



Mekaanisen liitoksen tehokkuus verrattuna hitsattuun liitokseen teräspankikiristikossa

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Rakennus- ja yhdyskuntateknikka, insinööri (AMK)
Syksy, 2025
Heini Heikkilä-Nikkanen

Koulutus	Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK)	
Tekijä	Heini Heikkilä-Nikkanen	Vuosi 2025
Työn nimi	Mekaanisen liitoksen tehokkuus verrattuna hitsattuun liitokseen teräsputkiristikossa	
Ohjaajat	Lauri Korhonen, Jarmo Havula	

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää mekaanisen liitoksen aika- ja kustannustehokkuutta verrattuna perinteiseen hitsattuun teräsputkiristikoon. Työ toteutettiin osana Hämeen ammattikorkeakoulun ja LUT-yliopiston MechJoint-hanketta ja sen toimeksiantajana toimi HAMK Tech - tutkimusyksikkö. Hankkeen taustalla on tarve kehittää teräsrakentamiseen ratkaisuja, jotka mahdollistavat rakenteiden purkamisen ja uudelleenkäytön sekä tukevat kestävä kehityksen tavoitteita.

Opinnäytetyössä mitoitettiin esimerkkiristikko Eurokoodien mukaisesti ja tarkasteltiin sen kuormituksia, sauvojen mitoitusta sekä hitsattujen ja mekaanisten liitosten kestävyyttä. Laskennassa hyödynnettiin RFEM-ohjelmistoa. Lisäksi opinnäytetyössä vertailtiin liitostapojen kokoamis- ja kuljetuskustannuksia hyödyntäen aikaisempia tutkimuksia ja kustannuslaskentamalleja.

Tulokset osoittivat, että tarkasteltava mekaanisella liitoksella koottu ristikko on noin 40 minuuttia nopeampi koota kuin vastaava hitsattu ristikko. Myös kuljetuksessa voidaan saavuttaa merkittäviä etuja, sillä mekaanisesti koottavat ristikot voidaan toimittaa osissa, jolloin merikonttiin mahtuu yli kaksinkertainen määrä ristikoita verrattuna hitsattuihin puolikkaisiin. Tämä tekee mekaanisesta liitoksesta erityisen kilpailukykyisen vientimarkkinoilla.

Johtopäätöksenä todettiin, että mekaaniset liitokset tarjoavat potentiaalisia säästöjä sekä kustannuksissa että läpimenoajassa ja tukevat rakenteiden kierrätettävyyttä. Haasteita kuitenkin aiheuttivat reikien esiporaus ja korkealujuusruuviin kustannukset. Jatkotutkimusaiheita ovat mekaanisten liitosten käyttäytyminen korkealujuusteräksissä, liitosten jäykkyyden vaikutus rakenteisiin sekä maalausprosessin vaikutus esiporattuihin reikiin.

Avainsanat	Teräsputkiristikko, mekaaninen liitos, hitsaus, kustannustehokkuus, MechJoint-hanke
Sivut	30 sivua ja liitteitä 26 sivua

DP	Construction and Civil Engineering, Bachelor of Engineering	
Author	Heini Heikkilä-Nikkanen	Year 2025
Subject	Efficiency of Mechanical Joint Compared to Welded Joint in Steel Tube Truss	
Supervisors	Lauri Korhonen, Jarmo Havula	

The aim of this thesis was to examine the time and cost efficiency of mechanical joints compared to traditional welded steel tube trusses. The thesis was carried out as part of the MechJoint project by Häme University of Applied Sciences and LUT University, commissioned by HAMK Tech research unit. The background of the project lies in the need to develop solutions for steel construction that enable disassembly and reuse of structures while supporting sustainable development goals.

In the thesis, a sample truss was designed according to the Eurocodes, and its loads, member design, and the strength of welded and mechanical joints were analyzed. The RFEM software was used for calculations. In addition, the thesis compared the assembly and transportation costs of the different joint types by utilizing previous studies and cost estimation models.

The result showed that the truss assembled with mechanical joints is approximately 40 minutes faster to assemble than an equivalent welded truss. Significant advantages were also achieved in transportation, as mechanically assembled trusses can be delivered in parts, allowing more than twice as many trusses to fit in a shipping container compared to welded halves. This makes the mechanical joint particularly competitive in export markets.

In conclusion, mechanical joints were found to offer potential savings in both costs and lead time, while also supporting the recyclability of structures. However, challenges were identified in the need for pre-drilling holes with laser cutting and the higher costs of high-strength bolts. Future research topics include the behavior of mechanical joints in high-strength steels, the impact of joint stiffness on structures, and the effect of the painting process on pre-drilled holes.

Keywords	Steel tube truss, mechanical joint, welding, cost efficiency, MechJoint project
Pages	30 pages and appendices 26 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Teräspankiristikko	2
2.1	Ristikkorakenne	2
2.2	Ideaaliristikko	3
2.3	Ristikkoliitokset	4
3	Suunnitteluperusteet	5
3.1	Rajatilamitoitus.....	6
3.2	Rakenteen kuormat.....	6
3.2.1	Rakenteista aiheutuvat kuormat.....	8
3.2.2	Lumikuorma.....	8
3.2.3	Tuulikuorma.....	10
4	Rakenteen mitoitus	11
4.1	Kuormat	13
4.2	Ylä- ja alapaarre.....	14
4.3	Uumasauvat.....	15
4.4	Liitokset.....	17
4.4.1	Hitsatut liitokset	17
4.4.2	Mekaaniset liitokset	19
5	Aika- ja kustannustehokkuuden vertailu	20
5.1	Tehokkuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät	21
5.2	Tulokset	22
5.2.1	Ristikon kokoaminen.....	22
5.2.2	Ristikon kuljetuskustannukset.....	26
6	Yhteenveto.....	27
7	Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet.....	28
	Lähteet.....	29

Kuvat

Kuva 1 Ristikon osien nimet.....	2
Kuva 2 Erilaiset ristikkotyypit.....	3
Kuva 3 Putkiristikoiden liitostyypit (SFS-EN 1993-1-8:2005, s. 111).....	5
Kuva 4 Maanpinnan ominaislumikuormat alueittain Suomessa (RIL 201-1-2017, 2016, s. 98).....	9
Kuva 5 Harjakaton lumikuorman kuormituskaavio (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, 2015, s. 34).....	10
Kuva 6 Harjakaton vyöhykekaavio (SFS-EN 1991-1-4+AC+A1, 2011, s. 74).	11
Kuva 7 Pilari-ristikko-kehä.....	12
Kuva 8 Kuormitukset katto-orsilla suurimman kuormitusyhdistelmän mukaan.....	13
Kuva 9 Paarteiden normaalivoimat ja taivutusmomentit.	14
Kuva 10 Päällekkäisliitoksen pulttien leikkauskestävyyden vertailu 0 mm ja 2 mm levyvälillä (Al-Maisari, ym., 2025, s. 58).	16
Kuva 11 Suorakaiteen muotoisten paarre- ja uumasauvojen välisten liitosten murtumismuodot (SFS-EN 1993-1-8, 2005, s. 115).....	17
Kuva 12 Palamurtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 35).....	19
Kuva 13 Kustannusjakauma: yksittäinen teräspalkki ja yksittäinen konepaja (Tiainen, ym., 2020, s. 14).	21
Kuva 14 Ristikon osien asettamiseen kuluva aika (Schreve, ym., 1999).	23
Kuva 15 Osien väliaikaiseen kiinnittämiseen ja irrottamiseen kuluva aika (Schreve, ym., 1999).	23
Kuva 16 Ruuvausnopeustestin tulokset PIAS 5.5 x 32 ruuvilla ja S355 teräslevyillä (Al-Maisari, ym., 2025, s. 56).....	24
Kuva 17 Putkiprofiilien välinen mekaaninen liitos (Patentti- ja rekisterihallitus, n.d.).....	25
Kuva 18 Kuljetusteline esimerkki.....	27

Taulukot

Taulukko 1 Ristikon osat.....	12
Taulukko 2 Uumasauvoihin vaikuttavat voimat.....	16
Taulukko 3 Liitosnopeuden vertailu puolikkaalla ristikolla.....	25
Taulukko 4 Kuljetusmäärän vertailu 40' HC merikontilla.....	27

Kaavat

Kaava 1 Rakennneosien kestävyysmitoituskäännöskäva, pysyvät kuormat (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 88).	7
--	---

Kaava 2 Rakennneosien kestävyysmitoituskava, pysyvät ja muuttuvat kuormat (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 88).....	7
Kaava 3 Ominaisyydistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).....	8
Kaava 4 Tavallinen yhdistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).....	8
Kaava 5 Pitkäaikainen yhdistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).....	8
Kaava 6 Poikkileikkausluokka 1 taso-osa, johon kohdistuu taivutusta ja aksiaalinen voima (SFS-EN 1993-1-1:2022, ss. 50–51).	14
Kaava 7 Taivutuskestävyyden mitoitussarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s. 60).....	15
Kaava 8 Nurjahduskestävyyden mitoitussarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s.73).	15
Kaava 9 Puristuskestävyyden mitoitussarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s. 60).	15
Kaava 10 Kestävyyden mitoitussarvo, paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 131).	18
Kaava 11 Kestävyyden mitoitussarvo, uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 131).....	18
Kaava 12 Vapaavälisen hitsatun K-liitoksen pätevyysraja (SFS-EN 1993-1-8, s. 127).	18
Kaava 13 Palamurtumiskestävyyden mitoitussarvo (SFS-EN 1993-1-8, s. 34).	20
Kaava 14 Ristikön esikokoamiseen kuluva aika pistehitseillä (Haapio, 2012, s. 55).	22
Kaava 15 Pienahitsaukseen kuluva aika (Haapio, 2012, ss. 55–56).	24

Liitteet

Liite 1. Ristikön mitoitustarkentaminen

1 Johdanto

Teräs on yksi maailman käytetyimmistä materiaaleista, mutta sen valmistusprosessi on teollisuuden suurimpia hiilidioksidipäästöjen aiheuttajia. Yksi teräksen merkittävimmistä eduista on kuitenkin sen kierrätettävyyden, sitä voidaan kierrättää lähes loputtomiin laadun heikkenemistä pelkäämättä. Teräksen kierrätys myös kuluttaa vähemmän energiaa kuin uuden teräksen valmistus. Rakennustekniikan alalla nojataan usein perinteisiin kokoonpanomenetelmiin, mikä johtaa siihen, että purkuhankkeissa materiaalien kierrätys ja uudelleenkäyttö on vaikeaa. (Teräsrakenneyhdistys ry, n.d.; ISO-20887:2020, 2020)

Hämeen ammattikorkeakoulun ja LUT-yliopiston MechJoint-hankkeessa kehitetään mekaanista liitostekniikkaa, jolla pyritään tehostamaan teräksisten ristikkorakenteiden kokoonpanoa ja purkamista sekä uudelleenkäyttöä. Mekaaninen liitos mahdollistaa myös ristikon kuljetuksen osissa parantaen erityisesti ristikoiden vientimahdollisuuksia. (Hämeen ammattikorkeakoulu, 2025)

Opinnäytetyön toimeksiantajana toimii Hämeen ammattikorkeakoulun tutkimusyksikkö HAMK Tech ja opinnäytetyö on osa MechJoint-hanketta. Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää mekaanisen liitoksen kokoonpanoaika- ja kustannustehokkuutta verrattuna perinteiseen hitsattuun teräsputkiristikoon. Vertailun pohjana toimii hallirakentamisessa tyypillisesti käytettävä ristikko.

Opinnäytetyössä perehdytään ristikkoon kohdistuvien kuormien mitoittamiseen Eurokoodin 1 (2015) mukaan sekä teräsputkiristikon rakenteiden ja liitosten mitoittamiseen Eurokoodin 3 (2005) mukaan. Nykyisissä Eurokoodeissa ei käsitellä ristikoiden ruuviliitoksia, joten ruuviliitosten mitoitus on tehty Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osan 1–8 luvun 7 (2005, ss. 110–143) mukaan. Rakenteissa vaikuttavien voimien laskemiseen on käytetty RFEM-ohjelmistoa.

Opinnäytetyön laskelmat toimivat pohjana vastaavan korkealujuusteräksisen ristikon ja sen liitosten mitoitukselle sekä MechJoint-hankeen myöhemmässä vaiheessa mekaanisen liitoksen tarkemman FEM-avusteisen mitoituksen lähtötietona.

2 Teräspuistikiristikko

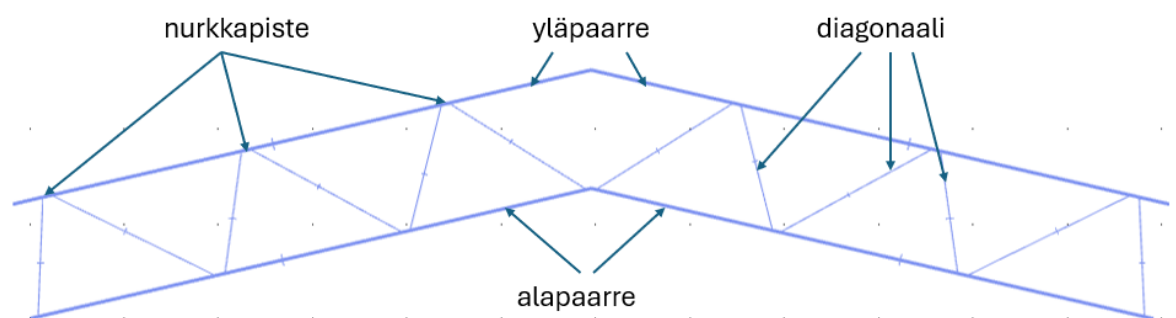
Putkiprofiileista valmistetut teräsristikot ovat laajasti käytössä Suomessa ja muualla Pohjoismaissa. Putkiprofiilit liitetään toisiinsa perinteisesti hitsaamalla. (Al-Maisari, ym., 2025, s. 53)

2.1 Ristikkorakenne

Ristikkorakenteet jaetaan yleisesti toimintatavan perusteella taso- ja avaruusristikoihin, joista avaruusristikot ovat monimutkaisempia ja harvemmin talonrakennuksessa käytettyjä. Ulkonäön perusteella ristikot voidaan jakaa vakio korkuisiin, muuttuvakorkuisiin ja kaareviin ristikoihin. Tässä opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa vakio korkuisia tasoristikkoita. Tasoristikko muodostuu ylä- ja alapaarteesta sekä niiden välissä olevista uumasauvoista (kuva 1). Pystyssä olevia uumasauvoja kutsutaan vertikaalisauvoiksi ja vinossa olevia sauvoja puolestaan diagonaaleiksi. Ristikkorakenteen kokonaispainosta noin 50 % koostuu puristuspaarteesta, 30 % vetopaarteesta ja loput 20 % uumasauvoista.

Materiaalikustannukset muodostavat merkittävän osan valmiin teräsrakenteen kustannuksista, joten materiaalin tehokkaalla käytöllä ja järkevällä optimoinnilla voidaan saavuttaa huomattavia säästöjä. (Kinnunen ym., 2001, s. 84; Tiainen ym., 2020, ss. 14, 140)

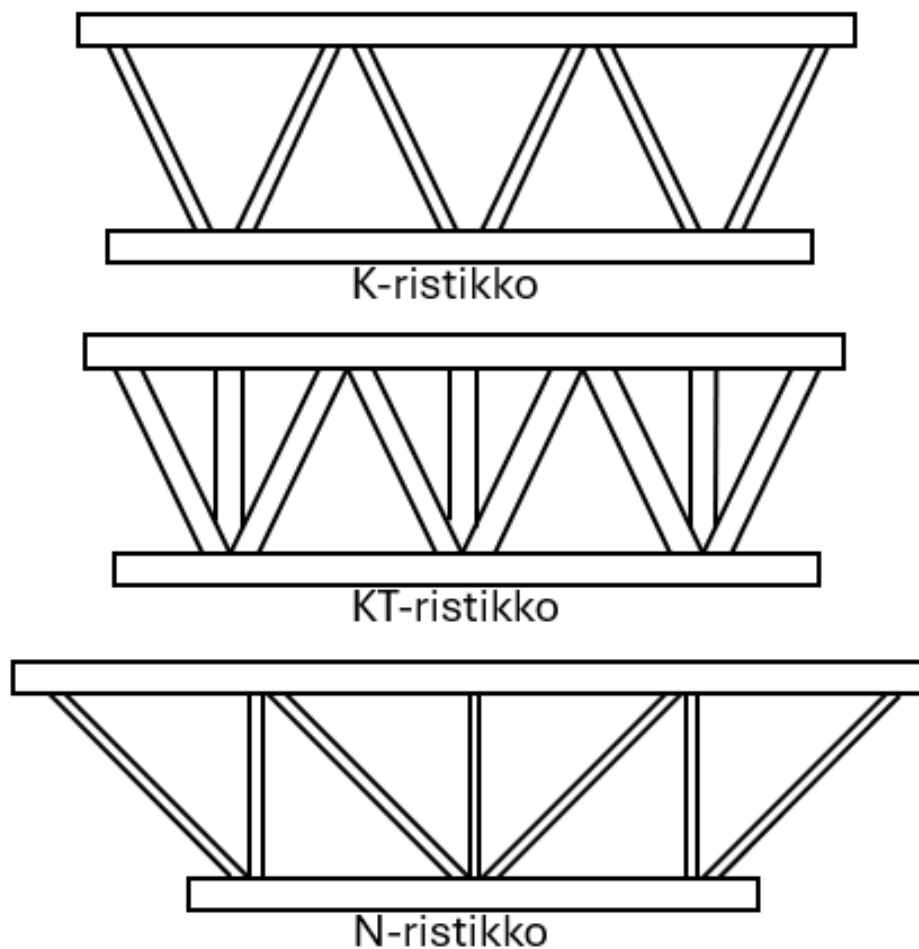
Kuva 1 Ristikon osien nimet.



Rakenneputkesta valmistetulla ristikkorakenteella on korkea nurjahduskestävyys mahdollistaen pitkät jännevälit ja suuret uumasauvojen väliset etäisyydet sekä erinomainen vääntöjäykkyys, jolloin ristikkorakenne kestää hyvin kiepsahdusta. Paras valinta on neliö- tai suorakaiderakenneputki, joka voidaan jäykkyyksien osalta valita vastaamaan paarteen puristavan normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutusta. (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 14; Tiainen ym., 2020, s.140)

Ristikkorakenteet jaetaan paarteiden ja uumasauvojen välisten liitosten mukaan yleisesti kolmeen eri tyyppiin: K-, KT- ja N-ristikkoon (kuva 2). Silloin kun ristikkorakenteeseen ei vaikuta ylöspäin suuntautuvaa taivutusta, on N-ristikko edullisin, sillä siinä puristuksessa olevat vertikaalisauvat ovat lyhyitä ja vedossa olevat diagonaalisauvat pitkiä. K-ristikossa on vähemmän uumasauvoja ja diagonaalien sama kaltevuuskulma yksinkertaistaa liitoksia vähentäen työmäärää. K-ristikko sopii hyvin myös pitkille jänneväleille. KT-ristikossa saadaan enemmän ristikkorakenteen nurkkapisteitä pienimmällä uumasauva määrällä, jolloin yläpaarteen nurjahduskestävyys on parempi kuin K-ristikossa. (Kinnunen ym., 2001, ss. 84–85; Ongelin & Valkonen, 2016, s. 427)

Kuva 2 Erilaiset ristikkotyypit.



2.2 Ideaaliristikko

Ideaaliristikossa uumasauvat liittyvät paarteisiin nivelellisesti, jolloin uumasauvoissa vaikuttaa vain normaalivoima. Kun kuormitukset tuodaan pistekuormina nurkkapisteisiin

esimerkiksi katto-orsien avulla, jotka toimivat samalla ristikon tukina, saadaan paarteiden taivutusrasitusta pienennettyä. (Tiainen ym., 2020, s. 136; Ongelin & Valkonen, 2016, s. 424)

Käytännössä ylä- ja alapaarteet toteutetaan jatkuvina sauvoina, joihin uumasauvat liittyvät nivelellisesti tai täysin jäykällä liitoksella. Uumasauvojen taivutusmomentti on otettava huomioon, mikäli uumasauvat liittyvät paarteisiin osittain tai täysin jäykällä liitoksella. Kattoristikkoa kannattavan pilarin ja paarteiden väliset liitokset ovat nivelellisiä ja liitoksen riittävä muodonmuutoskyky varmistetaan suhteellisen ohuilla päätylevyillä. Jotta päätylevyllystä liitosta voidaan pitää nivelellisenä, levyn paksuudeksi suositellaan 8–10(–12) mm. (Tiainen ym., 2020, ss. 137, 214; Joints in Steel Construction: Simple Connections, 2002, ss. 82–83)

2.3 Ristikkoliitokset

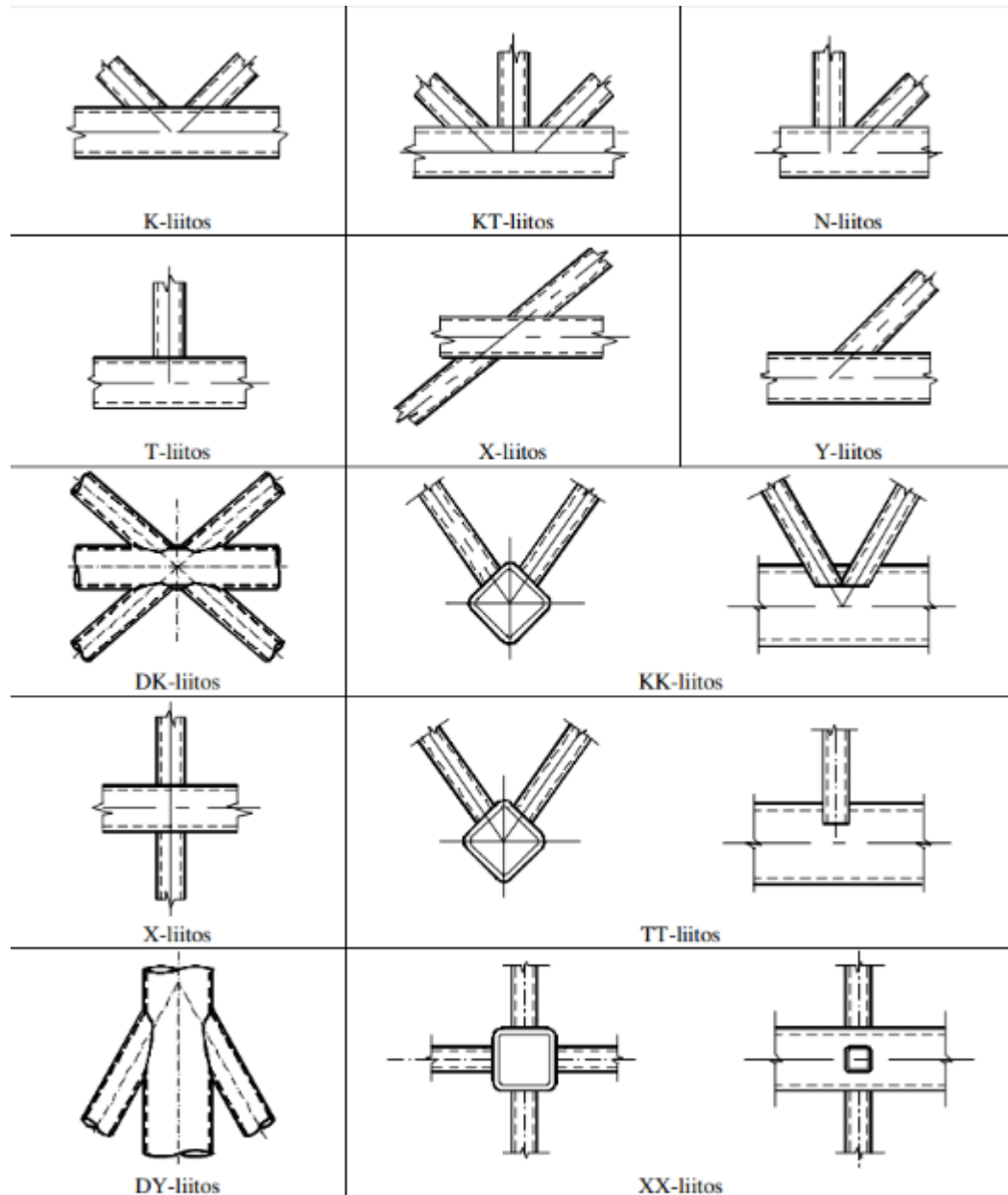
Ristikkorakenteiden liitokset tehdään pääasiallisesti hitsaamalla uumasauvat ja paarteet yhteen sekä hitsaamalla pääty- ja liitoslevyt paarteisiin työmaalla toteutettavia pulttiliitoksia varten. Hitsaus asettaa kuitenkin omat rajoitteensa sekä materiaalille että liitokselle hitsattavuuden ja vapaavälivaatimuksen myötä. Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan mekaanisen liitoksen käyttökelpoisuutta rakenneputkista valmistetun ristikkorakenteen liitoksissa niin kestävyys kuin kustannustehokkuudenkin kannalta. (Murtokangas ym., 1992, ss. 70–71)

Standardin SFS-EN 1993-1-8 luvun 7 ohjeet koskevat taso- ja avaruusristikoiden liitosten staattista kestävyyttä ja perustuvat etupäässä kokeisiin. Standardissa on myös tarkkaan määritelty mille teräslaaduille, rakenneputken valmistusmenetelmille, putken seinämäpaksuuksille ja liitostyypeille (kuva 3) ohjeet ovat käytettävissä. (Kouhi, 2015, s.122)

Liitoksen kestävyys kannalta paarteeksi kannattaa valita paksuseinäinen rakenneputki, mutta nurjahduskestävyyden kannalta ohut seinäinen rakenneputki on parempi vaihtoehto. Uumasauvoissa puolestaan kannattaa suosia ohutseinäistä ja ulkomitaltaan lähes paarteen levyistä rakenneputkea, joka tekee liitoksesta hitsaamisen kannalta mahdollisimman edullisen. Uumasauvan ja paarteen leveyden suhde tulisi olla kuitenkin 0,7–0,8. Eurokoodissa on määritelty neliön ja suorakaiteen muotoisten uuma- ja paartesaauvojen välisten hitsiliitosten pätevyysrajat sekä lisäehdot, joiden toteutuessa liitosten mitoituksessa

voidaan käyttää eurokoodissa esitettyjen taulukoiden mitoitusarvoja. (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 430; SFS-EN 1993-1-8:2005, ss. 127–133)

Kuva 3 Putkiristikoiden liitostyypit (SFS-EN 1993-1-8:2005, s. 111).



3 Suunnitteluperusteet

Suomessa rakennuksia suunniteltaessa noudatetaan kyseeseen tulevaa eurokoodia ja sen kansallista liitettä. Eurocode-järjestelmä on levinnyt laajalti ympäri maailmaa Pohjois-

Amerikkaa lukuun ottamatta, mikä helpottaa kansainvälistä yhteistyötä sekä avaa rakennusalan kansainväliselle kilpailulle. (Tiainen ym., 2020, s. 11)

Eurokoodi Rakenteiden suunnitteluperusteet (2006, s. 44) asettaa rakenteiden suunnittelun ja toteutuksen perusvaatimukset, joiden mukaan rakenteen tulee säilyttää luotettavuustasonsa koko suunnitellun käyttöiän ajan myös onnettomuustilanteessa. Eurokoodit ovat korvanneet aiemmat kansalliset standardit ja alueelliset ohjeet.

3.1 Rajatilamitoitus

Rajatilamitoituksen tarkoituksena on varmistaa, että rakenne säilyttää kantokykynsä ja käyttökelpoisuutensa koko rakenteen suunnitellun käyttöiän ajan. Rakenteelle määritetään seuraamusluokka sen mukaan, kuinka suuret vaikutukset rakenteen pettämisellä on. Seuraamusluokkiin voidaan liittää kolme eri luotettavuusluokkaa, joiden avulla määritetään kuormitusyhdistelyssä käytettävä kuormakerroin K_F . Rakenteen rajatilatarkastelussa tulee tarkastella sekä murto- että käyttörajatila. (da Silva, 2016, s. 10; Kinnunen ym., 2001, ss. 23–25; SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, ss. 136,138)

Murto-rajatilan tarkastelun tavoitteena on osoittaa, etteivät ominaiskuormista muodostuvat laskennalliset kuormat ylitä rakenteen kestävyyttä. Murto-rajatiloihin luetaan kaikki ihmisten turvallisuuteen tai rakenteen varmuuteen liittyvät rajatilat. Teräsrakenteen murto-rajatiloja ovat muun muassa poikkileikkauksen murtuminen rakenteen kestävyyskannalta kriittiseltä kohdalta, rakenteen vakauden menettäminen ja rakenteen siirtyminen paikaltaan tai kaatuminen. Käyttö-rajatilatarkastelulla osoitetaan, etteivät laskennalliset kuormat aiheuta liiallisia muutoksia rakenteen suunnitellulle käyttötarkoitukselle, ihmisten viihtyvyydelle tai rakenteen ulkonäölle. Yleisimmin tarkasteltu rajatila on taipumarajatila. (da Silva, 2016, ss. 9, 15; Kinnunen ym., 2001, ss. 24; SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, ss. 52, 54; RIL 144-2002, 2006, s. 13)

3.2 Rakenteen kuormat

Rakenteiden suunnittelussa rakenteiden kuormat tulee suunnitella eurokoodin mukaisesti. Eurocode 1: Rakenteiden kuormat osa 1–1 (yleiset kuormat, tilavuuspainot, oma paino ja rakennusten hyötykuormat), osa 1–3 (lumikuormat) ja osa 1–4 (tuulikuormat) määrittävät rakenteisiin kohdistuvien kuormien ominaisarvojen alarajat ja suunnittelijan tulee arvioida rakenteen suunnittelu iän aikana odotettavissa olevien kuormien todellinen suuruus.

Kuormat jaetaan niiden ajallisen vaihtelun mukaan kahteen ryhmään: pysyviin ja muuttuviin kuormiin. Pysyvät kuormat ovat vakaita suuruudeltaan, sijainniltaan ja suunnaltaan muuttumattomia tai hyvin vähän muuttuvia, jolloin muutosta ei tarvitse huomioida mitoituksessa. Esimerkiksi rakenneosien omapaino ja maanpaino ovat pysyviä kuormia. Muuttuvat kuormat puolestaan muuttuvat joko vaikutusaikansa tai -paikkansa perusteella. Muuttuvat kuormat voidaan edelleen jakaa vaikutusaikansa: pitkä- ja lyhytaikainen, tai sijaintinsa: kiinteä ja liikkuva, perusteella. Muuttuvia kuormia ovat rakenteen käytöstä aiheutuvat hyötykuormat sekä luonnonkuormat: lumi-, tuuli-, vesi- ja jääkuormat. (Kinnunen ym., 2001, s. 25; RIL 144-2002, 2006, ss. 14–80; Tiainen ym., 2020, s. 57)

Eurokoodin rakenteiden suunnitteluperusteet liitteessä A1 esitetään rakennuksia koskevat säännöt ja menetelmät, joita noudattaen muodostetaan rakennuksiin soveltuvat kuormitusyhdistelyt. Peruseriaatteena kuormitusyhdistelyissä on, että samaan aikaan huomioidaan vain kuormat, jotka voivat fysikaalisista tai toiminnallisista syistä esiintyä samanaikaisesti. Suomen kansallisessa liitteessä murtorajatilassa kuormitusyhdistelyissä käytetään vain kahta peruskaavaa, joista toinen sisältää vain pysyviä kuormia (kaava 1) ja toinen sekä pysyviä että muuttuvia kuormia (kaava 2). (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, ss. 86, 88, 90, 92; Ympäristöministeriö, 2016, s. 21; Tiainen ym., 2020, s. 57)

Kaava 1 Rakenneosien kestävyysmitoituskaava, pysyvät kuormat (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 88).

$$1.35K_{FI}G_{kj,sup} + 0.9G_{kj,inf}$$

Kaava 2 Rakenneosien kestävyysmitoituskaava, pysyvät ja muuttuvat kuormat (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 88).

$$1.15K_{FI}G_{kj,sup} + 0.9G_{kj,inf} + 1.5K_{FI}Q_{k,1} + 1.5K_{FI}\sum_{i>1}\psi_{0,i}Q_{k,i}$$

missä G_{kj} on pysyvän kuorman j ominaisarvo, $Q_{k,1}$ on määräävän muuttuvan kuorman ominaisarvo, $Q_{k,i}$ on muun samanaikaisen muuttuvan kuorman ominaisarvo, K_{FI} on kuormakerroin seuraamusluokan mukaan ja ψ on kuorman yhdistelykerroin.

Käyttöraajatilassa käytetään kolmea eri kuormitusyhdistely kaavaa, joista saatavaa tulosta käytetään kussakin tarkastelutilanteessa (kaavat 3–5). Ominaisyhdistelmää käytetään harvoin teräsrakenteissa, sillä siinä tarkastellaan palautumattomia rajatiloja. Pitkäaikaista

yhdistelmää käytetään tarkasteltaessa kuormien vaikutusta rakenteen ulkonäköön sekä pitkäaikaisvaikutusten arvioinnissa. (Tiainen ym., 2020, s. 58)

Kaava 3 Ominaisyhdistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{j > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Kaava 4 Tavallinen yhdistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \psi_{1,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{2,i} + Q_{k,i}$$

Kaava 5 Pitkäaikainen yhdistelmä (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, s. 92).

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + \sum_{i \geq 1} \psi_{2,i} Q_{k,i}$$

3.2.1 Rakenteista aiheutuvat kuormat

Rakenneosan omapaino lasketaan kertomalla nimellismitoista laskettu tilavuus materiaalin tilavuuspainolla. Rakenteen omapainoon huomioidaan sekä kantavat että ei-kantavat rakenneosat. (SFS-EN 1990+A1+AC, 2006, ss. 18, 20)

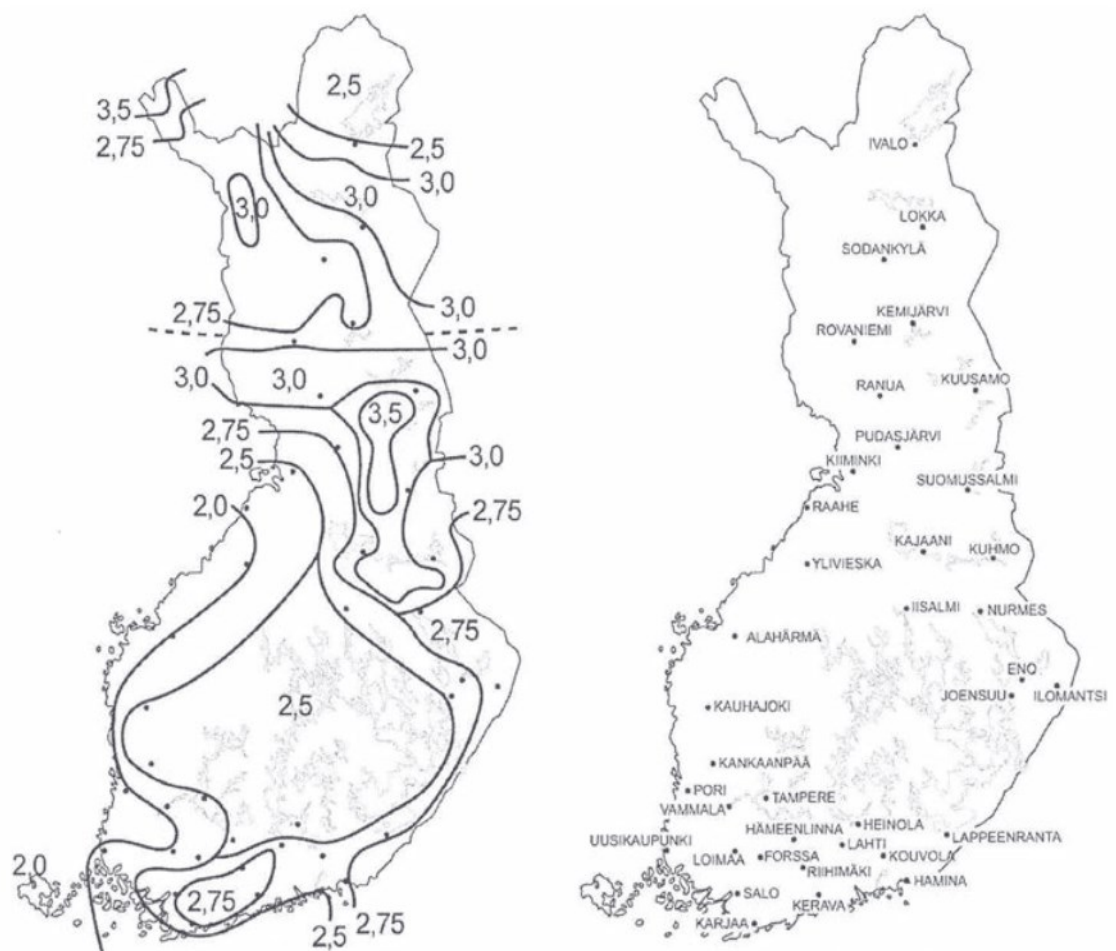
Omapaino on rakenteen suunnittelussa merkittävä kuormitustekijä, sillä se vaikuttaa rakenteeseen koko sen käyttöiän ajan eikä muutu olosuhteiden mukaan. Omapainoon sisällytetään paitsi kantavat pääosat, kuten pilarit, palkit ja kattoristikot, myös kaikki pysyvästi rakenteeseen liittyvät osat, esimerkiksi eristeet, pintamateriaalit ja kiinteät verhoukset. Koska omapaino on laskennallisesti helposti määritettävissä materiaalin tilavuuspainon ja mittojen perusteella, se muodostaa lähtökohdan muiden kuormien huomioimiselle ja on olennainen osa rakenteen kokonaiskuormitusten määrittämistä. (Kinnunen ym., 2001, s. 25; Tiainen ym., 2020, s. 57)

3.2.2 Lumikuorma

Eurokoodissa lumikuorma määritellään muuttuvaksi ja kiinteäksi kuormaksi, jota ei Suomessa käsitellä onnettomuuskuormana. Maanpinnan lumikuormassa on alueellista vaihtelua ja ominaislumikuormat on määritetty rakenteiden kuormat -kansallisessa liitteessä (kuva 4). Kattoristikkoa mitoitettaessa maanpinnan lumikuorma kerrotaan katon

muotokertoimella, maastotyyppistä johtuvalla tuulensuojakertoimella sekä lämpötilakertoimella. Yleisesti tuulensuojakerroin on 1, mutta arvoa 0,8 voidaan käyttää tuulisilla alueilla, kuten rannikolla tai tuntureissa. Lasikattojen tai vähäeristeisten yläpohjien tapauksessa lämpötilakerrointa voidaan pienentää, mutta tavallisesti sen arvo on 1. Katon muotokertoimeen vaikuttaa katon kaltevuus. (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, 2015, ss. 24, 28, 30; RIL 201-1-2017, 2016, ss. 100–102)

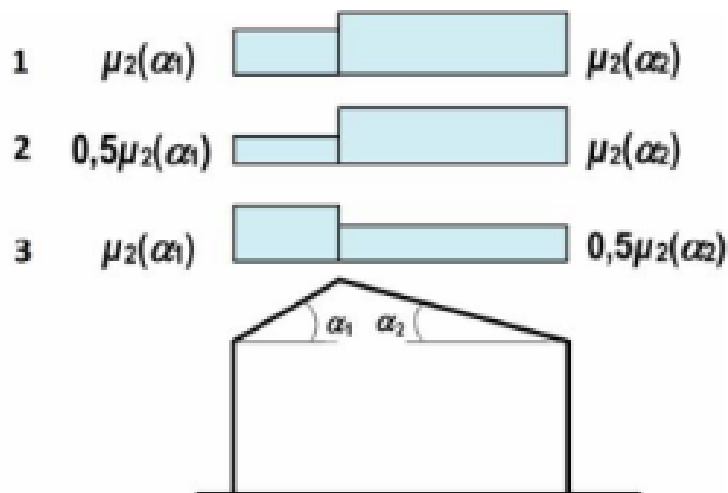
Kuva 4 Maanpinnan ominaislumikuormat alueittain Suomessa (RIL 201-1-2017, 2016, s. 98).



Pulpetti-, harja- ja sahakatoissa on huomioitava myös lumen kinostuminen katon muodon, mutta myös tasakatolla olevan esteen, esimerkiksi IV-konehuoneen, vuoksi. Kinostuminen ja ylemmältä katolta liukuva lumikuorma on huomioitava tapauksissa, joissa katot ovat eri korkeudella. Tässä opinnäytetyössä käsitellään vain symmetrisen harjakaton lumikuorman kinostumista (kuva 5) huomioimalla se omina kuormitustapauksinaan niin, että toisessa

kuormitustapauksessa molemmilla lappeilla on täysi lumikuorma ja toisessa kuormitustapauksessa tuulen puoleisella lappeella on täysi lumikuorma ja suojan puolella vain puolet täydestä lumikuormasta. (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, 2015, ss. 24, 28, 30; RIL 201-1-2017, 2016, ss. 101–109)

Kuva 5 Harjakaton lumikuorman kuormituskaavio (SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, 2015, s. 34).



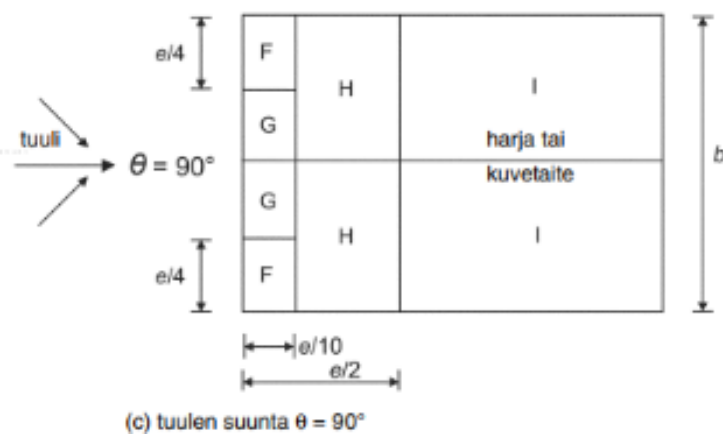
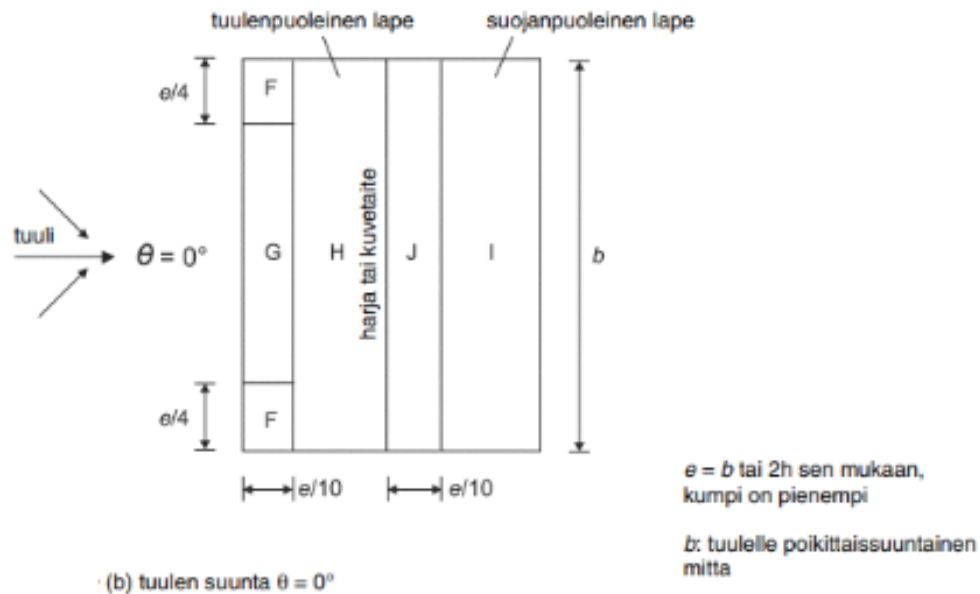
3.2.3 Tuulikuorma

Tuulen nopeus ja käyttäytyminen on erittäin monimutkaista, eikä sen vaikutuksia saa helposti sovellettua yksinkertaisiin rakennemalleihin. Jotta rakennukseen vaikuttava tuulikuorma voidaan laskea, on arvioitava tuulennopeus sekä tuulen aiheuttama paine. Tuulen nopeuteen vaikuttavat niin tuulen suunta, vuodenaika kuin maaston muodotkin. Tuulenpaineeseen puolestaan vaikuttavat tuulennopeus ja rakennuksen muoto. Laskennassa käytettävät tuulen nopeusarvot on määritetty havaintoasemilta kerättyjen tilastoarvojen perusteella. Tuulennopeuspainetta määritettäessä huomioidaan sekä modifioitu tuulennopeuden perusarvo, joka on Suomessa 21 m/s, että tuulen puuskien intensiteetti. (Guide to Evaluating Design Wind Loads to BS 6399-2:1997, 2003, s.1; RIL 144-2002, 2006, s. 29; RIL 201-1-2017, 2016, s. 129)

Rakenteiden tai sen osien tuulikuormia määrittäessä huomioidaan sekä ulko- että sisäpuoliset tuulenpaineet. Tuulikuormat voidaan määrittää joko koko rakenteelle tai sen osalle voimakertoimia tai painekertoimia käyttäen. Tässä opinnäytetyössä lasketaan vain katolle kohdistuva tuulenpaine harjakaton painekertoimia käyttäen. Eurokoodissa katon ulkopuoliset paineet on jaettu vyöhykkeisiin (kuva 6) ja vyöhykkeitä vastaavat

painekertoimet voidaan määrittää taulukkoarvojen mukaan. (RIL 201-1-2017, 2016, ss. 138–139, 146, 155-157; SFS-EN 1991-1-3+AC+A1, 2011, ss. 74)

Kuva 6 Harjakaton vyöhykekaavio (SFS-EN 1991-1-4+AC+A1, 2011, s. 74).

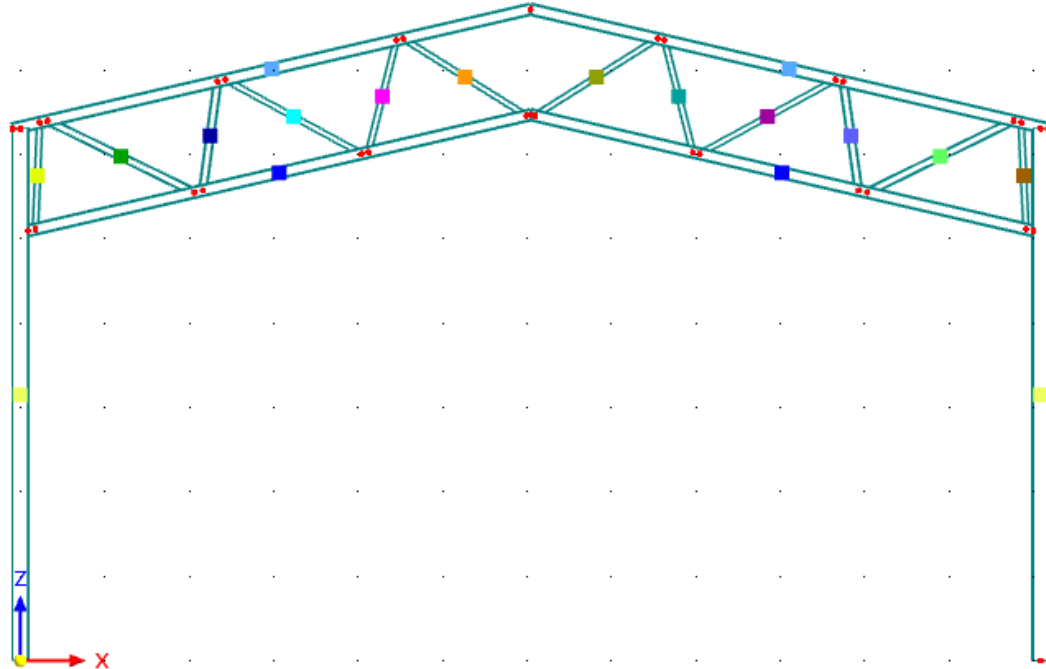


4 Rakenteen mitoitus

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltava esimerkki halli kuuluu seuraamusluokkaan CC2 ja luotettavuusluokkaan RC2. Kuvitteellinen halli sijaitsee Hämeenlinnassa ja maastoluokassa II. Hallin harjakorkeus on 7716,5 mm, pituus 30000 mm ja leveys 12000 mm. Ristikko koostuu kahdesta identtisestä puolikkaasta, jotka on liitetty nivelellisesti sekä toisiinsa että pilareihin (kuva 7). Koska pilarin ja ristikon paarteiden välinen liitos toteutetaan ohuilla ja joustavilla päätylevyillä voidaan pilari jättää huomioimatta ristikon mitoituksessa (Joints in

Steel Construction: Simple Connections, 2002, ss. 82–83). Hallin kantava runko koostuu päätyjen pilari-palkki-kehistä sekä neljästä pilari-ristikko-kehästä. Kehien väli on 6000 mm.

Kuva 7 Pilari-ristikko-kehä.



Kattoristikko koostuu taulukon 1 mukaisista S355 teräksestä kylmämuovaamalla valmistetuista rakenneteräsputkista. Katteena teräsristikon päällä on teräksiset kevytorret, jotka toimivat myös yläpaarten nurjahdustukina, profiilipelti ja eristeet.

Taulukko 1 Ristikön osat.

Osa	Profiili	Pituus (mm)
Vasen		
Alapaaire (1)	SHS 120x120x6	5958
Yläpaaire (2)	SHS 120x120x6	6161
Diagonaali (3)	RHS 100x60x3	1175
Diagonaali(4)	RHS 100x80x5	1969
Diagonaali (5)	RHS 100x80x5	1179
Diagonaali (6)	RHS 100x60x3	1950
Diagonaali (7)	RHS 100x60x3	1175
Diagonaali (8)	RHS 100x60x3	1950
Oikea		
Alapaaire (9)	SHS 120x120x6	5958
Yläpaaire (10)	SHS 120x120x6	6161
Diagonaali (11)	RHS 100x60x3	1175
Diagonaali(12)	RHS 100x80x5	1969
Diagonaali (13)	RHS 100x80x5	1179
Diagonaali (14)	RHS 100x60x3	1950
Diagonaali (15)	RHS 100x60x3	1175
Diagonaali (16)	RHS 100x60x3	1950

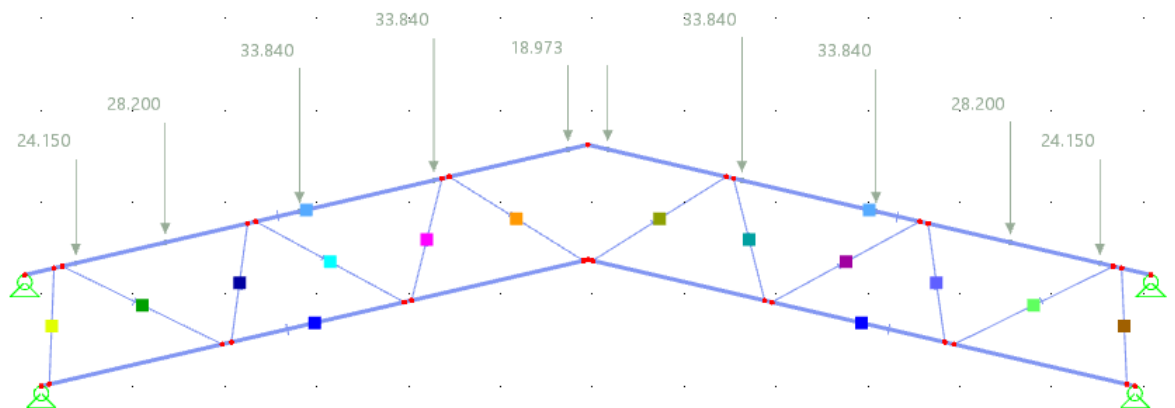
Laskenta toteutettiin aluksi kokonaisuudessaan esimerkki hallin ristikolle, jonka jälkeen selvitettiin, onko rakennetta mahdollista optimoida liitostekniikan vaihtamisen myötä. Optimoinnissa erilaisten profiilien määrää rajattiin niin, että ylä- ja alapäärre pysyvät samankokoisina suhteessa toisiinsa ja uumasauvoja on enintään kolmea eri kokoa. Laskennan pääpiirteet on esitetty liitteessä 1.

4.1 Kuormat

Pysyvinä kuormina, $G_{k,j}$, ristikon mitoituksessa huomioitiin ristikkorakenteen omapaino: $0,097 \text{ kN/m}^2$ ja kattorakenne: $0,4 \text{ kN/m}^2$. Muuttuvina kuormina, $Q_{k,i}$, huomioitiin hyötykuorma katolla: $0,4 \text{ kN/m}^2$, lumikuorma katolla: $2,2 \text{ kN/m}^2$ sekä tuuli katolla: $-0,793 \text{ kN/m}^2$ / $-0,488 \text{ kN/m}^2$.

Murtorajatilassa määrääväksi kuormitusyhdistelmäksi laskennassa muodostui kaavan 2 mukaan määritelty kuormitusyhdistelmä, kun sää on tyyni, katolla on molemmilla lappeilla 100 % lumipeite, eikä katolla ole hyötykuormaa (ihmisiä). Murtorajatilassa mitoituskuorman suuruudeksi tuli $3,871 \text{ kN/m}^2$. Suurimman kuormitusyhdistelmän pohjalta laskettiin kuormitukset katto-orsille (kuva 8).

Kuva 8 Kuormitukset katto-orsilla suurimman kuormitusyhdistelmän mukaan.



Mitoituksessa käytettävät sauvavoimat ja siirtymät saatiin RFEM-mallista ja ne taulukoitiin laskennan eri vaiheita vastaaviksi.

4.2 Ylä- ja alapaarre

Paarteiden mitoitus aloitettiin määrittämällä paarteiden poikkileikkausluokka Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osan 1–1 (2022, ss. 50–51) taulukon 7.3 mukaan. Paarteisiin kohdistuu sekä taivutusta että puristusta (kuva 9) ja paarteiden poikkileikkausluokaksi saatiin PL1 kaavan 6 mukaan.

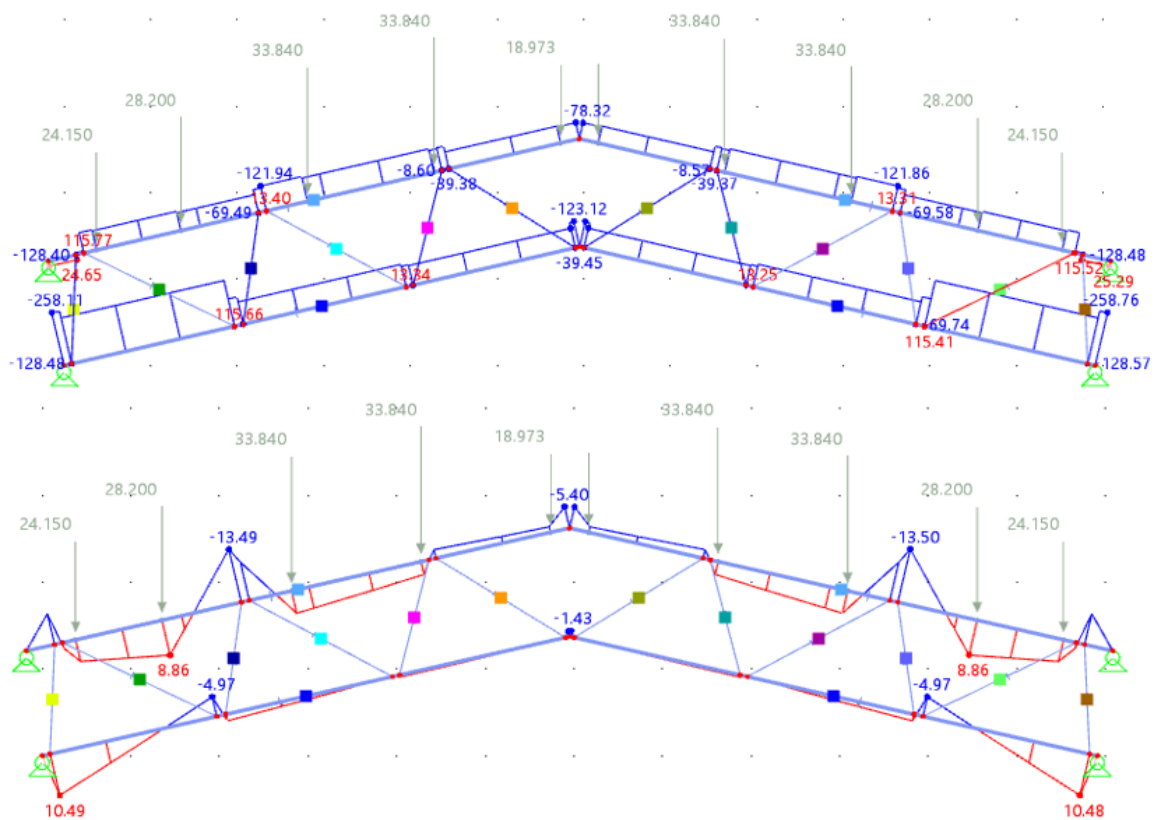
Kaava 6 Poikkileikkausluokka 1 taso-osa, johon kohdistuu taivutusta ja aksiaalinen voima (SFS-EN 1993-1-1:2022, ss. 50–51).

$$\frac{c}{t} \leq \frac{126\varepsilon}{5.5\alpha_c - 1}$$

missä $c = b - 3t$, b on profiilin leveys ja t on profiilin seinämän paksuus, $\alpha_c = 0.5(1 + \frac{N_{Ed}}{ctf_y})$,

N_{Ed} on mitoitusaksaalivoima ja f_y on materiaalin myötöraja sekä $\varepsilon = \frac{235}{f_y}$.

Kuva 9 Paarteiden normaalivoimat ja taivutusmomentit.



Ylä- ja alapaarteiden kestävyys tarkistettiin Eurokoodin 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osan 1–1 mukaan vedolle (vain yläpaarteet), puristukselle, taivutukselle, leikkaukselle, edellä mainittujen yhdistelmille sekä nurjahdukselle. Yläpaarteiden optimoinnissa rajoittavaksi tekijäksi muodostui paarteen taivutuskestävyys (kaava 7), kun taas alapaarteissa rajoittava tekijä oli paarteen nurjahduskestävyys (kaava 8), joka jo nykyisessä rakenteessa oli noin 90 %:n käyttöasteella.

Kaava 7 Taivutuskestävyyden mitoitusarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s. 60).

$$M_{c.Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}}$$

missä $W_{pl,y}$ on profiilin plastisuusteorian mukainen taivutusvastus taivutukselle y-y-akselin suhteen ja γ_{M0} on poikkileikkauksen kestävyden osavarmuusluku.

Kaava 8 Nurjahduskestävyyden mitoitusarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s.73).

$$N_{b.Rd} = \frac{\chi A f_y}{\gamma_{M1}}$$

missä A on poikkileikkauksen pinta-ala, $\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \lambda^2}}$, $\Phi = 0.5(1 + \alpha * (\lambda - 0.2) + \lambda^2)$, α on profiilin nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä, $\lambda = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}$, $N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_a^2}$, E on kimmokerroin, I on jäyhyysmomentti, L_a on alapaarteen nurjahduspituus ja γ_{M1} on epävakauskestävyyden tarkistuksilla arvioitu rakenneosien kestävyden osavarmuusluku.

4.3 Uumasauvat

Jokainen uumasauva mitoitettiin erikseen sen mukaan, oliko sauva vedossa vai puristuksessa (taulukko 2). Vetosauvat mitoitettiin vetokestävyyden osalta ja puristussauvat puristuskestävyyden ja nurjahduksen osalta. Uumasauvoissa itsessään ei tullut esille optimointia rajoittavia tekijöitä sillä eniten kuormitetun sauvan puristuskestävyyden (kaava 9) ja nurjahduskestävyyden käyttöasteet jäivät alle 50 %:iin.

Kaava 9 Puristuskestävyyden mitoitusarvo (SFS-EN 1993-1-1:2022, s. 60).

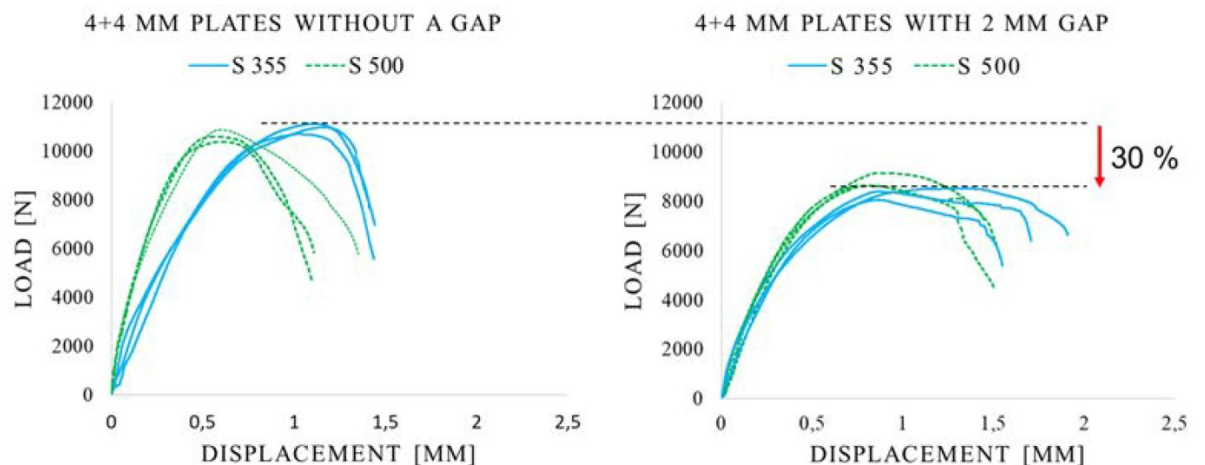
$$N_{c.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

Taulukko 2 Uumasauvoihin vaikuttavat voimat.

Osa	N _{d,max} (kN)
Vasen	
Diagonaali (3)	-128,48
Diagonaali(4)	115,76
Diagonaali (5)	-69,65
Diagonaali (6)	13,39
Diagonaali (7)	-8,69
Diagonaali (8)	-39,39
Oikea	
Diagonaali (11)	-128,56
Diagonaali(12)	115,52
Diagonaali (13)	-69,74
Diagonaali (14)	13,31
Diagonaali (15)	-8,66
Diagonaali (16)	-39,44

Uumasauvoja optimoitaessa otettiin huomioon myös paarteiden sisämittojen ja uumasauvojen ulkomittojen välinen suhde. Päällekkäisliitoksen ruuvien leikkauskestävyydestit (kuva 10) osoittavat, että päällekkäisliitos, jossa levyt ovat toisiaan vasten on 30 % kestävämpi kuin liitos, jossa levyjen välissä on 2 mm rako. (Al-Maisari, ym., 2025, ss. 57–58)

Kuva 10 Päällekkäisliitoksen pulttien leikkauskestävyyden vertailu 0 mm ja 2 mm levyvälillä (Al-Maisari, ym., 2025, s. 58).



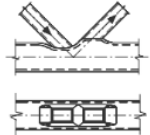
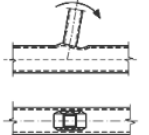
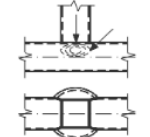
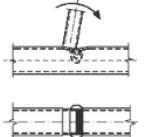
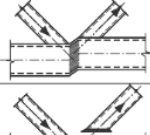
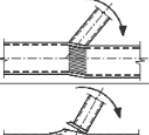
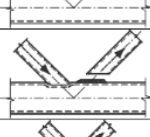
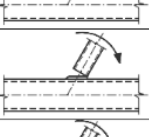
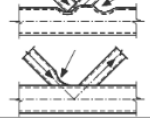
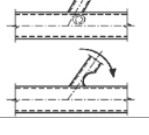
4.4 Liitokset

Avoimissa profiileissa hitsaamattomia liitostekniikoita, kuten pultti-, niitti- ja rosettiliitoksia, käytetään yleisesti, mutta suljetuissa profiileissa niiden käyttö on ollut haastavaa. 3D-laserleikkausteknologia mahdollistaa suljettujen teräsprofiilien monimutkaisetkin leikkaukset helposti ja tarkasti, mikä helpottaa hitsaamattomien liitostekniikoiden käyttöä. (Al-Maisari, ym., 2025, s. 53)

4.4.1 Hitsatut liitokset

Jokainen uumasauvan/uumasauvojen ja paarteen välinen liitos tarkistettiin erikseen tarkistamalla liitoksen osien väliset geometriaehdot sekä määrittämällä liitoksen määräävä murtumismuoto Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osan 1–8 luvun 7 (2005, ss. 110–143) mukaan. Kuvassa 11 on esitetty suorakaiteen muotoisten paarre- ja uumasauvojen välisten liitosten murtumismuodot. Murtumismuoto a on paarteen pinnan murtuminen, b on paarteen sivun murtuminen, c on paarteen leikkausmurtuminen, d on paarresauvan pinnan lävistymisleikkautuminen, e on uumasauvan murtuminen ja f on sauvan paikallinen lommahdus liitoksen kohdalla.

Kuva 11 Suorakaiteen muotoisten paarre- ja uumasauvojen välisten liitosten murtumismuodot (SFS-EN 1993-1-8, 2005, s. 115).

Muoto	Aksiaalinen voima	Taivutusmomentti
a		
b		
c		
d		
e		
f		

Liitosten pääasialliseksi murtotavaksi osoittautui murtumismuoto a: paarteen pinnan murtuminen (kaava 10), mutta huipun molemmiin puolin olevien uumasauvojen molempien päiden murtotavaksi osoittautui murtumismuoto e: uumasauvan murtuminen (kaava 11).

Kaava 10 Kestävyyden mitoitusarvo, paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 131).

$$N_{i.Rd} = \frac{8.9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

missä i on liitoksessa olevien uumasauvojen lukumäärä, $k_n = \min \left(1.3 - \frac{0.4n}{\beta}, 1.0 \right)$, $n = \frac{(\sigma_{0.Ed}/f_{y0})}{\gamma_{M5}}$, $\sigma_{0.Ed}$ on liitoksen kohdalla vaikuttava paarteen suurin puristusjännitys, $\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0}$, f_{y0} on paarteen materiaalin myötöraja, t_0 on paarteen seinämän paksuus, $\gamma = \frac{b_0}{2t_0}$, b_0 on paarteen leveys, θ_i on uumasauvan ja paarteen välinen kulma, b_1 ja b_2 on uumasauvojen leveydet, h_1 ja h_2 on uumasauvojen korkeudet ja γ_{M5} on rakenneputkien liitosten kestävyyden osavarmuusluku ristikoissa.

Kaava 11 Kestävyyden mitoitusarvo, uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 131).

$$N_{i.Rd} = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$$

missä f_{yi} on uumasauvan materiaalin myötöraja, t_i on uumasauvan seinämän paksuus, h_i on uumasauvan korkeus, b_i on uumasauvan leveys ja $b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$

Liitoksen geometriaehdoista diagonaalin ja paarteen leveyden välinen suhde tuli rajoittavaksi tekijäksi diagonaalisauvoja optimoitaessa (kaava 12).

Kaava 12 Vapaavälisen hitsatun K-liitoksen pätevyysraja (SFS-EN 1993-1-8, s. 127).

$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0.35$$

ja

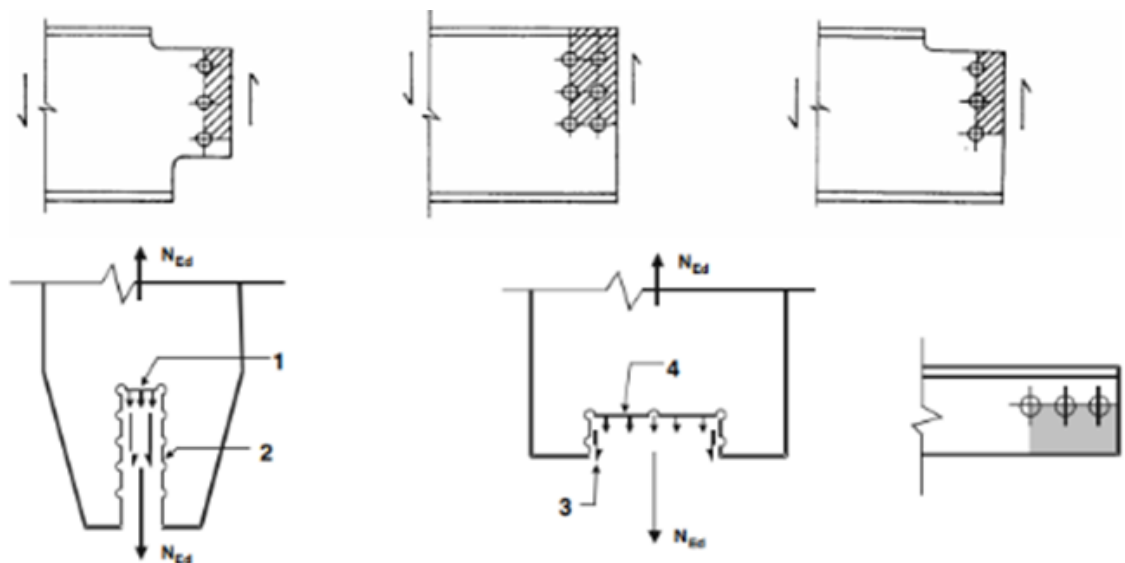
$$\frac{b_i}{b_0} \geq 0.1 + 0.01 \frac{b_0}{t_0}$$

4.4.2 Mekaaniset liitokset

Tällä hetkellä voimassa olevissa Eurokoodeissa ei suoraan ole mitoitusohjeita mekaanisille liitoksille ruuveja käyttäen. Suomenkielisessä Eurokoodissa 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osan 1–8 Liitokset (2005) puhutaan hieman harhaan johtavasti ruuviliitoksesta, sillä alkuperäisessä englanninkielisessä tekstissä käytetään sanaa "bolt", joka suomentuu suoraan sanaksi "pultti". Tässä opinnäytetyössä mitoitus on tehty Eurokoodin 3 osan 1–8 mukaan kuten se pulttiliitoksille tehtäisiin, mutta ruuvin läpimitta ja leikkauskestävyyden mitoitusarvo ovat alhaisemmat, kuin standardissa esitetyillä pulteilla.

Mekaanisessa ruuviliitoksessa tulee myös huomioida, että ruuvit jakautuvat liitoksen molemmiin puolin. Liitoksessa tarkistettiin ruuvien määrän ja reikien sijainnin reunaehtoja lisäksi uumasauvan reunapuristuskestävyys (ohuempi seinämä) sekä vetosauvojen perusaineen kestävyys palamurtumisen osalta (kuva 12). Palamurtuma osoittautui mekaanisessa liitoksessa uumasauvojen optimointia rajoittavaksi tekijäksi (kaava 13).

Kuva 12 Palamurtuminen (SFS-EN 1993-1-8, s. 35).



- 1 Pieni vetovoima
- 2 Suuri leikkausvoima
- 3 Pieni leikkausvoima
- 4 Suuri vetovoima

Kaava 13 Palamurtumiskestävyyden mitoitusarvo (SFS-EN 1993-1-8, s. 34).

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{(\frac{1}{\sqrt{3}}) f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}}$$

missä f_u on ruuvien vetolujuus, A_{nt} on vedon rasittama nettopinta-ala, γ_{M2} on poikkileikkausten vetomurtumakestävyyden osavarmuusluku ja A_{nv} on leikkauksen rasittama nettopinta-ala.

5 Aika- ja kustannustehokkuuden vertailu

Standardi ISO-20887 Sustainability in buildings and civil engineering works antaa ohjeet rakenteiden valmistettavuuden ja kokoonpantavuuden huomioivaan suunnitteluun (Design for Disassembly and Adaptability, DfD/A). Suunnittelu on merkittävässä roolissa parhaiden teknisten, taloudellisten ja ympäristöllisten mahdollisuuksien saavuttamiseksi.

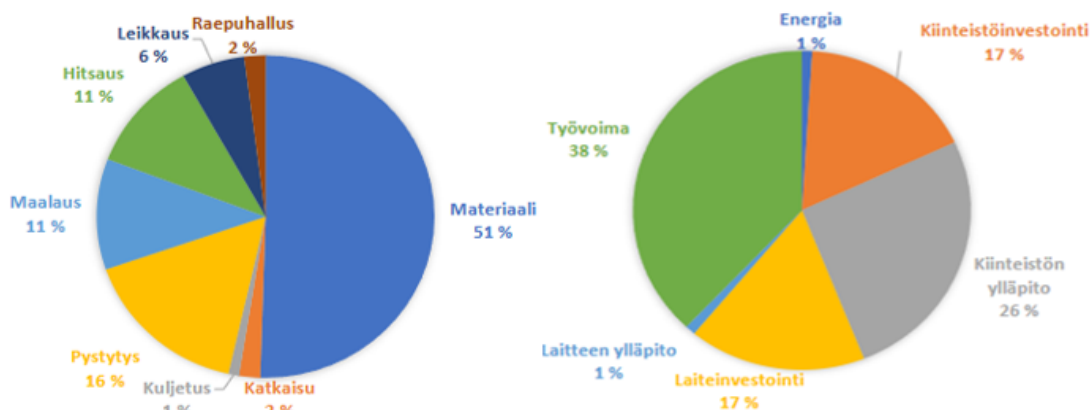
Tuotantokustannusten minimoinnin kannalta otollisin hetki on suunnitteluvaiheessa. DfD/A-menetelmän käyttäminen suunnittelussa on luonut tarpeen entistä tarkemmille kustannusarvio malleille. (ISO 20887:2020; Schreve, ym. 1999)

Tuotantokustannusten arviointi on aina työlästä ja sen kannattavuuden kannalta on tärkeää, että käytetty malli antaa riittävän tarkan tuloksen kohtuullisella vaivannäöllä. Valmistusyrityksen kustannuslaskennassa suoritekohtaista kustannuslaskentaa pidetään laskennan päätehtävänä. Suoritekohtainen laskenta selvittää tuotteen yksikkökustannukset siihen kohdistettujen kustannusten perusteella. Suunnitteluvaihe määrittää 88 % koko teräsrakenteen kustannuksesta, joten suunnittelijan valinnat ovat merkityksellisiä etenkin tiukassa kilpailutilanteessa. Kustannusten arviointimallit vaihtelevat usein suunnittelun vaiheiden mukaan. Hanke-, luonnos- ja ehdotussuunnittelussa kustannusarvio perustuu usein rakennuksen tilavuuteen, kun taas yleissuunnittelussa arvio perustuu valitun materiaalin määrään. Teräsrakenteissa liitokset voivat määrittää jopa 50 % rakenteen kustannuksista, joten toteutussuunnittelussa on syytä käyttää tarkempaa kustannuslaskentamallia kuten KBS-mallia (Knowledge-based System). (Stenbacka, ym., 2016, s. 121; Schreve, ym., 1999; Haapio, 2012, ss. 3–5)

5.1 Tehokkuuteen ja kustannuksiin vaikuttavat tekijät

Teräsrakenteiden kustannuksiin vaikuttavat niin rakenteen monimutkaisuus kuin vallitseva markkinatilannekin. Kuvassa 13 on esitetty kustannusjakauma kahdelta eri kannalta katsottuna: yksittäinen teräspalkki (vasemmalla) ja yksittäinen konepaja (oikealla). Teräksen materiaalikustannus ilmoitetaan yleensä kilohintoina. Materiaalikustannus on usein merkittävä osuus valmiin teräsrakenteen kustannuksista, mutta pelkkä materiaalikilojen vähentäminen ei välttämättä ole taloudellisesti järkevää. Konepajat toimivat yleisesti vain rakenteen kasaajina, eivätkä varastoi suuria määriä materiaalia, vaan niitä hankitaan tarvittava määrä valmistajalta kutakin projektia varten. (Tiainen ym., 2020, ss. 13–14)

Kuva 13 Kustannusjakauma: yksittäinen teräspalkki ja yksittäinen konepaja (Tiainen, ym., 2020, s. 14).



Kustannuksia laskiessa on tärkeää käyttää laskennan komponentteja, jotka vastaavat rakennetta ja laskelman päämäärää. Väitöskirjassaan Haapio (2012) on jakanut laskentamallinsa kuuteen komponenttiin: työ, materiaali, sijoitukset (laitteet ja kiinteistö), kulutustavara, energia ja huolto (laitteet ja kiinteistö). Tämän lisäksi kulut on jaettu ajasta riippuviin: työ, sijoitukset, energia, huolto sekä jotkin kulutustavarat, ja riippumattomiin: materiaali ja jotkin kulutustavarat. Tässä opinnäytetyössä on käytetty Haapion esittämää laskentamallia kustannusvertailujen tekemiseen.

Hitsatuilla liitoksilla on huomattavasti enemmän ja monimutkaisempia laadunvarmistukseen liittyviä vaatimuksia kuin ruuviliitoksilla. Jo pelkästään hitsaajan koulutusvaatimus ja NDT-tarkastukset muodostavat merkittävän kuluerän verrattuna mekaaniseen kiinnitykseen.

Konepajavalmistuksessa yksinkertainen ristikko on edullisin ja nopein koota oli sitten kyse hitsatusta tai mekaanisesta liitoksesta. (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 424)

Vaikka teräspalkin tapauksessa kuljetus on pienin kuluerä valmiin teräsrakenteen kustannuksesta, on asia toisin teräsristikoiden kohdalla. Ristikko rakenteena vie huomattavasti enemmän tilaa kuin pelkät ristikon osat, jotka voidaan koota esimerkiksi kuormalavoille ja koota vasta työmaalla. Kuljetuskustannukset tulevat merkittäviksi etenkin, kun harkitaan ristikoiden vientiä ulkomaille. Kokonaisina tai puolikkaina kuljetetuissa kattoristikoissa kuljetuskonttiin jää huomattavasti hukkatilaa, kun taas osissa olevan ristikon kohdalla rajoittava tekijä on kontin kantokyky.

5.2 Tulokset

Mekaanisen liitoksen potentiaalisen kustannustehokkuuden oletetaan tulevan parhaiten ilmi liitoksen kokoamisnopeudessa ja kuljetettavuudessa. Materiaalin optimoinnista saatava kustannushyöty on rajattu tämän opinnäytetyön ulkopuolelle, sillä liitoksen jäykkyyden vaikutus materiaalin kestävyysasteeseen ja liitoksen käyttäytymiseen vaatii lisää tutkimista ja tarkempia laskentamalleja.

5.2.1 Ristikon kokoaminen

Esimerkki ristikon hitsaus toteutetaan robottiaivusteisesti akselinsa ympäri kääntyvällä hitsausalustalla. Operaattori asettaa ristikon osat paikalleen ja kiinnittää uumasauvat paarteisiin kuudella pistehitsillä per osa. Tämän jälkeen robotti hitsaa liitokset ensin yhdeltä puolen ja hitsausalustan käännön jälkeen toiselta puolen. Kuuteen pistehitsiin per osa on päädytty, sillä silloin osat pysyvät paikallaan robottihitsauksen aiheuttamasta lämpövedosta huolimatta.

Ristikon esikokoamiseen kuluva aika on laskettu kaavalla 14. Kaavan muuttujat huomioivat asetettavien osien koot sekä niiden asemoinnin kriittisyyden (kuva 14), väliaikaisen kiinnittämisen eri menetelmillä (kuva 15) sekä pistehitsien määrän. Ristikon esikokoamiseen kuluva ajaksi hitsaamalla saatiin 31,8 minuuttia. (Haapio, 2012, s.55)

Kaava 14 Ristikon esikokoamiseen kuluva aika pistehitseillä (Haapio, 2012, s. 55).

$$T_{PTa} = T_{Ins.} + T_{Fas.} + T_{Tac.} + T_{Unfas.}$$

missä $T_{Ins.}$ on osien paikalleen asettaminen, $T_{Fas.}$ on osien väliaikainen kiinnittäminen, $T_{Tac.} = 5.42 * N_{tacks} + 2.69$, kun $1 \leq N_{tacks} \leq 7$ tai $T_{Tac.} = 2.73 * N_{tacks} + 25.4$, kun $8 \leq N_{tacks} \leq 20$, N_{tacks} on pistehitsien määrä ja $T_{Unfas.}$ on väliaikaisen kiinnittimen irrotus. (Schreve, ym., 1999)

Kuva 14 Ristikon osien asettamiseen kuluva aika (Schreve, ym., 1999).

0 ≤ Part Size < 300 mm		
MASS < 1 kg		MASS ≥ 1 kg
5.4 s		15.8 s
300 ≤ Part Size < 1000 mm		
CRITICAL ALIGNMENT WITH OTHER PARTS/ASSEMBLIES?		FLEXIBLE PART
NO	YES	
16.5 s	28 s	
29.4 s		
1000 ≤ Part Size < 2000 mm		
$\alpha + \beta < 360^\circ$	$\alpha + \beta \geq 360^\circ$	
31.3 s	47.8 s	
Part Size ≥ 2000 mm		
212.4 s		

Kuva 15 Osien väliaikaiseen kiinnittämiseen ja irrottamiseen kuluva aika (Schreve, ym., 1999).

Fastener	Fasten [s]	Unfasten [s]
PIN	13.1	6.2
BOLT	37.2	25
CLAMP	11	5.5
TOGGLE CLAMP	5.9	2.6
VICE GRIP	10.5	5
PIN & WEDGE	39.5	22.4

Liitosten hitsausaikaa robotilla voidaan arvioida kaavalla 15, jossa hitsausnopeuteen vaikuttavat hitsin pituus ja hitsin a-mitta. Kaava on luotu pienahitsille seoskaasu MAG-hitsauksella, joka vastaa hyvin yleisintä robottihitsaus tekniikkaa. Liitosten pienahitsauksen

kestoksi saatiin 75,7 minuuttia, joten hitsaamalla ristikon kokoamiseen kuluu 107,5 minuuttia. (Haapio, 2012, s. 55)

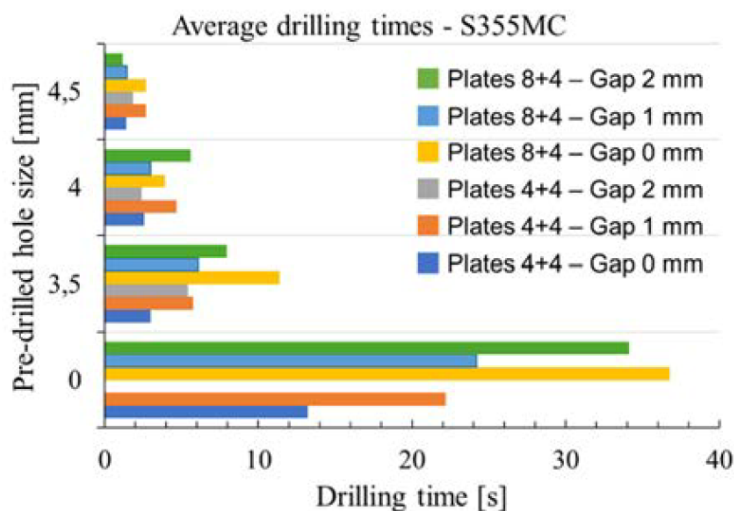
Kaava 15 Pienahitsaukseen kuluva aika (Haapio, 2012, ss. 55–56).

$$T_{pfw} = \frac{L_{fw}}{1000} * (0.4988 * a^2 - 0.0005 * a + 0.0021)$$

missä L_{pfw} on pienahitsin pituus ja a on hitsin a-mitta.

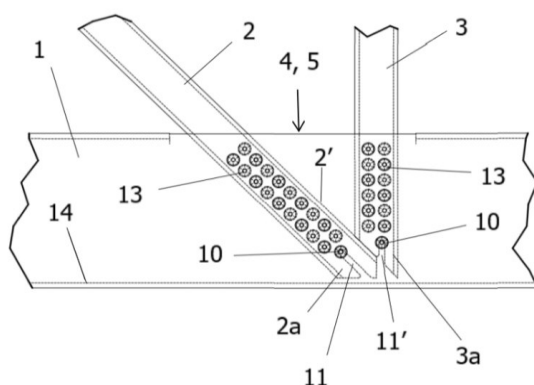
Laskettaessa ristikon kokoamista ruuvaamalla, käytettiin ruuvausnopeutena kuvassa 16 esitettyjen 4,5 mm esiporatuilla rei'illä kokeellisesti saatujen ruuvausnopeuksien keskiarvoa, 3 sekuntia per ruuvi. Kokeessa paras onnistumisprosentti, 100 %, saavutettiin 4,5 mm ja 4 mm esiporatuilla rei'illä. (Al-Maisari, ym., 2025, s. 56)

Kuva 16 Ruuvausnopeustestin tulokset PIAS 5.5 x 32 ruuvilla ja S355 teräslevyillä (Al-Maisari, ym., 2025, s. 56).



Hämeen ammattikorkeakoulun patentoidussa mekaanisen liitoksen liitostekniikassa (kuva 17) ala- ja yläpaarteeseen (1) on leikattu aukot (4, 5) ja ruuvien reiät laserilla, uumavauvoissa (2, 3) on vastaavat reiät ja kohdistus toteutetaan paarteeseen ruuvattavalla ohjaus ruuvilla (10) ja siihen sovitettavalla uumasauvan ohjaisuralla (11). Kaavaa 14 käyttäen ristikon kokoamisen kokonaisajaksi saatiin 25,7 minuuttia.

Kuva 17 Putkiprofiilien välinen mekaaninen liitos (Patentti- ja rekisterihallitus, n.d.).



Näin ollen mekaanisella liitoksella koottu puolikas ristikko olisi 42,1 minuuttia nopeampi valmistaa kuin vastaava hitsattu ristikko (taulukko 3). Työnosuus kokoonpanokuluista on 85 %, joten sen lisäksi, että mekaaninen liitos lyhentää rakenteen läpimenoaikaa, vähentää se myös kokoonpanon kustannuksia. (Haapio, 2012, s. 58)

Taulukko 3 Liitosnopeuden vertailu puolikkaalla ristikolla.

Liitos	Pistehitsaus, s.	Hitsausaika, s	Ruuvausaika, s	Säästetty aika, min
1.	83,01	153,23	100,3	
2.	166,02	541,08	194,6	
3.	166,02	560,23	164,6	
4.	166,02	325,62	116,6	
5.	166,02	306,47	86,6	
6.	166,02	306,47	98,6	
7.	83,01	153,23	58,3	
Kokonais aika	996,12	2346,34	819,60	42,05
min.	31,82	75,66	25,65	
		107,48		

Haapio (2012, s. 88) toteaa väitöskirjassaan, että puolijäykillä liitoksilla voidaan saavuttaa 13 %-30 %:n säästö rakenteen kokonaiskustannuksista. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1–8: liitosten mitoitus (2005, ss. 56, 58) asettaa tasoristikoidille olettamuksen, että ristikon uuma- ja paarsauvat liittyvät toisiinsa nivelellisesti. Liitosten geometriaehtojen täytyessä liitosten kiertymäjäykkyyden aiheuttamat toissijaiset momentit voidaan jättää huomiotta ja näin ollen olettaa uumasauvoihin kohdistuvan vain normaalivoimia. Ruuviliitokset, etenkin liitokset, joissa on useita ruuveja, voivat kuitenkin olla käyttäytymiseltään puolijäykkiä tai jopa jäykkiä liitoksia. Eurokoodissa 3 ei kuitenkaan

esitetä sääntöjä rakenneputkien välisten liitosten kiertymäjäykkyyden alkuarvon määrittämiseksi.

5.2.2 Ristikön kuljetuskustannukset

Kuljetus voidaan järjestää maanteitse, rautateitse tai meriteitse. Rautatiet harvoin osuvat juuri tehtaiden ja työmaiden kohdalle, joten kansallisesti maantiekuljetukset ovat käytännöllisempiä, sillä silloin vältetään turhalta purkamiselta ja uudelleen lastaamiselta. Kotimaassa ristikot kuljetetaan koottuna liitostavasta huolimatta, joten tässä opinnäytetyössä on keskitytty meriteitse tapahtuvan viennin kuljetuskustannusten vertailuun. Vertailun pohjana on käytetty 40' HC-merikonttia, jonka sisämitat P x L x K ovat 12,03 m x 2,34 m x 2,69 m, tilavuus 76,3 m³ ja kantokyky on 26 000 kg. (Haapio, 2012, s. 64; Scandic Container Oy, n.d.)

Euroopan unionin lainsäädäntö säätelee maantiekuljetuksia niin Suomessa kuin muuallakin Euroopassa. Direktiivin 96/53/EY liitteessä 1 (1996) asetetut kuljetuksen mitat ovat minimivaatimuksia kussakin jäsenvaltiossa hyväksyttävillä kuljetuksilla.

Perävaunuyhdistelmässä direktiivin mukainen suurin sallittu pituus on 18,75 m, leveys 2,55 m, korkeus 4,00 m ja paino 44 tonnia, ajoneuvoyhdistelmän mukaan. Kuljetusten suurimmat sallitut koot on syytä ottaa huomioon kuljetusta suunniteltaessa, jolloin vältetään turhilta puruilta ja lastauksilta. 40' HC-merikontti sopii mitoiltaan myös maantiekuljetuksiin EU-alueella.

Hitsatut kattoristikot kuljetetaan 2 symmetrisenä puolikkaana ja liitetään harjalta pulteilla työmaalla. Mekaanisesti koottava ristikko voidaan kuljettaa täysin osissa. Kuljetusta laskettaessa hitsatussa ristikossa rajoittavaksi tekijäksi tulee oletetusti kontin lattiapinta-alan ja ristikön leveyden suhde: ristikot kuljetetaan pystyasennossa, kun taas mekaanisesti kootussa ristikossa rajoittavaksi tekijäksi tulee kontin kantokyky. Yhden kokonaisen esimerkki ristikön paino on 695,3 kg ja kahdesta ristikön puolikkaasta koostuvan ristikön leveys kuljetuksen aikainen suojaus huomioiden on 130 mm.

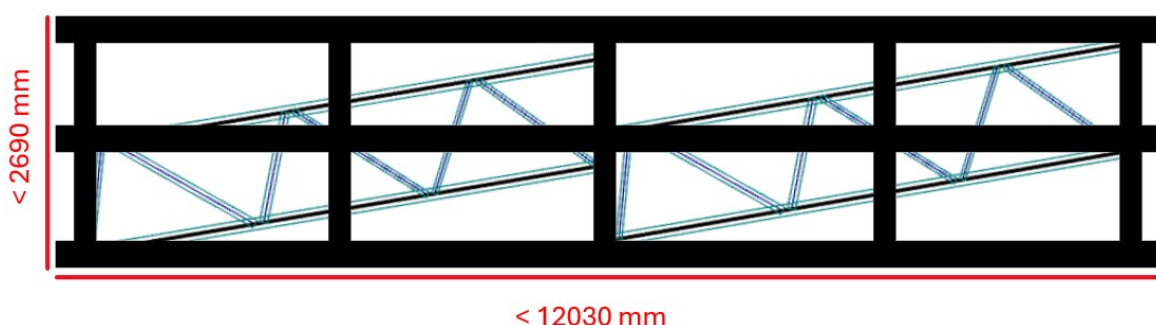
Kantokyvyn puolesta konttiin voidaan pakata 37 osissa olevaa ristikkkoa, kun taas lattiapinta-alan puolesta konttiin mahtuu vain 18 ristikön puolikasta eli 9 kokonaista ristikkkoa. Tämä tarkoittaa, että osissa voitaisiin kuljettaa yli 4 kertaa enemmän ristikkoita yhdellä kertaa (taulukko 4). Etenkin hitsaamalla koottuja ristikön puolikkaita kuljettaessa konttiin jää kuitenkin huomattavan paljon hukkatilaa, jota voidaan hyödyntää

suunnittelemalla toimivat kuljetustuet ristikoille. Kuvassa 18 on esitelty yksi mahdollinen kuljetustuki, jolla ristikon puolikkaiden määrä kontissa voidaan tuplata.

Taulukko 4 Kuljetusmäärän vertailu 40' HC merikontilla.

	Osat	Puolikasta
Konttin kantokyky	37	
Konttin lattia pinta-ala		18
Erotus		4 1/6

Kuva 18 Kuljetusteline esimerkki.



Osissa kuljetettavien ristikoiden uumasauvoille mittatilauksena tehdyt kuljetus laatikot voivat olla käytännöllisin vaihtoehto, sillä pisimmät uumasauvat ylittävät reilusti käytössä olevien FIN- ja EUR-kuormalavojen pituuden. Laatikot voidaan myös suunnitella niin, että merikontin korkeus pystytään hyödyntämään pinoamalla laatikoita päällekkäin ja lastaamalla paarteet omana nippunaan laatikoista jäävään tyhjään tilaan. (Reijo Rautauoman säätiö sr, n.d.)

6 Yhteenveto

Teräputkiristikko on rakennusteollisuudessa varsin tavallinen rakenne ja sen valmistuksessa luotetaan pääosin perinteisiin valmistusmenetelmiin: hitsaamiseen ja pulttiliitoksiin. Uudet Eurokoodit mahdollistavat kuitenkin myös uusien liitostekniikoiden hyödyntämisen ja esimerkiksi mekaanisen ruuviliitoksen hitsauksen tai pulttien sijaan. Mekaanisella liitoksella voidaan saavuttaa ristikon nopeampi läpimenoaika konepajalla, säästää rakenteen kokonaiskustannuksista puolijäykän liitoksen myötä sekä säästöjä ulkomaan viennissä, kun osia mahtuu jopa kaksi kertaa enemmän merikonttiin kuin hitsaamalla koottuja ristikon puolikkaita.

7 Johtopäätökset ja jatkotutkimusaiheet

Mekaaninen liitos osoittautui lupaavaksi vaihtoehdoksi teräsputkiristikoiden liitostekniikkana. Erityisesti viennissä saavutetaan merkittäviä hyötyjä, sillä osissa kuljetettavat ristikot parantavat tilatehokkuutta ja alentavat logistiikkakustannuksia. Myös kotimaisilla markkinoilla mekaanisen liitoksen voidaan odottaa tuovan etuja nopeamman läpimenoajan ja yksinkertaisemman kokoonpanon ansiosta. Toisaalta liitos edellyttää reikien esiporausta laserilla sekä korkealujuusruuveja, joiden kustannusvaikutukset voivat pienentää saavutettavaa kokonaishyötyä.

Opinnäytetyön tulokset tukevat käsitystä mekaanisen liitoksen kustannus- ja aikatehokkuudesta, mutta esiin nousi useita jatkokysymyksiä. Nykyiset eurokoodit eivät vielä kata mekaanisia liitoksia kattavasti, mikä rajoittaa tulosten yleistettävyyttä. Lisäksi opinnäytetyön laajuus ei mahdollistanut liitoksen kiertymäjäykkyyden systemaattista analyysiä, vaikka sillä on merkittävä vaikutus koko ristikon käyttäytymiseen. Myös rakenneputkien kokovalikoima ja mittatilaustuotteiden kustannukset rajoittivat optimointia, sillä parhaaksi vaihtoehdoksi todettiin liitos, jossa sauvojen väliin ei jää tyhjää tilaa.

Jatkotutkimuksessa olisi syytä tarkastella erityisesti mekaanisten liitosten käyttäytymistä korkealujuusteräksissä, joissa voidaan saavuttaa kevyempiä ja pidempiä rakenteita. Lisäksi tarvitaan numeerisia analyyseja, kuten FEM-laskentaa, liitosten jäykkyyden ja kuormitusten jakautumisen arvioimiseksi. Käytännön toteutuksen kannalta myös pintakäsittelyjen vaikutukset ansaitsevat huomiota: esimerkiksi maalaus voi tukkia esiporatut reiät ja siten heikentää liitoksen toimivuutta.

Kokonaisuutena teräsputkirakenteiden mekaaninen liitostapa tukee kiertotalouden tavoitteita, sillä se mahdollistaa rakenteiden purkamisen ja uudelleenkäytön ilman energiaintensiivistä kierrätysprosessia. Energian säästön ja materiaali tehokkuuden näkökulmasta mekaaninen liitos voidaan nähdä potentiaalisena ratkaisuna tulevaisuuden teräsrakentamisessa.

Lähteet

- Al-Maisari, A., Avila Dos Santos, N., Salli, M. & Ma, Zhongcheng. (2025). Experimental Tests And Finite Element Analyses Of The Demountable Steel Truss Joints With Rectangular Hollow Sections. *WIT Transactions on The Built Environment*, 216(VI), 53-65.
<https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-the-built-environment/216/38676>
- Haapio, J. (2012). *Feature-Based Costing Method for Skeletal Steel Structures based on the Process Approach* (Tampereen teknillinen yliopisto 1027) [väitöskirja, Tampereen teknillinen yliopisto]. Trepo. <https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/114746/haapio.pdf?sequence=1>
- Hämeen ammattikorkeakoulu. (24.6.2025). Kestävää teräsrakentamista uudenlaisen liitostekniikan avulla. HAMK. <https://www.hamk.fi/kestavampaa-teraserakentamista-uudenlaisen-liitostekniikan-avulla/>
- ISO 20887:2020. (2020). *Sustainability in buildings and civil engineering works – Design for disassembly and adaptability – Principles, requirements and guidance*. https://www.steelconstruct.com/wp-content/uploads/ISO-20887_2020_01.pdf
- Joints in Steel Construction: Simple Connections*. (2002). The Steel Construction Institute, The British Constructional Steelwork Association Limited
- Kinnunen, J., Saarinen, E., Tiira, S., Ulvinen, S. & Väänänen, E. (2001). *Teräsrakenteiden suunnittelu*. Rakennustieto
- Kouhi, J. (2015). *Eurocode 3 Käsikirja EN 1993-1-8*. Teräsrakenneyhdistys ry
- Murtokangas, K., Rantakokko, T., Syrjä, J., Kemppe, M., Kalamies, U., Niemi, E., Pynnönen, J., Arponen, M., Huhtanen, H., Matikainen, Y., Siivonen, T., Tenhunen, O., Ursin, J., Huuskonen, M., Piirainen, H., Rönkä, M., Lehto, S., Siivonen, T., Riisio, P., ...Törmänen, T. (1992). *RIL 167-2 Teräsrakenteet II*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- Neuvoston direktiivi 96/53/EY. (25.7.1996). *Euroopan yhteisöjen virallinen lehti*, 235/59. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/PDF/?uri=CELEX:31996L0053>
- Patentti- ja rekisterihallitus. (n.d.). *Patenttitietopalvelu*. Haettu 4.9.2025 osoitteesta <https://patenttitietopalvelu.prh.fi/fi/patent/20225016/>
- Reijo Rautauoman säätiö sr. (n.d.). *Logistiikan maailma*. Haettu 31.8.2025 osoitteesta <https://www.logistiikanmaailma.fi/varastointi/varastotyytit-ja-tekniikka/kuormalava/>
- RIL 144–2002*. (2006). *Rakenteiden kuormitusohjeet*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- RIL 201-1-2017*. (2016). *Suunnitteluperusteet ja rakenteiden kuormat*. Suomen Rakennusinsinöörien Liitto RIL ry
- Scandic Container Oy. (n.d.). *Merikonttien mitat*. Haettu 31.8.2025 osoitteesta https://www.scandiccontainer.fi/merikonttien-mitat/?gad_source=1&gad_campaignid=18251059878&gbraid=0AAAAADscPIQWxKH6NAQJ5N

[8fH-HIP7Wca&qclid=Cj0KCQjw5c_FBhDJARIsAlcmHK_o1yGtgIefXfCJNGdHbSL7YZaOh-sUIFItBZnKJXcscQM7Kqc-xN4aAuGTEALw_wcB](https://www.researchgate.net/profile/Anton-Basson/publication/239406140_Manufacturing_cost_estimation_during_design_of_fabricated_parts/links/576b810d08ae5b9a62b3acff/Manufacturing-cost-estimation-during-design-of-fabricated-parts.pdf)

- Schreve, K., Schuster, H. R. & Basson, A. H. (1999). Manufacturing cost estimation during design of fabricated parts. *Journal of Engineering Manufacture Proc IMechE Part B*, 213(B7), 731-735.
https://www.researchgate.net/profile/Anton-Basson/publication/239406140_Manufacturing_cost_estimation_during_design_of_fabricated_parts/links/576b810d08ae5b9a62b3acff/Manufacturing-cost-estimation-during-design-of-fabricated-parts.pdf
- SFS-EN 1990+A1+AC. (2006). *Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet*. SFS Online
- SFS-EN 1991-1-1. (2022). *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. SFS Online
- SFS-EN 1991-1-3+AC+A1. (2015). *Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat. Osa 1–3: Yleiset kuormat. Lumikuormat*. SFS Online
- SFS-EN 1993-1-1:2022. (2022). *Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. SFS Online
- SFS-EN 1993-1-8. (2005). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1–8: Liitosten mitoitus*. SFS Online
- Stenbacka, J., Mäkinen, I. & Söderström, T. (2016). *Kannattavuuden avaimet*. Sanoma Pro Oy
- Teräsrakenneyhdistys ry. (n.d.). *Teräs ja ympäristö*. <https://www.terasrakenneyhdistys.fi/teras-ja-ymparisto/>
- Tiainen, T., Papula, S., Mela, K., Kangaspuoskari, M., Lehtimäki, E., Lahdenmaa, J., Malaska, M. & Tiainen, T. (2020). *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 -oppikirja*. Teräsrakenneyhdistys ry
- Ympäristöministeriö. (2016). *Rakenteiden lujuus ja vakaus: Kantavien rakenteiden suunnitteluperusteet*. <https://ym.fi/rakentamismaaraykset>

Liite 1. Ristikon mitoituslaskenta

Lähtötiedot:

Materiaali: S355J2H
 Seuraamusluokka: CC2
 Luotettavuusluokka: RC2
 Toteutusluokka: EXC2
 Paloluokka: P3

Teräksen keskiarvolukuja:

$$E := 210000 \frac{N}{mm^2}$$

$$\nu := 0.3$$

$$G := \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Materiaali:

$$f_y := 355 \frac{N}{mm^2}$$

$$f_u := 510 \frac{N}{mm^2}$$

$$\varepsilon := \sqrt{\frac{235 \frac{N}{mm^2}}{f_y}} = 0.8136$$

Mitat:

$$H := 7716.5 \text{ mm}$$

$$B := 30000 \text{ mm}$$

$$h := 1250 \text{ mm}$$

$$L := 12000 \text{ mm}$$

Kehäväli:

$$k_{kehä} := 6000 \text{ mm}$$

Nurjahdustuet:

$$k_{ristikko} := 1500 \text{ mm}$$

pilarit ja kevytorret

Yläpaarteen

$$L_y := 0.9 \cdot k_{ristikko} = 1350 \text{ mm}$$

nurjahduspituus:

Alapaarteen nurjahduspituus:

$$L_a := 5400 \text{ mm}$$

12.292 m

$$\gamma_{M0} := 1.00$$

$$\gamma_{M1} := 1.00$$

Kevytorret:**Kevytorsien kuormitusalueet:**

$$O_1 := 570.5 \text{ mm}$$

$$O_6 := 6252.5 \text{ mm}$$

$$O_{k1} := 1070.5 \text{ mm}$$

$$O_{k6} := 841 \text{ mm}$$

$$O_2 := 1570.5 \text{ mm}$$

$$O_7 := 7752.5 \text{ mm}$$

$$O_{k2} := 1250 \text{ mm}$$

$$O_{k7} := 1500 \text{ mm}$$

$$O_3 := 3070.5 \text{ mm}$$

$$O_8 := 9252.5 \text{ mm}$$

$$O_{k3} := 1500 \text{ mm}$$

$$O_{k8} := 1500 \text{ mm}$$

$$O_4 := 4570.5 \text{ mm}$$

$$O_9 := 10752.5 \text{ mm}$$

$$O_{k4} := 1500 \text{ mm}$$

$$O_{k9} := 1250 \text{ mm}$$

$$O_5 := 6070.5 \text{ mm}$$

$$O_{10} := 11752.5 \text{ mm}$$

$$O_{k5} := 841 \text{ mm}$$

$$O_{k10} := 1070.5 \text{ mm}$$

Kuormat:

Pysyvät kuormat:

Teräsrakenteen omapaino:

$$\gamma_{\text{teräs}} := 78.5 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

Kattoristikon omapaino:

Yläpaarre: $P_{\text{ylä}} := 6161 \text{ mm}$

$$V_{p.\text{ylä}} := (120 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm} - (120 \text{ mm} - 2 \cdot 6 \text{ mm}) \cdot (120 \text{ mm} - 2 \cdot 6 \text{ mm})) \cdot P_{\text{ylä}} = (16.856 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

Alapaarre: $P_{\text{ala}} := 5958 \text{ mm}$

$$V_{p.\text{ala}} := (120 \text{ mm} \cdot 120 \text{ mm} - (120 \text{ mm} - 2 \cdot 6 \text{ mm}) \cdot (120 \text{ mm} - 2 \cdot 6 \text{ mm})) \cdot P_{\text{ala}} = (16.301 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

Uumasauvat: $U_{2013} := 1175 \text{ mm}$

$$V_{2013} := (100 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm} - (100 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm}) \cdot (60 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm})) \cdot U_{2013} = (1.0857 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

 $U_{2015} := 1969 \text{ mm}$

$$V_{2015} := (100 \text{ mm} \cdot 80 \text{ mm} - (100 \text{ mm} - 2 \cdot 5 \text{ mm}) \cdot (80 \text{ mm} - 2 \cdot 5 \text{ mm})) \cdot U_{2015} = (3.347 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

 $U_{2012} := 1179 \text{ mm}$

$$V_{2012} := (100 \text{ mm} \cdot 80 \text{ mm} - (100 \text{ mm} - 2 \cdot 5 \text{ mm}) \cdot (80 \text{ mm} - 2 \cdot 5 \text{ mm})) \cdot U_{2012} = (2.004 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

 $U_{2014} := 1950 \text{ mm}$

$$V_{2014} := (100 \text{ mm} \cdot 60 \text{ mm} - (100 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm}) \cdot (60 \text{ mm} - 2 \cdot 3 \text{ mm})) \cdot U_{2014} = (1.8018 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

$$\Sigma V := (V_{p.\text{ylä}} + V_{p.\text{ala}} + 2 \cdot V_{2013} + V_{2015} + V_{2012} + 2 \cdot V_{2014}) \cdot 2 = (88.568 \cdot 10^{-3}) \text{ m}^3$$

$$g_r := \frac{(\Sigma V \cdot \gamma_{\text{teräs}})}{(k_{\text{kehä}} \cdot L)} = 0.097 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Kattorakenne:

kevytorret, profiilipelti,
eristeet

$$g_k := 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Seinät:

kevytelementti

$$g_s := 0.3 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Muuttuvat kuormat:

Hyötykuorma katolla:

$$q_k := 0.4 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Lumikuorma:

$$C_e := 1.0 \quad \mu_t := 0.8 \quad C_t := 1.0 \quad s_k := 2.75 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad s := \mu_t \cdot C_e \cdot C_t \cdot s_k = 2.2 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

Tuulikuorma:

Maastoluokka: II

Tuulen nopeuden perusarvo:

$$v_{b,0} := 21 \frac{m}{s}$$

Puuskanopeuspaine:
8 m

$$q_{p0.8m} := 0.61 \frac{kN}{m^2}$$

Puuskanopeuspaine:
10 m

$$q_{p0.10m} := 0.65 \frac{kN}{m^2}$$

Seinän painekertoimet: $c_{Pe,10}$

$$c_{pe,s1} := -1.2$$

$$c_{pe,s2} := -0.8$$

$$c_{pe,s3} := -0.5$$

$$c_{pe,s4} := 0.8$$

Katon painekertoimet: $c_{Pe,10}$

$$c_{pe,k1} := -1.3$$

$$c_{pe,k2} := -1.0$$

$$c_{pe,k3} := -0.8$$

$$c_{pe,k4} := -0.5$$

$$c_{pe,k5} := 0.0$$

$$c_{pe,k6} := 0.1$$

Sisäpuoliset painekertoimet:

$$c_{pi,s1} := -0.3$$

$$c_{pi,s2} := 0.2$$

Ulkopintoihin vaikuttava tuulenpaine:
Katto:

$$w_{e5} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k1} = -0.793 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{e8} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k4} = -0.305 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{e6} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k2} = -0.61 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{e9} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k5} = 0 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{e7} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k3} = -0.488 \frac{kN}{m^2}$$

$$w_{e10} := q_{p0.8m} \cdot c_{pe,k6} = 0.061 \frac{kN}{m^2}$$

Kuormitusyhdistelyt:

$$K_{FI} := 1.0$$

$$\psi_{0,i} := 0.6$$

$$\psi_{0,k} := 0$$

$$\psi_{0,l} := 0.7$$

Pysyvät kuormat:

$$G_k := g_r + g_k = 0.497 \frac{kN}{m^2}$$

Muuttuvat kuormat:

$$Q_{k,tumi} := s = 2.2 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_{k,hyyöty} := q_k = 0.4 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_{k,tuuliA} := w_{e5} = -0.793 \frac{kN}{m^2}$$

$$Q_{k,tuuliC} := w_{e7} = -0.488 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY1 := 1.35 \cdot G_k = 0.67 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY2 := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} = 3.871 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY3 := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \langle \psi_{0,i} \cdot Q_{k,tuuliA} + \psi_{0,k} \cdot Q_{k,hyöty} \rangle = 3.157 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY4 := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \langle \psi_{0,i} \cdot Q_{k,tuuliC} + \psi_{0,k} \cdot Q_{k,hyöty} \rangle = 3.432 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY5 := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,tuuliA} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \langle \psi_{0,l} \cdot Q_{k,lumi} + \psi_{0,k} \cdot Q_{k,hyöty} \rangle = 1.692 \frac{kN}{m^2}$$

$$KY6 := 1.15 \cdot K_{FI} \cdot G_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,tuuliC} + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot \langle \psi_{0,l} \cdot Q_{k,lumi} + \psi_{0,k} \cdot Q_{k,hyöty} \rangle = 2.149 \frac{kN}{m^2}$$

Kevytorsien kohdalle syntyvät pistekuormat suurimman kuormitusyhdistelyn mukaan:

$$F := \langle 1.15 \cdot K_{FI} \cdot g_k + 1.5 \cdot K_{FI} \cdot Q_{k,lumi} \rangle \cdot k_{kehä} = 22.56 \frac{kN}{m}$$

$$F_{orsi1} := F \cdot O_{k1} = 24.15 \text{ kN}$$

$$F_{orsi6} := F \cdot O_{k6} = 18.973 \text{ kN}$$

$$F_{orsi2} := F \cdot O_{k2} = 28.2 \text{ kN}$$

$$F_{orsi7} := F \cdot O_{k7} = 33.84 \text{ kN}$$

$$F_{orsi3} := F \cdot O_{k3} = 33.84 \text{ kN}$$

$$F_{orsi8} := F \cdot O_{k8} = 33.84 \text{ kN}$$

$$F_{orsi4} := F \cdot O_{k4} = 33.84 \text{ kN}$$

$$F_{orsi9} := F \cdot O_{k9} = 28.2 \text{ kN}$$

$$F_{orsi5} := F \cdot O_{k5} = 18.973 \text{ kN}$$

$$F_{orsi10} := F \cdot O_{k10} = 24.15 \text{ kN}$$

Tukivoimat:

Alapäärre:

$$F_{Ax} := -225.37 \text{ kN}$$

$$F_{Bx} := 226.02 \text{ kN}$$

$$F_{Az} := -171.22 \text{ kN}$$

$$F_{Bz} := -171.29 \text{ kN}$$

Yläpäärre:

$$F_{Cx} := 18.62 \text{ kN}$$

$$F_{Dx} := -19.27 \text{ kN}$$

$$F_{Cz} := 28.78 \text{ kN}$$

$$F_{Dz} := 28.89 \text{ kN}$$

Normaalivoimat:

$$N_{ala.vas.p} := -258.11 \text{ kN} \quad N_{ala.vas.v} := 0 \text{ kN}$$

$$N_{ala.oik.p} := -258.76 \text{ kN} \quad N_{ala.oik.v} := 0 \text{ kN}$$

$$N_{ylä.vas.p} := -121.95 \text{ kN} \quad N_{ylä.vas.v} := 24.64 \text{ kN}$$

$$N_{ylä.oik.p} := -121.86 \text{ kN} \quad N_{ylä.oik.v} := 25.29 \text{ kN}$$

$$N_{D3} := -128.48 \text{ kN}$$

$$N_{D11} := -128.56 \text{ kN}$$

$$N_{D4} := 115.76 \text{ kN}$$

$$N_{D12} := 115.52 \text{ kN}$$

$$N_{D5} := -69.65 \text{ kN}$$

$$N_{D13} := -69.74 \text{ kN}$$

$$N_{D6} := 13.39 \text{ kN}$$

$$N_{D14} := 13.31 \text{ kN}$$

$$N_{D7} := -8.69 \text{ kN}$$

$$N_{D15} := -8.66 \text{ kN}$$

$$N_{D8} := -39.39 \text{ kN}$$

$$N_{D16} := -39.44 \text{ kN}$$

Leikkausvoimat:

$$V_{ala.vas} := 116.14 \text{ kN}$$

$$V_{ala.oik} := 116.06 \text{ kN}$$

$$V_{ylä.vas} := -23.85 \text{ kN}$$

$$V_{ylä.oik} := -23.81 \text{ kN}$$

Momentit:

$$M_{ala.vas} := 10.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ala.oik} := -13.50 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ylä.vas} := -13.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{ylä.oik} := 11.59 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Yläpaarteen mitoitus:

Yläpaarteen mitoittavat voimat, parre on vedossa ja puristuksessa:

$$|N_{ylä.vas.p}| = 121.95 \text{ kN} \quad |N_{ylä.vas.v}| = 24.64 \text{ kN} \quad |M_{ylä.vas}| = 13.49 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad |V_{ylä.vas}| = 23.85 \text{ kN}$$

Yläpaarteen mitat:

$$b_{ylä} := 120 \text{ mm} \quad h_{ylä} := b_{ylä} = 120 \text{ mm} \quad t_{ylä} := 6 \text{ mm} \quad r_{i.ylä} := 6 \text{ mm}$$

$$c_{ylä} := b_{ylä} - 3 \cdot t_{ylä} = 102 \text{ mm}$$

Profile	Side dimension b [mm]	Wall thickness t [mm]	Outer rounding radius r _o [mm]	Inner rounding radius r _i [mm]
SHS 120 / 6	120.0	6.0	12.0	6.0

Poikkileikkausluokan määrittäminen:

$$\alpha_{c.vas} := 0.5 \cdot \left(1 + \frac{|N_{ylä.vas.p}|}{c_{ylä} \cdot t_{ylä} \cdot f_y} \right) = 0.781$$

$$a) \psi \leq -1$$

Luokka:

Taivutettu taso-osa:

Puristettu taso-osa:

Taso-osa, johon kohdistuu taivutus ja aksiaalinen voima:

$$\text{PL1:} \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 72 \cdot \varepsilon = 1$$

$$\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 28 \cdot \varepsilon = 1$$

$$\text{kun } \alpha_c > 0.5: \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq \frac{126 \cdot \varepsilon}{5.5 \cdot \alpha_{c.vas} - 1} = 1$$

$$\text{kun } \alpha_c \leq 0.5: \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq \frac{36 \cdot \varepsilon}{\alpha_{c.vas}} = 1$$

$$\text{PL2:} \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 83 \cdot \varepsilon = 1$$

$$\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 34 \cdot \varepsilon = 1$$

$$\text{kun } \alpha_c > 0.5: \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq \frac{188 \cdot \varepsilon}{6.53 \cdot \alpha_{c.vas} - 1} = 1$$

$$\text{kun } \alpha_c \leq 0.5: \quad \frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq \frac{41.5 \cdot \varepsilon}{\alpha_{c.vas}} = 1$$

PL3: $\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 121 \cdot \varepsilon = 1$

$\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 38 \cdot \varepsilon = 1$

kun $\psi > -1$: $\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq \frac{38 \cdot \varepsilon}{0.608 + 0.343 \cdot \psi + 0.04 \cdot \psi^2} = ?$

kun $\psi \leq -1^{(a)}$: $\frac{c_{ylä}}{t_{ylä}} \leq 60.5 \cdot \varepsilon \cdot (1 - \psi) = ?$

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat

Selite

1 Taivutus ko. akselin suhteen

	Taivutettu taso-osa	Puristettu taso-osa	Taso-osa, johon kohdistuu taivutus ja aksiaalinen voima
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
Poikkileikkausluokka 1	$c/t \leq 72 \varepsilon$	$c/t \leq 28 \varepsilon$	kun $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{126 \varepsilon}{5,5 \alpha_c - 1}$ kun $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36 \varepsilon}{\alpha_c}$
Poikkileikkausluokka 2	$c/t \leq 83 \varepsilon$	$c/t \leq 34 \varepsilon$	kun $\alpha_c > 0,5$: $c/t \leq \frac{188 \varepsilon}{6,53 \alpha_c - 1}$ kun $\alpha_c \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5 \varepsilon}{\alpha_c}$
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)			
Poikkileikkausluokka 3	$c/t \leq 121 \varepsilon$	$c/t \leq 38 \varepsilon$	kun $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{38 \varepsilon}{0,608 + 0,343 \psi + 0,04 \psi^2}$ kun $\psi \leq -1^a$: $\frac{c}{t} \leq 60,5 \varepsilon (1 - \psi)$

Yläpaarteen poikkileikkausarvot:

$$A_{ylä} := 2643.00 \text{ mm}^2$$

$$W_{pl.y.ylä} := 111600 \text{ mm}^3$$

$$I_{ylä} := 5.622 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen vetokestävyys:

$$N_{t.Rd.ylä} := \frac{A_{ylä} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 938.265 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 59, kaava 8.14]

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{ylä.vas.v}|}{N_{t.Rd.ylä}} = 2.626\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 59, kaava 8.13]

Poikkileikkauksen puristuskestävyys:

$$N_{c.Rd.ylä} := \frac{A_{ylä} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 938.265 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 60, kaava 8.18]

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{ylä.vas.p}|}{N_{c.Rd.ylä}} = 12.997\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 60, kaava 8.17]

Poikkileikkauksen taivutuskestävyys:

$$M_{c.Rd.ylä} := \frac{W_{pl.y.ylä} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 39.618 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 60, kaava 8.20]

Käyttöaste:

$$\frac{|M_{ylä.vas}|}{M_{c.Rd.ylä}} = 34.05\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 60, kaava 8.19]

Profile	Weight m [kg/m]	External perimeter P [m]	Area A [mm ²]	Shear area A _v [mm ²]	Second moment of area I [×10 ⁶ mm ⁴]	Radius of gyration i [mm]	Elastic section modulus W _{el} [×10 ³ mm ³]	Plastic section modulus W _{pl} [×10 ³ mm ³]
SHS 120 / 6	20.7	0.459	2643	1322	5.622	46.1	93.69	111.6

Poikkileikkauksen leikkauskestävyys:

Leikkauspinta-ala:

$$A_{v,ylä} := \frac{A_{ylä} \cdot h_{ylä}}{(b_{ylä} + h_{ylä})} = 1321.5 \text{ mm}^2 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 62}]$$

$$V_{pl.Rd,ylä} := \frac{A_{v,ylä} \cdot \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} = 270.854 \text{ kN} \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 61, kaava 8.23}]$$

Käyttöaste:

$$\frac{|V_{ylä,vas}|}{V_{pl.Rd,ylä}} = 8.805\% \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 61, kaava 8.22}]$$

Poikkileikkauksen taivutus-, leikkaus- ja aksiaalisen voiman yhdistelmän kestävyys:

Leikkausvoiman vaikutus taivutuskestävyyteen voidaan jättää huomiotta, jos seuraava ehto täyttyy:

$$\eta_{V,ylä} := 0.5 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 65}]$$

$$|V_{ylä,vas}| \leq \eta_{V,ylä} \cdot V_{pl.Rd,ylä} = 1 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 65, kaava 8.35}]$$

Paitsi tilanteessa, jossa leikkauslommahdus pienentää poikkileikkauksen kestävyttä:

$$\eta := 1.2 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 63}]$$

$$\frac{h_{ylä}}{t_{ylä}} > 72 \cdot \frac{\varepsilon}{\eta} = 0 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 63, kaava 8.27}]$$

Poikkileikkaus ei ole altis leikkauslommahdukselle, joten leikkausvoima voidaan jättää huomiotta arvioitaessa poikkileikkauksen kestävyttä yhdistetyille voimille.

$$a_{w,ylä} := \frac{(A_{ylä} - 2 \cdot b_{ylä} \cdot t_{ylä})}{A_{ylä}} = 0.455 \quad a_{w,ylä} \leq 0.5 = 1 \quad [\text{SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 68}]$$

$$n_{yl\ddot{a}.vas.v} := \frac{|N_{yl\ddot{a}.vas.v}|}{N_{t.Rd.yl\ddot{a}}} = 0.026$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 67]

$$M_{N.Rd.yl\ddot{a}.v} := M_{c.Rd.yl\ddot{a}} \cdot \frac{1 - n_{yl\ddot{a}.vas.v}}{1 - 0.5 \cdot a_{w.yl\ddot{a}}} = 49.944 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 67, kaava 8.51]

$$n_{yl\ddot{a}.vas.p} := \frac{|N_{yl\ddot{a}.vas.p}|}{N_{t.Rd.yl\ddot{a}}} = 0.13$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 67]

$$M_{N.Rd.yl\ddot{a}.p} := M_{c.Rd.yl\ddot{a}} \cdot \frac{1 - n_{yl\ddot{a}.vas.p}}{1 - 0.5 \cdot a_{w.yl\ddot{a}}} = 44.624 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 67, kaava 8.51]

Käyttöaste:

$$\frac{|M_{yl\ddot{a}.vas}|}{M_{N.Rd.yl\ddot{a}.v}} = 27.01\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 66, kaava 8.43]

$$\frac{|M_{yl\ddot{a}.vas}|}{M_{N.Rd.yl\ddot{a}.p}} = 30.23\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 66, kaava 8.43]

Poikkileikkauksen nurjahduskestävyys:

Kriittinen nurjahduskuorma:

$$N_{cr.yl\ddot{a}} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{yl\ddot{a}}}{L_y^2} = 6393.554 \text{ kN}$$

Sauvan hoikkeusluku:

$$\lambda_{yl\ddot{a}} := \sqrt{\frac{A_{yl\ddot{a}} \cdot f_y}{N_{cr.yl\ddot{a}}}} = 0.383$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 73, kaava 8.69]

$$\lambda_{yl\ddot{a}} > 0.2 = 1$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 73]

Taulukko 8.3 Taivutusnurjahduksen nurjahduskäyrän valitseminen

Poikkileikkaus		Rajat	Nurjahdusko. akselin suhteen	Nurjahduskäyrä	
				S235 S275 S355 S420	S460 lajiin S700 asti, kyseinen laji mukaan lukien
Rakenneputket		Kuumamuovattu	Kaikki	a	a0
		Kylmämuovattu	Kaikki	c	c

Taulukko 8.2 Nurjahduskäyrien epätarkkuustekijät α

Nurjahduskäyrä	a0	a	b	c	d
Epätarkkuustekijä α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä:

$$\alpha_{ylä} := 0.49$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 74]

Nurjahduksen pienennystekijä:

$$\Phi_{ylä} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{ylä} \cdot (\lambda_{ylä} - 0.2) + \lambda_{ylä}^2) = 0.618$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 74, kaava 8.74]

$$\chi_{ylä} := \frac{1}{\Phi_{ylä} + \sqrt{\Phi_{ylä}^2 - \lambda_{ylä}^2}} = 0.906 \quad \chi_{ylä} \leq 1.0 = 1$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 74, kaava 8.73]

$$N_{b.Rd.ylä} := \frac{\chi_{ylä} \cdot A_{ylä} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 850.285 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 73, kaava 8.68]

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{ylä.vas.p}|}{N_{b.Rd.ylä}} = 14.342\%$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 72, kaava 8.67]

Yhdistetyn taivutuksen ja aksiaalisen puristuksen vaikutuksen tarkistus:

$$N_{Rk.ylä} := A_{ylä} \cdot f_y = 938.265 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 58, kaava 8.10]

$$M_{Rk.ylä} := W_{pl.y.ylä} \cdot f_y = 39.618 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 58, kaava 8.11]

Koska poikkileikkaus on symmetrinen, $\chi_y = \chi_z = \chi$ ja koska neliön malliset poikkileikkaukset eivät ole alttiita sivuttaisvääntötaipumalle, $\chi_{LT} := 1.0$.
[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 85]

$$n_{y.ylä.vas} := \frac{|N_{ylä.vas.p}|}{\frac{\chi_{ylä} \cdot N_{Rk.ylä}}{\gamma_{M1}}} = 0.143$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 87, kaava 8.91]

$$M_{h1} := -7.81 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{s1} := 8.86 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$M_{h2} := M_{ylä.vas} = -13.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

$$\alpha_s: |M_{h1}| > |M_{s1}| = 0$$

$$\alpha_h: |M_{s1}| > |M_{h1}| = 1$$

$$\alpha_{h1} := \frac{M_{h1}}{M_{s1}} = -0.881$$

$$\text{koska: } -1 \leq \alpha_{h1} = 1, \quad \alpha_{h1} \leq 0 = 1 \quad \text{ja} \quad \psi_1 := \frac{M_{h1}}{M_{h2}} = 0.579 \quad 0 \leq \psi_1 = 1, \quad \psi_1 \leq 1 = 1$$

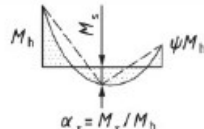
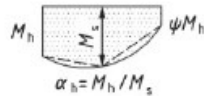
$$C_{my,ylä.vas} := 0.9 + 0.10 \cdot \alpha_{h1} = 0.812$$

$$\text{koska: } \lambda_{ylä} < 1.0 = 1$$

$$k_{yy,ylä.vas} := C_{my,ylä.vas} \cdot (1 + (\lambda_{ylä} - 0.2) \cdot n_{y,ylä.vas}) = 0.833$$

$$k_{zy,ylä.vas} := 0.6 \cdot k_{yy,ylä.vas} = 0.5$$

Taulukko 8.9 Ekvivalentin tasan jakautuneen momentin kertoimet C_m

Momenttipinta	Arvoväli		C_{my} ja C_{mz} ja C_{mLT}	
	$-1 \leq \psi \leq 1$		$0.6 + 0.4\psi \geq 0.4$	
Poikittaisessa kuormituksessa olevat rakenneosat	Tasan jakaantunut kuormitus		Pistemäinen kuormitus	
	$0 \leq \alpha_s \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0.2 + 0.8\alpha_s \geq 0.4$	$0.2 + 0.8\alpha_s \geq 0.4$
	$-1 \leq \alpha_s < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0.1 - 0.8\alpha_s \geq 0.4$	$-0.8\alpha_s \geq 0.4$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0.1(1 - \psi) - 0.8\alpha_s \geq 0.4$	$-0.2\psi - 0.8\alpha_s \geq 0.4$
	$0 \leq \alpha_h \leq 1$	$-1 \leq \psi \leq 1$	$0.95 + 0.05\alpha_h$	$0.90 + 0.10\alpha_h$
	$-1 \leq \alpha_h < 0$	$0 \leq \psi \leq 1$	$0.95 + 0.05\alpha_h$	$0.90 + 0.10\alpha_h$
		$-1 \leq \psi < 0$	$0.95 + 0.05\alpha_h (1 + 2\psi)$	$0.90 + 0.10\alpha_h (1 + 2\psi)$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 88]

(13) Negatiivisen momentin M_h etumerkki ja rakenneosan keskijänteen positiivisen momentin M_s etumerkki otetaan huomioon laskettaessa arvoa α_s tai α_h taulukossa 8.9. Täten:

- α_s tulee kyseeseen jos M_h :n itseisarvo on suurempi kuin M_s
- α_h tulee kyseeseen jos M_s :n itseisarvo on suurempi kuin M_h .

Taulukko 8.7 Yhteisvaikutustekijät k_{yy} ja k_{yz} kaavassa (8.88)

Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkauksen ominaisuudet		Kimmoteorian mukaiset poikkileikkauksen ominaisuudet	
Poikkileikkausluokka 1, Poikkileikkausluokka 2, Poikkileikkausluokka 3 (jossa W_{ep} poikkileikkausluokalle 3 liitteen B) mukaisesti		Poikkileikkausluokka 3, jossa W_{el} , Poikkileikkausluokka 4	
Kun $\bar{\lambda}_y < 1,0$:	$k_{yy} = C_{my} \left[1 + \left(\bar{\lambda}_y - 0,2 \right) n_y \right]$	Kun $\bar{\lambda}_y < 1,0$:	$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,6 \bar{\lambda}_y n_y \right)$
Kun $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$:	$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,8 n_y \right)$	Kun $\bar{\lambda}_y \geq 1,0$:	$k_{yy} = C_{my} \left(1 + 0,6 n_y \right)$
$k_{yz} = 0,6 k_{zz}$, ks. taulukko 8.8		$k_{yz} = k_{zz}$, ks. taulukko 8.8	
HUOM. 1 Arvo n_y , ks. kohta (9) .			
HUOM. 2 Arvo C_{my} , ks. kohta (10) ja taulukko 8.9 .			

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 86]

Taulukko 8.8 Yhteisvaikutustekijät k_{zy} ja k_{zz} kaavassa (8.89)

Poikkileikkaustyyppi	Plastisuusteorian mukaiset poikkileikkauksen ominaisuudet Poikkileikkausluokka 1, Poikkileikkausluokka 2, Poikkileikkausluokka 3 (jossa W_{ep} poikkileikkausluokalle 3 liitteen B) mukaisesti	Kimmoteorian mukaiset poikkileikkauksen ominaisuudet Poikkileikkausluokka 3, jossa W_{el} , Poikkileikkausluokka 4
Ei altis kiepahdukselle	$k_{zy} = 0,6 k_{yy}$ Ks. taulukko 8.7 .	$k_{zy} = 0,8 k_{yy}$ Ks. taulukko 8.7 .

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 86]

Koska poikkileikkausta ei tarkasteta toisen kertaluvun mukaista analyysia käyttäen, tulee seuraavien ehtojen täyttyä:

$$\frac{|N_{ylä.vas.p}|}{\chi_{ylä} \cdot N_{Rk.ylä}} + k_{yy.ylä.vas} \cdot \frac{|M_{ylä.vas}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk.ylä}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0 = 1$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 85, kaava 8.88]

$$\frac{|N_{ylä.vas.p}|}{\chi_{ylä} \cdot N_{Rk.ylä}} + k_{zy.ylä.vas} \cdot \frac{|M_{ylä.vas}|}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{Rk.ylä}}{\gamma_{M1}}} \leq 1.0 = 1$$

[SFS-EN 1993-1-1:2022 s. 85, kaava 8.89]

Uumasauvan mitoitus: (Puristussauva)

Uumasauvan mitoittava voima, sauva puristuksessa:

$$|N_{D3}| = 128.48 \text{ kN}$$

Diagonaalin 3. mitat:

Profile	Drawing	Depth h [mm]	Width b [mm]	Wall thickness t [mm]	Outer rounding radius r _o [mm]	Inner rounding radius r _i [mm]	Weight m [kg/m]	External perimeter P [m]	Area A [mm ²]	Shear area z-z A _{v,z} [mm ²] (for η=1.2)	Shear area y-y A _{v,y} [mm ²]	Second moment of area I _y [×10 ⁶ mm ⁴]	Radius of gyration i _y [mm]	Elastic section modulus W _{el,y} [×10 ³ mm ³]	Plastic section modulus W _{pl,y} [×10 ³ mm ³]
RHS 100x60 / 3	dx1	100	60	3.0	6.0	3.0	7.07	0.310	901	563	338	1.206	36.6	24.11	29.57

$$b_{D3} := 100 \text{ mm} \quad h_{D3} := 60 \text{ mm} \quad t_{D3} := 3 \text{ mm} \quad r_{i,D3} := 3 \text{ mm} \quad L_{D3} := 1175 \text{ mm} \quad L_{cr,D3} := 0.75 \cdot L_{D3} = 881.25 \text{ mm}$$

Diagonaalin poikkileikkausarvot:

$$A_{D3} := 901.00 \text{ mm}^2 \quad W_{pl,y,D3} := 29.57 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad I_{D3} := 1.206 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen puristuskestävyys:

$$N_{c,Rd,D3} := \frac{A_{D3} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 319.855 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{D3}|}{N_{c,Rd,D3}} = 40.168\%$$

Poikkileikkauksen nurjahduskestävyys:

Kriittinen nurjahduskuorma:

$$N_{cr,D3} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{D3}}{L_{cr,D3}^2} = 3218.608 \text{ kN}$$

Sauvan hoikkuusluku:

$$\lambda_{D3} := \sqrt{\frac{A_{D3} \cdot f_y}{N_{cr,D3}}} = 0.315 \quad \lambda_{D3} > 0.2 = 1$$

Nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä:

$$\alpha_{D3} := 0.49$$

Nurjahduksen pienennystekijä:

$$\Phi_{D3} := 0.5 \cdot (1 + \alpha_{D3} \cdot (\lambda_{D3} - 0.2) + \lambda_{D3}^2) = 0.578$$

$$\chi_{D3} := \frac{1}{\Phi_{D3} + \sqrt{\Phi_{D3}^2 - \lambda_{D3}^2}} = 0.941 \quad \chi_{D3} \leq 1.0 = 1$$

$$N_{b,Rd,D3} := \frac{\chi_{D3} \cdot A_{D3} \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = 301.098 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{D3}|}{N_{b,Rd,D3}} = 42.671\%$$

Uumasauvan mitoitus:(Vetosauva)

Uumasauvan mitoittava voima, sauva vedossa:

$$|N_{D4}| = 115.76 \text{ kN}$$

Profile	Drawing	Depth h [mm]	Width b [mm]	Wall thickness t [mm]	Outer rounding radius r _o [mm]	Inner rounding radius r _i [mm]	Weight m [kg/m]	External perimeter P [m]	Area A [mm ²]	Shear area z-z A _{v,z} [mm ²] (for η=1.2)	Shear area y-y A _{v,y} [mm ²]	Second moment of area I _y [×10 ⁶ mm ⁴]	Radius of gyration I _y [mm]	Elastic section modulus W _{el,y} [×10 ³ mm ³]	Plastic section modulus W _{pl,y} [×10 ³ mm ³]
RHS 100x80 / 5	dx1	100	80	5.0	10.0	5.0	12.8	0.343	1636	909	727	2.259	37.2	45.19	55.09

Diagonaalin 4. mitat:

$$b_{D4} := 100 \text{ mm} \quad h_{D4} := 80 \text{ mm} \quad t_{D4} := 5 \text{ mm} \quad r_{i,D4} := 5 \text{ mm} \quad L_{D4} := 1969 \text{ mm} \quad L_{cr,D4} := 0.75 \cdot L_{D4} = 1476.75 \text{ mm}$$

Diagonaalin poikkileikkausarvot:

$$A_{D4} := 1636.00 \text{ mm}^2 \quad W_{pl,y,D4} := 55.09 \cdot 10^3 \text{ mm}^3 \quad I_{D4} := 2.259 \cdot 10^6 \text{ mm}^4$$

Poikkileikkauksen vetokestävyys:

$$N_{t,Rd,D4} := \frac{A_{D4} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 580.78 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{D4}|}{N_{t,Rd,D4}} = 19.932\%$$

Taipuma:

Sallittu taipuma:

Paarteiden taipumat RFEM:

$$w_{max} := \frac{L}{300} = 40 \text{ mm}$$

$$\text{Yläpaarre: } w_{ylä,max} := -8.2 \text{ mm}$$

$$w_{max} \geq w_{ylä,max} = 1$$

$$\text{Alapaarre: } w_{ala,max} := -7.1 \text{ mm}$$

$$w_{max} \geq w_{ala,max} = 1$$

Liitoksen mitoitus:**Y-liitos**

Rakenneputkien liitosten kestävyys osavarmuusluku (ristikossa):

$$\gamma_{M5} = 1.0 \quad W_{el,0} := 93.69 \cdot 10^3 \text{ mm}^3$$

Liitoksen mitat:

Alapaarteen mitoittavat voimat liitoksen kohdalla, paarre on puristuksessa:

$$N_{ala,l1} := |-258.11 \text{ kN}| = 258.11 \text{ kN} \quad M_{ala,l1} := |10.49 \text{ kN} \cdot \text{m}| = 10.49 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Alapaarteen mitat:

$$b_{ala} := 120 \text{ mm} \quad h_{ala} := 120 \text{ mm} \quad t_{ala} := 6 \text{ mm} \quad A_{ala} := 2643 \text{ mm}^2$$

Uumasauvan mitoittava voima, sauva 3. puristuksessa:

$$N_{D3,l1} := |-128.48 \text{ kN}| = 128.48 \text{ kN}$$

Diagonaalin 3. mitat:

$$b_{D3} = 100 \text{ mm} \quad h_{D3} = 60 \text{ mm} \quad t_{D3} = 3 \text{ mm} \quad A_{D3} = 901 \text{ mm}^2 \quad \theta_{D3} := 77 \text{ deg}$$

Sauvojen suhdeluvut:

$$\beta_1 := \frac{b_{D3}}{b_{ala}} = 0.833 \quad \beta_1 \leq 0.85 = 1 \quad \eta_1 := \frac{h_{D3}}{b_{ala}} = 0.5$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 17]

Taulukko 3. Taipumien ja siirtymien käyttörajatilat

Rakenne	Taipuman tai siirtymän raja-arvo
Rakennettavat	
- vesikatoissa ja katokissa	L/300
- välipohjissa	L/400
Ulkokeet	L/150
Katto-ornet	L/200
Seinäornet	L/150
Muotolevyt	
- katoissa, joissa ei ole vesikeräytymien tai kattojen vaurioitumisen vaaraa	L/100
- katoissa, joissa vesikeräytymien tai kattojen vaurioitumisen vaara on olemassa	
- kun $l \leq 4,5 \text{ m}$	L/150
- kun $4,5 \text{ m} < l \leq 6,0 \text{ m}$	30 mm
- kun $l > 6,0 \text{ m}$	L/200
- välipohjissa	L/300
- seinissä	L/100
- ulkokeissa	L/100
Rakenteen varasirtymän rajatila	
- 1 ja 2 kerroksiset rakennukset	H/150
- muut rakennukset	H/400
L on jännäväli	
H on rakennuksen tarkasteltavan kohdan korkeus	
Rakennukset, joissa on nosturirata, katso standardi SFS-EN 1993-6 ja sen kansallinen liite.	

Geometria ehdot:

$$\frac{b_{D3}}{b_{ala}} \geq 0.25 = 1$$

Puristusdiagonaali

$$\frac{b_{D3}}{t_{D3}} \leq 35 = 1$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 127, taulukko 7.8]

Paarre:

$$\frac{h_{ala}}{b_{ala}} \geq 0.5 = 1$$

$$\frac{h_{ala}}{b_{ala}} \leq 2.0 = 1$$

$$\frac{b_{ala}}{t_{ala}} \leq 35 = 1$$

Alapaarteen normaaliännitys:

$$n_{ala,l1} := \frac{|N_{ala,l1}|}{A_{ala} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M5}}} + \frac{|M_{ala,l1}|}{W_{el.0} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M5}}} = 0.59$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 17]

$$k_{n,ala,l1} := \min \left(1.3 - \frac{0.4 \cdot |n_{ala,l1}|}{\beta_1}, 1 \right) = 1$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 130, taulukko 7.11]

Murtotavan määrittäminen:

Paarteen pinnan murtuma:

$$N_{1,D3,Rd,p,m} := \frac{k_{n,ala,l1} \cdot f_y \cdot t_{ala}^2}{(1 - \beta_1) \cdot \sin(\theta_{D3})} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot \eta_1}{\sin(\theta_{D3})} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta_1} \right)}{\gamma_{M5}} = 209.279 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 130, taulukko 7.11]

Paarteen lävistysleikkautuminen:

$$b_{e,p,D3} := \frac{10}{\frac{b_{ala}}{t_{ala}}} \cdot b_{D3} = 50 \text{ mm} \quad b_{e,p,D3} \leq b_{D3} = 1$$

$$N_{1,D3,Rd,p,l} := \frac{f_y \cdot t_{ala}}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_{D3})} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot h_{D3}}{\sin(\theta_{D3})} + 2 \cdot b_{e,p,D3} \right)}{\gamma_{M5}} = 281.647 \text{ kN}$$

Paarteen sivun lommahtaminen:

Normalisoitu muunnettu hoikkuus:

$$\lambda_{D3.I1} := 3.46 \cdot \frac{\left(\frac{h_{ala}}{t_{ala}} - 2\right) \cdot \sqrt{\frac{1}{\sin(\theta_{D3})}}}{\pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}}} = 0.826 \quad \lambda_{D3.I1} > 0.2 = 1$$

Nurjahduskäyrän mukainen epätarkkuustekijä:

$$\alpha := 0.49$$

Nurjahduksen pienennystekijä:

$$\Phi_{D3.I1} := 0.5 \cdot \left(1 + \alpha \cdot (\lambda_{D3.I1} - 0.2) + \lambda_{D3.I1}^2\right) = 0.994$$

$$\chi_{D3.I1} := \frac{1}{\Phi_{D3.I1} + \sqrt{\Phi_{D3.I1}^2 - \lambda_{D3.I1}^2}} = 0.646 \quad \chi_{D3.I1} \leq 1.0 = 1$$

$$f_{b.D3} := \chi_{D3.I1} \cdot f_y = 229.331 \frac{N}{mm^2}$$

$$N_{1.D3.Rd.ps} := \frac{f_{b.D3} \cdot t_{ala}}{\sin(\theta_{D3})} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot h_{D3}}{\sin(\theta_{D3})} + 10 \cdot t_{ala}\right)}{\gamma_{M5}} = 258.65 \text{ kN}$$

Uumasauvan murtuminen:

$$b_{eff.D3.I1} := \frac{10}{\frac{b_{ala}}{t_{ala}}} \cdot \frac{f_y \cdot t_{ala}}{f_y \cdot t_{D3}} \cdot b_{D3} = 100 \text{ mm}$$

$$N_{1.D3.Rd.u.m} := f_y \cdot t_{D3} \cdot \frac{(2 \cdot h_{D3} - 4 \cdot t_{D3} + 2 \cdot b_{eff.D3.I1})}{\gamma_{M5}} = 328.02 \text{ kN}$$

Liitoksen kestävyysmitoitussarvo:

$$N_{1.D3.Rd} := \min(N_{1.D3.Rd.p.m}, N_{1.D3.Rd.p.l}, N_{1.D3.Rd.p.s}, N_{1.D3.Rd.u.m}) = 209.279 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{N_{D3.l1}}{N_{1.D3.Rd}} = 61.392\%$$

K-liitos:

Rakenneputkien liitosten kestävyys osavarmuusluku (ristikossa):

$$\gamma_{M5} = 1 \quad W_{el.0} = (9.369 \cdot 10^4) \text{ mm}^3$$

Liitoksen mitat:

Yläpaarteen mitoittavat voimat liitoksen kohdalla, parre on puristuksessa:

$$N_{ylä.l6} := |-110.54 \text{ kN}| = 110.54 \text{ kN} \quad M_{ylä.l6} := |-5.73 \text{ kN} \cdot \text{m}| = 5.73 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad V_{ylä.l6} := |-34.74 \text{ kN}| = 34.74 \text{ kN}$$

Yläpaarteen mitat:

$$b_{ylä} = 120 \text{ mm} \quad h_{ylä} = 120 \text{ mm} \quad t_{ylä} = 6 \text{ mm} \quad A_{ylä} = 2643 \text{ mm}^2$$

Uumasauvan mitoittava voima, sauva 7. puristuksessa ja sauva 8. puristuksessa:

$$N_{D7.l6} := |-8.60 \text{ kN}| = 8.6 \text{ kN} \quad N_{D8.l6} := |-39.39 \text{ kN}| = 39.39 \text{ kN}$$

Diagonaalin 7. mitat:

$$b_{D7} := 100 \text{ mm} \quad h_{D7} := 60 \text{ mm} \quad t_{D7} := 3 \text{ mm} \quad A_{D7} := 901 \text{ mm}^2 \quad \theta_{D7} := 77 \text{ deg}$$

Diagonaalin 8. mitat:

$$b_{D8} := 100 \text{ mm} \quad h_{D8} := 60 \text{ mm} \quad t_{D8} := 3 \text{ mm} \quad A_{D8} := 901 \text{ mm}^2 \quad \theta_{D8} := 37 \text{ deg}$$

Uumasauvojen välinen vapaa väli:

$$g := 20 \text{ mm}$$

Diagonaalien määrä liitoksessa:

$$m := 2$$

Uumasauvojen keskiarvon suhde yläpaarteeseen:

$$\beta_6 := \frac{b_{D7} + b_{D8} + h_{D7} + h_{D8}}{2 \cdot m \cdot b_{ylä}} = 0.667 \quad \beta_6 \leq 0.85 = 1$$

Yläpaarteen suhde kaksinkertaiseen seinämäpaksuuteen:

$$\gamma := \frac{b_{ylä}}{2 \cdot t_{ylä}} = 10$$

Geometriaehdot:

$$\frac{g}{b_{ylä}} \geq 0.5 \cdot (1 - \beta_6) = 1 \quad \frac{g}{b_{ylä}} \leq 1.5 \cdot (1 - \beta_6) = 1 \quad \frac{b_{D7}}{b_{ylä}} > 0.35 = 1 \quad \frac{b_{D7}}{b_{ylä}} > 0.1 + 0.01 \cdot \frac{b_{ylä}}{t_{ylä}} = 1$$

Puristusdiagonaali:

$$\frac{b_{D7}}{t_{D7}} < 35 = 1 \quad \frac{b_{D8}}{t_{D8}} < 35 = 1$$

Paarre:

$$\frac{h_{ylä}}{b_{ylä}} > 0.5 = 1 \quad \frac{h_{ylä}}{b_{ylä}} < 2 = 1 \quad \frac{b_{ylä}}{t_{ylä}} < 35 = 1 \quad \frac{h_{ylä}}{t_{ylä}} < 35 = 1 \quad \frac{b_{D7} + b_{D8}}{2 \cdot b_{D7}} > 0.6 = 1 \quad \frac{b_{D7} + b_{D8}}{2 \cdot b_{D7}} < 1.3 = 1$$

Yläpaarteen normaalijännitys:

$$n_{ylä,16} := \frac{N_{ylä,16}}{A_{ylä} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M5}}} + \frac{M_{ylä,16}}{W_{el.0} \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M5}}} = 0.29$$

$$k_{n,ylä,16} := \min \left(1.3 - \frac{0.4 \cdot |n_{ylä,16}|}{\beta_6}, 1 \right) = 1$$

Murtotavan määrittäminen:

Paarteen pinnan murtuma:

$$N_{6.D7.Rd.p.m} := \frac{8.9 \cdot k_{n.ylä.16} \cdot f_y \cdot t_{ylä}^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin(\theta_{D7})} \cdot \frac{\left(\frac{b_{D7} + b_{D8} + h_{D7} + h_{D8}}{4 \cdot b_{ylä}} \right)}{\gamma_{M5}} = 246.097 \text{ kN}$$

$$N_{6.D8.Rd.p.m} := \frac{8.9 \cdot k_{n.ylä.16} \cdot f_y \cdot t_{ylä}^2 \cdot \sqrt{\gamma}}{\sin(\theta_{D8})} \cdot \frac{\left(\frac{b_{D7} + b_{D8} + h_{D7} + h_{D8}}{4 \cdot b_{ylä}} \right)}{\gamma_{M5}} = 398.443 \text{ kN}$$

Paarteen lävistysleikkautuminen:

$$b_{e.p.D7} := \frac{10}{\frac{b_{ala}}{t_{ala}}} \cdot b_{D7} = 50 \text{ mm} \quad b_{e.p.D7} \leq b_{D7} = 1$$

$$N_{6.D7.Rd.p.l} := \frac{f_y \cdot t_{ylä}}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_{D7})} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot h_{D7}}{\sin(\theta_{D7})} + b_{D7} + b_{e.p.D7} \right)}{\gamma_{M5}} = 344.752 \text{ kN}$$

$$b_{e.p.D8} := \frac{10}{\frac{b_{ylä}}{t_{ylä}}} \cdot b_{D8} = 50 \text{ mm} \quad b_{e.p.D8} \leq b_{D8} = 1$$

$$N_{6.D8.Rd.p.l} := \frac{f_y \cdot t_{ylä}}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_{D8})} \cdot \frac{\left(\frac{2 \cdot h_{D8}}{\sin(\theta_{D8})} + b_{D8} + b_{e.p.D8} \right)}{\gamma_{M5}} = 713.962 \text{ kN}$$

Paarteen leikkautuminen:

$$\alpha_{l6} := \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot g^2}{3 \cdot t_{ylä}^2}}} = 0.251$$

$$A_{v.l6} := (2 \cdot h_{yl\bar{a}} + \alpha_{l6} \cdot b_{yl\bar{a}}) \cdot t_{yl\bar{a}} = 1621.051 \text{ mm}^2$$

$$N_{D7.6.Rd} := \frac{\frac{f_y \cdot A_{v.l6}}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_{D7})}}{\gamma_{M5}} = 340.989 \text{ kN}$$

$$N_{D8.6.Rd} := \frac{\frac{f_y \cdot A_{v.l6}}{\sqrt{3} \cdot \sin(\theta_{D8})}}{\gamma_{M5}} = 552.079 \text{ kN}$$

$$V_{pl.Rd} := \frac{f_y \cdot A_{v.l6}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M5}} = 332.25 \text{ kN}$$

$$N_{yl\bar{a}.Rd.l6} := \frac{\left((A_{yl\bar{a}} - A_{v.l6}) \cdot f_y + A_{v.l6} \cdot f_y \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{V_{yl\bar{a}.l6}}{V_{pl.Rd}} \right)^2} \right)}{\gamma_{M5}} = 935.111 \text{ kN}$$

Uumasauvan murtuminen:

$$b_{eff.D7} := \frac{10}{\frac{b_{ala}}{t_{ala}}} \cdot \frac{f_y \cdot t_{ala}}{f_y \cdot t_{D7}} \cdot b_{D7} = 100 \text{ mm}$$

$$N_{6.D7.Rd.u.m} := f_y \cdot t_{D7} \cdot \frac{(2 \cdot h_{D7} - 4 \cdot t_{D7} + b_{D7} + b_{eff.D7})}{\gamma_{M5}} = 328.02 \text{ kN}$$

$$b_{eff.D8} := \frac{10}{\frac{b_{yl\bar{a}}}{t_{yl\bar{a}}}} \cdot \frac{f_y \cdot t_{yl\bar{a}}}{f_y \cdot t_{D8}} \cdot b_{D8} = 100 \text{ mm}$$

$$N_{6.D8.Rd.u.m} := f_y \cdot t_{D8} \cdot \frac{(2 \cdot h_{D8} - 4 \cdot t_{D8} + b_{D8} + b_{eff.D8})}{\gamma_{M5}} = 328.02 \text{ kN}$$

Liitoksen kestävyden mitoitusarvo:

$$N_{6.D7.Rd} := \min(N_{6.D7.Rd.p.m}, N_{6.D7.Rd.p.l}, N_{D7.6.Rd}, N_{6.D7.Rd.u.m}) = 246.097 \text{ kN}$$

$$N_{6.D8.Rd} := \min(N_{6.D8.Rd.p.m}, N_{6.D8.Rd.p.l}, N_{D8.6.Rd}, N_{6.D8.Rd.u.m}) = 328.02 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{N_{D7.l6}}{N_{6.D7.Rd}} = 3.495\% \quad \frac{N_{D8.l6}}{N_{6.D8.Rd}} = 12.008\% \quad \frac{N_{ylä.l6}}{N_{ylä.Rd.l6}} = 11.821\%$$

Ruuviliitoksen mitoitus:

Ruuvikiinnitysluokka:

Vetosauvat: A

$$t_{ala} = 6 \text{ mm}$$

Ruuvien kestävyden osavarmuusluvut:

$$\gamma_{M2} := 1.25 \quad k_2 := 0.9 \quad \theta_{D5} := 77 \text{ deg}$$

Ruuvin tiedot: SD6-T15-5,5X28

$$d := 5.5 \text{ mm} \quad d_0 := 4.0 \text{ mm}$$

Liitoksen reunaehdot:

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 23-25]

$$e_{1.min} := 1.2 \cdot d_0 = 4.8 \text{ mm}$$

$$e_{1.max} := 4 \cdot t_{ala} + 40 \text{ mm} = 64 \text{ mm}$$

$$e_{2.min} := 1.2 \cdot d_0 = 4.8 \text{ mm}$$

$$e_{2.max} := 4 \cdot t_{ala} + 40 \text{ mm} = 64 \text{ mm}$$

$$p_{1.min} := 2.2 \cdot d_0 = 8.8 \text{ mm}$$

$$p_{1.max} := 14 \cdot t_{ala} = 84 \text{ mm} \quad \text{tai} \quad p_{1.max} \leq 200 \text{ mm} = 1$$

$$p_{2.min} := 2.4 \cdot d_0 = 9.6 \text{ mm} \quad \text{tai jos} \quad L \geq 2.4 \cdot d_0 = 1$$

$$p_{2.min} := 1.2 \cdot d_0 = 4.8 \text{ mm}$$

$$p_{2.max} := 14 \cdot t_{ala} = 84 \text{ mm} \quad \text{tai} \quad p_{2.max} \leq 200 \text{ mm} = 1$$

$$p_{1.0.max} := 14 \cdot t_{ala} = 84 \text{ mm} \quad \text{tai} \quad p_{1.0.max} \leq 200 \text{ mm} = 1$$

$$p_{1.i.max} := 28 \cdot t_{ala} = 168 \text{ mm} \quad \text{tai} \quad p_{1.i.max} \leq 400 \text{ mm} = 1$$

Luokka	Ehto	Huomautuksia		
Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset				
A Reunapuristustyyppinen kiinnitys	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Esijännitystä ei vaadita. Kaikki lujuusluokat 4.6...10.9.		
Pääty- ja reunaetäisyydet sekä keskiöväli, ks. kuva 3.1	Minimi-arvo	Maksimi-arvo ^{1) 2) 3)}		
		EN 10025 mukaisista teräksistä (paitsi EN 10025-5:n mukaiset teräkset) tehdyt rakenteet		EN 10025-5 mukaisista teräksistä tehdyt rakenteet
		Säälle tai muille korroosiorasituksille altis rakenne	Rakenne, joka ei ole altis säälle tai muille korroosiorasituksille	
Päätyetäisyys e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm	Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm	
Reunaetäisyys e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm	Suurempi arvoista $8t$ ja 125 mm	
Etäisyys e_3 Pidennetyissä rei'issä	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Etäisyys e_4 Pidennetyissä rei'issä	$1,5d_0$ ⁴⁾			
Keskiöväli p_1	$2,2d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm
Keskiöväli $p_{1,0}$		Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm		
Keskiöväli $p_{1,i}$		Pienempi arvoista $28t$ ja 400 mm		
Keskiöväli p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t$ ja 200 mm	Pienempi arvoista $14t_{min}$ ja 175 mm

1) Keskiöväleillä, pääty- ja reunaetäisyyksillä ei ole ylärajaa paitsi seuraavissa tapauksissa:

- puristetussa rakenneosissa paikallisen lommahduksen ja korroosion välttämiseksi korroosiorasituksen alaisena ja;
- korroosiorasitukselle alttiit vedetyt rakenneosat korroosion välttämiseksi.

2) Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallinen lommahdus lasketaan standardin EN 1993-1-1 mukaan oletamalla levy pilariksi ja käyttämällä nurjahduspituutena arvon $0,6p_1$. Kiinnittimien välisen puristetun levyn paikallista lommahdusta ei tarvitse tarkistaa, jos p/t on pienempi kuin $9e$. Reunaetäisyys saa olla enintään ulokkeelliselle puristetulle taso-osalle esitetyn arvon suuruinen paikallisen lommahduksen estämiseksi, ks. standardi EN 1993-1-1. Tämä vaatimus ei koske päätyetäisyyttä.

3) t on uloimman liitetävän osan pienempi paksuus.

4) Pidennettyjen reikien raja-arvot esitetään kohdan 1.2.7 mukaisessa viitestandardiryhmässä 7.

5) Limitetyille kiinnittimille voidaan käyttää minimiarvoa $p_2 = 1,2d_0$, jos kahden limityksessä olevan kiinnittimen välinen minimietäisyys $L \geq 2,4d_0$, ks. kuva 3.1b).

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 23-25]

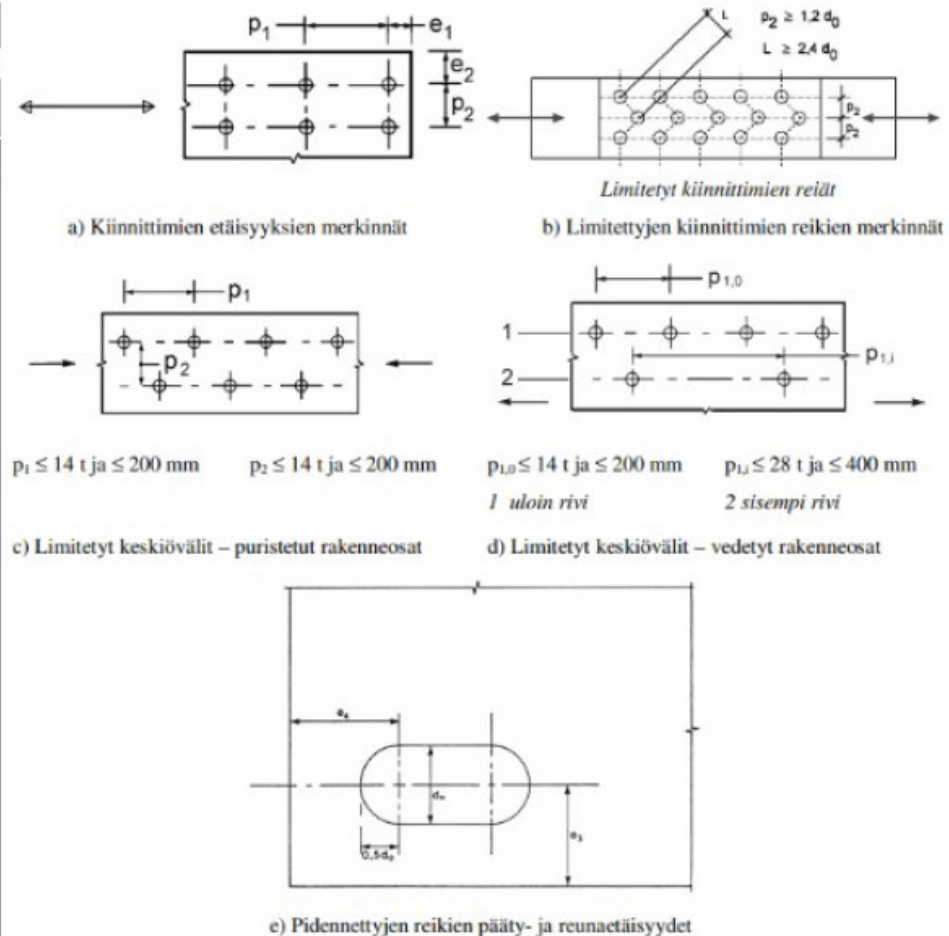
Reunaehtojen valinta:

$$e_1 := 21.72 \text{ mm}$$

$$e_2 := 12 \text{ mm}$$

$$p_1 := 10.32 \text{ mm}$$

$$p_2 := 18 \text{ mm}$$



Kuva 3.1: Kiinnittimien pääty- ja reunaetäisyyksien sekä keskiövälin merkinnät

Ruuvien leikkauskestävyys:

$$\alpha_v := 0.5 \quad F_{v.Rd} := 6 \text{ kN}$$

Ruuvia per liitoksen puoli:

$$N_{D3} = -128.48 \text{ kN} \quad kpl_{D3} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D3}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 11.0$$

$$N_{D4} = 115.76 \text{ kN} \quad kpl_{D4} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D4}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 10.0$$

$$N_{D5} = -69.65 \text{ kN} \quad kpl_{D5} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D5}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 6.0$$

$$N_{D6} = 13.39 \text{ kN} \quad kpl_{D6} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D6}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 2.0$$

$$N_{D7} = -8.69 \text{ kN} \quad kpl_{D7} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D7}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 1.0$$

$$N_{D8} = -39.39 \text{ kN} \quad kpl_{D8} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D8}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 4.0$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 23, taulukko 3.2]

Ruuvia per liitoksen puoli:

$$N_{D11} = -128.56 \text{ kN} \quad kpl_{D11} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D11}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 11.0$$

$$N_{D12} = 115.52 \text{ kN} \quad kpl_{D12} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D12}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 10.0$$

$$N_{D13} = -69.74 \text{ kN} \quad kpl_{D13} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D13}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 6.0$$

$$N_{D14} = 13.31 \text{ kN} \quad kpl_{D14} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D14}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 2.0$$

$$N_{D15} = -8.66 \text{ kN} \quad kpl_{D15} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D15}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 1.0$$

$$N_{D16} = -39.44 \text{ kN} \quad kpl_{D16} := \text{ceil}\left(\frac{\frac{|N_{D16}|}{F_{v.Rd}}}{2}\right) = 4.0$$

Reunapuristuskestävyys:

Siirrettävän voiman suunnassa:

$$A_s := \frac{\pi}{4} \cdot d_0^2 = 12.566 \text{ mm}^2$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 28, taulukko 3.4]

Ruuvin lujuusluokka on oletettavasti korkea, joten otetaan $\alpha_v = 0.5$.

$$f_{ub} := \frac{F_{v.Rd} \cdot \gamma_{M2}}{\alpha_v \cdot A_s} = 1193.662 \text{ MPa}$$

$$\alpha_d := \min \left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0}, \frac{p_1}{3 \cdot d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1.0 \right) = 0.61$$

$$k_1 := \min \left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7, 1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0}, 2.5 \right) = 2.5$$

$$F_{b.Rd.D3} := \frac{k_1 \cdot \alpha_d \cdot f_u \cdot d \cdot t_{D3}}{\gamma_{M2}} = 10.266 \text{ kN}$$

Käyttöaste:

$$\frac{|N_{D3}|}{(kpl_{D3} \cdot 2) \cdot F_{b.Rd.D3}} = 56.885\%$$

Perusaineen kestävyys, palamurtuma vetosauvoilla:

$$A_{nt.D4} := t_{D4} \cdot \left(h_{D4} - \left(\frac{kpl_{D4} \cdot 2}{2} \right) \cdot d_0 \right) = 200 \text{ mm}^2$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 34]

$$A_{nv.D4} := \left(\frac{kpl_{D4} \cdot 2}{2} \right) \cdot d \cdot t_{D4} = 275 \text{ mm}^2$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 34]

$$V_{eff.1.Rd.D4} := \frac{f_u \cdot A_{nt.D4}}{\gamma_{M2}} + \frac{\left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \cdot f_y \cdot A_{nv.D4}}{\gamma_{M0}} = 137.964 \text{ kN}$$

[SFS-EN 1993-1-8:2005 s. 34, kaava 3.9]

$$\frac{|N_{D4}|}{V_{eff.1.Rd.D4}} = 83.906\%$$