,9	116,5	424,6	77,19	92,46	4,20	1	1009	38,83	291,4
120	120	3	10,8	13,81	0,470	340	487,7	78,15	312,3	52,06	60,24	4,76	4	501,0	20,00	167,4
120	120	4	14,2	18,15	0,466	257	636,6	100,8	402,3	67,05	78,33	4,71	2	762,2	32,90	220,0
120	120	5	17,5	22,36	0,463	207	778,5	121,8	485,5	80,91	95,45	4,66	1	939,0	40,09	271,1
120	120	5,6	19,5	24,82	0,461	186	860,3	133,6	532,3	88,71	105,3	4,63	1	1042	44,21	300,9
120	120	6	20,7	26,43	0,459	174	913,5	141,2	562,2	93,69	111,6	4,61	1	1110	46,88	320,5
120	120	7,1	23,8	30,33	0,450	148	1056	160,1	623,5	103,9	125,7	4,53	1	1274	52,79	367,8
120	120	8	26,4	33,64	0,446	132	1163	174,6	676,9	112,8	137,8	4,49	1	1413	57,88	407,9
120	120	8,8	28,6	36,48	0,442	121	1252	186,5	719,9	120,0	147,9	4,44	1	1532	62,12	442,3
120	120	10	31,8	40,57	0,437	108	1376	202,5	776,8	129,5	161,8	4,38	1	1704	67,96	491,8
140	140	4	16,8	21,35	0,546	256	1023	139,8	651,6	93,09	108,2	5,52	4	844,9	37,69	258,8
140	140	5	20,7	26,36	0,543	206	1256	169,8	790,6	112,9	132,3	5,48	2	1107	55,57	319,6
140	140	5,6	23,0	29,30	0,541	185	1391	186,9	869,6	124,2	146,3	5,45	1	1231	61,43	355,2
140	140	6	24,5	31,23	0,539	173	1479	197,9	920,4	131,5	155,3	5,43	1	1312	65,24	378,7
140	140	7,1	28,3	36,01	0,530	147	1719	226,0	1032	147,4	176,3	5,35	1	1513	74,05	436,6
140	140	8	31,4	40,04	0,526	131	1901	247,7	1127	161,0	194,2	5,30	1	1682	81,55	485,5
140	140	8,8	34,2	43,52	0,522	120	2055	265,8	1205	172,1	209,2	5,26	1	1828	87,88	527,7
140	140	10	38,1	48,57	0,517	106	2274	290,9	1312	187,4	230,4	5,20	1	2040	96,76	588,8
h mm	b mm	t mm	M kg/m	A mm^2 $x\ 10^2$	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 $x\ 10^4$	W_t mm^3 $x\ 10^3$	I mm^4 $x\ 10^4$	W_{el} mm^3 $x\ 10^3$	W_{pl} mm^3 $x\ 10^3$	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN

Taulukko 11.1.5 Neliön muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys ilman nurjahdusta
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (leikkauslommahdus-kestävyys tarkasteltava tarvittaessa erikseen, ks. kohta 2.7)

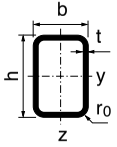
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
150	150	4	18,0	22,95	0,586	255	1265	161,7	807,8	107,7	124,9	5,93	4	869,1	42,47	278,2
150	150	5	22,3	28,36	0,583	206	1554	196,8	982,1	130,9	153,0	5,89	2	1191	64,25	343,8
150	150	6	26,4	33,63	0,579	172	1833	229,8	1146	152,8	179,9	5,84	1	1413	75,55	407,8
150	150	7,1	30,5	38,85	0,570	147	2134	263,2	1290	172,0	204,8	5,76	1	1632	86,03	471,1
150	150	8	33,9	43,24	0,566	131	2364	289,0	1412	188,2	226,0	5,71	1	1816	94,90	524,3
150	150	8,8	36,9	47,04	0,562	120	2560	310,7	1513	201,7	243,9	5,67	1	1976	102,4	570,4
150	150	10	41,3	52,57	0,557	106	2839	341,0	1653	220,3	269,2	5,61	1	2208	113,0	637,3
150	150	12,5	48,7	62,04	0,536	86	3321	389,3	1817	242,3	305,6	5,41	1	2606	128,3	752,2
160	160	4	19,3	24,55	0,626	255	1542	185,3	987,2	123,4	142,8	6,34	4	890,0	47,41	297,6
160	160	5	23,8	30,36	0,623	205	1896	225,8	1202	150,3	175,2	6,29	3	1275	63,12	368,1
160	160	6	28,3	36,03	0,619	172	2239	264,2	1405	175,7	206,2	6,25	1	1513	86,62	436,9
160	160	7,1	32,7	41,69	0,610	146	2611	303,2	1587	198,4	235,5	6,17	1	1751	98,89	505,5
160	160	8	36,5	46,44	0,606	130	2897	333,6	1741	217,7	260,1	6,12	1	1951	109,3	563,1
160	160	8,8	39,7	50,56	0,602	119	3141	359,2	1870	233,7	281,1	6,08	1	2124	118,1	613,1
160	160	10	44,4	56,57	0,597	106	3490	395,1	2048	256,0	311,0	6,02	1	2376	130,6	685,8
160	160	12,5	52,6	67,04	0,576	86	4114	454,6	2275	284,4	355,7	5,83	1	2816	149,4	812,9
180	180	5	27,0	34,36	0,703	205	2724	289,8	1737	193,0	224,0	7,11	4	1336	77,32	416,6
180	180	6	32,1	40,83	0,699	171	3223	340,1	2037	226,3	264,4	7,06	2	1715	111,0	495,1
180	180	7,1	37,2	47,37	0,690	146	3768	391,7	2313	257,0	303,1	6,99	1	1990	127,3	574,4
180	180	8	41,5	52,84	0,686	130	4189	432,2	2546	282,9	335,7	6,94	1	2219	141,0	640,7
180	180	8,8	45,2	57,60	0,682	118	4551	466,6	2742	304,6	363,6	6,90	1	2419	152,7	698,4
180	180	10	50,7	64,57	0,677	105	5074	515,3	3017	335,2	403,5	6,84	1	2712	169,5	782,8
180	180	12,5	60,5	77,04	0,656	85	6050	600,1	3406	378,5	467,1	6,65	1	3236	196,2	934,1

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
200	200	5	30,1	38,36	0,783	204	3763	361,8	2410	241,0	278,9	7,93	4	1391	92,60	465,0
200	200	6	35,8	45,63	0,779	171	4459	425,5	2833	283,3	329,7	7,88	3	1917	119,0	553,3
200	200	7,1	41,6	53,05	0,770	145	5223	491,6	3232	323,2	379,3	7,81	2	2228	159,3	643,2
200	200	8	46,5	59,24	0,766	129	5815	543,6	3566	356,6	420,9	7,76	1	2488	176,8	718,3
200	200	8,8	50,7	64,64	0,762	118	6328	588,1	3850	385,0	456,6	7,72	1	2715	191,8	783,8
200	200	10	57,0	72,57	0,757	104	7072	651,5	4251	425,1	508,1	7,65	1	3048	213,4	879,8
200	200	12,5	68,3	87,04	0,736	85	8502	765,5	4859	485,9	593,5	7,47	1	3656	249,3	1055
220	220	6	39,6	50,43	0,859	170	5976	520,6	3813	346,7	402,2	8,70	4	1938	137,9	611,5
220	220	7,1	46,1	58,73	0,850	145	7010	602,9	4367	397,0	464,0	8,62	2	2467	194,9	712,1
220	220	8	51,5	65,64	0,846	129	7815	667,9	4828	438,9	515,6	8,58	1	2757	216,6	795,9
220	220	8,8	56,3	71,68	0,842	117	8514	723,6	5221	474,7	560,2	8,53	1	3011	235,3	869,1
220	220	10	63,2	80,57	0,837	104	9533	803,6	5782	525,7	624,7	8,47	1	3384	262,4	976,8
220	220	12,5	76,2	97,04	0,816	84	11530	950,8	6674	606,7	734,9	8,29	1	4076	308,7	1177
250	250	6	45,2	57,63	0,979	170	8843	681,2	5672	453,8	524,5	9,92	4	2030	171,5	698,8
250	250	7,1	52,8	67,25	0,970	144	10387	791,0	6523	521,8	607,1	9,85	4	2651	210,8	815,4
250	250	8	59,1	75,24	0,966	128	11598	878,2	7229	578,3	675,8	9,80	2	3160	283,8	912,3
250	250	8,8	64,6	82,24	0,962	117	12653	953,3	7835	626,8	735,3	9,76	2	3454	308,8	997,2
250	250	10	72,7	92,57	0,957	103	14197	1062	8707	696,5	822,0	9,70	1	3888	345,2	1122
250	250	12,5	88,0	112,0	0,936	84	17283	1266	10161	812,9	975,2	9,52	1	4706	409,6	1358
260	260	6	47,1	60,03	1,019	170	9970	739,5	6405	492,7	568,8	10,33	4	2056	183,1	727,9
260	260	7,1	55,0	70,09	1,010	144	11716	859,4	7374	567,2	659,0	10,26	4	2694	225,6	849,8
260	260	8	61,6	78,44	1,006	128	13087	954,7	8178	629,1	734,0	10,21	3	3295	264,2	951,1
260	260	8,8	67,3	85,76	1,002	117	14283	1037	8869	682,2	799,0	10,17	2	3602	335,6	1040
260	260	10	75,8	96,57	0,997	103	16035	1156	9865	758,8	893,8	10,11	1	4056	375,4	1171
260	260	12,5	91,9	117,0	0,976	83	19553	1381	11548	888,3	1063	9,93	1	4916	446,4	1419
300	300	6	54,7	69,63	1,179	169	15434	996,8	9964	664,2	764,2	11,96	4	2141	232,4	844,3
300	300	7,1	63,9	81,45	1,170	144	18160	1161	11516	767,7	888,0	11,89	4	2838	288,2	987,6
300	300	8	71,6	91,24	1,166	128	20312	1293	12801	853,4	990,7	11,84	4	3453	336,3	1106
300	300	8,8	78,4	99,84	1,162	116	22195	1406	13911	927,4	1080	11,80	3	4193	389,5	1211
300	300	10	88,4	112,6	1,157	103	24966	1572	15519	1035	1211	11,74	2	4728	508,6	1365
300	300	12,5	108,0	137,0	1,136	83	30601	1892	18348	1223	1451	11,57	1	5756	609,3	1662

Taulukko 11.1.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

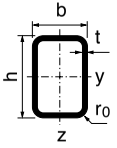
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
40	20	2	1,68	2,14	0,113	529	3,45	2,36	4,05	2,02	2,61	1,38	1,34	1,34	1,60	0,79	1	1	89,75	1,10	0,67	17,27	34,55
40	20	2,5	2,03	2,59	0,111	430	4,06	2,72	4,69	2,35	3,09	1,35	1,54	1,54	1,88	0,77	1	1	108,7	1,30	0,79	20,93	41,85
40	20	3	2,36	3,01	0,110	365	4,57	3,00	5,21	2,60	3,50	1,32	1,68	1,68	2,12	0,75	1	1	126,4	1,47	0,89	24,32	48,63
40	30	2	1,99	2,54	0,133	525	7,07	3,79	5,49	2,75	3,37	1,47	3,51	2,34	2,77	1,18	1	1	106,6	1,42	1,16	26,37	35,15
40	30	2,5	2,42	3,09	0,131	425	8,47	4,46	6,45	3,23	4,03	1,45	4,10	2,74	3,30	1,15	1	1	129,7	1,69	1,38	32,10	42,80
40	30	3	2,83	3,61	0,130	359	9,72	5,03	7,27	3,63	4,61	1,42	4,60	3,07	3,77	1,13	1	1	151,6	1,94	1,58	37,50	50,00
50	30	2	2,31	2,94	0,153	521	9,77	4,84	9,54	3,81	4,74	1,80	4,29	2,86	3,33	1,21	1	1	123,4	1,99	1,40	26,71	44,51
50	30	2,5	2,82	3,59	0,151	422	11,74	5,72	11,30	4,52	5,70	1,77	5,05	3,37	3,98	1,19	1	1	150,7	2,39	1,67	32,64	54,39
50	30	3	3,30	4,21	0,150	356	13,53	6,49	12,83	5,13	6,57	1,75	5,70	3,80	4,58	1,16	1	1	176,8	2,76	1,92	38,27	63,78
50	30	4	4,20	5,35	0,146	273	16,53	7,71	15,25	6,10	8,05	1,69	6,69	4,46	5,58	1,12	1	1	224,6	3,38	2,34	48,63	81,05
60	40	2	2,93	3,74	0,193	517	20,70	8,12	18,41	6,14	7,47	2,22	9,83	4,92	5,65	1,62	2	1	157,0	3,14	2,37	36,25	54,37
60	40	2,5	3,60	4,59	0,191	417	25,14	9,72	22,07	7,36	9,06	2,19	11,74	5,87	6,84	1,60	1	1	192,7	3,80	2,87	44,51	66,77
60	40	3	4,25	5,41	0,190	351	29,28	11,17	25,38	8,46	10,53	2,17	13,44	6,72	7,94	1,58	1	1	227,2	4,42	3,34	52,46	78,69
60	40	4	5,45	6,95	0,186	268	36,67	13,65	30,99	10,33	13,16	2,11	16,28	8,14	9,89	1,53	1	1	291,8	5,53	4,16	67,39	101,1
60	40	5	6,56	8,36	0,183	219	42,85	15,60	35,33	11,78	15,38	2,06	18,43	9,21	11,52	1,48	1	1	351,0	6,46	4,84	81,05	121,6
70	50	2	3,56	4,54	0,233	514	37,45	12,20	31,48	8,99	10,80	2,63	18,76	7,50	8,58	2,03	4	1	184,1	4,54	3,03	45,84	64,18
70	50	2,5	4,39	5,59	0,231	414	45,75	14,72	38,01	10,86	13,16	2,61	22,59	9,04	10,45	2,01	2	1	234,7	5,53	4,39	56,47	79,06
70	50	3	5,19	6,61	0,230	348	53,62	17,06	44,05	12,59	15,40	2,58	26,10	10,44	12,21	1,99	1	1	277,6	6,47	5,13	66,77	93,47
70	50	4	6,71	8,55	0,226	265	68,07	21,19	54,67	15,62	19,48	2,53	32,22	12,89	15,41	1,94	1	1	359,0	8,18	6,47	86,37	120,9
70	50	5	8,13	10,36	0,223	215	80,77	24,64	63,46	18,13	23,06	2,48	37,20	14,88	18,20	1,90	1	1	435,0	9,68	7,64	104,63	146,5
80	40	2	3,56	4,54	0,233	514	30,88	11,00	37,36	9,34	11,61	2,87	12,72	6,36	7,17	1,67	4	1	172,9	4,88	2,39	36,67	73,34
80	40	2,5	4,39	5,59	0,231	414	37,58	13,24	45,11	11,28	14,15	2,84	15,26	7,63	8,72	1,65	3	1	234,7	5,94	3,20	45,18	90,35
80	40	3	5,19	6,61	0,230	348	43,88	15,28	52,25	13,06	16,54	2,81	17,56	8,78	10,16	1,63	1	1	277,6	6,95	4,27	53,41	106,8
80	40	4	6,71	8,55	0,226	265	55,24	18,84	64,79	16,20	20,91	2,75	21,49	10,74	12,77	1,59	1	1	359,0	8,78	5,37	69,09	138,2
80	40	5	8,13	10,36	0,223	215	64,97	21,74	75,11	18,78	24,74	2,69	24,59	12,30	15,02	1,54	1	1	435,0	10,39	6,31	83,71	167,4

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el,y}$	$W_{pl,y}$	i_y	I_z	$W_{el,z}$	$W_{pl,z}$	i_z	PL		$N_{c,Rd}$	$M_{c,y,Rd}$	$M_{c,z,Rd}$	$V_{pl,y,Rd}$	$V_{pl,z,Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
80	60	2,5	5,17	6,59	0,271	412	75,07	20,73	60,13	15,03	18,02	3,02	38,61	12,87	14,81	2,42	3	1	276,7	7,57	5,41	68,48	91,30
80	60	3	6,13	7,81	0,270	345	88,35	24,14	70,05	17,51	21,16	3,00	44,89	14,96	17,37	2,40	1	1	328,0	8,89	7,30	81,15	108,2
80	60	4	7,97	10,15	0,266	262	113,1	30,32	87,92	21,98	26,99	2,94	56,12	18,71	22,12	2,35	1	1	426,2	11,34	9,29	105,5	140,6
80	60	5	9,70	12,36	0,263	213	135,5	35,67	103,3	25,82	32,24	2,89	65,66	21,89	26,38	2,31	1	1	519,0	13,54	11,08	128,4	171,2
90	50	2,5	5,17	6,59	0,271	412	65,30	19,24	70,26	15,61	19,25	3,27	28,24	11,29	12,82	2,07	4	1	263,4	8,09	4,48	57,06	102,7
90	50	3	6,13	7,81	0,270	345	76,67	22,36	81,85	18,19	22,60	3,24	32,74	13,10	15,03	2,05	2	1	328,0	9,49	6,31	67,62	121,7
90	50	4	7,97	10,15	0,266	262	97,70	27,96	102,7	22,82	28,82	3,18	40,71	16,28	19,09	2,00	1	1	426,2	12,11	8,02	87,88	158,2
90	50	5	9,70	12,36	0,263	213	116,5	32,75	126,0	26,80	34,41	3,12	47,37	18,95	22,70	1,96	1	1	519,0	14,45	9,53	107,0	192,6
100	40	2,5	5,17	6,59	0,271	412	50,52	16,76	79,32	15,86	20,23	3,47	18,78	9,39	10,59	1,69	4	1	249,2	8,50	3,52	45,65	114,1
100	40	3	6,13	7,81	0,270	345	59,05	19,39	92,34	18,47	23,75	3,44	21,67	10,84	12,38	1,67	3	1	328,0	9,97	4,55	54,10	135,2
100	40	4	7,97	10,15	0,266	262	74,53	24,04	115,7	23,14	30,26	3,38	26,69	13,35	15,65	1,62	1	1	426,2	12,71	6,58	70,31	175,8
100	40	5	9,70	12,36	0,263	213	87,92	27,90	135,6	27,12	36,09	3,31	30,76	15,38	18,52	1,58	1	1	519,0	15,16	7,78	85,61	219,0
100	50	2,5	5,56	7,09	0,291	411	75,39	21,49	91,20	18,24	22,67	3,59	31,06	12,42	14,01	2,09	4	1	270,2	9,52	4,68	57,30	114,6
100	50	3	6,60	8,41	0,290	345	88,56	25,01	106,5	21,29	26,66	3,56	36,06	14,42	16,44	2,07	3	1	353,2	11,20	6,06	67,96	135,9
100	50	4	8,59	10,95	0,286	261	113,0	31,35	134,1	26,83	34,10	3,50	44,95	17,98	20,93	2,03	1	1	459,8	14,32	8,79	88,49	177,0
100	50	5	10,5	13,36	0,283	212	134,9	36,80	158,2	31,64	40,84	3,44	52,45	20,98	24,95	1,98	1	1	561,0	17,15	10,48	108,0	215,9
100	50	6	12,3	15,63	0,279	179	154,2	41,43	178,8	35,75	46,90	3,38	58,67	23,47	28,52	1,94	1	1	656,6	19,70	11,98	126,4	252,7
100	60	2,5	5,96	7,59	0,311	410	103,3	26,23	103,1	20,62	25,11	3,69	46,88	15,63	17,68	2,49	4	1	291,2	10,55	5,91	69,01	115,0
100	60	3	7,07	9,01	0,310	344	121,7	30,64	120,6	24,11	29,57	3,66	54,65	18,22	20,79	2,46	3	1	378,4	12,42	7,65	81,91	136,5
100	60	4	9,22	11,75	0,306	261	156,3	38,68	152,6	30,52	37,94	3,60	68,68	22,89	26,60	2,42	1	1	493,4	15,93	11,17	106,8	178,1
100	60	5	11,3	14,36	0,303	211	187,9	45,75	180,8	36,15	45,59	3,55	80,83	26,94	31,88	2,37	1	1	603,0	19,15	13,39	130,5	217,6
100	60	6	13,2	16,83	0,299	178	216,4	51,92	205,3	41,06	52,54	3,49	91,20	30,40	36,64	2,33	1	1	707,0	22,07	15,39	153,1	255,1
100	80	2,5	6,74	8,59	0,351	409	165,8	35,73	126,9	25,37	29,98	3,84	90,17	22,54	25,77	3,24	4	3	332,1	10,66	8,60	92,57	115,7
100	80	3	8,01	10,21	0,350	343	196,1	41,91	148,8	29,76	35,39	3,82	105,6	26,41	30,40	3,22	3	1	428,8	14,86	11,09	110,0	137,5
100	80	4	10,5	13,35	0,346	259	253,8	53,38	189,5	37,89	45,62	3,77	134,2	33,54	39,15	3,17	1	1	560,6	19,16	16,44	143,9	179,8
100	80	5	12,8	16,36	0,343	210	307,6	63,72	225,9	45,19	55,09	3,72	159,6	39,90	47,24	3,12	1	1	687,0	23,14	19,84	176,3	220,3
100	80	6	15,1	19,23	0,339	176	357,4	72,98	258,4	51,68	63,82	3,67	182,1	45,53	54,67	3,08	1	1	807,8	26,80	22,96	207,3	259,1
120	40	2,5	5,96	7,59	0,311	410	63,77	20,27	126,7	21,12	27,32	4,09	22,30	11,15	12,47	1,71	4	1	259,2	11,48	3,74	46,01	138,0
120	40	3	7,07	9,01	0,310	344	74,56	23,51	148,0	24,67	32,16	4,05	25,79	12,89	14,60	1,69	4	1	338,7	13,51	4,81	54,61	163,8
120	40	4	9,22	11,75	0,306	261	94,23	29,24	186,9	31,15	41,21	3,99	31,90	15,95	18,53	1,65	2	1	493,4	17,31	7,78	71,22	213,7
120	40	5	11,3	14,36	0,303	211	111,4	34,05	220,8	36,80	49,45	3,92	36,93	18,46	22,02	1,60	1	1	603,0	20,77	9,25	87,03	261,1
120	40	6	13,2	16,83	0,299	178	126,0	38,02	250,0	41,66	56,89	3,85	40,97	20,49	25,08	1,56	1	1	707,0	23,90	10,53	102,0	306,1
120	50	2,5	6,35	8,09	0,331	410	96,03	26,01	144,0	23,99	30,26	4,22	36,70	14,68	16,39	2,13	4	1	280,2	12,71	4,98	57,69	138,5
120	50	3	7,54	9,61	0,330	343	112,9	30,32	168,6	28,10	35,67	4,19	42,69	17,08	19,26	2,11	4	1	363,9	14,98	6,40	68,53	164,5
120	50	4	9,85	12,55	0,326	260	144,2	38,13	213,8	35,64	45,85	4,13	53,43	21,37	24,61	2,06	2	1	527,0	19,26	10,34	89,49	214,8
120	50	5	12,1	15,36	0,323	210	172,4	44,92	253,9	42,32	55,20	4,07	62,62	25,05	29,45	2,02	1	1	645,0	23,18	12,37	109,5	262,9
120	50	6	14,2	18,03	0,319	177	197,6	50,76	289,0	48,16	63,73	4,00	70,36	28,14	33,80	1,98	1	1	757,4	26,77	14,20	128,6	308,7
120	60	2,5	6,74	8,59	0,351	409	132,6	31,75	161,2	26,87	33,20	4,33	55,15	18,89	20,56	2,53	4	1	301,2	13,94	6,29	69,42	138,9
120	60	3	8,01	10,21	0,350	343	156,3	37,14	189,1	31,52	39,18	4,30	64,40	21,47	24,21	2,51	4	1	389,1	16,45	8,08	82,51	165,0
120	60	4	10,5	13,35	0,346	259	201,1	47,05	240,7	40,12	50,49	4,25	81,25	27,08	31,08	2,47	2	1	560,6	21,20	13,05	107,9	215,8
120	60	5	12,8	16,36	0,343	210	242,2	55,85	287,0	47,83	60,95	4,19	95,99	32,00	37,38	2,42	1	1	687,0	25,60	15,70	132,2	264,4
120	60	6	15,1	19,23	0,339	176	279,7	63,60	328,0	54,67	70,57	4,13	108,8	36,26	43,12	2,38	1	1	807,8	29,64	18,11	155,5	310,9

Taulukko 11.1.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

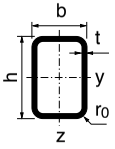
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
120	80	2,5	7,53	9,59	0,391	408	215,8	43,23	195,8	32,63	39,07	4,52	105,2	26,30	29,65	3,31	4	3	342,1	13,70	9,13	93,01	139,5
120	80	3	8,96	11,41	0,390	342	255,5	50,80	230,2	38,37	46,20	4,49	123,4	30,86	35,02	3,29	4	1	439,5	19,40	11,71	110,7	166,0
120	80	4	11,7	14,95	0,386	258	331,2	64,93	294,6	49,10	59,77	4,44	157,3	39,32	45,23	3,24	2	1	627,8	25,10	19,00	145,0	217,5
120	80	5	14,4	18,36	0,383	209	402,3	77,77	353,1	58,86	72,45	4,39	187,8	46,94	54,74	3,20	1	1	771,0	30,43	22,99	178,1	267,1
120	80	6	17,0	21,63	0,379	175	468,5	89,40	406,1	67,68	84,25	4,33	215,0	53,76	63,55	3,15	1	1	908,6	35,39	26,69	209,8	314,7
120	80	7,1	19,4	24,65	0,369	150	535,1	99,99	442,1	73,68	93,59	4,24	234,4	58,60	70,68	3,08	1	1	1035	39,31	29,69	239,1	358,6
120	80	8	21,4	27,24	0,366	134	584,0	108,0	475,8	79,31	102,0	4,18	251,7	62,92	76,93	3,04	1	1	1144	42,83	32,31	264,2	396,4
120	80	8,8	23,1	29,44	0,362	123	623,5	114,3	501,8	83,63	108,8	4,13	264,8	66,21	81,97	3,00	1	1	1237	45,68	34,43	285,6	428,4
120	80	10	25,6	32,57	0,357	110	675,6	122,4	534,1	89,02	117,8	4,05	281,1	70,29	88,68	2,94	1	1	1368	49,48	37,25	315,9	473,8
120	100	2,5	8,31	10,59	0,431	407	309,4	54,73	230,3	38,38	44,95	4,66	174,4	34,88	39,73	4,06	4	4	357,7	14,84	12,27	116,7	140,1
120	100	3	9,90	12,61	0,430	341	367,0	64,47	271,3	45,21	53,22	4,64	205,3	41,06	47,03	4,04	4	3	482,8	18,99	15,68	139,0	166,8
120	100	4	13,0	16,55	0,426	258	477,8	82,83	348,4	58,07	69,05	4,59	263,2	52,65	60,98	3,99	2	1	695,0	29,00	25,61	182,4	218,9
120	100	5	16,0	20,36	0,423	208	582,9	99,75	419,3	69,88	83,95	4,54	316,3	63,25	74,09	3,94	1	1	855,0	35,26	31,12	224,4	269,2
120	100	6	18,9	24,03	0,419	175	682,0	115,3	484,1	80,68	97,93	4,49	364,6	72,91	86,38	3,89	1	1	1009	41,13	36,28	264,9	317,9
140	60	2,5	7,53	9,59	0,391	408	162,7	37,26	236,6	33,79	42,29	4,97	63,43	21,14	23,43	2,57	4	1	308,2	17,76	6,57	69,76	162,8
140	60	3	8,96	11,41	0,390	342	191,9	43,64	278,1	39,73	49,98	4,94	74,16	24,72	27,63	2,55	4	1	401,5	20,99	8,52	82,99	193,6
140	60	4	11,7	14,95	0,386	258	247,1	55,42	355,6	50,80	64,63	4,88	93,81	31,27	35,56	2,51	4	1	602,0	27,15	12,54	108,7	253,7
140	60	5	14,4	18,36	0,383	209	298,0	65,94	425,9	60,84	78,30	4,82	111,2	37,05	42,88	2,46	2	1	771,0	32,89	18,01	133,5	311,6
140	60	6	17,0	21,63	0,379	175	344,5	75,29	489,2	69,88	91,01	4,76	126,3	42,11	49,60	2,42	1	1	908,6	38,22	20,83	157,4	367,2
140	70	2,5	7,92	10,09	0,411	408	213,1	44,00	260,2	37,17	45,72	5,08	89,30	25,51	28,35	2,98	4	2	329,2	19,20	8,01	81,55	163,1
140	70	3	9,43	12,01	0,410	341	252,0	51,66	306,2	43,75	54,09	5,05	104,7	29,91	33,49	2,95	4	1	426,7	22,72	10,38	97,06	194,1
140	70	4	12,4	15,75	0,406	258	326,0	65,94	392,6	56,09	70,07	4,99	133,2	38,05	43,24	2,91	4	1	635,6	29,43	15,28	127,3	254,6
140	70	5	15,2	19,36	0,403	208	395,1	78,88	471,5	67,35	85,05	4,94	158,7	45,35	52,31	2,86	2	1	813,0	35,72	21,97	156,5	312,9
140	70	6	17,9	22,83	0,399	175	459,1	90,54	543,1	77,59	99,05	4,88	181,4	51,84	60,71	2,82	1	1	959,0	41,60	25,50	184,6	369,1
140	80	3	9,90	12,61	0,430	341	317,1	59,69	334,4	47,77	58,20	5,15	141,2	35,31	39,64	3,35	4	1	451,9	24,45	12,34	111,2	194,6
140	80	4	13,0	16,55	0,426	258	411,6	76,48	429,6	61,37	75,51	5,10	180,4	45,10	51,31	3,30	4	1	669,2	31,72	18,14	145,9	255,4
140	80	5	16,0	20,36	0,423	208	500,5	91,83	517,1	73,87	91,80	5,04	215,9	53,99	62,24	3,26	2	1	855,0	38,56	26,14	179,5	314,1
140	80	6	18,9	24,03	0,419	175	583,8	105,8	597,0	85,29	107,1	4,98	248,0	61,99	72,43	3,21	1	1	1009	44,98	30,42	211,9	370,9

150	50	2,5	7,53	9,59	0,391	408	127,7	32,78	254,1	33,88	43,52	5,15	45,17	18,07	19,95	2,17	4	2	290,0	18,28	5,29	58,13	174,4
150	50	3	8,96	11,41	0,390	342	150,2	38,28	298,6	39,81	51,43	5,12	52,65	21,06	23,49	2,15	4	1	381,2	21,60	6,90	69,16	207,5
150	50	4	11,7	14,95	0,386	258	192,1	48,30	381,4	50,85	66,47	5,05	66,16	26,47	30,13	2,10	4	1	580,5	27,92	10,22	90,62	271,9
150	50	5	14,4	18,36	0,383	209	230,1	57,11	456,3	60,84	80,48	4,99	77,87	31,15	36,20	2,06	2	1	771,0	33,80	15,20	111,3	333,8
150	50	6	17,0	21,63	0,379	175	264,0	64,77	523,5	69,80	93,48	4,92	87,89	35,16	41,72	2,02	1	1	908,6	39,26	17,52	131,1	393,4
150	100	3	11,3	14,41	0,490	340	507,2	81,40	460,6	61,42	73,48	5,65	247,6	49,53	55,76	4,15	4	3	500,1	25,80	16,85	139,8	209,6
150	100	4	14,9	18,95	0,486	257	661,6	104,9	594,6	79,28	95,67	5,60	318,6	63,71	72,50	4,10	4	1	748,5	40,18	24,90	183,8	275,7
150	100	5	18,3	23,36	0,483	207	808,7	126,8	719,2	95,89	116,7	5,55	384,0	76,80	88,34	4,05	2	1	981,0	49,03	37,10	226,5	339,8
150	100	6	21,7	27,63	0,479	173	948,3	147,1	834,7	111,3	136,7	5,50	444,2	88,84	103,3	4,01	1	1	1161	57,41	43,39	268,0	402,0
150	100	7,1	24,9	31,75	0,470	148	1096	166,8	926,9	123,6	154,1	5,40	493,6	98,72	116,6	3,94	1	1	1334	64,72	48,96	308,0	462,0
150	100	8	27,7	35,24	0,466	132	1206	181,9	1008	134,4	169,2	5,35	535,7	107,1	127,9	3,90	1	1	1480	71,05	53,70	341,8	512,8
150	100	8,8	30,0	38,24	0,462	121	1298	194,2	1074	143,2	181,7	5,30	569,5	113,9	137,3	3,86	1	1	1606	76,33	57,64	370,9	556,4
150	100	10	33,4	42,57	0,457	107	1426	211,0	1162	154,9	199,2	5,22	614,4	122,9	150,3	3,80	1	1	1788	83,65	63,10	412,9	619,3
160	70	4	13,6	17,35	0,446	257	389,7	75,90	549,0	68,63	86,62	5,63	150,6	43,04	48,52	2,95	4	1	658,1	36,38	16,15	128,0	292,6
160	70	5	16,8	21,36	0,443	207	472,5	90,96	661,6	82,70	105,4	5,57	179,9	51,39	58,81	2,90	3	1	897,0	44,27	21,59	157,6	360,3
160	70	6	19,8	25,23	0,439	174	549,6	104,6	764,8	95,60	123,1	5,51	206,1	58,88	68,39	2,86	1	1	1060	51,69	28,72	186,2	425,6
160	70	8	25,2	32,04	0,426	133	683,7	126,7	908,7	113,6	150,7	5,33	243,3	69,50	83,55	2,76	1	1	1346	63,29	35,09	236,5	540,5
160	80	3	10,8	13,81	0,470	340	380,3	68,59	463,8	57,98	71,41	5,80	159,0	39,76	44,26	3,39	4	1	461,0	29,99	12,83	111,6	223,2
160	80	4	14,3	18,15	0,466	257	494,1	88,03	597,7	74,71	92,86	5,74	203,5	50,89	57,39	3,35	4	1	691,7	39,00	19,15	146,7	293,4
160	80	5	17,6	22,36	0,463	207	601,3	105,9	721,7	90,21	113,2	5,68	244,1	61,03	69,74	3,30	3	1	939,0	47,53	25,63	180,7	361,4
160	80	6	20,8	26,43	0,459	174	702,1	122,3	836,0	104,5	132,3	5,62	280,9	70,22	81,31	3,26	1	1	1110	55,57	34,15	213,7	427,3
160	80	7,1	23,8	30,33	0,449	148	805,5	137,8	922,6	115,3	148,6	5,52	310,1	77,53	91,39	3,20	1	1	1274	62,40	38,38	245,1	490,3
160	80	8	26,4	33,64	0,446	132	882,3	149,5	1001	125,2	162,9	5,46	335,0	83,74	99,97	3,16	1	1	1413	68,40	41,99	271,9	543,9
160	80	10	31,8	40,57	0,437	108	1031	171,6	1146	143,3	191,0	5,32	379,8	94,95	116,7	3,06	1	1	1704	80,20	49,01	327,9	655,8
160	90	3	11,3	14,41	0,490	340	465,4	77,82	500,8	62,60	76,12	5,90	206,8	45,95	51,31	3,79	4	2	486,2	31,97	14,95	125,8	223,6
160	90	4	14,9	18,95	0,486	257	606,2	100,2	646,4	80,80	99,10	5,84	265,5	59,01	66,66	3,74	4	1	725,3	41,62	22,28	165,4	294,1
160	90	5	18,3	23,36	0,483	207	739,7	120,9	781,8	97,72	120,9	5,79	319,5	71,00	81,16	3,70	3	1	981,0	50,78	29,82	203,9	362,5
160	90	6	21,7	27,63	0,479	173	866,0	140,0	907,2	113,4	141,6	5,73	368,9	81,98	94,82	3,65	1	1	1161	59,46	39,83	241,2	428,8
160	90	7,1	24,9	31,75	0,470	148	997,9	158,4	1006	125,8	159,5	5,63	409,3	90,96	106,9	3,59	1	1	1334	66,98	44,91	277,2	492,8
160	90	8	27,7	35,24	0,466	132	1097	172,4	1094	136,7	175,0	5,57	443,5	98,55	117,2	3,55	1	1	1480	73,51	49,22	307,7	546,9
160	90	8,8	30,0	38,24	0,462	121	1178	183,9	1165	145,6	188,0	5,52	470,8	104,6	125,7	3,51	1	1	1606	78,95	52,80	333,9	593,5
180	100	4	16,8	21,35	0,546	256	853,9	127,1	926,0	102,9	125,9	6,59	373,9	74,78	84,02	4,18	4	1	776,1	52,87	26,59	184,9	332,8
180	100	5	20,7	26,36	0,543	206	1045	153,9	1124	124,9	154,0	6,53	451,8	90,35	102,6	4,14	4	1	1053	64,69	35,87	228,3	410,9
180	100	5,6	23,0	29,30	0,541	185	1155	169,1	1237	137,4	170,3	6,50	495,7	99,14	113,3	4,11	3	1	1231	71,51	41,64	253,7	456,7
180	100	6	24,5	31,23	0,539	173	1227	178,9	1310	145,5	180,8	6,48	523,8	104,8	120,2	4,10	2	1	1312	75,95	50,49	270,5	486,9
180	100	7,1	28,3	36,01	0,530	147	1420	203,5	1464	162,7	204,9	6,38	585,7	117,1	136,4	4,03	1	1	1513	86,07	57,27	311,9	561,4
180	100	8	31,4	40,04	0,526	131	1565	222,5	1598	177,6	225,6	6,32	637,5	127,5	149,9	3,99	1	1	1682	94,76	62,97	346,8	624,2
180	100	8,8	34,2	43,52	0,522	120	1688	238,2	1709	189,9	243,1	6,27	679,7	135,9	161,3	3,95	1	1	1828	102,1	67,76	376,9	678,5
180	100	10	38,1	48,57	0,517	106	1859	259,6	1859	206,6	267,5	6,19	736,4	147,3	177,3	3,89	1	1	2040	112,4	74,44	420,6	757,1
h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN

Taulukko 11.1.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

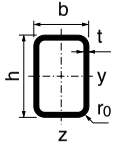
r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
180	120	4	18,0	22,95	0,586	255	1160	154,6	1050	116,7	140,0	6,76	563,8	93,97	106,2	4,96	4	2	843,3	58,79	33,69	222,6	333,9
180	120	5	22,3	28,36	0,583	206	1424	187,8	1277	141,9	171,5	6,71	684,0	114,0	130,0	4,91	4	1	1137	72,04	45,37	275,0	412,6
180	120	6	26,4	33,63	0,579	172	1677	219,1	1491	165,7	201,7	6,66	796,3	132,7	152,7	4,87	2	1	1413	84,72	64,11	326,2	489,3
180	120	7,1	30,5	38,85	0,570	147	1949	250,5	1676	186,3	229,5	6,57	895,4	149,2	173,8	4,80	1	1	1632	96,38	72,99	376,9	565,3
180	120	8	34,0	43,24	0,566	131	2156	274,8	1835	203,9	253,1	6,51	978,4	163,1	191,6	4,76	1	1	1816	106,3	80,46	419,4	629,1
180	120	8,8	36,9	47,04	0,562	120	2332	295,1	1967	218,6	273,2	6,47	1047	174,5	206,6	4,72	1	1	1976	114,7	86,78	456,3	684,4
180	120	10	41,3	52,57	0,557	106	2582	323,3	2149	238,8	301,5	6,39	1141	190,1	227,8	4,66	1	1	2208	126,6	95,68	509,9	764,8
180	120	12,5	48,7	62,04	0,536	86	3001	367,5	2352	261,4	341,5	6,16	1252	208,7	258,5	4,49	1	1	2606	143,4	108,6	601,8	902,7
200	80	4	16,8	21,35	0,546	256	663,6	111,1	1046	104,6	132,4	7,00	249,8	62,45	69,55	3,42	4	1	722,4	55,59	20,63	147,9	369,8
200	80	5	20,7	26,36	0,543	206	808,4	134,1	1269	126,9	161,9	6,94	300,4	75,11	84,74	3,38	4	1	996,8	67,99	28,12	182,6	456,5
200	80	6	24,5	31,23	0,539	173	944,8	155,2	1477	147,7	190,0	6,88	346,7	86,69	99,07	3,33	3	1	1312	79,79	36,41	216,4	541,0
200	80	7,1	28,3	36,01	0,529	147	1086	175,6	1646	164,6	214,9	6,76	385,8	96,45	112,1	3,27	2	1	1512	90,26	47,08	249,5	623,7
200	80	8	31,4	40,04	0,526	131	1192	191,1	1796	179,6	236,5	6,70	418,2	104,6	123,0	3,23	1	1	1682	99,35	51,66	277,4	693,6
200	80	8,8	34,2	43,52	0,522	120	1279	203,8	1918	191,8	254,7	6,64	444,2	111,1	132,1	3,19	1	1	1828	107,0	55,48	301,5	753,9
200	80	10	38,1	48,57	0,517	106	1399	220,8	2083	208,3	280,1	6,55	478,5	119,6	144,7	3,14	1	1	2040	117,6	60,77	336,5	841,2
200	100	4	18,0	22,95	0,586	255	985,4	141,8	1200	120,0	148,0	7,23	410,8	82,16	91,70	4,23	4	1	789,6	62,18	27,47	185,5	371,0
200	100	5	22,3	28,36	0,583	206	1206	171,9	1459	145,9	181,4	7,17	496,9	99,39	112,1	4,19	4	1	1081	76,18	37,41	229,2	458,4
200	100	6	26,4	33,63	0,579	172	1417	200,1	1703	170,3	213,3	7,12	576,9	115,4	131,5	4,14	3	1	1413	89,57	48,46	271,9	543,7
200	100	7,1	30,5	38,85	0,570	147	1641	228,1	1911	191,1	242,4	7,01	647,1	129,4	149,6	4,08	2	1	1632	101,8	62,81	314,0	628,1
200	100	8	34,0	43,24	0,566	131	1811	249,6	2091	209,1	267,3	6,95	705,4	141,1	164,7	4,04	1	1	1816	112,3	69,15	349,5	699,1
200	100	8,8	36,9	47,04	0,562	120	1954	267,5	2240	224,0	288,3	6,90	753,1	150,6	177,4	4,00	1	1	1976	121,1	74,50	380,3	760,5
200	100	10	41,3	52,57	0,557	106	2154	292,1	2444	244,4	318,1	6,82	817,7	163,6	195,3	3,94	1	1	2208	133,6	82,00	424,9	849,8
200	100	12,5	48,7	62,04	0,536	86	2474	328,8	2659	265,9	359,1	6,55	892,2	178,4	220,8	3,79	1	1	2606	150,8	92,73	501,5	1003

200	120	5	23,8	30,36	0,623	205	1652	209,9	1649	164,9	200,9	7,37	750,1	125,0	141,5	4,97	4	1	1165	84,37	47,29	276,0	460,1
200	120	6	28,3	36,03	0,619	172	1947	245,1	1929	192,9	236,6	7,32	874,4	145,7	166,3	4,93	3	1	1513	99,35	61,20	327,7	546,1
200	120	7,1	32,7	41,69	0,610	146	2265	280,7	2175	217,5	269,7	7,22	986,0	164,3	189,8	4,86	2	1	1751	113,3	79,72	379,1	631,9
200	120	8	36,5	46,44	0,606	130	2507	308,3	2386	238,6	298,0	7,17	1079	179,8	209,5	4,82	1	1	1951	125,2	87,99	422,3	703,9
200	120	8,8	39,7	50,56	0,602	119	2714	331,4	2562	256,2	322,0	7,12	1156	192,7	226,2	4,78	1	1	2124	135,2	95,00	459,8	766,3
200	120	10	44,4	56,57	0,597	106	3007	363,7	2806	280,6	356,1	7,04	1262	210,4	249,8	4,72	1	1	2376	149,6	104,9	514,4	857,3
200	120	12,5	52,6	67,04	0,576	86	3514	415,7	3099	309,9	406,0	6,80	1397	232,9	285,3	4,57	1	1	2816	170,5	119,8	609,6	1016
220	120	5	25,4	32,36	0,663	205	1885	231,9	2082	189,3	232,2	8,02	816,3	136,1	153,0	5,02	4	1	1187	97,54	48,90	276,9	507,7
220	120	6	30,2	38,43	0,659	172	2222	271,1	2439	221,7	273,8	7,97	952,4	158,7	180,0	4,98	4	1	1524	115,0	62,46	328,9	603,0
220	120	7,1	35,0	44,53	0,650	146	2586	310,8	2757	250,7	312,9	7,87	1077	179,4	205,9	4,92	2	1	1870	131,4	86,46	381,1	698,7
220	120	8	39,0	49,64	0,646	130	2864	341,7	3029	275,4	346,0	7,81	1179	196,6	227,4	4,87	1	1	2085	145,3	95,51	424,9	778,9
220	120	8,8	42,5	54,08	0,642	119	3102	367,7	3258	296,1	374,3	7,76	1265	210,9	245,8	4,84	1	1	2272	157,2	103,2	462,9	848,6
220	120	10	47,5	60,57	0,637	105	3440	404,1	3576	325,1	414,7	7,68	1383	230,6	271,8	4,78	1	1	2544	174,2	114,2	518,4	950,3
250	100	5	26,2	33,36	0,683	205	1620	217,1	2554	204,3	258,5	8,75	609,9	122,0	135,8	4,28	4	1	1129	108,6	40,30	231,1	577,7
250	100	6	31,1	39,63	0,679	171	1905	253,2	2992	239,4	304,9	8,69	709,6	141,9	159,7	4,23	4	1	1470	128,0	51,99	274,6	686,5
250	100	8	40,2	51,24	0,666	130	2439	317,4	3714	297,1	385,4	8,51	875,1	175,0	201,5	4,13	2	1	2152	161,9	84,61	355,0	887,5
250	100	10	49,1	62,57	0,657	105	2910	373,3	4384	350,7	462,0	8,37	1021	204,2	240,3	4,04	1	1	2628	194,0	100,9	433,5	1084
250	150	5	30,1	38,36	0,783	204	3285	336,9	3304	264,3	319,8	9,28	1508	201,1	225,5	6,27	4	2	1339	134,3	67,96	348,8	581,3
250	150	6	35,8	45,63	0,779	171	3886	395,7	3886	310,8	378,1	9,23	1768	235,8	266,3	6,23	4	1	1722	158,8	87,42	415,0	691,6
250	150	7,1	41,7	53,05	0,770	145	4543	456,3	4428	354,2	434,6	9,14	2015	268,7	306,3	6,16	4	1	2141	182,5	107,8	482,4	804,0
250	150	8	46,5	59,24	0,766	129	5050	504,0	4886	390,9	482,2	9,08	2219	295,9	339,6	6,12	2	1	2488	202,5	142,6	538,7	897,8
250	150	8,8	50,8	64,64	0,762	118	5488	544,5	5274	422,0	523,1	9,03	2392	318,9	368,1	6,08	2	1	2715	219,7	154,6	587,8	979,7
250	150	10	57,0	72,57	0,757	104	6121	602,1	5825	466,0	582,0	8,96	2634	351,2	409,2	6,02	1	1	3048	244,4	171,9	659,9	1100
250	150	12,5	68,3	87,04	0,736	85	7315	704,1	6633	530,6	678,3	8,73	3002	400,3	477,5	5,87	1	1	3656	284,9	200,5	791,5	1319
260	140	6	35,8	45,63	0,779	171	3646	382,5	4082	314,0	385,9	9,46	1567	223,9	251,8	5,86	4	1	1684	162,1	81,08	387,3	719,3
260	140	7,1	41,7	53,05	0,770	145	4258	440,8	4648	357,6	443,5	9,36	1785	255,0	289,6	5,80	4	1	2104	186,3	100,3	450,3	836,2
260	140	8	46,5	59,24	0,766	129	4731	486,5	5129	394,5	492,0	9,30	1964	280,6	320,9	5,76	3	1	2488	206,7	117,9	502,8	933,8
260	140	8,8	50,8	64,64	0,762	118	5138	525,3	5536	425,9	533,7	9,25	2115	302,2	347,8	5,72	2	1	2715	224,2	146,1	548,6	1019
260	140	10	57,0	72,57	0,757	104	5724	580,4	6113	470,2	593,8	9,18	2328	332,5	386,4	5,66	1	1	3048	249,4	162,3	615,9	1144
260	140	12,5	68,3	87,04	0,736	85	6821	677,2	6950	534,6	691,5	8,94	2648	378,3	450,5	5,52	1	1	3656	290,4	189,2	738,7	1372
260	180	6	39,6	50,43	0,859	170	5566	501,4	4856	373,5	446,9	9,81	2763	307,1	347,9	7,40	4	2	1886	187,7	112,3	500,3	722,6
260	180	7,1	46,1	58,73	0,850	145	6522	580,3	5557	427,5	515,3	9,73	3163	351,4	401,3	7,34	4	1	2342	216,4	138,8	582,6	841,6
260	180	8	51,5	65,64	0,846	129	7267	642,4	6145	472,7	572,7	9,68	3493	388,1	445,8	7,29	3	1	2757	240,5	163,0	651,2	940,6
260	180	8,8	56,3	71,68	0,842	117	7912	695,6	6647	511,3	622,2	9,63	3774	419,4	484,1	7,26	2	1	3011	261,3	203,3	711,1	1027
260	180	10	63,2	80,57	0,837	104	8850	771,9	7363	566,4	693,8	9,56	4174	463,8	539,5	7,20	1	1	3384	291,4	226,6	799,2	1154
h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN

Taulukko 11.1.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus

I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde

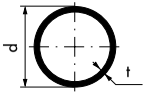
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

r_0 = 2,0 x t kun t ≤ 6,0 mm
r_0 = 2,5 x t kun 6,0 mm < t ≤ 10,0 mm
r_0 = 3,0 x t kun t > 10,0 mm

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I_y	$W_{el.y}$	$W_{pl.y}$	i_y	I_z	$W_{el.z}$	$W_{pl.z}$	i_z	PL		$N_{c.Rd}$	$M_{c.y.Rd}$	$M_{c.z.Rd}$	$V_{pl.y.Rd}$	$V_{pl.z.Rd}$
mm	mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10	h	b	kN	kNm	kNm	kN	kN
300	100	5	30,1	38,36	0,783	204	2044	262,2	4065	271,0	348,2	10,29	722,8	144,6	159,6	4,34	4	2	1160	146,2	42,32	232,5	697,6
300	100	6	35,8	45,63	0,779	171	2403	306,2	4777	318,5	411,4	10,23	842,4	168,5	187,9	4,30	4	1	1525	172,8	55,19	276,6	829,9
300	100	7,1	41,7	53,05	0,770	145	2787	350,8	5424	361,6	472,1	10,11	954,1	190,8	215,5	4,24	4	1	1937	198,3	68,92	321,6	964,8
300	100	8	46,5	59,24	0,766	129	3080	385,2	5978	398,5	523,5	10,05	1045	209,0	238,3	4,20	4	1	2299	219,9	80,65	359,1	1077
300	100	8,8	50,8	64,64	0,762	118	3329	414,2	6446	429,7	567,6	9,99	1120	224,0	257,6	4,16	3	1	2715	238,4	94,10	391,9	1176
300	100	10	57,0	72,57	0,757	104	3681	454,5	7106	473,7	630,9	9,90	1224	244,9	285,3	4,11	2	1	3048	265,0	119,8	439,9	1320
300	100	12,5	68,3	87,04	0,736	85	4292	521,2	8010	534,0	731,9	9,59	1374	274,8	330,2	3,97	1	1	3656	307,4	138,7	527,7	1583
300	150	6	40,5	51,63	0,879	170	4988	478,6	6074	404,9	499,6	10,85	2080	277,3	309,5	6,35	4	1	1777	209,8	92,71	417,3	834,7
300	150	7,1	47,2	60,15	0,870	145	5834	553,0	6947	463,1	576,1	10,75	2378	317,1	357,0	6,29	4	1	2235	242,0	115,9	486,2	972,4
300	150	8	52,8	67,24	0,866	129	6491	611,5	7684	512,2	640,3	10,69	2623	349,7	396,4	6,25	4	1	2635	268,9	135,8	543,5	1087
300	150	10	64,8	82,57	0,857	104	7879	732,8	9209	614,0	775,9	10,56	3125	416,7	479,2	6,15	2	1	3468	325,9	201,3	667,4	1335
300	150	12,5	78,1	99,54	0,836	84	9452	861,8	10590	706,3	911,5	10,32	3595	479,3	563,4	6,01	1	1	4181	382,8	236,6	804,6	1609
300	200	6	45,2	57,63	0,979	170	8115	651,2	7370	491,4	587,8	11,31	3962	396,2	446,1	8,29	4	3	2000	206,4	134,8	559,0	838,5
300	200	7,1	52,8	67,25	0,970	144	9524	755,7	8470	564,7	680,1	11,22	4554	455,4	516,3	8,23	4	2	2533	285,6	168,1	652,3	978,5
300	200	8	59,1	75,24	0,966	128	10630	838,4	9389	626,0	757,1	11,17	5042	504,2	574,5	8,19	4	1	2971	318,0	196,9	729,8	1095
300	200	8,8	64,6	82,24	0,962	117	11590	909,5	10178	678,6	823,8	11,12	5459	545,9	624,9	8,15	3	1	3454	346,0	229,3	797,7	1197
300	200	10	72,7	92,57	0,957	103	12990	1012	11313	754,2	920,9	11,05	6058	605,8	698,1	8,09	2	1	3888	386,8	293,2	897,8	1347
300	200	12,5	88,0	112,0	0,936	84	15770	1204	13179	878,6	1091	10,85	7060	706,0	827,9	7,94	1	1	4706	458,3	347,7	1087	1630
400	200	6	54,7	69,63	1,179	169	12069	877,1	14789	739,5	906,0	14,57	5092	509,2	562,5	8,55	4	3	2067	310,6	145,1	562,8	1126
400	200	7,1	63,9	81,45	1,170	144	14169	1020	17070	853,5	1052	14,48	5875	587,5	653,2	8,49	4	2	2646	441,8	183,5	658,4	1317
400	200	8	71,6	91,24	1,166	128	15820	1133	18974	948,7	1173	14,42	6517	651,7	728,1	8,45	4	1	3135	492,8	217,5	737,5	1475
400	200	8,8	78,4	99,84	1,162	116	17260	1231	20619	1031	1279	14,37	7069	706,9	793,1	8,41	4	1	3587	537,2	248,5	807,0	1614
400	200	10	88,4	112,6	1,157	103	19368	1373	23003	1150	1434	14,30	7864	786,4	888,1	8,36	4	1	4287	602,2	295,7	909,9	1820
400	200	12,5	108	137,0	1,136	83	23594	1644	27101	1355	1714	14,06	9260	926,1	1062	8,22	3	1	5756	719,9	388,9	1108	2215

Taulukko 11.1.7 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



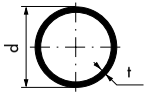
M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m²/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
26,9	2	1,23	1,56	0,085	540	2,44	1,81	1,22	0,91	1,24	0,88	1	65,71	0,52	24,15
26,9	2,5	1,50	1,92	0,085	441	2,88	2,14	1,44	1,07	1,49	0,87	1	80,49	0,63	29,58
26,9	2,6	1,56	1,98	0,085	426	2,96	2,20	1,48	1,10	1,54	0,86	1	83,36	0,65	30,64
33,7	2	1,56	1,99	0,106	532	5,02	2,98	2,51	1,49	2,01	1,12	1	83,65	0,85	30,75
33,7	2,5	1,92	2,45	0,106	432	6,00	3,56	3,00	1,78	2,44	1,11	1	102,9	1,02	37,83
33,7	2,6	1,99	2,54	0,106	417	6,19	3,67	3,09	1,84	2,52	1,10	1	106,7	1,06	39,22
33,7	3	2,27	2,89	0,106	366	6,88	4,08	3,44	2,04	2,84	1,09	1	121,5	1,19	44,67
33,7	3,2	2,41	3,07	0,106	345	7,21	4,28	3,60	2,14	2,99	1,08	1	128,8	1,25	47,33
42,4	2	1,99	2,54	0,133	525	10,38	4,90	5,19	2,45	3,27	1,43	1	106,6	1,37	39,19
42,4	2,5	2,46	3,13	0,133	425	12,52	5,91	6,26	2,95	3,99	1,41	1	131,6	1,67	48,38
42,4	2,6	2,55	3,25	0,133	410	12,93	6,10	6,46	3,05	4,12	1,41	1	136,5	1,73	50,19
42,4	2,9	2,82	3,60	0,133	370	14,11	6,66	7,06	3,33	4,53	1,40	1	151,2	1,90	55,55
42,4	3	2,91	3,71	0,133	359	14,49	6,84	7,25	3,42	4,67	1,40	1	156,0	1,96	57,32
42,4	3,2	3,09	3,94	0,133	338	15,24	7,19	7,62	3,59	4,93	1,39	1	165,5	2,07	60,84
42,4	4	3,79	4,83	0,133	276	17,98	8,48	8,99	4,24	5,92	1,36	1	202,7	2,49	74,49
48,3	2	2,28	2,91	0,152	522	15,62	6,47	7,81	3,23	4,29	1,64	1	122,2	1,80	44,91
48,3	2,5	2,82	3,60	0,152	422	18,92	7,83	9,46	3,92	5,25	1,62	1	151,1	2,20	55,53
48,3	2,6	2,93	3,73	0,152	406	19,55	8,10	9,78	4,05	5,44	1,62	1	156,8	2,28	57,62
48,3	3	3,35	4,27	0,152	355	22,00	9,11	11,00	4,55	6,17	1,61	1	179,3	2,59	65,91
48,3	3,2	3,56	4,53	0,152	335	23,17	9,59	11,59	4,80	6,52	1,60	1	190,4	2,74	69,99
48,3	4	4,37	5,57	0,152	273	27,54	11,40	13,77	5,70	7,87	1,57	1	233,8	3,31	85,94

d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
60,3	2	2,88	3,66	0,189	517	31,16	10,34	15,58	5,17	6,80	2,06	2	153,9	2,86	56,55
60,3	2,5	3,56	4,54	0,189	417	37,99	12,60	18,99	6,30	8,36	2,05	1	190,7	3,51	70,08
60,3	2,9	4,11	5,23	0,189	362	43,18	14,32	21,59	7,16	9,56	2,03	1	219,6	4,02	80,73
60,3	3	4,24	5,40	0,189	351	44,45	14,74	22,22	7,37	9,86	2,03	1	226,8	4,14	83,37
60,3	3,2	4,51	5,74	0,189	330	46,94	15,57	23,47	7,78	10,44	2,02	1	241,1	4,39	88,61
60,3	4	5,55	7,07	0,189	268	56,35	18,69	28,17	9,34	12,70	2,00	1	297,1	5,33	109,2
60,3	5	6,82	8,69	0,189	218	66,95	22,21	33,48	11,10	15,33	1,96	1	364,8	6,44	134,1
76,1	2	3,65	4,66	0,239	513	63,96	16,81	31,98	8,40	10,98	2,62	2	195,6	4,61	71,87
76,1	2,5	4,54	5,78	0,239	414	78,37	20,60	39,19	10,30	13,55	2,60	2	242,8	5,69	89,24
76,1	2,9	5,24	6,67	0,239	358	89,48	23,52	44,74	11,76	15,55	2,59	1	280,1	6,53	103,0
76,1	3	5,41	6,89	0,239	347	92,19	24,23	46,10	12,11	16,04	2,59	1	289,4	6,74	106,4
76,1	4	7,11	9,06	0,239	264	118,1	31,04	59,06	15,52	20,81	2,55	1	380,5	8,74	139,9
76,1	5	8,77	11,17	0,239	214	141,8	37,28	70,92	18,64	25,32	2,52	1	469,1	10,63	172,4
76,1	6	10,4	13,21	0,239	181	163,5	42,97	81,76	21,49	29,56	2,49	1	555,0	12,41	204,0
76,1	6,3	10,8	13,81	0,239	173	169,6	44,58	84,82	22,29	30,78	2,48	1	580,2	12,93	213,3
88,9	2	4,29	5,46	0,279	512	103,1	23,20	51,57	11,60	15,11	3,07	3	229,3	4,87	84,29
88,9	2,5	5,33	6,79	0,279	412	126,8	28,51	63,37	14,26	18,67	3,06	2	285,0	7,84	104,8
88,9	3	6,36	8,10	0,279	345	149,5	33,64	74,76	16,82	22,15	3,04	2	340,0	9,30	125,0
88,9	3,2	6,76	8,62	0,279	324	158,4	35,64	79,21	17,82	23,51	3,03	1	361,9	9,88	133,0
88,9	4	8,38	10,67	0,279	262	192,7	43,35	96,34	21,67	28,85	3,00	1	448,1	12,12	164,7
88,9	5	10,4	13,18	0,279	212	232,8	52,36	116,4	26,18	35,24	2,97	1	553,5	14,80	203,5
88,9	6	12,3	15,63	0,279	179	269,9	60,72	134,9	30,36	41,31	2,94	1	656,3	17,35	241,2
88,9	6,3	12,8	16,35	0,279	171	280,5	63,10	140,2	31,55	43,07	2,93	1	686,6	18,09	252,4
101,6	2	4,91	6,26	0,319	510	155,3	30,56	77,63	15,28	19,84	3,52	4	213,0	5,20	96,61
101,6	2,5	6,11	7,78	0,319	410	191,2	37,64	95,61	18,82	24,56	3,50	3	326,9	7,90	120,2
101,6	3	7,29	9,29	0,319	343	226,1	44,50	113,0	22,25	29,17	3,49	2	390,3	12,25	143,5
101,6	3,6	8,70	11,08	0,319	288	266,5	52,46	133,2	26,23	34,59	3,47	2	465,5	14,53	171,1
101,6	4	9,63	12,26	0,319	260	292,6	57,59	146,3	28,80	38,12	3,45	1	515,1	16,01	189,3
101,6	5	11,9	15,17	0,319	210	354,9	69,87	177,5	34,93	46,70	3,42	1	637,3	19,61	234,2
101,6	6	14,2	18,02	0,319	177	413,4	81,37	206,7	40,68	54,91	3,39	1	756,9	23,06	278,2
101,6	6,3	14,8	18,86	0,319	169	430,1	84,67	215,1	42,34	57,30	3,38	1	792,2	24,07	291,2
108	2	5,23	6,66	0,339	509	187,2	34,66	93,58	17,33	22,47	3,75	4	224,7	5,85	102,8
108	2,5	6,50	8,29	0,339	409	230,7	42,72	115,4	21,36	27,83	3,73	3	348,0	8,97	127,9
108	3	7,77	9,90	0,339	343	273,0	50,55	136,5	25,28	33,08	3,71	2	415,6	13,90	152,8
108	3,6	9,27	11,81	0,339	287	322,1	59,65	161,1	29,83	39,25	3,69	2	495,9	16,49	182,3
108	4	10,3	13,07	0,339	260	353,9	65,54	177,0	32,77	43,29	3,68	1	548,9	18,18	201,8
108	5	12,7	16,18	0,339	210	430,1	79,65	215,1	39,83	53,09	3,65	1	679,5	22,30	249,8
108	6	15,1	19,23	0,339	176	501,8	92,93	250,9	46,46	62,50	3,61	1	807,5	26,25	296,8
108	6,3	15,8	20,13	0,339	169	522,5	96,75	261,2	48,38	65,24	3,60	1	845,4	27,40	310,7

Taulukko 11.1.7 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



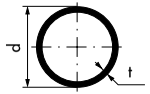
M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m²/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
114,3	2	5,54	7,06	0,359	509	222,5	38,94	111,3	19,47	25,23	3,97	4	236,0	6,51	108,9
114,3	2,5	6,89	8,78	0,359	409	274,5	48,03	137,3	24,02	31,25	3,95	3	368,8	10,09	135,6
114,3	3	8,23	10,49	0,359	342	325,1	56,88	162,6	28,44	37,17	3,94	2	440,6	15,61	161,9
114,3	3,6	9,83	12,52	0,359	287	384,0	67,19	192,0	33,59	44,13	3,92	2	525,8	18,54	193,3
114,3	4	10,9	13,86	0,359	259	422,1	73,86	211,1	36,93	48,69	3,90	2	582,2	20,45	214,0
114,3	5	13,5	17,17	0,359	209	513,8	89,91	256,9	44,96	59,77	3,87	1	721,0	25,11	265,0
114,3	6	16,0	20,41	0,359	176	600,4	105,1	300,2	52,53	70,45	3,83	1	857,4	29,59	315,1
114,3	6,3	16,8	21,38	0,359	168	625,4	109,4	312,7	54,72	73,57	3,82	1	897,8	30,90	330,0
127	2	6,17	7,85	0,399	508	306,9	48,33	153,4	24,16	31,25	4,42	4	258,2	7,94	121,2
127	2,5	7,68	9,78	0,399	408	379,1	59,70	189,5	29,85	38,76	4,40	4	332,9	10,16	151,0
127	3	9,17	11,69	0,399	341	449,5	70,79	224,8	35,39	46,14	4,39	3	490,8	14,87	180,4
127	4	12,1	15,46	0,399	258	585,2	92,16	292,6	46,08	60,54	4,35	2	649,2	25,43	238,6
127	5	15,0	19,16	0,399	208	714,3	112,5	357,1	56,24	74,46	4,32	1	804,9	31,27	295,8
127	6	17,9	22,81	0,399	175	836,9	131,8	418,4	65,90	87,92	4,28	1	957,9	36,93	352,1
127	6,3	18,8	23,89	0,399	167	872,4	137,4	436,2	68,70	91,86	4,27	1	1003	38,58	368,8
133	2	6,46	8,23	0,418	508	353,2	53,11	176,6	26,56	34,32	4,63	4	268,4	8,66	127,1
133	2,5	8,05	10,25	0,418	408	436,5	65,64	218,3	32,82	42,58	4,61	4	346,5	11,10	158,2
133	3	9,62	12,25	0,418	341	517,9	77,88	259,0	38,94	50,71	4,60	3	514,6	16,36	189,1
133	4	12,7	16,21	0,418	258	675,1	101,5	337,5	50,76	66,59	4,56	2	680,9	27,97	250,3
133	5	15,8	20,11	0,418	208	824,8	124,0	412,4	62,02	81,96	4,53	1	844,5	34,42	310,4
133	6	18,8	23,94	0,418	175	967,4	145,5	483,7	72,74	96,85	4,50	1	1005	40,68	369,6
133	6,3	19,7	25,08	0,418	167	1009	151,7	504,4	75,85	101,2	4,49	1	1053	42,51	387,1

139,7	3	10,1	12,88	0,439	341	602,2	86,21	301,1	43,11	56,07	4,83	3	541,1	18,10	198,9
139,7	4	13,4	17,05	0,439	257	785,7	112,5	392,9	56,24	73,68	4,80	2	716,2	30,95	263,2
139,7	5	16,6	21,16	0,439	207	961,1	137,6	480,5	68,80	90,76	4,77	1	888,7	38,12	326,6
139,7	6	19,8	25,20	0,439	174	1129	161,6	564,3	80,78	107,3	4,73	1	1058	45,08	389,1
139,7	6,3	20,7	26,40	0,439	166	1177	168,5	588,6	84,27	112,2	4,72	1	1109	47,12	407,6
139,7	8	26,0	33,10	0,439	133	1441	206,2	720,3	103,1	138,9	4,66	1	1390	58,35	511,0
139,7	10	32,0	40,75	0,439	108	1724	246,8	861,9	123,4	168,6	4,60	1	1711	70,79	629,0
152,4	3	11,1	14,08	0,479	340	786,0	103,2	393,0	51,58	66,97	5,28	4	479,3	17,56	217,4
152,4	4	14,6	18,65	0,479	257	1027	134,8	513,7	67,42	88,11	5,25	2	783,2	37,01	287,9
152,4	5	18,2	23,15	0,479	207	1259	165,2	629,5	82,62	108,7	5,21	2	972,5	45,64	357,4
152,4	6	21,7	27,60	0,479	173	1481	194,4	740,6	97,19	128,7	5,18	1	1159	54,04	426,0
152,4	6,3	22,7	28,92	0,479	166	1546	202,9	773,0	101,4	134,6	5,17	1	1214	56,51	446,4
159	3	11,5	14,70	0,500	340	894,8	112,6	447,4	56,28	73,02	5,52	4	497,4	19,04	227,0
159	4	15,3	19,48	0,500	256	1171	147,3	585,3	73,63	96,12	5,48	3	818,1	30,92	300,7
159	5	19,0	24,19	0,500	206	1436	180,6	717,9	90,30	118,6	5,45	2	1016	49,82	373,4
159	6	22,6	28,84	0,500	173	1690	212,6	845,2	106,3	140,5	5,41	1	1211	59,02	445,2
159	6,3	23,7	30,22	0,500	165	1765	222,0	882,4	111,0	147,0	5,40	1	1269	61,73	466,6
168,3	3	12,2	15,58	0,529	339	1065	126,5	532,3	63,25	81,98	5,85	4	522,5	21,22	240,5
168,3	3,2	13,0	16,60	0,529	319	1131	134,5	565,7	67,23	87,24	5,84	4	562,1	22,77	256,2
168,3	4	16,2	20,65	0,529	256	1394	165,7	697,1	82,84	108,0	5,81	3	867,2	34,79	318,7
168,3	4,5	18,2	23,16	0,529	228	1554	184,7	777,2	92,36	120,8	5,79	2	972,6	50,72	357,5
168,3	5	20,1	25,65	0,529	206	1712	203,4	855,9	101,7	133,4	5,78	2	1077	56,02	396,0
168,3	6	24,0	30,59	0,529	173	2017	239,7	1009	119,9	158,1	5,74	2	1285	66,41	472,3
168,3	6,3	25,2	32,06	0,529	165	2107	250,4	1053	125,2	165,4	5,73	1	1347	69,48	495,0
168,3	8	31,6	40,29	0,529	131	2595	308,3	1297	154,2	205,7	5,67	1	1692	86,41	621,9
168,3	10	39,0	49,73	0,529	106	3128	371,7	1564	185,9	250,9	5,61	1	2089	105,4	767,7
193,7	4	18,7	23,84	0,609	255	2146	221,5	1073	110,8	144,0	6,71	3	1001	46,52	368,0
193,7	5	23,3	29,64	0,609	205	2640	272,6	1320	136,3	178,1	6,67	2	1245	74,79	457,6
193,7	6	27,8	35,38	0,609	172	3119	322,1	1560	161,1	211,5	6,64	2	1486	88,81	546,2
193,7	6,3	29,1	37,09	0,609	164	3260	336,6	1630	168,3	221,3	6,63	2	1558	92,96	572,6
193,7	8	36,6	46,67	0,609	130	4031	416,2	2016	208,1	276,1	6,57	1	1960	115,9	720,5
193,7	10	45,3	57,71	0,609	105	4883	504,2	2442	252,1	337,8	6,50	1	2424	141,9	891,0
193,7	12,5	55,9	71,16	0,609	86	5869	606,0	2934	303,0	411,1	6,42	1	2989	172,7	1098
d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 $x\ 10^2$	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 $x\ 10^4$	W_t mm^3 $x\ 10^3$	I mm^4 $x\ 10^4$	W_{el} mm^3 $x\ 10^3$	W_{pl} mm^3 $x\ 10^3$	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN

Taulukko 11.1.7 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*

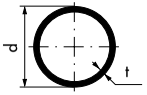


M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c.Rd}$	$M_{c.Rd}$	$V_{pl.Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m²/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN
219,1	4	21,2	27,03	0,688	255	3128	285,5	1564	142,8	185,1	7,61	4	909,9	48,05	417,3
219,1	4,5	23,8	30,34	0,688	227	3494	319,0	1747	159,5	207,3	7,59	3	1274	66,99	468,3
219,1	5	26,4	33,63	0,688	205	3856	352,0	1928	176,0	229,2	7,57	3	1412	73,92	519,2
219,1	6	31,5	40,17	0,688	171	4564	416,6	2282	208,3	272,5	7,54	2	1687	114,5	620,1
219,1	6,3	33,1	42,12	0,688	163	4772	435,6	2386	217,8	285,4	7,53	2	1769	120,0	650,2
219,1	8	41,7	53,06	0,688	130	5919	540,3	2960	270,2	356,7	7,47	1	2228	149,8	819,0
219,1	10	51,6	65,69	0,688	105	7197	657,0	3598	328,5	437,6	7,40	1	2759	183,8	1014
219,1	12,5	63,7	81,13	0,688	85	8689	793,2	4345	396,6	534,2	7,32	1	3408	224,4	1252
244,5	6	35,3	44,96	0,768	171	6397	523,3	3199	261,6	341,4	8,43	3	1888	110,0	694,0
244,5	8	46,7	59,44	0,768	129	8321	680,7	4160	340,3	447,6	8,37	2	2496	188,0	917,6
244,5	10	57,8	73,67	0,768	104	10150	830,0	5073	415,0	550,2	8,30	1	3094	231,1	1137
244,5	12,5	71,5	91,11	0,768	84	12290	1006	6147	502,9	673,5	8,21	1	3826	282,9	1406
273	4	26,5	33,80	0,858	254	6117	448,1	3058	224,1	289,5	9,51	4	1097	72,71	521,8
273	5	33,1	42,10	0,858	204	7562	554,0	3781	277,0	359,2	9,48	4	1418	93,29	649,9
273	6	39,5	50,33	0,858	170	8974	657,5	4487	328,7	427,8	9,44	3	2114	138,1	776,9
273	6,3	41,4	52,79	0,858	162	9392	688,0	4696	344,0	448,2	9,43	3	2217	144,5	814,9
273	8	52,3	66,60	0,858	129	11703	857,4	5852	428,7	562,0	9,37	2	2797	236,0	1028
273	10	64,9	82,62	0,858	104	14308	1048	7154	524,1	692,0	9,31	1	3470	290,7	1275
273	12,5	80,3	102,3	0,858	84	17395	1274	8697	637,2	848,9	9,22	1	4297	356,5	1579
323,9	4	31,6	40,20	1,018	253	10286	635,2	5143	317,6	409,4	11,31	4	1262	99,66	620,6
323,9	5	39,3	50,09	1,018	203	12739	786,6	6369	393,3	508,5	11,28	4	1641	128,8	773,3
323,9	6	47,0	59,92	1,018	170	15145	935,2	7572	467,6	606,4	11,24	4	2022	157,8	925,0
323,9	6,3	49,3	62,86	1,018	162	15858	979,2	7929	489,6	635,6	11,23	4	2136	166,4	970,4
323,9	8	62,3	79,39	1,018	128	19820	1224	9910	611,9	798,5	11,17	3	3335	257,0	1226
323,9	10	77,4	98,61	1,018	103	24317	1501	12158	750,8	985,7	11,10	2	4142	414,0	1522
323,9	12,5	96,0	122,3	1,018	83	29693	1833	14847	916,7	1213	11,02	1	5136	509,4	1888

Taulukko 11.1.8 Pyöreiden kierresaumahitsattujen rakenneputkien poikkileikkaus- ja kestävyysarvot teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)
(Tekniset toimitusehdot sovittava tilauskohtaisesti)



M = paino
A = poikkileikkauksen pinta-ala
A_u = ulkopuolinen pinta-ala
A_m/V = poikkileikkaustekijä palomitoituksessa
I_t = vääntöneliömomentti
W_t = vääntövastus
I = neliömomentti
W_{el} = kimmoinen taivutusvastus
W_{pl} = plastinen taivutusvastus (käytetään vain kun PL1...2)
i = hitaussäde
PL = poikkileikkausluokka tasaiselle puristukselle
$N_{c.Rd}$ = puristuskestävyys (ilman nurjahdusta)
$M_{c.Rd}$ = taivutuskestävyys (PL-luokan mukainen)
$V_{pl.Rd}$ = plastinen leikkauskestävyys (ilman leikkauslommahdusta)

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

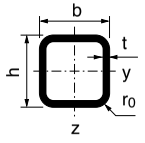
d mm	t mm	M kg/m	A mm^2 x 10^2	A_u m^2/m	A_m/V 1/m	I_t mm^4 x 10^4	W_t mm^3 x 10^3	I mm^4 x 10^4	W_{el} mm^3 x 10^3	W_{pl} mm^3 x 10^3	i mm x 10	PL	$N_{c.Rd}$ kN	$M_{c.Rd}$ kNm	$V_{pl.Rd}$ kN
406,4	6,3	62,2	79,19	1,277	161	31699	1560	15849	780,0	1009	14,15	4	2596	255,7	1222
406,4	8	78,6	100,1	1,277	128	39748	1956	19874	978,1	1270	14,09	4	3408	332,9	1546
406,4	10	97,8	124,5	1,277	103	48952	2409	24476	1205	1572	14,02	3	5230	505,9	1922
406,4	12,5	121	154,7	1,277	83	60061	2956	30031	1478	1940	13,93	2	6497	814,9	2388
457	6,3	70,0	89,20	1,436	161	45308	1983	22654	991,4	1280	15,94	4	2862	318,1	1377
457	8	88,6	112,9	1,436	127	56893	2490	28446	1245	1613	15,88	4	3774	416,4	1742
457	10	110	140,4	1,436	102	70183	3071	35091	1536	1998	15,81	3	5898	645,0	2168
457	12	132	167,8	1,436	86	83113	3637	41556	1819	2377	15,74	2	7046	998,3	2590
457	12,5	137	174,6	1,436	82	86290	3776	43145	1888	2470	15,72	2	7331	1038	2695
508	6,3	78,0	99,30	1,596	161	62493	2460	31246	1230	1586	17,74	4	3119	386,4	1533
508	8	98,7	125,7	1,596	127	78560	3093	39280	1546	2000	17,68	4	4130	508,3	1940
508	10	123	156,5	1,596	102	97040	3820	48520	1910	2480	17,61	4	5326	650,2	2415
508	12,5	153	194,6	1,596	82	119511	4705	59755	2353	3070	17,52	3	8172	988,1	3004
559	6,3	85,9	109,4	1,756	161	83552	2989	41776	1495	1925	19,54	4	3364	459,7	1689
559	8	109	138,5	1,756	127	105130	3761	52565	1881	2429	19,48	4	4475	607,7	2138
559	10	135	172,5	1,756	102	130002	4651	65001	2326	3014	19,41	4	5788	780,4	2663
559	12,5	168	214,6	1,756	82	160324	5736	80162	2868	3734	19,33	3	9014	1205	3313
610	8	119	151,3	1,916	127	137103	4495	68551	2248	2899	21,29	4	4807	714,1	2336
610	10	148	188,5	1,916	102	169693	5564	84847	2782	3600	21,22	4	6238	920,6	2910
610	12,5	184	234,6	1,916	82	209509	6869	104755	3435	4463	21,13	3	9855	1443	3622
610	14,2	209	265,8	1,916	72	236008	7738	118004	3869	5042	21,07	3	11163	1625	4103

660	8	129	163,9	2,073	127	174176	5278	87088	2639	3401	23,05	4	5122	824,9	2530
660	10	160	204,2	2,073	102	215741	6538	107870	3269	4225	22,98	4	6667	1067	3152
660	12,5	200	254,3	2,073	82	266613	8079	133306	4040	5241	22,90	4	8607	1367	3925
660	14,2	226	288,1	2,073	72	300526	9107	150263	4553	5923	22,84	3	12100	1912	4447
711	8	139	176,7	2,234	126	218324	6141	109162	3071	3954	24,86	4	5432	944,0	2727
711	10	173	220,2	2,234	101	270603	7612	135301	3806	4914	24,79	4	7093	1226	3400
711	12,5	215	274,3	2,234	81	334686	9415	167343	4707	6099	24,70	4	9180	1575	4234
711	14,2	244	310,9	2,234	72	377470	10618	188735	5309	6895	24,64	3	13056	2230	4799
762	8	149	189,5	2,394	126	269366	7070	134683	3535	4548	26,66	4	5731	1069	2925
762	10	185	236,3	2,394	101	334057	8768	167028	4384	5655	26,59	4	7507	1393	3647
762	12,5	231	294,3	2,394	81	413462	10852	206731	5426	7023	26,50	4	9741	1796	4544
762	14,2	262	333,6	2,394	72	466542	12245	233271	6123	7942	26,44	4	11265	2067	5150
813	8	159	202,3	2,554	126	327801	8064	163901	4032	5184	28,46	4	6019	1200	3123
813	10	198	252,3	2,554	101	406728	10006	203364	5003	6448	28,39	4	7910	1569	3894
813	12,5	247	314,4	2,554	81	503721	12392	251860	6196	8011	28,31	4	10290	2028	4853
813	14,2	280	356,4	2,554	72	568630	13988	284315	6994	9062	28,25	4	11914	2338	5501
813	16	314	400,6	2,554	64	636443	15657	318222	7828	10165	28,18	4	13636	2665	6184
914	10	223	284,0	2,871	101	580294	12698	290147	6349	8172	31,96	4	8674	1939	4384
914	12,5	278	354,0	2,871	81	719417	15742	359708	7871	10159	31,88	4	11341	2521	5465
914	14,2	315	401,4	2,871	72	812689	17783	406344	8892	11498	31,82	4	13163	2916	6197
914	16	354	451,4	2,871	64	910283	19919	455142	9959	12904	31,75	4	15096	3331	6968
1016	10	248	316,0	3,192	101	799699	15742	399850	7871	10121	35,57	4	9403	2342	4879
1016	12,5	309	394,1	3,192	81	992246	19532	496123	9766	12588	35,48	4	12357	3062	6083
1016	14,2	351	446,9	3,192	71	1121520	22077	560762	11039	14252	35,42	4	14376	3551	6899
1016	16	395	502,7	3,192	64	1256959	24743	628479	12372	16001	35,36	4	16521	4066	7760
1219	10	298	379,8	3,830	101	1388029	22773	694014	11387	14617	42,75	4	10728	3216	5863
1219	12,5	372	473,8	3,830	81	1724362	28291	862181	14146	18196	42,66	4	14245	4253	7314
1219	14,2	422	537,5	3,830	71	1950668	32004	975334	16002	20613	42,60	4	16654	4958	8297
1219	16	475	604,7	3,830	63	2188182	35901	1094091	17951	23157	42,54	4	19215	5704	9335
d	t	M	A	A_u	A_m/V	I_t	W_t	I	W_{el}	W_{pl}	i	PL	$N_{c,Rd}$	$M_{c,Rd}$	$V_{pl,Rd}$
mm	mm	kg/m	mm^2 x 10^2	m^2/m	1/m	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^4 x 10^4	mm^3 x 10^3	mm^3 x 10^3	mm x 10		kN	kNm	kN

Liite 11.2 Rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajeille S355J2H ja S420MH

Taulukko	Teräslaji		Rakenneputken muoto
11.2.1	S355J2H		Neliö
11.2.2	S355J2H		Suorakaide
11.2.3	S355J2H		Pyöreä pituussaumahitsattu
11.2.4	S355J2H		Pyöreä kierresaumahitsattu
11.2.5		S420MH	Neliö
11.2.6		S420MH	Suorakaide
11.2.7		S420MH	Pyöreä pituussaumahitsattu
11.2.8		S420MH	Pyöreä kierresaumahitsattu

Taulukko 11.2.1 Neliön muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



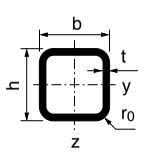
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h	b	t	$N_{b.Rd}$ (kN)																h	b	t
mm	mm	mm	L_{cr} (m)																mm	mm	mm
			0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
25	25	2	61,66	44,38	21,17	10,90	6,52	4,31											25	25	2
25	25	2,5	74,16	52,47	24,44	12,50	7,46	4,93											25	25	2,5
25	25	3	85,49	59,38	26,98	13,71	8.161	5,39											25	25	3
30	30	2	75,86	60,49	34,40	18,83	11,49	7,68	5,48										30	30	2
30	30	2,5	91,91	72,58	40,51	22,00	13,39	8,94	6,38										30	30	2,5
30	30	3	106,8	83,47	45,69	24,61	14,94	9,96	7,10										30	30	3
40	40	2	104,3	92,13	65,68	41,56	26,80	18,37	13,29	10,04	7,84								40	40	2
40	40	2,5	127,4	112,1	79,18	49,67	31,91	21,83	15,78	11,91	9,30								40	40	2,5
40	40	3	149,4	130,9	91,52	56,91	36,42	24,87	17,97	13,56	10,58								40	40	3
40	40	4	189,9	164,8	112,8	68,88	43,75	29,78	21,47	16,19	12,63								40	40	4
50	50	2	132,7	123,4	98,38	70,94	49,12	34,80	25,63	19,57	15,39	12,41							50	50	2
50	50	2,5	162,9	151,2	120,0	85,93	59,23	41,88	30,80	23,50	18,48	14,89							50	50	2,5
50	50	3	192,0	177,8	140,3	99,85	68,52	48,33	35,51	27,07	21,28	17,15							50	50	3
50	50	4	246,7	227,3	177,5	124,5	84,68	59,47	43,60	33,19	26,06	20,99							50	50	4
50	50	5	296,6	271,8	209,9	145,0	97,75	68,36	50,00	38,02	29,83	24,00							50	50	5
60	60	2	161,1	154,7	130,7	103,2	76,98	56,86	42,82	33,12	26,27	21,31	17,61						60	60	2
60	60	2,5	198,4	190,3	160,3	126,1	93,64	68,98	51,88	40,09	31,79	25,77	21,29						60	60	2,5
60	60	3	234,6	224,6	188,7	147,8	109,3	80,30	60,30	46,56	36,90	29,90	24,70						60	60	3
60	60	4	303,5	289,6	241,9	187,7	137,6	100,6	75,32	58,06	45,96	37,22	30,73						60	60	4
60	60	5	367,6	349,6	290,3	223,0	162,1	117,8	87,99	67,72	53,55	43,33	35,76						60	60	5
70	70	2,5	233,9	229,3	200,1	167,1	132,4	102,0	78,82	61,89	49,57	40,46	33,59	24,16					70	70	2,5
70	70	3	277,2	271,4	236,4	196,9	155,5	119,5	92,17	72,30	57,87	47,21	39,19	28,18					70	70	3
70	70	4	360,3	351,9	305,5	252,9	198,3	151,6	116,5	91,24	72,93	59,45	49,32	35,43					70	70	4
70	70	5	438,6	427,5	369,8	304,2	236,8	180,1	137,9	107,8	86,03	70,07	58,09	41,70					70	70	5
80	80	2,5	269,4	268,3	239,5	207,8	173,0	139,3	110,9	88,73	71,92	59,18	49,41	35,81	27,07				80	80	2,5
80	80	3	319,8	318,2	283,7	245,7	204,1	164,0	130,3	104,1	84,31	69,34	57,88	41,92	31,68				80	80	3
80	80	4	417,1	414,3	368,5	317,9	262,7	210,0	166,3	132,6	107,2	88,08	73,46	53,16	40,15				80	80	4
80	80	5	509,6	505,4	448,5	385,3	316,7	251,9	198,7	158,0	127,6	104,8	87,31	63,12	47,65				80	80	5
80	80	6	597,6	591,5	523,6	448,0	366,1	289,7	227,6	180,7	145,7	119,4	99,49	71,86	54,22				80	80	6

90	90	2,5	304,9	304,9	278,7	248,0	214,1	179,1	146,9	120,1	98,67	81,96	68,88	50,34	38,25	30,00			90	90	2,5
90	90	3	362,4	362,4	330,8	294,0	253,3	211,5	173,2	141,3	116,1	96,34	80,94	59,12	44,90	35,21			90	90	3
90	90	4	473,9	473,9	431,2	382,3	328,2	272,9	222,7	181,2	148,6	123,2	103,4	75,45	57,28	44,89			90	90	4
90	90	5	580,6	580,6	526,8	465,7	398,3	329,7	268,1	217,7	178,1	147,5	123,8	90,19	68,43	53,61			90	90	5
90	90	6	682,8	682,8	617,5	544,4	463,6	382,1	309,6	250,7	204,9	169,5	142,0	103,4	78,40	61,40			90	90	6
100	100	2,5	309,5	309,5	291,4	265,6	237,6	207,4	177,2	149,5	125,8	106,2	90,26	66,92	51,29	40,45	32,67		100	100	2,5
100	100	3	405,0	405,0	377,7	341,8	302,4	260,4	219,5	183,0	152,6	128,0	108,4	79,91	61,05	48,04	38,75		100	100	3
100	100	4	530,7	530,7	493,8	446,0	393,5	337,8	283,8	236,1	196,5	164,6	139,2	102,5	78,26	61,56	49,64		100	100	4
100	100	5	651,6	651,6	605,0	545,4	479,8	410,5	343,7	285,2	236,9	198,3	167,5	123,2	93,99	73,90	59,57		100	100	5
100	100	6	768,0	768,0	711,2	639,9	561,4	478,6	399,4	330,5	274,1	229,0	193,3	142,0	108,3	85,11	68,58		100	100	6
100	100	7,1	875,2	875,2	807,1	723,7	631,7	535,3	444,2	366,0	302,6	252,4	212,7	156,0	118,8	93,29	75,13		100	100	7,1
100	100	8	967,1	967,1	889,5	795,8	692,4	584,4	483,3	397,2	327,8	273,0	229,9	168,4	128,1	100,6	81,00		100	100	8
100	100	10	1156	1156	1057	940,1	811,4	678,7	556,7	454,8	373,8	310,4	260,9	190,6	144,9	113,6	91,40		100	100	10
110	110	2,5	320,5	320,5	308,0	285,1	260,5	234,0	206,3	179,2	154,2	132,5	114,1	85,98	66,54	52,80	42,83	35,40	110	110	2,5
110	110	3	447,6	447,6	424,6	389,3	351,0	309,7	267,6	228,1	193,3	164,1	140,1	104,4	80,24	63,40	51,28	42,30	110	110	3
110	110	4	587,5	587,5	556,3	509,3	458,3	403,4	347,6	295,5	250,0	211,9	180,7	134,5	103,3	81,58	65,96	54,39	110	110	4
110	110	5	722,6	722,6	683,0	624,5	560,8	492,3	423,1	358,7	302,9	256,4	218,4	162,3	124,6	98,35	79,49	65,54	110	110	5
110	110	6	853,2	853,2	804,8	734,8	658,5	576,5	494,0	417,8	352,0	297,6	253,2	188,0	144,2	113,8	91,91	75,75	110	110	6
120	120	3	445,7	445,7	431,5	401,4	369,5	335,0	298,7	262,3	228,1	197,5	171,1	130,0	101,0	80,43	65,37	54,11	120	120	3
120	120	4	644,3	644,3	618,7	572,3	522,6	468,9	412,9	358,1	307,9	264,3	227,4	171,3	132,5	105,1	85,23	70,44	120	120	4
120	120	5	793,6	793,6	761,0	703,2	641,1	574,1	504,3	436,4	374,6	321,0	275,9	207,5	160,4	127,1	103,1	85,16	120	120	5
120	120	5,6	881,0	881,0	844,0	779,4	709,9	634,9	557,0	481,3	412,6	353,3	303,5	228,0	176,1	139,6	113,1	93,47	120	120	5,6
120	120	6	938,4	938,4	898,4	829,2	754,9	674,5	591,1	510,3	437,2	374,1	321,2	241,2	186,2	147,6	119,6	98,79	120	120	6
120	120	7,1	1077	1077	1028	947,3	860,1	765,9	668,6	575,0	491,0	419,2	359,3	269,2	207,6	164,3	133,1	109,9	120	120	7,1
120	120	8	1194	1194	1139	1048	949,6	843,7	734,6	630,3	537,2	457,9	392,0	293,3	226,0	178,8	144,8	119,5	120	120	8
120	120	8,8	1295	1295	1233	1133	1025	909,1	789,7	676,1	575,2	489,7	418,9	313,0	241,0	190,6	154,3	127,3	120	120	8,8
120	120	10	1440	1440	1368	1255	1133	1001	866,3	739,2	627,2	532,9	455,1	339,5	261,1	206,4	166,9	137,7	120	120	10
140	140	4	757,9	757,9	743,6	697,8	649,9	598,7	544,2	488,0	432,7	380,9	334,4	258,8	203,4	163,0	133,1	110,5	140	140	4
140	140	5	935,6	935,6	917,1	859,9	800,2	736,3	668,2	598,2	529,5	465,5	408,2	315,3	247,6	198,3	161,8	134,4	140	140	5
140	140	5,6	1040	1040	1019	954,9	888,1	816,5	740,4	662,1	585,5	514,2	450,6	347,7	272,8	218,4	178,3	148,0	140	140	5,6
140	140	6	1109	1109	1086	1017	945,7	869,0	787,5	703,7	621,9	545,9	478,1	368,7	289,2	231,5	188,9	156,7	140	140	6
140	140	7,1	1278	1278	1250	1169	1086	995,5	899,8	801,9	706,7	618,9	541,0	416,1	325,8	260,5	212,4	176,2	140	140	7,1
140	140	8	1422	1422	1388	1298	1204	1102	994,6	884,8	778,4	680,7	594,3	456,3	357,0	285,3	232,5	192,8	140	140	8
140	140	8,8	1545	1545	1507	1408	1305	1193	1075	954,9	838,8	732,5	638,9	489,8	382,9	305,8	249,1	206,6	140	140	8,8
140	140	10	1724	1724	1679	1567	1450	1324	1190	1054	923,6	804,9	700,9	536,2	418,6	334,0	272,0	225,4	140	140	10
h	b	t	$N_{b.Rd}$ (kN)																h	b	t
mm	mm	mm	L_{cr} (m)																mm	mm	mm
			0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			

Taulukko 11.2.1 Neliön muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

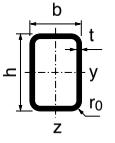
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
150	150	4	771,4	771,4	765,6	723,5	680,1	634,3	585,5	534,4	482,5	431,9	384,7	303,9	242,0	195,6	160,6	133,9	150	150	4
150	150	5	1007	1007	995,2	938,1	879,2	816,6	749,9	680,3	610,3	543,1	481,1	377,1	298,8	240,7	197,2	164,2	150	150	5
150	150	6	1194	1194	1179	1111	1040	965,4	885,4	802,0	718,5	638,5	564,9	442,1	349,9	281,6	230,7	192,0	150	150	6
150	150	7,1	1379	1379	1360	1280	1197	1109	1015	917,6	820,0	727,1	642,1	501,1	395,9	318,3	260,5	216,7	150	150	7,1
150	150	8	1535	1535	1512	1423	1330	1230	1125	1015	905,6	801,8	707,3	551,0	434,9	349,4	285,9	237,7	150	150	8
150	150	8,8	1670	1670	1644	1546	1443	1334	1218	1098	978,2	865,0	762,2	592,9	467,5	375,4	307,0	255,2	150	150	8,8
150	150	10	1866	1866	1834	1723	1607	1484	1352	1216	1081	954,1	839,3	651,3	512,9	411,5	336,3	279,4	150	150	10
150	150	12,5	2203	2203	2156	2019	1877	1724	1561	1394	1232	1081	945,9	729,0	571,7	457,4	373,2	309,7	150	150	12,5
160	160	4	792,3	792,3	792,3	753,9	713,6	671,4	626,8	579,7	531,0	482,3	435,2	351,0	283,4	231,1	190,9	159,8	160	160	4
160	160	5	1078	1078	1073	1016	957,9	896,4	831,0	762,3	692,1	622,9	557,4	443,6	354,9	287,7	236,7	197,7	160	160	5
160	160	6	1279	1279	1273	1205	1135	1061	982,7	900,4	816,4	733,8	655,9	521,0	416,4	337,3	277,4	231,5	160	160	6
160	160	7,1	1480	1480	1471	1391	1309	1222	1130	1034	935,2	838,9	748,4	592,9	473,0	382,6	314,4	262,3	160	160	7,1
160	160	8	1649	1649	1637	1547	1455	1358	1254	1145	1035	927,2	826,3	653,4	520,6	420,9	345,7	288,3	160	160	8
160	160	8,8	1795	1795	1781	1683	1582	1475	1361	1241	1120	1002	892,3	704,5	560,8	453,0	372,0	310,1	160	160	8,8
160	160	10	2008	2008	1990	1879	1764	1643	1514	1378	1242	1109	985,7	776,4	617,1	498,1	408,7	340,5	160	160	10
160	160	12,5	2380	2380	2350	2214	2073	1923	1763	1596	1430	1270	1123	878,6	695,2	559,5	458,2	381,3	160	160	12,5
180	180	5	1220	1220	1220	1172	1115	1055	992,0	925,6	856,3	785,9	716,4	587,8	480,2	394,7	327,8	275,5	180	180	5
180	180	6	1450	1450	1450	1392	1323	1251	1176	1096	1013	929,0	845,9	692,8	565,3	464,2	385,4	323,8	180	180	6
180	180	7,1	1682	1682	1682	1613	1532	1447	1358	1265	1167	1068	971,4	793,4	646,1	529,9	439,5	369,0	180	180	7,1
180	180	8	1876	1876	1876	1797	1706	1611	1511	1406	1296	1185	1076	877,7	713,9	585,0	484,9	406,9	180	180	8
180	180	8,8	2045	2045	2045	1957	1857	1753	1643	1527	1407	1285	1166	949,5	771,4	631,7	523,3	439,1	180	180	8,8
180	180	10	2292	2292	2292	2191	2077	1959	1835	1703	1567	1429	1295	1052	853,3	697,9	577,8	484,5	180	180	10
180	180	12,5	2735	2735	2735	2603	2463	2318	2163	2001	1833	1665	1502	1212	978,0	797,4	658,7	551,5	180	180	12,5
200	200	5	1238	1238	1238	1215	1166	1115	1063	1008	950,3	890,7	829,7	709,0	598,2	503,1	424,7	361,0	200	200	5
200	200	6	1620	1620	1620	1579	1511	1441	1367	1290	1209	1126	1042	877,8	732,1	610,5	512,2	433,5	200	200	6
200	200	7,1	1883	1883	1883	1834	1753	1671	1584	1494	1399	1301	1202	1010	841,0	700,3	586,9	496,4	200	200	7,1
200	200	8	2103	2103	2103	2046	1956	1863	1766	1664	1557	1447	1335	1121	931,8	775,2	649,3	548,9	200	200	8
200	200	8,8	2295	2295	2295	2231	2132	2030	1923	1811	1694	1573	1451	1216	1010	839,3	702,6	593,7	200	200	8,8
200	200	10	2576	2576	2576	2502	2390	2274	2153	2026	1892	1755	1617	1353	1121	930,9	778,6	657,6	200	200	10
200	200	12,5	3090	3090	3090	2992	2853	2710	2561	2403	2238	2069	1900	1579	1302	1078	899,2	758,2	200	200	12,5

220	220	6	1790	1790	1790	1790	1767	1698	1629	1557	1482	1404	1323	1239	1071	912,2	773,1	656,3	560,2	220	220	6
220	220	7,1	2085	2085	2085	2085	2056	1975	1893	1809	1721	1629	1533	1434	1237	1052	890,4	755,0	643,9	220	220	7,1
220	220	8	2330	2330	2330	2330	2296	2206	2114	2019	1920	1816	1708	1597	1375	1168	987,9	837,1	713,6	220	220	8
220	220	8,8	2545	2545	2545	2545	2506	2407	2306	2201	2092	1978	1860	1738	1495	1269	1072	907,7	773,4	220	220	8,8
220	220	10	2860	2860	2860	2860	2814	2702	2587	2469	2345	2216	2081	1943	1669	1414	1193	1009	859,3	220	220	10
220	220	12,5	3445	3445	3445	3445	3381	3242	3101	2955	2802	2641	2475	2305	1968	1660	1395	1177	1001	220	220	12,5
250	250	6	1811	1811	1811	1811	1811	1766	1709	1651	1591	1530	1466	1400	1262	1121	985,2	860,6	750,8	250	250	6
250	250	7,1	2387	2387	2387	2387	2387	2308	2227	2144	2059	1970	1878	1782	1585	1388	1204	1040	899,7	250	250	7,1
250	250	8	2671	2671	2671	2671	2671	2580	2489	2396	2300	2200	2097	1989	1767	1546	1339	1157	999,8	250	250	8
250	250	8,8	2920	2920	2920	2920	2918	2818	2718	2616	2511	2401	2287	2169	1925	1683	1457	1257	1086	250	250	8,8
250	250	10	3286	3286	3286	3286	3282	3169	3056	2940	2821	2696	2567	2433	2156	1882	1627	1403	1211	250	250	10
250	250	12,5	3978	3978	3978	3978	3965	3826	3686	3543	3395	3241	3080	2914	2572	2237	1927	1657	1428	250	250	12,5
260	260	6	1836	1836	1836	1836	1836	1803	1748	1693	1636	1578	1518	1455	1324	1189	1056	930,5	817,7	260	260	6
260	260	7,1	2488	2488	2488	2488	2488	2418	2338	2255	2171	2083	1992	1898	1701	1503	1314	1142	993,1	260	260	7,1
260	260	8	2785	2785	2785	2785	2785	2705	2614	2521	2426	2328	2225	2119	1898	1675	1463	1271	1104	260	260	8
260	260	8,8	3045	3045	3045	3045	3045	2956	2856	2754	2650	2541	2429	2312	2069	1825	1592	1383	1201	260	260	8,8
260	260	10	3428	3428	3428	3428	3428	3325	3212	3097	2978	2855	2727	2595	2320	2043	1781	1545	1340	260	260	10
260	260	12,5	4155	4155	4155	4155	4155	4021	3881	3739	3592	3439	3281	3116	2776	2436	2116	1831	1585	260	260	12,5
300	300	6	1921	1921	1921	1921	1921	1921	1881	1834	1786	1738	1689	1638	1533	1421	1306	1190	1077	300	300	6
300	300	7,1	2533	2533	2533	2533	2533	2525	2459	2392	2325	2257	2186	2114	1962	1802	1639	1477	1324	300	300	7,1
300	300	8	3066	3066	3066	3066	3066	3043	2959	2875	2789	2702	2612	2520	2325	2122	1915	1714	1526	300	300	8
300	300	8,8	3544	3544	3544	3544	3544	3505	3405	3305	3203	3098	2990	2878	2644	2400	2154	1918	1700	300	300	8,8
300	300	10	3996	3996	3996	3996	3996	3949	3836	3722	3607	3488	3365	3238	2973	2696	2417	2150	1904	300	300	10
300	300	12,5	4865	4865	4865	4865	4865	4800	4660	4520	4376	4229	4077	3919	3590	3247	2904	2576	2277	300	300	12,5

h	b	t	$N_{b,Rd}$ (kN)																	h	b	t
			L_{cr} (m)																			
mm	mm	mm	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10		mm	mm	mm

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



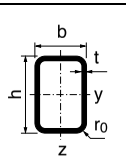
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
40	20	2	y-y	75,86	64,99	43,17	25,77	16,22	11,00	7,91	5,96									40	20	2
			z-z	75,86	49,02	20,50	10,22	6,04	3,98	2,82	2,10											
40	20	2,5	y-y	91,91	78,20	51,14	30,20	18,93	12,81	9,21	6,93									40	20	2,5
			z-z	91,91	58,02	23,72	11,77	6,94	4,57	3,23	2,40											
40	20	3	y-y	106,8	90,18	57,99	33,87	21,14	14,28	10,26	7,71									40	20	3
			z-z	106,8	65,75	26,27	12,97	7,64	5,02	3,55	2,64											
40	30	2	y-y	90,06	78,67	54,62	33,76	21,55	14,70	10,61	8,00	6,25								40	30	2
			z-z	90,06	73,03	42,99	23,90	14,66	9,83	7,03	5,27	4,09										
40	30	2,5	y-y	109,7	95,30	65,42	40,05	25,46	17,34	12,51	9,43	7,35								40	30	2,5
			z-z	109,7	88,21	51,07	28,18	17,24	11,54	8,24	6,18	4,80										
40	30	3	y-y	128,1	110,70	75,09	45,53	28,83	19,60	14,12	10,64	8,30								40	30	3
			z-z	128,1	102,20	58,14	31,83	19,42	12,99	9,27	6,94	5,39										
50	30	2	y-y	104,3	95,57	73,86	51,08	34,45	24,10	17,63	13,40	10,52	8,46							50	30	2
			z-z	104,3	85,46	51,47	28,94	17,83	11,97	8,56	6,42	4,99	3,99									
50	30	2,5	y-y	127,4	116,4	89,35	61,26	41,11	28,69	20,96	15,93	12,49	10,05							50	30	2,5
			z-z	127,4	103,7	61,49	34,31	21,08	14,13	10,11	7,58	5,89	4,71									
50	30	3	y-y	149,4	136,0	103,7	70,44	47,04	32,75	23,90	18,15	14,22	11,44							50	30	3
			z-z	149,4	120,6	70,42	39,00	23,89	16,00	11,44	8,57	6,66	5,32									
50	30	4	y-y	189,9	171,6	128,7	85,82	56,74	39,33	28,63	21,70	17,00	13,66							50	30	4
			z-z	189,9	150,8	85,13	46,44	28,31	18,92	13,50	10,11	7,85	6,27									
60	40	2	y-y	132,7	126,3	105,0	80,85	58,88	42,86	32,03	24,66	19,50	15,79	13,03						60	40	2
			z-z	132,7	118,8	87,27	56,89	37,19	25,65	18,62	14,09	11,02	8,85	7,26								
60	40	2,5	y-y	162,9	154,8	128,3	98,21	71,17	51,67	38,55	29,65	23,44	18,97	15,65						60	40	2,5
			z-z	162,9	145,4	106,0	68,56	44,65	30,73	22,29	16,86	13,19	10,59	8,69								
60	40	3	y-y	192,0	182,0	150,3	114,4	82,52	59,75	44,51	34,21	27,03	21,86	18,03						60	40	3
			z-z	192,0	170,7	123,5	79,24	51,41	35,33	25,60	19,36	15,13	12,15	9,96								
60	40	4	y-y	246,7	232,9	190,8	143,5	102,5	73,77	54,79	42,04	33,17	26,81	22,10						60	40	4
			z-z	246,7	217,7	154,8	97,75	62,96	43,13	31,20	23,56	18,41	14,77	12,11								
60	40	5	y-y	296,6	278,8	226,5	168,1	118,8	85,05	62,99	48,24	38,03	30,71	25,30						60	40	5
			z-z	296,6	259,7	181,4	112,6	72,03	49,18	35,52	26,80	20,92	16,77	13,75								

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)											h	b	t
				L_{cr} (m)													
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
70	50	2	y-y	161,1	157,1	136,1	112,2	87,55	66,70	51,15	39,99	31,94	26,02	21,58	15,49					70	50	2
			z-z	161,1	151,1	122,3	90,23	63,50	45,36	33,56	25,68	20,24	16,34	13,46	9,58							
70	50	2,5	y-y	198,4	193,3	167,1	137,3	106,7	81,06	62,06	48,46	38,68	31,50	26,11	18,74					70	50	2,5
			z-z	198,4	185,7	149,8	109,9	76,98	54,88	40,55	31,01	24,42	19,71	16,23	11,55							
70	50	3	y-y	234,6	228,2	196,9	161,2	124,8	94,53	72,24	56,35	44,95	36,59	30,32	21,75					70	50	3
			z-z	234,6	219,1	176,0	128,3	89,55	63,70	47,01	35,93	28,29	22,82	18,79	13,36							
70	50	4	y-y	303,5	294,4	252,8	205,5	157,8	118,8	90,47	70,43	56,11	45,63	37,79	27,09					70	50	4
			z-z	303,5	282,3	224,8	161,9	112,0	79,33	58,41	44,58	35,07	28,27	23,27	16,54							
70	50	5	y-y	367,6	355,6	304,0	245,0	186,5	139,6	106,0	82,32	65,49	53,22	44,04	31,54					70	50	5
			z-z	367,6	340,4	268,6	191,0	131,0	92,40	67,89	51,75	40,67	32,77	26,96	19,15							
80	40	2	y-y	151,2	149,6	132,3	113,0	92,19	72,83	57,17	45,34	36,54	29,96	24,95	18,01	13,59				80	40	2
			z-z	151,2	137,3	104,2	70,4	46,85	32,57	23,75	18,03	14,13	11,36	9,33	6,61	4,93						
80	40	2,5	y-y	198,4	195,3	171,6	144,9	116,4	90,76	70,62	55,70	44,74	36,59	30,42	21,92	16,51				80	40	2,5
			z-z	198,4	178,5	132,4	87,2	57,29	39,59	28,78	21,80	17,06	13,71	11,25	7,96	5,93						
80	40	3	y-y	234,6	230,7	202,2	170,3	136,3	105,9	82,25	64,79	51,99	42,50	35,32	25,44	19,16				80	40	3
			z-z	234,6	210,3	154,9	101,3	66,29	45,73	33,21	25,14	19,67	15,80	12,96	9,18	6,83						
80	40	4	y-y	303,5	297,6	260,0	217,5	172,7	133,3	103,1	81,00	64,90	52,99	44,00	31,66	23,83				80	40	4
			z-z	303,5	270,2	196,1	126,2	82,01	56,40	40,89	30,92	24,17	19,40	15,92	11,26	8,38						
80	40	5	y-y	367,6	359,6	312,8	259,8	204,6	156,9	120,8	94,67	75,73	61,76	51,25	36,84	27,71				80	40	5
			z-z	367,6	325,1	232,1	147,1	94,88	65,04	47,07	35,56	27,78	22,29	18,27	12,92	9,62						
80	60	2,5	y-y	233,9	231,9	205,7	176,7	145,2	115,4	90,98	72,35	58,41	47,94	39,95	28,88	21,80	17,03			80	60	2,5
			z-z	233,9	225,6	191,8	153,3	115,6	86,02	65,05	50,44	40,07	32,54	26,91	19,26	14,45	11,23					
80	60	3	y-y	277,2	274,6	243,3	208,5	170,7	135,4	106,5	84,60	68,26	55,99	46,65	33,70	25,44	19,86			80	60	3
			z-z	277,2	266,9	226,5	180,3	135,5	100,5	75,92	58,81	46,70	37,90	31,34	22,42	16,81	13,07					
80	60	4	y-y	360,3	356,2	314,7	268,4	218,5	172,2	135,0	107,0	86,19	70,62	58,80	42,44	32,01	24,98			80	60	4
			z-z	360,3	345,9	292,1	230,7	172,0	127,0	95,61	73,94	58,66	47,57	39,31	28,10	21,07	16,37					
80	60	5	y-y	438,6	432,8	381,2	323,6	261,7	205,1	160,2	126,6	101,9	83,37	69,36	50,02	37,71	29,42			80	60	5
			z-z	438,6	419,9	352,8	276,3	204,3	150,1	112,7	87,02	68,96	55,88	46,16	32,98	24,71	19,19					
90	50	2,5	y-y	233,9	233,9	209,8	183,5	154,7	126,0	101,2	81,45	66,28	54,68	45,74	33,22	25,15	19,68	15,80		90	50	2,5
			z-z	233,9	220,1	179,2	133,4	94,54	67,79	50,24	38,49	30,35	24,52	20,20	14,38	10,75	8,34	6,66				
90	50	3	y-y	277,2	276,9	248,1	216,7	182,1	148,0	118,6	95,30	77,47	63,88	53,41	38,77	29,34	22,95	18,43		90	50	3
			z-z	277,2	260,3	211,2	156,4	110,4	78,95	58,44	44,75	35,27	28,48	23,46	16,70	12,48	9,68	7,72				
90	50	4	y-y	360,3	359,2	321,1	279,3	233,4	188,6	150,5	120,6	97,89	80,61	67,34	48,83	36,93	28,87	23,18		90	50	4
			z-z	360,3	337,0	271,4	198,7	139,0	99,04	73,14	55,93	44,04	35,54	29,26	20,82	15,55	12,06	9,62				
90	50	5	y-y	438,6	436,5	389,2	337,1	280,0	225,0	178,8	142,9	115,7	95,19	79,45	57,55	43,49	33,99	27,28		90	50	5
			z-z	438,6	408,7	326,4	236,2	163,9	116,3	85,67	65,42	51,48	41,51	34,17	24,29	18,14	14,06	11,22				

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



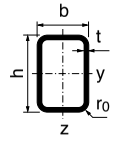
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
100	40	2,5	y-y	218,4	218,4	200,1	178,4	154,4	129,5	106,5	87,20	71,76	59,66	50,17	36,69	27,89	21,88	17,61	14,47	100	40	2,5
			z-z	218,4	198,9	151,6	103,1	68,82	47,92	34,97	26,55	20,81	16,74	13,75	9,75	7,27	5,63	4,48	3,66			
100	40	3	y-y	277,2	277,2	251,6	222,5	190,3	157,6	128,2	104,1	85,21	70,58	59,21	43,16	32,74	25,65	20,63	16,94	100	40	3
			z-z	277,2	249,8	186,1	123,1	81,09	56,10	40,80	30,92	24,20	19,45	15,96	11,30	8,42	6,52	5,19	4,23			
100	40	4	y-y	360,3	360,3	325,6	286,9	244,2	201,1	162,8	131,8	107,6	89,01	74,59	54,30	41,16	32,23	25,91	21,27	100	40	4
			z-z	360,3	322,6	237,0	154,5	101,0	69,63	50,55	38,26	29,93	24,04	19,72	13,96	10,39	8,04	6,40	5,22			
100	40	5	y-y	438,6	438,6	394,8	346,4	293,2	240,0	193,4	156,0	127,2	105,0	87,91	63,91	48,41	37,89	30,44	24,99	100	40	5
			z-z	438,6	390,2	282,3	181,3	117,6	80,84	58,59	44,30	34,63	27,80	22,80	16,13	12,01	9,28	7,39	6,02			
100	50	2,5	y-y	236,2	236,2	217,7	195,1	170,1	144,0	119,4	98,35	81,28	67,76	57,10	41,86	31,87	25,03	20,16	16,57	100	50	2,5
			z-z	236,2	223,8	184,7	140,4	101,2	73,20	54,52	41,89	33,09	26,76	22,07	15,73	11,77	9,14	7,30	5,96			
100	50	3	y-y	298,5	298,5	272,9	242,9	209,7	175,5	144,0	117,7	96,72	80,35	67,53	49,35	37,50	29,41	23,67	19,44	100	50	3
			z-z	298,5	280,9	228,7	170,3	120,7	86,55	64,15	49,15	38,76	31,30	25,79	18,36	13,73	10,65	8,50	6,94			
100	50	4	y-y	388,7	388,7	354,1	314,2	270,1	224,9	183,8	149,7	122,8	101,9	85,54	62,43	47,40	37,16	29,89	24,55	100	50	4
			z-z	388,7	364,3	294,5	217,0	152,5	108,9	80,49	61,59	48,53	39,17	32,26	22,95	17,15	13,30	10,61	8,67			
100	50	5	y-y	474,1	474,1	430,4	380,6	325,7	269,8	219,5	178,3	145,9	120,9	101,4	73,92	56,08	43,94	35,33	29,01	100	50	5
			z-z	474,1	442,7	355,2	258,6	180,2	128,1	94,54	72,24	56,87	45,88	37,77	26,86	20,06	15,55	12,41	10,13			
100	50	6	y-y	555,0	555,0	501,8	442,2	376,5	310,2	251,3	203,4	166,2	137,5	115,2	83,86	63,58	49,79	40,02	32,86	100	50	6
			z-z	555,0	516,0	410,6	295,4	204,2	144,6	106,4	81,22	63,88	51,51	42,38	30,12	22,49	17,43	13,90	11,35			
100	60	2,5	y-y	253,9	253,9	235,2	211,6	185,7	158,3	132,1	109,4	90,69	75,79	63,98	47,01	35,84	28,17	22,70	18,67	100	60	2,5
			z-z	253,9	246,8	212,5	173,4	133,8	101,1	77,17	60,15	47,95	39,02	32,32	23,18	17,41	13,55	10,84	8,87			
100	60	3	y-y	319,8	319,8	294,0	263,0	228,7	192,9	159,5	131,0	108,1	90,01	75,79	55,51	42,24	33,16	26,70	21,94	100	60	3
			z-z	319,8	309,1	263,9	212,3	161,3	120,6	91,43	71,00	56,47	45,88	37,96	27,18	20,40	15,86	12,69	10,38			
100	60	4	y-y	417,1	417,1	382,3	341,0	295,4	248,1	204,3	167,4	137,8	114,6	96,39	70,51	53,61	42,07	33,86	27,82	100	60	4
			z-z	417,1	402,1	341,8	273,0	205,9	153,1	115,8	89,75	71,30	57,89	47,87	34,26	25,70	19,98	15,97	13,06			
100	60	5	y-y	509,6	509,6	465,7	414,2	357,4	298,8	245,1	200,1	164,5	136,6	114,8	83,86	63,71	49,97	40,20	33,03	100	60	5
			z-z	509,6	490,0	414,7	328,7	245,9	182,0	137,2	106,2	84,30	68,39	56,53	40,43	30,31	23,56	18,83	15,39			
100	60	6	y-y	597,6	597,6	544,1	482,6	414,6	345,0	281,8	229,4	188,2	156,0	131,0	95,60	72,58	56,89	45,76	37,59	100	60	6
			z-z	597,6	572,9	482,6	379,4	281,7	207,4	156,0	120,5	95,56	77,47	64,01	45,74	34,28	26,63	21,28	17,40			

h	b	t			$N_{b,Rd}$ (kN)											h	b	t
			akseli		L_{cr} (m)													
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
100	80	2,5	y-y	289,4	289,4	270,0	244,4	216,2	186,3	157,1	131,0	109,3	91,70	77,62	57,24	43,73	34,42	27,76	22,85	100	80	2,5
			z-z	289,4	289,4	260,7	229,0	194,0	159,0	128,3	103,5	84,42	69,74	58,39	42,46	32,17	25,18	20,23	16,61			
100	80	3	y-y	362,4	362,4	336,0	302,6	265,9	227,0	189,8	157,2	130,5	109,1	92,16	67,75	51,67	40,62	32,73	26,93	100	80	3
			z-z	362,4	361,8	323,9	282,4	236,8	192,1	153,7	123,4	100,2	82,61	69,05	50,10	37,91	29,65	23,81	19,53			
100	80	4	y-y	473,9	473,9	438,2	393,8	344,9	293,5	244,5	202,0	167,3	139,7	117,9	86,57	65,97	51,83	41,76	34,35	100	80	4
			z-z	473,9	472,3	422,0	366,7	306,2	247,2	197,1	157,8	128,0	105,4	88,05	63,83	48,27	37,74	30,29	24,85			
100	80	5	y-y	580,6	580,6	535,6	480,2	419,3	355,3	294,9	243,0	200,9	167,6	141,3	103,6	78,89	61,96	49,90	41,03	100	80	5
			z-z	580,6	577,8	515,2	446,2	370,7	297,8	236,6	189,1	153,2	126,0	105,2	76,16	57,56	44,99	36,10	29,61			
100	80	6	y-y	682,8	682,8	628,0	561,8	488,8	412,6	341,2	280,4	231,4	192,8	162,3	118,9	90,48	71,03	57,19	47,01	100	80	6
			z-z	682,8	678,4	603,5	520,7	430,4	344,2	272,5	217,3	175,7	144,4	120,4	87,16	65,84	51,43	41,27	33,84			
120	40	2,5	y-y	228,5	228,5	217,4	199,8	180,8	160,3	139,2	119,1	101,3	86,25	73,76	55,11	42,43	33,56	27,16	22,41	120	40	2,5
			z-z	228,5	210,8	165,1	116,3	79,26	55,73	40,88	31,13	24,45	19,70	16,20	11,50	8,58	6,65	5,30	4,32			
120	40	3	y-y	297,5	297,5	280,7	256,2	229,6	201,0	172,3	145,7	122,8	103,8	88,30	65,55	50,27	39,66	32,05	26,42	120	40	3
			z-z	297,5	271,2	207,1	141,1	94,34	65,73	47,98	36,44	28,56	22,98	18,87	13,38	9,98	7,72	6,15	5,02			
120	40	4	y-y	417,1	417,1	389,8	353,4	313,4	270,8	229,0	191,5	160,0	134,4	113,9	84,06	64,26	50,60	40,82	33,61	120	40	4
			z-z	417,1	374,9	277,7	182,6	119,9	82,84	60,20	45,59	35,68	28,66	23,52	16,66	12,41	9,60	7,64	6,23			
120	40	5	y-y	509,6	509,6	474,9	429,5	379,6	326,5	274,8	229,0	190,8	160,0	135,4	99,79	76,21	59,97	48,36	39,81	120	40	5
			z-z	509,6	455,2	332,3	215,3	140,3	96,62	70,10	53,03	41,47	33,30	27,32	19,33	14,39	11,13	8,86	7,22			
120	40	6	y-y	597,6	597,6	555,0	500,6	440,7	377,3	316,2	262,5	218,1	182,6	154,3	113,5	86,61	68,11	54,90	45,17	120	40	6
			z-z	597,6	530,0	381,1	243,1	157,4	108,0	78,22	59,12	46,20	37,08	30,40	21,50	16,01	12,37	9,85	8,03			
120	50	2,5	y-y	246,2	246,2	235,3	216,9	197,1	175,7	153,5	132,2	113,0	96,50	82,75	62,04	47,86	37,90	30,70	25,35	120	50	2,5
			z-z	246,2	235,6	197,9	154,8	114,4	83,98	63,05	48,67	38,57	31,25	25,81	18,44	13,82	10,73	8,58	7,01			
120	50	3	y-y	318,8	318,8	302,3	277,0	249,6	220,1	190,0	161,8	137,0	116,3	99,22	73,91	56,81	44,88	36,30	29,94	120	50	3
			z-z	318,8	302,6	250,4	191,2	138,2	100,2	74,72	57,45	45,40	36,73	30,29	21,60	16,17	12,55	10,02	8,19			
120	50	4	y-y	445,5	445,5	418,9	381,6	340,8	297,0	253,4	213,4	179,3	151,2	128,5	95,19	72,92	57,50	46,43	38,26	120	50	4
			z-z	445,5	418,9	340,7	253,3	179,3	128,5	95,16	72,90	57,48	46,42	38,24	27,23	20,35	15,79	12,60	10,29			
120	50	5	y-y	545,1	545,1	511,3	464,8	413,9	359,4	305,4	256,4	214,9	180,9	153,5	113,6	86,90	68,48	55,28	45,53	120	50	5
			z-z	545,1	510,7	412,4	303,2	212,8	151,9	112,3	85,87	67,65	54,60	44,96	31,99	23,91	18,54	14,79	12,07			
120	50	6	y-y	640,2	640,2	598,8	543,1	482,1	416,9	352,8	295,3	246,8	207,5	175,8	129,8	99,28	78,18	63,08	51,94	120	50	6
			z-z	640,2	597,4	478,7	348,0	242,2	172,1	126,9	96,98	76,33	61,57	50,68	36,04	26,92	20,87	16,65	13,59			
120	60	2,5	y-y	264,0	264,0	253,1	233,8	213,2	190,9	167,6	145,0	124,5	106,7	91,67	68,93	53,27	42,23	34,24	28,29	120	60	2,5
			z-z	264,0	258,6	225,4	187,9	148,6	114,3	88,22	69,23	55,42	45,23	37,54	27,00	20,31	15,83	12,67	10,38			
120	60	3	y-y	340,1	340,1	323,8	297,6	269,3	238,8	207,4	177,6	151,1	128,6	110,0	82,22	63,30	50,07	40,53	33,45	120	60	3
			z-z	340,1	331,1	285,8	234,4	181,8	137,8	105,4	82,27	65,64	53,44	44,29	31,78	23,88	18,59	14,88	12,17			
120	60	4	y-y	473,9	473,9	447,8	409,3	367,5	322,6	277,1	234,9	198,3	167,8	142,9	106,2	81,53	64,36	52,02	42,89	120	60	4
			z-z	473,9	458,1	391,3	315,0	239,5	179,1	135,8	105,5	83,92	68,18	56,42	40,40	30,32	23,58	18,86	15,42			
120	60	5	y-y	580,6	580,6	547,4	499,6	447,4	391,4	335,1	283,2	238,5	201,5	171,4	127,2	97,53	76,94	62,16	51,23	120	60	5
			z-z	580,6	560,0	476,3	380,7	287,3	213,8	161,7	125,4	99,61	80,87	66,89	47,87	35,91	27,92	22,32	18,25			
120	60	6	y-y	682,8	682,8	642,1	584,9	522,4	455,4	388,5	327,3	275,0	232,0	197,1	146,0	111,9	88,20	71,23	58,68	120	60	6
			z-z	682,8	656,7	556,1	441,2	330,4	244,7	184,5	142,8	113,4	91,99	76,04	54,38	40,78	31,69	25,33	20,71			

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



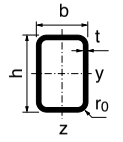
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
120	80	2,5	y-y	299,5	299,5	288,6	267,5	245,1	220,9	195,5	170,4	147,1	126,7	109,3	82,61	64,02	50,85	41,28	34,14	120	80	2,5
			z-z	299,5	299,5	273,3	242,9	209,3	174,8	143,1	116,8	95,91	79,62	66,89	48,85	37,11	29,10	23,41	19,23			
120	80	3	y-y	382,7	382,7	366,5	338,4	308,1	275,4	241,5	208,6	178,7	153,0	131,4	98,70	76,22	60,41	48,96	40,44	120	80	3
			z-z	382,7	382,7	346,1	305,1	259,8	214,1	173,4	140,4	114,7	94,90	79,53	57,90	43,90	34,38	27,63	22,69			
120	80	4	y-y	530,7	530,7	505,1	464,2	420,0	372,3	323,4	276,8	235,5	200,5	171,5	128,1	98,63	78,01	63,14	52,11	120	80	4
			z-z	530,7	530,2	475,2	415,1	349,1	283,9	227,6	183,0	148,8	122,70	102,6	74,47	56,37	44,09	35,41	29,05			
120	80	5	y-y	651,6	651,6	619,0	568,1	513,0	453,6	392,8	335,4	284,7	241,9	206,7	154,2	118,6	93,77	75,86	62,59	120	80	5
			z-z	651,6	650,1	581,6	506,4	424,0	343,2	274,2	220,0	178,6	147,10	122,9	89,17	67,45	52,75	42,35	34,74			
120	80	6	y-y	768,0	768,0	728,1	667,2	601,3	530,1	457,7	389,7	330,1	280,1	239,0	178,0	136,8	108,1	87,43	72,11	120	80	6
			z-z	768,0	765,0	683,0	592,8	494,0	398,1	317,0	253,7	205,7	169,2	141,3	102,4	77,43	60,53	48,58	39,85			
120	80	7,1	y-y	875,0	875,0	826,4	755,2	677,8	594,4	510,4	432,3	364,8	308,6	262,8	195,2	149,8	118,3	95,57	78,78	120	80	7,1
			z-z	875,0	869,5	773,8	668,0	552,6	442,2	350,3	279,4	226,0	185,8	155,0	112,1	84,72	66,19	53,11	43,54			
120	80	8	y-y	967,1	967,1	911,4	831,5	744,4	650,8	556,9	470,4	396,0	334,5	284,5	211,0	161,8	127,6	103,1	84,98	120	80	8
			z-z	967,1	959,6	852,0	732,9	603,3	480,6	379,4	302,0	244,0	200,3	167,0	120,7	91,17	71,20	57,12	46,82			
120	80	8,8	y-y	1045	1045	983,0	895,3	799,6	697,0	594,6	500,9	420,8	354,9	301,5	223,4	171,1	134,9	109,0	89,78	120	80	8,8
			z-z	1045	1036	917,6	786,6	644,6	511,2	402,4	319,7	258,0	211,6	176,3	127,4	96,15	75,07	60,20	49,34			
120	80	10	y-y	1156	1156	1084	984,4	875,9	759,8	644,9	541,0	453,1	381,3	323,5	239,2	183,0	144,2	116,4	95,84	120	80	10
			z-z	1156	1143	1009	860,5	700,0	551,6	432,2	342,4	275,8	226,0	188,1	135,8	102,4	79,91	64,06	52,49			
120	100	2,5	y-y	319,5	319,5	310,0	288,7	266,2	242,0	216,3	190,6	166,1	144,1	125,1	95,26	74,16	59,07	48,04	39,79	120	100	2,5
			z-z	319,5	319,5	303,7	278,8	251,9	222,9	193,2	165,1	140,2	119,2	101,9	76,06	58,52	46,27	37,44	30,89			
120	100	3	y-y	425,3	425,3	409,1	378,8	346,5	311,5	274,9	239,0	205,9	177,0	152,5	115,0	89,05	70,69	57,35	47,41	120	100	3
			z-z	425,3	425,3	400,2	364,6	325,8	284,2	242,6	204,5	171,9	145,0	123,2	91,32	69,97	55,17	44,56	36,71			
120	100	4	y-y	587,5	587,5	562,0	518,4	471,6	421,0	368,5	317,8	272,0	232,6	199,6	149,8	115,6	91,58	74,21	61,29	120	100	4
			z-z	587,5	587,5	549,1	497,8	441,5	381,5	322,5	269,7	225,3	189,3	160,4	118,4	90,51	71,26	57,50	47,34			
120	100	5	y-y	722,6	722,6	690,2	635,9	577,5	514,3	449,1	386,3	330,0	281,7	241,5	180,9	139,5	110,5	89,49	73,89	120	100	5
			z-z	722,6	722,6	674,0	610,0	539,7	464,9	391,8	326,8	272,6	228,7	193,6	142,7	109,0	85,81	69,22	56,97			
120	100	6	y-y	853,2	853,2	813,4	748,5	678,5	602,9	525,0	450,5	384,0	327,4	280,3	209,7	161,6	127,9	103,5	85,47	120	100	6
			z-z	853,2	853,2	794,0	717,3	633,0	543,5	456,7	379,9	316,3	265,0	224,1	165,1	126,0	99,14	79,94	65,78			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
mm	mm	mm		L_{cr} (m)																mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
140	60	2,5	y-y	271,0	271,0	266,1	249,9	232,9	214,8	195,5	175,5	155,9	137,4	120,8	93,57	73,62	59,03	48,23	40,06	140	60	2,5
			z-z	271,0	267,2	235,3	199,5	161,2	126,3	98,54	77,86	62,61	51,24	42,63	30,74	23,17	18,07	14,48	11,87			
140	60	3	y-y	352,5	352,5	344,0	321,7	298,2	273,0	246,3	218,9	192,5	168,3	146,9	112,7	88,18	70,45	57,41	47,61	140	60	3
			z-z	352,5	345,4	301,3	251,4	199,1	153,4	118,4	92,97	74,44	60,76	50,44	36,28	27,30	21,27	17,04	13,95			
140	60	4	y-y	530,7	530,7	512,2	475,5	436,3	394,1	349,7	305,6	264,6	228,3	197,2	149,3	115,9	92,09	74,79	61,87	140	60	4
			z-z	530,7	514,1	440,6	356,8	273,0	205,0	155,9	121,2	96,51	78,46	64,95	46,54	34,94	27,18	21,74	17,78			
140	60	5	y-y	651,6	651,6	627,9	582,1	533,3	480,6	425,3	370,7	320,2	275,7	237,9	179,7	139,3	110,6	89,81	74,27	140	60	5
			z-z	651,6	629,8	537,6	432,4	328,4	245,4	186,0	144,5	114,9	93,34	77,23	55,30	41,50	32,27	25,81	21,11			
140	60	6	y-y	768,0	768,0	738,6	683,9	625,4	562,2	496,2	431,2	371,5	319,3	275,1	207,5	160,6	127,5	103,4	85,51	140	60	6
			z-z	768,0	740,3	629,3	502,6	378,8	281,7	213,0	165,1	131,2	106,5	88,07	63,02	47,27	36,75	29,38	24,02			
140	70	2,5	y-y	288,7	288,7	284,1	267,0	249,3	230,4	210,3	189,4	168,7	149,1	131,3	102,1	80,47	64,61	52,82	43,91	140	70	2,5
			z-z	288,7	288,7	259,8	228,0	193,0	158,0	127,3	102,7	83,73	69,15	57,89	42,08	31,88	24,95	20,05	16,45			
140	70	3	y-y	373,8	373,8	365,7	342,5	318,2	292,1	264,4	236,0	208,3	182,6	159,8	123,1	96,45	77,16	62,94	52,23	140	70	3
			z-z	373,8	372,4	332,4	288,6	240,5	193,8	154,3	123,5	100,1	82,40	68,80	49,86	37,70	29,47	23,65	19,40			
140	70	4	y-y	559,1	559,1	541,4	503,7	463,6	420,5	375,0	329,4	286,4	248,0	214,9	163,3	127,0	101,1	82,15	68,00	140	70	4
			z-z	559,1	551,9	486,7	413,7	335,3	263,4	205,9	162,9	131,1	107,3	89,32	64,44	48,58	37,90	30,38	24,89			
140	70	5	y-y	687,1	687,1	664,4	617,4	567,5	513,6	456,9	400,4	347,4	300,3	259,8	197,1	153,0	121,7	98,91	81,85	140	70	5
			z-z	687,1	677,2	595,6	504,1	406,2	317,5	247,5	195,4	157,0	128,5	106,8	77,01	58,03	45,26	36,27	29,71			
140	70	6	y-y	810,6	810,6	782,4	726,3	666,5	602,0	534,2	466,8	404,1	348,7	301,3	228,1	177,0	140,7	114,2	94,49	140	70	6
			z-z	810,6	797,3	699,3	589,2	472,1	367,2	285,2	224,8	180,4	147,5	122,6	88,28	66,50	51,85	41,54	34,02			
140	80	3	y-y	395,1	395,1	387,3	363,2	338,0	311,0	282,3	252,8	223,8	196,8	172,6	133,3	104,7	83,85	68,45	56,83	140	80	3
			z-z	395,1	395,1	361,3	321,6	277,8	232,5	190,9	156,0	128,3	106,5	89,56	65,45	49,74	39,01	31,39	25,79			
140	80	4	y-y	587,5	587,5	570,5	531,7	490,7	446,5	399,8	352,7	307,9	267,5	232,3	177,2	138,0	110,0	89,49	74,12	140	80	4
			z-z	587,5	587,5	528,3	463,3	391,7	320,3	257,9	208,0	169,4	139,9	117,1	85,09	64,45	50,44	40,52	33,26			
140	80	5	y-y	722,6	722,6	700,7	652,4	601,3	546,2	488,0	429,5	374,2	324,5	281,5	214,2	166,7	132,8	108,0	89,40	140	80	5
			z-z	722,6	722,3	647,7	566,4	476,8	388,3	311,6	250,7	203,9	168,2	140,7	102,2	77,33	60,50	48,59	39,87			
140	80	6	y-y	853,2	853,2	826,0	768,3	707,1	641,1	571,5	501,8	436,2	377,6	327,1	248,5	193,2	153,8	125,0	103,4	140	80	6
			z-z	853,2	851,5	762,2	664,4	557,0	451,5	361,1	289,8	235,4	194,0	162,1	117,6	89,01	69,61	55,89	45,85			
150	50	2,5	y-y	256,0	256,0	253,3	238,9	224,1	208,3	191,6	174,0	156,4	139,4	123,6	97,09	77,02	62,09	50,90	42,39	150	50	2,5
			z-z	256,0	248,0	212,5	172,0	131,5	98,75	75,08	58,39	46,48	37,79	31,28	22,42	16,83	13,09	10,47	8,56			
150	50	3	y-y	336,1	336,1	330,4	310,4	289,6	267,4	243,7	219,2	195,0	172,1	151,5	117,6	92,60	74,30	60,73	50,46	150	50	3
			z-z	336,1	322,8	272,8	215,7	161,0	118,9	89,60	69,32	54,99	44,60	36,86	26,36	19,76	15,35	12,27	10,03			
150	50	4	y-y	509,0	509,0	514,7	479,3	441,9	401,6	358,9	316,1	275,5	239,0	207,3	157,9	122,9	97,88	79,60	65,91	150	50	4
			z-z	509,0	481,9	397,0	301,0	216,3	156,3	116,4	89,37	70,58	57,07	47,06	33,54	25,10	19,47	15,55	12,70			
150	50	5	y-y	651,6	651,6	630,9	586,9	540,2	489,8	436,6	383,4	333,3	288,6	250,0	189,9	147,6	117,5	95,51	79,06	150	50	5
			z-z	651,6	612,6	498,0	369,9	261,5	187,3	138,8	106,3	83,79	67,67	55,75	39,69	29,67	23,01	18,36	14,99			
150	50	6	y-y	768,0	768,0	742,2	689,5	633,5	573,0	509,4	446,0	386,8	334,1	289,0	219,1	170,1	135,3	109,9	90,93	150	50	6
			z-z	768,0	719,2	580,4	426,4	299,1	213,3	157,6	120,6	94,98	76,66	63,13	44,91	33,56	26,02	20,76	16,95			

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



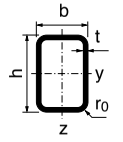
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
150	100	3	y-y	442,6	442,6	439,1	414,9	389,9	363,5	335,4	306,0	276,1	247,0	219,9	173,6	138,2	111,6	91,66	76,41	150	100	3
			z-z	442,6	442,6	421,5	387,6	350,9	311,3	270,7	231,9	197,4	168,1	143,9	107,5	82,82	65,52	53,04	43,77			
150	100	4	y-y	651,0	651,0	661,1	621,0	579,2	534,6	487,1	437,9	389,3	343,6	302,2	234,5	184,6	148,1	121,0	100,6	150	100	4
			z-z	651,0	651,0	613,2	559,3	500,4	437,2	373,8	315,6	265,6	224,2	190,7	141,4	108,4	85,50	69,07	56,91			
150	100	5	y-y	829,1	829,1	814,0	764,1	712,0	656,3	597,0	535,8	475,5	418,9	368,0	285,0	224,1	179,7	146,7	121,9	150	100	5
			z-z	829,1	829,1	777,3	706,3	628,6	545,4	463,1	388,6	325,5	274,0	232,5	171,9	131,5	103,6	83,65	68,89			
150	100	6	y-y	981,0	981,0	961,9	902,2	839,9	773,2	702,1	629,0	557,1	490,1	429,9	332,3	261,0	209,1	170,7	141,8	150	100	6
			z-z	981,0	981,0	917,8	832,6	739,3	639,7	541,6	453,3	379,1	318,6	270,1	199,5	152,5	120,1	96,94	79,82			
150	100	7,1	y-y	1127	1127	1103	1033	960,0	881,6	798,2	712,6	629,2	551,9	483,0	372,1	291,7	233,4	190,4	158,0	150	100	7,1
			z-z	1127	1127	1051	951,6	841,9	725,3	611,4	510,0	425,3	356,9	302,1	222,7	170,2	133,9	108,0	88,92			
150	100	8	y-y	1251	1251	1223	1144	1062	973,9	880,1	784,2	691,0	605,1	528,9	406,7	318,5	254,6	207,6	172,2	150	100	8
			z-z	1251	1251	1165	1052	928,7	797,6	670,4	557,9	464,5	389,2	329,2	242,5	185,1	145,6	117,4	96,64			
150	100	8,8	y-y	1358	1358	1325	1239	1149	1052	949,3	844,3	742,6	649,3	566,8	435,1	340,4	272,0	221,7	183,8	150	100	8,8
			z-z	1358	1358	1261	1138	1002	858,3	719,4	597,4	496,6	415,7	351,3	258,5	197,3	155,1	125,1	102,9			
150	100	10	y-y	1511	1511	1472	1375	1273	1163	1047	928,0	814,1	710,1	618,7	473,8	370,1	295,4	240,6	199,4	150	100	10
			z-z	1511	1511	1400	1260	1105	942,7	787,0	651,4	540,3	451,6	381,2	280,1	213,5	167,8	135,3	111,3			
160	70	4	y-y	576,3	576,3	568,9	535,9	501,6	465,2	426,5	386,1	345,6	306,9	271,4	212,2	167,9	135,1	110,6	92,06	160	70	4
			z-z	576,3	571,9	508,0	437,2	360,2	287,1	226,8	180,6	145,9	119,8	99,88	72,24	54,55	42,60	34,18	28,02			
160	70	5	y-y	758,1	758,1	744,6	699,1	651,6	600,9	546,9	491,1	436,0	384,4	337,8	261,7	205,9	165,1	134,9	112,1	160	70	5
			z-z	758,1	748,3	659,6	560,4	453,9	356,2	278,4	220,2	177,2	145,1	120,7	87,07	65,64	51,21	41,05	33,63			
160	70	6	y-y	895,8	895,8	878,6	824,2	767,3	706,6	641,8	575,2	509,6	448,4	393,5	304,2	239,0	191,5	156,4	129,8	160	70	6
			z-z	895,8	882,6	775,9	656,4	528,6	412,9	321,7	253,9	204,0	166,9	138,8	100,0	75,38	58,79	47,11	38,59			
160	70	8	y-y	1138	1138	1111	1039	964,3	883,6	798,0	710,4	625,5	547,3	478,1	367,3	287,5	229,8	187,3	155,4	160	70	8
			z-z	1138	1116	974,7	815,5	647,8	500,3	386,9	304,0	243,6	198,9	165,2	118,8	89,45	69,71	55,83	45,71			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
				L_{cr} (m)																		
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
160	80	3	y-y	404,2	404,2	404,2	403,2	382,1	360,5	337,9	313,8	288,5	262,5	236,8	212,4	169,6	136,0	110,4	90,91	75,96	160	80	3
			z-z	404,2	404,2	373,2	335,0	292,8	248,6	206,6	170,5	141,0	117,7	99,24	72,82	55,46	43,57	35,10	28,86				
160	80	4	y-y	604,7	604,7	598,2	564,2	529,0	491,8	452,0	410,5	368,8	328,5	291,3	228,7	181,4	146,2	119,8	99,78	160	80	4
			z-z	604,7	604,7	549,4	486,3	416,6	345,6	281,5	228,8	187,4	155,3	130,3	95,01	72,10	56,50	45,43	37,31			
160	80	5	y-y	793,6	793,6	781,4	734,7	686,3	634,6	579,5	522,4	465,7	411,9	363,1	282,5	222,8	178,9	146,3	121,7	160	80	5
			z-z	793,6	793,6	713,8	626,1	529,4	433,1	348,8	281,2	229,1	189,2	158,4	115,1	87,19	68,24	54,82	44,99			
160	80	6	y-y	938,4	938,4	922,7	867,0	809,0	747,1	681,1	612,8	545,2	481,4	423,7	329,0	259,1	208,0	170,0	141,3	160	80	6
			z-z	938,4	938,4	841,3	735,7	619,6	504,7	405,1	325,9	265,1	218,7	182,9	132,8	100,6	78,68	63,19	51,85			
160	80	7,1	y-y	1077	1077	1056	990,9	922,8	849,9	772,3	692,3	613,6	540,1	474,0	366,7	288,1	230,9	188,5	156,6	160	80	7,1
			z-z	1077	1074	960,8	836,6	700,3	567,0	452,9	363,3	295,0	243,0	203,0	147,3	111,4	87,11	69,94	57,37			
160	80	8	y-y	1194	1194	1170	1097	1020	938,2	850,9	761,1	673,2	591,5	518,3	400,1	314,0	251,4	205,2	170,3	160	80	8
			z-z	1194	1190	1062	922,2	768,7	619,6	493,5	395,0	320,2	263,6	220,1	159,5	120,6	94,27	75,67	62,06			
160	80	10	y-y	1440	1440	1406	1315	1220	1118	1009	898,0	790,4	691,4	603,8	463,8	362,9	290,1	236,4	196,1	160	80	10
			z-z	1440	1430	1271	1095	903,6	721,2	570,3	454,4	367,3	301,7	251,6	182,0	137,4	107,4	86,13	70,61			
160	90	3	y-y	425,5	425,5	425,0	403,1	380,7	357,2	332,3	306,1	279,1	252,3	226,7	181,6	145,9	118,6	97,76	81,73	160	90	3
			z-z	425,5	425,5	400,6	365,2	326,5	285,0	243,5	205,4	172,8	145,8	123,9	91,89	70,42	55,54	44,86	36,96			
160	90	4	y-y	633,1	633,1	627,5	592,4	556,3	518,1	477,4	434,8	391,7	349,9	311,0	245,0	194,7	157,2	129,0	107,5	160	90	4
			z-z	633,1	633,1	588,2	530,6	467,2	400,2	335,4	278,5	231,6	193,8	163,8	120,5	91,98	72,33	58,31	47,98			
160	90	5	y-y	829,1	829,1	818,1	770,3	720,7	668,0	611,8	553,3	494,9	439,1	388,0	303,1	239,6	192,7	157,8	131,2	160	90	5
			z-z	829,1	829,1	764,0	684,6	596,9	505,2	418,8	344,8	284,9	237,5	200,1	146,7	111,7	87,70	70,63	58,07			
160	90	6	y-y	981,0	981,0	966,8	909,6	850,3	787,1	719,8	649,9	580,2	514,0	453,6	353,5	279,1	224,3	183,5	152,6	160	90	6
			z-z	981,0	981,0	901,7	806,3	700,9	591,1	488,5	401,2	330,9	275,5	232,0	169,9	129,3	101,5	81,69	67,15			
160	90	7,1	y-y	1127	1127	1109	1042	972,1	897,8	818,6	736,6	655,5	578,9	509,5	395,7	311,7	250,2	204,5	170,0	160	90	7,1
			z-z	1127	1127	1032	920,3	796,6	668,3	549,7	450,0	370,3	307,9	258,9	189,3	143,9	112,9	90,87	74,68			
160	90	8	y-y	1251	1251	1229	1154	1076	992,0	903,0	811,0	720,2	634,9	558,1	432,5	340,3	272,9	222,9	185,2	160	90	8
			z-z	1251	1251	1143	1017	877,2	733,3	601,3	491,1	403,5	335,1	281,6	205,7	156,3	122,6	98,62	81,03			
160	90	8,8	y-y	1358	1358	1332	1250	1164	1072	974,2	873,4	774,2	681,5	598,2	462,8	363,7	291,4	238,0	197,6	160	90	8,8
			z-z	1358	1358	1238	1098	945,0	787,4	643,8	524,7	430,6	357,2	300,0	219,0	166,3	130,4	104,9	86,15			

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



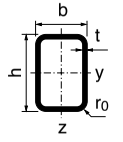
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
180	100	4	y-y	678,6	678,6	678,6	650,3	617,5	583,3	547,3	509,3	469,7	429,7	390,5	318,6	259,3	212,5	176,2	147,9	180	100	4
			z-z	678,6	678,6	645,5	593,0	536,3	475,0	412,2	352,5	299,7	255,0	218,0	162,8	125,3	99,10	80,20	66,17			
180	100	5	y-y	935,6	935,6	935,5	887,8	839,2	788,2	734,2	677,3	618,6	560,2	504,1	404,8	325,8	265,1	218,7	182,9	180	100	5
			z-z	935,6	935,6	880,4	802,2	716,8	625,3	533,7	449,9	378,2	319,1	271,2	201,0	154,0	121,4	98,06	80,79			
180	100	5,6	y-y	1040	1040	1039	986,1	931,7	874,7	814,2	750,5	685,0	619,8	557,3	447,0	359,4	292,3	241,1	201,6	180	100	5,6
			z-z	1040	1040	977,5	889,9	794,2	691,7	589,5	496,2	416,6	351,2	298,3	220,9	169,2	133,4	107,7	88,74			
180	100	6	y-y	1109	1109	1108	1051	992,4	931,4	866,6	798,4	728,3	658,6	591,9	474,3	381,2	309,9	255,5	213,6	180	100	6
			z-z	1109	1109	1041	947,4	844,8	734,9	625,6	526,1	441,4	372,0	315,8	233,8	179,0	141,1	113,9	93,84			
180	100	7,1	y-y	1278	1278	1275	1208	1140	1068	992,0	911,8	829,6	748,3	670,9	535,6	429,4	348,5	287,0	239,8	180	100	7,1
			z-z	1278	1278	1197	1087	966,4	837,5	710,1	595,2	498,1	419,0	355,3	262,6	200,9	158,2	127,7	105,2			
180	100	8	y-y	1422	1422	1416	1341	1265	1184	1098	1008	915,8	824,8	738,5	588,3	471,0	381,9	314,3	262,5	180	100	8
			z-z	1422	1422	1329	1205	1069	923,4	780,8	652,9	545,5	458,3	388,3	286,7	219,2	172,6	139,2	114,6			
180	100	8,8	y-y	1545	1545	1538	1456	1372	1283	1189	1090	988,8	889,3	795,3	632,3	505,5	409,6	336,9	281,3	180	100	8,8
			z-z	1545	1545	1442	1305	1155	996,0	840,0	701,0	584,9	490,9	415,6	306,5	234,2	184,3	148,7	122,4			
180	100	10	y-y	1724	1724	1714	1621	1526	1425	1318	1206	1092	980,0	874,6	693,3	553,3	447,7	368,0	307,0	180	100	10
			z-z	1724	1724	1605	1449	1279	1098	922,6	767,6	639,0	535,4	452,8	333,5	254,6	200,3	161,5	132,9			
180	120	4	y-y	735,4	735,4	735,4	707,1	672,4	636,4	598,5	558,5	516,8	474,4	432,5	355,0	290,1	238,5	198,1	166,5	180	120	4
			z-z	735,4	735,4	716,4	669,1	619,3	565,7	508,9	451,1	395,6	345,0	300,5	230,1	179,7	143,4	116,8	96,82			
180	120	5	y-y	1007	1007	1007	959,3	908,6	855,6	799,5	740,4	679,2	617,8	558,3	451,3	364,9	297,8	246,2	206,3	180	120	5
			z-z	1007	1007	972,6	903,4	829,9	750,5	666,9	583,8	506,0	437,1	377,9	286,4	222,4	176,8	143,6	118,8			
180	120	6	y-y	1194	1194	1194	1136	1076	1012	945,1	874,2	801,0	727,6	656,7	529,9	427,8	348,9	288,2	241,4	180	120	6
			z-z	1194	1194	1152	1069	980,9	885,6	785,4	686,1	593,7	512,0	442,3	334,7	259,6	206,4	167,6	138,6			
180	120	7,1	y-y	1379	1379	1379	1310	1239	1164	1085	1002	915,9	830,2	747,7	601,3	484,4	394,4	325,5	272,3	180	120	7,1
			z-z	1379	1379	1328	1231	1127	1015	897,8	782,0	674,9	580,9	501,0	378,4	293,2	232,8	188,9	156,2			
180	120	8	y-y	1535	1535	1534	1456	1376	1292	1203	1110	1013	917,0	824,9	662,0	532,6	433,2	357,4	298,9	180	120	8
			z-z	1535	1535	1476	1367	1250	1124	992,0	862,3	742,9	638,6	550,2	415,0	321,2	255,0	206,9	171,0			
180	120	8,8	y-y	1670	1670	1668	1582	1494	1402	1305	1202	1096	990,8	890,2	713,1	573,0	465,8	384,0	321,0	180	120	8,8
			z-z	1670	1670	1604	1484	1356	1217	1072	930,2	800,2	687,0	591,3	445,4	344,6	273,4	221,7	183,3			
180	120	10	y-y	1866	1866	1862	1764	1665	1561	1450	1333	1214	1095	982,4	784,8	629,4	511,0	421,0	351,7	180	120	10
			z-z	1866	1866	1789	1653	1507	1350	1186	1026	880,4	754,4	648,5	487,7	376,8	298,8	242,2	200,1			
180	120	12,5	y-y	2203	2203	2188	2069	1947	1818	1680	1536	1389	1246	1111	879,8	701,5	567,4	466,3	388,9	180	120	12,5
			z-z	2203	2203	2100	1933	1752	1557	1357	1164	992,7	846,4	724,7	542,4	417,9	330,8	267,8	221,1			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
mm	mm	mm		L_{cr} (m)																mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
200	80	4	y-y	635,4	635,4	635,4	617,0	589,2	560,7	530,8	499,3	466,4	432,5	398,4	333,1	276,1	229,2	191,7	161,9	200	80	4
			z-z	635,4	635,4	586,6	526,5	460,2	390,6	324,6	267,8	221,6	184,9	155,9	114,4	87,13	68,44	55,13	45,33			
200	80	5	y-y	873,8	873,8	873,8	841,2	800,3	758,0	713,4	666,4	617,4	567,5	518,1	426,1	348,8	287,0	238,6	200,7	200	80	5
			z-z	873,8	873,8	795,7	705,8	606,4	504,7	412,2	335,7	275,3	228,3	191,7	139,9	106,2	83,26	66,96	55,00			
200	80	6	y-y	1109	1109	1109	1061	1006	949,6	889,8	826,7	761,2	695,1	630,4	512,8	416,4	340,9	282,3	236,8	200	80	6
			z-z	1109	1109	999,1	877,9	744,2	610,3	492,5	397,8	324,4	268,0	224,4	163,2	123,7	96,81	77,79	63,85			
200	80	7,1	y-y	1278	1278	1278	1220	1156	1089	1018	944,0	867,0	789,5	714,2	578,5	468,3	382,5	316,4	265,2	200	80	7,1
			z-z	1278	1278	1147	1004	846,7	690,5	554,8	446,7	363,6	300,0	251,0	182,3	138,0	108,0	86,75	71,19			
200	80	8	y-y	1422	1422	1422	1354	1282	1207	1128	1044	957,6	870,7	786,5	635,5	513,6	419,1	346,4	290,1	200	80	8
			z-z	1422	1422	1272	1110	932,4	757,4	606,6	487,4	396,2	326,6	273,0	198,2	150,0	117,3	94,20	77,28			
200	80	8,8	y-y	1545	1545	1545	1470	1391	1309	1221	1129	1034	939,0	847,1	683,0	551,2	449,3	371,1	310,7	200	80	8,8
			z-z	1545	1541	1379	1200	1004	812,8	649,2	520,6	422,7	348,1	290,9	211,0	159,6	124,8	100,2	82,19			
200	80	10	y-y	1724	1724	1724	1637	1547	1454	1355	1250	1142	1035	931,7	748,7	602,8	490,7	404,9	338,7	200	80	10
			z-z	1724	1717	1532	1328	1105	889,2	707,3	565,6	458,4	377,1	314,8	228,1	172,4	134,8	108,2	88,71			
200	100	4	y-y	692,2	692,2	692,2	674,5	645,0	614,8	583,3	550,2	515,5	479,7	443,5	373,3	311,0	259,2	217,4	183,9	200	100	4
			z-z	692,2	692,2	662,2	610,9	555,7	496,1	434,3	374,5	320,6	274,1	235,3	176,5	136,3	108,0	87,48	72,25			
200	100	5	y-y	944,8	944,8	944,8	913,5	870,8	826,6	780,3	731,6	680,6	628,4	576,2	477,8	393,4	325,1	271,0	228,4	200	100	5
			z-z	944,8	944,8	895,4	820,3	738,8	651,0	561,7	478,0	404,7	343,2	292,8	218,1	167,6	132,4	107,0	88,28			
200	100	6	y-y	1194,0	1194	1194	1148	1092	1033	971,4	906,5	838,8	769,9	701,9	576,0	470,7	386,9	321,4	270,1	200	100	6
			z-z	1194,0	1194	1123	1024	914,9	798,1	681,4	574,4	482,8	407,4	346,2	256,6	196,6	155,0	125,2	103,2			
200	100	7,1	y-y	1379,0	1379	1379	1323	1257	1188	1116	1039	959,6	878,8	799,4	653,6	532,6	437,0	362,5	304,4	200	100	7,1
			z-z	1379,0	1379	1295	1177	1049	911,8	775,5	651,7	546,4	460,3	390,7	289,1	221,3	174,4	140,8	116,0			
200	100	8	y-y	1535,0	1535	1535	1471	1397	1319	1238	1151	1062	971,3	882,4	719,8	585,7	480,0	398,0	334,0	200	100	8
			z-z	1535,0	1535	1438	1306	1161	1007	853,9	716,0	599,4	504,2	427,6	316,1	241,8	190,5	153,7	126,6			
200	100	8,8	y-y	1670,0	1670	1670	1598	1517	1432	1342	1247	1149	1050	952,7	775,6	630,2	516,0	427,5	358,7	200	100	8,8
			z-z	1670,0	1670	1562	1417	1257	1087	920,0	769,8	643,4	540,8	458,3	338,4	258,7	203,7	164,4	135,4			
200	100	10	y-y	1866,0	1866	1866	1783	1690	1594	1492	1385	1274	1161	1052	853,8	692,3	566,1	468,5	392,8	200	100	10
			z-z	1866,0	1866	1741	1575	1394	1201	1013	844,6	704,5	591,1	500,4	369,0	281,9	221,8	178,9	147,3			
200	100	12,5	y-y	2203,0	2203	2203	2091	1977	1857	1730	1597	1459	1322	1190	955,9	769,6	626,4	516,9	432,4	200	100	12,5
			z-z	2203,0	2203	2040	1835	1609	1372	1145	947,1	785,3	656,2	553,9	406,9	310,2	243,8	196,4	161,6			

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



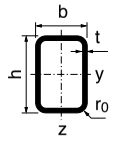
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
200	120	5	y-y	1016,0	1016	1016	985,5	940,8	894,7	846,5	795,8	742,7	688,1	633,3	528,5	437,4	362,7	303,2	255,9	200	120	5
			z-z	1016,0	1016	987,1	920,4	849,9	774,1	693,8	612,7	535,4	465,4	404,5	308,7	240,6	191,8	156,1	129,3			
200	120	6	y-y	1279,0	1279	1279	1235	1176	1116	1052	984,8	914,7	843,1	771,8	637,9	524,1	432,4	360,1	303,2	200	120	6
			z-z	1279,0	1279	1236	1149	1056	955,2	849,4	743,9	645,3	557,6	482,3	365,7	284,0	225,9	183,5	151,8			
200	120	7,1	y-y	1480,0	1480	1480	1426	1357	1286	1211	1132	1050	965,7	882,4	726,9	595,6	490,6	408,0	343,3	200	120	7,1
			z-z	1480,0	1480	1428	1325	1216	1097	973,2	850,0	735,5	634,3	547,8	414,6	321,6	255,5	207,5	171,6			
200	120	8	y-y	1649,0	1649	1649	1587	1510	1429	1345	1256	1164	1069	975,8	802,3	656,5	540,1	448,9	377,5	200	120	8
			z-z	1649,0	1649	1589	1473	1350	1216	1077	938,5	810,7	698,2	602,4	455,3	352,8	280,3	227,5	188,1			
200	120	8,8	y-y	1795,0	1795	1795	1726	1641	1553	1461	1363	1261	1158	1055	866,2	707,8	581,9	483,3	406,3	200	120	8,8
			z-z	1795,0	1795	1728	1601	1465	1318	1165	1014	874,2	752,0	648,2	489,3	379,0	300,9	244,2	201,9			
200	120	10	y-y	2008,0	2008	2008	1928	1832	1732	1627	1516	1401	1284	1169	956,6	780,1	640,4	531,5	446,4	200	120	10
			z-z	2008,0	2008	1929	1785	1631	1464	1290	1120	963,6	827,4	712,3	536,7	415,2	329,5	267,2	220,9			
200	120	12,5	y-y	2380,0	2380	2380	2273	2154	2031	1901	1763	1621	1477	1338	1085	879,1	718,6	594,6	498,5	200	120	12,5
			z-z	2380,0	2380	2275	2098	1907	1700	1487	1281	1095	935,5	802,4	601,8	464,3	367,7	297,9	246,0			
220	120	5	y-y	1038,0	1038	1038	1021	979,6	938,0	894,8	849,7	802,5	753,5	703,2	603,2	510,6	430,5	364,1	309,9	220	120	5
			z-z	1038,0	1038	1013	946,8	877,5	803,2	724,3	643,8	566,0	494,6	431,6	331,2	259,0	206,9	168,6	139,8			
220	120	6	y-y	1364,0	1364	1364	1332	1275	1217	1156	1092	1025	955,4	885,1	748,1	625,3	522,4	438,8	371,7	220	120	6
			z-z	1364,0	1364	1321	1228	1130	1025	913,1	801,6	696,6	603,0	522,2	396,6	308,3	245,4	199,4	165,1			
220	120	7,1	y-y	1581,0	1581	1581	1541	1474	1405	1334	1258	1179	1098	1015	855,5	713,2	594,6	498,8	422,2	220	120	7,1
			z-z	1581,0	1581	1528	1419	1304	1179	1048	917,8	795,8	687,4	594,5	450,7	349,9	278,3	226,0	187,0			
220	120	8	y-y	1762,0	1762	1762	1716	1641	1564	1483	1398	1310	1218	1125	946,2	787,7	656,0	549,9	465,1	220	120	8
			z-z	1762,0	1762	1701	1579	1449	1308	1161	1014	878,1	757,6	654,5	495,5	384,4	305,5	248,1	205,2			
220	120	8,8	y-y	1920,0	1920	1920	1868	1786	1701	1612	1519	1422	1321	1219	1024	851,0	708,0	593,0	501,4	220	120	8,8
			z-z	1920,0	1920	1851	1717	1574	1419	1257	1097	947,9	816,8	705,0	533,1	413,3	328,3	266,5	220,4			
220	120	10	y-y	2150,0	2150	2150	2089	1996	1900	1799	1694	1583	1469	1354	1134	940,6	781,4	653,8	552,4	220	120	10
			z-z	2150,0	2150	2069	1917	1754	1579	1395	1214	1047	900,2	775,9	585,7	453,6	360,1	292,2	241,6			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)												h	b	t
				L_{cr} (m)														
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
250	100	5	y-y	992,7	992,7	992,7	992,7	990,0	955,4	920,7	885,1	848,3	810,0	770,1	728,8	643,8	560,2	483,1	415,5	358,1	250	100	5
			z-z	992,7	992,7	952,2	880,1	802,7	719,0	632,0	547,1	469,8	402,7	346,2	260,5	201,3	159,6	129,4	106,9				
250	100	6	y-y	1289	1289	1289	1279	1231	1184	1135	1084	1030	974,8	917,6	801,2	689,2	588,7	502,6	430,8	250	100	6	
			z-z	1289	1289	1226	1126	1019	902,1	782,7	669,4	569,0	484,1	413,8	309,1	237,9	188,1	152,2	125,6				
250	100	8	y-y	1819	1819	1819	1791	1720	1647	1573	1494	1413	1328	1240	1066	904,3	763,7	646,5	550,8	250	100	8	
			z-z	1819	1819	1711	1559	1392	1214	1036	872,8	733,3	618,6	525,6	389,5	298,4	235,3	190,0	156,5				
250	100	10	y-y	2221	2221	2221	2182	2094	2004	1910	1813	1711	1605	1496	1281	1082	911,2	769,8	654,9	250	100	10	
			z-z	2221	2221	2081	1890	1681	1457	1236	1036	867,5	729,8	619,0	457,5	350,0	275,7	222,6	183,3				
250	150	5	y-y	1170	1170	1170	1170	1134	1095	1055	1014	971,4	927,2	881,4	786,4	691,2	601,3	520,9	451,5	250	150	5	
			z-z	1170	1170	1117	1058	997,1	932,5	864,5	794,0	723,1	654,2	529,9	429,0	350,5	289,9	242,9					
250	150	6	y-y	1502	1502	1502	1499	1446	1394	1340	1285	1227	1167	1105	976,4	850,0	733,4	631,0	544,1	250	150	6	
			z-z	1502	1502	1500	1423	1344	1261	1173	1081	985,5	890,9	800,5	641,2	515,2	418,7	345,2	288,6				
250	150	7,1	y-y	1883	1883	1883	1869	1801	1731	1660	1586	1509	1429	1346	1177	1014	866,9	740,8	635,4	250	150	7,1	
			z-z	1883	1883	1872	1770	1665	1555	1437	1314	1189	1066	951,1	753,2	600,7	486,0	399,3	333,1				
250	150	8	y-y	2103	2103	2103	2086	2009	1931	1851	1768	1681	1591	1497	1307	1125	960,8	820,4	703,3	250	150	8	
			z-z	2103	2103	2088	1974	1856	1732	1599	1461	1320	1182	1053	833,0	663,7	536,5	440,7	367,5				
250	150	8,8	y-y	2295	2295	2295	2275	2190	2105	2017	1925	1830	1731	1628	1420	1220	1041	888,4	761,2	250	150	8,8	
			z-z	2295	2295	2277	2151	2022	1885	1740	1587	1432	1282	1141	901,0	717,2	579,5	475,8	396,6				
250	150	10	y-y	2576	2576	2576	2551	2455	2359	2259	2155	2047	1934	1818	1583	1358	1157	985,8	843,9	250	150	10	
			z-z	2576	2576	2554	2411	2264	2109	1943	1770	1595	1425	1267	998,0	793,4	640,4	525,5	437,9				
250	150	12,5	y-y	3090	3090	3090	3051	2933	2814	2690	2562	2427	2288	2144	1854	1581	1341	1139	972,7	250	150	12,5	
			z-z	3090	3090	3054	2879	2697	2505	2299	2085	1870	1663	1473	1154	914,3	736,4	603,3	502,2				
260	140	6	y-y	1473	1473	1473	1473	1425	1375	1325	1272	1218	1162	1104	982,8	862,1	748,7	647,6	560,7	260	140	6	
			z-z	1473	1473	1463	1383	1301	1214	1122	1026	927,4	831,4	741,3	586,8	467,8	378,3	310,8	259,2				
260	140	7,1	y-y	1883	1883	1883	1874	1807	1740	1671	1599	1524	1446	1366	1201	1040	893,6	766,3	659,0	260	140	7,1	
			z-z	1883	1883	1859	1750	1638	1519	1392	1259	1127	1000	884,2	690,9	546,4	439,6	359,9	299,5				
260	140	8	y-y	2103	2103	2103	2091	2016	1940	1863	1782	1698	1610	1520	1335	1154	990,5	848,6	729,3	260	140	8	
			z-z	2103	2103	2074	1952	1826	1691	1548	1398	1250	1108	978,4	763,4	603,1	484,9	396,9	330,1				
260	140	8,8	y-y	2295	2295	2295	2281	2198	2115	2030	1941	1849	1752	1653	1450	1253	1074	919,1	789,4	260	140	8,8	
			z-z	2295	2295	2261	2127	1988	1840	1682	1518	1355	1200	1059	825,0	651,3	523,4	428,2	356,0				
260	140	10	y-y	2576	2576	2576	2558	2465	2370	2273	2173	2068	1959	1846	1616	1394	1193	1020	875,3	260	140	10	
			z-z	2576	2576	2535	2383	2226	2057	1878	1692	1507	1332	1174	912,7	719,5	577,8	472,4	392,7				
260	140	12,5	y-y	3090	3090	3090	3059	2944	2828	2708	2583	2453	2317	2177	1894	1624	1383	1178	1008	260	140	12,5	
			z-z	3090	3090	3031	2844	2649	2439	2217	1987	1761	1550	1361	1053	827,1	662,8	541,2	449,4				

Taulukko 11.2.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



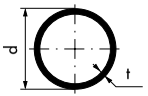
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
260	180	6	y-y	1643	1643	1643	1643	1597	1543	1489	1433	1375	1315	1252	1122	991,2	866,2	753,1	654,5	260	180	6
			z-z	1643	1643	1643	1598	1527	1454	1378	1297	1213	1127	1040	871,7	724,1	602,0	504,0	426,0			
260	180	7,1	y-y	2085	2085	2085	2083	2012	1940	1867	1791	1713	1631	1546	1371	1198	1036	893,6	771,8	260	180	7,1
			z-z	2085	2085	2085	2013	1918	1820	1716	1607	1494	1377	1261	1043	857,6	707,8	589,6	496,5			
260	180	8	y-y	2330	2330	2330	2327	2247	2166	2084	1999	1910	1818	1723	1526	1331	1151	991,7	856,0	260	180	8
			z-z	2330	2330	2330	2248	2141	2031	1914	1791	1663	1532	1402	1158	950,8	784,1	652,8	549,5			
260	180	8,8	y-y	2545	2545	2545	2540	2452	2363	2273	2180	2082	1981	1876	1660	1447	1250	1076	928,3	260	180	8,8
			z-z	2545	2545	2545	2454	2336	2214	2086	1951	1810	1666	1524	1257	1031	849,4	706,8	594,8			
260	180	10	y-y	2860	2860	2860	2852	2753	2653	2550	2444	2334	2219	2100	1855	1615	1392	1198	1032	260	180	10
			z-z	2860	2860	2860	2754	2621	2483	2337	2184	2024	1861	1700	1399	1146	943,0	784,1	659,5			
300	100	5	y-y	1024	1024	1024	1024	1013	984,5	955,7	926,4	896,3	865,4	833,4	766,3	696,2	625,6	557,5	494,5	300	100	5
			z-z	1024	1024	991,9	923,0	849,9	771,2	688,1	604,7	526,1	455,8	395,0	300,3	233,6	185,9	151,2	125,1			
300	100	6	y-y	1344	1344	1344	1344	1322	1282	1242	1201	1158	1115	1070	974,9	876,9	779,9	688,6	605,9	300	100	6
			z-z	1344	1344	1291	1195	1091	979,4	862,8	748,5	643,9	552,8	475,8	358,4	277,3	220,0	178,4	147,5			
300	100	7,1	y-y	1704	1704	1704	1704	1664	1611	1557	1501	1444	1384	1323	1194	1062	935,0	817,9	714,3	300	100	7,1
			z-z	1704	1704	1623	1492	1351	1199	1042	893,2	760,4	647,7	554,2	414,3	319,1	252,4	204,3	168,6			
300	100	8	y-y	2017	2017	2017	2017	2038	1968	1897	1824	1748	1669	1587	1417	1246	1085	940,2	815,2	300	100	8
			z-z	2017	2017	1909	1747	1571	1382	1190	1011	855,1	724,6	617,7	459,6	353,0	278,7	225,4	185,8			
300	100	8,8	y-y	2295	2295	2295	2295	2222	2146	2067	1987	1903	1816	1726	1539	1352	1176	1018	882,1	300	100	8,8
			z-z	2295	2295	2161	1971	1763	1540	1316	1111	934,5	789,0	670,8	497,4	381,3	300,7	242,9	200,2			
300	100	10	y-y	2576	2576	2576	2576	2492	2405	2316	2225	2129	2031	1928	1716	1505	1306	1129	977,5	300	100	10
			z-z	2576	2576	2421	2203	1966	1711	1458	1227	1030	868,1	737,3	545,9	418,1	329,6	266,1	219,2			
300	100	12,5	y-y	3090	3090	3090	3083	2976	2868	2758	2643	2525	2401	2273	2010	1750	1510	1300	1121	300	100	12,5
			z-z	3090	3090	2886	2615	2318	2000	1690	1412	1179	989,8	838,3	618,6	472,8	372,2	300,3	247,2			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)															h	b	t
mm	mm	mm		L_{cr} (m)															mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
300	150	6	y-y	1557	1557	1557	1557	1557	1540	1496	1451	1406	1360	1312	1263	1160	1052	943,9	839,9	744,0	300	150	6
			z-z	1557	1557	1557	1490	1414	1334	1250	1162	1070	977,2	886,4	721,3	585,8	479,5	397,2	333,2				
300	150	7,1	y-y	1956	1956	1956	1956	1923	1865	1807	1747	1686	1622	1556	1418	1276	1135	1002	881,3	300	150	7,1	
			z-z	1956	1956	1956	1858	1757	1651	1539	1421	1299	1178	1061	852,9	687,1	559,4	461,7	386,3				
300	150	8	y-y	2301	2301	2301	2301	2333	2258	2183	2106	2026	1943	1858	1679	1495	1318	1154	1008	300	150	8	
			z-z	2301	2301	2301	2294	2173	2050	1921	1783	1639	1490	1344	1204	961,0	770,2	625,0	514,7	429,9			
300	150	10	y-y	2931	2931	2931	2931	2931	2860	2767	2674	2577	2478	2375	2268	2045	1817	1597	1396	1218	300	150	10
			z-z	2931	2931	2931	2912	2753	2590	2418	2235	2043	1847	1656	1477	1169	932,4	754,1	619,6	516,8			
300	150	12,5	y-y	3534	3534	3534	3534	3534	3437	3323	3207	3088	2964	2836	2703	2426	2146	1878	1634	1422	300	150	12,5
			z-z	3534	3534	3534	3502	3306	3104	2890	2662	2424	2183	1949	1732	1364	1084	874,7	717,7	598,0			
300	200	6	y-y	1770	1770	1770	1770	1757	1708	1660	1610	1560	1508	1454	1342	1224	1104	988,2	879,6	300	200	6	
			z-z	1770	1770	1770	1752	1686	1619	1550	1479	1404	1326	1245	1083	927,6	789,7	672,5	575,4				
300	200	7,1	y-y	2208	2208	2208	2208	2181	2118	2055	1990	1924	1856	1785	1637	1483	1328	1180	1044	300	200	7,1	
			z-z	2208	2208	2208	2175	2089	2002	1912	1817	1719	1616	1511	1301	1104	933,3	790,6	673,8				
300	200	8	y-y	2585	2585	2585	2585	2624	2545	2465	2383	2298	2211	2120	1931	1735	1542	1360	1195	300	200	8	
			z-z	2585	2585	2585	2537	2434	2328	2219	2105	1985	1861	1734	1482	1250	1052	887,9	754,9				
300	200	8,8	y-y	2920	2920	2920	2920	2867	2780	2692	2602	2509	2413	2313	2105	1890	1678	1479	1300	300	200	8,8	
			z-z	2920	2920	2920	2859	2739	2617	2491	2358	2219	2074	1927	1639	1376	1154	971,6	824,6				
300	200	10	y-y	3286	3286	3286	3286	3225	3126	3026	2924	2818	2709	2597	2360	2117	1877	1653	1451	300	200	10	
			z-z	3286	3286	3286	3215	3079	2941	2797	2646	2488	2324	2158	1831	1535	1286	1082	917,6				
300	200	12,5	y-y	3978	3978	3978	3978	3894	3772	3648	3522	3391	3256	3116	2823	2522	2229	1956	1713	300	200	12,5	
			z-z	3978	3978	3978	3882	3715	3543	3365	3178	2982	2779	2573	2173	1815	1515	1272	1077				
400	200	6	y-y	1837	1837	1837	1837	1837	1837	1807	1771	1735	1698	1661	1585	1505	1422	1335	1246	400	200	6	
			z-z	1837	1837	1837	1837	1778	1716	1653	1588	1520	1450	1377	1226	1075	934,0	808,0	699,4				
400	200	7,1	y-y	2321	2321	2321	2321	2321	2318	2271	2223	2175	2126	2077	1975	1868	1756	1640	1522	400	200	7,1	
			z-z	2321	2321	2321	2313	2231	2149	2065	1978	1888	1794	1696	1496	1299	1118	960,9	827,5				
400	200	8	y-y	2749	2749	2749	2749	2749	2736	2678	2620	2561	2501	2440	2315	2183	2045	1902	1758	400	200	8	
			z-z	2749	2749	2749	2730	2630	2529	2426	2319	2207	2090	1970	1724	1487	1272	1088	933,4				
400	200	8,8	y-y	3143	3143	3143	3143	3143	3120	3051	2983	2913	2843	2772	2624	2468	2305	2137	1968	400	200	8,8	
			z-z	3143	3143	3143	3111	2994	2876	2754	2627	2494	2357	2214	1926	1651	1406	1198	1025				
400	200	10	y-y	3749	3749	3749	3749	3749	3707	3623	3538	3453	3366	3277	3092	2898	2695	2487	2279	400	200	10	
			z-z	3749	3749	3749	3696	3552	3405	3253	3095	2929	2757	2580	2226	1893	1603	1359	1159				
400	200	12,5	y-y	4865	4865	4865	4865	4865	4784	4669	4554	4436	4317	4195	3940	3671	3391	3107	2827	400	200	12,5	
			z-z	4865	4865	4865	4769	4572	4371	4162	3943	3714	3476	3234	2755	2319	1947	1641	1394				

Taulukko 11.2.3 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)



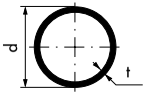
d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	d mm	t mm
26,9	2	55,54	38,84	17,80	9,07	5,40												26,9	2
26,9	2,5	68,03	46,99	21,20	10,76	6,40												26,9	2,5
26,9	2,6	70,46	48,54	21,83	11,07	6,58												26,9	2,6
33,7	2	70,71	56,25	31,86	17,41	10,62	7,10	5,06										33,7	2
33,7	2,5	86,99	68,77	38,46	20,90	12,72	8,50	6,06										33,7	2,5
33,7	2,6	90,18	71,20	39,72	21,56	13,12	8,76	6,25										33,7	2,6
33,7	3	102,7	80,67	44,55	24,09	14,64	9,77	6,97										33,7	3
33,7	3,2	108,9	85,26	46,85	25,28	15,35	10,24	7,30										33,7	3,2
42,4	2	90,11	78,08	53,22	32,40	20,55	13,98	10,08	7,59									42,4	2
42,4	2,5	111,2	96,06	64,97	39,31	24,88	16,91	12,18	9,17									42,4	2,5
42,4	2,6	115,4	99,58	67,25	40,64	25,71	17,47	12,58	9,48									42,4	2,6
42,4	2,9	127,8	110,0	73,93	44,52	28,12	19,10	13,75	10,35									42,4	2,9
42,4	3	131,8	113,4	76,12	45,78	28,90	19,62	14,13	10,64									42,4	3
42,4	3,2	139,9	120,2	80,41	48,25	30,43	20,65	14,87	11,19									42,4	3,2
42,4	4	171,3	146,4	96,65	57,46	36,11	24,47	17,60	13,24									42,4	4
48,3	2	103,3	92,70	68,46	44,89	29,43	20,32	14,76	11,18	8,74								48,3	2
48,3	2,5	127,7	114,3	83,99	54,75	35,79	24,68	17,92	13,56	10,61								48,3	2,5
48,3	2,6	132,5	118,6	87,02	56,66	37,02	25,52	18,52	14,02	10,97								48,3	2,6
48,3	3	151,6	135,4	98,90	64,10	41,79	28,78	20,88	15,80	12,35								48,3	3
48,3	3,2	161,0	143,6	104,7	67,70	44,08	30,34	22,01	16,65	13,02								48,3	3,2
48,3	4	197,6	175,6	126,9	81,30	52,72	36,22	26,24	19,84	15,51								48,3	4
60,3	2	130,0	122,3	99,44	73,91	52,29	37,47	27,75	21,26	16,76	13,54	11,15						60,3	2
60,3	2,5	161,2	151,3	122,7	90,83	64,06	45,82	33,92	25,97	20,47	16,52	13,61						60,3	2,5
60,3	2,9	185,6	174,1	140,9	103,9	73,12	52,23	38,63	29,57	23,30	18,81	15,49						60,3	2,9
60,3	3	191,7	179,8	145,4	107,1	75,33	53,80	39,78	30,44	23,99	19,36	15,95						60,3	3
60,3	3,2	203,8	191,0	154,3	113,5	79,71	56,88	42,05	32,17	25,35	20,46	16,85						60,3	3,2
60,3	4	251,2	234,8	188,8	138,0	96,43	68,64	50,68	38,74	30,50	24,61	20,26						60,3	4
60,3	5	308,4	287,4	229,8	166,5	115,7	82,08	60,50	46,21	36,36	29,32	24,14						60,3	5

d mm	t mm	$N_{b,Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	d mm	t mm
76,1	2	165,3	161,1	139,4	114,7	89,36	67,98	52,09	40,70	32,50	26,47	21,94	15,75					76,1	2
76,1	2,5	205,2	199,9	172,7	141,8	110,2	83,65	64,02	49,99	39,89	32,49	26,93	19,32					76,1	2,5
76,1	2,9	236,7	230,4	198,9	163,0	126,4	95,81	73,26	57,17	45,61	37,13	30,77	22,08					76,1	2,9
76,1	3	244,6	238,0	205,4	168,3	130,4	98,80	75,53	58,93	47,01	38,27	31,72	22,76					76,1	3
76,1	4	321,6	312,4	268,9	219,3	169,0	127,6	97,32	75,84	60,45	49,18	40,74	29,21					76,1	4
76,1	5	396,5	384,4	329,9	267,8	205,3	154,4	117,5	91,47	72,85	59,24	49,05	35,16					76,1	5
76,1	6	469,1	454,0	388,5	313,8	239,3	179,4	136,2	105,9	84,27	68,49	56,69	40,61					76,1	6
76,1	6,3	490,4	474,4	405,6	327,1	249,1	186,5	141,6	110,0	87,51	71,11	58,85	42,15					76,1	6,3
88,9	2	193,8	192,6	171,3	147,7	122,1	97,57	77,23	61,57	49,79	40,91	34,12	24,69	18,65				88,9	2
88,9	2,5	240,9	239,2	212,5	183,1	151,0	120,5	95,23	75,86	61,31	50,36	41,99	30,37	22,94				88,9	2,5
88,9	3	287,4	285,2	253,2	217,8	179,3	142,8	112,7	89,72	72,48	59,51	49,61	35,87	27,09				88,9	3
88,9	3,2	305,9	303,4	269,3	231,5	190,4	151,5	119,6	95,15	76,85	63,08	52,58	38,02	28,71				88,9	3,2
88,9	4	378,7	375,3	332,7	285,3	234,0	185,7	146,2	116,2	93,77	76,93	64,10	46,33	34,97				88,9	4
88,9	5	467,9	463,0	409,7	350,4	286,2	226,3	177,8	141,0	113,7	93,23	77,65	56,08	42,31				88,9	5
88,9	6	554,7	548,3	484,3	412,9	335,9	264,7	207,4	164,3	132,4	108,4	90,28	65,16	49,15				88,9	6
88,9	6,3	580,4	573,4	506,2	431,2	350,4	275,8	216,0	171,0	137,7	112,8	93,89	67,76	51,10				88,9	6,3
101,6	2	222,2	222,2	202,7	180,0	155,0	129,3	105,9	86,33	70,87	58,82	49,41	36,08	27,40	21,48			101,6	2
101,6	2,5	276,3	276,3	251,8	223,5	192,2	160,1	130,9	106,6	87,48	72,57	60,94	44,48	33,78	26,48			101,6	2,5
101,6	3	329,9	329,9	300,3	266,3	228,7	190,2	155,3	126,4	103,7	85,96	72,16	52,65	39,97	31,33			101,6	3
101,6	3,6	393,5	393,5	357,7	316,8	271,7	225,6	183,9	149,5	122,5	101,5	85,21	62,15	47,17	36,97			101,6	3,6
101,6	4	435,4	435,4	395,5	350,0	299,8	248,6	202,5	164,5	134,7	111,6	93,67	68,30	51,83	40,61			101,6	4
101,6	5	538,7	538,7	488,3	431,3	368,4	304,6	247,4	200,7	164,2	135,9	114,0	83,05	62,99	49,35			101,6	5
101,6	6	639,7	639,7	578,6	510,1	434,5	358,1	290,2	235,0	192,0	158,8	133,1	96,93	73,49	57,56			101,6	6
101,6	6,3	669,6	669,6	605,2	533,2	453,8	373,7	302,6	244,9	200,1	165,5	138,7	100,9	76,52	59,92			101,6	6,3
108	2	236,4	236,4	218,4	196,2	171,6	145,8	121,3	100,1	82,87	69,17	58,33	42,81	32,62	25,62	20,64		108	2
108	2,5	294,2	294,2	271,5	243,6	212,9	180,6	150,1	123,8	102,4	85,42	72,02	52,84	40,24	31,61	25,46		108	2,5
108	3	351,3	351,3	324,0	290,5	253,5	214,8	178,3	146,9	121,4	101,3	85,36	62,60	47,67	37,44	30,15		108	3
108	3,6	419,2	419,2	386,1	345,9	301,5	255,1	211,4	174,0	143,7	119,8	100,9	73,97	56,31	44,22	35,61		108	3,6
108	4	464,0	464,0	427,1	382,3	333,0	281,4	232,9	191,6	158,2	131,8	111,0	81,35	61,92	48,61	39,14		108	4
108	5	574,4	574,4	527,7	471,7	409,8	345,4	285,3	234,2	193,1	160,8	135,3	99,10	75,39	59,17	47,64		108	5
108	6	682,5	682,5	626,0	558,6	484,2	407,0	335,3	274,8	226,3	188,3	158,4	115,9	88,12	69,15	55,65		108	6
108	6,3	714,6	714,6	654,9	584,2	506,0	425,0	349,9	286,6	236,0	196,2	165,1	120,7	91,80	72,02	57,97		108	6,3
114,3	2	250,5	250,5	234,0	211,9	187,8	162,1	136,9	114,4	95,48	80,18	67,91	50,11	38,30	30,15	24,32	20,02	114,3	2
114,3	2,5	311,7	311,7	290,9	263,4	233,2	201,0	169,6	141,5	118,1	99,11	83,91	61,89	47,29	37,22	30,02	24,72	114,3	2,5
114,3	3	372,4	372,4	347,3	314,2	277,9	239,3	201,6	168,1	140,2	117,6	99,54	73,38	56,06	44,12	35,58	29,29	114,3	3
114,3	3,6	444,5	444,5	414,1	374,3	330,7	284,4	239,3	199,3	166,1	139,2	117,8	86,80	66,28	52,15	42,06	34,62	114,3	3,6
114,3	4	492,1	492,1	458,1	414,0	365,4	314,0	263,9	219,7	182,9	153,3	129,7	95,52	72,93	57,38	46,27	38,08	114,3	4
114,3	5	609,5	609,5	566,5	511,2	450,5	386,1	323,8	269,0	223,7	187,3	158,4	116,6	88,95	69,95	56,40	46,41	114,3	5
114,3	6	724,7	724,7	672,5	606,1	533,0	455,7	381,4	316,3	262,7	219,7	185,6	136,5	104,1	81,87	65,99	54,29	114,3	6
114,3	6,3	758,8	758,8	703,8	634,0	557,3	476,1	398,2	330,0	274,0	229,2	193,5	142,3	108,5	85,32	68,77	56,57	114,3	6,3

Taulukko 11.2.3 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2) *jatkuu*



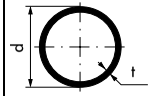
d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	$N_{b.Rd}$ (kN)																d	t
mm	mm	L_{cr} (m)																mm	mm
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10		
127	2	223,7	223,7	214,8	198,7	181,4	162,7	143,3	124,2	106,8	91,68	78,88	59,41	45,95	36,45	29,56	24,43	127	2
127	2,5	347,1	347,1	330,0	303,0	273,8	242,2	210,0	179,4	152,4	129,6	110,7	82,66	63,60	50,28	40,69	33,57	127	2,5
127	3	414,9	414,9	394,1	361,7	326,6	288,7	250,1	213,5	181,2	154,0	131,6	98,15	75,49	59,68	48,28	39,83	127	3
127	4	548,7	548,7	520,6	477,3	430,4	379,9	328,3	279,8	237,2	201,4	171,9	128,1	98,49	77,83	62,95	51,93	127	4
127	5	680,3	680,3	644,6	590,5	531,8	468,5	404,1	343,8	291,0	246,8	210,5	156,8	120,5	95,15	76,95	63,46	127	5
127	6	809,7	809,7	766,2	701,2	630,6	554,5	477,4	405,5	342,8	290,4	247,5	184,1	141,4	111,7	90,28	74,44	127	6
127	6,3	848,1	848,1	802,2	733,9	659,7	579,8	498,9	423,5	357,9	303,1	258,3	192,1	147,5	116,5	94,16	77,63	127	6,3
133	2	232,7	232,7	225,1	209,3	192,4	174,2	155,1	136,0	118,0	102,1	88,33	67,03	52,07	41,43	33,66	27,86	133	2
133	2,5	363,9	363,9	348,4	321,6	292,8	261,7	229,3	198,0	169,7	145,2	124,7	93,63	72,30	57,29	46,43	38,35	133	2,5
133	3	435,0	435,0	416,2	384,0	349,4	312,1	273,3	235,8	201,9	172,6	148,2	111,2	85,87	68,04	55,13	45,53	133	3
133	4	575,5	575,5	550,1	507,1	460,9	411,0	359,3	309,4	264,6	226,0	193,9	145,4	112,2	88,83	71,96	59,42	133	4
133	5	713,8	713,8	681,5	627,7	569,9	507,3	442,7	380,7	325,0	277,4	237,7	178,1	137,3	108,7	88,06	72,70	133	5
133	6	849,8	849,8	810,5	745,9	676,3	601,1	523,7	449,5	383,3	326,8	279,9	209,4	161,4	127,7	103,4	85,38	133	6
133	6,3	890,2	890,2	848,7	780,9	707,8	628,8	547,5	469,7	400,3	341,2	292,2	218,6	168,4	133,3	107,9	89,07	133	6,3
139,7	3	457,4	457,4	440,9	408,9	374,8	338,0	299,4	261,1	225,7	194,5	167,8	126,9	98,37	78,15	63,44	52,47	139,7	3
139,7	4	605,4	605,4	583,0	540,3	494,8	445,6	394,0	343,2	296,2	254,9	219,8	166,0	128,6	102,2	82,91	68,55	139,7	4
139,7	5	751,1	751,1	722,6	669,3	612,2	550,6	486,1	422,7	364,3	313,3	269,9	203,7	157,7	125,2	101,6	83,96	139,7	5
139,7	6	894,7	894,7	859,8	795,7	727,2	653,1	575,7	499,8	430,2	369,5	318,2	239,8	185,5	147,2	119,4	98,71	139,7	6
139,7	6,3	937,3	937,3	900,5	833,2	761,2	683,3	602,1	522,5	449,6	386,0	332,3	250,3	193,7	153,7	124,6	103,0	139,7	6,3
139,7	8	1175	1175	1127	1041	949,7	850,5	747,4	646,9	555,3	475,9	409,1	307,7	237,8	188,6	152,9	126,3	139,7	8
139,7	10	1446	1446	1384	1277	1162	1038	909,2	784,4	671,6	574,5	493,1	370,2	285,8	226,4	183,5	151,5	139,7	10
152,4	3	499,9	499,9	487,7	456,0	422,7	386,8	348,8	310,0	272,5	238,2	207,8	159,5	124,7	99,62	81,18	67,31	152,4	3
152,4	4	662,0	662,0	645,4	603,1	558,6	510,7	459,9	408,3	358,5	312,9	272,8	209,1	163,4	130,5	106,3	88,11	152,4	4
152,4	5	822,0	822,0	800,6	747,7	692,0	632,1	568,5	504,0	441,9	385,3	335,7	257,0	200,7	160,2	130,4	108,1	152,4	5
152,4	6	979,6	979,6	953,4	889,9	822,9	750,9	674,6	597,2	523,0	455,5	396,5	303,2	236,6	188,8	153,7	127,3	152,4	6
152,4	6,3	1027	1027	998,8	932,1	861,7	786,1	705,9	624,6	546,8	476,2	414,3	316,7	247,1	197,1	160,5	133,0	152,4	6,3
159	3	521,9	521,9	512,1	480,4	447,4	412,1	374,5	335,7	297,5	261,9	229,9	177,8	139,7	112,0	91,43	75,93	159	3
159	4	691,5	691,5	677,8	635,6	591,5	544,4	494,1	442,4	391,7	344,4	302,0	233,3	183,2	146,8	119,8	99,47	159	4
159	5	858,8	858,8	841,2	788,4	733,2	674,1	611,3	546,6	483,4	424,6	372,0	287,1	225,3	180,3	147,2	122,2	159	5
159	6	1024	1024	1002	938,7	872,5	801,4	725,9	648,3	572,6	502,4	439,8	339,0	265,8	212,7	173,5	144,0	159	6
159	6,3	1073	1073	1050	983,4	913,7	839,1	759,8	678,3	598,9	525,3	459,8	354,2	277,7	222,2	181,3	150,4	159	6,3

d mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	d mm	t mm
168,3	3	553,1	553,1	546,3	514,8	482,1	447,4	410,4	371,9	333,2	296,2	262,1	205,2	162,4	130,8	107,1	89,14	168,3	3
168,3	3,2	589,2	589,2	582,0	548,3	513,5	476,4	437,0	395,9	354,6	315,2	278,9	218,2	172,7	139,0	113,9	94,77	168,3	3,2
168,3	4	733,0	733,0	723,5	681,5	637,9	591,5	542,1	490,7	439,2	390,0	344,9	269,6	213,2	171,6	140,5	116,9	168,3	4
168,3	4,5	822,1	822,1	811,2	763,9	714,8	662,6	607,0	549,2	491,3	436,0	385,4	301,1	238,1	191,5	156,8	130,4	168,3	4,5
168,3	5	910,6	910,6	898,3	845,7	791,2	733,1	671,3	607,0	542,7	481,4	425,3	332,1	262,5	211,1	172,8	143,7	168,3	5
168,3	6	1086	1086	1071	1007	942,0	872,2	797,9	720,7	643,7	570,4	503,5	392,6	310,1	249,3	204,0	169,6	168,3	6
168,3	6,3	1138	1138	1122	1056	986,8	913,5	835,4	754,3	673,5	596,6	526,5	410,4	324,1	260,5	213,1	177,2	168,3	6,3
168,3	8	1430	1430	1408	1324	1236	1143	1044	940,5	838,2	741,3	653,2	508,1	400,7	321,8	263,2	218,8	168,3	8
168,3	10	1765	1765	1735	1630	1521	1404	1279	1150	1023	902,8	794,3	616,4	485,3	389,4	318,2	264,4	168,3	10
193,7	4	846,3	846,3	846,3	806,4	763,8	719,2	672,0	622,3	570,8	519,2	469,1	379,2	306,6	250,2	206,8	173,2	193,7	4
193,7	5	1052	1052	1052	1002	948,5	892,8	833,7	771,4	707,1	642,6	580,1	468,3	378,3	308,6	255,0	213,5	193,7	5
193,7	6	1256	1256	1256	1195	1131	1064	992,9	918,1	840,8	763,5	688,7	555,3	448,2	365,3	301,8	252,6	193,7	6
193,7	6,3	1317	1317	1317	1252	1185	1115	1040	961,6	880,4	799,2	720,9	581,0	468,7	382,0	315,5	264,1	193,7	6,3
193,7	8	1657	1657	1657	1574	1488	1399	1304	1204	1101	997,7	898,7	722,7	582,3	474,1	391,3	327,4	193,7	8
193,7	10	2049	2049	2047	1943	1836	1724	1605	1479	1350	1222	1099	881,6	709,1	576,7	475,6	397,8	193,7	10
193,7	12,5	2526	2526	2521	2390	2257	2116	1967	1810	1649	1489	1336	1069	857,7	696,6	574,0	479,8	193,7	12,5
219,1	4	959,6	959,6	959,6	931,2	889,1	845,6	800,2	752,4	702,4	650,9	599,2	500,3	414,2	343,6	287,2	242,5	219,1	4
219,1	4,5	1077	1077	1077	1045	997,4	948,6	897,4	843,6	787,3	729,4	671,2	560,1	463,5	384,4	321,2	271,1	219,1	4,5
219,1	5	1194	1194	1194	1158	1105	1051	994,0	934,1	871,6	807,2	742,5	619,3	512,2	424,6	354,8	299,4	219,1	5
219,1	6	1426	1426	1426	1382	1319	1254	1185	1113	1038	960,9	883,4	735,9	608,1	503,8	420,7	355,0	219,1	6
219,1	6,3	1495	1495	1495	1449	1382	1314	1242	1167	1088	1007	925,1	770,4	636,5	527,2	440,2	371,3	219,1	6,3
219,1	8	1883	1883	1883	1823	1739	1652	1560	1464	1364	1261	1158	961,9	793,5	656,5	547,8	461,8	219,1	8
219,1	10	2332	2332	2332	2255	2149	2040	1926	1805	1679	1550	1422	1179	970,4	801,9	668,5	563,3	219,1	10
219,1	12,5	2880	2880	2880	2780	2648	2512	2368	2217	2060	1898	1738	1437	1180	973,6	810,8	682,7	219,1	12,5
244,5	6	1596	1596	1596	1569	1506	1442	1376	1306	1234	1158	1081	927,1	784,7	661,6	559,5	476,2	244,5	6
244,5	8	2110	2110	2110	2073	1989	1903	1815	1722	1625	1524	1421	1216	1027	865,0	730,8	621,6	244,5	8
244,5	10	2615	2615	2615	2567	2462	2355	2244	2127	2006	1880	1751	1495	1261	1060	894,8	760,5	244,5	10
244,5	12,5	3234	3234	3234	3170	3039	2905	2766	2620	2468	2310	2148	1830	1540	1293	1090	925,5	244,5	12,5
273	4	951,9	951,9	951,9	951,9	924,3	893,1	861,4	828,7	794,9	759,7	723,3	647,5	571,2	498,5	433,0	376,1	273	4
273	5	1494	1494	1494	1489	1437	1384	1330	1274	1215	1155	1092	962,7	836,1	719,9	618,4	532,6	273	5
273	6	1787	1787	1787	1779	1717	1653	1588	1521	1451	1378	1302	1148	995,9	856,8	735,7	633,3	273	6
273	6,3	1874	1874	1874	1866	1800	1733	1665	1595	1521	1444	1365	1203	1043	897,4	770,4	663,1	273	6,3
273	8	2364	2364	2364	2353	2269	2185	2098	2008	1914	1817	1716	1510	1308	1124	963,8	829,0	273	8
273	10	2933	2933	2933	2917	2812	2706	2598	2485	2368	2246	2120	1862	1610	1382	1184	1017	273	10
273	12,5	3632	3632	3632	3608	3477	3345	3209	3068	2921	2768	2610	2287	1974	1691	1447	1242	273	12,5
323,9	4	1099	1099	1099	1099	1091	1062	1032	1002	970,8	939,0	906,1	837,4	765,2	691,8	620,2	553,0	323,9	4
323,9	5	1422	1422	1422	1422	1409	1370	1331	1290	1249	1207	1163	1072	975,7	878,7	784,8	697,4	323,9	5
323,9	6	2127	2127	2127	2127	2092	2029	1965	1900	1834	1765	1693	1544	1389	1235	1091	959,8	323,9	6
323,9	6,3	2232	2232	2232	2232	2194	2128	2061	1993	1923	1851	1775	1618	1456	1295	1143	1006	323,9	6,3
323,9	8	2818	2818	2818	2818	2769	2685	2601	2514	2425	2333	2237	2038	1831	1627	1435	1262	323,9	8
323,9	10	3501	3501	3501	3501	3437	3332	3226	3118	3007	2891	2772	2521	2263	2008	1770	1555	323,9	10
323,9	12,5	4341	4341	4341	4341	4258	4127	3995	3859	3720	3575	3425	3112	2789	2472	2175	1909	323,9	12,5

Taulukko 11.2.4 Pyöreiden kierresaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S355J2H (f_y = 355 N/mm^2)
(Tekniset toimitusehdot sovittava tilauskohtaisesti)



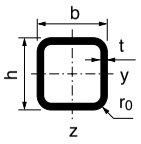
d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	$N_{b.Rd}$ (kN)																	d	t
mm	mm	L_{cr} (m)																	mm	mm
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
406,4	6,3	2250	2250	2250	2181	2081	1978	1870	1757	1638	1516	1394	1275	1161	1056	959,8	872,9	795,1	406,4	6,3
406,4	8	3555	3555	3555	3412	3243	3066	2880	2684	2480	2273	2069	1875	1694	1529	1381	1250	1134	406,4	8
406,4	10	4421	4421	4421	4241	4029	3808	3575	3330	3075	2816	2561	2319	2094	1889	1706	1543	1400	406,4	10
406,4	12,5	5491	5491	5491	5263	4998	4721	4430	4123	3804	3480	3162	2860	2581	2327	2101	1900	1722	406,4	12,5
457	6,3	2487	2487	2487	2450	2353	2255	2154	2048	1937	1822	1704	1585	1467	1354	1246	1146	1054	457	6,3
457	8	4006	4006	4006	3910	3741	3569	3389	3201	3003	2799	2592	2386	2188	2001	1828	1670	1526	457	8
457	10	4985	4985	4985	4863	4652	4436	4212	3975	3728	3473	3214	2958	2711	2478	2262	2065	1887	457	10
457	12	5956	5956	5956	5806	5553	5294	5024	4740	4443	4136	3826	3519	3223	2945	2687	2453	2241	457	12
457	12,5	6197	6197	6197	6040	5777	5507	5226	4930	4621	4301	3977	3657	3350	3060	2792	2548	2328	457	12,5
508	6,3	2716	2716	2716	2716	2617	2523	2426	2327	2223	2115	2003	1889	1773	1658	1545	1437	1335	508	6,3
508	8	3579	3579	3579	3579	3437	3309	3179	3043	2902	2756	2604	2449	2292	2138	1988	1844	1709	508	8
508	10	5554	5554	5554	5489	5279	5067	4847	4619	4380	4131	3876	3617	3360	3109	2871	2646	2438	508	10
508	12,5	6908	6908	6908	6823	6561	6295	6021	5735	5436	5124	4804	4481	4160	3848	3550	3271	3013	508	12,5
559	6,3	2937	2937	2937	2937	2871	2780	2687	2592	2494	2393	2288	2179	2068	1956	1843	1732	1625	559	6,3
559	8	3884	3884	3884	3884	3785	3661	3535	3406	3272	3134	2990	2842	2690	2538	2386	2237	2093	559	8
559	10	6123	6123	6123	6116	5906	5695	5480	5257	5025	4784	4535	4279	4020	3762	3509	3266	3035	559	10
559	12,5	7619	7619	7619	7606	7344	7081	6811	6532	6242	5941	5628	5308	4984	4662	4347	4044	3757	559	12,5
610	8	4181	4181	4181	4181	4122	4001	3880	3756	3628	3496	3360	3219	3074	2927	2778	2629	2481	610	8
610	10	5401	5401	5401	5401	5312	5152	4991	4827	4658	4483	4302	4115	3922	3727	3530	3334	3141	610	10
610	12,5	8330	8330	8330	8330	8127	7865	7598	7325	7043	6750	6446	6132	5812	5488	5166	4848	4541	610	12,5
610	14,2	9436	9436	9436	9436	9203	8905	8602	8292	7970	7637	7292	6936	6571	6204	5837	5477	5129	610	14,2
660	8	4463	4463	4463	4463	4463	4325	4207	4087	3964	3838	3708	3574	3436	3295	3151	3005	2859	660	8
660	10	5781	5781	5781	5781	5742	5585	5428	5269	5105	4938	4765	4586	4402	4213	4022	3828	3635	660	10
660	12,5	9027	9027	9027	9027	8895	8633	8369	8099	7822	7536	7240	6934	6620	6300	5976	5653	5334	660	12,5
660	14,2	10227	10227	10227	10227	10075	9778	9477	9171	8856	8531	8195	7847	7490	7125	6757	6391	6029	660	14,2
711	8	4742	4742	4742	4742	4742	4645	4530	4413	4295	4174	4050	3922	3791	3656	3518	3377	3235	711	8
711	10	6160	6160	6160	6160	6160	6016	5862	5707	5549	5388	5222	5051	4875	4694	4509	4321	4131	711	10
711	12,5	9738	9738	9738	9738	9678	9416	9153	8887	8614	8334	8045	7746	7439	7124	6803	6480	6156	711	12,5
711	14,2	11035	11035	11035	11035	10965	10667	10369	10066	9756	9437	9109	8769	8420	8062	7698	7330	6962	711	14,2

d mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	d mm	t mm
762	8	5013	5013	5013	5013	5013	4956	4843	4729	4615	4498	4379	4257	4131	4003	3871	3736	3598	762	8
762	10	6529	6529	6529	6529	6529	6437	6286	6134	5981	5824	5664	5500	5332	5158	4981	4799	4615	762	10
762	12,5	8434	8434	8434	8434	8434	8294	8095	7894	7691	7484	7272	7054	6830	6600	6364	6123	5878	762	12,5
762	14,2	11843	11843	11843	11843	11843	11557	11259	10958	10652	10339	10017	9685	9344	8993	8634	8270	7902	762	14,2
813	8	5275	5275	5275	5275	5275	5275	5146	5036	4924	4811	4696	4579	4459	4336	4209	4080	3948	813	8
813	10	6890	6890	6890	6890	6890	6848	6699	6551	6401	6249	6094	5936	5774	5608	5437	5263	5085	813	10
813	12,5	8920	8920	8920	8920	8920	8844	8647	8451	8252	8050	7844	7634	7418	7196	6969	6736	6499	813	12,5
813	14,2	12650	12650	12650	12650	12650	12447	12149	11850	11546	11237	10921	10596	10261	9918	9566	9207	8842	813	14,2
813	16	14222	14222	14222	14222	14222	13989	13654	13316	12975	12626	12269	11903	11526	11139	10742	10337	9926	813	16
914	10	7579	7579	7579	7579	7579	7579	7488	7345	7202	7057	6911	6762	6611	6456	6298	6137	5971	914	10
914	12,5	9855	9855	9855	9855	9855	9855	9710	9520	9328	9135	8940	8741	8538	8331	8119	7902	7681	914	12,5
914	14,2	11409	11409	11409	11409	11409	11409	11225	11001	10777	10551	10321	10088	9849	9606	9356	9101	8840	914	14,2
914	16	16024	16024	16024	16024	16024	15974	15639	15303	14965	14623	14276	13920	13557	13184	12802	12411	12012	914	16
1016	10	8241	8241	8241	8241	8241	8241	8241	8109	7970	7832	7692	7551	7408	7263	7115	6965	6811	1016	10
1016	12,5	10763	10763	10763	10763	10763	10763	10763	10558	10372	10186	9999	9809	9617	9422	9222	9019	8812	1016	12,5
1016	14,2	12487	12487	12487	12487	12487	12487	12487	12228	12011	11792	11571	11348	11122	10891	10656	10416	10172	1016	14,2
1016	16	14316	14316	14316	14316	14316	14316	14316	14000	13747	13493	13237	12978	12715	12447	12174	11895	11610	1016	16
1219	10	9461	9461	9461	9461	9461	9461	9461	9461	9388	9259	9130	9000	8870	8739	8606	8472	8337	1219	10
1219	12,5	12469	12469	12469	12469	12469	12469	12469	12469	12331	12156	11980	11804	11627	11449	11268	11085	10900	1219	12,5
1219	14,2	14526	14526	14526	14526	14526	14526	14526	14526	14342	14134	13927	13719	13509	13298	13084	12867	12647	1219	14,2
1219	16	16712	16712	16712	16712	16712	16712	16712	16712	16476	16234	15993	15750	15505	15258	15009	14755	14498	1219	16

Taulukko 11.2.5 Neliön muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

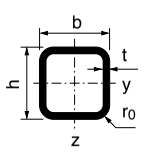
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
25	25	2	72,95	49,67	22,02	11,12	6,61	4,36											25	25	2
25	25	2,5	87,74	58,57	25,37	12,75	7,56	4,98											25	25	2,5
25	25	3	101,1	66,08	27,96	13,97	8,27	5,45											25	25	3
30	30	2	89,75	68,85	36,40	19,36	11,70	7,79	5,54										30	30	2
30	30	2,5	108,7	82,49	42,77	22,59	13,62	9,06	6,45										30	30	2,5
30	30	3	126,3	94,71	48,13	25,25	15,19	10,09	7,18										30	30	3
40	40	2	123,4	106,5	72,03	43,58	27,58	18,74	13,50	10,17	7,93								40	40	2
40	40	2,5	150,7	129,5	86,66	52,01	32,81	22,26	16,03	12,07	9,41								40	40	2,5
40	40	3	176,7	151,1	99,98	59,51	37,42	25,36	18,24	13,73	10,70								40	40	3
40	40	4	224,6	190,0	122,7	71,84	44,89	30,34	21,79	16,38	12,76								40	40	4
50	50	2	157,0	143,7	110,7	76,22	51,28	35,83	26,20	19,91	15,62	12,57							50	50	2
50	50	2,5	192,7	175,9	134,8	92,19	61,78	43,09	31,47	23,91	18,75	15,08							50	50	2,5
50	50	3	227,1	206,8	157,5	107,0	71,40	49,71	36,27	27,54	21,58	17,36							50	50	3
50	50	4	291,8	264,1	198,7	133,0	88,07	61,09	44,49	33,74	26,43	21,24							50	50	4
50	50	5	351,0	315,7	234,3	154,4	101,5	70,15	50,99	38,62	30,23	24,29							50	50	5
60	60	2	190,6	180,6	149,1	113,5	81,81	59,21	44,11	33,90	26,78	21,66	17,86						60	60	2
60	60	2,5	234,7	222,1	182,8	138,4	99,40	71,79	53,41	41,01	32,39	26,19	21,59						60	60	2,5
60	60	3	277,5	262,2	215,1	162,1	115,9	83,51	62,05	47,62	37,59	30,38	25,04						60	60	3
60	60	4	359,0	337,9	275,4	205,3	145,6	104,5	77,43	59,34	46,79	37,80	31,14						60	60	4
60	60	5	435,0	407,9	330,0	243,3	171,1	122,2	90,37	69,16	54,49	43,99	36,23						60	60	5
70	70	2,5	276,7	268,3	230,2	186,8	143,1	107,6	81,92	63,75	50,76	41,28	34,18	24,50					70	70	2,5
70	70	3	327,9	317,6	271,9	219,9	167,9	126,0	95,73	74,43	59,24	48,15	39,86	28,56					70	70	3
70	70	4	426,2	411,7	351,1	282,0	213,8	159,6	120,9	93,85	74,62	60,61	50,14	35,90					70	70	4
70	70	5	519,0	500,0	424,6	338,5	254,7	189,2	142,9	110,8	87,97	71,40	59,04	42,24					70	70	5
80	80	2,5	318,7	314,5	277,1	235,2	190,3	149,2	116,5	92,11	74,09	60,66	50,46	36,39	27,43				80	80	2,5
80	80	3	378,3	373,0	328,2	278,0	224,2	175,4	136,8	108,0	86,83	71,05	59,09	42,60	32,11				80	80	3
80	80	4	493,4	485,5	426,0	359,2	288,1	224,3	174,3	137,4	110,3	90,19	74,97	54,01	40,68				80	80	4
80	80	5	603,0	592,2	518,2	434,8	346,7	268,5	208,0	163,7	131,2	107,2	89,06	64,11	48,27				80	80	5
80	80	6	707,0	692,9	604,5	504,8	399,9	308,2	238,0	186,9	149,7	122,2	101,4	72,96	54,91				80	80	6

90	90	2,5	334,0	334,0	302,3	266,7	227,3	187,6	152,1	123,2	100,7	83,34	69,86	50,88	38,58	30,22									90	90	2,5
90	90	3	428,7	428,4	384,0	335,5	282,2	229,5	184,1	148,0	120,3	99,24	82,99	60,25	45,61	35,68									90	90	3
90	90	4	560,6	559,4	500,5	435,9	365,1	295,7	236,3	189,6	153,9	126,8	106,0	76,87	58,15	45,48									90	90	4
90	90	5	687,0	684,4	611,1	530,6	442,4	356,7	284,1	227,4	184,4	151,8	126,7	91,86	69,46	54,29									90	90	5
90	90	6	807,8	803,6	716,1	619,6	514,2	412,7	327,6	261,7	211,9	174,2	145,4	105,3	79,56	62,17									90	90	6
100	100	2,5	347,7	347,7	324,0	293,0	258,9	222,7	187,5	156,2	130,2	109,2	92,37	68,08	51,99	40,91	32,99								100	100	2,5
100	100	3	479,1	479,1	439,7	392,5	340,5	286,4	236,1	193,6	159,5	132,7	111,7	81,72	62,15	48,77	39,26								100	100	3
100	100	4	627,8	627,8	574,6	511,9	442,6	371,0	304,9	249,4	205,1	170,5	143,3	104,8	79,65	62,48	50,28								100	100	4
100	100	5	771,0	771,0	703,8	625,5	539,1	450,2	368,7	300,9	247,1	205,2	172,4	125,9	95,63	74,99	60,33								100	100	5
100	100	6	908,6	908,6	827,2	733,5	630,0	524,0	427,8	348,3	285,6	236,8	198,8	145,1	110,1	86,33	69,44								100	100	6
100	100	7,1	1035	1035	938,2	828,5	707,4	584,6	474,7	385,0	314,9	260,6	218,5	159,2	120,8	94,60	76,05								100	100	7,1
100	100	8	1144	1144	1034	910,4	774,3	637,2	515,7	417,3	340,7	281,7	236,1	171,8	130,2	102,0	81,97								100	100	8
100	100	10	1368	1368	1227	1073	904,5	737,2	592,0	476,5	387,7	319,9	267,6	194,3	147,1	115,1	92,46								100	100	10
110	110	2,5	358,7	358,7	341,8	314,4	284,9	253,0	220,2	188,8	160,9	137,1	117,3	87,76	67,61	53,50	43,31	35,75							110	110	2,5
110	110	3	484,6	484,6	456,6	416,6	372,9	326,0	279,0	235,6	198,4	167,5	142,5	105,7	81,04	63,93	51,65	42,56							110	110	3
110	110	4	695,0	695,0	648,6	587,2	519,9	448,1	378,0	315,5	263,2	220,9	187,0	138,0	105,4	82,96	66,92	55,09							110	110	4
110	110	5	855,0	855,0	796,2	719,7	635,6	546,2	459,4	382,5	318,6	267,1	225,9	166,4	127,1	99,99	80,63	66,36							110	110	5
110	110	6	1009	1009	938,0	846,4	745,6	638,8	535,7	444,9	369,9	309,7	261,8	192,7	147,0	115,6	93,21	76,70							110	110	6
120	120	3	500,6	500,6	480,8	444,7	406,0	364,3	320,7	278,1	239,2	205,2	176,6	133,0	102,9	81,61	66,18	54,70	120	120	3
120	120	4	762,2	762,2	722,5	662,1	596,5	525,8	453,9	386,4	327,2	277,6	236,9	176,4	135,6	107,1	86,63	71,45	120	120	4
120	120	5	939,0	939,0	888,6	813,2	731,3	643,1	553,8	470,3	397,6	336,9	287,2	213,6	164,1	129,6	104,7	86,36	120	120	5
120	120	5,6	1042	1042	985,4	901,1	809,5	710,8	611,1	518,3	437,7	370,6	315,7	234,7	180,1	142,2	115,0	94,78	120	120	5,6
120	120	6	1110	1110	1049	958,6	860,4	754,8	648,3	549,3	463,5	392,2	334,0	248,2	190,5	150,3	121,5	100,2	120	120	6
120	120	7,1	1274	1274	1200	1094	979,3	855,6	731,7	617,7	519,7	438,9	373,2	276,8	212,2	167,3	135,2	111,4	120	120	7,1
120	120	8	1413	1413	1329	1210	1080	941,5	802,9	676,2	568,0	479,0	406,9	301,4	230,9	182,1	147,0	121,1	120	120	8
120	120	8,8	1532	1532	1438	1308	1166	1013	862,1	724,6	607,7	511,9	434,5	321,5	246,1	194,0	156,6	129,0	120	120	8,8
120	120	10	1704	1704	1595	1448	1286	1114	944,0	790,8	661,6	556,3	471,7	348,5	266,6	209,9	169,4	139,5	120	120	10
140	140	4	844,9	844,9	823,4	769,2	712,1	650,8	585,8	519,6	456,0	397,8	346,7	265,6	207,5	165,6	134,9	111,8	140	140	4
140	140	5	1107	1107	1073	999,2	920,8	836,3	747,1	657,4	572,6	496,5	430,6	327,7	255,0	203,1	165,1	136,7	140	140	5
140	140	5,6	1231	1231	1192	1109	1022	927,1	827,2	727,1	632,7	548,1	475,1	361,2	280,9	223,7	181,8	150,5	140	140	5,6
140	140	6	1312	1312	1270	1182	1088	986,4	879,6	772,6	671,8	581,7	503,9	382,9	297,7	237,0	192,6	159,4	140	140	6
140	140	7,1	1513	1513	1462	1358	1248	1129	1004	878,8	762,0	658,4	569,4	431,7	335,2	266,6	216,6	179,2	140	140	7,1
140	140	8	1682	1682	1623	1507	1383	1249	1108	968,6	838,5	723,4	625,0	473,2	367,1	291,8	237,0	196,0	140	140	8
140	140	8,8	1828	1828	1762	1635	1498	1351	1197	1044	902,7	777,9	671,4	507,7	393,6	312,7	253,9	210,0	140	140	8,8
140	140	10	2040	2040	1963	1819	1664	1497	1323	1151	992,5	853,6	735,8	555,3	430,1	341,4	277,1	229,1	140	140	10

h	b	t	$N_{b,Rd}$ (kN)														h	b	t
			L_{cr} (m)																
mm	mm	mm	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm

Taulukko 11.2.5 Neliön muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

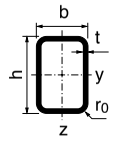
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
150	150	4	869,1	869,1	856,8	806,3	753,9	698,1	638,7	576,9	515,3	456,6	403,1	314,4	248,3	199,6	163,3	135,8	150	150	4
150	150	5	1191	1191	1166	1092	1015	932,0	844,1	753,8	665,7	584,1	511,3	394,0	309,0	247,2	201,7	167,4	150	150	5
150	150	6	1413	1413	1381	1293	1200	1101	995,9	887,9	783,0	686,0	599,8	461,5	361,6	289,1	235,8	195,6	150	150	6
150	150	7,1	1632	1632	1593	1489	1381	1264	1141	1014	892,2	780,0	680,8	522,6	408,8	326,7	266,2	220,8	150	150	7,1
150	150	8	1816	1816	1771	1655	1533	1402	1263	1121	984,3	859,3	749,3	574,3	448,9	358,4	292,0	242,1	150	150	8
150	150	8,8	1976	1976	1925	1797	1663	1519	1367	1211	1062	926,2	806,8	617,6	482,3	385,0	313,5	259,9	150	150	8,8
150	150	10	2208	2208	2147	2003	1852	1688	1515	1340	1172	1020	887,5	678,0	528,8	421,8	343,3	284,5	150	150	10
150	150	12,5	2606	2606	2522	2346	2158	1956	1743	1530	1330	1151	996,8	757,0	588,4	468,3	380,6	315,0	150	150	12,5
160	160	4	890,0	890,0	886,1	838,9	790,5	739,5	685,3	628,4	570,2	513,0	458,8	364,9	291,8	236,5	194,5	162,4	160	160	4
160	160	5	1275	1275	1258	1184	1108	1027	940,8	850,9	761,0	675,3	596,7	466,1	368,5	296,4	242,6	201,8	160	160	5
160	160	6	1513	1513	1492	1404	1313	1215	1112	1004	896,9	794,8	701,6	547,1	432,1	347,3	284,2	236,4	160	160	6
160	160	7,1	1751	1751	1724	1621	1514	1399	1278	1151	1026	907,3	799,5	621,9	490,4	393,8	322,0	267,7	160	160	7,1
160	160	8	1951	1951	1918	1803	1682	1554	1417	1275	1134	1002	881,8	684,9	539,5	433,0	354,0	294,2	160	160	8
160	160	8,8	2124	2124	2087	1960	1828	1686	1536	1380	1227	1082	951,6	738,0	580,9	466,0	380,7	316,3	160	160	8,8
160	160	10	2376	2376	2332	2188	2038	1878	1707	1531	1358	1196	1050	812,6	638,8	512,0	418,1	347,3	160	160	10
160	160	12,5	2816	2816	2752	2576	2391	2193	1983	1767	1557	1364	1192	917,2	718,4	574,4	468,4	388,5	160	160	12,5
180	180	5	1336	1336	1336	1276	1209	1140	1067	989,4	909,3	828,7	750,2	608,4	492,9	402,9	333,4	279,4	180	180	5
180	180	6	1715	1715	1714	1626	1536	1442	1342	1237	1129	1021	918,2	736,2	592,0	481,4	397,0	332,0	180	180	6
180	180	7,1	1990	1990	1986	1883	1778	1667	1549	1426	1299	1173	1053	842,2	676,0	549,1	452,5	378,2	180	180	7,1
180	180	8	2219	2219	2214	2098	1980	1855	1723	1584	1441	1300	1166	930,9	746,4	605,9	499,0	417,0	180	180	8
180	180	8,8	2419	2419	2412	2285	2155	2018	1873	1720	1563	1409	1262	1007	806,3	654,1	538,5	449,8	180	180	8,8
180	180	10	2712	2712	2700	2557	2410	2255	2090	1917	1739	1565	1400	1114	891,1	722,2	594,2	496,1	180	180	10
180	180	12,5	3236	3236	3213	3036	2855	2663	2459	2246	2028	1817	1619	1280	1019	823,9	676,6	564,2	180	180	12,5
200	200	5	1391	1391	1391	1355	1296	1235	1172	1105	1036	963,7	890,9	750,0	624,9	520,7	436,7	369,5	200	200	5
200	200	6	1917	1917	1917	1847	1759	1667	1570	1468	1362	1253	1146	944,5	774,4	638,0	530,8	446,7	200	200	6
200	200	7,1	2228	2228	2228	2145	2041	1933	1819	1699	1574	1446	1320	1086	888,7	731,3	607,9	511,2	200	200	7,1
200	200	8	2488	2488	2488	2393	2276	2154	2026	1891	1751	1608	1466	1204	984,1	809,2	672,3	565,1	200	200	8
200	200	8,8	2715	2715	2715	2609	2481	2347	2206	2058	1904	1746	1591	1305	1066	875,7	727,2	611,1	200	200	8,8
200	200	10	3048	3048	3048	2925	2780	2628	2469	2300	2125	1947	1772	1450	1183	970,7	805,5	676,6	200	200	10
200	200	12,5	3656	3656	3656	3496	3317	3130	2932	2724	2508	2289	2076	1688	1371	1122	929,0	779,2	200	200	12,5

220	220	6	1938	1938	1938	1904	1827	1748	1666	1581	1492	1399	1304	1116	942,5	793,4	670,2	570,0	220	220	6
220	220	7,1	2467	2467	2467	2407	2303	2197	2086	1970	1848	1722	1594	1345	1124	937,8	787,3	666,7	220	220	7,1
220	220	8	2757	2757	2757	2688	2572	2452	2327	2196	2059	1917	1774	1495	1247	1040	872,7	738,7	220	220	8
220	220	8,8	3011	3011	3011	2934	2806	2674	2537	2393	2243	2087	1929	1624	1353	1128	945,8	800,3	220	220	8,8
220	220	10	3384	3384	3384	3294	3149	3000	2845	2681	2510	2334	2155	1811	1507	1254	1051	888,8	220	220	10
220	220	12,5	4076	4076	4076	3957	3778	3594	3402	3199	2987	2769	2550	2131	1765	1465	1224	1034	220	220	12,5
250	250	6	2030	2030	2030	2030	1966	1898	1828	1757	1682	1605	1525	1359	1193	1037	897,6	777,4	250	250	6
250	250	7,1	2651	2651	2651	2637	2543	2448	2350	2249	2144	2034	1921	1688	1462	1255	1076	925,4	250	250	7,1
250	250	8	3160	3160	3160	3131	3015	2897	2776	2649	2518	2380	2239	1951	1676	1430	1219	1044	250	250	8
250	250	8,8	3454	3454	3454	3421	3293	3164	3030	2892	2747	2596	2441	2125	1824	1554	1325	1134	250	250	8,8
250	250	10	3888	3888	3888	3848	3703	3556	3405	3247	3083	2912	2735	2378	2038	1735	1478	1264	250	250	10
250	250	12,5	4706	4706	4706	4648	4469	4288	4101	3906	3702	3490	3271	2832	2417	2051	1742	1488	250	250	12,5
260	260	6	2056	2056	2056	2056	2005	1940	1874	1806	1736	1663	1588	1430	1270	1115	973,9	849,3	260	260	6
260	260	7,1	2694	2694	2694	2694	2605	2513	2420	2324	2224	2120	2013	1790	1568	1360	1175	1017	260	260	7,1
260	260	8	3295	3295	3295	3279	3163	3045	2924	2799	2669	2534	2393	2106	1825	1569	1346	1158	260	260	8
260	260	8,8	3602	3602	3602	3584	3456	3326	3194	3057	2914	2765	2611	2295	1987	1707	1463	1258	260	260	8,8
260	260	10	4056	4056	4056	4032	3887	3741	3591	3435	3273	3103	2929	2571	2223	1907	1634	1404	260	260	10
260	260	12,5	4916	4916	4916	4878	4699	4519	4333	4140	3938	3728	3512	3071	2645	2262	1933	1658	260	260	12,5
300	300	6	2141	2141	2141	2141	2137	2081	2026	1970	1913	1854	1794	1667	1534	1398	1263	1133	300	300	6
300	300	7,1	2838	2838	2838	2838	2812	2733	2654	2574	2492	2407	2320	2136	1945	1751	1563	1389	300	300	7,1
300	300	8	3453	3453	3453	3453	3404	3304	3203	3100	2994	2885	2772	2536	2290	2044	1811	1599	300	300	8
300	300	8,8	4193	4193	4193	4193	4106	3977	3847	3714	3576	3434	3286	2977	2660	2351	2063	1807	300	300	8,8
300	300	10	4728	4728	4728	4728	4626	4480	4332	4181	4025	3863	3696	3346	2986	2636	2312	2023	300	300	10
300	300	12,5	5756	5756	5756	5756	5621	5441	5258	5071	4877	4677	4469	4035	3591	3161	2765	2415	300	300	12,5

h	b	t	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
			L_{cr} (m)																		
mm	mm	mm	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

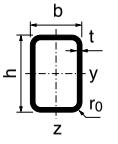
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
40	20	2	y-y	89,75	74,80	46,71	26,79	16,62	11,19	8,02	6,03									40	20	2
			z-z	89,75	53,95	21,13	10,39	6,11	4,02	2,84	2,11											
40	20	2,5	y-y	108,7	89,91	55,19	31,35	19,38	13,03	9,33	7,01									40	20	2,5
			z-z	108,7	63,65	24,41	11,96	7,02	4,61	3,25	2,42											
40	20	3	y-y	126,3	103,6	62,41	35,10	21,62	14,52	10,39	7,79									40	20	3
			z-z	126,3	71,87	27,00	13,17	7,73	5,07	3,58	2,66											
40	30	2	y-y	106,6	90,79	59,58	35,27	22,13	14,98	10,77	8,10	6,31								40	30	2
			z-z	106,6	83,35	45,68	24,62	14,95	9,97	7,11	5,32	4,13										
40	30	2,5	y-y	129,7	109,9	71,20	41,78	26,13	17,67	12,69	9,54	7,43								40	30	2,5
			z-z	129,7	100,5	54,15	28,99	17,56	11,70	8,34	6,24	4,84										
40	30	3	y-y	151,5	127,6	81,55	47,43	29,57	19,96	14,33	10,77	8,38								40	30	3
			z-z	151,5	116,3	61,52	32,72	19,78	13,16	9,37	7,01	5,44										
50	30	2	y-y	123,4	111,0	82,45	54,40	35,77	24,73	17,98	13,62	10,66	8,56							50	30	2
			z-z	123,4	97,70	54,85	29,85	18,18	12,15	8,67	6,49	5,04	4,02									
50	30	2,5	y-y	150,7	135,2	99,59	65,14	42,65	29,43	21,37	16,18	12,66	10,17							50	30	2,5
			z-z	150,7	118,4	65,40	35,36	21,49	14,34	10,22	7,65	5,94	4,74									
50	30	3	y-y	176,7	157,9	115,3	74,77	48,74	33,57	24,35	18,43	14,41	11,57							50	30	3
			z-z	176,7	137,6	74,74	40,15	24,34	16,23	11,56	8,65	6,71	5,36									
50	30	4	y-y	224,6	199,0	142,7	90,78	58,68	40,25	29,15	22,02	17,21	13,81							50	30	4
			z-z	224,6	171,5	89,99	47,72	28,82	19,17	13,65	10,20	7,91	6,31									
60	40	2	y-y	157,0	147,3	119,4	88,25	62,19	44,46	32,90	25,19	19,85	16,02	13,20						60	40	2
			z-z	157,0	137,6	96,31	59,94	38,38	26,21	18,94	14,29	11,15	8,95	7,33								
60	40	2,5	y-y	192,7	180,5	145,7	107,0	75,09	53,56	39,58	30,28	23,85	19,25	15,85						60	40	2,5
			z-z	192,7	168,3	116,8	72,14	46,03	31,40	22,67	17,10	13,34	10,70	8,76								
60	40	3	y-y	227,1	212,3	170,6	124,5	86,96	61,88	45,68	34,91	27,49	22,18	18,26						60	40	3
			z-z	227,1	197,6	135,8	83,27	52,97	36,08	26,03	19,62	15,31	12,27	10,05								
60	40	4	y-y	291,8	271,4	216,1	155,7	107,7	76,29	56,17	42,87	33,72	27,19	22,38						60	40	4
			z-z	291,8	251,7	169,7	102,5	64,78	44,01	31,69	23,87	18,61	14,91	12,21								
60	40	5	y-y	351,0	324,8	256,0	181,8	124,6	87,82	64,51	49,17	38,64	31,13	25,61						60	40	5
			z-z	351,0	299,9	198,0	117,7	74,01	50,14	36,06	27,14	21,14	16,93	13,86								

70	50	2	y-y	184,1	183,8	156,3	124,9	94,23	70,11	53,02	41,11	32,66	26,52	21,93	15,70					70	50	2
			z-z	184,1	170,6	134,8	96,00	65,93	46,53	34,20	26,07	20,49	16,51	13,58	9,65							
70	50	2,5	y-y	234,7	226,0	191,8	152,7	114,7	85,13	64,29	49,80	39,55	32,10	26,54	18,98					70	50	2,5
			z-z	234,7	216,3	168,9	118,5	80,59	56,60	41,49	31,59	24,80	19,97	16,42	11,66							
70	50	3	y-y	277,5	266,9	225,9	179,1	134,0	99,18	74,79	57,88	45,94	37,27	30,81	22,03					70	50	3
			z-z	277,5	255,1	198,3	138,2	93,65	65,66	48,09	36,59	28,72	23,12	19,01	13,49							
70	50	4	y-y	359,0	344,2	289,8	227,8	169,0	124,4	93,55	72,28	57,30	46,45	38,38	27,43					70	50	4
			z-z	359,0	328,4	252,8	173,9	116,9	81,67	59,70	45,37	35,59	28,64	23,53	16,69							
70	50	5	y-y	435,0	415,6	348,0	271,0	199,3	146,0	109,4	84,41	66,85	54,15	44,71	31,93					70	50	5
			z-z	435,0	395,9	301,4	204,6	136,5	95,03	69,33	52,63	41,26	33,18	27,25	19,32							
80	40	2	y-y	172,9	169,7	148,4	124,4	98,97	76,56	59,26	46,60	37,35	30,50	25,34	18,23	13,73				80	40	2
			z-z	172,9	154,7	113,4	73,80	48,20	33,22	24,11	18,25	14,27	11,46	9,40	6,66	4,96						
80	40	2,5	y-y	234,7	228,7	197,7	162,6	126,4	96,10	73,59	57,48	45,88	37,37	30,97	22,23	16,71				80	40	2,5
			z-z	234,7	206,8	146,4	92,03	59,17	40,50	29,28	22,11	17,27	13,85	11,35	8,03	5,97						
80	40	3	y-y	277,5	270,0	233,0	190,9	147,9	112,0	85,63	66,82	53,30	43,39	35,95	25,80	19,38				80	40	3
			z-z	277,5	243,6	171,0	106,7	68,41	46,76	33,78	25,50	19,91	15,96	13,08	9,25	6,88						
80	40	4	y-y	359,0	348,3	299,2	243,2	186,8	140,7	107,2	83,44	66,47	54,06	44,77	32,10	24,10				80	40	4
			z-z	359,0	312,7	215,8	132,7	84,52	57,61	41,56	31,34	24,45	19,60	16,06	11,34	8,44						
80	40	5	y-y	435,0	420,7	359,7	290,0	220,7	165,2	125,4	97,42	77,51	62,98	52,12	37,33	28,02				80	40	5
			z-z	435,0	375,8	254,6	154,2	97,65	66,37	47,82	36,02	28,09	22,51	18,44	13,02	9,68						
80	60	2,5	y-y	276,7	271,7	237,7	199,4	158,8	123,0	95,25	74,91	60,06	49,06	40,75	29,33	22,08	17,21			80	60	2,5
			z-z	276,7	263,5	219,3	169,1	123,2	89,78	67,11	51,67	40,88	33,09	27,31	19,49	14,59	11,33					
80	60	3	y-y	327,9	321,7	281,0	235,0	186,6	144,1	111,4	87,56	70,16	57,28	47,57	34,22	25,76	20,07			80	60	3
			z-z	327,9	311,8	258,8	198,6	144,2	104,8	78,27	60,23	47,62	38,54	31,80	22,68	16,98	13,18					
80	60	4	y-y	426,2	417,1	363,2	302,1	238,3	183,0	141,1	110,6	88,52	72,21	59,93	43,08	32,41	25,25			80	60	4
			z-z	426,2	404,0	333,4	253,6	182,7	132,2	98,48	75,67	59,78	48,35	39,87	28,43	21,27	16,51					
80	60	5	y-y	519,0	506,8	439,7	363,6	284,8	217,6	167,1	130,8	104,5	85,20	70,66	50,76	38,17	29,72			80	60	5
			z-z	519,0	490,2	402,2	303,0	216,6	156,1	116,0	89,00	70,25	56,77	46,80	33,35	24,94	19,35					
90	50	2,5	y-y	263,4	261,7	232,8	200,9	166,1	132,8	105,1	83,83	67,81	55,71	46,47	33,63	25,40	19,85	15,92		90	50	2,5
			z-z	263,4	245,2	195,6	141,2	97,89	69,39	51,12	39,03	30,70	24,76	20,38	14,48	10,82	8,38	6,69				
90	50	3	y-y	327,9	324,6	287,3	245,8	200,9	158,9	124,9	99,13	79,93	65,54	54,59	39,43	29,75	23,22	18,62		90	50	3
			z-z	327,9	303,3	238,6	169,1	115,7	81,51	59,85	45,60	35,83	28,87	23,74	16,86	12,59	9,75	7,77				
90	50	4	y-y	426,2	421,1	371,6	316,4	257,0	202,2	158,3	125,3	100,9	82,65	68,79	49,64	37,43	29,21	23,42		90	50	4
			z-z	426,2	392,4	306,0	214,2	145,5	102,1	74,84	56,96	44,72	36,01	29,61	21,02	15,68	12,14	9,68				
90	50	5	y-y	519,0	511,6	450,2	381,4	307,7	240,7	187,7	148,3	119,2	97,53	81,12	58,48	44,08	34,38	27,55		90	50	5
			z-z	519,0	475,6	367,4	253,9	171,2	119,7	87,59	66,59	52,25	42,05	34,56	24,52	18,28	14,16	11,28				

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)														h	b	t
				L_{cr} (m)																
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



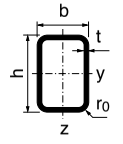
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
100	40	2,5	y-y	249,2	249,2	225,0	198,1	168,3	138,4	112,0	90,56	73,93	61,12	51,20	37,26	28,24	22,11	17,77	14,59	100	40	2,5
			z-z	249,2	223,6	165,0	108,1	70,80	48,87	35,50	26,88	21,03	16,89	13,86	9,81	7,31	5,65	4,50	3,67			
100	40	3	y-y	327,9	326,8	291,8	253,5	211,4	170,5	135,9	108,8	88,22	72,61	60,64	43,96	33,24	25,98	20,86	17,11	100	40	3
			z-z	327,9	289,5	206,0	130,1	83,80	57,40	41,53	31,36	24,50	19,66	16,11	11,39	8,48	6,55	5,22	4,25			
100	40	4	y-y	426,2	423,9	377,6	326,5	270,7	217,1	172,2	137,5	111,3	91,50	76,35	55,28	41,77	32,64	26,19	21,48	100	40	4
			z-z	426,2	373,6	261,5	162,8	104,2	71,17	51,41	38,80	30,28	24,29	19,90	14,07	10,46	8,09	6,44	5,24			
100	40	5	y-y	519,0	515,0	457,5	393,7	324,3	258,5	204,2	162,6	131,4	107,9	89,92	65,04	49,11	38,35	30,77	25,22	100	40	5
			z-z	519,0	451,5	310,6	190,5	121,2	82,57	59,56	44,90	35,03	28,08	23,00	16,25	12,08	9,33	7,43	6,05			
100	50	2,5	y-y	270,2	270,2	245,6	217,4	186,4	154,6	126,0	102,4	83,92	69,55	58,36	42,56	32,30	25,31	20,35	16,72	100	50	2,5
			z-z	270,2	253,1	204,4	150,4	105,5	75,31	55,67	42,59	33,55	27,08	22,30	15,87	11,86	9,19	7,34	5,99			
100	50	3	y-y	353,1	353,1	316,9	277,3	233,8	190,6	153,2	123,3	100,3	82,79	69,26	50,31	38,09	29,80	23,94	19,64	100	50	3
			z-z	353,1	327,3	258,7	184,4	126,7	89,41	65,71	50,10	39,38	31,74	26,11	18,55	13,85	10,73	8,55	6,98			
100	50	4	y-y	459,8	459,0	411,0	358,4	300,6	243,8	195,1	156,7	127,3	104,9	87,67	63,62	48,14	37,65	30,23	24,80	100	50	4
			z-z	459,8	424,3	332,5	234,2	159,7	112,3	82,39	62,75	49,29	39,70	32,64	23,18	17,30	13,40	10,68	8,71			
100	50	5	y-y	561,0	559,0	499,3	433,7	361,8	291,9	232,6	186,3	151,1	124,4	103,9	75,29	56,93	44,50	35,72	29,30	100	50	5
			z-z	561,0	515,4	400,1	278,4	188,5	132,1	96,70	73,56	57,74	46,48	38,21	27,11	20,22	15,66	12,48	10,18			
100	50	6	y-y	656,6	653,1	581,8	503,3	417,5	334,9	265,8	212,3	171,9	141,3	117,9	85,38	64,52	50,42	40,46	33,18	100	50	6
			z-z	656,6	600,4	461,6	317,2	213,1	148,8	108,8	82,66	64,83	52,17	42,86	30,40	22,67	17,55	13,99	11,41			
100	60	2,5	y-y	291,2	291,2	266,0	236,6	204,1	170,6	139,9	114,2	93,83	77,91	65,47	47,83	36,34	28,50	22,93	18,84	100	60	2,5
			z-z	291,2	280,3	237,6	189,0	141,8	105,2	79,38	61,48	48,81	39,61	32,75	23,42	17,57	13,65	10,92	8,92			
100	60	3	y-y	378,3	378,3	341,7	300,8	255,7	210,3	170,1	137,6	112,3	92,89	77,82	56,64	42,93	33,61	27,01	22,18	100	60	3
			z-z	378,3	361,2	302,1	234,7	172,3	126,0	94,40	72,79	57,63	46,67	38,53	27,51	20,61	16,00	12,78	10,45			
100	60	4	y-y	493,4	493,4	444,1	389,7	329,8	270,0	217,6	175,5	143,1	118,2	98,91	71,91	54,47	42,63	34,25	28,11	100	60	4
			z-z	493,4	469,7	390,8	301,1	219,4	159,8	119,4	91,94	72,73	58,87	48,58	34,66	25,95	20,15	16,09	13,15			
100	60	5	y-y	603,0	602,8	540,7	472,9	398,4	324,5	260,5	209,7	170,6	140,7	117,7	85,48	64,71	50,63	40,67	33,37	100	60	5
			z-z	603,0	572,3	473,6	361,7	261,6	189,7	141,4	108,7	85,94	69,52	57,35	40,90	30,61	23,76	18,97	15,50			
100	60	6	y-y	707,0	705,6	631,5	550,5	461,4	374,0	299,1	240,0	195,0	160,6	134,3	97,41	73,70	57,63	46,28	37,96	100	60	6
			z-z	707,0	668,9	550,4	416,6	299,0	215,9	160,6	123,3	97,37	78,72	64,91	46,26	34,61	26,85	21,44	17,51			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
				L_{cr} (m)																		
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
100	80	2,5	y-y	332,1	332,1	305,8	273,8	238,5	201,6	166,9	137,3	113,4	94,46	79,57	58,31	44,38	34,85	28,06	23,07	100	80	2,5
			z-z	332,1	330,3	294,2	254,4	210,9	169,2	134,2	107,1	86,74	71,31	59,50	43,08	32,55	25,44	20,41	16,74			
100	80	3	y-y	428,7	428,7	390,8	347,0	298,5	248,8	203,4	165,8	136,1	112,9	94,81	69,21	52,56	41,21	33,15	27,23	100	80	3
			z-z	428,7	424,1	375,0	320,3	261,1	206,2	161,8	128,3	103,4	84,74	70,56	50,95	38,44	30,00	24,05	19,71			
100	80	4	y-y	560,6	560,6	509,6	451,2	386,8	321,1	261,7	212,7	174,3	144,4	121,2	88,40	67,09	52,58	42,28	34,72	100	80	4
			z-z	560,6	553,6	488,3	415,4	337,0	264,8	207,2	164,0	132,0	108,1	89,94	64,89	48,93	38,17	30,60	25,07			
100	80	5	y-y	687,0	687,0	622,6	549,8	469,5	388,1	315,2	255,6	209,1	173,1	145,1	105,7	80,21	62,83	50,51	41,48	100	80	5
			z-z	687,0	677,2	595,9	504,8	407,3	318,6	248,5	196,2	157,7	129,1	107,4	77,40	58,33	45,50	36,46	29,87			
100	80	6	y-y	807,8	807,8	729,8	642,7	546,7	449,9	364,1	294,6	240,6	198,9	166,7	121,3	91,96	72,01	57,88	47,51	100	80	6
			z-z	807,8	794,9	697,6	588,4	472,1	367,6	285,8	225,3	180,9	147,9	122,9	88,55	66,71	52,01	41,67	34,13			
120	40	2,5	y-y	259,2	259,2	244,2	222,6	199,2	174,0	148,8	125,6	105,7	89,21	75,86	56,26	43,12	34,01	27,47	22,64	120	40	2,5
			z-z	259,2	236,1	180,0	122,3	81,72	56,90	41,53	31,53	24,72	19,88	16,33	11,58	8,63	6,68	5,32	4,34			
120	40	3	y-y	338,7	338,7	315,9	285,8	252,8	217,8	183,5	153,1	127,6	107,1	90,63	66,82	51,05	40,17	32,40	26,67	120	40	3
			z-z	338,7	304,3	225,1	147,9	97,03	67,01	48,70	36,88	28,86	23,18	19,02	13,47	10,03	7,76	6,18	5,04			
120	40	4	y-y	493,4	493,4	453,9	406,1	353,3	298,3	246,7	202,8	167,4	139,4	117,4	86,00	65,44	51,37	41,36	34,00	120	40	4
			z-z	493,4	434,3	307,0	192,7	123,8	84,72	61,25	46,24	36,11	28,97	23,75	16,78	12,49	9,65	7,68	6,26			
120	40	5	y-y	603,0	603,0	552,8	493,1	427,2	358,9	295,6	242,1	199,4	165,8	139,5	102,0	77,58	60,87	48,99	40,26	120	40	5
			z-z	603,0	526,9	366,3	226,6	144,7	98,73	71,28	53,77	41,96	33,64	27,6	19,48	14,49	11,19	8,91	7,26			
120	40	6	y-y	707,0	707,0	645,7	574,2	495,3	413,9	339,3	277,0	227,6	189,0	158,8	116,0	88,13	69,11	55,60	45,68	120	40	6
			z-z	707,0	613,1	418,7	255,3	162,0	110,3	79,49	59,91	46,73	37,45	30,68	21,66	16,11	12,44	9,90	8,06			
120	50	2,5	y-y	280,2	280,2	265,0	242,5	217,9	191,5	164,8	139,8	118,2	100,1	85,27	63,42	48,69	38,44	31,08	25,62	120	50	2,5
			z-z	280,2	265,5	218,9	166,3	119,7	86,59	64,47	49,53	39,12	31,64	26,09	18,60	13,92	10,80	8,62	7,04			
120	50	3	y-y	363,9	363,9	341,2	310,0	275,9	239,4	203,3	170,6	142,9	120,3	102,0	75,46	57,74	45,49	36,72	30,24	120	50	3
			z-z	363,9	341,5	276,8	204,6	144,2	103,1	76,29	58,40	46,02	37,16	30,61	21,78	16,28	12,63	10,08	8,23			
120	50	4	y-y	527,0	527,0	488,1	439,2	385,3	328,5	274,1	226,9	188,1	157,2	132,7	97,51	74,33	58,42	47,08	38,72	120	50	4
			z-z	527,0	488,1	385,2	274,1	188,1	132,7	97,48	74,31	58,40	47,06	38,71	27,50	20,53	15,90	12,68	10,35			
120	50	5	y-y	645,0	645,0	595,6	534,6	467,3	396,7	329,8	272,1	225,1	187,9	158,4	116,2	88,55	69,56	56,03	46,07	120	50	5
			z-z	645,0	594,8	465,4	327,2	222,9	156,7	114,9	87,48	68,70	55,33	45,50	32,30	24,10	18,67	14,88	12,14			
120	50	6	y-y	757,4	757,4	697,2	624,2	543,6	459,4	380,4	312,8	258,3	215,2	181,3	132,8	101,1	79,39	63,93	52,55	120	50	6
			z-z	757,4	695,4	539,2	374,5	253,2	177,3	129,8	98,74	77,49	62,38	51,27	36,38	27,14	21,01	16,75	13,66			
120	60	2,5	y-y	301,2	301,2	285,9	262,2	236,5	208,8	180,5	153,9	130,5	110,8	94,63	70,55	54,24	42,87	34,68	28,60	120	60	2,5
			z-z	301,2	292,5	251,7	205,1	158,0	119,3	90,95	70,86	56,48	45,95	38,06	27,29	20,50	15,95	12,76	10,44			
120	60	3	y-y	389,1	389,1	366,3	333,9	298,6	260,7	222,7	187,9	158,0	133,3	113,4	84,04	64,40	50,79	41,03	33,81	120	60	3
			z-z	389,1	375,3	319,2	255,2	192,6	143,4	108,4	84,09	66,82	54,25	44,87	32,11	24,09	18,73	14,97	12,24			
120	60	4	y-y	560,6	560,6	522,0	471,7	416,5	357,9	300,9	250,5	208,6	174,8	147,9	108,9	83,17	65,44	52,77	43,43	120	60	4
			z-z	560,6	535,4	447,9	348,2	255,8	187,2	140,3	108,2	85,64	69,37	57,27	40,89	30,63	23,79	19,01	15,53			
120	60	5	y-y	687,0	687,0	638,0	575,3	506,4	433,5	363,2	301,5	250,5	209,7	177,2	130,4	99,45	78,20	63,04	51,87	120	60	5
			z-z	687,0	654,2	544,6	419,9	306,2	223,1	166,8	128,4	101,6	82,25	67,88	48,44	36,27	28,16	22,49	18,38			
120	60	6	y-y	807,8	807,8	748,2	673,2	590,7	503,7	420,4	347,9	288,5	241,1	203,6	149,6	114,0	89,61	72,21	59,40	120	60	6
			z-z	807,8	767,0	635,1	485,6	351,5	255,0	190,2	146,3	115,6	93,52	77,15	55,02	41,18	31,96	25,52	20,85			

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



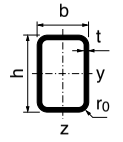
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
120	80	2,5	y-y	342,1	342,1	326,4	300,5	272,6	242,4	211,3	181,5	154,8	132,1	113,1	84,68	65,27	51,66	41,84	34,54	120	80	2,5
			z-z	342,1	342,1	307,7	269,9	228,2	186,7	150,3	121,2	98,75	81,54	68,25	49,61	37,57	29,41	23,62	19,39			
120	80	3	y-y	439,5	439,5	416,3	381,3	343,3	302,4	260,8	221,8	187,7	159,2	135,8	101,1	77,66	61,35	49,61	40,91	120	80	3
			z-z	439,5	437,9	391,0	339,5	283,0	228,2	181,8	145,5	118,0	97,10	81,09	58,77	44,44	34,74	27,88	22,87			
120	80	4	y-y	627,8	627,8	589,3	535,9	477,5	415,1	353,0	296,6	248,8	209,5	177,8	131,6	100,7	79,39	64,10	52,80	120	80	4
			z-z	627,8	621,6	550,3	471,1	385,2	305,0	239,8	190,3	153,5	125,9	104,9	75,75	57,16	44,62	35,78	29,32			
120	80	5	y-y	771,0	771,0	722,1	655,6	582,8	505,0	428,2	358,9	300,3	252,6	214,2	158,3	121,1	95,40	77,00	63,41	120	80	5
			z-z	771,0	762,1	673,2	574,1	467,1	368,2	288,5	228,6	184,1	150,9	125,6	90,67	68,38	53,36	42,78	35,06			
120	80	6	y-y	908,6	908,6	849,1	769,6	682,4	589,4	498,2	416,4	347,8	292,2	247,5	182,7	139,7	110,0	88,71	73,04	120	80	6
			z-z	908,6	896,7	790,2	671,2	543,3	426,3	333,1	263,4	211,9	173,5	144,3	104,1	78,48	61,23	49,08	40,21			
120	80	7,1	y-y	1035	1035	963,4	870,2	767,9	659,3	553,9	460,8	383,6	321,4	271,8	200,2	152,8	120,2	96,94	79,77	120	80	7,1
			z-z	1035	1019	894,6	755,0	606,2	472,4	367,4	289,7	232,6	190,2	158,1	113,9	85,84	66,93	53,63	43,93			
120	80	8	y-y	1144	1144	1062	957,5	842,4	720,7	603,4	500,6	415,9	348,0	294,0	216,3	165,0	129,7	104,6	86,03	120	80	8
			z-z	1144	1124	984,6	827,4	660,7	512,5	397,4	312,8	250,9	205,0	170,3	122,6	92,35	71,99	57,67	47,23			
120	80	8,8	y-y	1237	1237	1145	1030	904,1	770,8	643,3	532,4	441,5	368,9	311,4	228,8	174,4	137,1	110,5	90,87	120	80	8,8
			z-z	1237	1213	1060	887,0	704,7	544,4	421,1	330,9	265,1	216,5	179,8	129,4	97,37	75,89	60,78	49,76			
120	80	10	y-y	1368	1368	1262	1132	988,7	838,4	696,2	573,9	474,6	395,9	333,8	244,8	186,4	146,4	117,9	96,98	120	80	10
			z-z	1368	1338	1165	968,5	763,4	586,0	451,5	354,0	283,2	231,0	191,7	137,8	103,7	80,76	64,66	52,93			
120	100	2,5	y-y	357,7	358	344,3	318,9	291,9	262,6	232,1	201,9	174,2	149,8	129,1	97,47	75,49	59,93	48,64	40,21	120	100	2,5
			z-z	357,7	358	336,8	307,1	274,7	239,9	205,0	173,0	145,5	122,9	104,5	77,46	59,37	46,82	37,82	31,17			
120	100	3	y-y	482,8	483	460,0	423,0	383,1	340,1	295,8	253,6	215,9	184,0	157,4	117,7	90,67	71,74	58,08	47,93	120	100	3
			z-z	482,8	483	449,1	405,6	357,7	306,9	257,7	214,3	178,3	149,4	126,3	93,02	71,00	55,85	45,03	37,06			
120	100	4	y-y	695,0	695	656,0	599,2	537,4	470,9	403,9	341,8	288,2	243,7	207,5	154,1	118,2	93,28	75,38	62,13	120	100	4
			z-z	695,0	695	639,3	572,0	497,7	420,2	347,5	285,6	235,7	196,3	165,3	121,1	92,17	72,36	58,26	47,89			
120	100	5	y-y	855,0	855	805,5	734,7	657,5	574,6	491,5	415,0	349,3	295,0	250,8	186,1	142,6	112,5	90,89	74,90	120	100	5
			z-z	855,0	855	784,6	700,5	607,7	511,3	421,6	345,7	284,9	237,0	199,4	146,0	111,0	87,11	70,12	57,63			
120	100	6	y-y	1009	1009	949,2	864,5	772,0	672,8	573,9	483,4	406,1	342,5	291,0	215,6	165,1	130,2	105,1	86,62	120	100	6
			z-z	1009	1009	924,0	823,3	712,0	597,0	490,7	401,4	330,2	274,5	230,8	168,7	128,3	100,6	80,97	66,53			

h	b	t			$N_{b,Rd}$ (kN)										h	b	t
mm	mm	mm	akseli		L_{cr} (m)										mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
140	60	2,5	y-y	308,2	308	300,3	280,4	259,6	237,1	213,3	189,1	165,9	144,7	126,0	96,51	75,37	60,16	49,00	40,62	140	60	2,5
			z-z	308,2	302	262,5	218,3	172,1	132,2	101,8	79,84	63,88	52,11	43,24	31,09	23,39	18,22	14,59	11,94			
140	60	3	y-y	401,5	402	388,4	361,1	332,1	300,9	267,9	235,0	204,1	176,5	152,8	116,0	90,13	71,71	58,28	48,23	140	60	3
			z-z	401,5	390	335,9	274,3	211,7	159,9	122,0	95,14	75,84	61,72	51,13	36,67	27,54	21,44	17,15	14,03			
140	60	4	y-y	602,0	602	598,5	550,7	499,1	443,4	386,0	331,2	282,3	240,6	206,0	154,1	118,7	93,96	76,07	62,79	140	60	4
			z-z	602,0	578	488,1	385,5	287,4	212,2	159,8	123,6	98,05	79,52	65,72	46,98	35,22	27,37	21,87	17,88			
140	60	5	y-y	771,0	771	733,5	673,9	609,6	540,1	468,8	401,1	341,1	290,2	248,2	185,4	142,7	112,8	91,33	75,36	140	60	5
			z-z	771,0	736	615,3	477,8	350,7	256,4	192,1	148,1	117,2	94,96	78,40	55,97	41,92	32,56	26,01	21,25			
140	60	6	y-y	908,6	909	862,7	791,4	714,3	631,1	546,1	465,9	395,2	335,7	286,7	213,8	164,4	130,0	105,2	86,74	140	60	6
			z-z	908,6	865	719,5	554,2	403,7	294,0	219,7	169,1	133,8	108,3	89,37	63,77	47,74	37,07	29,61	24,19			
140	70	2,5	y-y	329,2	329	321,3	300,5	278,6	255,1	230,1	204,6	180,0	157,4	137,4	105,4	82,48	65,90	53,71	44,54	140	70	2,5
			z-z	329,2	327	291,6	252,1	209,0	167,6	132,9	106,1	85,91	70,63	58,93	42,67	32,24	25,19	20,22	16,58			
140	70	3	y-y	426,7	427	413,8	385,4	355,2	322,8	288,5	254,0	221,3	192,0	166,6	126,8	98,69	78,61	63,92	52,93	140	70	3
			z-z	426,7	422	373,0	318,4	259,4	204,7	160,5	127,3	102,5	84,03	69,97	50,52	38,10	29,74	23,84	19,54			
140	70	4	y-y	635,6	636	632,8	583,8	531,0	474,1	415,0	357,9	306,4	262,0	224,8	168,7	130,2	103,2	83,61	69,05	140	70	4
			z-z	635,6	623	542,9	452,8	358,2	275,8	212,9	167,1	133,8	109,2	90,63	65,17	49,04	38,21	30,60	25,05			
140	70	5	y-y	813,0	813	776,4	715,3	649,6	578,5	505,1	434,5	371,1	316,8	271,5	203,5	156,9	124,2	100,6	83,09	140	70	5
			z-z	813,0	793	686,6	566,0	441,7	336,4	258,0	201,7	161,1	131,2	108,8	78,13	58,73	45,73	36,60	29,95			
140	70	6	y-y	959,0	959	914,2	841,1	762,4	677,3	589,6	505,9	431,1	367,5	314,6	235,4	181,3	143,5	116,2	95,90	140	70	6
			z-z	959,0	933	805,7	660,6	512,3	388,4	297,0	231,8	185,0	150,6	124,8	89,54	67,28	52,37	41,91	34,29			
140	80	3	y-y	451,9	452	439,2	409,5	378,2	344,5	308,9	272,8	238,4	207,3	180,2	137,5	107,2	85,48	69,56	57,63	140	80	3
			z-z	451,9	452	407,2	357,7	303,2	248,7	200,7	162,0	132,1	109,2	91,41	66,48	50,37	39,43	31,68	26,01			
140	80	4	y-y	669,2	669	667,0	616,6	562,6	504,3	443,6	384,3	330,1	283,1	243,5	183,3	141,7	112,4	91,12	75,29	140	80	4
			z-z	669,2	665	592,3	511,7	423,8	339,5	269,1	214,7	173,8	142,8	119,2	86,26	65,17	50,92	40,86	33,50			
140	80	5	y-y	855,0	855	819,1	756,4	689,1	616,3	540,7	467,3	400,7	343,1	294,7	221,5	171,1	135,6	109,9	90,79	140	80	5
			z-z	855,0	847	750,3	642,9	526,5	417,4	328,4	260,8	210,4	172,6	143,8	103,90	78,42	61,22	49,10	40,24			
140	80	6	y-y	1009	1009	965,5	890,5	809,8	722,7	632,4	545,2	466,5	398,8	342,2	256,7	198,1	157,0	127,2	105,0	140	80	6
			z-z	1009	998	882,4	753,4	613,9	484,5	380,1	301,3	242,8	199,0	165,7	119,6	90,24	70,43	56,47	46,27			
150	50	2,5	y-y	290,0	290	284,9	267,5	249,4	230,0	209,4	188,1	167,1	147,4	129,5	100,4	79,02	63,37	51,77	43,01	150	50	2,5
			z-z	290,0	278	235,1	185,7	138,4	102,2	76,96	59,52	47,22	38,29	31,65	22,62	16,96	13,18	10,53	8,61			
150	50	3	y-y	381,1	381	371,8	347,6	322,1	294,7	265,6	236,0	207,4	181,2	158,1	121,2	94,79	75,72	61,69	51,15	150	50	3
			z-z	381,1	363	301,4	231,8	168,6	122,7	91,65	70,55	55,80	45,16	37,26	26,58	19,90	15,45	12,34	10,08			
150	50	4	y-y	580,5	581	559,5	518,9	475,5	428,7	379,6	331,1	286,1	246,5	212,7	160,8	124,6	99,02	80,38	66,48	150	50	4
			z-z	580,5	543	438,2	321,6	225,4	160,7	118,7	90,81	71,53	57,72	47,53	33,82	25,27	19,59	15,63	12,76			
150	50	5	y-y	771,0	771	737,4	680,2	618,6	552,1	483,2	416,6	356,4	304,7	261,5	196,2	151,4	120,0	97,20	80,27	150	50	5
			z-z	771,0	714	562,9	400,1	274,4	193,5	142,1	108,3	85,14	68,60	56,43	40,08	29,92	23,18	18,48	15,08			
150	50	6	y-y	908,6	909	867,3	798,8	725,0	645,2	562,9	483,8	413,0	352,4	302,0	226,2	174,4	138,0	111,8	92,30	150	50	6
			z-z	908,6	838	654,9	460,0	313,1	220,0	161,3	122,8	96,46	77,69	63,88	45,35	33,84	26,21	20,89	17,05			

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



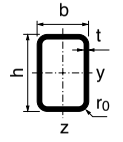
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
150	100	3	y-y	500,1	500	492,7	463,5	433,2	400,9	366,5	330,8	295,2	261,4	230,6	179,7	141,8	114,0	93,25	77,54	150	100	3
			z-z	500,1	500	471,5	430,3	385,5	337,3	288,9	244,2	205,7	173,8	147,8	109,7	84,14	66,38	53,63	44,20			
150	100	4	y-y	748,5	749	730,8	683,5	633,9	580,7	524,1	466,3	410,3	358,9	313,4	240,7	188,3	150,5	122,7	101,7	150	100	4
			z-z	748,5	749	696,3	628,8	554,7	476,0	399,8	332,5	276,7	231,8	196,0	144,3	110,2	86,66	69,87	57,50			
150	100	5	y-y	981,0	981	952,8	888,1	819,7	746,1	668,3	589,7	514,9	447,4	388,7	296,4	231,0	184,1	149,8	124,1	150	100	5
			z-z	981,0	981	905,3	812,2	709,6	601,9	500,0	412,3	341,0	284,5	239,8	175,9	134,0	105,3	84,78	69,71			
150	100	6	y-y	1161	1161	1126	1048	966,6	878,4	785,2	691,5	602,7	522,9	453,7	345,4	268,9	214,2	174,2	144,2	150	100	6
			z-z	1161	1161	1069	957,0	833,8	705,0	583,9	480,4	396,7	330,6	278,5	204,1	155,4	122,0	98,23	80,76			
150	100	7,1	y-y	1334	1334	1291	1200	1104	1000	891,1	781,9	679,2	587,7	508,9	386,4	300,3	238,9	194,2	160,7	150	100	7,1
			z-z	1334	1334	1224	1093	948,2	797,8	657,9	539,5	444,5	369,9	311,2	227,8	173,2	136,0	109,4	89,94			
150	100	8	y-y	1480	1480	1430	1329	1221	1104	981,5	859,4	745,1	643,7	556,7	422,0	327,6	260,5	211,7	175,1	150	100	8
			z-z	1480	1480	1355	1208	1045	876,2	720,4	589,5	485,0	403,1	339,0	247,9	188,4	147,8	118,9	97,75			
150	100	8,8	y-y	1606	1606	1550	1439	1320	1192	1058	924,1	799,8	690,0	596,1	451,2	350,0	278,2	225,9	186,9	150	100	8,8
			z-z	1606	1606	1468	1305	1126	941,6	772,2	630,6	518,2	430,3	361,6	264,2	200,7	157,4	126,7	104,1			
150	100	10	y-y	1788	1788	1722	1596	1462	1316	1164	1014	875,3	753,5	649,8	490,8	380,3	302,0	245,1	202,7	150	100	10
			z-z	1788	1788	1628	1444	1241	1032	843,1	686,6	563,0	467,0	392,1	286,1	217,2	170,3	136,9	112,5			
160	70	4	y-y	658,1	658	644,6	604,1	561,7	516,4	468,2	418,6	370,1	325,0	284,7	219,7	172,3	138,0	112,6	93,45	160	70	4
			z-z	658,1	648	569,6	481,5	387,4	302,3	235,4	185,8	149,2	122,1	101,5	73,14	55,11	42,98	34,44	28,21			
160	70	5	y-y	897,0	897	871,5	812,6	750,3	683,3	612,4	540,7	472,4	410,7	356,9	272,3	212,3	169,2	137,7	114,1	160	70	5
			z-z	897,0	876	760,9	630,1	494,3	378,0	290,6	227,5	181,9	148,3	123,0	88,35	66,44	51,75	41,43	33,91			
160	70	6	y-y	1060	1060	1028	957,8	883,2	802,8	717,9	632,5	551,4	478,5	415,3	316,3	246,3	196,2	159,6	132,1	160	70	6
			z-z	1060	1033	894,5	736,9	574,6	437,4	335,3	262,1	209,3	170,5	141,3	101,5	76,28	59,39	47,54	38,90			
160	70	8	y-y	1346	1346	1300	1207	1108	1002	889,5	778,0	674,0	581,9	503,0	381,0	295,7	235,1	191,0	158,0	160	70	8
			z-z	1346	1306	1122	912,3	701,0	528,1	402,2	313,2	249,5	202,9	168,1	120,5	90,48	70,40	56,32	46,07			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)															h	b	t
mm	mm	mm		L_{cr} (m)															mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
160	80	3	y-y	461,0	461	456,5	430,8	404,3	376,2	346,3	315,0	283,4	252,8	224,5	176,6	140,2	113,1	92,74	77,26	160	80	3
			z-z	461,0	461	420,0	372,6	320,3	266,7	217,9	177,5	145,6	120,8	101,4	74,02	56,20	44,06	35,44	29,11			
160	80	4	y-y	691,7	692	678,9	637,2	593,6	547,0	497,5	446,3	395,9	348,7	306,2	237,1	186,4	149,4	122,0	101,3	160	80	4
			z-z	691,7	691	618,9	540,2	453,7	368,6	295,2	237,2	192,8	158,9	132,9	96,44	72,99	57,09	45,84	37,61			
160	80	5	y-y	939,0	939	914,8	854,5	791,0	722,7	650,2	576,6	505,8	441,2	384,4	294,3	229,9	183,5	149,5	123,9	160	80	5
			z-z	939,0	932	827,1	711,4	585,5	466,3	368,1	293,0	236,7	194,3	162,0	117,1	88,44	69,07	55,41	45,42			
160	80	6	y-y	1110	1110	1080	1008	932,0	850,1	763,4	675,5	591,4	515,0	448,1	342,5	267,3	213,2	173,6	143,8	160	80	6
			z-z	1110	1100	974,5	835,2	684,2	542,5	427,0	339,2	273,6	224,5	187,0	135,1	102,0	79,62	63,86	52,34			
160	80	7,1	y-y	1274	1274	1236	1152	1062	965,8	864,0	761,4	664,1	576,5	500,4	381,2	296,9	236,5	192,4	159,3	160	80	7,1
			z-z	1274	1259	1112	948,3	771,6	608,1	476,6	377,6	304,1	249,2	207,4	149,7	112,9	88,13	70,66	57,90			
160	80	8	y-y	1413	1413	1369	1274	1174	1065	950,9	836,0	727,6	630,5	546,6	415,7	323,3	257,4	209,3	173,3	160	80	8
			z-z	1413	1395	1229	1044	845,6	663,6	518,6	410,1	330,0	270,2	224,8	162,1	122,2	95,36	76,44	62,62			
160	80	10	y-y	1704	1704	1645	1527	1402	1267	1125	983,3	851,6	735,0	635,1	481,0	373,3	296,7	241,0	199,4	160	80	10
			z-z	1704	1676	1469	1237	990,3	769,7	597,7	470,9	377,9	308,9	256,7	184,9	139,2	108,6	86,97	71,23			
160	90	3	y-y	486,2	486	482,1	455,3	427,7	398,5	367,5	334,9	301,9	269,9	240,1	189,3	150,6	121,6	99,80	83,18	160	90	3
			z-z	486,2	486	452,3	408,4	360,2	309,1	259,6	215,9	179,6	150,5	127,2	93,70	71,52	56,26	45,36	37,33			
160	90	4	y-y	725,3	725	713,2	670,2	625,3	577,5	526,5	473,7	421,5	372,2	327,6	254,4	200,4	160,8	131,4	109,2	160	90	4
			z-z	725,3	725	664,9	593,1	513,9	431,7	355,5	291,2	239,8	199,4	167,7	122,7	93,30	73,20	58,92	48,42			
160	90	5	y-y	981,0	981	958,0	896,2	831,3	761,6	687,6	612,0	538,7	471,3	411,6	316,2	247,5	197,8	161,2	133,7	160	90	5
			z-z	981,0	981	888,1	783,5	668,2	551,5	447,3	362,5	296,3	245,2	205,6	149,7	113,5	88,92	71,48	58,69			
160	90	6	y-y	1161	1161	1132	1058	980,4	896,9	808,3	718,0	630,8	551,0	480,6	368,6	288,1	230,1	187,5	155,5	160	90	6
			z-z	1161	1161	1048	922,2	783,6	644,3	521,0	421,3	343,9	284,3	238,2	173,3	131,4	102,9	82,67	67,86			
160	90	7,1	y-y	1334	1334	1298	1211	1120	1022	917,6	812,1	711,1	619,3	539,0	412,0	321,5	256,5	208,8	173,0	160	90	7,1
			z-z	1334	1334	1199	1052	889,0	726,9	585,2	471,9	384,4	317,4	265,6	193,1	146,2	114,4	91,94	75,45			
160	90	8	y-y	1480	1480	1438	1341	1239	1128	1011	893,0	780,4	678,5	589,7	450,0	350,8	279,6	227,6	188,5	160	90	8
			z-z	1480	1480	1327	1161	977,7	796,4	639,3	514,4	418,5	345,2	288,8	209,7	158,8	124,2	99,76	81,86			
160	90	8,8	y-y	1606	1606	1559	1452	1340	1218	1090	960,7	838,0	727,5	631,5	481,2	374,7	298,5	242,8	201,1	160	90	8,8
			z-z	1606	1604	1436	1253	1052	854,0	683,7	549,2	446,3	367,9	307,5	223,2	168,9	132,1	106,1	87,02			

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

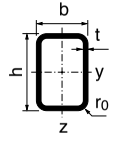
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
180	100	4	y-y	776,1	776	775,6	736,0	695,5	653,1	608,0	560,6	511,8	463,2	416,6	334,2	268,9	218,7	180,4	150,8	180	100	4
			z-z	776,1	776	730,1	665,1	594,2	518,2	442,2	372,7	313,2	264,2	224,5	166,4	127,5	100,5	81,17	66,88			
180	100	5	y-y	1053	1053	1047	989,7	931,1	869,3	803,5	734,4	664,2	595,6	531,2	420,5	335,3	271,2	222,9	185,9	180	100	5
			z-z	1053	1053	980,80	886,2	782,4	672,1	565,0	470,2	391,6	328,2	277,6	204,5	156,1	122,8	99,03	81,50			
180	100	5,6	y-y	1231	1231	1219	1150	1079	1004	924,1	840,5	756,1	674,5	598,9	471,0	374,0	301,6	247,4	206,1	180	100	5,6
			z-z	1231	1231	1139	1024	897,7	764,6	637,5	527,2	436,9	365,0	308,0	226,3	172,5	135,5	109,2	89,81			
180	100	6	y-y	1312	1312	1299	1225	1149	1069	983,3	893,8	803,6	716,5	635,8	499,6	396,5	319,7	262,2	218,4	180	100	6
			z-z	1312	1312	1213	1090	954,5	812,0	676,2	558,7	462,8	386,5	326,0	239,4	182,4	143,3	115,5	94,97			
180	100	7,1	y-y	1513	1513	1495	1409	1320	1225	1124	1019	913,7	812,5	719,4	563,4	446,2	359,3	294,3	245,0	180	100	7,1
			z-z	1513	1513	1394	1250	1091	923,6	766,1	631,0	521,6	434,9	366,5	268,7	204,6	160,7	129,4	106,4			
180	100	8	y-y	1682	1682	1660	1564	1463	1357	1244	1126	1008	894,6	791,0	618,3	489,1	393,5	322,2	268,1	180	100	8
			z-z	1682	1682	1547	1384	1205	1017	841,3	691,5	570,7	475,4	400,4	293,3	223,2	175,2	141,1	116,0			
180	100	8,8	y-y	1828	1828	1803	1697	1587	1470	1346	1216	1087	963,6	851,0	664,1	524,7	421,9	345,3	287,2	180	100	8,8
			z-z	1828	1828	1678	1499	1301	1096	904,1	741,8	611,4	508,8	428,2	313,5	238,4	187,1	150,6	123,8			
180	100	10	y-y	2040	2040	2009	1889	1764	1632	1491	1344	1198	1060	934,6	727,4	573,8	460,9	376,9	313,4	180	100	10
			z-z	2040	2040	1867	1664	1439	1206	991,3	811,0	667,2	554,5	466,2	340,9	259,1	203,2	163,6	134,4			
180	120	4	y-y	843,3	843	843,3	802,4	759,5	714,6	667,0	616,9	565,1	513,2	463,1	373,5	301,5	245,8	203,0	170,0	180	120	4
			z-z	843,3	843	813,9	755,4	693,1	625,9	555,3	485,2	419,9	362,2	312,9	236,9	183,8	146,1	118,6	98,11			
180	120	5	y-y	1137	1137	1133	1073	1012	947,2	878,5	806,3	732,4	659,6	590,5	470,3	376,5	305,3	251,2	209,8	180	120	5
			z-z	1137	1137	1089	1006	915,7	818,6	717,7	619,8	531,2	454,6	390,4	293,3	226,5	179,5	145,5	120,2			
180	120	6	y-y	1413	1413	1403	1326	1247	1163	1074	981,3	886,6	794,3	707,8	559,7	445,9	360,5	296,1	246,9	180	120	6
			z-z	1413	1413	1346	1238	1122	996,1	866,8	743,3	633,2	539,5	461,8	345,4	266,1	210,5	170,4	140,7			
180	120	7,1	y-y	1632	1632	1618	1528	1435	1337	1232	1123	1012	904,7	804,5	634,2	504,3	407,2	334,2	278,5	180	120	7,1
			z-z	1632	1632	1552	1425	1288	1141	989,3	845,7	718,7	611,3	522,5	390,2	300,2	237,4	192,1	158,5			
180	120	8	y-y	1816	1816	1799	1698	1594	1483	1366	1243	1119	998,4	886,7	697,8	554,2	447,1	366,8	305,6	180	120	8
			z-z	1816	1816	1725	1582	1428	1262	1092	931,6	790,4	671,4	573,4	427,7	328,9	260,0	210,3	173,5			
180	120	8,8	y-y	1976	1976	1956	1845	1730	1609	1480	1345	1209	1078	956,1	751,1	596,0	480,5	394,0	328,1	180	120	8,8
			z-z	1976	1976	1874	1717	1548	1365	1179	1004	850,5	721,7	615,9	458,9	352,7	278,7	225,4	185,9			
180	120	10	y-y	2208	2208	2182	2057	1928	1790	1644	1491	1337	1190	1054	825,7	654,2	526,9	431,7	359,4	180	120	10
			z-z	2208	2208	2089	1912	1719	1512	1302	1105	934,5	791,7	674,9	502,1	385,5	304,5	246,1	203,0			
180	120	12,5	y-y	2606	2606	2564	2411	2251	2080	1899	1710	1524	1347	1187	922,6	727,3	584,0	477,5	396,9	180	120	12,5
			z-z	2606	2606	2451	2232	1994	1738	1483	1249	1050	885,5	752,4	557,4	427,1	336,7	271,9	224,0			

200	80	4	y-y	722,4	722	722,4	695,3	661,5	626,4	589,5	550,5	510,0	468,6	427,7	351,7	287,8	236,8	196,8	165,5
			z-z	722,4	722	658,3	584,2	502,3	418,4	342,0	278,6	228,6	189,6	159,2	116,2	88,26	69,19	55,65	45,71
200	80	5	y-y	996,8	997	996,8	950,2	900,0	847,7	792,3	733,8	673,4	612,7	553,8	447,9	362,2	295,7	244,5	204,8
			z-z	996,8	997	894,4	782,8	659,9	538,1	432,2	348,0	283,2	233,7	195,5	142,0	107,5	84,11	67,56	55,44
200	80	6	y-y	1312	1312	1307	1238	1167	1093	1014	930,7	845,6	761,7	682,1	543,5	435,1	352,9	290,4	242,6
			z-z	1312	1303	1158	998,2	823,8	657,8	520,3	414,6	335,2	275,3	229,6	166,1	125,5	98,00	78,62	64,46
200	80	7,1	y-y	1512	1512	1504	1423	1340	1252	1159	1061	961,3	863,4	771,1	611,9	488,7	395,6	325,3	271,4
			z-z	1512	1499	1329	1140	935,4	742,7	585,1	465,0	375,3	308,0	256,6	185,5	140,0	109,3	87,67	71,86
200	80	8	y-y	1682	1682	1671	1580	1487	1388	1283	1173	1061	951,1	848,2	671,6	535,6	433,2	355,9	296,9
			z-z	1682	1664	1473	1259	1029	813,3	638,9	506,9	408,7	335,1	279,1	201,5	152,1	118,7	95,18	78,00
200	80	8,8	y-y	1828	1828	1815	1715	1612	1504	1388	1267	1144	1025	912,6	721,2	574,3	464,2	381,2	317,8
			z-z	1828	1807	1596	1360	1106	871,7	683,0	541,1	435,8	357,0	297,2	214,5	161,8	126,3	101,2	82,94
200	80	10	y-y	2040	2040	2022	1909	1793	1669	1538	1401	1262	1127	1002	789,5	627,6	506,5	415,6	346,3
			z-z	2040	2012	1772	1503	1215	951,7	742,9	587,1	472,2	386,5	321,5	231,8	174,7	136,3	109,3	89,50
200	100	4	y-y	789,6	790	789,6	762,6	726,6	689,3	650,2	609,0	565,9	521,9	478,0	395,5	325,1	268,4	223,6	188,3
			z-z	789,6	790	747,6	684,5	615,9	542,0	467,0	396,9	335,7	284,6	242,6	180,6	138,7	109,5	88,58	73,04
200	100	5	y-y	1081	1081	1081	1035	982,3	927,5	869,7	808,7	745,4	681,3	618,6	504,0	409,8	335,7	278,2	233,4
			z-z	1081	1081	1013	919,6	817,8	709,0	601,4	504,3	422,2	355,2	301,2	222,7	170,4	134,2	108,3	89,20
200	100	6	y-y	1413	1413	1413	1341	1267	1191	1109	1024	935,2	847,2	762,6	612,6	493,2	401,4	331,2	277,0
			z-z	1413	1413	1309	1178	1035	882,9	737,5	610,7	506,7	423,6	357,6	262,9	200,4	157,5	127,0	104,4
200	100	7,1	y-y	1632	1632	1629	1545	1459	1369	1273	1172	1068	965,3	867,0	694,0	557,4	452,9	373,3	312,0
			z-z	1632	1632	1508	1354	1185	1007	837,9	691,8	572,8	478,1	403,3	296,0	225,5	177,2	142,7	117,4
200	100	8	y-y	1816	1816	1812	1717	1621	1519	1411	1298	1181	1066	956,0	763,7	612,5	497,3	409,6	342,3
			z-z	1816	1816	1675	1502	1311	1111	921,5	759,2	627,7	523,4	441,2	323,5	246,3	193,5	155,8	128,1
200	100	8,8	y-y	1976	1976	1969	1866	1760	1648	1530	1405	1277	1151	1031	822,2	658,6	534,3	439,9	367,4
			z-z	1976	1976	1819	1628	1418	1198	991,6	815,5	673,3	561,0	472,5	346,2	263,5	206,9	166,6	137,0
200	100	10	y-y	2208	2208	2198	2081	1961	1834	1699	1558	1413	1271	1137	904,0	722,9	585,7	481,8	402,2
			z-z	2208	2208	2026	1809	1570	1321	1090	893,5	736,3	612,6	515,6	377,3	287,0	225,2	181,3	149,0
200	100	12,5	y-y	2606	2606	2583	2438	2290	2132	1965	1789	1612	1440	1280	1008	801,2	646,7	530,6	442,1
			z-z	2606	2606	2372	2103	1806	1502	1226	998,0	818,3	678,5	569,6	415,6	315,5	247,3	198,9	163,4

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)										h	b	t
				L_{cr} (m)												
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



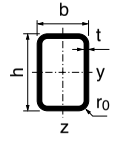
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
200	120	5	y-y	1165	1165	1165	1119	1064	1007	946,3	882,6	816,3	748,9	682,3	559,4	456,8	375,3	311,7	261,9	200	120	5
			z-z	1165	1165	1121	1039	950,6	855,4	755,8	657,7	567,2	488,0	420,6	317,5	245,9	195,2	158,4	131,0			
200	120	6	y-y	1513	1513	1513	1443	1367	1287	1203	1115	1023	930,7	841,3	680,5	550,5	449,4	371,6	311,3	200	120	6
			z-z	1513	1513	1445	1331	1208	1076	938,7	807,1	689,1	588,2	504,1	377,6	291,1	230,5	186,7	154,1			
200	120	7,1	y-y	1751	1751	1751	1666	1577	1483	1384	1280	1172	1064	960,3	774,3	624,9	509,4	420,8	352,3	200	120	7,1
			z-z	1751	1751	1669	1535	1390	1234	1074	920,8	784,3	668,2	571,9	427,7	329,5	260,7	211,1	174,2			
200	120	8	y-y	1951	1951	1951	1853	1753	1648	1537	1419	1298	1178	1061	853,9	688,3	560,6	462,8	387,3	200	120	8
			z-z	1951	1951	1856	1705	1543	1367	1187	1016	863,7	735,0	628,5	469,5	361,4	285,8	231,3	190,9			
200	120	8,8	y-y	2124	2124	2124	2016	1906	1790	1668	1539	1406	1274	1147	921,2	741,7	603,6	498,1	416,7	200	120	8,8
			z-z	2124	2124	2018	1853	1674	1480	1283	1096	930,5	791,0	675,9	504,4	388,1	306,8	248,2	204,8			
200	120	10	y-y	2376	2376	2373	2251	2126	1996	1857	1711	1560	1411	1268	1016	816,7	663,9	547,4	457,7	200	120	10
			z-z	2376	2376	2253	2066	1862	1643	1419	1209	1024	869,4	742,0	553,0	425,0	335,8	271,6	224,0			
200	120	12,5	y-y	2816	2816	2802	2652	2499	2337	2164	1983	1798	1617	1445	1148	917,8	743,4	611,4	510,4	200	120	12,5
			z-z	2816	2816	2656	2424	2172	1901	1628	1377	1160	980,1	833,9	619,0	474,7	374,5	302,6	249,4			
220	120	5	y-y	1187	1187	1187	1157	1107	1056	1002	945,8	886,8	825,9	764,1	644,2	537,5	448,3	376,2	318,5	220	120	5
			z-z	1187	1187	1148	1067	980,6	887,7	789,9	692,3	600,8	519,4	449,5	341,0	264,9	210,7	171,2	141,7			
220	120	6	y-y	1524	1524	1524	1477	1410	1340	1267	1190	1110	1027	944,2	786,6	650,0	538,5	449,7	379,4	220	120	6
			z-z	1524	1524	1464	1354	1237	1110	977,1	847,5	728,8	625,5	538,3	405,5	313,6	248,8	201,8	166,8			
220	120	7,1	y-y	1870	1870	1870	1803	1716	1626	1531	1432	1328	1222	1117	920,3	754,3	621,4	516,9	434,9	220	120	7,1
			z-z	1870	1870	1785	1644	1492	1328	1158	995,5	849,7	725,0	621,2	465,3	358,7	284,0	230,0	189,9			
220	120	8	y-y	2085	2085	2085	2007	1910	1809	1702	1590	1473	1354	1236	1017	832,5	685,1	569,6	479,0	220	120	8
			z-z	2085	2085	1987	1829	1657	1472	1281	1099	936,7	798,3	683,4	511,3	393,9	311,7	252,4	208,3			
220	120	8,8	y-y	2272	2272	2272	2185	2078	1967	1850	1727	1599	1468	1339	1099	898,8	739,0	614,0	516,2	220	120	8,8
			z-z	2272	2272	2163	1988	1799	1596	1386	1187	1010	860,1	735,7	549,9	423,4	334,9	271,1	223,7			
220	120	10	y-y	2544	2544	2544	2443	2322	2196	2064	1924	1778	1631	1485	1216	992,5	815,0	676,6	568,4	220	120	10
			z-z	2544	2544	2417	2219	2004	1773	1536	1312	1114	946,9	809,0	603,7	464,5	367,2	297,1	245,1			

h	b	t			$N_{b,Rd}$ (kN)											h	b	t
mm	mm	mm	akseli		L_{cr} (m)											mm	mm	mm
				0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
250	100	5	y-y	1129	1129	1129	1118	1076	1034	989,9	944,5	897,1	847,7	796,8	693,6	595,0	507,0	432,1	369,9	250	100	5
			z-z	1129	1129	1072	983,7	888,1	784,9	679,5	579,9	492,1	418,2	357,2	266,4	204,9	162,0	131,0	108,1			
250	100	6	y-y	1470	1470	1470	1446	1389	1330	1270	1207	1140	1072	1001	860,3	729,4	615,8	521,2	444,0	250	100	6
			z-z	1470	1470	1383	1260	1126	982,1	838,4	706,7	594,0	501,2	425,9	315,6	241,8	190,7	154,0	126,9			
250	100	8	y-y	2152	2152	2152	2097	2005	1911	1812	1709	1601	1489	1376	1158	964,4	803,4	673,6	569,8	250	100	8
			z-z	2152	2152	1994	1794	1574	1343	1121	927,7	769,5	643,1	542,9	398,9	304,1	239,0	192,6	158,5			
250	100	10	y-y	2628	2628	2628	2554	2440	2323	2200	2071	1936	1797	1657	1388	1152	957,2	801,1	676,9	250	100	10
			z-z	2628	2628	2423	2173	1897	1607	1334	1099	908,5	757,6	638,6	468,3	356,6	280,1	225,6	185,5			
250	150	5	y-y	1339	1339	1339	1332	1285	1237	1187	1136	1083	1028	970,9	853,8	739,5	635,2	544,7	468,4	250	150	5
			z-z	1339	1339	1334	1264	1191	1115	1035	949,9	863,1	777,4	696,1	554,7	444,1	360,1	296,4	247,6			
250	150	6	y-y	1722	1722	1722	1705	1641	1576	1509	1440	1367	1292	1214	1057	906,3	772,1	657,9	563,2	250	150	6
			z-z	1722	1722	1707	1612	1514	1410	1300	1185	1068	954,4	848,7	669,1	532,1	429,6	352,5	293,8			
250	150	7,1	y-y	2141	2141	2141	2190	2102	2012	1918	1821	1719	1613	1505	1289	1090	918,3	776,1	660,4	250	150	7,1
			z-z	2141	2141	2112	1989	1861	1724	1579	1428	1277	1133	1001	781,6	617,8	496,9	406,8	338,4			
250	150	8	y-y	2488	2488	2488	2444	2344	2243	2139	2029	1914	1795	1673	1431	1209	1017	859,1	730,6	250	150	8
			z-z	2488	2488	2447	2299	2145	1981	1807	1626	1446	1277	1124	873,1	687,8	552,0	451,2	375,0			
250	150	8,8	y-y	2715	2715	2715	2715	2665	2556	2445	2330	2209	2083	1952	1818	1553	1310	1102	929,9	250	150	8,8
			z-z	2715	2715	2668	2506	2337	2156	1964	1765	1569	1384	1217	943,9	743,0	596,0	487,0	404,6			
250	150	10	y-y	3048	3048	3048	2988	2865	2739	2609	2472	2329	2180	2029	1730	1456	1223	1031	875,9	250	150	10
			z-z	3048	3048	2992	2808	2616	2410	2192	1967	1745	1537	1349	1045	821,4	658,4	537,7	446,6			
250	150	12,5	y-y	3656	3656	3656	3573	3421	3266	3104	2934	2756	2572	2385	2020	1691	1414	1189	1008	250	150	12,5
			z-z	3656	3656	3577	3350	3113	2858	2588	2310	2039	1788	1565	1206	945,2	756,2	616,8	511,9			
260	140	6	y-y	1684	1684	1684	1674	1614	1553	1490	1425	1358	1287	1215	1066	921,4	790,1	676,6	581,3	260	140	6
			z-z	1684	1684	1660	1562	1461	1353	1238	1118	999,0	885,4	781,7	609,7	481,6	387,2	316,8	263,5			
260	140	7,1	y-y	2104	2104	2104	2080	2001	1921	1839	1753	1663	1570	1474	1279	1094	930,6	791,9	677,1	260	140	7,1
			z-z	2104	2104	2062	1934	1800	1657	1504	1347	1193	1049	920,2	711,1	558,5	447,4	365,2	303,2			
260	140	8	y-y	2488	2488	2488	2451	2354	2256	2154	2048	1936	1821	1702	1465	1244	1051	890,5	759,0	260	140	8
			z-z	2488	2488	2428	2271	2105	1927	1739	1546	1360	1188	1037	796,2	622,8	497,6	405,5	336,3			
260	140	8,8	y-y	2715	2715	2715	2673	2566	2458	2347	2230	2108	1981	1850	1590	1349	1139	964,0	821,2	260	140	8,8
			z-z	2715	2715	2648	2474	2292	2097	1889	1677	1473	1286	1122	860,0	672,2	536,9	437,4	362,6			
260	140	10	y-y	3048	3048	3048	2997	2877	2755	2628	2495	2357	2213	2065	1771	1499	1264	1069	909,9	260	140	10
			z-z	3048	3048	2968	2772	2565	2342	2106	1866	1636	1426	1242	950,7	742,3	592,4	482,4	399,9			
260	140	12,5	y-y	3656	3656	3656	3583	3435	3284	3127	2962	2790	2611	2429	2069	1741	1461	1232	1046	260	140	12,5
			z-z	3656	3656	3548	3305	3049	2772	2480	2186	1906	1655	1436	1094	852,2	678,9	552,2	457,3			

Taulukko 11.2.6 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



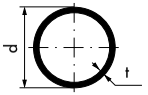
h = korkeus
b = leveys
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

h mm	b mm	t mm	akseli	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	h mm	b mm	t mm
260	180	6	y-y	1886	1886	1886	1880	1815	1749	1681	1611	1539	1463	1385	1223	1065	918,1	789,7	680,8	260	180	6
			z-z	1886	1886	1886	1816	1729	1638	1542	1441	1336	1229	1123	924,5	757,4	623,7	518,7	436,3			
260	180	7,1	y-y	2342	2342	2342	2325	2241	2155	2067	1976	1880	1781	1678	1469	1267	1084	927,2	795,7	260	180	7,1
			z-z	2342	2342	2342	2243	2129	2010	1885	1753	1615	1477	1341	1092	888,1	727,5	602,9	505,9			
260	180	8	y-y	2757	2757	2757	2728	2625	2520	2413	2301	2184	2062	1937	1683	1441	1227	1044	893,3	260	180	8
			z-z	2757	2757	2757	2627	2488	2343	2189	2027	1859	1691	1528	1235	998,4	814,8	673,5	564,2			
260	180	8,8	y-y	3011	3011	3011	2977	2864	2750	2632	2509	2380	2246	2108	1830	1566	1331	1133	968,5	260	180	8,8
			z-z	3011	3011	3011	2866	2714	2554	2385	2207	2022	1838	1659	1339	1082	882,3	729,0	610,5			
260	180	10	y-y	3384	3384	3384	3344	3216	3086	2952	2812	2666	2515	2358	2043	1745	1482	1260	1076	260	180	10
			z-z	3384	3384	3384	3217	3044	2863	2671	2469	2260	2051	1849	1490	1201	979,0	808,5	676,7			
300	100	5	y-y	1160	1160	1160	1160	1139	1105	1070	1034	997,5	959,5	920,1	837,7	752,5	668,4	589,4	518,1	300	100	5
			z-z	1160	1160	1114	1030	940,5	843,7	742,7	644,0	553,7	475,1	408,8	307,9	238,1	188,9	153,2	126,6			
300	100	6	y-y	1525	1525	1525	1525	1487	1439	1390	1340	1288	1235	1179	1063	944,0	829,6	724,7	632,3	300	100	6
			z-z	1525	1525	1451	1333	1205	1068	927,2	793,3	674,5	574,0	490,8	366,6	282,2	223,2	180,6	149,0			
300	100	7,1	y-y	1937	1937	1937	1937	1875	1810	1744	1676	1605	1532	1456	1298	1139	990,6	857,6	742,8	300	100	7,1
			z-z	1937	1937	1825	1665	1491	1304	1116	942,7	793,6	670,4	570,2	423,1	324,4	255,9	206,7	170,4			
300	100	8	y-y	2299	2299	2299	2294	2214	2134	2052	1968	1879	1788	1693	1497	1304	1126	969,1	835,9	300	100	8
			z-z	2299	2299	2151	1952	1734	1501	1271	1065	890,6	748,8	634,8	468,9	358,6	282,5	227,9	187,7			
300	100	8,8	y-y	2715	2715	2715	2696	2598	2498	2396	2290	2180	2065	1946	1704	1469	1258	1075	922,9	300	100	8,8
			z-z	2715	2715	2519	2269	1994	1704	1426	1182	981,2	820,7	693,1	509,7	388,7	305,6	246,3	202,6			
300	100	10	y-y	3048	3048	3048	3023	2912	2799	2684	2563	2438	2307	2172	1898	1633	1396	1192	1022	300	100	10
			z-z	3048	3048	2820	2535	2222	1892	1577	1303	1080	902,2	761,3	559,1	426,1	334,8	269,8	221,9			
300	100	12,5	y-y	3656	3656	3656	3614	3476	3336	3192	3042	2885	2722	2554	2215	1893	1608	1368	1169	300	100	12,5
			z-z	3656	3656	3360	3004	2612	2202	1820	1494	1233	1026	864,1	632,8	481,5	377,9	304,3	250,1			

h	b	t	akseli	$N_{b,Rd}$ (kN)																h	b	t
				L_{cr} (m)																		
mm	mm	mm		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	mm	mm	mm
300	150	6	y-y	1777	1777	1777	1777	1777	1743	1689	1635	1579	1522	1463	1402	1273	1141	1011	889,9	300	150	6
			z-z	1777	1777	1774	1682	1588	1490	1386	1276	1163	1051	943,8	755,4	606,7	493,0	406,3	339,6			
300	150	7,1	y-y	2235	2235	2235	2235	2179	2108	2036	1962	1886	1807	1725	1553	1379	1211	1057	921,8	300	150	7,1
			z-z	2235	2235	2220	2099	1975	1843	1703	1557	1407	1262	1125	890,3	709,8	574,0	471,6	393,3			
300	150	8	y-y	2635	2635	2635	2635	2558	2472	2384	2293	2200	2102	2001	1791	1580	1379	1197	1040	300	150	8
			z-z	2635	2635	2635	2608	2460	2307	2146	1973	1793	1612	1437	1275	1002	794,6	640,7	525,3	437,5		
300	150	10	y-y	3468	3468	3468	3468	3464	3345	3226	3104	2978	2846	2710	2569	2277	1988	1720	1483	1280	300	150	10
			z-z	3468	3468	3468	3412	3208	2995	2768	2526	2275	2026	1791	1577	1226	966,5	776,0	634,5	527,4			
300	150	12,5	y-y	4181	4181	4181	4181	4166	4019	3872	3721	3564	3401	3231	3056	2695	2341	2016	1732	1492	300	150	12,5
			z-z	4181	4181	4181	4102	3849	3585	3303	3002	2692	2387	2101	1845	1427	1122	899,2	734,3	609,8			
300	200	6	y-y	2000	2000	2000	2000	2000	1971	1913	1854	1794	1733	1669	1604	1466	1323	1181	1046	922,5	300	200	6
			z-z	2000	2000	2000	1966	1886	1805	1721	1634	1542	1447	1349	1155	976,6	822,6	695,1	591,4			
300	200	7,1	y-y	2533	2533	2533	2533	2481	2404	2326	2246	2163	2077	1989	1803	1612	1426	1252	1097	300	200	7,1
			z-z	2533	2533	2533	2474	2368	2260	2147	2029	1905	1777	1647	1393	1165	973,7	818,1	693,2			
300	200	8	y-y	2971	2971	2971	2971	2900	2806	2711	2614	2514	2410	2302	2076	1846	1624	1420	1239	300	200	8
			z-z	2971	2971	2971	2891	2763	2632	2495	2350	2200	2044	1887	1584	1317	1096	917,8	775,9			
300	200	8,8	y-y	3454	3454	3454	3454	3356	3243	3129	3011	2889	2762	2631	2357	2081	1818	1580	1373	300	200	8,8
			z-z	3454	3454	3454	3345	3191	3032	2865	2689	2506	2317	2128	1770	1461	1209	1009	851,0			
300	200	10	y-y	3888	3888	3888	3888	3888	3774	3646	3517	3383	3244	3100	2951	2641	2329	2032	1764	1532	300	200	10
			z-z	3888	3888	3888	3888	3761	3586	3406	3216	3017	2808	2594	2380	1976	1629	1347	1123	946,7			
300	200	12,5	y-y	4706	4706	4706	4706	4706	4556	4399	4238	4073	3901	3722	3537	3153	2769	2407	2084	1805	300	200	12,5
			z-z	4706	4706	4706	4706	4541	4325	4101	3866	3618	3360	3095	2832	2340	1921	1584	1319	1110			
400	200	6	y-y	2067	2067	2067	2067	2067	2067	2062	2018	1975	1932	1888	1843	1751	1654	1553	1448	1341	400	200	6
			z-z	2067	2067	2067	2057	1983	1909	1833	1754	1672	1587	1498	1317	1141	979,6	839,9	722,2			
400	200	7,1	y-y	2646	2646	2646	2646	2646	2624	2566	2508	2449	2390	2329	2203	2070	1931	1788	1645	400	200	7,1
			z-z	2646	2646	2646	2618	2519	2418	2315	2207	2095	1977	1857	1613	1380	1174	999,6	854,9			
400	200	8	y-y	3135	3135	3135	3135	3135	3098	3027	2956	2884	2810	2735	2580	2416	2244	2069	1894	400	200	8
			z-z	3135	3135	3135	3090	2968	2845	2717	2584	2445	2300	2151	1854	1575	1332	1129	962,6			
400	200	8,8	y-y	3587	3587	3587	3587	3587	3534	3451	3367	3282	3195	3107	2923	2728	2526	2320	2116	400	200	8,8
			z-z	3587	3587	3587	3524	3381	3235	3085	2927	2762	2590	2415	2067	1746	1470	1242	1056			
400	200	10	y-y	4287	4287	4287	4287	4287	4206	4103	3999	3894	3786	3676	3445	3202	2950	2695	2446	400	200	10
			z-z	4287	4287	4287	4193	4016	3835	3646	3449	3242	3027	2809	2382	1997	1672	1406	1192			
400	200	12,5	y-y	5756	5756	5756	5756	5749	5601	5452	5302	5150	4993	4832	4495	4140	3776	3413	3067	400	200	12,5
			z-z	5756	5756	5756	5581	5326	5064	4789	4500	4197	3886	3574	2979	2463	2042	1705	1439			

Taulukko 11.2.7 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)



d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

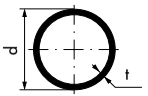
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	d mm	t mm
26,9	2	65,71	43,27	18,46	9,24	5,47												26,9	2
26,9	2,5	80,49	52,25	21,96	10,96	6,48												26,9	2,5
26,9	2,6	83,36	53,96	22,61	11,27	6,67												26,9	2,6
33,7	2	83,65	64,01	33,69	17,89	10,81	7,19	5,12										33,7	2
33,7	2,5	102,9	78,17	40,61	21,47	12,95	8,61	6,13										33,7	2,5
33,7	2,6	106,7	80,91	41,93	22,15	13,35	8,88	6,32										33,7	2,6
33,7	3	121,5	91,60	46,98	24,73	14,89	9,89	7,04										33,7	3
33,7	3,2	128,8	96,77	49,38	25,94	15,61	10,37	7,38										33,7	3,2
42,4	2	106,6	90,01	57,85	33,77	21,08	14,24	10,22	7,69									42,4	2
42,4	2,5	131,6	110,7	70,52	40,95	25,51	17,21	12,35	9,28									42,4	2,5
42,4	2,6	136,5	114,7	72,97	42,32	26,36	17,78	12,76	9,59									42,4	2,6
42,4	2,9	151,1	126,7	80,16	46,34	28,82	19,44	13,94	10,48									42,4	2,9
42,4	3	156,0	130,6	82,51	47,65	29,62	19,97	14,33	10,76									42,4	3
42,4	3,2	165,5	138,4	87,11	50,20	31,19	21,02	15,07	11,32									42,4	3,2
42,4	4	202,7	168,4	104,5	59,70	36,98	24,89	17,84	13,39									42,4	4
48,3	2	122,2	107,4	75,64	47,34	30,38	20,77	15,01	11,33	8,85								48,3	2
48,3	2,5	151,1	132,4	92,69	57,69	36,93	25,23	18,22	13,75	10,73								48,3	2,5
48,3	2,6	156,8	137,3	96,01	59,69	38,19	26,08	18,84	14,22	11,10								48,3	2,6
48,3	3	179,3	156,7	109,0	67,47	43,09	29,41	21,23	16,01	12,50								48,3	3
48,3	3,2	190,4	166,3	115,3	71,23	45,45	31,00	22,38	16,88	13,17								48,3	3,2
48,3	4	233,8	203,2	139,5	85,41	54,31	36,98	26,67	20,11	15,69								48,3	4
60,3	2	153,9	142,5	112,4	79,96	54,86	38,69	28,43	21,67	17,03	13,72	11,29						60,3	2
60,3	2,5	190,7	176,3	138,7	98,17	67,16	47,30	34,73	26,46	20,79	16,75	13,78						60,3	2,5
60,3	2,9	219,6	202,8	159,1	112,2	76,61	53,90	39,55	30,13	23,66	19,06	15,68						60,3	2,9
60,3	3	226,8	209,4	164,1	115,7	78,92	55,51	40,73	31,02	24,36	19,63	16,14						60,3	3
60,3	3,2	241,1	222,4	174,1	122,5	83,48	58,69	43,04	32,78	25,74	20,73	17,05						60,3	3,2
60,3	4	297,1	273,4	212,9	148,7	100,9	70,77	51,84	39,45	30,97	24,94	20,50						60,3	4
60,3	5	364,8	334,5	258,7	179,1	120,8	84,55	61,86	47,04	36,91	29,71	24,41						60,3	5

76,1	2	195,5	188,4	160,1	127,7	96,12	71,42	53,98	41,83	33,23	26,97	22,30	15,96						76,1	2
76,1	2,5	242,8	233,7	198,2	157,7	118,4	87,83	66,31	51,36	40,78	33,10	27,36	19,57						76,1	2,5
76,1	2,9	280,1	269,4	228,2	181,2	135,8	100,6	75,86	58,73	46,62	37,83	31,27	22,36						76,1	2,9
76,1	3	289,4	278,3	235,7	187,0	140,0	103,7	78,20	60,54	48,05	38,99	32,23	23,05						76,1	3
76,1	4	380,5	365,3	308,3	243,3	181,2	133,7	100,7	77,86	61,76	50,08	41,38	29,58						76,1	4
76,1	5	469,1	449,4	378,1	296,7	219,8	161,7	121,5	93,86	74,40	60,30	49,81	35,59						76,1	5
76,1	6	555,0	530,7	444,9	347,2	255,9	187,6	140,7	108,6	86,02	69,69	57,55	41,11						76,1	6
76,1	6,3	580,2	554,5	464,4	361,8	266,2	195,0	146,2	112,8	89,32	72,36	59,75	42,67						76,1	6,3
88,9	2	229,3	225,6	198,0	166,9	133,9	104,2	80,97	63,82	51,24	41,89	34,82	25,08	18,89					88,9	2
88,9	2,5	285,0	280,2	245,6	206,8	165,5	128,5	99,80	78,60	63,08	51,55	42,84	30,85	23,24					88,9	2,5
88,9	3	340,0	334,1	292,6	245,9	196,3	152,3	118,1	92,94	74,55	60,91	50,61	36,44	27,44					88,9	3
88,9	3,2	361,9	355,5	311,2	261,3	208,5	161,6	125,2	98,54	79,03	64,57	53,64	38,62	29,08					88,9	3,2
88,9	4	448,1	439,7	384,3	321,8	255,9	197,8	153,0	120,3	96,39	78,72	65,37	47,04	35,41					88,9	4
88,9	5	553,5	542,4	473,1	394,7	312,5	240,7	185,9	145,9	116,8	95,35	79,16	56,93	42,84					88,9	5
88,9	6	656,3	642,2	558,9	464,8	366,4	281,2	216,7	169,9	135,9	110,9	92,01	66,14	49,76					88,9	6
88,9	6,3	686,6	671,6	584,2	485,2	382,0	292,9	225,6	176,8	141,4	115,3	95,69	68,78	51,73					88,9	6,3
101,6	2	213,0	213,0	193,2	170,8	146,0	120,8	98,19	79,69	65,21	54,00	45,29	33,00	25,04	19,62				101,6	2
101,6	2,5	326,9	326,4	292,3	254,9	213,9	173,6	138,9	111,6	90,67	74,73	62,47	45,33	34,30	26,83				101,6	2,5
101,6	3	390,3	389,5	348,5	303,7	254,4	206,2	164,8	132,2	107,4	88,49	73,95	53,65	40,59	31,74				101,6	3
101,6	3,6	465,5	464,3	415,1	361,2	302,1	244,3	195,0	156,3	126,9	104,5	87,31	63,32	47,89	37,44				101,6	3,6
101,6	4	515,1	513,5	458,9	399,0	333,2	269,1	214,6	172,0	139,5	114,9	95,96	69,57	52,61	41,13				101,6	4
101,6	5	637,3	634,7	566,4	491,3	409,0	329,3	262,0	209,6	169,9	139,8	116,7	84,57	63,94	49,97				101,6	5
101,6	6	756,8	752,9	671,0	580,6	481,8	386,8	307,0	245,3	198,6	163,3	136,3	98,69	74,58	58,28				101,6	6
101,6	6,3	792,2	787,8	701,8	606,9	503,1	403,5	320,1	255,6	206,9	170,1	141,9	102,8	77,65	60,67				101,6	6,3
108	2	224,7	224,7	206,7	184,9	160,9	135,8	112,3	92,32	76,18	63,45	53,44	39,14	29,79	23,38	18,83			108	2
108	2,5	348,0	348,0	315,7	279,0	238,5	197,4	160,5	130,2	106,6	88,25	74,01	53,94	40,92	32,06	25,77			108	2,5
108	3	415,6	415,6	376,6	332,6	283,9	234,6	190,5	154,5	126,4	104,6	87,70	63,89	48,46	37,96	30,52			108	3
108	3,6	495,9	495,9	448,8	395,9	337,4	278,4	225,7	182,9	149,5	123,7	103,7	75,49	57,24	44,83	36,04			108	3,6
108	4	548,9	548,9	496,3	437,5	372,5	307,0	248,7	201,3	164,5	136,1	114,0	83,01	62,94	49,29	39,62			108	4
108	5	679,5	679,5	613,2	539,4	458,1	376,4	304,2	245,9	200,7	165,9	138,9	101,1	76,62	59,99	48,21			108	5
108	6	807,5	807,5	727,1	638,5	540,7	443,0	357,2	288,3	235,0	194,1	162,5	118,2	89,54	70,08	56,31			108	6
108	6,3	845,4	845,4	760,8	667,6	564,9	462,4	372,6	300,6	245,0	202,3	169,4	123,1	93,27	73,00	58,65			108	6,3
114,3	2	236,0	236,0	219,7	198,5	175,2	150,5	126,5	105,3	87,68	73,48	62,15	45,78	34,95	27,50	22,17	18,25		114,3	2
114,3	2,5	368,8	368,8	338,6	302,5	262,7	221,2	182,5	149,8	123,4	102,7	86,47	63,30	48,15	37,79	30,42	25,00		114,3	2,5
114,3	3	440,6	440,6	404,2	360,8	312,9	263,2	216,9	177,8	146,5	121,9	102,5	75,04	57,07	44,78	36,05	29,63		114,3	3
114,3	3,6	525,8	525,8	481,9	429,8	372,2	312,6	257,3	210,7	173,5	144,2	121,3	88,75	67,47	52,94	42,61	35,01		114,3	3,6
114,3	4	582,2	582,2	533,1	475,2	411,2	344,9	283,6	232,1	191,0	158,8	133,5	97,65	74,23	58,23	46,86	38,51		114,3	4
114,3	5	721,1	721,1	659,2	586,6	506,4	423,7	347,7	284,1	233,5	193,9	163,0	119,1	90,51	70,99	57,12	46,93		114,3	5
114,3	6	857,4	857,4	782,3	695,1	598,7	499,6	409,0	333,7	273,9	227,4	191,0	139,5	105,9	83,07	66,83	54,90		114,3	6
114,3	6,3	897,8	897,8	818,7	727,0	625,8	521,8	426,9	348,1	285,7	237,1	199,1	145,4	110,4	86,56	69,63	57,20		114,3	6,3

d	t	$N_{b,Rd}$ (kN)															d	t
mm	mm	L_{cr} (m)															mm	mm
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10	

Taulukko 11.2.7 Pyöreiden pituussaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2) *jatkuu*



d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

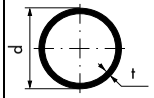
Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d mm	t mm	$N_{b.Rd}$ (kN) L_{cr} (m)																	d mm	t mm
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10			
127	2	258,1	258,1	245,2	225,0	203,1	179,5	155,4	132,6	112,6	95,64	81,69	60,94	46,87	37,05	29,97	24,73		127	2
127	2,5	332,8	332,8	315,0	288,3	259,3	228,1	196,4	166,8	141,1	119,5	101,9	75,81	58,22	45,97	37,17	30,65		127	2,5
127	3	490,8	490,8	459,7	417,4	371,0	321,5	272,5	228,4	191,2	160,8	136,4	100,8	77,08	60,72	49,00	40,35		127	3
127	4	649,2	649,2	607,1	550,6	488,7	422,6	357,5	299,1	250,0	210,1	178,1	131,5	100,5	79,17	63,88	52,60		127	4
127	5	804,9	804,9	751,7	680,9	603,3	520,6	439,6	367,2	306,6	257,4	218,0	160,9	122,9	96,78	78,07	64,27		127	5
127	6	957,9	957,9	893,3	808,3	715,0	615,7	518,9	432,7	360,8	302,7	256,2	188,9	144,3	113,6	91,59	75,39		127	6
127	6,3	1003	1003	935,3	846,0	747,9	643,7	542,1	451,8	376,6	315,9	267,3	197,0	150,5	118,4	95,52	78,62		127	6,3
133	2	268,4	268,4	256,9	237,1	215,8	192,8	169,0	145,8	124,9	106,9	91,76	68,90	53,20	42,16	34,16	28,22		133	2
133	2,5	346,5	346,5	330,6	304,4	276,1	245,6	214,1	183,9	156,9	133,8	114,6	85,83	66,16	52,37	42,41	35,01		133	2,5
133	3	514,6	514,6	485,9	443,9	398,2	349,1	299,6	253,7	214,0	181,0	154,1	114,5	87,81	69,30	56,01	46,17		133	3
133	4	680,8	680,8	642,1	586,0	525,0	459,4	393,5	332,6	280,2	236,8	201,5	149,5	114,7	90,47	73,09	60,24		133	4
133	5	844,5	844,5	795,3	725,2	648,8	566,7	484,5	408,9	344,0	290,4	246,9	183,1	140,4	110,7	89,43	73,69		133	5
133	6	1005	1005	945,7	861,5	769,6	671,0	572,5	482,4	405,4	341,9	290,5	215,3	164,9	130,0	105,0	86,53		133	6
133	6,3	1053	1053	990,3	901,8	805,3	701,7	598,4	504,0	423,3	357,0	303,3	224,7	172,1	135,7	109,6	90,27		133	6,3
139,7	3	541,1	541,1	515,1	473,5	428,5	380,0	330,1	282,7	240,5	204,8	175,1	130,9	100,8	79,71	64,52	53,25		139,7	3
139,7	4	716,2	716,2	681,0	625,5	565,4	500,5	434,1	371,1	315,4	268,2	229,3	171,2	131,7	104,2	84,30	69,56		139,7	4
139,7	5	888,7	888,7	844,1	774,6	699,3	618,1	535,2	456,8	387,7	329,4	281,4	209,9	161,4	127,6	103,3	85,18		139,7	5
139,7	6	1058	1058	1004	920,7	830,3	732,7	633,3	539,7	457,4	388,3	331,5	247,1	189,9	150,1	121,4	100,1		139,7	6
139,7	6,3	1109	1109	1052	964,0	869,0	766,5	662,1	564,0	477,9	405,6	346,1	257,9	198,2	156,6	126,7	104,5		139,7	6,3
139,7	8	1390	1390	1316	1204	1083	952,9	820,7	697,2	589,5	499,5	425,8	316,9	243,3	192,2	155,4	128,1		139,7	8
139,7	10	1711	1711	1616	1476	1325	1161	996,7	844,0	711,9	602,2	512,7	380,9	292,2	230,6	186,4	153,6		139,7	10
152,4	3	479,3	479,3	466,0	434,7	401,7	366,1	328,4	290,3	253,9	220,9	192,1	146,7	114,4	91,24	74,26	61,53		152,4	3
152,4	4	783,2	783,2	754,9	700,0	641,4	578,2	511,9	446,4	385,6	332,2	286,6	216,7	167,9	133,4	108,3	89,56		152,4	4
152,4	5	972,4	972,4	936,4	867,7	794,4	715,2	632,3	550,6	475,1	408,8	352,5	266,2	206,2	163,7	132,9	109,9		152,4	5
152,4	6	1159	1159	1115	1033	944,4	849,3	749,7	651,9	561,8	483,0	416,1	313,9	243,1	192,9	156,5	129,4		152,4	6
152,4	6,3	1214	1214	1168	1081	988,9	888,9	784,4	681,7	587,3	504,7	434,8	327,9	253,8	201,5	163,5	135,1		152,4	6,3
159	3	497,4	497,4	486,5	455,6	423,2	388,5	351,6	313,7	276,8	242,7	212,3	163,5	128,2	102,5	83,61	69,38		159	3
159	4	818,1	818,1	793,3	738,6	680,7	618,3	552,5	486,3	423,6	367,4	318,6	242,5	188,7	150,3	122,2	101,2		159	4
159	5	1016	1016	984,3	916,0	843,5	765,4	683,0	600,3	522,4	452,6	392,2	298,2	231,9	184,6	150,1	124,3		159	5
159	6	1211	1211	1173	1090	1003	909,5	810,5	711,5	618,3	535,2	463,5	352,0	273,6	217,8	177,0	146,5		159	6
159	6,3	1269	1269	1228	1142	1051	952,2	848,2	744,2	646,6	559,4	484,4	367,8	285,8	227,4	184,8	153,0		159	6,3

168,3	3	522,5	522,5	515,0	484,6	453,0	419,4	383,6	346,4	309,3	274,0	241,8	188,5	148,8	119,6	97,89	81,41	168,3	3				
168,3	3,2	562,1	562,1	553,7	520,7	486,5	450,1	411,2	370,9	330,8	292,8	258,1	201,0	158,6	127,4	104,2	86,64	168,3	3,2				
168,3	4	867,2	867,2	847,3	792,9	735,9	674,6	609,6	543,0	478,4	418,8	366,0	281,4	220,3	176,1	143,6	119,1	168,3	4				
168,3	4,5	972,6	972,6	950,0	888,8	824,5	755,6	682,3	607,5	534,9	468,0	408,8	314,2	245,9	196,5	160,2	132,9	168,3	4,5				
168,3	5	1077	1077	1052	983,9	912,5	835,8	754,4	671,2	590,6	516,6	451,1	346,4	271,1	216,6	176,6	146,4	168,3	5				
168,3	6	1285	1285	1254	1172	1086	994,0	896,2	796,4	700,0	611,6	533,7	409,4	320,1	255,7	208,4	172,8	168,3	6				
168,3	6,3	1347	1347	1314	1228	1138	1041	938,1	833,4	732,3	639,6	558,0	427,9	334,5	267,2	217,7	180,5	168,3	6,3				
168,3	8	1692	1692	1648	1539	1425	1302	1171	1038	910,2	793,8	691,5	529,4	413,4	330,0	268,7	222,8	168,3	8				
168,3	10	2089	2089	2032	1895	1752	1597	1434	1268	1109	965,5	839,8	641,6	500,5	399,2	324,9	269,2	168,3	10				
193,7	4	1001	1001	995,0	940,9	885,4	826,8	764,4	699,0	632,3	567,2	506,0	400,8	319,7	258,6	212,5	177,3	193,7	4				
193,7	5	1245	1245	1236	1169	1099	1026	948,0	866,1	782,8	701,6	625,4	494,8	394,4	318,9	262,0	218,5	193,7	5				
193,7	6	1486	1486	1475	1394	1311	1222	1129	1030	930,4	833,1	742,0	586,4	467,0	377,4	310,0	258,4	193,7	6				
193,7	6,3	1558	1558	1546	1461	1373	1281	1182	1079	974,0	871,9	776,5	613,4	488,4	394,7	324,1	270,2	193,7	6,3				
193,7	8	1960	1960	1944	1836	1724	1606	1481	1349	1216	1087	967,0	762,4	606,3	489,5	401,8	334,8	193,7	8				
193,7	10	2424	2424	2401	2266	2126	1978	1821	1657	1491	1330	1181	929,1	737,8	595,2	488,1	406,6	193,7	10				
193,7	12,5	2989	2989	2956	2787	2612	2427	2230	2024	1817	1618	1434	1125	891,6	718,4	588,8	490,2	193,7	12,5				
219,1	4	909,9	909,9	909,9	880,5	839,6	797,4	753,1	706,5	657,8	607,8	557,8	463,2	381,9	315,8	263,4	222,1	219,1	4				
219,1	4,5	1274	1274	1274	1222	1160	1096	1029	957,4	883,5	808,5	734,9	600,0	488,5	400,5	332,1	278,8	219,1	4,5				
219,1	5	1412	1412	1412	1354	1285	1214	1139	1060	977,8	894,5	812,8	663,2	539,7	442,4	366,8	307,9	219,1	5				
219,1	6	1687	1687	1687	1616	1534	1448	1358	1263	1164	1064	966,5	787,7	640,5	524,7	434,9	364,9	219,1	6				
219,1	6,3	1769	1769	1769	1694	1608	1518	1423	1323	1220	1115	1012	824,5	670,2	549,0	455,0	381,8	219,1	6,3				
219,1	8	2228	2228	2228	2131	2022	1908	1787	1660	1528	1395	1265	1029	835,0	683,3	565,9	474,6	219,1	8				
219,1	10	2759	2759	2759	2635	2498	2355	2204	2045	1880	1714	1552	1259	1020	834,1	690,3	578,7	219,1	10				
219,1	12,5	3408	3408	3408	3249	3077	2898	2709	2510	2303	2096	1894	1532	1240	1012	836,7	701,0	219,1	12,5				
244,5	6	1888	1888	1888	1837	1756	1672	1585	1493	1397	1298	1198	1006	836,0	695,5	582,5	492,4	244,5	6				
244,5	8	2496	2496	2496	2426	2318	2206	2090	1967	1839	1707	1574	1318	1094	908,6	760,4	642,5	244,5	8				
244,5	10	3094	3094	3094	3004	2868	2729	2583	2429	2269	2103	1937	1619	1341	1113	930,5	785,7	244,5	10				
244,5	12,5	3826	3826	3826	3710	3540	3366	3183	2990	2789	2582	2375	1979	1636	1356	1132	955,6	244,5	12,5				
273	4	1097	1097	1097	1097	1055	1016	976,2	935,2	892,4	847,9	801,8	707,2	614,3	529,0	454,5	391,4	273	4				
273	5	1418	1418	1418	1409	1359	1307	1255	1200	1143	1084	1023	897,5	775,8	665,3	569,8	489,5	273	5				
273	6	2114	2114	2114	2086	2005	1922	1838	1749	1656	1560	1461	1262	1075	910,8	773,0	659,7	273	6				
273	6,3	2217	2217	2217	2187	2102	2016	1927	1834	1736	1635	1531	1322	1126	953,9	809,4	690,7	273	6,3				
273	8	2797	2797	2797	2758	2650	2540	2427	2308	2185	2056	1924	1659	1410	1194	1012	863,1	273	8				
273	10	3470	3470	3470	3418	3283	3146	3004	2856	2701	2540	2374	2044	1735	1466	1242	1059	273	10				
273	12,5	4297	4297	4297	4227	4059	3887	3709	3524	3330	3128	2921	2508	2125	1793	1517	1292	273	12,5				
323,9	4	1262	1262	1262	1262	1243	1207	1170	1132	1094	1054	1013	926,2	836,4	746,8	661,7	584,0	323,9	4				
323,9	5	1641	1641	1641	1641	1613	1564	1515	1464	1413	1359	1304	1187	1067	948,8	837,1	736,2	323,9	5				
323,9	6	2022	2022	2022	2022	1982	1921	1859	1796	1731	1663	1594	1447	1296	1148	1010	886,3	323,9	6				
323,9	6,3	2136	2136	2136	2136	2093	2029	1963	1896	1826	1755	1680	1525	1365	1208	1062	930,9	323,9	6,3				
323,9	8	3335	3335	3335	3335	3242	3133	3023	2910	2793	2671	2545	2282	2017	1763	1534	1334	323,9	8				
323,9	10	4142	4142	4142	4142	4023	3888	3750	3608	3462	3309	3151	2823	2491	2175	1890	1642	323,9	10				
323,9	12,5	5136	5136	5136	5136	4984	4814	4642	4465	4281	4090	3892	3481	3067	2674	2321	2015	323,9	12,5				

d	t	$N_{b,Rd}$ (kN)																d	t
mm	mm	L_{cr} (m)																mm	mm
		0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	6	7	8	9	10		

Taulukko 11.2.8 Pyöreiden kierresaumahitsattujen rakenneputkien nurjahduskestävyydet teräslajille S420MH (f_y = 420 N/mm^2)
(Tekniset toimitusehdot sovittava tilauskohtaisesti)



d = halkaisija
t = seinämän paksuus
L_{cr} = nurjahduspituus
$N_{b.Rd}$ = nurjahduskestävyys

Lasketut kestävyydet ovat mitoitusarvoja (luku 2), joissa on käytetty kestävyyden osavarmuusluvuille Eurocode 3:n (EN 1993) suositusarvoja γ_{M0} = 1,0 ja γ_{M1} = 1,0 **(poikkileikkausluokan 4 pyöreät rakenneputket γ_{M1} = 1,1)**. Osavarmuuslukujen arvot voivat vaihdella eri maissa. Maakohtaiset arvot on tarkastettava kyseisen maan kansallisesta liitteestä (= NA, National Annex).

d	t	$N_{b.Rd}$ (kN)																	d	t
mm	mm	L_{cr} (m)																	mm	mm
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16		
406,4	6,3	2596	2596	2596	2491	2366	2237	2100	1957	1807	1655	1506	1363	1231	1111	1004	908,0	823,5	406,4	6,3
406,4	8	3408	3408	3408	3259	3091	2917	2732	2538	2336	2132	1933	1744	1571	1415	1275	1152	1043	406,4	8
406,4	10	5230	5230	5222	4952	4676	4387	4079	3755	3423	3093	2778	2486	2223	1990	1785	1607	1451	406,4	10
406,4	12,5	6497	6497	6482	6145	5800	5437	5052	4647	4231	3819	3427	3065	2739	2450	2197	1977	1784	406,4	12,5
457	6,3	2862	2862	2862	2796	2676	2554	2427	2293	2153	2008	1861	1715	1574	1441	1317	1203	1101	457	6,3
457	8	3774	3774	3774	3675	3513	3347	3174	2992	2802	2605	2406	2211	2023	1846	1683	1535	1401	457	8
457	10	5898	5898	5898	5688	5415	5134	4837	4525	4199	3867	3536	3217	2917	2642	2394	2171	1973	457	10
457	12	7046	7046	7046	6790	6464	6125	5769	5394	5003	4603	4207	3825	3467	3139	2842	2577	2341	457	12
457	12,5	7331	7331	7331	7064	6724	6371	6001	5610	5202	4786	4373	3975	3603	3261	2953	2677	2432	457	12,5
508	6,3	3119	3119	3119	3090	2974	2858	2737	2613	2482	2346	2206	2064	1922	1783	1650	1524	1407	508	6,3
508	8	4130	4130	4130	4080	3923	3764	3600	3429	3250	3064	2872	2679	2487	2300	2122	1955	1801	508	8
508	10	5326	5326	5326	5247	5040	4830	4613	4386	4149	3902	3649	3394	3143	2900	2669	2455	2257	508	10
508	12,5	8172	8172	8172	7991	7653	7307	6947	6569	6174	5765	5348	4935	4533	4153	3799	3474	3179	508	12,5
559	6,3	3364	3364	3364	3364	3259	3147	3033	2915	2793	2665	2534	2398	2260	2123	1987	1855	1728	559	6,3
559	8	4475	4475	4475	4475	4318	4164	4007	3845	3677	3501	3319	3133	2944	2756	2572	2395	2226	559	8
559	10	5788	5788	5788	5788	5567	5364	5155	4940	4715	4481	4239	3992	3742	3494	3253	3022	2803	559	10
559	12,5	9014	9014	9014	8917	8580	8238	7886	7519	7136	6738	6327	5911	5496	5092	4706	4342	4004	559	12,5
610	8	4807	4807	4807	4807	4699	4550	4399	4244	4084	3918	3747	3569	3388	3204	3020	2839	2663	610	8
610	10	6238	6238	6238	6238	6080	5881	5680	5473	5259	5037	4807	4570	4328	4083	3840	3601	3370	610	10
610	12,5	9855	9855	9855	9844	9507	9167	8821	8463	8090	7703	7301	6890	6473	6058	5652	5261	4889	610	12,5
610	14,2	11163	11163	11163	11147	10764	10379	9985	9578	9155	8714	8258	7790	7317	6846	6385	5941	5520	610	14,2
660	8	5122	5122	5122	5122	5061	4915	4769	4620	4467	4310	4147	3978	3805	3628	3449	3269	3091	660	8
660	10	6667	6667	6667	6667	6568	6374	6179	5979	5774	5562	5343	5117	4884	4646	4407	4168	3932	660	10
660	12,5	8607	8607	8607	8607	8457	8201	7943	7679	7407	7125	6834	6533	6224	5910	5594	5279	4971	660	12,5
660	14,2	12100	12100	12100	12100	11796	11412	11023	10623	10209	9780	9335	8876	8407	7934	7462	7000	6552	660	14,2
711	8	5432	5432	5432	5432	5432	5275	5133	4989	4842	4692	4537	4377	4212	4043	3871	3696	3521	711	8
711	10	7093	7093	7093	7093	7053	6863	6672	6479	6282	6079	5869	5653	5431	5203	4970	4736	4501	711	10
711	12,5	9180	9180	9180	9180	9106	8854	8602	8345	8083	7812	7533	7245	6948	6644	6336	6025	5715	711	12,5
711	14,2	13056	13056	13056	13056	12849	12466	12079	11685	11279	10859	10425	9977	9516	9046	8573	8101	7637	711	14,2

d mm	t mm	$N_{b,Rd}$ (kN) L_{cr} (m) 0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	d mm	t mm
762	8	5731	5731	5731	5731	5731	5621	5483	5344	5202	5058	4910	4758	4601	4440	4276	4108	3937	762	8
762	10	7507	7507	7507	7507	7507	7338	7152	6964	6773	6578	6377	6170	5958	5739	5516	5288	5058	762	10
762	12,5	9741	9741	9741	9741	9741	9493	9245	8995	8740	8479	8211	7935	7650	7357	7059	6755	6449	762	12,5
762	14,2	11265	11265	11265	11265	11265	10960	10670	10377	10078	9772	9457	9132	8797	8453	8102	7746	7388	762	14,2
813	8	6019	6019	6019	6019	6019	5956	5821	5685	5549	5410	5268	5122	4973	4820	4663	4502	4338	813	8
813	10	7910	7910	7910	7910	7910	7800	7618	7435	7249	7060	6867	6669	6465	6256	6041	5822	5600	813	10
813	12,5	10290	10290	10290	10290	10290	10118	9874	9630	9382	9129	8870	8603	8330	8049	7760	7466	7168	813	12,5
813	14,2	11914	11914	11914	11914	11914	11697	11411	11124	10833	10536	10231	9918	9595	9264	8925	8579	8229	813	14,2
813	16	13636	13636	13636	13636	13636	13370	13039	12707	12369	12024	11670	11307	10932	10548	10154	9752	9346	813	16
914	10	8674	8674	8674	8674	8674	8674	8502	8327	8151	7972	7791	7607	7418	7226	7028	6826	6619	914	10
914	12,5	11341	11341	11341	11341	11341	11341	11079	10843	10606	10366	10122	9873	9618	9357	9089	8815	8536	914	12,5
914	14,2	13163	13163	13163	13163	13163	13163	12836	12559	12280	11997	11709	11415	11114	10806	10489	10166	9835	914	14,2
914	16	15096	15096	15096	15096	15096	15021	14699	14377	14053	13724	13389	13047	12697	12337	11969	11592	11207	914	16
1016	10	9403	9403	9403	9403	9403	9403	9346	9177	9008	8839	8668	8494	8318	8138	7955	7768	7577	1016	10
1016	12,5	12357	12357	12357	12357	12357	12357	12242	12014	11786	11556	11323	11088	10849	10604	10354	10099	9838	1016	12,5
1016	14,2	14376	14376	14376	14376	14376	14376	14220	13951	13681	13410	13135	12856	12572	12283	11986	11684	11374	1016	14,2
1016	16	16521	16521	16521	16521	16521	16521	16319	16005	15691	15375	15055	14730	14398	14060	13714	13360	12999	1016	16
1219	10	10728	10728	10728	10728	10728	10728	10728	10728	10569	10413	10257	10100	9942	9782	9621	9457	9291	1219	10
1219	12,5	14245	14245	14245	14245	14245	14245	14245	14245	13978	13764	13549	13333	13115	12895	12672	12446	12216	1219	12,5
1219	14,2	16654	16654	16654	16654	16654	16654	16654	16563	16308	16054	15798	15541	15282	15020	14754	14484	14209	1219	14,2
1219	16	19215	19215	19215	19215	19215	19215	19215	19081	18783	18485	18186	17885	17581	17274	16962	16644	16322	1219	16

Liite 11.3 Ristikkoliitosten laskentataulukot

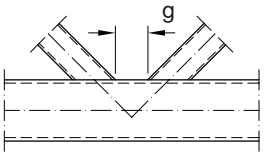
Tässä liitteessä on esitetty tasoristikkorakenteiden yleisimmin esiintyvien liitosten laskentakaavoja, jotka perustuvat pääosin Eurocoden osaan EN 1993-1-8 [1,2,3]. Taulukoihin on lisätty myös muiden lähteiden mukaisia arvoja [4,5]. Lisää erilaisia liitostyyppejä löytyy kyseisistä lähteistä.

Taulukko	Liitostyyppi	Paarre	Uumasauva
11.3.1	T-, Y- ja X-liitos	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.2	Vapaavälinen N-, K- ja KT-liitos	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.3	Limitetty N-, K- ja KT-liitos	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.4	T-, Y- ja X-liitos	Pyöreä	Pyöreä
11.3.5	Vapaavälinen N-, K- ja KT-liitos	Pyöreä	Pyöreä
11.3.6	Limitetty N-, K- ja KT-liitos	Pyöreä	Pyöreä
11.3.7	Vapaavälinen N- ja K-liitos sekä T-, Y- ja X-liitos	I-profiili	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.8	Limitetty N- ja K-liitos	I-profiili	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.9	T-liitos taivutuskestävyys	I-profiili	Neliö Suorakaide
11.3.10	T- liitos taivutuskestävyys	Neliö Suorakaide	I-profiili
11.3.11	T- ja X-liitos taivutuskestävyys	Neliö Suorakaide	Neliö Suorakaide
11.3.12	T-, Y- ja X-liitos taivutuskestävyys	Pyöreä	Pyöreä
11.3.13	T- ja X-liitos taivutuskestävyys	Pyöreä	Neliö Suorakaide
11.3.14	Polviliitos taivutuskestävyys	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.15	Levyn liitos	Neliö Suorakaide	Levy
11.3.16	Levyn liitos	Pyöreä	Levy
11.3.17	T-, Y-, ja X-liitos paarteen pinta vahvistettu	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.18	T-, Y-, ja X-liitos paarteen uuma vahvistettu	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.19	Vapaavälinen N-, K- ja KT-liitos paarteen pinta vahvistettu	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.20	Vapaavälinen N-, K- ja KT-liitos paarteen uuma vahvistettu	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide
11.3.21	Limitetty N-, K- ja KT-liitos välilevyllä vahvistettuna	Neliö Suorakaide	Pyöreä Neliö Suorakaide

Merkinnät

A_i	on uumasauvan poikkipinta-ala
A_{vp}	on vahvistetuissa liitoksissa paarteen uuman vahvikelevyn leikkauspinta-ala
A_{v0}	on paarteen leikkauspinta-ala
A_0	on paarteen poikkipinta-ala
E	on teräksen kimmokerroin
$M_{ip.i.Ed}$	on liitoksen tasossa (in-plane) uumasauvassa vaikuttavan taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{ip.i.Rd}$	on liitoskestävyyden mukainen uumasauvan taivutuskestävyyden mitoitusarvo liitoksen tasossa vaikuttavalle taivutusmomentille
$M_{op.i.Ed}$	on liitoksen tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa (out-of-plane) uumasauvassa vaikuttavan taivutusmomentin mitoitusarvo
$M_{op.i.Rd}$	on liitoskestävyyden mukainen uumasauvan taivutuskestävyyden mitoitusarvo liitoksen tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa vaikuttavalle taivutusmomentille
$M_{pl,Rd}$	on poikkileikkauksen plastisen taivutuskestävyyden mitoitusarvo
$M_{0,Ed}$	on paarteessa vaikuttavan taivutusmomentin mitoitusarvo
N_{Ed}	on poikkileikkauksessa vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{i,Ed}$	on uumasauvassa vaikuttavan normaalivoiman mitoitusarvo
$N_{i,Rd}$	on liitoksen normaalivoimakestävyyden mitoitusarvo
$N_{p,Ed}$	on paarteen itseisarvoltaan pienempi (vasen / oikea) normaalivoiman mitoitusarvo (käytetään liitoskestävyyttä laskettaessa, kun paarteena on pyöreä rakenneputki)
$N_{pl.Rd}$	on poikkileikkauksen plastisen kestävyyden mitoitusarvo
$N_{0,Ed}$	on paarteen itseisarvoltaan suurempi (vasen / oikea) normaalivoiman mitoitusarvo (käytetään liitoskestävyyttä laskettaessa, kun paarteena on muu kuin pyöreä rakenneputki)
$N_{0,gap.Rd}$	on paarteen kestävyys normaalivoimalle vapaavälin kohdalla (käytetään kun paarteena on neliön tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki)
V_{Ed}	on poikkileikkauksessa vaikuttavan leikkausvoiman mitoitusarvo
$V_{pl.Rd}$	on poikkileikkauksen plastisen leikkauskestävyyden mitoitusarvo
$W_{el.i}$	on uumasauvan kimmoinen taivutusvastus
$W_{el.0}$	on paarteen kimmoinen taivutusvastus
$W_{pl.i}$	on uumasauvan plastinen taivutusvastus
$W_{pl.0}$	on paarteen plastinen taivutusvastus
b_i	on uumasauvan leveys
b_0	on paarteen leveys
b_{eff}	on uumasauvan tehollinen leveys sen liittyessä paarteeseen
$b_{e.ov}$	on limittävän (eli päällä olevan) uumasauvan tehollinen leveys sen liittyessä limitettyyn (alla olevaan) uumasauvaan
$b_{e.p}$	on uumasauvan tehollinen leveys paarteen pinnan lävistysleikkautumiskestävyyttä laskettaessa
b_p	on vahvikelevyn leveys
b_w	on paarteen uuman tehollinen leveys, kun paarteena on I-profiili
d_i	on pyöreän uumasauvan halkaisija
d_0	on pyöreän paarteen halkaisija
e	on liitoksen epäkeskeisyys
f_b	on paarteen uuman nurjahduslujuus
f_{yi}	on uumasauvan nimellinen myötölujuus
f_{yk}	on paarteen uuman pienennetty myötölujuuden mitoitusarvo eräissä liitoksissa
f_{y0}	on paarteen nimellinen myötölujuus

g on liitoksen vapaaväli



h_i on uumasauvan korkeus
h_w on I-profiilin uuman korkeus
h_0 on paarteen korkeus, kun paarteena on rakenneputki tai I-profiili
i on uumasauvan numero (1,2,3)
k_g on vapaavälisten ja limitettyjen liitosten kestävyyden lisäpienennyskerroin, kun paarteena on pyöreä rakenneputki
k_m on liitoksen kestävyyden pienennyskerroin eräissä liitoksissa, joissa käytetään levyä tai I-profiilia
k_n on liitoksen kestävyyden pienennyskerroin, kun liitoksen kaikki sauvat ovat rakenneputkia ja paarteena on neliön tai suorakaiteen muotoinen rakenneputki
k_p on liitoksen kestävyyden pienennyskerroin, kun paarteena on pyöreä rakenneputki
m on liitoksen uumasauvojen lukumäärä
n on neliön ja suorakaiteen muotoisten paarteiden N_{0Ed}:n ja $M_{0.Ed}$:n aiheuttaman puristusjännityksen suhde myötölujuuden mitoitusarvoon
n_p on pyöreiden paarteiden $N_{p.Ed}$:n ja $M_{0.Ed}$:n aiheuttaman puristusjännityksen suhde myötölujuuden mitoitusarvoon
p_{eff} on uumasauvan tehollinen leveys sen liittyessä paarteeseen, kun paarteena on I-profiili
r on valssatun I-profiilin laipan ja uuman välinen pyöristyssäde (hitsatuilla I-profiileilla korvataan arvolla $\sqrt{2}a$, missä a on kaulahitsin a-mitta)
t_f on I-profiilin laipan paksuus
t_i on uumasauvan seinämänpaksuus
t_0 on paarteen seinämänpaksuus
t_p on vahvikelevyn paksuus
t_w on I-profiilin uuman paksuus
α on liitoksessa paarteen leikkauspinta-alan laskennassa käytettävä parametri
β on uumasauvan halkaisijan tai leveyden suhde paarteen halkaisijaan tai leveyteen. Uumasauvan mitat lasketaan keskiarvona, jos liitoksessa on useita uumasauvoja:

T-, Y- ja X-liitokset:

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} \; ; \; \frac{d_1}{b_0} \text{ tai } \frac{b_1}{b_0}$$

N-, K- ja KT-liitokset:

$$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_0}$$

missä m on uumasauvojen lukumäärä:
N- ja K-liitos: m = 2
KT-liitos: m = 3

β_p on levyllä vahvistetuissa liitoksissa uumasauvan leveyden suhde vahvikelevyn leveyteen
$\beta_p = b_i / b_p$

γ on puolet paarteen leveyden suhteesta paarteen seinämän paksuuteen
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$ tai
$= 0{,}5\, b_0 / t_0$ tai
$= 0{,}5\, b_0 / t_f$

γ_{M0} on sauvan kestävyyden osavarmuusluku

γ_{M5} on ristikkoliitosten kestävyyden osavarmuusluku

η on uumasauvan korkeuden suhde paarteen leveyteen
$\eta = h_i / b_0$

η_p on levyllä vahvistetussa liitoksessa uumasauvan korkeuden suhde vahvikelevyn leveyteen
$\eta_p = h_i / b_p$

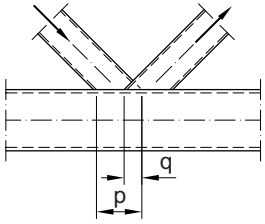
κ on polviliitoksen kestävyyden parametri, kun liitoskulma on θ

κ_{90} on polviliitoksen kestävyyden parametri, kun liitoskulma on $\theta = 90°$

$\overline{\lambda}$ on paarteen uuman suhteellinen hoikkuus nurjahdukselle

λ_{ov} on limitetyn liitoksen limitysaste

$$\lambda_{ov} = \frac{q}{p} \cdot 100\ \% = \frac{q \cdot \sin\theta_i}{h_i} \cdot 100\ \%$$



$\lambda_{ov.lim}$ on limitetyn liitoksen limitysasteen yläraja

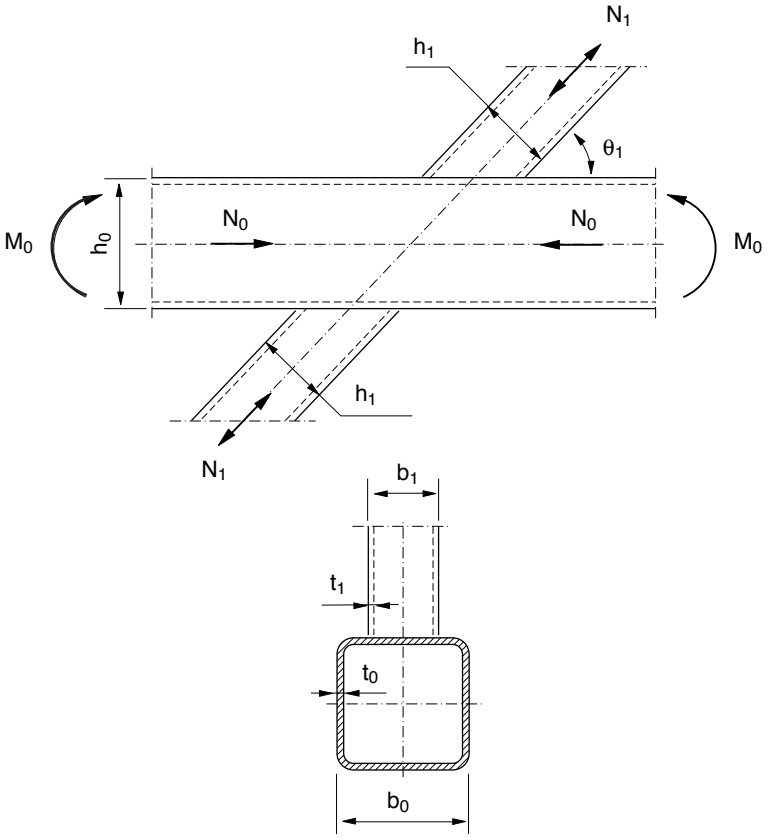
θ_i on uumasauvan ja paarteen välinen pienempi kulma

Tämän liitteen kaikissa taulukoissa pätevät seuraavat rajoitukset
(ellei taulukkokohtaisesti toisin määritetä):

- $t_0 \geq 2{,}5$ mm
- $t_i \geq 2{,}5$ mm
- $\theta_i \geq 30°$ (koskee myös uumasauvojen välistä kulmaa)
- $-0{,}55 \geq e/h_0 \leq 0{,}25$ tai $-0{,}55 \leq e/d_0 \leq 0{,}25$
- $L_i \geq 6h_i$ tai $6d_i$
- paarteiden poikkileikkauksen on kuuluttava poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 (määritettynä tasaisen puristuksen mukaan)
- puristetun uumasauvan poikkileikkauksen on kuuluttava poikkileikkausluokkaan 1 tai 2 (määritettynä tasaisen puristuksen mukaan)
- uumasauvojen päät eivät saa olla litistettyjä

Lisäksi taulukoissa on liitostyypistä riippuen lisäehtoja.

Taulukko 11.3.1 T-, Y- ja X-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">$\beta \le 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="11">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$

Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$b_i / b_0 \ge 0{,}25$
$b_i / t_i \le 35$
$h_i / t_i \le 35$
$0{,}5 \le h_i / b_i \le 2{,}0$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Pyöreät uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}4 \le d_i / b_0 \le 0{,}8$
- vedetty uumasauva:
$d_i / t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)

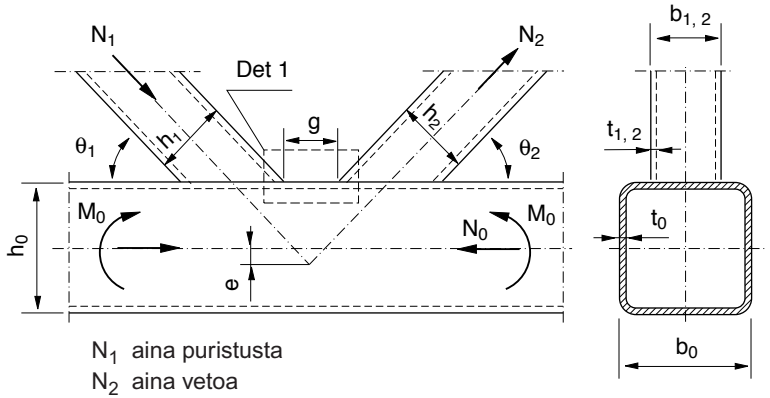
Paarteet:
$b_0 / t_0 \le 35$
$h_0 / t_0 \le 35$
$0{,}5 \le h_0 / b_0 \le 2{,}0$
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1-\beta)\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2\eta}{\sin\theta_i} + 4\sqrt{1-\beta}\right) / \gamma_{M5}$</td><td>$\beta = b_i / b_0$
$\eta = h_i / b_0$

vedetty paarre:
$k_n = 1{,}0$

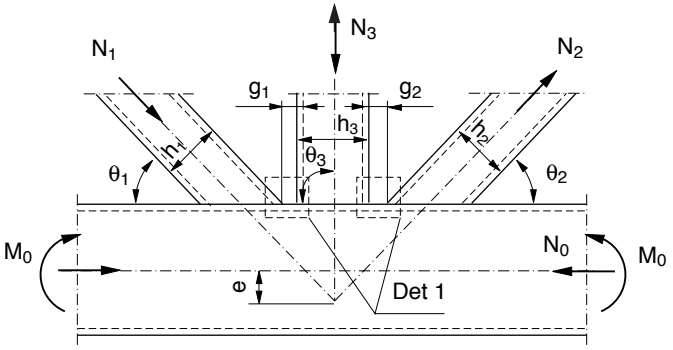
puristettu paarre:
$k_n = 1{,}3 - \dfrac{0{,}4\,|n|}{\beta} \le 1{,}0$
$n = \dfrac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \dfrac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$0{,}85 < \beta < 1{,}0$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Käytetään lineaarista interpolointia seuraavien arvojen välillä:
- paarteen pinnan myötääminen kun $\beta = 0{,}85$
- määräävin seuraavista: paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen kun $\beta = 1{,}0$, tai taulukossa 11.3.2 esitetty paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\beta = 1{,}0$, paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen [a)]</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{k_n \cdot f_b \cdot t_0}{\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2h_i}{\sin\theta_i} + 10t_0\right) / \gamma_{M5}$</td><td>vedetty paarre:
$f_b = f_{y0}$

puristettu paarre:
$f_b = \chi \cdot f_{y0}$ (T- ja Y-liitokset)
$f_b = 0{,}8\,\chi \cdot f_{y0} \cdot \sin\theta_i$ (X-liitokset)
χ = nurjahduksen pienennyskerroin nurjahdusluokassa c, kun hoikkuus on:
$\bar{\lambda} = 3{,}46 \cdot \dfrac{\left(\dfrac{h_0}{t_0} - 2\right) \cdot \sqrt{\dfrac{1}{\sin\theta_i}}}{\pi \cdot \sqrt{\dfrac{E}{f_{y0}}}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$0{,}85 \le \beta \le (1 - 1/\gamma)$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2h_i}{\sin\theta_i} + 2b_{e.p}\right) / \gamma_{M5}$</td><td>$b_{e.p} = \dfrac{10}{b_0 / t_0} b_i \le b_i$
$\gamma = \dfrac{b_0}{2t_0}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\beta \ge 0{,}85$, uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$</td><td>$b_{eff} = \dfrac{10}{b_0 / t_0} \cdot \dfrac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi / 4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i .</td></tr>
<tr><td colspan="2">a) X-liitokselle, joille $\cos\theta_t > h_i / h_0$ käytetään pienempää seuraavista arvoista: tämä arvo tai taulukossa 11.3.2 vapaavälisille N- ja K-liitoksille esitetty paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo.</td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.2 N-, K- ja KT-ristikoiden vapaavälisten liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia

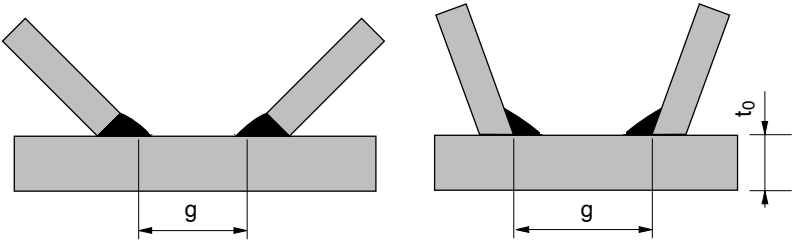


N_1 aina puristusta
N_2 aina vetoa
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima



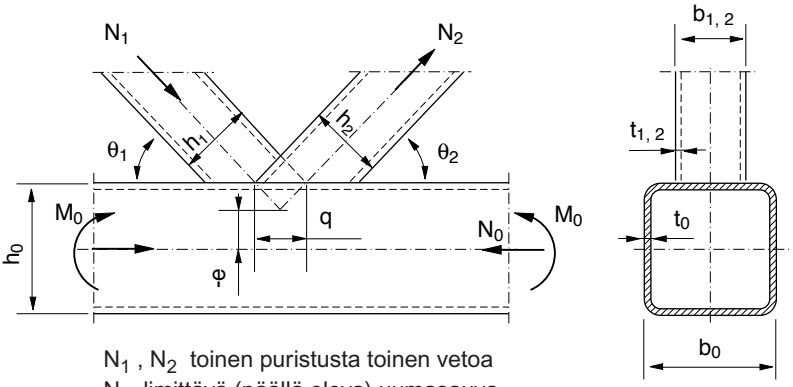
Det 1

$\theta \leq 60°$ $\theta > 60°$

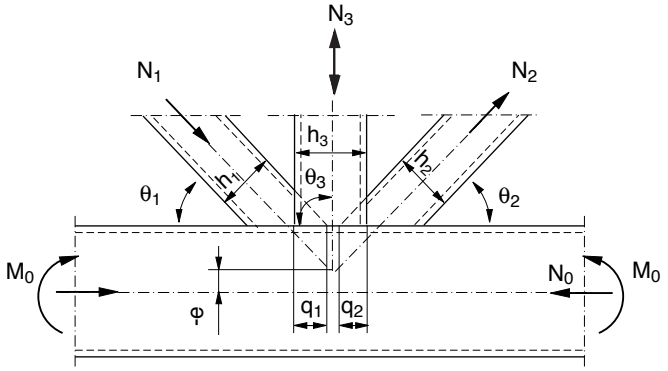


Kestävyys [i = 1 tai 2]	Parametrit	Voimassaoloehdot
N- ja K-liitos: Paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ $-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$ Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i/b_0 \ge 0{,}35$ $b_i/b_0 \ge 0{,}1+0{,}01b_0/t_0$ $0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$ $b_i/t_i \le 35$ $h_i/t_i \le 35$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i/b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i/t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0/t_0 \le 35$ $h_0/t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0/b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Vapaaväli: $g \ge t_1 + t_2$ $g/b_0 \ge 0{,}5(1-\beta)$ $g/b_0 \le 1{,}5(1-\beta)$ [a] KT-liitoksessa ehdot tarkastetaan erikseen kummankin vapaavälin osalta.
$N_{i.Rd} = \frac{8{,}9 \cdot k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_0} \right) / \gamma_{M5}$	$\beta = \frac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_0}$ m on uumasauvojen lukumäärä $\gamma = 0{,}5\, b_0/t_0$ vedetty paarre: $k_n = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_n = 1{,}3 - \frac{0{,}4\,\lvert n \rvert}{\beta} \le 1{,}0$ $n = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$	
N- ja K-liitos: Paarteen leikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3}\sin\theta_i} / \gamma_{M5}$ $N_{0.gap.Rd} = \frac{\left((A_0 - A_{v0}) f_{y0} + A_{v0} f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} \right)^2} \right)}{\gamma_{M5}}$	$A_{v0} = (2h_0 + \alpha b_0) t_0$ $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}$ $\alpha = 0$ kun pyöreät uumasauvat V_{Ed} on paarteen leikkausvoima vapaavälin kohdalla $V_{pl.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}}$	
N- ja K-liitos: $\beta \le (1 - 1/\gamma)$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e.p} \right) / \gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i \le b_i$	
N- ja K-liitos: Uumasauvan myötääminen		
$N_{i.Rd} = f_{yi}\, t_i\, (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.		
KT-liitos: - Jokaisen kolmen uumasauvan osalta tarkastetaan mitoitusehto: $N_{i.Rd} \ge N_{i.Ed}$ (i = 1,2,3) - Uumasauvojen kestävyydet lasketaan tarkastelemalla vierekkäisiä sauvoja pareittain N-liitoksena seuraavasti: A) uumasauvat 1 & 3 B) uumasauvat 2 & 3 Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa vetoa, sen kestävyys lasketaan tapauksesta A. Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa puristusta, sen kestävyys lasketaan tapauksesta B.		
a) Jos $g/b_0 > 1{,}5(1-\beta)$ ja $g \ge t_1 + t_2$ liitosta käsitellään kahtena erillisenä T- tai Y-liitoksena.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.3 N-, K- ja KT- ristikoiden limitettyjen liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



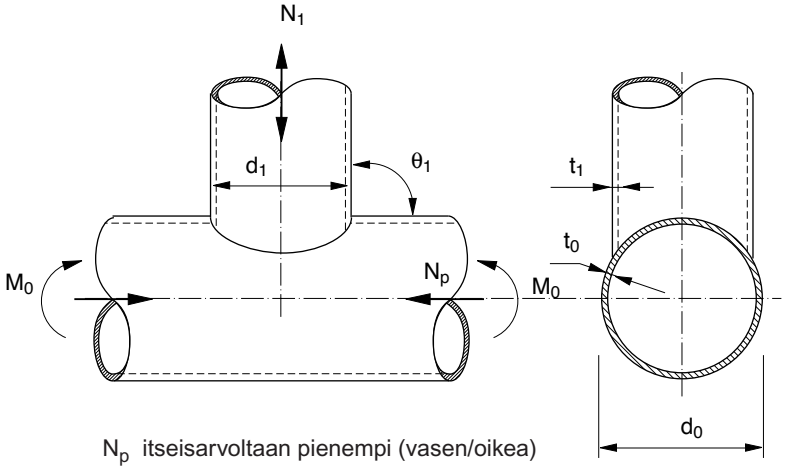
N_1 , N_2 toinen puristusta toinen vetoa
N_1 limittävä (päällä oleva) uumasauva
N_2 limitetty (alla oleva) uumasauva
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima



N_1 , N_2 toinen puristusta toinen vetoa
N_1 , N_2 limittävät (päällä olevat) uumasauvat
N_3 limitetty (alla oleva) uumasauva
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima

Kestävyys [i = 1 tai 2]	Parametrit	Voimassaoloehdot
25 % ≤ λ_{ov} < 50 % , uumasauvan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ $-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$ Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i/b_0 \ge 0{,}25$ $0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$ - vedetty uumasauva: $b_i/t_i \le 35$ $h_i/t_i \le 35$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) - N- ja K-liitos: $0{,}75 \le b_1/b_2 \le 1{,}0$ $(t_1 f_{y1}) / (t_2 f_{y2}) \le 1{,}0$ - KT-liitos: $0{,}75 \le b_1/b_3 \le 1{,}0$ $(t_1 f_{y1}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$ $0{,}75 \le b_2/b_3 \le 1{,}0$ $(t_2 f_{y2}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$ Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i/b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i/t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) - N- ja K-liitos: $0{,}75 \le d_1/d_2 \le 1{,}0$ $(t_1 f_{y1}) / (t_2 f_{y2}) \le 1{,}0$ - KT-liitos: $0{,}75 \le d_1/d_3 \le 1{,}0$ $(t_1 f_{y1}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$ $0{,}75 \le d_2/d_3 \le 1{,}0$ $(t_2 f_{y2}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$ Paarteet: $b_0/t_0 \le 35$ $h_0/t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0/b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Limitysaste: 25 % ≤ $\lambda_{ov} \le \lambda_{ov.lim}$ a)
N- ja K-liitos: $N_{1.Rd} = f_{y1}\, t_1 \left(b_{eff} + b_{e.ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} \cdot 2h_1 - 4t_1 \right) / \gamma_{M5}$ KT-liitos: $N_{i.Rd} = f_{yi}\, t_i \left(b_{eff} + b_{e.ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} \cdot 2h_i - 4t_i \right) / \gamma_{M5}$ (i = 1,2)	N- ja K-liitos: $\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_1}{h_1} \cdot 100\ \%$ $b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 \le b_1$ $b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 \le b_1$ KT-liitos: $\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_i}{h_i}$ $b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$ $b_{e.ov} = \frac{10}{b_3/t_3} \cdot \frac{f_{y3} \cdot t_3}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$ (i = 1,2)	
50 % ≤ λ_{ov} < 80 % , uumasauvan myötääminen		
N- ja K-liitos: $N_{1.Rd} = f_{y1}\, t_1 \cdot (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5}$ KT-liitos: $N_{i.Rd} = f_{yi}\, t_i \cdot (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$ (i = 1,2)		
λ_{ov} ≥ 80 % , uumasauvan myötääminen		
N- ja K-liitos: $N_{1.Rd} = f_{y1}\, t_1 \cdot (b_1 + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5}$ KT-liitos: $N_{i.Rd} = f_{yi}\, t_i \cdot (b_i + b_{e.ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$ (i = 1,2)		
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.		
Uumasauvan 1 (= limittävä uumasauva) kestävyys lasketaan taulukon kaavoilla. **Uumasauvan 2 (= limitetty uumasauva)** kestävyys lasketaan N/K/KT-liitoksissa hyväksikäyttöasteen avulla (liitoksen kestävyyden mitoitusarvo jaettuna poikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisella poikkileikkauskestävyydellä) joka valitaan yhtä suureksi kuin limittävän uumasauvan hyväksikäyttöaste.		
a) Jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ tai jos suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_1 < b_1$ ja/tai $h_2 < b_2$, tulee tarkastaa myös uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta kohdan 7.4.7 ohjeiden mukaisesti: $\lambda_{ov.lim}$ = 60 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen $\lambda_{ov.lim}$ = 80 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.4 T-, Y- ja X-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat pyöreitä rakenneputkia
- uumasauvat ovat pyöreitä rakenneputkia



N_p itseisarvoltaan pienempi (vasen/oikea) paarrevoima

<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">T- ja Y-liitos: Paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="6">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6d_i$

Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}2 \le d_i / d_0 \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$d_i / t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Paarteet:
- T- ja Y-liitos:
$10 \le d_0 / t_0 \le 50$
- X-liitos:
$10 \le d_0 / t_0 \le 40$
- puristettu paarre:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \frac{\gamma^{0,2} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_i}(2{,}8 + 14{,}2\beta^2)/\gamma_{M5}$</td><td>$\beta = d_i / d_0$
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$

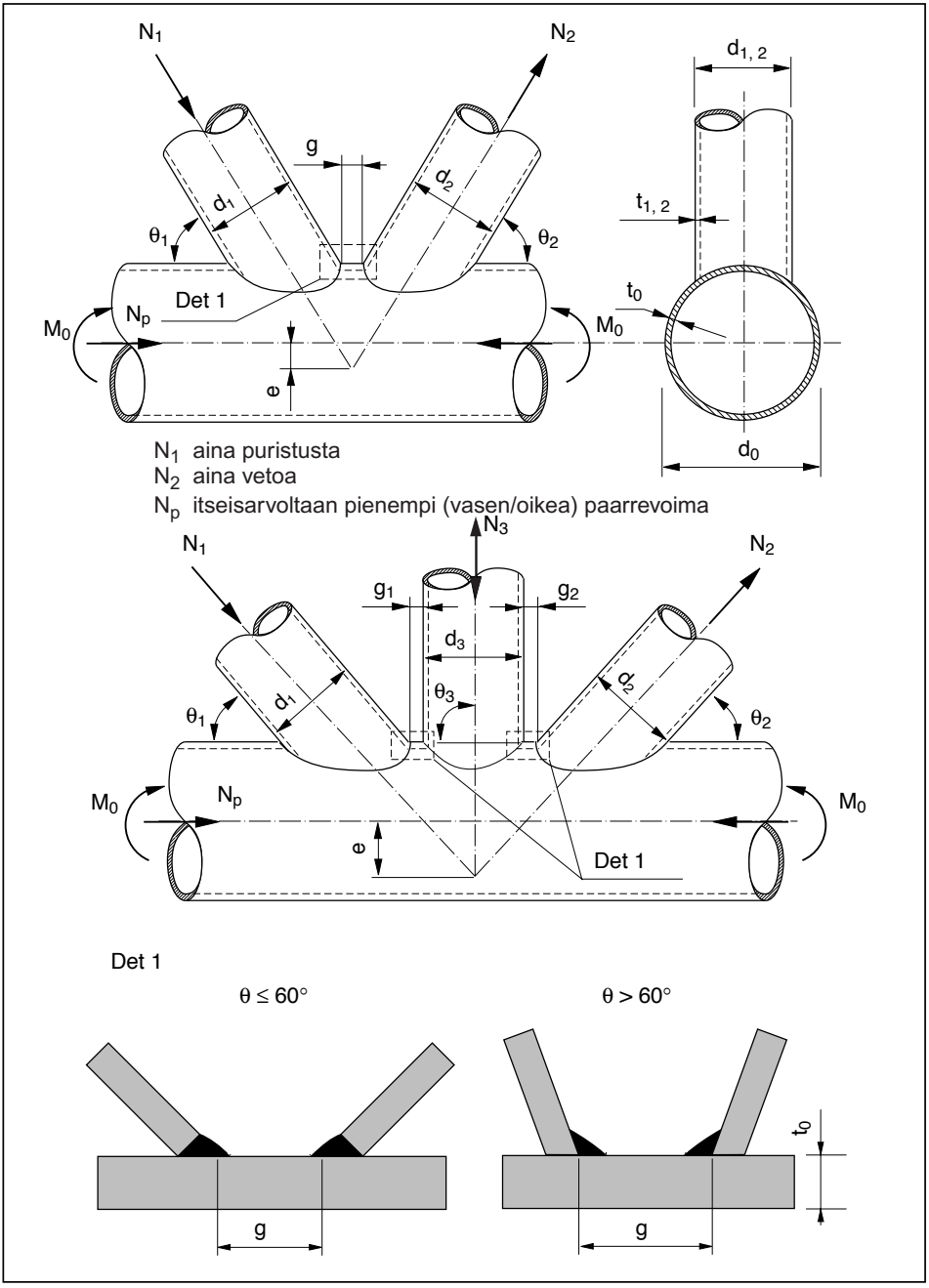
vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3|n_p| - 0{,}3n_p^2 \le 1{,}0$
$n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">X-liitos: Paarteen pinnan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \frac{k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_i} \cdot \frac{5{,}2}{(1 - 0{,}81\beta)}/\gamma_{M5}$</td><td>$\beta = d_i / d_0$
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$

vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3|n_p| - 0{,}3n_p^2 \le 1{,}0$
$n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">T-, Y- ja X-liitos: $d_i \le d_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi d_i \cdot \frac{1 + \sin\theta_i}{2\sin^2\theta_i}/\gamma_{M5}$</td><td></td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td colspan="2">S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.5 N-, K- ja KT-ristikoiden vapaavälisten liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat pyöreitä rakenneputkia
- uumasauvat ovat pyöreitä rakenneputkia



<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1 tai 2]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">N- ja K-liitos: Paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="5">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6 d_i$
$-0{,}55 \le e / d_0 \le 0{,}25$

Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}2 \le d_i / d_0 \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$d_i / t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Paarteet:
- paarteet yleisesti:
$10 \le d_0 / t_0 \le 50$
- puristettu paarre:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

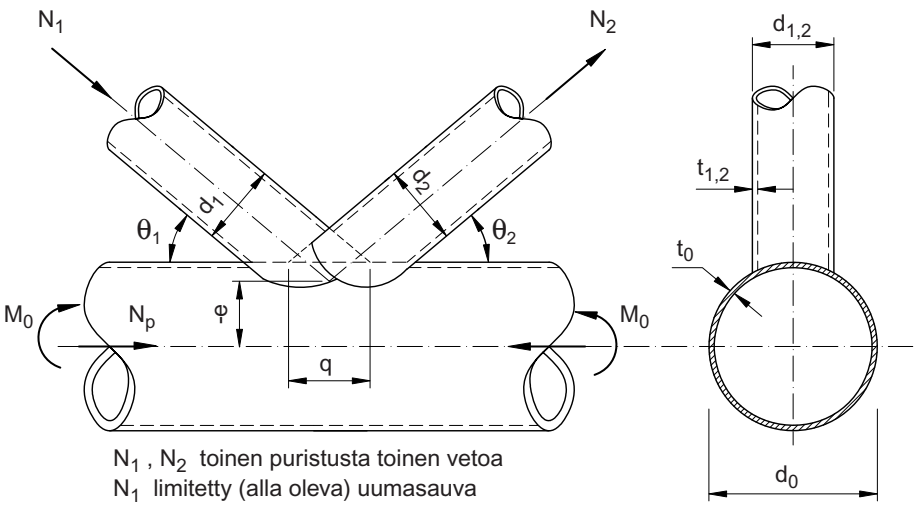
Vapaaväli:
$g \ge t_1 + t_2$</td></tr>
<tr><td>Uumasauva 1 (= puristettu uumasauva):
$N_{1.Rd} = \frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1} \cdot \left(1{,}8 + 10{,}2 \frac{d_1}{d_0}\right) / \gamma_{M5}$

Uumasauva 2 (= vedetty uumasauva):
$N_{2.Rd} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \cdot N_{1.Rd}$</td><td>$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0{,}024 \cdot \gamma^{1,2}}{\left(\frac{g}{2t_0} - 1{,}33\right)}\right)^{1+e}$
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$

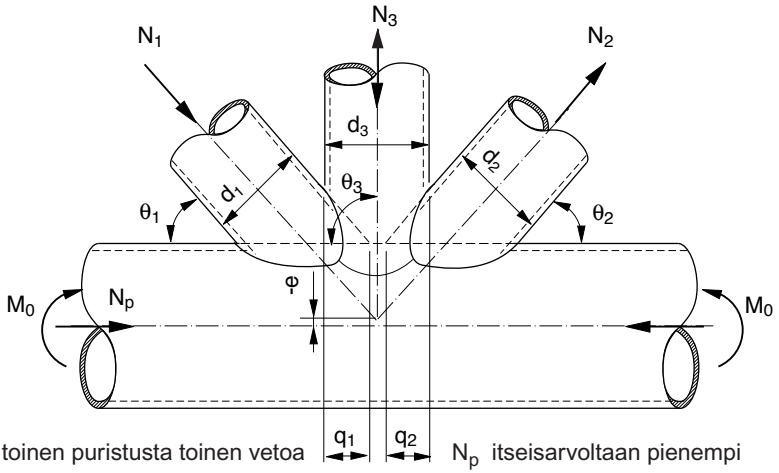
vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3|n_p| - 0{,}3 n_p^2 \le 1{,}0$
$n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">N- ja K-liitos: $d_i \le d_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi d_i \cdot \frac{1 + \sin\theta_i}{2\sin^2\theta_i} / \gamma_{M5}$</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">KT-liitos:
- Jokaisen kolmen uumasauvan osalta tarkastetaan mitoitusehto:
$N_{i.Rd} \ge N_{i.Ed}$ (i = 1,2,3)
- Uumasauvojen kestävyydet lasketaan tarkastelemalla vierekkäisiä sauvoja pareittain N-liitoksena seuraavasti:
A) uumasauvat 1 & 3
B) uumasauvat 2 & 3
Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa vetoa, sen kestävyys lasketaan tapauksesta A.
Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa puristusta, sen kestävyys lasketaan tapauksesta B.</td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td><td></td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.6 N-, K-, ja KT-ristikoiden limitettyjen liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat pyöreitä rakenneputkia
- uumasauvat ovat pyöreitä rakenneputkia



N_1 , N_2 toinen puristusta toinen vetoa
N_1 limitetty (alla oleva) uumasauva
N_2 limittävä (päällä oleva) uumasauva
N_p itseisarvoltaan pienempi (vasen/oikea) paarrevoima



N_1 , N_2 toinen puristusta toinen vetoa
N_1 , N_2 limittävät (päällä olevat) uumasauvat
N_3 limitetty (alla oleva) uumasauva
N_p itseisarvoltaan pienempi (vasen/oikea) paarrevoima

<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1 tai 2]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">Paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="4">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6 d_i$
$-0{,}55 \le e / d_0 \le 0{,}25$

Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}2 \le d_i / d_0 \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$d_i / t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
- N- ja K-liitos:
$0{,}75 \le d_1 / d_2 \le 1{,}0$
$(t_1 f_{y1}) / (t_2 f_{y2}) \le 1{,}0$
- KT-liitos:
$0{,}75 \le d_1 / d_3 \le 1{,}0$
$(t_1 f_{y1}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$
$0{,}75 \le d_2 / d_3 \le 1{,}0$
$(t_2 f_{y2}) / (t_3 f_{y3}) \le 1{,}0$

Paarteet:
- paarteet yleisesti:
$10 \le d_0 / t_0 \le 50$
- puristettu paarre:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Limitysaste:
$25\ \% \le \lambda_{ov} \le \lambda_{ov.lim}$ a)</td></tr>
<tr><td>Uumasauva 1 (= limitetty uumasauva):
$N_{1.Rd} = \frac{k_g \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{\sin\theta_1} \cdot \left(1{,}8 + 10{,}2 \frac{d_1}{d_0}\right) / \gamma_{M5}$

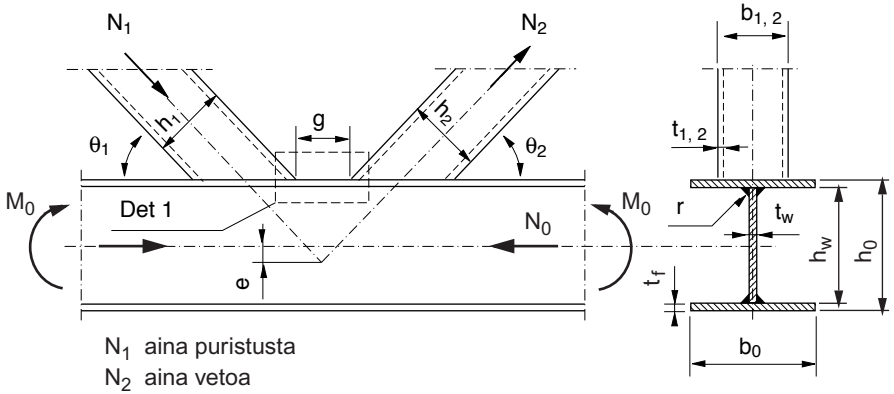
Uumasauva 2 (= limittävä uumasauva):
$N_{2.Rd} = \frac{\sin\theta_1}{\sin\theta_2} \cdot N_{1.Rd}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_2}{d_2} \cdot 100\ \%$

$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0{,}024 \cdot \gamma^{1,2}}{\left(\frac{-q}{2t_0} - 1{,}33\right)}\right) \Big/ (1 + e)$
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$

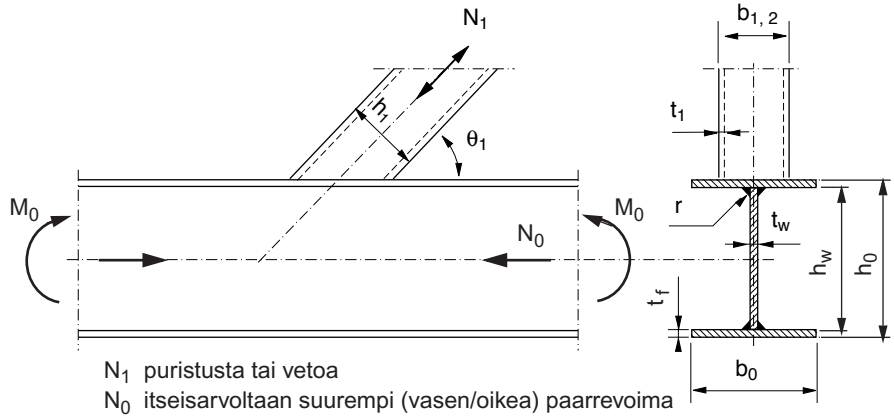
vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3|n_p| - 0{,}3 n_p^2 \le 1{,}0$
$n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">KT-liitos:
- Jokaisen kolmen uumasauvan osalta tarkastetaan mitoitusehto:
$N_{i.Rd} \ge N_{i.Ed}$ (i = 1,2,3)
- Uumasauvojen kestävyydet lasketaan tarkastelemalla vierekkäisiä sauvoja pareittain N-liitoksena seuraavasti:
A) N-liitos uumasauvat 1 & 3
B) N-liitos uumasauvat 2 & 3
Uumasauvan 3 (= limitetty uumasauva) kestävyyden määrää tapauksista A ja B se, kummasta saadaan pienempi kestävyys.</td></tr>
<tr><td colspan="2">a) Jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ tai jos suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_1 < b_1$ ja/tai $h_2 < b_2$, tulee tarkastaa myös uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta kohdan 7.4.7 ohjeiden mukaisesti:
$\lambda_{ov.lim}$ = 60 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen
$\lambda_{ov.lim}$ = 80 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.7 T-, Y- ja X-liitosten sekä vapaavälisten N- ja K- liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat I-profiileja
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia

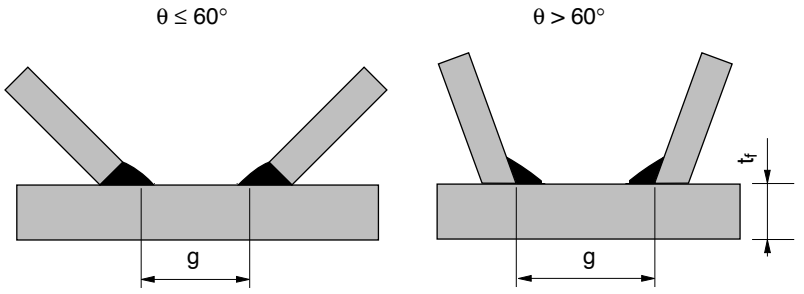


N_1 aina puristusta
N_2 aina vetoa
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima



N_1 puristusta tai vetoa
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima

Det 1



<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1 tai 2]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">T-, Y- ja X-liitokset: Paarteen uuman myötääminen</td><td rowspan="20">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$
$-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$

T-, Y-, N- ja K-liitokset:
- uumasauvat yleisesti:
$h_i/b_i = 1{,}0$
$b_i/t_i \le 35$
$h_i/t_i \le 35$
$d_i/t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)
- paarteet:
uuma:
$h_w \le 400$ mm
uuma ja laipat:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

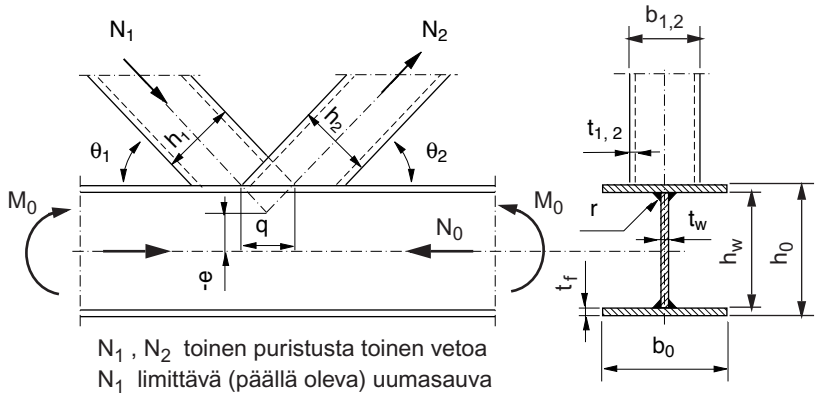
X-liitokset:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$
$b_i/t_i \le 35$
$h_i/t_i \le 35$
$d_i/t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)
- paarteet:
uuma:
$h_w \le 400$ mm
PL-luokka 1
laipat:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Vapaaväli:
$g \ge t_1 + t_2$</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin\theta_i} / \gamma_{M5}$</td><td>$b_w = (h_i / \sin\theta_i) + 5(t_f + r)$
mutta: $b_w \le 2t_i + 10(t_f + r)$</td></tr>
<tr><td colspan="2">T-, Y- ja X-liitokset: Uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = 2 \cdot f_{yi} \cdot t_i \cdot p_{eff} / \gamma_{M5}$</td><td>$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \cdot f_{y0} / f_{yi}$
mutta: $p_{eff} \le b_i + h_i - 2t_i$</td></tr>
<tr><td colspan="2">N- ja K-liitokset: Paarteen uuman myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w}{\sin\theta_i} / \gamma_{M5}$</td><td>$b_w = (h_i / \sin\theta_i) + 5(t_f + r)$
mutta: $b_w \le 2t_i + 10(t_f + r)$</td></tr>
<tr><td colspan="2">N- ja K-liitokset: Uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = 2 \cdot f_{yi} \cdot t_i \cdot p_{eff} / \gamma_{M5}$</td><td>$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \cdot f_{y0} / f_{yi}$
mutta: $p_{eff} \le b_i + h_i - 2t_i$

Kyseistä kestävyyttä ei tarvitse tarkastaa, jos seuraavat ehdot toteutuvat:
$\beta \le 1{,}0 - 0{,}03\gamma$
$g/t_f \le 20 - 28\beta$
$0{,}75 \le b_1/b_2 \le 1{,}33$
$0{,}75 \le d_1/d_2 \le 1{,}33$
missä:
$\beta = \dfrac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_0}$
m on uumasauvojen lukumäärä
$\gamma = 0{,}5\, b_0 / t_f$</td></tr>
<tr><td colspan="2">N- ja K-liitokset: Paarteen leikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3}\sin\theta_i} / \gamma_{M5}$

$N_{0.gap.Rd} = \dfrac{\left((A_0 - A_{v0}) f_{y0} + A_{v0} f_{y0} \sqrt{1 - \left(\dfrac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}}\right)^2}\right)}{\gamma_{M5}}$</td><td>$A_{v0} = A_0 - (2 - \alpha) b_0 t_f + (t_w + 2r) t_f$
$\alpha = \sqrt{\dfrac{1}{1 + \dfrac{4g^2}{3t_f^2}}}$
$\alpha = 0$ kun pyöreät uumasauvat
V_{Ed} on paarteen leikkausvoima vapaavälin kohdalla
$V_{pl.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pyöreillä uumasauvoilla suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i, ja kestävyys uumasauvan myötäämiselle kerrotaan luvulla $\pi/4$.</td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td><td></td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.8 N- ja K-ristikoiden limitettyjen liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat I-profiileja
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



N_1 , N_2 toinen puristusta toinen vetoa
N_1 limittävä (päällä oleva) uumasauva
N_2 limitetty (alla oleva) uumasauva
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima

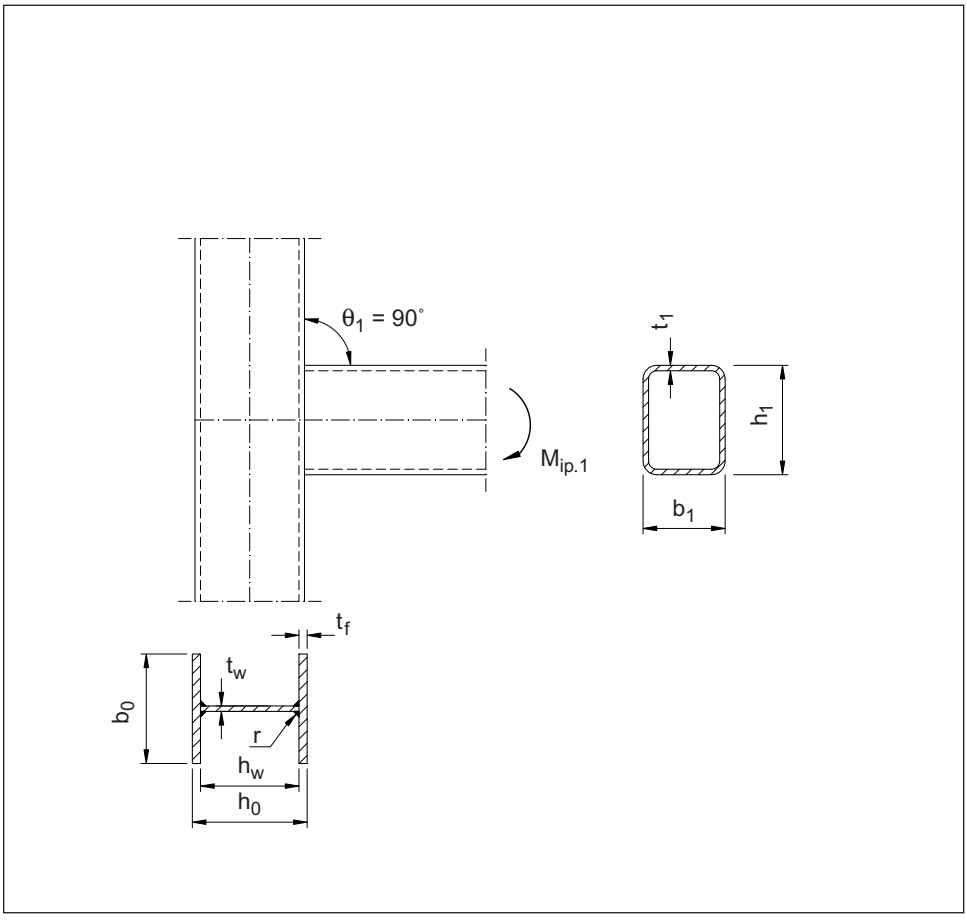
<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">25 % ≤ λ_{ov} < 50 % , uumasauvan myötääminen</td><td rowspan="11">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$
$-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$

Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$
$b_i/t_i \le 35$
$h_i/t_i \le 35$
$d_i/t_i \le 50$
$0{,}75 \le b_1/b_2 \le 1{,}0$
$0{,}75 \le d_1/d_2 \le 1{,}0$
$(t_1 f_{y1}) / (t_2 f_{y2}) \le 1{,}0$
- puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)

Paarteet:
- uuma: $h_w \le 400$ mm
- uuma ja laipat: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

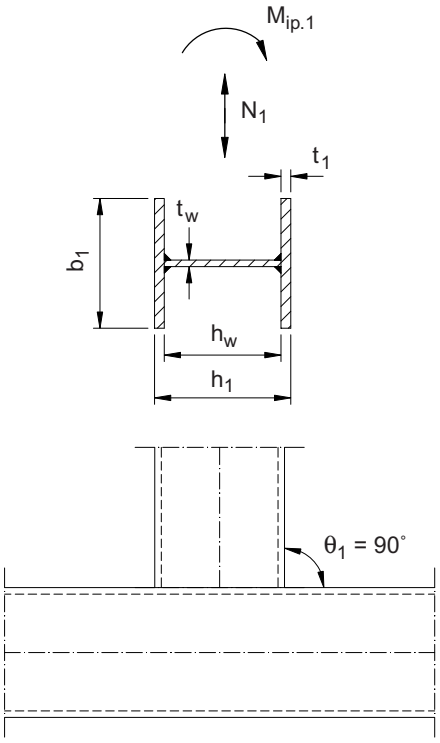
Limitysaste:
25 % ≤ $\lambda_{ov} \le \lambda_{ov.lim}$ a)</td></tr>
<tr><td>$N_{1.Rd} = f_{y1} t_1 \left(p_{eff} + b_{e.ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} \cdot 2h_1 - 4t_1\right) / \gamma_{M5}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_1}{h_1} \cdot 100\ \%$
$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \cdot f_{y0}/f_{y1}$
mutta: $p_{eff} \le b_1 + h_1 - 2t_1$
$b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 \le b_1$</td></tr>
<tr><td colspan="2">50 % ≤ λ_{ov} < 80 % , uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{1.Rd} = f_{y1} t_1 \cdot (p_{eff} + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_1}{h_1} \cdot 100\ \%$
$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f \cdot f_{y0}/f_{y1}$
mutta: $p_{eff} \le b_1 + h_1 - 2t_1$
$b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 \le b_1$</td></tr>
<tr><td colspan="2">$\lambda_{ov} \ge 80$ % , uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{1.Rd} = f_{y1} t_1 \cdot (b_1 + b_{e.ov} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q \cdot \sin\theta_1}{h_1} \cdot 100\ \%$
$b_{e.ov} = \frac{10}{b_2/t_2} \cdot \frac{f_{y2} \cdot t_2}{f_{y1} \cdot t_1} \cdot b_1 \le b_1$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i .</td></tr>
<tr><td colspan="2">Uumasauvan 1 (= limittävä uumasauva) kestävyys lasketaan taulukon kaavoilla.
Uumasauvan 2 (= limitetty uumasauva) kestävyys lasketaan N/K-liitoksissa hyväksikäyttöasteen avulla (liitoksen kestävyyden mitoitusarvo jaettuna poikkileikkauksen plastisuusteorian mukaisella poikkileikkauskestävyydellä) joka valitaan yhtä suureksi kuin limittävän uumasauvan hyväksikäyttöaste.</td></tr>
<tr><td colspan="2">a) Jos $\lambda_{ov} > \lambda_{ov.lim}$ tai jos suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_1 < b_1$ ja/tai $h_2 < b_2$, tulee tarkastaa myös uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta kohdan 7.4.7 ohjeiden mukaisesti:
$\lambda_{ov.lim}$ = 60 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu ei ole hitsattu paarteeseen
$\lambda_{ov.lim}$ = 80 % jos limitetyn uumasauvan piiloon jäävä sivu on hitsattu paarteeseen.</td></tr>
<tr><td colspan="3">Kestävyyden pienennyskerroin: S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.9 T-liitoksen kestävyys taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat I-profiileja
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia



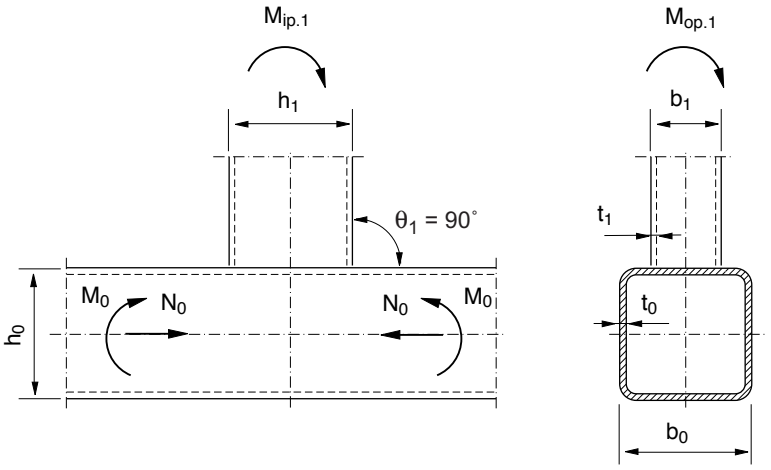
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Uumasauvan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $t_i \geq 2{,}5$ mm $L_i \geq 6h_i$ Uumasauvat: $0{,}5 \leq h_i / b_i \leq 2{,}0$ $b_i / t_i \leq 35$ $h_i / t_i \leq 35$ $d_i / t_i \leq 50$ Paarteet: - uuma: $h_w \leq 400$ mm - uuma ja laipat: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
$M_{ip.1.Rd} = f_{y1} \cdot t_1 \cdot p_{eff} \cdot (h_1 - t_1) / \gamma_{M5}$	$p_{eff} = t_w + 2r + 7t_f f_{y0} / f_{yi}$ mutta: $p_{eff} \leq b_i + h_i - 2t_i$	
Paarteen uuman myötääminen		
$M_{ip.1.Rd} = 0{,}5 \cdot f_{y0} \cdot t_w \cdot b_w \cdot (h_1 - t_1) / \gamma_{M5}$	$b_w = \frac{h_i}{\sin\theta_i} + 5(t_f + r)$ mutta: $b_w \leq 2t_i + 10(t_f + r)$	
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.10 T-liitoksen kestävyys taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat I-profiileja



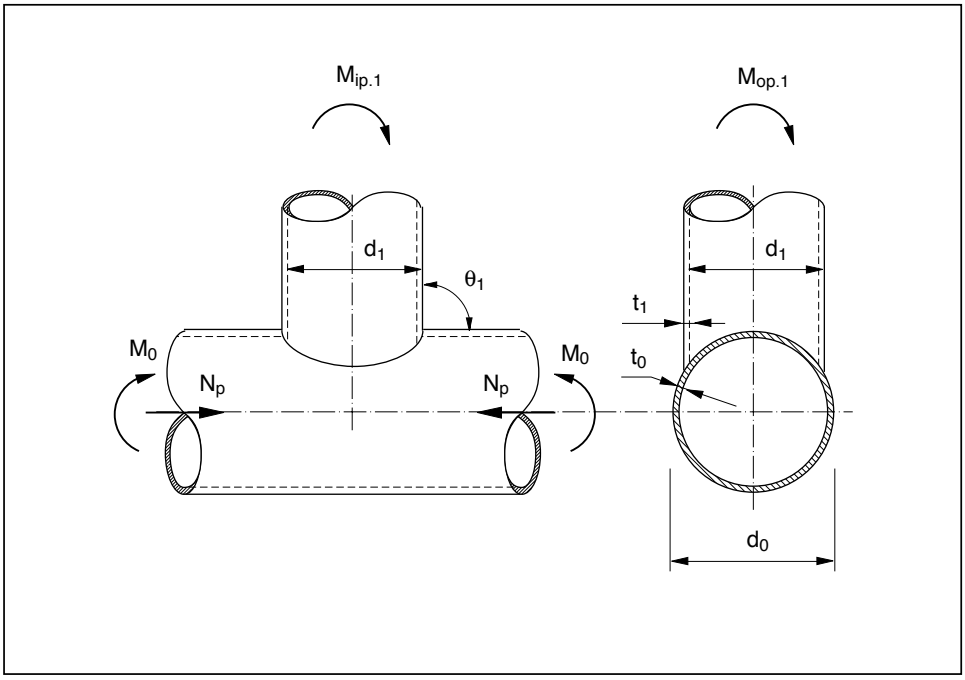
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Kestävyys, kun $\eta \geq 2\sqrt{1-\beta}$ a)		Liitokselle yleisesti: $t_0 \geq 2{,}5$ mm $L_i \geq 6h_i$ Uumasauvat: $h_w \leq 400$ mm $0{,}5 \leq h_i / b_i \leq 2{,}0$ $0{,}5 \leq b_i / b_o \leq 1{,}0$ - uuma ja laipat: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0 / t_0 \leq 30$ $h_0 / t_0 \leq 35$ $0{,}5 \leq h_0 / b_0 \leq 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
$\beta \leq 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen		
$N_{1.Rd} = 2 \cdot k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \frac{2 + 2{,}8\beta}{\sqrt{1 - 0{,}9\beta}} / \gamma_{M5}$	$\beta = b_i / b_0$ $\eta = h_i / b_0$ vedetty paarre: $k_m = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_m = 1{,}3 - 1{,}3\lvert n \rvert \leq 1{,}0$ $n = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$	
$b_1 \leq b_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{1.Rd} = 2 \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}} \cdot (2t_1 + 2b_{e.p}) / \gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \leq b_i$	
$b_1 \geq b_0 - 2t_0$, paarteen uuman myötääminen		
$N_{1.Rd} = 2 \cdot k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot (2t_1 + 10t_0) / \gamma_{M5}$		
Momentti ristikon tasossa		
$M_{ip.1.Rd} = 0{,}5 \cdot N_{1.Rd} \cdot (h_1 - t_1) / \gamma_{M5}$		
a) Kun $0 \leq \eta < 2\sqrt{1-\beta}$, käytetään lineaarista interpolointia seuraavien arvojen välillä: - kun $\eta = 2\sqrt{1-\beta}$, taulukon mukaiset kestävyydet - kun $\eta = 0$, taulukon kestävyydet kerrotaan tekijällä 0,5		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.11 T- ja X-liitosten kestävyydet taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia



Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Momentti ristikon tasossa, $\beta \le 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ Uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i / b_0 \ge 0{,}25$ $b_i / t_i \le 35$ $h_i / t_i \le 35$ $0{,}5 \le h_i / b_i \le 2{,}0$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0 / t_0 \le 35$ $h_0 / t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0 / b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
$M_{ip.1.Rd} = k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot h_1 \cdot \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta}\right) / \gamma_{M5}$	$\beta = b_i / b_0$ $\eta = h_i / b_0$ vedetty paarre: $k_n = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_n = 1{,}3 - \frac{0{,}4\,\lvert n \rvert}{\beta} \le 1{,}0$ $n = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$	
Momentti ristikon tasossa, $0{,}85 < \beta \le 1{,}0$, paarteen uuman myötääminen		
$M_{ip.1.Rd} = 0{,}5 \cdot f_{yk} \cdot t_0 \cdot (h_1 + 5t_0)^2 / \gamma_{M5}$	$f_{yk} = f_{y0}$ (T-liitokset) $f_{yk} = 0{,}8\, f_{y0}$ (X-liitokset)	
Momentti ristikon tasossa, $0{,}85 < \beta \le 1{,}0$, uumasauvan myötääminen		
$M_{ip.1.Rd} = f_{y1} \cdot [W_{pl.1} - (1 - b_{eff}/b_1) b_1 (h_1 - t_1) t_1] / \gamma_{M5}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, $\beta \le 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen		
$M_{op.1.Rd} = k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \left(\frac{h_1(1+\beta)}{2(1-\beta)} + \sqrt{\frac{2b_0 b_1 (1+\beta)}{1-\beta}}\right) / \gamma_{M5}$	$\beta = b_i / b_0$	
Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, $0{,}85 < \beta \le 1{,}0$, paarteen uuman myötääminen		
$M_{op.1.Rd} = f_{yk} \cdot t_0 \cdot (b_0 - t_0)(h_1 + 5t_0) / \gamma_{M5}$	$f_{yk} = f_{y0}$ (T-liitokset) $f_{yk} = 0{,}8\, f_{y0}$ (X-liitokset)	
Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, $0{,}85 < \beta \le 1{,}0$, uumasauvan myötääminen		
$M_{op.1.Rd} = f_{y1} \cdot [W_{pl.1} - 0{,}5(1 - b_{eff}/b_1)^2 b_1^2 t_1] / \gamma_{M5}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa, T-liitokset, paarteen muodon vääristyminen		
$M_{op.1.Rd} = 2 \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot (h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0 t_0 (b_0 + h_0)}) / \gamma_{M5}$		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.12 T-, Y- ja X-liitosten kestävyydet taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat pyöreitä rakenneputkia
- uumasauvat ovat pyöreitä rakenneputkia



<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">Momentti ristikon tasossa,
paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="8">Liitokselle yleisesti:
$30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6 d_i$

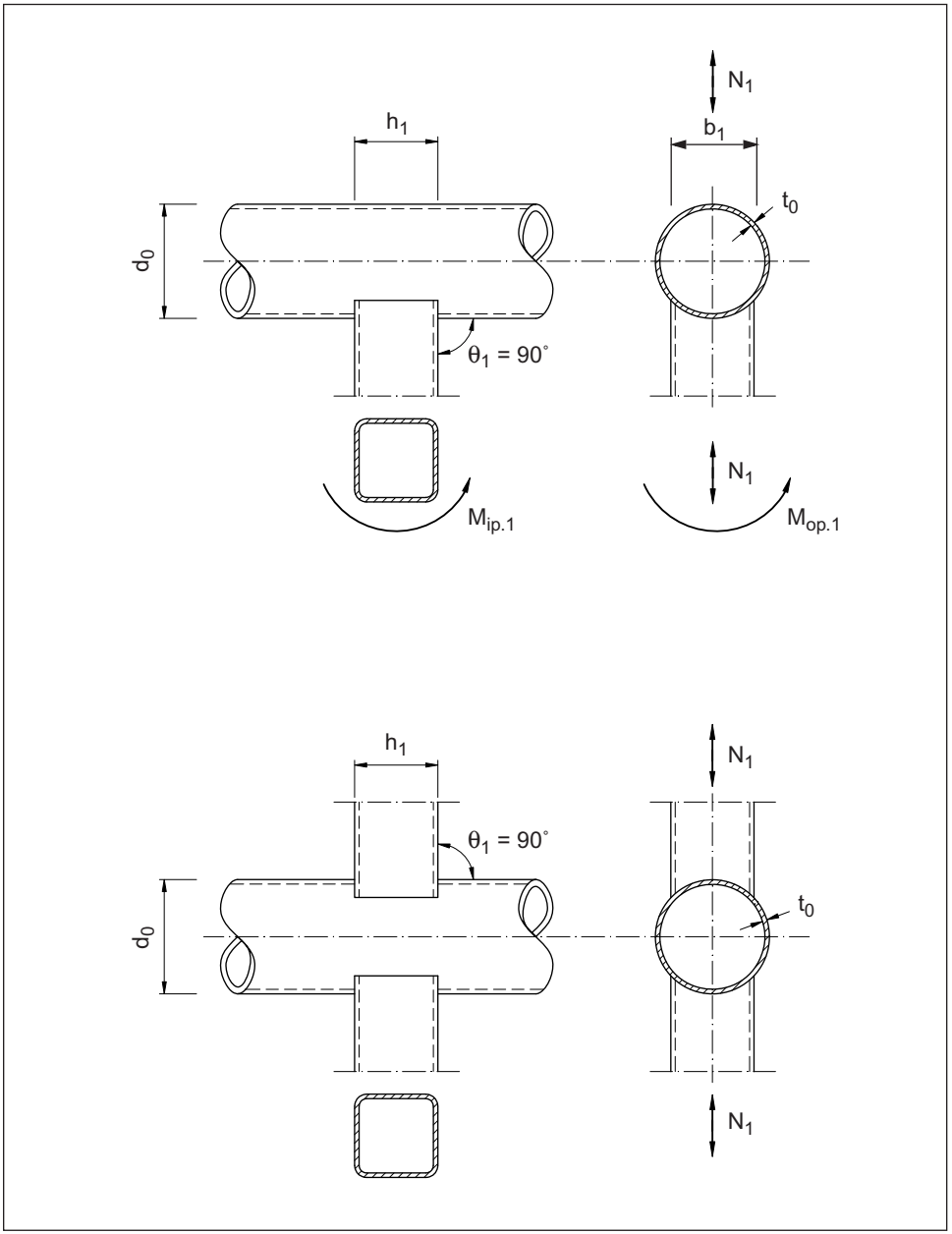
Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}2 \le d_i / d_0 \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$d_i / t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Paarteet:
- T- ja Y-liitos:
$10 \le d_0 / t_0 \le 50$
- X-liitos:
$10 \le d_0 / t_0 \le 40$
- puristettu paarre:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)</td></tr>
<tr><td>$M_{ip.1.Rd} = \dfrac{4{,}85 \cdot \sqrt{\gamma} \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin\theta_1} \cdot \beta / \gamma_{M5}$</td><td>$\beta = d_i / d_0$
$\gamma = 0{,}5\, d_0 / t_0$

vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3\lvert n_p \rvert - 0{,}3 n_p^2 \le 1{,}0$
$n_p = \dfrac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \dfrac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">Momentti ristikon tasossa,
$d_1 \le d_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$M_{ip.1.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_0 \cdot d_1^2}{\sqrt{3}} \cdot \dfrac{1 + 3\sin\theta_1}{4\sin^2\theta_1} / \gamma_{M5}$</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa,
paarteen pinnan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$M_{op.1.Rd} = \dfrac{k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot d_1}{\sin\theta_1} \cdot \dfrac{2{,}7}{1 - 0{,}81\beta} / \gamma_{M5}$</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Momentti ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa suunnassa,
$d_1 \le d_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$M_{op.1.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_0 \cdot d_1^2}{\sqrt{3}} \cdot \dfrac{3 + 3\sin\theta_1}{4\sin^2\theta_1} / \gamma_{M5}$</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.13 T- ja X- liitoksen kestävyys taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat pyöreitä rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia



<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">T-liitos: Paarteen pinnan myötääminen</td><td rowspan="6">Liitokselle yleisesti:
$t_0 \geq 2{,}5$ mm
$t_i \geq 2{,}5$ mm
$L_i \geq 6h_i$

Uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$\beta = b_i / d_0 \geq 0{,}4$
$\eta = h_i / d_0 \leq 4$
$b_i / t_i \leq 35$
$h_i / t_i \leq 35$
$0{,}5 \leq h_i / b_i \leq 2{,}0$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

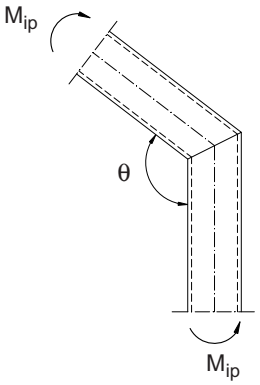
Paarteet:
- T-liitos:
$10 \leq d_0 / t_0 \leq 50$
- X-liitos:
$10 \leq d_0 / t_0 \leq 40$
- puristettu paarre:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)</td></tr>
<tr><td>$N_{1.Rd} = k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (4 + 20\beta^2)(1 + 0{,}25\eta)/\gamma_{M5}$
$M_{ip1.Rd} = N_{1.Rd} \cdot h_1$
$M_{op1.Rd} = 0{,}5 \cdot N_{1.Rd} \cdot b_1$</td><td>$\beta = b_i / d_0$
$\eta = h_i / d_0$

vedetty paarre:
$k_p = 1{,}0$

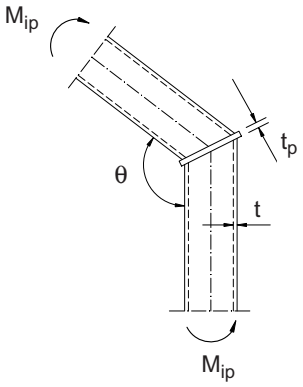
puristettu paarre:
$k_p = 1{,}0 - 0{,}3|n_p| - 0{,}3n_p^2 \leq 1{,}0$
$n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$</td></tr>
<tr><td colspan="2">X-liitos: Paarteen pinnan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{1.Rd} = \frac{5 \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{1 - 0{,}81\beta} \cdot (1 + 0{,}25\eta)/\gamma_{M5}$
$M_{ip1.Rd} = N_{1.Rd} \cdot h_1$
$M_{op1.Rd} = 0{,}5 \cdot N_{1.Rd} \cdot b_1$</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="2">T- ja X-liitos: Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen</td></tr>
<tr><td>$\sigma_{max} \cdot t_1 = \left(\frac{N_{1.Ed}}{A_1} + \frac{M_{1.Ed}}{W_{el.1}}\right) \cdot t_1 \leq \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}}$</td><td></td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td><td></td></tr>
</table>

Taulukko 11.3.14 Polviliitoksen kestävyys taivutuskuormitukselle [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia

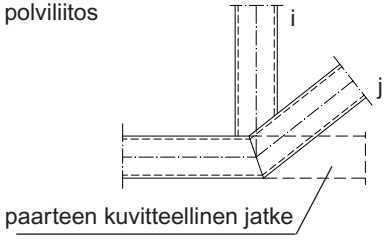
A) Polviliitos



B) Polviliitos vahvikelevyllä

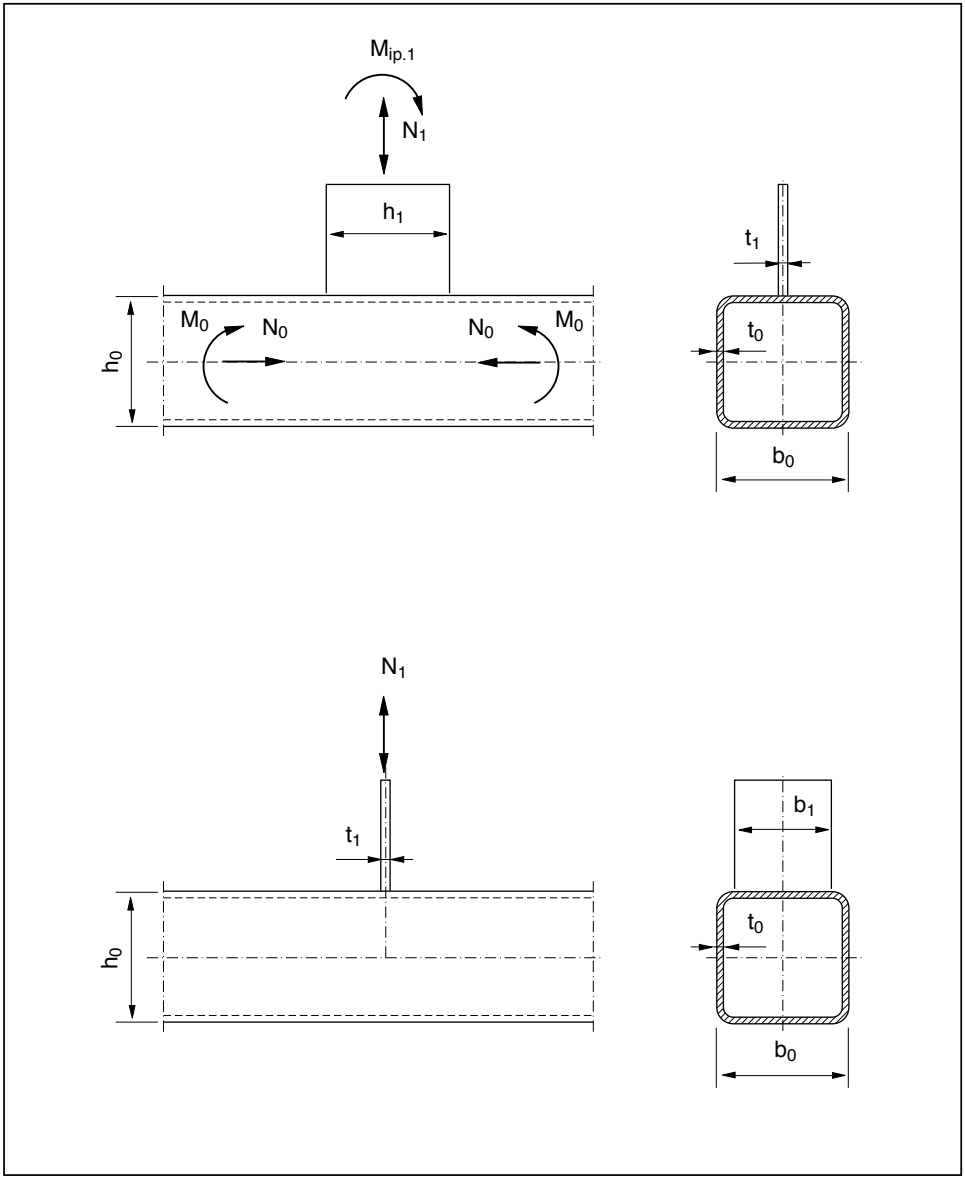


C) Uumasauvallinen paarteen polviliitos



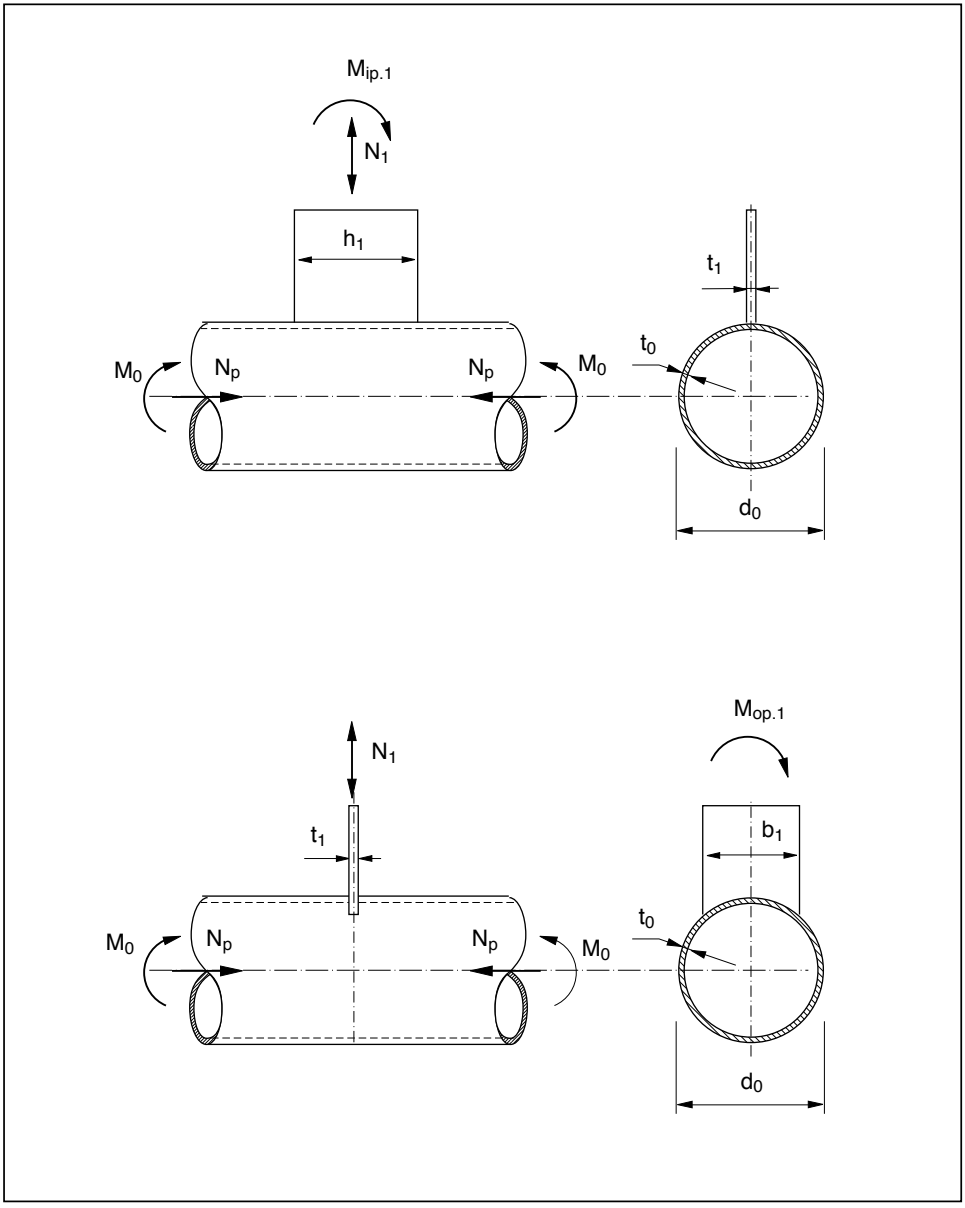
Kestävyys	Parametrit	Voimassaoloehdot
Polviliitos (kuva A)		
$N_{Ed} \le 0,2N_{pl.Rd}$ $\frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} + \frac{M_{ip.Ed}}{M_{pl.Rd}} \le \kappa$	$N_{pl.Rd} = \frac{f_y \cdot A}{\gamma_{M0}}$ $M_{pl.Rd} = \frac{f_y \cdot W_{pl}}{\gamma_{M0}}$ Kun $\theta \le 90^\circ$: $\kappa = \frac{3\sqrt{b_0/h_0}}{(b_0/t_0)^{0,8}} + \frac{1}{1+2 \cdot b_0/h_0}$ Kun $90^\circ < \theta \le 180^\circ$: $\kappa = 1 - [\sqrt{2} \cdot \cos(\theta/2)] \cdot (1 - \kappa_{90})$ missä κ_{90} on κ kun $\theta = 90^\circ$	Paarteet: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)
Polviliitos vahvikelevyllä (kuva B)		
$\frac{N_{Ed}}{N_{pl.Rd}} + \frac{M_{ip.Ed}}{M_{pl.Rd}} \le 1,0$		Paarteet: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Vahvikelevy: $t_p \ge 10$ mm $t_p \ge 1,5t_0$
Uumasauvallinen paarteen polviliitos (kuva C)		
$N_{i.Ed} \le N_{i.Rd}$	$N_{i.Rd}$ lasketaan kuten on esitetty limitetyn N- ja K-liitoksen taulukossa 11.3.3 limittävälle uumasauvalle (i = 1).	Voimassaoloehdot: ks. taulukko 11.3.3
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.15 Levyn liitos neliön tai suorakaiteen muotoiseen rakenneputkeen [1...5]



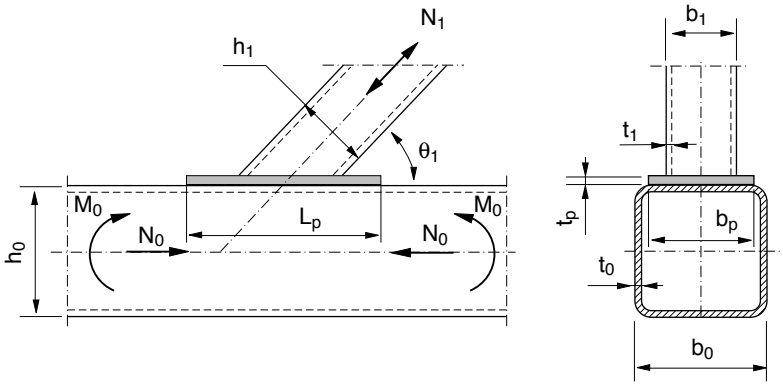
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Pituussuuntainen levy, paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $t_0 \geq 2{,}5$ mm Pituussuuntaiset levyt: $t_i / b_0 \leq 0{,}2$ Poikittaissuuntaiset levyt: $0{,}5 \leq b_i / b_0 \leq 1{,}0$ Paarteet: $b_0 / t_0 \leq 35$ $h_0 / t_0 \leq 35$ $0{,}5 \leq h_0 / b_0 \leq 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
$N_{1.Rd} = k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (2h_1/b_0 + 4\sqrt{1 - t_1/b_0})/\gamma_{M5}$ $M_{ip.1.Rd} = 0{,}5 N_{1.Rd} h_1$	vedetty paarre: $k_m = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_m = 1{,}3 - 1{,}3\lvert n \rvert \leq 1{,}0$ $n = \frac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$	
Poikittaissuuntainen levy, $\beta \leq 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen		
$N_{1.Rd} = k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot \frac{2 + 2{,}8\beta}{\sqrt{1 - 0{,}9\beta}}/\gamma_{M5}$	$\beta = b_i / b_0$	
Poikittaissuuntainen levy, $b_1 \leq b_0 - 2t_0$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{1.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}} \cdot (2t_1 + 2b_{e.p})/\gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i \leq b_i$	
Poikittaissuuntainen levy, $b_1 \geq b_0 - 2t_0$, paarteen uuman myötääminen		
$N_{1.Rd} = k_m \cdot f_{y0} \cdot t_0 \cdot (2t_1 + 10t_0)/\gamma_{M5}$		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.16 Levyn liitos pyöreään rakenneputkeen [1...5]



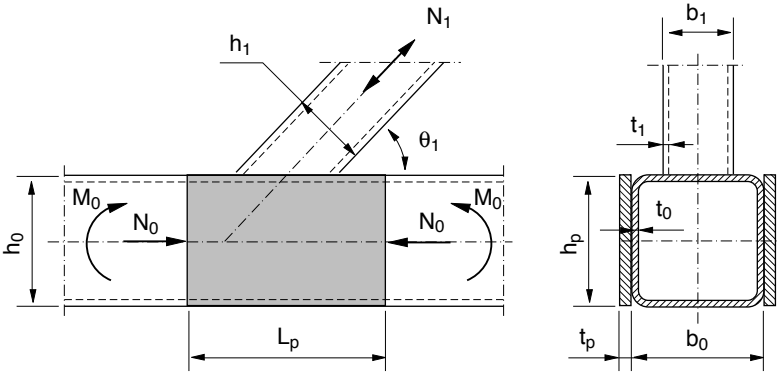
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Pituussuuntainen levy, paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $t_0 \geq 2{,}5$ mm Pituussuuntaiset levyt: $\eta = h_i / d_0 \leq 4$ Poikittaissuuntainset levyt: $\beta = b_i / d_0 \geq 0{,}4$ Paarteet: - kun levy yhdellä puolella: $10 \leq d_0 / t_0 \leq 50$ - kun levy molemmilla puolilla: $10 \leq d_0 / t_0 \leq 40$ - puristettu paarre: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)
$N_{1.Rd} = 5 \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (1 + 0{,}25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip1.Rd} = N_{1.Rd} \cdot h_1$ $M_{op1.Rd} = 0$	$\eta = h_i / d_0$ vedetty paarre: $k_p = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_p = 1{,}0 - 0{,}3\lvert n_p \rvert - 0{,}3 n_p^2 \leq 1{,}0$ $n_p = \frac{N_{p.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \frac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$	
Pituussuuntainen levy molemmilla puolilla, paarteen pinnan myötääminen		
$N_{1.Rd} = 5 \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (1 + 0{,}25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip1.Rd} = N_{1.Rd} \cdot h_1$ $M_{op1.Rd} = 0$		
Poikittaissuuntainen levy, paarteen pinnan myötääminen		
$N_{1.Rd} = k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2 \cdot (4 + 20\beta^2) / \gamma_{M5}$ $M_{ip1.Rd} = 0$ $M_{op1.Rd} = 0{,}5 \cdot N_{1.Rd} \cdot b_1$	$\beta = b_i / d_0$	
Poikittaissuuntainen levy molemmilla puolilla, paarteen pinnan myötääminen		
$N_{1.Rd} = \frac{5 \cdot k_p \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{1 - 0{,}81\beta} / \gamma_{M5}$ $M_{ip1.Rd} = 0$ $M_{op1.Rd} = 0{,}5 \cdot N_{1.Rd} \cdot b_1$		
Pituus- tai poikittaissuuntainen levy, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$\sigma_{max} \cdot t_1 = \left(\frac{N_{1.Ed}}{A_1} + \frac{M_{1.Ed}}{W_{el.1}} \right) \cdot t_1 \leq \frac{2 \cdot f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}}$		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.17 Paarteen pinnan osalta vahvistettujen T-, Y-, ja X-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



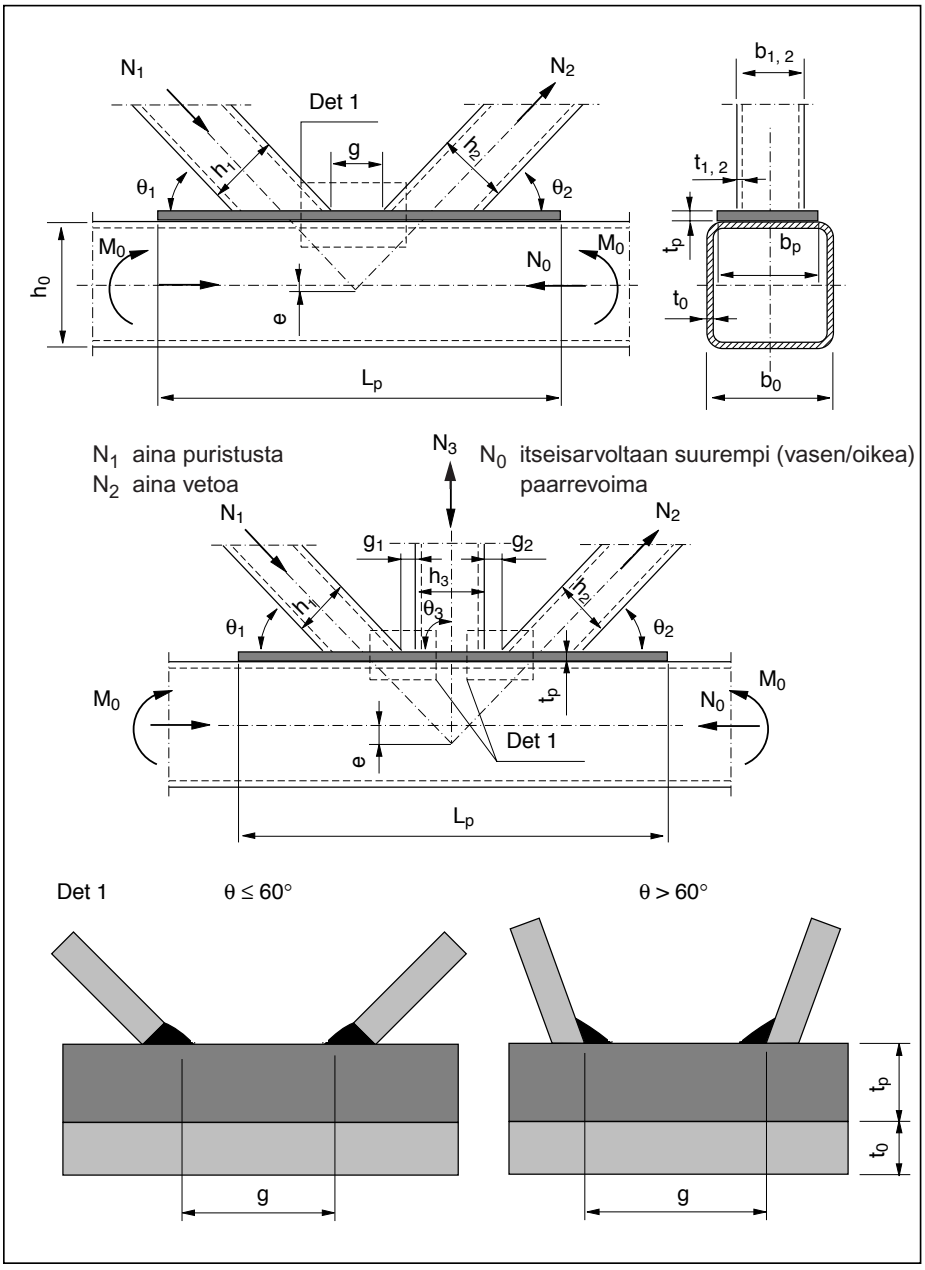
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i / b_0 \ge 0{,}25$ $b_i / t_i \le 35$ $h_i / t_i \le 35$ $0{,}5 \le h_i / b_i \le 2{,}0$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i / b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i / t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0 / t_0 \le 35$ $h_0 / t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0 / b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Vahvikelevy: $f_{yp} \ge f_{y0}$ $b_p \ge b_0 - 2t_0$ $t_p \ge 2t_i$ $L_p \ge \frac{h_i}{\sin\theta_i} + \sqrt{b_p(b_p - b_i)}$
$N_{i.Rd} = \frac{f_{yp} \cdot t_p^2}{(1-\beta_p)\sin\theta_i}\left(\frac{2\eta_p}{\sin\theta_i} + 4\sqrt{1-\beta_p}\right)/\gamma_{M5}$	$\beta_p = b_i / b_p$ $\eta_p = h_i / b_p$	
Paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen [a]		
$N_{i.Rd} = \frac{f_b \cdot t_0}{\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + 10t_0\right)/\gamma_{M5}$	vedetty paarre: $f_b = f_{y0}$ puristettu paarre: $f_b = \chi \cdot f_{y0}$ (T- ja Y-liitokset) $f_b = 0{,}8\chi \cdot f_{y0} \cdot \sin\theta_i$ (X-liitokset) χ = nurjahduksen pienennyskerroin nurjahdusluokassa c, kun hoikkuus on: $\bar{\lambda} = 3{,}46 \cdot \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin\theta_i}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}}$	
Paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \frac{f_{yp} \cdot t_p}{\sqrt{3}\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + 2b_{e.p}\right)/\gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \frac{10}{b_p/t_p} b_i \le b_i$	
Uumasauvan myötääminen		
$N_{i.Rd} = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2h_i - 4t_i + 2b_{eff})/\gamma_{M5}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.		
a) X-liitokselle, joille $\cos\theta_i > h_i / h_0$ käytetään pienempää seuraavista arvoista: tämä arvo tai taulukossa 11.3.2 vapaavälisille N- ja K-liitoksille esitetty paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo.		
Huom: Taulukon arvot ovat voimassa, kun $\beta_p \le 0{,}85$. Liitoksen kestävyydeksi valitaan pienin eri murtumismuotojen perusteella lasketuista arvoista.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.18 Paarteen uuman osalta vahvistettujen T-, Y- ja X-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



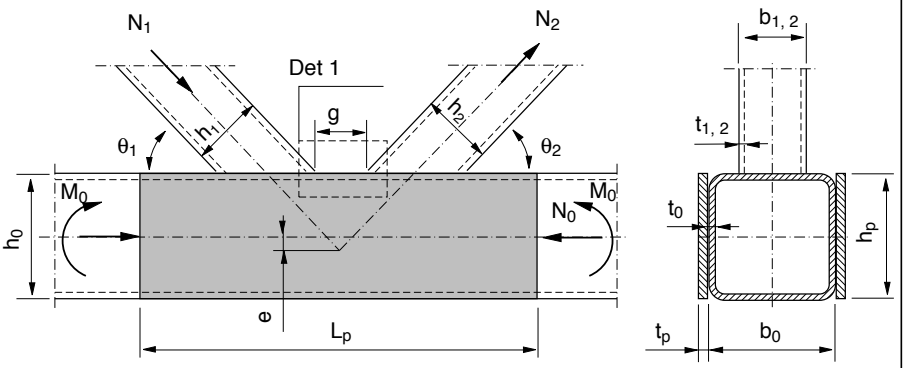
Kestävyys [i = 1]	Parametrit	Voimassaoloehdot
$\beta \le 0{,}85$, paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i / b_0 \ge 0{,}25$ $b_i / t_i \le 35$ $h_i / t_i \le 35$ $0{,}5 \le h_i / b_i \le 2{,}0$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i / b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i / t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0 / t_0 \le 35$ $h_0 / t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0 / b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Vahvikelevy: $f_{yp} \ge f_{y0}$ $t_p \ge 2t_i$ $L_p \ge 1{,}5\, h_i / \sin\theta_i$
$N_{i.Rd} = \dfrac{k_n \cdot f_{y0} \cdot t_0^2}{(1-\beta)\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2\eta}{\sin\theta_i} + 4\sqrt{1-\beta}\right) / \gamma_{M5}$	$\beta = b_i / b_0$ $\eta = h_i / b_0$ vedetty paarre: $k_n = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_n = 1{,}3 - \dfrac{0{,}4\,\lvert n\rvert}{\beta} \le 1{,}0$ $n = \dfrac{N_{0.Ed}}{A_0 \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}} + \dfrac{M_{0.Ed}}{W_{el.0} \cdot f_{y0} / \gamma_{M5}}$	
$0{,}85 < \beta < 1{,}0$		
Käytetään lineaarista interpolointia seuraavien arvojen välillä: - paarteen pinnan myötääminen kun $\beta = 0{,}85$ - määräävin seuraavista: paarteen uuman lommahtaminen / myötääminen kun $\beta = 1{,}0$, tai taulukossa 11.3.2 esitetty paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo, jolloin kaavoissa paksuus t_0 korvataan paksuudella $(t_0 + t_p)$		
$\beta = 1{,}0$, paarteen uuman lommahtaminen tai myötääminen [a]		
$N_{i.Rd} = \dfrac{k_n \cdot f_b \cdot (t_0 + t_p)}{\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2h_i}{\sin\theta_i} + 10(t_0 + t_p)\right) / \gamma_{M5}$	vedetty paarre: $f_b = f_{y0}$ puristettu paarre: $f_b = \chi \cdot f_{y0}$ (T- ja Y-liitokset) $f_b = 0{,}8\,\chi \cdot f_{y0} \cdot \sin\theta_i$ (X-liitokset) χ = nurjahduksen pienennyskerroin nurjahdusluokassa c, kun hoikkuus on: $\bar{\lambda} = 3{,}46 \cdot \dfrac{\left(\dfrac{h_0}{t_0 + t_p} - 2\right) \cdot \sqrt{\dfrac{1}{\sin\theta_i}}}{\pi \cdot \sqrt{\dfrac{E}{f_{y0}}}}$	
$0{,}85 \le \beta \le (1 - 1/\gamma)$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0} \cdot t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_i} \cdot \left(\dfrac{2h_i}{\sin\theta_i} + 2b_{e.p}\right) / \gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \dfrac{10}{b_0 / t_0} b_i \le b_i$ $\gamma = \dfrac{b_0}{2t_0}$	
$\beta \ge 0{,}85$, uumasauvan myötääminen		
$N_{i.Rd} = f_{yi} \cdot t_i \cdot (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$	$b_{eff} = \dfrac{10}{b_0 / t_0} \cdot \dfrac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i .		
a) X-liitokselle, joille $\cos\theta_i > h_i / h_0$ käytetään pienempää seuraavista arvoista: tämä arvo tai taulukossa 11.3.2 vapaavälisille N- ja K-liitoksille esitetty paarteen leikkauskestävyyden mitoitusarvo, jolloin kaavoissa paksuus t_0 korvataan paksuudella $(t_0 + t_p)$.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.19 Paarteet pinnan osalta vahvistettujen vapaavälisten N-, K- ja KT-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia

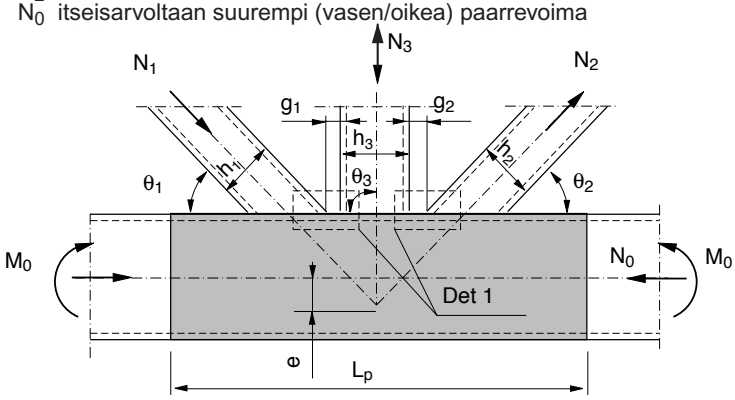


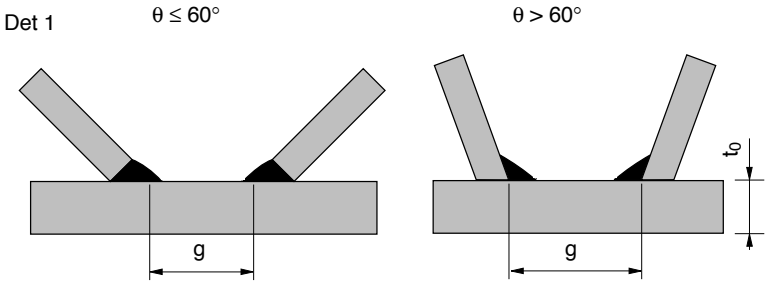
Kestävyys [i = 1 tai 2]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ $-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$ Neliön ja suorakai-teen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i/b_0 \ge 0{,}35$ $b_i/b_0 \ge 0{,}1 + 0{,}01 b_0/t_0$ $0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$ $b_i/t_i \le 35$ $h_i/t_i \le 35$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuk-sen mukaan) Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i/b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i/t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0/t_0 \le 35$ $h_0/t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0/b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Vahvikelevy: $f_{yp} \ge f_{y0}$ $t_p \ge 2t_i$ $L_p \ge 1{,}5\left(\sum_{i=1}^{m} \frac{h_i}{\sin\theta_i} + \sum_{i=1}^{m} g_i\right)$ Vapaaväli: $g \ge t_1 + t_2$ $g/b_p \ge 0{,}5(1 - \beta_p)$ $g/b_p \le 1{,}5(1 - \beta_p)$ a) KT-liitoksessa ehdot tarkastetaan erikseen kummankin vapaavälin osalta.
$N_{i.Rd} = \frac{8{,}9 \cdot f_{yp} \cdot t_p^2 \cdot \sqrt{\gamma_p}}{\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_p} \right) / \gamma_{M5}$	$\beta_p = \frac{\sum_{i=1}^{m} b_i + \sum_{i=1}^{m} h_i}{2m \cdot b_p}$ m on uumasauvojen lukumäärä $\gamma_p = 0{,}5\, b_p/t_p$	
Paarteen leikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3}\sin\theta_i} / \gamma_{M5}$ $N_{0.gap.Rd} = \frac{\left((A_0 - A_{v0}) f_{y0} + A_{vo} f_{y0} \sqrt{1 - \left(\frac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}} \right)^2} \right)}{\gamma_{M5}}$	$A_{v0} = (2h_0 + \alpha b_0) t_0$ $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}$ $\alpha = 0$ kun pyöreät uumasauvat V_{Ed} on paarteen leikkausvoima vapaavälin kohdalla $V_{pl.Rd} = \frac{f_{y0} \cdot A_{v0}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}}$	
$\beta_p \le (1 - 1/\gamma_p)$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \frac{f_{yp} \cdot t_p}{\sqrt{3}\sin\theta_i} \cdot \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e.p} \right) / \gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \frac{10}{b_p/t_p} b_i \le b_i$	
Uumasauvan myötääminen		
$N_{i.Rd} = f_{yi}\, t_i\, (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$	
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.		
KT-liitos: - Jokaisen kolmen uumasauvan osalta tarkastetaan mitoitusehto: $N_{i.Rd} \ge N_{i.Ed}$ (i = 1,2,3) - Uumasauvojen kestävyydet lasketaan tarkastelemalla vierekkäisiä sauvoja pareittain N-liitoksena seuraavasti: A) uumasauvat 1 & 3 B) uumasauvat 2 & 3 Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa vetoa, sen kestävyys lasketaan tapauksesta A. Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa puristusta, sen kestävyys lasketaan tapauksesta B.		
a) Jos $g/b_p > 1{,}5(1 - \beta_p)$ ja $g \ge t_1 + t_2$ liitosta käsitellään kahtena erillisenä T- tai Y-liitoksena.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.20 Paarteen uuman osalta vahvistettujen vapaavälisten N-, K- ja KT-liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



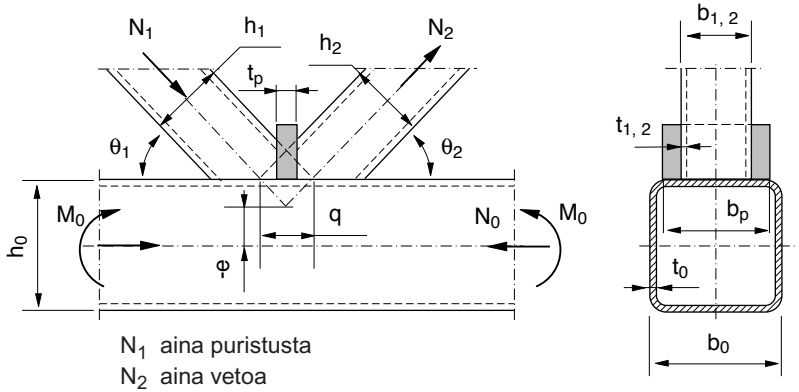
N_1 aina puristusta
N_2 aina vetoa
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima





Kestävyys [i = 1 tai 2]	Parametrit	Voimassaoloehdot
Paarteen pinnan myötääminen		Liitokselle yleisesti: $30^\circ \le \theta_i \le 90^\circ$ $t_0 \ge 2{,}5$ mm $t_i \ge 2{,}5$ mm $L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$ $-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$ Neliön ja suorakai-teen muotoiset uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $b_i/b_0 \ge 0{,}35$ $b_i/b_0 \ge 0{,}1 + 0{,}01\,b_0/t_0$ $0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$ $b_i/t_i \le 35$ $h_i/t_i \le 35$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Pyöreät uumasauvat: - uumasauvat yleisesti: $0{,}4 \le d_i/b_0 \le 0{,}8$ - vedetty uumasauva: $d_i/t_i \le 50$ - puristettu uumasauva: PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan) Paarteet: $b_0/t_0 \le 35$ $h_0/t_0 \le 35$ $0{,}5 \le h_0/b_0 \le 2{,}0$ PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan) Vahvikelevy: $L_p \ge 1{,}5\left(\sum_{i=1}^{m}\frac{h_i}{\sin\theta_i}+\sum_{i=1}^{m} g_i\right)$ Vapaaväli: $g \ge t_1 + t_2$ $g/b_0 \ge 0{,}5\,(1-\beta)$ $g/b_0 \le 1{,}5\,(1-\beta)$ [a] KT-liitoksessa ehdot tarkastetaan erikseen kummankin vapaavälin osalta.
$N_{i.Rd} = \dfrac{8{,}9\cdot k_n\cdot f_{y0}\cdot t_0^2\cdot\sqrt{\gamma}}{\sin\theta_i}\cdot\left(\dfrac{\sum_{i=1}^{m} b_i+\sum_{i=1}^{m} h_i}{2m\cdot b_0}\right)/\gamma_{M5}$	$\beta = \dfrac{\sum_{i=1}^{m} b_i+\sum_{i=1}^{m} h_i}{2m\cdot b_0}$ m on uumasauvojen lukumäärä $\gamma = 0{,}5\,b_0/t_0$ vedetty paarre: $k_n = 1{,}0$ puristettu paarre: $k_n = 1{,}3 - \dfrac{0{,}4\,\lvert n\rvert}{\beta} \le 1{,}0$ $n = \dfrac{N_{0.Ed}}{A_0\cdot f_{y0}/\gamma_{M5}} + \dfrac{M_{0.Ed}}{W_{el.0}\cdot f_{y0}/\gamma_{M5}}$	
Paarteen leikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0}\cdot A_{v0}+f_{yp}\cdot A_{vp}}{\sqrt{3}\sin\theta_i}/\gamma_{M5}$ $N_{0.gap.Rd} = \dfrac{\left((A_0-A_{v0})f_{y0}+(A_{v0}f_{y0}+A_{vp}f_{yp})\sqrt{1-\left(\dfrac{V_{Ed}}{V_{pl.Rd}}\right)^2}\right)}{\gamma_{M5}}$	$A_{v0} = (2h_0+\alpha b_0)\,t_0$ $\alpha = \sqrt{\dfrac{1}{1+\dfrac{4g^2}{3t_0^2}}}$ $\alpha = 0$ kun pyöreät uumasauvat $A_{vp} = 2h_p t_p$ V_{Ed} on paarteen leikkausvoima vapaavälin kohdalla $V_{pl.Rd} = \dfrac{f_{y0}\cdot A_{v0}+f_{yp}\cdot A_{vp}}{\sqrt{3}\cdot\gamma_{M5}}$	
$\beta \le (1 - 1/\gamma)$, paarteen pinnan lävistysleikkautuminen		
$N_{i.Rd} = \dfrac{f_{y0}\cdot t_0}{\sqrt{3}\sin\theta_i}\cdot\left(\dfrac{2h_i}{\sin\theta_i}+b_i+b_{e.p}\right)/\gamma_{M5}$	$b_{e.p} = \dfrac{10}{b_0/t_0} b_i \le b_i$	
Uumasauvan myötääminen		
$N_{i.Rd} = f_{yi}\,t_i\,(2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff})/\gamma_{M5}$	$b_{eff} = \dfrac{10}{b_0/t_0}\cdot\dfrac{f_{y0}\cdot t_0}{f_{yi}\cdot t_i}\cdot b_i \le b_i$	
Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.		
KT-liitos: - Jokaisen kolmen uumasauvan osalta tarkastetaan mitoitusehto: $N_{i.Rd} \ge N_{i.Ed}$ (i = 1,2,3) - Uumasauvojen kestävyydet lasketaan tarkastelemalla vierekkäisiä sauvoja pareittain N-liitoksena seuraavasti: A) uumasauvat 1 & 3 B) uumasauvat 2 & 3 Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa vetoa, sen kestävyys lasketaan tapauksesta A. Jos uumasauvassa 3 vaikuttaa puristusta, sen kestävyys lasketaan tapauksesta B.		
a) Jos $g/b_0 > 1{,}5(1-\beta)$ ja $g \ge t_1 + t_2$ liitosta käsitellään kahtena erillisenä T- tai Y-liitoksena.		
Kestävyyden pienennyskerroin:	S235 - S355: 1,0 S420 - S460: 0,9	

Taulukko 11.3.21 N- ja K-ristikoiden vahvistettujen limitettyjen liitosten kestävyydet [1...5]:
- paarteet ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia rakenneputkia
- uumasauvat ovat neliön tai suorakaiteen muotoisia tai pyöreitä rakenneputkia



N_1 aina puristusta
N_2 aina vetoa
N_0 itseisarvoltaan suurempi (vasen/oikea) paarrevoima

<table>
<tr><th>Kestävyys [i = 1 tai 2]</th><th>Parametrit</th><th>Voimassaoloehdot</th></tr>
<tr><td colspan="2">25 % ≤ λ_{ov} < 50 % , uumasauvan myötääminen</td><td rowspan="8">Liitokselle yleisesti:
$30^{\circ} \le \theta_i \le 90^{\circ}$
$t_0 \ge 2{,}5$ mm
$t_i \ge 2{,}5$ mm
$L_i \ge 6h_i$ tai $6d_i$
$-0{,}55 \le e/h_0 \le 0{,}25$

Neliön ja suorakaiteen muotoiset uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$b_i/b_0 \ge 0{,}25$
$0{,}5 \le h_i/b_i \le 2{,}0$
$0{,}75 \le b_i/b_p \le 1{,}0$
$(t_i f_{yi}) / (t_p f_{yp}) \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$b_i/t_i \le 35$
$h_i/t_i \le 35$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Pyöreät uumasauvat:
- uumasauvat yleisesti:
$0{,}4 \le d_i/b_0 \le 0{,}8$
$0{,}75 \le d_i/b_p \le 1{,}0$
$(t_i f_{yi}) / (t_p f_{yp}) \le 1{,}0$
- vedetty uumasauva:
$d_i/t_i \le 50$
- puristettu uumasauva:
PL-luokka 1 (tasaisen puristuksen mukaan)

Paarteet:
$b_0/t_0 \le 35$
$h_0/t_0 \le 35$
$0{,}5 \le h_0/b_0 \le 2{,}0$
PL-luokka 1 tai 2 (tasaisen puristuksen mukaan)

Vahvikelevy:
$f_{yp} \ge f_{y0}$
$t_p \ge 2t_i$

Limitysaste:
25 % ≤ λ_{ov} < 80 % [a)]</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = f_{yi} t_i \left(b_{eff} + b_{e.ov} + \frac{\lambda_{ov}}{50} \cdot 2h_i - 4t_i\right) / \gamma_{M5}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q_i \cdot \sin\theta_i}{h_i} \cdot 100\ \%$
$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$
$b_{e.ov} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$</td></tr>
<tr><td colspan="2">50 % ≤ λ_{ov} < 80 % , uumasauvan myötääminen</td></tr>
<tr><td>$N_{i.Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_{eff} + b_{e.ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$</td><td>$\lambda_{ov} = \frac{q_i \cdot \sin\theta_i}{h_i} \cdot 100\ \%$
$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} \cdot t_0}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$
$b_{e.ov} = \frac{10}{b_p/t_p} \cdot \frac{f_{yp} \cdot t_p}{f_{yi} \cdot t_i} \cdot b_i \le b_i$</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Pyöreillä uumasauvoilla kestävyydet kerrotaan luvulla $\pi/4$ ja suureet b_i ja h_i korvataan halkaisijalla d_i.</td></tr>
<tr><td colspan="2">a) Jos suorakaiteen muotoisilla uumasauvoilla $h_1 < b_1$ ja/tai $h_2 < b_2$, tulee tarkastaa myös uumasauvojen leikkautuminen paarteen suunnassa irti paarteesta.</td></tr>
<tr><td>Kestävyyden pienennyskerroin:</td><td>S235 - S355: 1,0
S420 - S460: 0,9</td><td></td></tr>
</table>

Lähdeluettelo

[1] SFS-EN 1993-1-8:2005. (EN 1993-1-8:2005)
Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu.
Osa 1-8: Liitosten mitoitus.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 149 s.

[2] SFS-EN 1993-1-8:2005+AC:2005. (EN 1993-1-8:2005+AC:2005)
Sisältää myös korjaukset AC:2005.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 137 s.

[3] SFS-EN 1993-1-8: AC:2009. (EN 1993-1-8: AC:2009)
Korjausosa AC:2009 standardiin EN 1993-1-8.
Suomen Standardisoimisliitto SFS ry. 21 s.

[4] CIDECT. 1991. Design guide for circular hollow section (CHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No 1.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 68 s.

[5] CIDECT. 1992. Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading. CIDECT Design Guide No 3.
Verlag TÜV Rheinland GmbH. 102 s.

Liite 11.4 Kehäliitosten jäykkyyden arvioiminen

Kehärakenteissa liitosten jäykkyys voidaan ottaa huomioon, jolloin palkeille tulevat taivutusmomentit muuttuvat palkin jännevälillä. Tasaisesti kuormitetun molemmista päistä osittain jäykästi kiinnitetyn palkin taivutusmomenteille saadaan seuraavat yhtälöt, kun palkin tuet oletetaan painumattomiksi [1,2]:

$$M_1 = \frac{S_j}{S_j + K} \cdot \frac{qL^2}{12} \qquad \textit{kiinnitysmomentti} \qquad (11.4.1)$$

$$M_0 = \frac{S_j + 3K}{S_j + K} \cdot \frac{qL^2}{24} \qquad \textit{kenttämomentti} \qquad (11.4.2)$$

missä

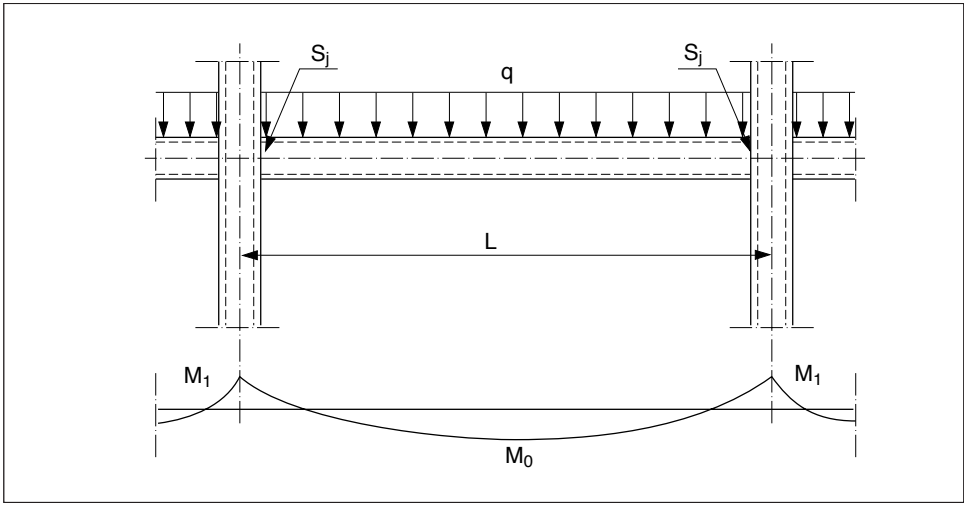
$$K = \frac{2EI}{L}$$

E on kimmokerroin
I on palkin neliömomentti
L on palkin pituus
S_j on liitoksen kiertymisjäykkyys [Nm/rad]
q on palkin kuormitus [N/m]

Palkin taipuma ja kiertymä lasketaan seuraavasti:

$$\phi_1 = \frac{M_1}{S_j} = \frac{1}{S_j + K} \cdot \frac{qL^2}{12} \qquad \textit{kiertymä tuella} \qquad (11.4.3)$$

$$\delta_0 = \frac{5qL^4}{384EI} \cdot \frac{K + S_j/5}{S_j + K} \qquad \textit{taipuma keskellä} \qquad (11.4.4)$$



Kuva 11.4.1 Osittain jäykästi tuettu palkki

Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien hitsatun T-liitoksen kiertymisjäykkyys S_j voidaan laskea lähteen [3] ohjeiden mukaan:

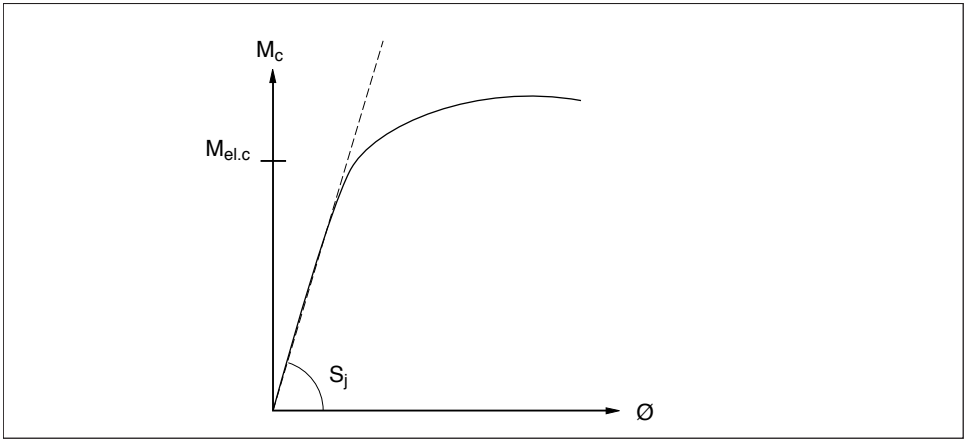
$$S_j = \frac{1000 \cdot C^* \cdot t_0^3}{52} \qquad (11.4.5)$$

missä S_j on liitoksen kiertymisjäykkyys [Nm/rad]
t_0 on rakenneputken seinämänpaksuus [mm]
C^* on kuvista 11.4.3 - 11.4.7 saatu vakio [N/mm^2]

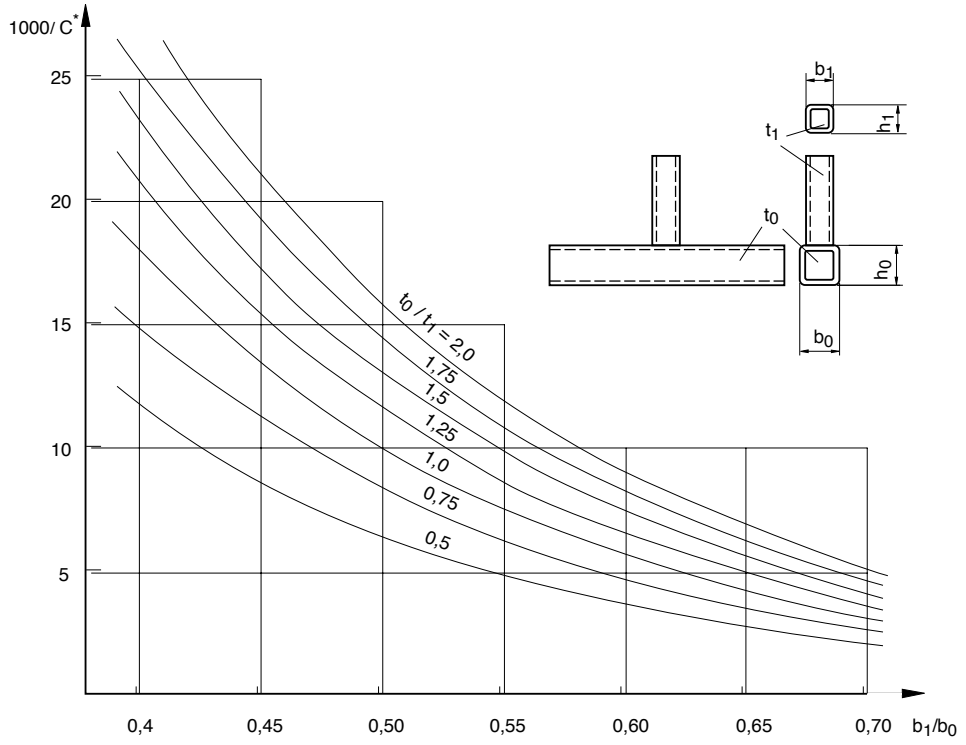
Neliön muotoisilla rakenneputkilla vakion C^* arvo saadaan kuvasta 11.4.3, kun $b_1 / b_0 \leq 0{,}7$. Muussa tapauksessa käytetään kuvia 11.4.4 - 11.4.7.

Suorakaiteen muotoisilla rakenneputkilla vakio C* lasketaan kuten neliön muotoisilla rakenneputkilla, jonka jälkeen saatu tulos kerrotaan kuvan 11.4.7 korjauskertoimella.

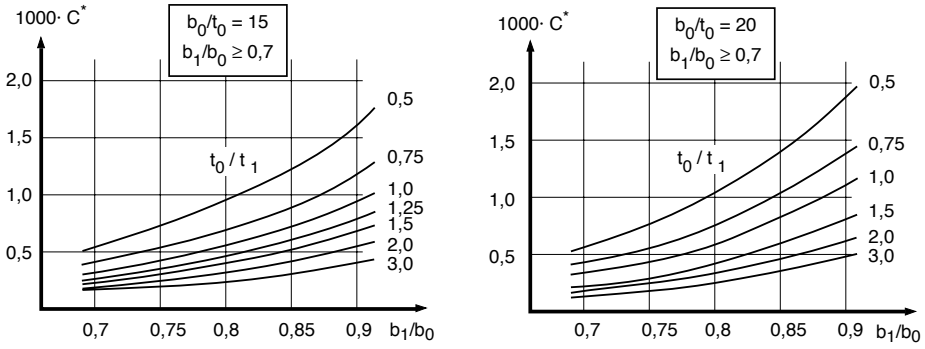
Kaava (11.4.5) antaa kiertymisjäykkyyden likiarvon, joka vastaa parhaiten taivutusmomentin arvoja liitoksen myötömomenttiin ($M_{el.c}$) saakka.



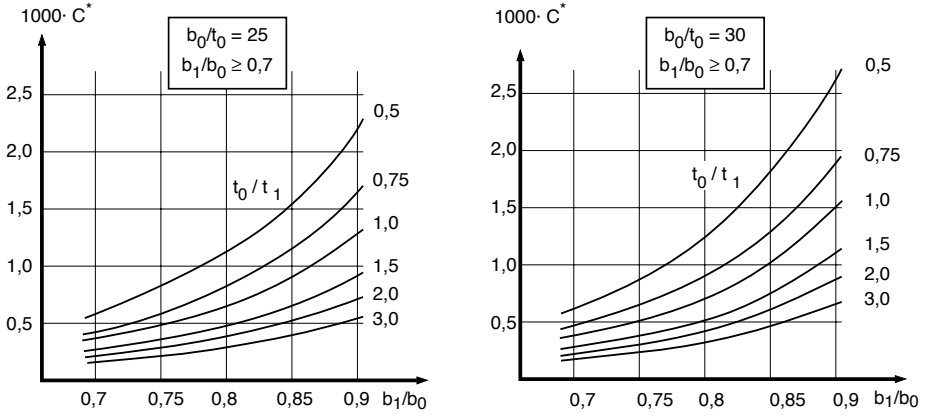
Kuva 11.4.2 Osittain jäykän liitoksen momentti-kiertymä-kuvaaja



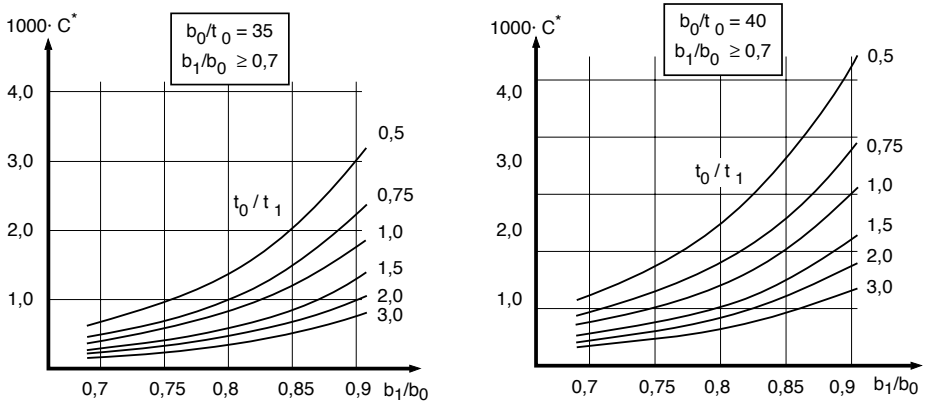
Kuva 11.4.3 Vakion 1000/C* arvot neliön muotoisten rakenneputkien T-liitoksille, kun $b_1/b_0 \leq 0,7$ ja $b_0/t_0 \geq 10$ [3]



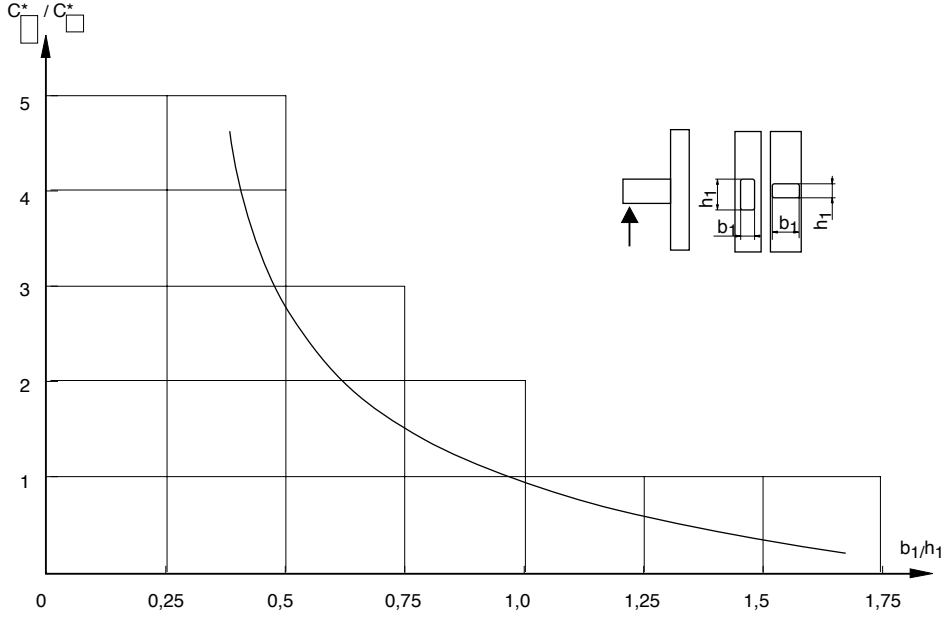
Kuva 11.4.4 Vakion C* arvot neliön muotoisten rakenneputkien T-liitoksille, kun $b_1 / b_0 \geq 0,7$ ja $b_0 / t_0 = 10$ tai $b_0 / t_0 = 20$ [3]



Kuva 11.4.5 Vakion C* arvot neliön muotoisten rakenneputkien T-liitoksille, kun $b_1 / b_0 \geq 0,7$ ja $b_0 / t_0 = 25$ tai $b_0 / t_0 = 30$ [3]



Kuva 11.4.6 Vakion C* arvot neliön muotoisten rakenneputkien T-liitoksille, kun $b_1 / b_0 \geq 0,7$ ja $b_0 / t_0 = 35$ tai $b_0 / t_0 = 40$ [3]



Kuva 11.4.7 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien vakion C* arvot suhteessa neliön muotoisten rakenneputkien C* arvoon [3]

Lähdeluettelo

[1] ECCS. 1992. Analysis and Design of Steel frames with Semi-Rigid Joints.
ECCS Technical Committee 8 - Structural Stability.
Technical Working Group 8.1/8.2 Skeletal Structures.
ECCS No 67. First edition. 80 s.

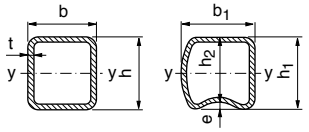
[2] CIDECT. 2004. Design guide for structural hollow section column connections.
CIDECT Design Guide No 9. Verlag TÜV Rheinland GmbH. 214 s.

[3] CIDECT. 1983. The development of recommendations for the design of
welded joints between steel structural hollow sections (T- and X-type joints).
Final report on ECSC Agreement 7210 SA/109 and CIDECT Program 5AD.

Liite 11.5 Neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien minimitaivussäteet

Taulukoissa 11.5.1 ja 11.5.2 on esitetty neliön ja suorakaiteen muotoisten rakenneputkien minimitaivutussäteitä, kun taivutus tehdään rullataivutuksena huoneenlämpötilassa kolmea rullaa käyttäen. **Taulukoiden arvot ovat ohjeellisia minimiarvoja, joihin päästään hyvillä laitteilla ja huolellisella työn suorituksella.**

Taulukko 11.5.1 Neliön muotoisten rakenneputkien ohjeellisia minimitaivutussäteitä 3-rulla-taivutuksessa lähteen [1] mukaan.
Mittasarjassa poikkeamia SSAB:n valmistusmitoista



a) ennen taivutusta b) taivutuksen jälkeen

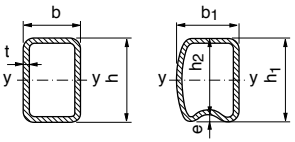
$$P_b = \frac{b_1 - b}{b} 100$$

$$P_e = \frac{e}{h} 100$$

P_b on poikkileikkauksen levenemä [%]
P_e on puristuslaipan sisääntaipuma [%]
R_t on sisäpuolinen taivutussäde [m]
I_{red} on neliömomentin I_y pienentyminen poikkileikkauksen muodonvääristymästä johtuen [%]

			P_b = 1 %		P_b = 2,5 %		P_b = 5 %		P_b = 7,5 %		P_e = 0,5 %		P_e = 1 %		P_e = 2,5 %		P_e = 5 %	
h	b	t	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}
mm	mm	mm	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
40	40	4,0	1,44	1	0,31	1	0,22	1	0,22	1	0,22	1	0,22	2	0,22	4	0,22	8
50	50	4,0	2,88	1	0,61	2	0,22	3	0,22	3	0,79	1	0,29	2	0,22	4	0,22	7
50	50	5,0	2,72	1	0,58	1	0,22	2	0,22	2	0,43	1	0,22	2	0,22	4	0,22	8
60	60	4,0	5,07	1	1,08	2	0,34	3	0,22	5	2,55	1	0,95	2	0,26	4	0,22	7
60	60	5,0	4,79	1	1,02	2	0,32	3	0,22	3	1,37	1	0,51	2	0,22	4	0,22	7
70	70	4,0	8,17	1	1,74	3	0,54	5	0,27	7	6,85	1	2,55	2	0,69	4	0,26	7
70	70	5,0	7,72	1	1,65	2	0,51	3	0,26	6	3,68	1	1,37	2	0,37	4	0,22	7
80	80	4,0	12,36	2	2,64	3	0,82	6	0,41	8	16,12	1	5,99	2	1,62	4	0,60	6
80	80	5,0	11,68	1	2,49	3	0,77	5	0,39	7	8,66	1	3,22	2	0,87	4	0,32	7
80	80	6,3	11,02	1	2,35	2	0,73	3	0,73	5	4,55	1	1,69	2	0,46	4	0,22	7
90	90	4,0	17,80	2	3,80	3	1,18	7	0,60	10	34,29	1	12,75	2	3,45	3	1,28	6
90	90	5,0	16,83	2	3,59	3	1,11	6	0,56	8	18,42	1	6,85	2	1,85	4	0,69	7
90	90	6,3	15,87	1	3,38	3	1,05	4	0,53	6	9,68	1	3,60	2	0,97	4	0,36	7
100	100	4,0	24,67	2	5,26	4	1,63	8	0,82	12	67,38	1	25,05	2	6,77	3	2,52	6
100	100	5,0	23,32	2	4,97	4	1,54	6	0,78	9	36,20	1	13,46	2	3,64	4	1,35	6
100	100	6,3	22,00	1	4,69	3	1,46	6	0,74	7	19,03	1	7,07	2	1,91	4	0,71	7
100	100	8,0	20,71	1	4,42	2	1,37	3	0,69	6	9,78	1	3,64	2	0,98	4	0,37	7
120	120	4,0	43,41	3	9,26	6	2,88	12	1,45	18	216,84	1	80,60	2	21,79	3	8,10	6
120	120	5,0	41,03	3	8,75	5	2,72	8	1,37	13	116,51	1	43,31	2	11,71	3	4,35	6
120	120	6,3	38,70	2	8,25	4	2,56	7	1,29	11	61,23	1	22,76	2	6,15	4	2,29	7
120	120	8,0	36,44	1	7,77	3	2,41	6	1,22	7	31,49	1	11,70	2	3,16	4	1,18	7
150	150	5,0	81,91	3	17,47	7	5,43	13	2,74	20	487,11	1	181,06	2	48,94	3	18,19	6
150	150	6,3	77,27	3	16,48	5	5,12	9	2,58	14	255,98	1	95,15	2	25,72	3	9,56	6
150	150	8,0	72,75	2	15,51	4	4,82	7	2,43	11	131,64	1	48,93	2	13,23	4	4,92	7
150	150	10,0	68,76	2	14,66	3	4,55	6	2,30	8	70,73	1	26,29	2	7,11	4	2,64	7
180	180	6,3	123,65	3	20,04	6	5,06	11	2,26	17	831,60	1	251,71	2	51,86	3	15,70	6
180	180	8,0	81,47	3	13,21	6	3,33	10	1,49	15	416,40	1	126,03	2	25,96	4	7,86	6
180	180	10,0	55,18	3	8,94	6	2,26	10	1,01	14	218,22	1	66,05	2	13,61	4	4,12	7
200	200	6,3	176,76	3	28,66	6	7,24	10	3,23	16	1046,76	1	316,83	2	65,27	3	19,76	6
200	200	8,0	116,47	3	18,88	5	4,77	9	2,13	14	524,13	1	158,64	2	32,68	3	9,89	6
200	200	10,0	78,88	3	12,79	5	3,23	9	1,44	13	274,69	1	83,14	2	17,13	4	5,18	7
250	250	6,3	376,81	3	61,08	5	15,42	9	6,89	14	1704,11	1	515,80	2	106,26	3	32,16	6
250	250	8,0	248,27	3	40,25	4	10,16	8	4,54	12	853,27	1	258,27	2	53,21	3	16,10	6
250	250	10,0	168,15	2	27,26	4	6,88	7	3,08	10	447,18	1	135,35	2	27,88	3	8,44	6
300	300	8,0	460,71	2	74,69	4	18,86	7	8,43	11	1270,17	1	384,45	2	79,20	3	23,97	6
300	300	10,0	312,03	2	50,58	3	12,77	6	5,71	9	665,71	1	201,50	2	41,51	3	12,56	6

Taulukko 11.5.2 Suorakaiteen muotoisten rakenneputkien ohjeellisia minimitaivutussäteitä 3-rulla-rullataivutuksessa lähteen [1] mukaan.
Mittasarjassa poikkeamia SSAB:n valmistusmitoista



a) ennen taivutusta b) taivutuksen jälkeen

$$P_b = \frac{b_1 - b}{b} 100$$

$$P_e = \frac{e}{h} 100$$

P_b on poikkileikkauksen levenemä [%]
P_e on puristuslaipan sisääntaipuma [%]
R_t on sisäpuolinen taivutussäde [m]
I_{red} on neliömomentin I_y pienentyminen poikkileikkauksen muodonvääristymästä johtuen [%]

			P_b = 1 %		P_b = 2,5 %		P_b = 5 %		P_b = 7,5 %		P_e = 0,5 %		P_e = 1 %		P_e = 2,5 %		P_e = 5 %	
H	B	T	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}	R_t	I_{red}
mm	mm	mm	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%	m	%
50	30	4,0	2,18	1	0,47	1	0,22	2	0,22	2	0,26	1	0,22	2	0,22	4	0,22	7
60	40	4,0	4,07	1	0,87	2	0,27	3	0,22	3	1,06	1	0,39	2	0,22	3	0,22	6
80	40	4,0	8,48	1	1,81	2	0,56	3	0,28	4	3,59	1	1,34	2	0,36	3	0,22	5
80	40	5,0	8,01	1	1,71	2	0,53	3	0,27	3	1,93	1	0,72	2	0,22	3	0,22	6
90	50	4,0	12,93	1	2,76	3	0,86	4	0,43	5	9,61	1	3,57	2	0,97	3	0,36	5
90	50	5,0	12,22	1	2,61	2	0,81	3	0,41	4	5,16	1	1,92	2	0,52	3	0,22	6
100	50	4,0	16,92	1	3,61	2	1,12	5	0,57	5	15,02	1	5,58	1	1,51	3	0,56	5
100	50	5,0	15,99	1	3,41	2	1,06	3	0,53	5	8,07	1	3,00	2	0,81	3	0,30	5
100	60	4,0	18,69	2	3,98	3	1,24	5	0,62	7	22,30	1	8,29	2	2,24	3	0,83	5
100	60	5,0	17,66	1	3,77	3	1,17	4	0,59	6	11,98	1	4,45	2	1,20	3	0,45	6
100	60	6,3	16,66	1	3,55	2	1,10	3	0,56	4	6,30	1	2,34	2	0,63	3	0,24	6
120	60	4,0	29,77	1	6,35	3	1,97	5	1,00	8	48,35	1	17,97	1	4,86	3	1,81	5
120	60	5,0	28,14	1	6,00	3	1,86	5	0,94	6	25,98	1	9,66	1	2,61	3	0,97	5
120	60	6,3	26,54	1	5,66	2	1,76	3	0,89	6	13,65	1	5,07	2	1,37	3	0,51	6
120	80	4,0	34,81	2	7,42	4	2,31	7	1,16	11	90,14	1	33,50	2	9,06	3	3,37	5
120	80	5,0	32,90	2	7,02	3	2,18	6	1,10	9	48,43	1	18,00	2	4,87	3	1,81	6
120	80	6,3	31,04	1	6,62	3	2,06	4	1,04	6	25,45	1	9,46	2	2,56	3	0,95	6
150	100	4,0	69,50	3	14,82	5	4,60	11	2,32	18	376,84	1	140,08	2	37,86	3	14,07	5
150	100	5,0	65,69	3	14,01	5	4,35	8	2,20	12	202,48	1	75,26	2	20,34	3	7,56	5
150	100	6,3	61,97	2	13,21	3	4,10	6	2,07	9	106,41	1	39,55	2	10,69	3	3,97	6
150	100	8,0	58,34	1	12,44	3	3,86	6	1,95	7	54,72	1	20,34	2	5,50	3	2,04	6
160	80	4,0	176,59	1	28,63	2	7,23	5	3,23	7	244,29	1	73,94	1	15,23	3	4,61	5
160	80	5,0	119,60	1	19,39	2	4,90	5	2,19	6	128,03	1	38,75	1	7,98	3	2,42	5
160	80	6,3	79,88	1	12,95	2	3,27	4	1,46	5	65,56	1	19,85	1	4,09	3	1,24	5
160	80	8,0	52,63	1	8,53	3	2,15	3	0,96	5	32,83	1	9,94	2	2,05	3	0,62	5
200	100	5,0	254,95	1	41,33	3	10,44	4	4,66	5	208,42	1	63,09	1	13,00	3	3,93	5
200	100	6,3	170,28	1	27,60	3	6,97	3	3,12	5	106,74	1	32,31	1	6,66	3	2,01	5
200	100	8,0	112,19	1	18,19	2	4,59	3	2,05	5	53,45	1	16,18	2	3,33	3	1,01	5
200	100	10,0	75,98	1	12,32	2	3,11	3	1,39	4	28,01	1	8,48	2	1,75	3	0,53	6
250	150	6,3	366,57	1	59,42	3	15,00	4	6,71	5	316,79	1	95,89	1	19,75	3	5,98	5
250	150	8,0	241,53	1	39,15	3	9,89	3	4,42	5	158,62	1	48,01	2	9,89	3	2,99	5
250	150	10,0	163,58	1	26,52	2	6,70	3	2,99	5	83,13	1	25,16	2	5,18	3	1,57	6
300	200	6,3	684,25	1	110,92	3	28,01	5	12,52	6	667,45	1	202,02	1	41,62	3	12,60	5
300	200	8,0	450,84	1	73,09	3	18,45	4	8,25	5	334,20	1	101,16	2	20,84	3	6,31	5
300	200	10,0	305,34	1	49,50	3	12,50	3	5,59	5	175,15	1	53,01	2	10,92	3	3,31	6
400	200	8,0	1177,85	1	190,94	1	48,21	2	21,55	3	242,86	1	73,51	1	15,14	3	4,58	5
400	200	10,0	797,71	1	129,32	1	32,65	3	14,60	3	127,28	1	38,52	1	7,94	3	2,40	5

Lähdeluettelo

[1] CIDECT. 1988. Minimum bending radii for square and rectangular hollow sections (3-roller cold bending). CIDECT report 11C-88/14E.

Liite 11.6 Ristikko- ja kehärakenteiden mitoitusohjelmat - *WinRami*, *Section* ja *Fire Protection System*

WinRami ja **Section** ohjelmilla on mahdollista suorittaa ristikko- ja kehärakenteen rakennetekninen analysointi sekä rakenteen mitoitus Eurocode 3:n (EN 1993) mukaisesti. Mitoitus voidaan suorittaa kylmämuovatuille rakenneputkille, hitsatuille I-profiileille (symmetriset ja epäsymmetriset) sekä kuumavalssatuille HEA, HEB, ja IPE profiileille.

Rakenteen voimasuureet ja siirtymät ratkaistaan **WinRami** ohjelmalla ja sauvojen mitoitus suoritetaan siihen kytketyllä **Section** ohjelmalla. **WinRami** ja **Section** ohjelmat (sekä muut käytettävät ohjelmakomponentit) on linkitetty toisiinsa MS Windowsin OLE2-linkillä, jolloin käyttäjän kannalta ne toimivat yhtenä kokonaisuutena.

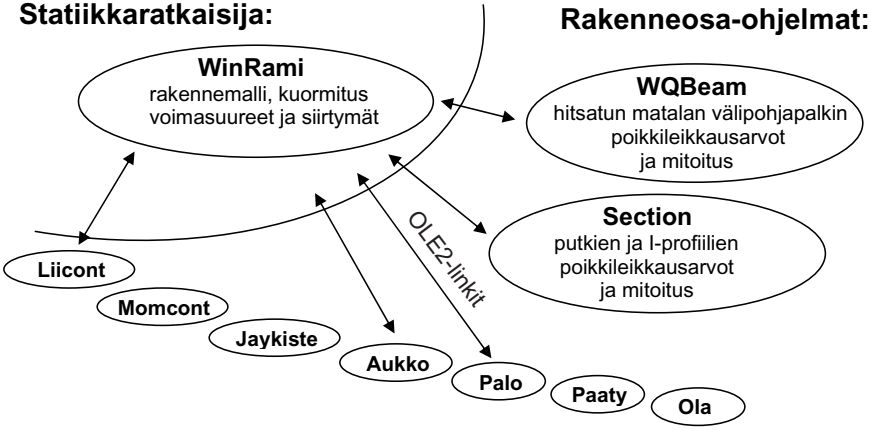
Section ohjelma sisältää valmiiksi taulukoituna SSAB:n valmistamat kylmämuovatut rakenneputket, sekä edellä mainitut kuumavalssatut I-profiilit. Hitsatttujen I-profiilien mitat voidaan antaa vapaavalintaisina.

WinRami ohjelmassa on kaksi ohjelmakomponenttia liitosten mitoitukseen:

- **Liicont:** rakenneputkiristikon hitsattujen liitosten mitoitus
- **Momcont:** rakenneputkipilarin ja -palkin välisen hitsatun momenttiliitoksen mitoitus

Winrami ohjelmassa hyödynnetään lisäksi seuraavia ohjelmakomponentteja:

- **Palo:** palosuojauksen mitoitus (erillisellä **Fire Protection System** asennusohjelmalla)
- **Paaty:** I-profiilin pääty/tukijäykisteen mitoitus
- **Jaykiste:** I-profiilin pitkittäisten tai poikkittaisten jäykisteiden mitoitus
- **Aukko:** I-profiilin uuman aukkojen mitoitus



WinRami ohjelma sisältää myös makroja ristikoiden mallintamiseen ja niiden liitosten käsittelyyn. Makrojen avulla N-, K- ja KT-tyyppiset rakenneputkiristikot ja niiden liitokset voidaan suunnitella nopeasti ja tehokkaasti. Suunnittelijan tarvitsee antaa vain ristikoiden keskeiset parametrit (jänneväli, korkeus jne) määritelläkseen rakenteen, minkä jälkeen **WinRami** luo rakennemallin, lisää kuormat ja tekee kuormitusyhdistelyt sekä määrittelee alustavasti ristikkoliitokset. Suunnittelija lisää käytettävät profiilit **Section** ohjelmasta, tai käyttää tähän tarkoitukseen kehitettyä makroa, jolla kaikki halutut profiilit voidaan lisätä kerralla. Lisätietoja **WinRami** ohjelmasta saa Ruukin verkkosivuilta [www.ruukki.com].

Liite 11.7 Liittopilarin mitoitusohjelma - *ColGraph*

Betonitäytteinen putkipilari voidaan mitoittaa **ColGraph** ohjelmalla. Ohjelma laskee Teräsrakenneyhdistyksen julkaisun 'Betonitäytteisen terässliittopilarin suunnitteluohje' mukaiset keskeisesti kuormitetun betonitäytteisen terässliittopilarin kapasiteettikäyrät parametrisoituina.

Ohjelmalla voidaan valita nurjahduspituuden ja kuormituksen perusteella sopiva liittopilaripoikkileikkaus (neliön tai suorakaiteen muotoinen tai pyöreä rakenneputki) ja siinä käytettävä raudoitus. Raudoituksen sijainti voidaan määrittää myös vapaasti, TRY:n suunnitteluohjeen mukaisesta sijainnista poiketen.

Käyrät perustuvat TRY:n julkaisussa (v.2004) 'Betonitäytteisen terässliittopilarin suunnitteluohje' esitettyyn menetelmään, joka perustuu Eurocoden osaan EN 1994-1-2. Pilarin tulee olla keskeisesti kuormitettu. Kestävyyskäyrät lasketaan normaalilämpötilalle ja standardipalon R30 - R120 mukaisille tilanteille. Käyrissä on mahdollista huomioida nurjahduspituuden hoikkuus (lambda) raja.

Ohjelman keskeiset ominaisuudet:

- valinta eri materiaalien (rakenneputki, raudoite, betoni) lujuusluokille
- pääterästen suojaetäisyyden säätö
- paikallisen lommahduksen huomiointi
- normaalilämpötila ja R30 - R120 palotilanne (standardipalo)
- valittujen kestävyyskäyrien esikatselu ja tulostus
- täydentää TRY:n julkaisua 'Betonitäytteisen terässliittopilarin suunnitteluohje'
- mitoitusnormina Eurocode 4 (EN 1994)
- käyttöliittymä suomenkielinen

Lisätietoja **ColGraph** ohjelmasta saa Ruukin verkkosivuilta [www.ruukki.com].

SSAB on maailmanlaajuisesti toimiva pohjoismainen ja yhdysvaltalainen teräsyhtiö. Yhtiön lisäarvoa tarjoavat tuotteet ja palvelut on kehitetty tiiviissä yhteistyössä asiakkaiden kanssa. Tavoitteena on vahvempi, kevyempi ja kestävämpi maailma. SSAB:llä on työntekijöitä yli 50 maassa ja tuotantolaitoksia Ruotsissa, Suomessa ja Yhdysvalloissa. Yhtiö on noteerattu Nasdaq OMX Nordic Tukholmassa ja toissijaisesti Nasdaq OMX Helsingissä. www.ssab.com.

SSAB Domex Tube - Structural hollow sections-fi-2016.

SSAB ja sen tytäryhtiöt ovat varmistaneet, että tässä julkaisussa olevat tiedot olisivat mahdollisimman tarkkoja. Emme kuitenkaan vastaa mahdollisista virheistä tai harhaanjohtaviksi katsotuista tiedoista. Tuotteidemme käyttöön ja käyttökohteisiin liittyvät ehdotukset ja kuvaukset on tarkoitettu ainoastaan tiedoksi. SSAB ja sen tytäryhtiöt eivät vastaa mistään ehdotuksiin ja kuvauksiin liittyvistä seikoista.

SSAB Europe Oy
Harvialantie 420
13300 Hämeenlinna

T +358 20 59 11
F +358 20 59 25080
contact@ssab.com

www.ssab.com

ISBN 978-952-93-7448-9

SSAB