

SWECON VAKIODETALJIT TERÄSRAKENTEILLE

Ammattikorkeakoulututkinnon opinnäytetyö
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka, insinööri (AMK)
Syksy, 2024
Katja Kupari

Liitossuunnittelu on iteratiivinen prosessi, jossa parhaan ratkaisun löytäminen vaatii toistuvaa suunnittelua ja kestävyysuudelleenlaskentaa rakennushankkeen aikana tapahtuvien muutoksien ja tarkentuvien lähtötietojen vuoksi. Mitoituspohjat ja rakenneanalyysiohjelmat ovat nopeuttaneet ja helpottaneet suunnittelua merkittävästi, mutta liitosten geometrian valitseminen jää edelleen suunnittelijan ratkaistavaksi. Valmiiksi muodostetut yleisesti hyvät, tiettyihin rakenneratkaisuihin sopivat liitokset, joiden geometria ja detaljit on suunniteltu kokonaisuus huomioiden, säästävät huomattavasti suunnittelijoiden aikaa.

Opinnäytetyön tilaajana toimi Sweco Finland Oy. Työn tavoitteena oli yhtenäistää liitosdetaljiikkaa, aloittaa tyyppiliitoskirjaston luominen sekä koota suunnittelumateriaali helpommin saataville. Detaljiikan yhtenäistämisen lisäksi etuna oli työn tehostaminen, ajansäästäminen sekä kustannustehokkaat liitokset. Liitoskirjasto ja detaljien yhtenäistäminen helpottavat tulevien rakennusprojektien suunnittelua.

Opinnäytetyössä esitellään lyhyesti teräksen ominaisuuksia, runkoratkaisujen vaikutuksia liitoksiin sekä liitossuunnittelussa huomioitavia seikkoja kestävyys, säilyvyyden sekä kustannusten kannalta. Teoriaosuuden tarkoitus on saada lukija ymmärtämään liitossuunnittelu laajempaan kokonaisuuteen, kuin ainoastaan riittävän kestävyysmitoitaminen. Lopuksi esitellään yleisiä matalien teollisuusrakennuksien ja liittorakenteiden liitoksia sekä niiden toimintaperiaatteet.

Opinnäytetyön tuloksena Sweco Finland Oy:lle laadittiin valikoima tyyppiliitoksia yhteistyössä terässuunnittelun asiantuntijoiden kanssa. Opinnäytetyön ohella tilaajalle tuotettiin lisämateriaalina Tekla Structures -ohjelmalla muodostetut teollisuushallien esimerkkimallit, joissa käytettiin valittuja liitoksia. Näiden tyyppiliitosten toimintaperiaatteet ovat yhtenevät tässä opinnäytetyön teoreettisessa osassa esitettyjen liitosratkaisujen kanssa. Opinnäytetyön lisämateriaalina syntyneet tietomallit ja tyyppiliitokset jäävät ainoastaan tilaajan saataville.

Construction Engineering

Author Katja Kupari

Subject Standard Details for Steel Structures of Sweco

Supervisors Ville Tanskanen (Sweco Finland Oy), Juha Airola (HAMK)

Abstract

Year 2024

The design of connections in steel structures requires plenty of repetition. With the aim of finding the best solution in terms of performance and durability for each situation, the design must be repeated and recalculated multiple times. Pre-design calculation templates and structural analysis software have significantly streamlined the design process. However, the geometry model of the connections must be determined by the designer. Pre-selected connections save a significant amount of time for designers.

Sweco Finland Oy commissioned this thesis with the goal of standardizing connection details of steel structures and starting to compile a library of typical connections. Standardizing details brings benefits like increased efficiency, time savings, and cost-effective connections.

This thesis briefly presents the properties of structural steel, effects of frame solutions on connections, and factors to consider in connection to design in terms of durability, maintenance, and costs. The purpose of the theoretical section is to provide an understanding of connection design as a broader concept rather than just ensuring sufficient durability. Finally, common connections of low-rise industrial buildings and composite structures as well as their operating principles, are presented.

As a result of the development work for this thesis, a wide range of standard connections was created for Sweco Finland Oy in collaboration with steel design experts. In addition, example models of industrial buildings with selected standard connections were created with Tekla Structure software. These standard connections operate on the same principles as connections presented in the theoretical part of this thesis. Data models and their standard connections, which were formed as the final output of the work, will be available only to the commissioner.

Keywords Details, connections, steel structures, composite structures

Pages 66 pages

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Teräksen yleisiä ominaisuuksia.....	2
3	Liike- ja toimistorakennusten runkojärjestelmät ja liitoksien luokittelu	4
3.1	Ristikkojäykistys.....	6
3.2	Kehäjäykistys.....	6
3.3	Levyjäykistys.....	7
3.4	Mastojäykistys	8
3.5	Liitokset ja niiden luokittelu	9
3.5.1	Kiertymisjäykkyys	10
3.5.2	Luokittelu lujuuden mukaan	10
3.5.3	Luokittelu kiertymiskyvyn mukaan	11
3.6	Liitoksen kuormansiirtoreitit.....	12
3.7	Leikkausvoiman rasittamat ruuviliitokset	13
3.8	Vetovoiman rasittamat ruuviliitokset	15
3.9	Hitsausliitokset.....	17
3.10	Lamellirepeily	21
3.11	Korroosioilmiö ja sen muodot.....	22
4	Liitosten kustannusten optimointi	26
5	Teräsrakenteiden liitosten toimintaperiaatteet	29
5.1	Sideliitos	29
5.2	Palkki-palkki liitokset	31
5.2.1	Momenttijäykkä jatkos	31
5.2.2	Niveljatkokset	32
5.2.3	Risteävien palkkien liitokset.....	33
5.3	Pilarijatkokset.....	35
5.4	Palkki-pilariliitokset.....	37
5.4.1	Niveellinen palkki-pilariliitos	38
5.4.2	Palkki-pilari jäykkä liitos	42
5.5	Kattoristikon niveellinen liitos pilariin	43
5.6	Kattoristikon jäykkänurkkainen liitos pilariin.....	44
5.7	Primääri- ja sekundääristikoiden liitos	45
5.8	Teräspilarin pulttiliitos perustuksiin.....	46
6	Liittorakenteet	48
6.1	Liittorakenteiden liitosten toimintaperiaatteet.....	50

6.2	Liittopilarin jatkosliitokset.....	51
6.3	Liittopilarin peruspulttiliitos perustuksiin	52
6.4	Liittopilarin ja WQ-palkin liitokset.....	53
6.5	Poikittaisen WQ-palkin liitos WQ-palkkiin	57
6.6	WQ-palkin liitos betoniseinään PCs-konsolin avulla	58
6.7	WQ-palkin liitos betoniseinään tartuntalevyihin hitsaamalla	59
7	Lopputulokset	61
8	Pohdinta.....	62
	Lähteet	64

Kuvat

Kuva 1	Momentin jakautuminen jatkuvalla palkilla.	5
Kuva 2	Ristikkojäykistys.....	6
Kuva 3	Esimerkkejä kehärakenteista.	7
Kuva 4	Levyjäykistys katon tasossa.....	8
Kuva 5	Mastojäykistys.	9
Kuva 6	Momentin aiheuttaman vetovoiman jakautuminen ruuveille	13
Kuva 7	Reunapuristuksen jakautuminen yksi- ja kaksileikkeisessä liitoksessa.....	14
Kuva 8	T-osan murtumismuodot	16
Kuva 9	Pienahitsin a-mitta.	20
Kuva 10	Pienahitsin laskentapinnan jännitykset	21
Kuva 11	Sähkökemiallinen jännitesarja.....	23
Kuva 12	Lamellirepeilyn vaara vedetyssä liitoksessa	30

Kuva 13 Vinositeen sideliitos pilariin.	31
Kuva 14 Palkin jäykkä jatkos päätylevyillä toteutettuna.	32
Kuva 15 Palkin levyliitosjatkos ruuvi- ja hitsikiinnityksellä.	33
Kuva 16 Yksinkertainen risteävien palkkien liitos.	33
Kuva 17 Palkki-palkki nivelellinen liitos.	34
Kuva 18 Risteävien palkkien tasakorkea liitos.	34
Kuva 19 Palkkien välinen jäykkä liitos.	35
Kuva 20 Hitsattu pilarijatkos.	36
Kuva 21 Pilarijatkos päätylevyillä ruuvikiinnityksenä.	36
Kuva 22 Pilarin kylkilevyjatkos.	37
Kuva 23 Nivelellinen palkki-pilariliitos.	38
Kuva 24 Jatkuva palkki tuella.	39
Kuva 25 Putkiprofiilin vinouman estäminen.	39
Kuva 26 Pilarin ja palkin välinen kannakepalallinen päätylevyliitos.	40
Kuva 27 Pilarin ja palkin päätylevyliitos.	41
Kuva 28 Pilarin ja palkin välinen leikkauslevyliitos.	41
Kuva 29 Pilarin ja palkin välinen jäykkä päätylevyliitos.	42
Kuva 30 Ristikon nivelellinen liitos pilariin.	43
Kuva 31 Ristikon ja pilarin jäykkänurkkainen liitos.	44
Kuva 32 Primääriristikon ja sen päälle asennettujen sekundääriristikoiden liitos.	45

Kuva 33 Putkipilarin leikkauspalalla vahvistettu peruspulttiliitos.	48
Kuva 34 Avoprofiilipilarin vahvan suunnan lisävahvistettu jäykkä liitos.....	48
Kuva 35 Palkin käyttäytyminen palotilanteessa.....	51
Kuva 36 Liittopilarin hitsattu jatkosliitos.....	52
Kuva 37 Liittopilarin jatkos, ruuviliitos päätylevyillä.	52
Kuva 38 Liittopilarin peruspulttiliitos perustuksiin.	53
Kuva 39 WQ-palkin ja liittopilarin putkikonsoliliitos.	55
Kuva 40 Putkikonsoliliitos ja vaarnatapit.	55
Kuva 41 WQ-palkin ja liittopilarin ruuviliitos.....	56
Kuva 42 WQ-palkin ja liittopilarin lattateräskonsoliliitos.	57
Kuva 43 WQ-palkin ruuviliitos WQ-palkin kylkeen.....	57
Kuva 44 PCs-konsoli.....	58
Kuva 45 WQ-palkin liitos betoniseinään PCs-konsolin avulla.	59
Kuva 46 WQ-palkin liitos betoniseinään, palkin pää tuella.	60
Kuva 47 WQ-palkin liitos betoniseinään, leikkauslevyliitos.	61

Taulukot

Taulukko 1 Liitosten luokitus kokonaistarkastelun mukaisesti.	11
Taulukko 2 Valmistuskustannusten jakautuminen.....	27

1 Johdanto

Liitokset ovat häviävän pieni osa teräsrakenteita, mutta niillä on merkittävä vaikutus koko hankkeen kustannuksiin ja rakenteiden toimintaan. Mikäli materiaalikustannuksia ei huomioida, liitosten osuus voi muodostaa lähes 100 % teräsrakenteiden valmistuskustannuksista (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 148). Liitosten suunnittelu on hyvin iteratiivinen prosessi; vaihtoehtoisia liitosmalleja on useita ja liitoksen toimintaa joudutaan tarkastelemaan ja muuttamaan suunnitteluprosessin aikana useaan kertaan. Liitoksille asetetaan vaatimuksia niin kestävyiden, jäykkyyden, muodonmuutoskyvyn, valmistuksen, asennuksen, huollon kuin esteettisyydenkin kannalta.

Liitoksia ja geometriamalleja on mahdollista suunnitella loputon määrä. Koska liitosten valmistus, suunnittelu ja asennus muodostavat suuren osan koko rakennuksen kustannuksista, on tehokasta käyttää mahdollisimman yksinkertaisia ja samanlaisia liitoksia, joille on valmiit mitoitusohjelmat tai -ohjelmat, sekä ne ovat hyväksi havaittuja niin asennuksen kuin kustannusvaikutustensakin kannalta. Koko geometrian muodostaminen ja suunnitteluprosessin aloittaminen alusta on aikaa vievää ja aiheuttaa suuria ylimääräisiä kustannuksia.

Tämän opinnäytetyön tilaajana toimii Sweco Finland Oy. Opinnäytetyössä kerrotaan teräksen yleisistä ominaisuuksista sekä niiden huomioimisesta liitossuunnittelussa. Lisäksi työssä käsitellään matalien ja yksinkertaisien teollisuus- ja liikerakennuksien tavanomaisten rakenneratkaisujen eräitä yleisimpiä liitoksia Suomessa sekä käydään läpi niiden toimintaperiaatteet. Liitettävät rakenneosat ovat liittorakenteita sekä kuumavalssattuja tai hitsattuja I- ja putkiprofiileita.

Opinnäytetyön ohella toimeksiantajalle tuotetaan nykyaikainen 3D-liitoskirjasto. Liitoskirjasto luodaan muodostamalla Tekla Structures -ohjelmalla esimerkkimallit liittorakenteisesta toimistorakennuksesta sekä kahdesta teräshallista. Esimerkkimalleissa käytetyt liitokset vastaavat tässä opinnäytetyössä esiteltyjä liitoksia, mutta ne ovat detaljitasoltaan tarkempia. Tekla Structures -malleissa huomioidaan myös mallinnuksessa käytettävät oikeat työkalut sekä rakenne- ja liitososien luokittelu.

Opinnäytetyön tavoitteena on tuottaa selkeä opas liitossuunnittelussa huomioitavista asioista ja herättää lukija pohtimaan liitossuunnittelua laajempänä kokonaisuutena kuin vain liitoksen osien kestävyys. Toimeksiantajalle tuotettava liitoskirjasto tehostaa työskentelyä, kokoaa

suunnittelumateriaalin helpommin löydettäväksi ja yhtenäistää teräs- ja liittorakenteisten liike- ja hallirakennuksien yleisimpien liitosten detaljisuunnittelua. Toimeksiantajalle tuotettavat yksityiskohtaisemmat esimerkkimallit ja liitokset jäävät ainoastaan tilaajan käyttöön.

2 Teräksen yleisiä ominaisuuksia

Rakentamisessa käytetään rakenneteräksiä, joiden mekaanisia ominaisuuksia voidaan muokata ja parannella teräksen koostumusta säätelemällä sekä erilaisilla valmistus- ja työstöprosesseilla. Terästuotteilla on kansainväliset ISO suositusstandardit, joiden pohjalta on laadittu kansalliset standardit. Suomi on sitoutunut käyttämään Euroopassa yhtenäisiä EN-standardeja. Standardeissa määritetään teräslajin ominaisuuksien testausmenetelmät, teräslaji- ja mittastandardit sekä aineistotodistus.

Yleisesti teräksellä tarkoitetaan raudan ja hiilen seosta, jonka hiilipitoisuus on alle 2 % ja rakenneteräksen alle 0,3 % (Kinnunen ym., 2001, s. 7). Teräs poikkeaa muista rakennusmateriaaleista erityisesti painoon suhteutetun suuren lujuutensa ansiosta. Materiaali on homogeenistä ja sen ominaisuuksia sekä muotoilua voidaan muokata halutunlaiseksi. Edellä mainittujen seikkojen ansiosta teräsrakenteista saadaan hoikkia sekä kevyitä ja materiaalimenekki voidaan poikkileikkauksen geometrian avulla optimoida vastaamaan siihen kohdistuvia kuormituksia. Hoikissa rakenteissa poikkileikkauksen kestävyys sijaan stabiiliuden menettäminen ja erilaisten nurjahdusmuotojen syntymekanismit on tärkeitä tunnistaa.

Teräs on palamaton aine, mutta korkeissa lämpötiloissa materiaali pehmenee ja lopulta menettää lujuusominaisuutensa. Kylmässä teräs puolestaan haurastuu, jolloin sen muodonmuutoskyky heikkenee ja rakenne saattaa murtua yllättäen. Rakenteisiin, jotka ovat alttiina suurille lämpötilanvaihteluille ja iskumaisille rasituksille erityisesti alhaisissa lämpötiloissa, tulee valita käyttöolosuhteisiin soveltuva iskusitkeydeltään oikea teräslaji. Standardisoidulla iskusitkeyskokeella määritetään transitiolämpötila, jossa teräksen käyttäytyminen muuttuu sitkeästä hauraaksi. (Kinnunen ym., 2001, s. 11) Iskusitkeys saattaa heikentyä rakenteen valmistuksen yhteydessä hitsauksen, kylmämuovaamisen tai jonkin muun työstön vaikutuksesta.

Haurasmurtuma tapahtuu äkillisesti ilman selkeästi nähtäviä plastisia muodonmuutoksia. Se saa alkunsa staattisesti kuormitetusta tai väsymisen rasittamasta alkusäröstä, joka voi olla

lähtöisin esimerkiksi hitsausvirheestä. Särön kasvaessa murtuma etenee nopeasti myös ehjään, virheettömään rakenteeseen. Haurasmurtumalle altistaa korkealujuuksinen ja paksu teräs, suuri kuormitusnopeus sekä matala lämpötila. (Ongelin, Valkonen, 2010, s. 465)

Dynaamisesti kuormitetuissa rakenteissa tulee huomioida väsymismurtuma. Toistuva veto- ja puristusrasitus voivat aiheuttaa yllättävän rakenteen murtumisen jo matalalla kuormituksella materiaalin staattiseen kestävyys verrattuna. Väsymismurtuma saa alkunsa yleensä kappaleen pinnassa, jolloin hitsauksesta johtuvat pinnan virheet, naarmut ja epäjatkuvuuskohdat voivat toimia alkusärönä murtuman syntymiselle. Väsymiskestävyyttä parantavat pintakäsittelyt, jotka aiheuttavat pintaan puristusjännitystä. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 30–31)

Teräksen pintakäsittelyssä ja detaljisuunnittelussa on huomioitava teräksen korroosio. Suojaamatonta rakenneterästä ei juurikaan voida käyttää sen ruostumisherkkyyden vuoksi, joka aiheuttaa vähintään esteettistä haittaa ja pahimmillaan rakenteen pettämisen. Korroosioilmiötä käsitellään tarkemmin luvussa 3.11.

Teräksen uudelleenkäyttöä kannattaa suosia, koska teräksen materiaalikustannukset ovat korkeat ja terästuotteiden valmistus vaatii paljon energiaa korkeiden työstölämpötilojen takia. Teräs on yksi yleisimmin käytetyistä rakennusmateriaaleista, joten sen käyttö on aiheuttanut paljon teräsromua. Noin 30% uudesta terästuotannosta valmistetaan romua sulattamalla ja jalostamalla, 60-70% käytetään luonnosta saatavista rautamalmeista. Malmeista valmistaessa rautaoksidit pelkistetään poistamalla niistä happi. Masuuniin puhallettu 1200 asteinen kuuma ilma saa rikastetun raakaraudan sisältämän hapen, öljyn ja koksen muodostamaan palamiskaasuina hiilimonoksidia ja vetyä. Sulaneen, pelkistyneen raakaraudan neljän prosentin hiilipitoisuutta alennetaan polttamalla eli melloittamalla konverttereissa. Teräsmassan koostumusta parannetaan poistamalla teräksen ominaisuuksia heikentäviä alkuaineita, kuten rikkiä ja fosforia tai lisäämällä alku- ja lisäaineita, joilla on suotuisat ja halutut vaikutukset teräksen ominaisuuksiin. Kun teräsmassan koostumus on halutunlainen, teräsmassa valetaan kokilleihin tai jatkuvana valuna pitkiksi teräsaihoiksi, jotka jäädytetään haluttuun lämpötilaan. Terästuote valmistetaan sen lopulliseen muotoonsa pääasiassa erilaisten valssauskäsittelyiden avulla. (Kinnunen ym., 2001, ss. 7–8; Metallinjalostajat ry., 2014, s. 51)

Teräslevyt valssataan kahteen suuntaan, joten niiden mekaaniset ominaisuudet pituus- ja leveyssuunnassa ovat lähes samanlaiset. Valssauskäsittelyiden yhteydessä aihion virheellisyudet kuitenkin voivat kerrostua levyn paksuussuunnassa, mikä saattaa heikentää

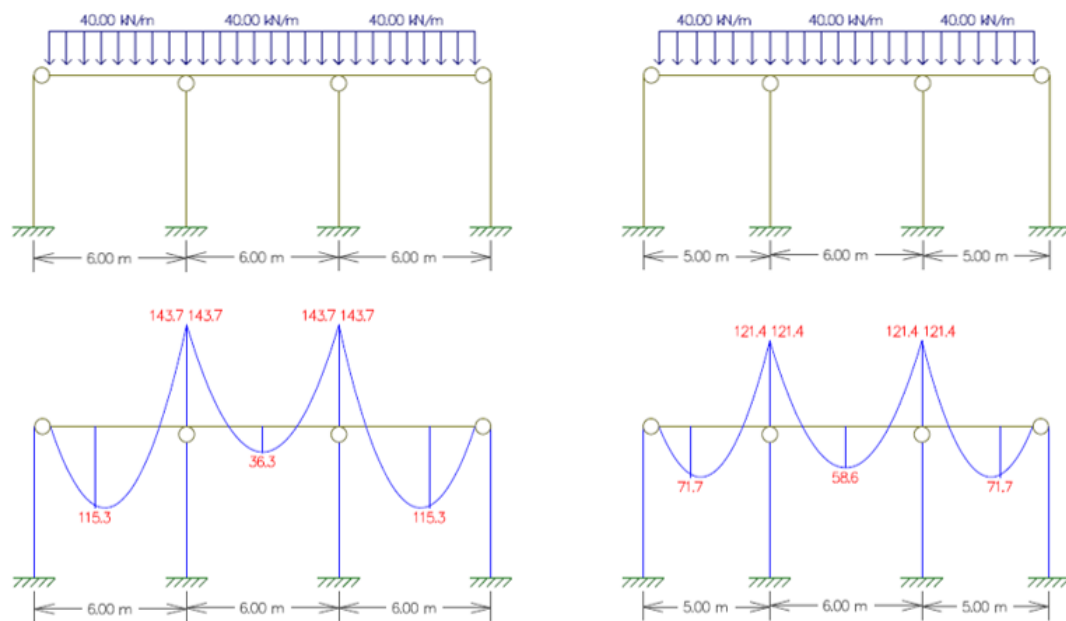
huomattavasti levyn vetolujuutta tasoa vastaan kohtisuorassa. Tämä teräksen paksuussuuntainen ominaisuus tulee huomioida erityisesti hitsatuissa rakenteissa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 22)

3 Liike- ja toimistorakennusten runkojärjestelmät ja liitoksien luokittelu

Rakennejärjestelmän valintaan vaikuttavat ympäristö- ja perustamisolosuhteet, rakenteisiin kohdistuvat rasitukset, rakenteille sallitut taipumat, muodonmuutokset sekä kustannukset. Näiden lisäksi tulee huomioida myös käytettävissä oleva rakennusaika, rakennukselta vaadittava muuntojoustavuus, laitteiden ja niiden asennuksen vaatima tila sekä rakenneosien valmistuksen, kuljetuksen ja asennuksen vaatimukset. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 211)

Teräsrakenteiset runkojärjestelmät koostuvat erityyppisistä pilari-palkki- ja pilari-palkki-laattarakenteista, mutta myös kantavia terässeiniä ovat mahdollisia toteuttaa. Teräsrakenteisissa järjestelmissä suositaan moduuliverkkoa, jossa toinen sivu on selkeästi pitempi, lukuun ottamatta kevennetystä välipohjasta koostuvasta pilari-laatta-järjestelmästä, jossa suositaan neliömäisempää ruudukkoa. Mikäli rakenne koostuu jatkuvista rakenteista, kuten kuvassa 1, momenttirasitus saadaan jakautumaan tasaisemmin suunnittelemalla reunakentät sisäkenttiä pienemmiksi. (Piironen ym., 1998, s. 37)

Kuva 1 Momentin jakautuminen jatkuvalla palkilla.



Rakennuksen kokonaisjäykistyksen tarkoitus on vastaanottaa erityisesti tuulesta, alkuepätkärsästä ja teollisuuslaitoksissa esimerkiksi nosturiradoista aiheutuvia vaakavoimia ja välittää ne perustuksille sekä maapohjaan ilman, että rakennus tai osa siitä pääsee kaatumaan tai kiertymään. Jäykistyksellä rajoitetaan siirtymien syntymistä sekä voidaan estää toisen kertaluvun vaikutukset, ja näin yksinkertaistaa mitoitusprosessia. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 211–212)

Mahdollisimman tehokkaan ja taloudellisen lopputuloksen aikaansaamiseksi on usein kannattavaa yhdistellä erilaisia jäykistysmenetelmiä. Esimerkiksi yksinkertaisen suorakaiteen muotoisen, teräsrakenteisen, kehistä muodostuvan hallin jäykistys poikkisuunnassa voidaan toteuttaa kehäjäykistyksellä tai pilareiden mastojäykistyksellä, jolloin poikkisuunnassa jäykisteet eivät rajoita tilan käyttöä. Pituussuunnassa voidaan käyttää diagonaalisauvoja ja yläpohjassa diagonaalisauvoja ja/tai levyjäykistystä muotolevyn avulla.

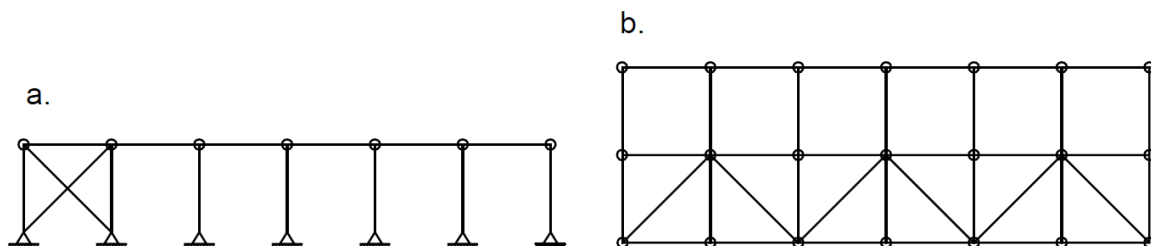
3.1 Ristikkojäykistys

Ristikkojäykistys on teräsrakenteiden yleisimpiä jäykistystapoja. Se voidaan toteuttaa ristikkokokoonpanoilla, erillisillä diagonaalisauvoilla tai siteillä, jotka ottavat vastaan vetoa tai vetoa ja puristusta. Esivalmistettua ristikkokokoonpanoa käytetään usein kehäjäykistyksen osana, jolloin ristikko mahdollistaa pidemmän jännevälin pienemmillä taipumilla. (Piironen ym., 1998, s. 45)

Katon tasossa ja rakennuksen sivuilla käytetään usein siteitä ja diagonaalisauvoja, kuten kuvassa 2. Ristikkojäykisteet voidaan suunnitella ja sijoittaa monin eri tavoin ja ristikkojäykistys soveltuu hyvin niin korkeille kuin matalillekin rakennuksille.

Diagonaalijäykisteet suunnitellaan siirtämään vaakavoimat nivelellisten liitosten kautta, diagonaalisauvat sekä niiden liitokset mitoitetaan kestäämään ainoastaan vetoa ja puristusta. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 215; Piironen ym., 1998, s. 45)

Kuva 2 Ristikkojäykistys a. seinän pituussuunnassa ja b. katon tasossa.



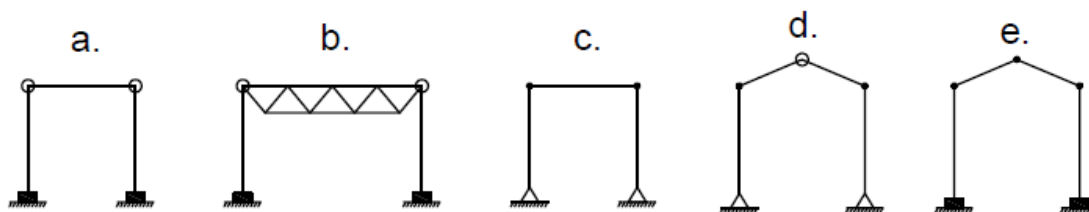
3.2 Kehäjäykistys

Kehäjäykistyksessä kehän nurkkien jäykkyys on niin suuri, ettei erillisiä kehän tason suuntaisia jäykistysrakenteita tarvita. Kuten kuvasta 3 voidaan nähdä, kehätyyppejä on monia erilaisia ja niitä voidaan jaotella eri tavoin. Kehärakenne voidaan toteuttaa esimerkiksi kaksi- tai kolminivelkehänä tai jäykkäkantaisena kehänä. Palkin sijaan nykyisin käytetään usein ristikkopalkkirakennetta, joka voidaan tukea pilareihin nivelellisesti, jäykästi, jatkuvana palkkina pilareiden yli tai yksiaukkoisesti pilareiden välillä. Yhteistä kaikille kehätyypeille on

se, että rakenneosiin vaikuttaa samanaikaisesti normaali- ja taivutusmomentti ja suurimmat taivutusmomentit esiintyvät jäykissä nurkissa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 213)

Kehäjäykistetyissä rakenteissa siirtymät ovat huomattavasti suurempia, joten toisen kertaluvun vaikutukset kasvavat nopeasti sitä suuremmiksi, mitä korkeampi rakennus on. Kehäjäykistys huono puoli on se, että riittävän jäykkien liitosten toteuttaminen on taloudellisesti kallista. Toisaalta kehäjäykistys mahdollistaa muuntojoustavuuden, kun kehän suunnassa ei tarvita tilan käyttöä rajoittavia erillisiä jäykistysrakenteita. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 213)

Kuva 3 Esimerkkejä keharakenteista a. mastokehä b. mastokehä ristikolla c. jäykkänurkkainen kehä d. kolminivelkehä e. jäykkäkantainen kehä.



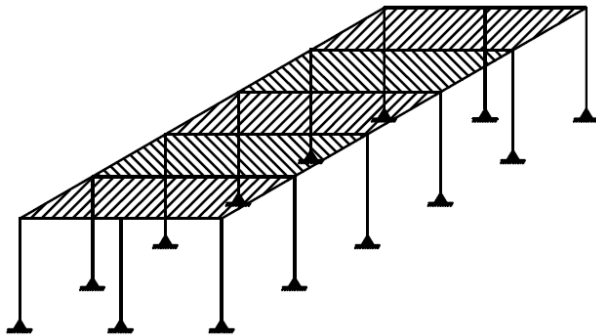
3.3 Levyjäykistys

Rakennus voidaan jäykistää teräsrunkoon kiinnitetyillä paikallavaletuilla tai elementtirakenteisilla seinillä tai yhtenäisillä jäykillä välipohjarakenteilla. Jäykistysseiniä käytetään usein yhdessä jäykistävän porraskuilun kanssa. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 540)

Jäykistävänä levynä voi toimia myös muotolevy, joka jäykistää rakennuksen katon tasossa, kuten kuvassa 4. Hallimaisten teräsrunkoisten rakennusten levyjäykistämiseen toimii erityisen hyvin vesikattorakenne, jolloin kattotason jäykistävät ristikkojäykisteet voidaan jättää pois. Toisiinsa kytketyt muotolevyt toimivat yläpohjarakenteen kanssa korkeana palkkina, joka siirtää pilarin yläpäähän syntyviä vaakavoimia tason suunnassa. Rungon toisessa päässä voimat siirtyvät jäykistysrakenteille, joiden kautta kuormat viedään perustuksille. Levykenttä siirtää kuormat leikkausvoimana sekä levykentän reunasauvoilla

normaalivoimana. Jos levykentän alapuolinen kehärakenne on jäykkäliitoksinen ja kehän sekä yläpohjan yhteistoiminta on taattu, vaakakuormat jakautuvat kehärungolle ja levykentälle niiden jäykkyyksien suhteessa. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 217–218)

Kuva 4 Levyjäykistys katon tasossa.



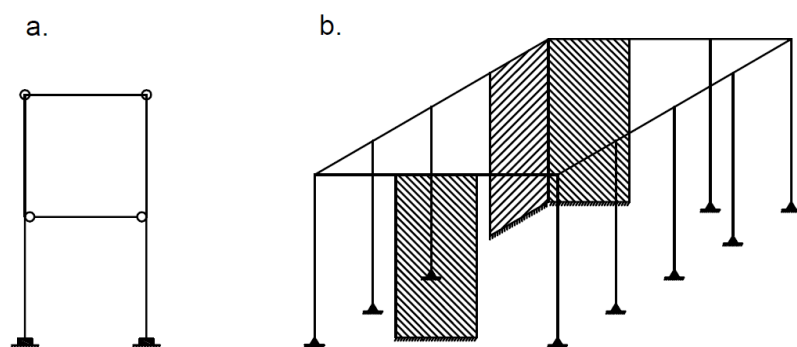
3.4 Mastojäykistys

Mastojäykistys perustuu siihen, että jäykistävä pystyrakenne on liitetty alapäästään niin jäykästi perustuksiin, että se kykenee jäykistämään myös ympäröiviä rakenteita.

Kehärakenteiden pilarit voidaan suunnitella mastojäykisteiksi, jolloin pilari-palkkiliitos voidaan suunnitella nivelelliseksi jäykän sijaan. Mastopilarit sopivat vain matalan rakennuksen jäykistykseen, koska perustuksille siirtyvä momentti ja pilarin yläpäähän siirtymät kasvavat nopeasti pilarin korkeuden kasvaessa (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 540).

Mastojäykisteisenä rakenteena voidaan käyttää myös seinämastoa. Seinämastoja tulisi olla vähintään kolme ja ne tulisi sijoittaa niin, ettei niiden keskipisteet leikkaa samassa pisteessä. Mastojäykisteseinät voivat olla paikalla valettuja, betonielementtejä tai teräsrakenteisia seinä. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 540; Kangaspuoskari ym., 2020, s. 216) Kuvassa 5 on esitetty kaksi erilaista mastojäykistystapaa.

Kuva 5 Mastojäykistys a. mastopilari b. seinämasto.



3.5 Liitokset ja niiden luokittelu

Liitos koostuu kiinnityksestä, kiinnikkeistä, sekä sauvojen osista, jotka välittävät kuormituksesta syntyvät jännitykset liitoksen kautta toisen sauvan osille. Kiinnityksellä tarkoitetaan kahden sauvan liitoskohtaa sekä sen kiinnitystapaa. Teräslitokset voidaan kiinnittää ruuveilla, hitseillä, niiteillä tai kiinnikkeettöminä liitoksina. Yksinkertaistettuna ohjeena voidaan pitää, että hitsiliitokset toteutetaan konepajalla ja ruuviliitokset työmaalla. Konepajalla hitsiliitokset saadaan toteutettua hallituissa ja valvotuissa olosuhteissa, jolloin hitsisauman epätäydellisyydet ja virheet saadaan minimoitua. Ruuviliitokset ovat nopea ja turvallinen työtap, joka ei myöskään ole säästä riippuvainen. Niittiliitoksia käytetään yleensä vain vanhojen teräsrakenteiden korjauksessa (Kinnunen ym., 2001, s. 91).

Rakenteiden kuormitus aiheuttaa liitoksien kiinnityksiin ja kiinnikkeisiin muodonmuutoksia sekä jännityksiä. Liitoksen kestävyys määräytyy heikoimman osan perusteella, ja sen tulee olla liitokseen kohdistuvia rasituksia suurempi. Standardi SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 66–69) esittää liitosten suunnittelun avuksi peruskomponenttien ominaisuuksia. Standardista löytyy kaavat liitoskomponenttien jouston, kestävyys ja muodonmuutoskyvyn määrittämiseen. Liitoksen peruskomponentteja ovat pilarin uuman leikkaus, pilarin uuman poikittainen puristus, pilarin uuman poikittainen veto, pilarin laipan taivutus, päätylevyn taivutus, kulmateräksen laipan taivutus, palkin tai pilarin laipan ja uuman puristus, palkin uuman veto, levyn veto tai puristus, ruuvien veto, ruuvien leikkaus, ruuveihin kohdistuva reunapuristus, betoniin ja jälkivaluun kohdistuva puristus, puristuksesta aiheutuva pohjalevyn taivutus, vetovoimasta aiheutuva pohjalevyn taivutus, perustusruuvien vetorasitus,

perustusruuvien leikkausrasitus, perustusruuvien reunapuristus, hitsit sekä viistetty palkki. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 149)

3.5.1 Kiertymisjäykkyys

Liitokset voidaan jakaa jäykkyyden tai lujuuden mukaan. Kiertymisjäykkyyden mukaan luokiteltuna liitokset jaetaan nimellisesti nivelellisiin, jäykkiin sekä osittain jäykkiin liitoksiin. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 302) Kiertymisjäykkyys tarkoittaa momenttia, joka saa aikaan yhden yksikön suuruisen kiertymän liitoksessa.

Nimellisesti nivelellisiin liitoksiin ei saa päästä muodostumaan merkittäviä momenteja. Standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 58–60) on määritetty kiertymisjäykkyyden alkuarvon $S_{j,ini}$ laskeminen sekä raja-arvo, jonka perusteella liitoksen katsotaan toimivan nimellisesti nivelellisenä liitoksena. Jäykät liitokset siirtävät tavutusmomentin säilyttäen samalla liitettävien sauvojen välisen kulman suuruuden. Osittain jäykkien liitosten jäykkyys vaikuttaa liitettävien sauvojen rasituksiin ja muodonmuutoksiin ja mitoitus perustuu momentti-kiertymäyhteyteen. Osittain jäykkä liitos mallinnetaan usein kiertojousena, jonka jäykkyys vastaa liitoksen kiertymisjäykkyyttä. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159; Ongelin & Valkonen, 2010, s. 302)

3.5.2 Luokittelu lujuuden mukaan

Liitos luokitellaan täysin lujaksi, jos sen taivutuskestävyyden mitoitusarvo $M_{j,Rd}$ on liitettävän sauvan taivutuskestävyyttä suurempi. Jos liitos sijaitsee pilarin keskellä, tulee liitoksen taivutuksen olla kaksi kertaa pilarin taivutuskestävyyttä suurempi, jotta liitosta voidaan käsitellä täysin lujana. Osittain luja liitos on heikompi, mutta kykenee silti siirtämään taivutusmomenttia. Jos liitoksen kestävyys on alle 25% liitettävän osan taivutuskestävyydestä, liitos toimii ainoastaan riittävän kiertymiskykynsä ansiosta. Tällöin luokitellaan, ettei liitoksella ole lujuutta ja se on nimellisesti nivelellinen liitos. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159; Ongelin & Valkonen, 2010, s. 302)

Liitosmalli ja -luokka valitaan taulukon 1 mukaisesti. Liitosluokka määräytyy rakenteen kokonaistarkastelussa käytetyn menetelmän mukaan. Kimmoteorian mukaisessa kokonaistarkastelussa riittää, että liitoksen jäykkyydet on määritetty, jolloin liitokset luokitellaan nimellisesti nivelellisiksi, jäykiksi tai osittain jäykiksi. Jäykkä-plastisessa mallissa

tulee tuntea liitoksen lujuus ja liitokset luokitellaan nimellisesti nivelellisiksi, täysin lujiksi tai osittain lujiksi. Kimmo-plastisessa mallissa tulee tuntea liitoksen jäykkyys sekä lujuus. Tällöin liitokset luokitellaan nimellisesti nivelellisiksi, jäykiksi ja täysin lujiksi tai osittain jäykäksi ja osittain lujaksi, osittain jäykäksi ja täysin lujaksi tai jäykäksi ja osittain lujaksi. Liitosmallissa liitokset luokitellaan nivelellisiksi, jäykiksi tai osittain jäykiksi. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 304)

Taulukko 1 Liitosten luokitus kokonaistarkastelun mukaisesti (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 305).

Kokonaismenettelyssä käytetty menetelmä	Liitosluokka		
	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä ^{a)}
Kimoteoria	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä ^{a)}
Jäykkä-plastinen malli ^{a)}	Nimellisesti nivelellinen	Täysin luja	Osittain luja
Kimmo-plastinen malli ^{a)}	Nimellisesti nivelellinen	Jäykkä ja täysin luja	- Osittain jäykkä ja osittain luja - Osittain jäykkä ja täysin luja - Jäykkä ja osittain luja
Liitosmalli	Nivelellinen	Jäykkä	Osittain jäykkä
a) ei sovelleta S500–S700 teräksillä			

3.5.3 Luokittelu kiertymiskyvyn mukaan

Riittävä kiertymiskyky tulee tarkistaa, ellei liitoksen kestävyys ole vähintään 1,2 kertaa liitettävien osien kestävyyttä suurempi, jolloin plastinen nivel syntyy liitoksen sijaan sen viereen liittyvään osaan. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 155) Standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 65–69) esitetään ohjeet kiertymiskyvyn laskemiseen sekä vaatimuksia riittävän kiertymiskyvyn toteamiseen eri tilanteissa.

Liitos luokitellaan sitkeäksi, jos sillä on riittävästi plastista muodonmuutoskykyä kuormitustilanteessa. Myötörajan ylittymisen jälkeen liitoksen heikoin osa ei saa murtua yllättäen ja nopeasti, vaan osan tulee myötää kuormituksen lisääntyessä. Sitkeisiin murtotapoihin lasketaan reunapuristus, bruttopoikkileikkauksen myötääminen, ekvivalentin T-osan myötääminen, levyn taivutus, sekä pilarin uuman leikkaus tai poikittainen veto. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 149 & 160; Ongelin & Valkonen, 2010, s. 306)

Äkilliseen murtumaan johtavia hauraita liitoksia tulee välttää. Hauraita murtotapoja ovat levymäisten osien lommahdus ja nurjahdus, poikkileikkauksen vetomurto, hitsien kaikki murtotavat, ruuvien leikkautuminen ja niiden veto- sekä lävistysmurto. Hauraille liitoksille ei myöskään saa soveltaa voimien plastista uudelleenjakautumista ruuveille, koska kiinnike murtuu ennen plastisen kestävyuden saavuttamista. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 149 & 160) Perusperiaatteena voidaan pitää, että levyrakenteet suunnitellaan geometrian tai komponenttien sijoittelun avulla niin, että levyn mahdollinen nurjahdus puristavan kuorman alla estetään ja kiinnikkeet suunnitellaan heikointa osaa kestävimmiä, jolloin levyosan myötääminen mitoittaa liitoksen. Suunnittelija siis valitsee, kuinka liitos murtuu.

3.6 Liitoksen kuormansiirtoreitit

Liitosten mitoituksen lähtökohtana on, että liitoksiin ja sen kiinnityksiin kohdistuvat rasitukset on määritetty standardin SFS-EN 1993-1-1 mukaisesti ja laskelmissa käytetään todellisia rasituksia. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 41; ks. myös SFS-EN 1993-1-1, 2005, ss. 30–42)

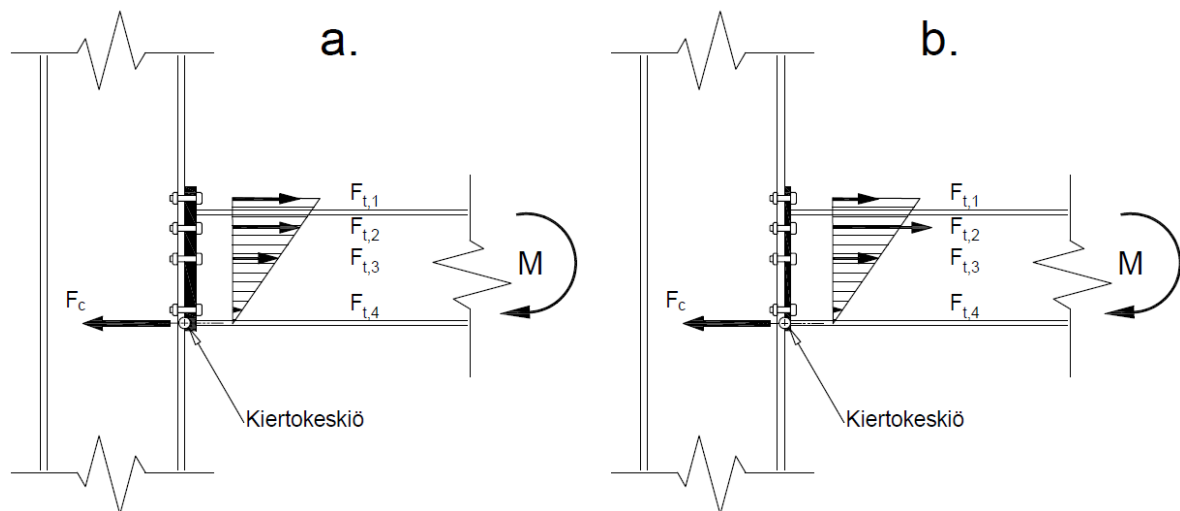
Jotta liitos on toimiva, liitokseen kohdistuvien ulkoisten voimien tulee olla tasapainossa liitoksen sisäisten voimien kanssa, eikä minkään liitoksen osan muodonmuutoskyky tai kestävyys saa ylittyä. Mikäli liitos sisältää useita ruuveja tai hitsejä, on liitos staattisesti määräämätön, eikä sisäisiä voimia voida ratkaista suoraan tasapainoyhtälöstä lineaarisesti. Sisäisten voimien jakautumiseen vaikuttaa koko liitoksen sekä sen kaikkien osien jäykkyys sekä muodonmuutoskyky. Täysin tarkan jakautumisen selvittäminen on erittäin aikaa vievää ja jopa mahdotonta, sen vuoksi yksinkertaistettuna riittää, että päätellään liitoksen toiminnasta aiheutuvat todennäköiset muodonmuutokset sekä ne huomioiden sisäisten ja ulkoisten voimien tasapaino.

Rakenteessa liitoksen yli vaikuttava normaalivoima jakautuu tasaisesti koko poikkileikkauksen alueelle, yksittäisille osille rasitus jaetaan suoraan suhteessa niiden poikkileikkauksen pinta-alaan. Leikkausvoima kohdistuu sen kanssa samaan suuntaan oleville tasopinnoille ja mitoituksen lähtökohtana voidaan pitää, että leikkauskuormituksen suuntaiset osat kantavat koko leikkausvoiman (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 153). Momentin vaikuttaessa liitokseen on tunnistettava liitoksen toiminta ja muodonmuutokset kuormituksen alaisena, jotta saadaan määritettyä kiertokeskiö. Tämän jälkeen voimat voidaan jakaa kiertokeskiön kautta lineaarisesti kiertokeskiön etäisyyden mukaan tai plastisuusteorian

mukaisesti, mikäli liitoksen komponenttien kestävyys ja sitkeys on riittävä. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 166)

Rakenteen oikean käyttäytymisen tunnistaminen on tärkeää erityisesti kiinnikkeiden mitoituksen yhteydessä. Kuvassa 6 esitetään kimmoteorian mukainen momentin aiheuttaman vetovoiman jakautuminen ruuveille käytettäessä paksua tai ohutta päätylevyä. Kuvassa 6 b. voima ei jakaudu lineaarisesti ruuveille ohuen päätylevyn taipumisen seurauksena.

Kuva 6 Momentin aiheuttaman vetovoiman jakautuminen ruuveille a. paksun päätylevyn b. ohuen päätylevyn tapauksessa.



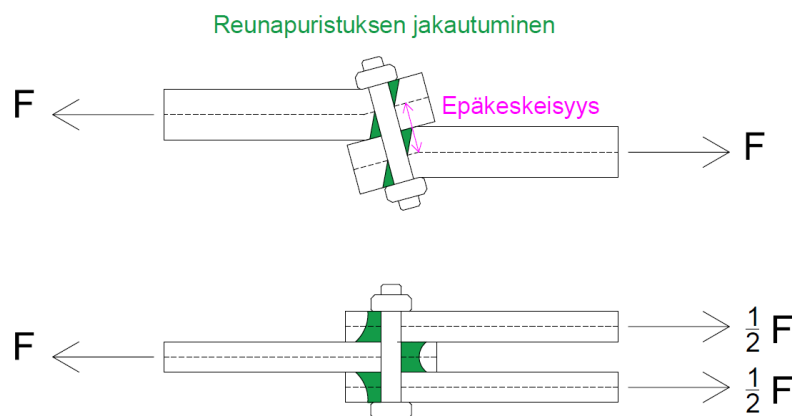
3.7 Leikkausvoiman rasittamat ruuviliitokset

Leikkausvoiman rasittamien ruuvikiinnitysten tarkastettavia kestävyyskomponentteja ovat ruuvin leikkauskestävyys, reunapuristuskestävyys, liitettävien osien palamurtumiskestävyys, liitettävien osien nettopoikkileikkauksen kestävyys sekä liitettävien osien bruttopoikkileikkauksen kestävyys. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159) Leikkausvoiman rasittamissa ruuviliitoksissa voima siirtyy suoraan ruuvien vartta vasten liitettävien osien kanssa samassa tasossa reunapuristuksen kautta ja ruuvien varsissa leikkausjännityksen välityksellä. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 164)

Reunapuristuksen oletetaan jakautuvan tasaisesti ruuvien ja liitettävien levyjen perusaineen välillä. Todellisuudessa reiän välyksen vuoksi ruuvien varsi ei täytä reikää kokonaan ja pienillä rasituksilla syntyy (epätasaisen) kosketuspaineen vaikutuksesta jännityshuippuja. Rasitusten kasvaessa myötörajan suuruisiksi, jännitys jakautuu tasaisesti leveämmälle alueelle. Yksinkertaistuksen vuoksi myös ruuvien varren poikkileikkauksen leikkausjännityksen oletetaan olevan tasaisesti jakautunut, vaikka todellisuudessa näin ei ole.

Yksileikkeisissä liitoksissa tulee huomioida liitoksen epäkeskisyydestä aiheutuva reunapuristuksen epätasainen jakauma ruuvien varren suunnassa. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 164–165) Kuvassa 7 esitetään reunapuristuksen jakautuminen liitoslevyissä yksi- ja kaksileikkeisessä liitoksessa. Yksileikkeisyys aiheuttaa myös liitoslevyihin taivutusmomenttia, jonka momenttivarsi on liitoslevyjen neutraaliakselien etäisyyden suuruinen.

Kuva 7 Reunapuristuksen jakautuminen yksi- ja kaksileikkeisessä liitoksessa.



Ruuvien varteen kohdistuu taivutusmomenttia, joka yleensä voidaan jättää huomioimatta. Mikäli ruuvien varren paksuus on vähemmän kuin $1/5$ liitettävien osien yhteispaksuudesta, tulisi ruuvien taivutuskestävyys kuitenkin tarkistaa. Tämä tulee huomioida erityisesti täytelevyjä käytettäessä, koska momenttivarren kasvaessa ruuvien varteen kohdistuva taivutusrasituksen suuruus kasvaa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 165)

Jännityksen ollessa kimmoisella alueella, liitoslevyjen jännityshuippu on ruuvien reiän vieressä paikallisesti myötörajan suuruinen. Rasitusten kasvaessa poikkileikkaus plastisoituu ja

jännitys jakauma tasaantuu. Liitoslevyjen perusaineen vetokestävyys lasketaan olettaen jännityksen olevan tasaisesti jakautunut koko nettopoikkileikkauksen pinta-alalle. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 165)

Standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 92–96) määritetään rasiusten jakautuminen liitoksen ruuveille. Kun liitokseen vaikuttaa momentti, sisäiset voimat jakautuvat kimmoteorian mukaisesti lineaarisesti kiertokeskiöön nähden tai plastisuusteorian mukaisesti tasaisesti, mikäli minkään komponentin kestävyys ei ylitä ja niiden sitkeys on riittävä. Voimien jakautuminen tulee määrittää lineaarisesti kimmoteorian perusteella, jos kyseessä on liukumaton kiinnitysluokan C kiinnitys. Jos kiinnittimen leikkauskestävyys on reunapuristusta pienempi, eli ruuvien murtotapa on hauras, tai jos kiinnityksiin kohdistuu iskuja, värähtelyjä tai kuorman suunnan muutoksia, tulee myös tällöin sisäisille voimille käyttää kimmoteorian mukaista jakautumista. Mikäli liitokseen kohdistuu vain keskeistä leikkausvoimaa ja kiinnittimet ovat samanlaiset, voidaan voimien olettaa jakaantuvan tasan kaikille kiinnittimille, poikkeuksena pitkät liitokset. Jos äärimmäisten ruuvien etäisyys on enemmän kuin 15 kertaa ruuvin varren halkaisija, pienennetään ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvoa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 166)

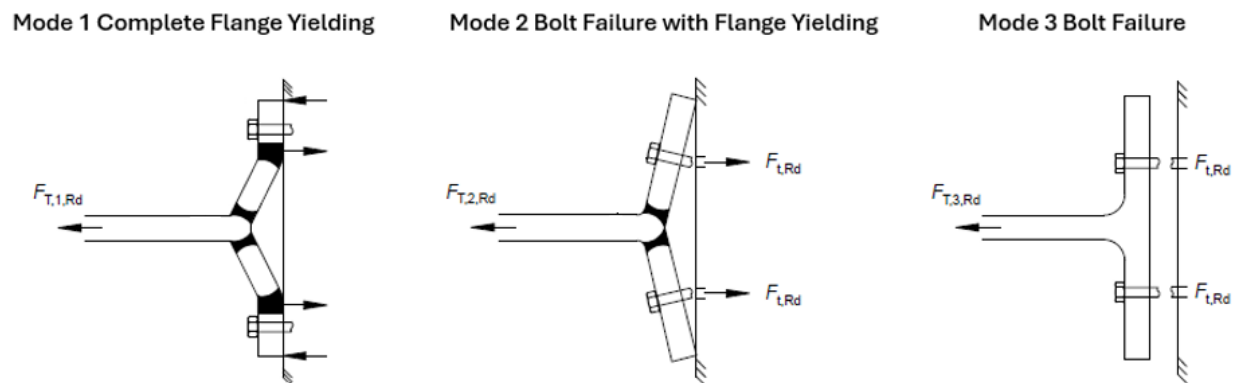
3.8 Vetovoiman rasittamat ruuviliitokset

Vetovoiman rasittamien ruuvikiinnitysten tarkastettavia kestävyyskomponentteja ovat ruuvin vetokestävyys, ruuvin kannan ja mutterin lävistyskestävyys sekä liitettävien osien levyjen myötääminen ja niihin liittyvät vipuvoimat, eli ekvivalentin T-osan tarkastus. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159)

Vedettyjen sauvojen päätylevyliitoksiin syntyy ruuvin varren suuntaista vetorasitusta. Jos liitokseen kohdistuu lisäksi taivutusta, aiheuttaa se vetopuolen ruuveille päätylevyn taipumisen välityksellä vipuvoimia. Vedettyjen ruuvien liitettäviin levyihin aiheuttaman poikittaisen taivutuksen ja levyn taipumisesta seuraavien vipuvoimien vaikutusten määrittämiseen löytyy standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 72–76) ohjeet nimellä vedetyn ekvivalentin T-osan tarkastelu. Tässä osassa esitetään kolme murtumismallia, jotka on esitetty kuvassa 8. Murtumismallissa 1 pilarin laippaan tai palkin päätylevyyn syntyy täysi mekanismi, murtumismallissa 2 ruuvi murtuu laipan tai päätylevyn samalla myötäessä ja murtumismallissa 3 T-osa murtuu hauraasti ruuvien murtuessa. Murtumismallien kaavoissa huomioidaan tarvittaessa vipuvoimavaikutus. Standardissa esitetään kaava, jolla voidaan

laskea, syntyykö liitokseen vipuvoimia. Yksinkertaistetusti voidaan olettaa, että palkki-pilariliitoksessa vipuvoimia esiintyy aina ja perustusruuviliitoksessa ei koskaan (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159). Tämä yleistys pätee tilanteissa, jossa päätylevy on paksuutensa ansiosta riittävän jäykkä.

Kuva 8 T-osan murtumismuodot (The Steel Construction Institute, 2013, s. 11)



Lisätietoja: Alkuperäistä kuvaa on muokattu kokoamalla murtumismuodot vierekkäin ja poistamalla ruuvien etäisyyksien merkinnät.

Mikäli ruuvikiinnityksen heikoimmalla komponentilla on sitkeä murtotapa, voidaan kiinnityksen olettaa olevan plastisesti muodonmuutoskykyinen eli kestävyys ylittyessä heikoin komponentti myötää ennen murtumista. Sitkeitä kestävyyskomponentteja ovat reunapuristus, bruttopoikkileikkauksen myötääminen ja T-osan myötääminen. Haurailla liitoksilla ei saa käyttää plastisuusteorian mukaista rasiusten jakautumista ruuveille, eivätkä hauraat liitokset välttämättä täytä jatkuvan sortuman estämisen vaatimuksia. Hauraita kestävyyskomponentteja ovat ruuvien leikkautuminen, lyhyiden ruuvien vetomurto, lävistysmurto ja nettopoikkileikkauksen vetomurto. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 159)

Ruuviliitoksen kiertymisjäykkyys lasketaan Standardin SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 100–108) mukaisesti, jolloin huomioidaan komponenttien jäykkyystekijät sekä komponenttien momenttivarret, eli etäisyydet liitoksen kiertymäkeskiöstä. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 160)

Standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 23–28), esitetään nimellisvälykset erityyppisille ruuvien rei'ille sekä ruuvien reikien pienimmät ja suurimmat reuna-, pääty- ja keskiöetäisyydet. Näiden tarkoituksena on ruuvien asennuksen tarvitseman tilan varmistaminen, korroosion välttäminen sekä paikallisen ruuvien välisen levyosan lommahduksen ja sauvan sekä liitoslevyjen nurjahduksen estäminen. Lisäksi reikien sopivalla sijoittelulla estetään ruuviryhmän palamurtuminen palkin uuman päässä tai liitoslevyissä. Palamurtuminen tapahtuu ruuvien keskilinjojen kohdalla ja sen aiheuttaa samaan aikaan tapahtuva perusaineen leikkausmurtuma leikkausvoiman kuormittamassa pinnassa sekä vetomurtuma vetovoiman kuormittamassa pinnassa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 173; Ongelin & Valkonen, 2010, s. 340)

Perusaineenkestävyys ruuviryhmän vieressä tarkastetaan teräksen myötörajan perusteella. Ruuviryhmän kohdalla huomioidaan reikävähennys ja kestävyys tarkastetaan vetomurtolujuuden mukaan. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 174)

3.9 Hitsausliitokset

Hitsausliitoksessa liitettäviä osia sekä saumaan lisättävää lisäainetta kuumennetaan liitoskohdassa sulaan tai lähes sulaan muotoon, jolloin liitettävien osien aineet sekoittuvat ja jäähtyessään muodostavat hitsisauman. Lisäaineina käytetään yleisesti hitsaustavan mukaan joko päällystettyjä tai päällystämättömiä metallilanka- tai -puikkotuotteita, jotka ovat samaa ainetta kuin liitettävät kappaleet. Liitettävien osien välistä rakoa, johon hitsisauma tehdään, kutsutaan railoksi. Railoksi kutsutaan myös sauman kohtaa, jossa ei ole varsinaista rakoa. Railo voidaan muotoilla eri tavoin liitettävien osien sijainnista tai hitsausmenetelmästä riippuen. Hitsisauma voidaan työstää valmiiksi yhdellä hitsauskerralla, mutta paksut saumat vaativat useamman hitsauskerran. Yhdellä hitsauskerralla muodostunutta hitsisauman osaa kutsutaan paloksi. Yksi hitsisauma voi siis koostua useista paloista, jotka muodostavat samassa tasossa olevien palkojen kanssa palkokerroksia. Alinta, ensimmäiseksi hitsattua palkoa kutsutaan pohjapaloksi. Mikäli V- tai I-railo hitsataan kahdelta puolelta, eli myös juuren puolelta, kutsutaan tätä osaa saumasta juuripaloksi. Päällimmäinen palko muodostaa hitsin pinnan. Hitsin pinnan muodon perusteella hitsi voidaan nimetä kupu-, kouru- tai tasahitsiksi. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 181 & 184)

Hitsattavien rakenneterästen tulee olla standardin SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 8, 10) viitestandardiryhmän 1 mukaisia sekä hitsausaineiden viitestandardiryhmän 5. Lisäksi

standardissa SFS-EN 1090-2 edellytetään, että hitsaus suoritetaan standardin SFS-EN ISO 4063 määritellyillä hitsausprosesseilla, materiaalipaksuuden on oltava vähintään 4 mm, hitsiaineen mekaanisten ominaisuuksien on vastattava perusaineen mekaanisia ominaisuuksia ja hitsien tulee täyttää standardin SFS-EN 1993-1-9 mukaiset vaatimukset. Mikäli hitsattavan materiaalin paksuus on vähemmän kuin 4 mm, tulee seurata standardin SFS-EN 1993-1-3 + AC ohjeita. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 181; ks. myös SFS-EN 1090-2:2018; SFS-EN ISO 4063:2023; SFS-EN 1993-1-9, 2005; SFS-EN 1993-1-3 + AC, 2006, ss. 60–69)

Standardissa EN ISO 5817 määritellään hitsausluokat D, C ja B sekä määritellään hitsiluokille sallitut virheet. Hitsausluokka valitaan rakenneosalle määritetyn toteutusluokan perusteella. Yleensä toteutusluokissa EXC2 ja EXC3 käytetään hitsausluokkia B (vaativa) tai C (hyvä). Toteutusluokassa EXC1 on mahdollista edellyttää hitsausluokkaa D (tyytyttävä). Hitsausluokka ei vaikuta hitsaussauman mitoittamiseen. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 342; ks. myös SFS-EN ISO 5817:2023, ss. 9–24)

Hitsauskäsittelyn lämpötilanmuutokset aiheuttavat jännitysten muutoksia ja sen kautta muodonmuutoksia teräsosissa. Hitsauksen aikana sauman sulamisvyöhykkeellä ensin tapahtuva nopea kuumeneminen aiheuttaa lämpölaajentumista ja johtaa lujuuden häviämiseen sulamisen seurauksena. Tämän jälkeen sauma alkaa jäähmettyä ja lujuus palautua, jäähtymisen yhteydessä tilavuus taas pienenee ja lujuus kasvaa. Lämpötila vaihtelee hitsaussauman eri kohdissa. Kuumat kohdat pyrkivät laajenemaan ja kylmät kohdat estämään sen. Kuumien kohtien myötöraja on alentunut lämpenemisen seurauksena, joten puristuessaan ne tyssääntyvät, kylmemmillä alueilla teräs käyttäytyy kimmoisasti. Jäähtyessään osa tyssäytyneistä alueista palautuu alkuperäiseen muotoon plastisen venymän avulla. Lämpötilan tasaantuessa hitsisaumassa on pituussuunnassa myötörajan suuruinen vetojännitys ja poikittaisessa suunnassa tasapainottava puristusjännitys. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 186)

Hitsauskiinnitysten voimien jakautuminen voidaan määrittää kimmo- tai plastisuusteorian mukaisesti. Tavallisesti voidaan olettaa voimien jakautuvan yksinkertaistetusti ilman jäännösjännitysten ja voimien siirtymiseen liittymättömien jännitysten huomioimista. Tämä pätee erityisesti hitsisauman pituusakselin suuntaisiin normaalijännityksiin. Hitsausliitoksien riittävä muodonmuutoskyky tulee myös huomioida. Liitokset, joihin voi syntyä plastinen nivel, hitsaussaumojen kestävyys tulee olla vähintään yhtä suuri kuin liitoksen heikoimmalla komponentilla. Muissa tilanteissa hitsien lujuuden tulee olla perusaineen myötäämistä suurempi. Leikkausvoiman kuormittavissa hitsatuissa kiinnityksissä ja ruuveilla

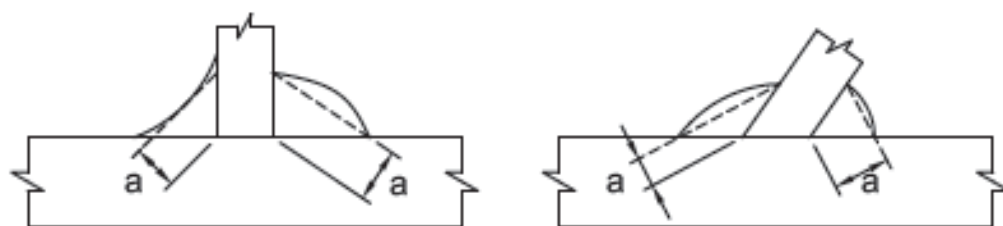
kiinnitettävissä päätylevyliitoksissa palkin laippojen hitsejä ei huomioida ja ainoastaan palkin uuman hitsit mitoitetaan leikkausvoimalle. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 343)

Taivutusmomentin kuormittavissa liitoksissa hitsit eivät saa mitoittaa liitoksen taivutuskestävyyttä. Palkki-pilariliitoksissa ja palkkien jatkoksissa, joihin on mahdollista syntyä kiertyvä plastinen nivel, hitsit on mitoitettava liitettävän sauvan plastisuusteorian mukaiselle taivutuskestävyyden mitoitusarvolle tai suuremmaksi kun liitoksen taivutuskestävyys. Mikäli liitos on osa kehää, standardissa SFS-EN 1993-1-1 (2005, ss. 30–33) määritetään ehdot hitsin taivutuskestävyydelle sivusiirtyvyyteen perusten. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 343)

Standardissa SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 41–44) hitsilajit luokitellaan pienahitseihin, katkopianahitseihin, kolopianahitseihin, päittäishitseihin, tulppahitseihin sekä pyöröterästen kylkihitseihin. Kolopianahitsejä ja tulppahitsejä käytetään pyöreissä tai pitkänomaisissa rei'issä. Kolopiena- ja tulppahitsejä käytetään vain leikkausvoiman siirtämiseen tai rajoittamaan joko nurjahdusta tai päällekkäisten kappaleiden erkaantumista. Päittäishitsillä yhdistetään esimerkiksi kaksi samassa tasossa olevaa teräslevyä. Päittäishitsi voi olla täysin läpihitsattu, jolloin hitsisauma täyttää koko perusaineen paksuuden, tai vaihtoehtoisesti osittain läpihitsattu. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 181–182)

Piena- ja osittain läpihitsatuille päittäishitseille tulee antaa hitsin poikkileikkausmitta. Liitettävät osat voidaan kiinnittää pienahitsillä, mikäli osien muodostama kulma on 60–120 astetta. Jos kulma on alle 60 astetta, hitsisauma oletetaan osittain läpihitsatuksi päittäishitsiksi ja hitsin paksuudeksi valitaan hitsautumissyvyys, joka kokeellisesti voidaan todistaa saavutettavan säännöllisesti. Pienahitsin mitta voidaan antaa a- tai z-mittana. Suomessa pienahitseille käytetään vain a-mittaa, railohitseille z-mittaa. A-mitan määrittämiseksi hitsin poikkileikkaukseen kuvitellaan mahdollisimman suuri kolmio hitsin kylkien ja pinnan sisään, jota havainnollistetaan kuvassa 9. A-mitta vastaa suurinta korkeutta, joka voidaan mitata kohtisuoraan sauman juuresta kolmion uloimpaan pintaan. Mikäli pienahitsin on määrä siirtää voimia, tulee a-mitan olla vähintään 3 mm. Pienahitsiä ei saa lopettaa osien kulmissa, vaan sauman tulee jatkaa jatkuvana ja täysikokoisena kulman ympäri vähintään kaksi kertaa hitsisauman kyljen pituisena, mikäli geometria sen sallii. (Ongelin & Valkonen, 2010, ss. 343–345)

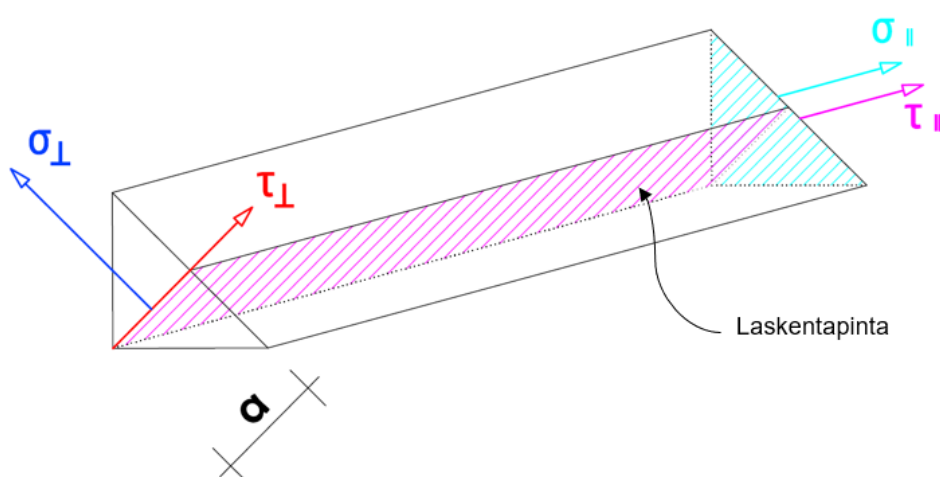
Kuva 9 Pienahitsin a-mitta (Ongelin, Valkonen, 2016, s. 203).



Standardin SFS-EN 1993-1-8 (2005, ss. 44–47) antaa pienahitsin kestävyyslaskemiseen kaksi tapaa, yksinkertaistetun menetelmän tai tarkemman tuloksen antavan komponenttimenetelmän. Yksinkertaistellulla menetelmällä laskettuna hitsisaumaan kohdistuvien voimien resultantin oletetaan aiheuttavan hitsin poikkileikkauspintaan ainoastaan leikkausta voiman tai hitsisauman suunnasta riippumatta.

Komponenttimenetelmällä laskettaessa hitsin siirtämät voimat jaetaan hitsisauman pituusakselin suuntaiseen normaalijännitykseen, laskentapintaa vastaan kohtisuoraan normaalijännitykseen sekä laskentapinnan tasossa hitsin akselia vastaan kohtisuoraan ja akselin suuntaiseen leikkausjännitykseen. Jännitykset on esitetty kuvassa 10. Hitsisauman pituusakselin suuntaista normaalivoimaa ei huomioida laskettaessa hitsin kestävyyttä komponenttimenetelmällä. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 181–182) Laskentapinnan leveys vastaa hitsisauman a -mittaa ja pituus hitsisauman tehollista pituutta. Suorankulman muodostavassa T-liitoksessa tasakylkisen pienahitsin laskentapinta on 45 asteen kulmassa liitettäviin osiin nähden.

Kuva 10 Pienahitsin laskentapinnan jännitykset.



σ_{\parallel} hitsin akselin suuntainen normaalijännitys

σ_{\perp} laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys

τ_{\parallel} hitsin akselin suuntainen leikkausjännitys laskentapinnan tasossa

τ_{\perp} hitsin akselia vastaan kohtisuora keikkausjännitys laskentapinnan tasossa

3.10 Lamellirepeily

Kun vetovoima kohdistuu suoraan teräslevyn valssauspintaa kohti, syntyy lamellirepeilyn vaara. Vetojännityksen voi aiheuttaa ulkoisen kuormituksen vetovoima tai hitsauksesta aiheutuneet kutistumisjännitykset. Lamellirepeilyn vuoksi pienahitsillä ja osittain läpihitsatuilla päittäishitseillä kiinnitetyjä X-, T-, L- ja nurkkaliitoksia tulisi välttää. Lamellirepeily on vaarallista myös levyjen pinnoissa, joissa on hitsattu nostokorvake, palkkien ja pilarien päätylevyissä sekä putkimaisten osien kylkien hitsauksissa. Lamellirepeäminen ilmenee hitsausliitoksen alla levyosan pinnan suuntaisena murtumisena. Paksuussuunnassa testattuja levyjä kutsutaan Z-levyiksi. Näiden levyjen materiaalin paksuussuuntaisia ominaisuuksia on testattu paksuussuuntaisissa vetokokeissa, joiden perusteella materiaalille on määritetty Z-arvo eli vetokokeen aiheuttama murtokuorma. (Ongelin & Valkonen, 2010, ss. 470–471)

Materiaalivalinnan lisäksi lamellirepeily voidaan välttää tai sen riskiä pienentää hitsaustavan valinnalla tai liitoksen detaljisuunnittelulla. Suuremmalla energialla hitsattaessa hitsisauman tunkeuma on suurempi ja hitsi leveämpi, jolloin muodonmuutokset jakautuvat leveämmälle alueelle levyn paksuussuunnassa. Vetovoiman rasittamat liitokset kannattaa

mahdollisuuksien mukaan suunnitella sellaisiksi, ettei kohtisuora veto kuormita levyn pintaa. Nurkkaliitokset on hyvä muotoilla niin, että mahdollisesti tarvittava loveus tehdään levyyn, jolla on lamellirepeilyn vaara tai sijoittaa levyt niin, että hitsisauma muodostuu levyjen tasopintojen sijaan poikkipintoihin. (Ongelin & Valkonen, 2010, ss. 470–471)

Jotta lamellirepeily voidaan standardin SFS-EN 1993-1-10 mukaan estää, tulee materiaalilla olla riittävä standardin EN 10164 mukainen Z-arvo tai rakenne tulee valmistuksen jälkeen tarkistaa, onko lamellirepeilyä esiintynyt. Z-arvo on määritetty ainoastaan materiaaleille, joiden paksuus on vähintään 15 mm. Tätä ohuempien rakenteiden lamellirepeily on mahdollista tarkistaa vain hitsauksen jälkeen silmämääräisesti sekä esimerkiksi magneettijauhe- ja ultraäänitarkastuksella. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 473; ks. myös SFS-EN 1993-1-10, 2005, ss. 13–16)

3.11 Korroosioilmiö ja sen muodot

Korroosio tarkoittaa metallin syöpymistä ympäristöolosuhteiden vaikutuksesta kemiallisten, sähkökemiallisten tai fysikaalisten tekijöiden aiheuttamana. Useimmat korroosioilmiöt perustuvat ainakin osittain sähkökemialliseen korroosioon (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 274). Sähkökemiallinen korroosio syntyy usean mikroskooppisen pienen sähköparin välille sähköä johtavan kosteuden ja hapen välityksellä. Sähköpari voi muodostua kahden eri jaloustasteisen metallin välille tai saman metallipinnan eri potentiaaliaalueille, jossa alhaisemman potentiaalin alue syöpyy. Potentiaali- eli jalouserot saman metallin pinnalla voivat aiheutua epäpuhtauksista, jännityksistä, kidevirheistä tai pinnan happipitoisuuden eroista. Syöpyvä metallin osa, anodi, hapettuu ioneiksi, jotka liukenevat elektrolyyttiin tai saostuvat metallin jalommalle katodipinnalle, joka säilyy ehjänä. Elektrolyytinä voi toimia esimerkiksi ilmankosteus. Katodilla tapahtuva pelkistymisreaktio vaihtelee elektrolyyttiliuoksen koostumuksen mukaan. Anodi- ja katodireaktiot tapahtuvat samanaikaisesti. Korroosion seurauksena metallin pinnalle muodostuu korroosiotuotteita, joka teräksen sisältämällä raudalla on ruoste. Koska anodiset ja katodiset alueet vaihtavat paikkaa jatkuvasti, pinta syöpyy tasaisella nopeudella koko pinnan alueella. Tätä ilmiötä kutsutaan yleiseksi tai tasaiseksi korroosioksi. Syöpymisnopeuteen vaikuttaa metallien pinta-alaero, elektrolyytin sähkönjohtavuus sekä ympäristöolosuhteet, kuten teollisuus-, kaupunki-, maaseutu- ja meri-ilmastot. (Antila ym., 2014, ss. 201–205)

Kuten kuvassa 11, metallit voidaan järjestää sähkökemialliseen galvaaniseen jännitesarjaan, jonka positiivisessa päässä vedyn jälkeen ovat jalot, huonosti reagoivat metallit ja ennen vetyä negatiivisessa päässä epäjalot, helposti reagoivat ja syöpyvät metallit. Kahden eri metallin välinen jännite-ero ja korroosion voimakkuus on sitä suurempi, mitä kauempana toisistaan ne sijaitsevat galvaanisessa sarjassa. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 271)

Kuva 11 Sähkökemiallinen jännitesarja (perustuu Antila ym., 2014, ss. 20, 180–181).

Epäjalot metallit															Jalot metallit						
Li	K	Ca	Na	Mg	Al	Mn	Zn	Cr	Fe	Cd	Co	Ni	Sn	Pb	H	Cu	Hg	Ag	Pd	Pt	Au

Hapettumis- ja reaktiokyky kasvaa

Hapettumis- ja reaktiokyky pienenee

Rautaa sisältävän teräksen pintaan muodostuva oksidikerros, ruoste, on koostumukseltaan huokoista ja sen tilavuus on terästä suurempi, joten ruoste lohkeaa helposti irti pinnasta ja rikkoo mahdollisen pinnoitteen (Antila ym., 2014, s. 213). Ilmastokorroosioteräs on seostettu kuparilla, nikkellillä ja fosforilla. Myös ilmastokorroosioteräksen pintaan muodostuu ruostekerros, mutta kerroksen paksuuden kasvaessa ruostuminen hidastuu ja oksidikerroksesta muodostuu suojaava, luja ja tiivis. Tämä perustuu siihen, että kuparin, nikkelin ja fosforin hapettumisen seurauksena teräksen pinta passivoituu, eli pintaan syntyy korroosiolta suojaava patinakerros (Antila ym., 2014, s. 208). Patina muodostaa suojaavan kerroksen ilman ja teräksen välille. Terästä suojaavan patinan muodostumiseksi pinnan on kastuttava ja kuivuttava toistuvasti. Pinnan ollessa jatkuvasti märkä tai kloridirasituksen alaisena ilmastokorroosioteräksen korroosio käyttäytyy samoin kuin tavallisen rakenneteräksen syövyttävä korroosio. (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 21)

Paikallisessa korroosiossa anodi- ja katodialueet pysyvät paikoillaan, jolloin vain anodialueet syöpyvät. Galvaaninen, piste- ja raerajarakorroosio ovat paikallisia korroosimuotoja.

Ruostumattomat teräkset ovat seostettu kromilla, jonka oksidit muodostavat korroosiolta suojaavan tiiviin passiivikalvon. Rikkoontunut kalvo hapettuu yleensä nopeasti uudelleen, mutta kloridirasituksen alaisena passiivikalvon muodostuminen saattaa estyä kokonaan. Pistekorrosio on tyypillistä rakenteissa, joissa passiivikalvo pääsee vahingoittumaan. Pistekorrosio aiheuttaa pieniä syviä kuoppia, jotka voivat jopa lävistää kappaleen. (Antila ym., 2014, s. 205; Kangaspuoskari ym., 2020, s. 275)

Galvaaninen korrosio muodostuu kahden eri jalousasteisen metallin välille. Epäjalompi metalli syöpyy ja syöpymisnopeus on sitä nopeampaa, mitä kauempana toisistaan metallit ovat galvaanisessa jännitesarjassa, ja mitä suurempi katodin pinta-ala on suhteessa anodin pinta-alaan. Tämä tulee huomioida erityisesti, jos kiinnikkeiden ja liitettävien kappaleiden materiaalit poikkeavat toisistaan. Kiinnikkeiden tulee olla aina samaa tai jalompaa materiaalia kiinnitettävään verrattuna ja eri jalousasteisen ruuvin kanta tulee erottaa rakenteesta esimerkiksi kumitiivisteellä. Standardissa SFS-EN 1993-1-3 + AC liitteessä B löytyy taulukko, jossa opastetaan kiinnikkeiden materiaalin valinnasta. (Teräsrakenneyhdistys Oy, 2015, ss. 2–4)

Teräsrakenne on koostumukseltaan kideäinen, kiteitä yhdistäviä pintoja kutsutaan raerajoiksi. Raerajoilla atomien järjestys on epäsäännöllistä ja sen vuoksi raerajat ovat alttiita korroosiolle. Epäsäännöllisyys aiheutuu epäpuhtauksista, jonkin ainesosan rikastumisesta tai korroosiolta suojaavan seosaineen pitoisuuden pienentymisestä raerajoilla.

Raerajakorroosiota esiintyy esimerkiksi lämpökäsittelyiden ja hitsauksen yhteydessä.

Kuumennus korkeassa lämpötilassa saattaa aiheuttaa ruostumattoman teräksen herkistymisen, jolloin ruostumattoman teräksen sisältämästä kromista osa reagoi raerajoilla kromikarbideiksi. Tällöin kromin määrä raerajalla vähenee, eikä tällä alueella synny passiivista suojakerrosta. (Antila ym., 2014, ss. 205–206)

Jännityskorroosiota esiintyy rakenteissa, joita kuormittaa korroosion lisäksi vetojännitys otollisissa olosuhteissa. Jännityskorroosio ei aiheuta näkyviä vaurioita, vaan rakenne murtuu yllättäen. Kaikki metallit ovat alttiita jännityskorroosiolle, mutta herkkyys eri olosuhteiden aiheuttamille rasituksille vaihtelee materiaalienkohtaisesti. Rakenneteräkselle jännityskorroosion muodostumisherkkyyttä lisää hiilen ja typen oksidit, lipeä sekä klorideja sisältävä ympäristö. (Laitinen, 2012, s. 2)

Standardin SFS-EN 1993-1-1 (2005, s. 29) mukaan korroosiosuojaus ei ole tarpeellista sisätiloissa, joissa suhteellinen ilmankosteus on enintään 80%. Rakenteita suunniteltaessa tulee kuitenkin huomioida, että korroosion vaikutus alkaa suhteellisen ilmankosteuden

ylittäessä 60% (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 573) ja mikroilmasto voi pienemmällä alueella olla merkittävästi syövyttävämpää ympäröiviin olosuhteisiin verrattuna.

(Teräsrakenneyhdistys Oy, 2015, s. 5)

Rakenteiden suunnittelun lähtökohta korroosio huomioiden on se, että rakenteen pinnalle muodostunut kosteus pääsee poistumaan ja epäpuhtauksien kertyminen estetään.

Likakerros mahdollistaa korroosiolle suotuisat kosteat ja happipitoisuudeltaan eroavat olosuhteet. Kapeita onkaloita ja rakoja tulee välttää ja epäjatkuvia tai pistehitsejä tulisi käyttää ainoastaan silloin, kun korroosion vaaraa ei esiinny. Korroosion kannalta yksinkertaiset muodot sekä rakenteet, joissa on mahdollisimman vähän epäsäännöllisyyksiä, nurkkia ja limityksiä ovat parhaita. Jäykisteet tulisi suunnitella poispäin viettäviksi, käyttää sileää pinnanlaatua sekä ne tulisi hitsata ympäriinsä rakojen muodostumisen estämiseksi. Erilaiset materiaalit eristetään toisistaan tiivisteiden tai pinnoitteen avulla. Ruuviliitoksessa ruuvien kanta ja mutteri eristetään liitettävästä kappaleesta eristelevyllä tai -tiivisteellä ja ruuvien varsi liitettävän kappaleen poikkipinnasta eristeholkin avulla. Eristelevyn sijaan metallit voidaan eristää toisistaan myös maalamalla. Tällöin molemmat pinnat tulee maalata kahteen kertaan. Jos molempia pintoja ei voida maalata, ainakin jalompi pinta on maalattava.

(Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 276–280; Teräsrakenneyhdistys Oy, 2015, s. 2)

Pinnoituksella estetään kosteuden tai hapen kontakti teräkseen tai estetään eri metallien välinen kontakti. Pinnoitteena voi toimia maali tai toinen metalli. Rakennustekniikassa on yleisempää pinnoittaa kiinnike liitettävää kappaletta epäjalommalla metallilla, joka passivoituu hapettumisen seurauksena. Tyypillisinä metallipinnoitteina käytetään sinkkiä tai alumiinia. Nämä metallit toimivat ns. uhrimetalleina. Pinnoitteen naarmuuntuessa pinnoite suojaa terästä sähkökemiallisesti pinta-alaan perustuen; paljastuneen teräksen pinta-ala pinnoitettuun pinta-alaan suhteutettuna on merkittävästi pienempi, joten pinnoite korrodoituu teräksen sijaan. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 276 Teräsrakenneyhdistys Oy, 2015, s. 2)

Korroosionestomaalausta voidaan käyttää niin sinkitylle kuin suoraan pinnoittamattomalle teräspinnalle. Teräksen pinta esikäsitellään, jolloin pinnasta poistetaan lika, öljy, rasva, suolat, valssaushilse, ruoste ja mahdolliset aiemmat hilseilevät pinnoitekerrokset.

Maalattavien pintojen esikäsitteilyluokka ilmoitetaan standardin SFS-EN ISO 12944-4 mukaisilla esikäsitteilyasteilla. Maaliyhdistelmä valitaan korroosio-olosuhteiden ja maalipinnoitteelta vaaditun kestävyysajan mukaan. Maalaustyö tehdään joko konepajalla tai rakennuspaikalla maalausmenetelmästä ja olosuhteista riippuen. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 277–278; ks. myös SFS-EN ISO 12944-4:2017, ss. 10–17)

4 Liitosten kustannusten optimointi

Liitossuunnittelussa kestävyys lisäksi on tärkeää huomioida myös ei-rakenteelliset seikat, kuten ulkonäkö, huollettavuus sekä erityisesti kuljetuksesta, valmistuksesta ja asennuksesta aiheutuvat kustannukset. J. W. B. Starkin kirjoittaman *Steel design 3 Connections* mukaan voidaan karkeasti arvioida, että teräsrakenteisen toimistorakennuksen kustannuksista 55% on materiaalikustannuksia ja 45% työkustannuksia. Työkustannusten osuudesta n. 44% koostuu valmistuksesta, hieman yli 20% asennuksesta ja loput korroosio- ja palosuojauksesta (luku 1 s. 18). Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 3 - oppikirjan mukaan teräsrakenteiden valmistuskustannuksista jopa lähes 100% voi koostua liitosten valmistuskustannuksista (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 148). Näiden osuuksien perusteella voidaan päätellä, että liitosten osuus kokonaiskustannuksista voi olla noin viidenneksen verran.

Liitosten tai valmistuskustannusten tarkan osuuden selvittäminen kokonaiskustannuksista on todella monimutkaista. Aiemmin viitattiin valmistuskustannusten voivan muodostaa teollisuusrakennuksen teräsrakenteesta noin viidenneksen. Tämä on kuitenkin todella karkea yleistys. Ei myöskään voida suoraan tehdä johtopäätöstä, että liitosten kustannusten suuri osuus kokonaiskustannuksista tarkoittaisi huonosti suunniteltuja liitoksia.

Opinnäytetyön alussa kerrotaan teollisuusrakennusten yleisistä rakenneratkaisuista sekä jäykistystavoista, jotka määrittelevät jäykistävien rakenteiden liitosten toimintatavan, ja siten suurelta osin myös teräsrakenteen kokonaiskustannukset. Rakenteiden mekaniikka - lehdessä julkaistussa Jaakko Haapion ja Markku Heinisuo tutkimuksessa verrattiin kehärakenteen pilaria ja palkkia yhdistävän päätylevyllä toteutetun nivelellisen, jäykän sekä osittain jäykän liitoksen sekä palkin kustannuksia. Tutkimuksen liitoksia vastaa tämän opinnäytetyön esimerkkiliitokset kuvissa 27 ja 29. Kustannustehokkaimmaksi ratkaisuksi osoittautui osittain jäykkä liitos, jossa yhdistyy nivelellisen ja jäykän liitokset edut. Jäykkään liitokseen verrattuna liitoksen valmistuskustannukset ovat pienemmät ja momenttirasitusta siirtyy pilarille vähemmän. Koska osittain jäykkä liitos siirtää momenttia vain tietyn verran, palkilla voidaan käyttää pienempää profiilia kuin nivelellistä liitosta käytettäessä. (Haapio & Heinisuo, 2010, ss. 1–11) Materiaalikustannuksissa säästäminen onkin tärkeää, kun muistetaan niiden muodostavan 40-50% kokonaiskustannuksista (Stark, J. W. B., 2023, luku 1 s. 18). Materiaalikustannusten pienentyessä liitosten kustannusten osuus kasvaa suhteessa kokonaiskustannuksiin. Optimaalisinta liitosta valittaessa on myös huomioitava liitostyyppin kuormansiirron vaikutus pilarin ja perustuksien kokoon sekä näistä aiheutuvat kustannukset.

Haapion ja Heinisuo tutkimuksessa verrattiin myös palkin ja liitoksen yksikkökustannuksia €/kg, kuten taulukosta 2 voidaan nähdä. Kaikkien liitosratkaisujen kustannukset jäivät välille 1,75–1,98 €/kg. Yksikkökustannuksia tarkastellessa osittain jäykkää liitosta käytettäessä yksikkökustannukset olivat suurimmat.

Kokonaiskustannuksissa erot olivatkin merkittävämmät yksikkökustannuksiin verrattuna. Kustannustehokkaimmaksi liitokseksi todettiin aiemmin mainittu osittain jäykkä liitos, vaikka yksikkökustannukset sillä olivatkin suurimmat. Osittain jäykän liitoksen ja palkin kustannusten vertailuarvoksi oli valittu 100%. Jäykän pilari-palkkiliitoksen kustannukset osittain jäykkään liitokseen verrattuna olivat 116% ja nivelellisen liitoksen ja palkin kustannukset 142%. Jos näissä tapauksissa puhtaasti liitosten kustannuksia verrattaisiin kokonaiskustannuksiin, muodostaisi nivelellisen liitoksen kustannukset pienimmän prosenttiosuuden kokonaiskustannuksista, koska tässä vaihtoehdossa palkki tarvitsee suurimman profiilin suurimman momenttirasituksen vuoksi. Tutkimus toimii havainnollistavana esimerkkinä sille, miksi liitoskustannusten vertaaminen valmistuskustannuksiin on paljon yksinkertaisempaa kokonaiskustannuksiin vertaamisen sijaan ja kertoo myös liitosten kustannusvaikutuksista enemmän.

Taulukko 2 Valmistuskustannusten jakautuminen (Haapio & Heinisuo, 2010, s. 8)

		Semi-rigid IPE 220	Hinged IPE 300	Rigid IPE 240
Materiaalikustannukset	€/kg	1,5	1,5	1,5
Palkin materiaali	€	196,50	316,50	230,25
Puhalluspuhdistus	€	1,82	1,82	1,82
Sahaus	€	8,80	10,12	9,14
Kokoonpanon valmistus	€	19,73	8,92	22,66
Asentaminen	€	14,18	6,92	17,33
Jälkikäsitteily	€	0,22	0,31	0,24
Pinnoitus	€	18,38	25,00	20,19
Kokonaiskustannus	€	259,63	369,59	301,63
Kustannusero		100 %	142 %	116%
Yksikkökustannukset yhteensä	€/kg	1,98	1,75	1,97

Lisätietoja: Suomennettu.

Huomattavia säästöjä voidaan saada aikaan rajoittamalla erilaisia liitostyypppejä ja standardoimalla yleisimmät liitokset. Liitosten valmistaminen konepajalla on helpompaa ja siksi myös halvempaa. Kuljetus- ja työmaan nosto- ja asennusrajoitteet huomioiden rakenneosat kannattaa valmistaa konepajalla mahdollisimman suuriksi esivalmisteisiksi kokonaisuuksiksi. Konepajat eroavat toisistaan käytössä olevien työstömahdollisuuksien mukaan, joten konepajalle ominaiset kustannustehokkaat työtavat tulee myös ottaa huomioon. (Stark, J. W. B., 2023, luku 1 ss. 18–19)

Konepajalla työmenetelmät kannattaa valita niin, että ne vaativat mahdollisimman vähän ihmisen tekemää työtä. Leikkaaminen ja rei'ittäminen voidaan tehdä suurelta osin koneellisesti ja automatisoidusti, hitsaaminen vaatii ainakin jonkin verran käsin tehtävää työtä. Hitsisaumoissa kannattaa suosia pienahitsiä, koska se ei vaadi teräsosien reunojen viistämistä tai muuta esikäsitteilyä. Lisäkustannuksia aiheuttaa myös maalattavien rakenneosien maalamattomat pinnat, joita tarvitaan esimerkiksi hitsi- ja kitkaliitoksia varten. Länsimaissa työ on kallista ja materiaali halpaa. Levyissä kannattaa suosia yleisiä kaupallisia mittoja, sekä mahdollisuuksien mukaan vain muutamia paksuuksia. Työkustannuksia pienennetään esimerkiksi mittojen, geometrian, osien koon ja muotojen sekä ruuvien kokojen ja niiden sijoittamisen toistuvuudella. Vaikka tuloksena olisi raskaampi ja suuremman materiaalmäärän vaativa komponentti, monimutkaisten ja työtä vaativien toimintojen vähentämisellä kokonaiskustannukset saadaan pysymään pienempinä. (Stark, J. W. B., 2023, luku 1 ss. 18–19; Kangaspuoskari ym., 2020, s. 307)

Valmistuskustannukset riippuvat suuresti liitostyypeistä. Kustannusten pienentämiseksi on suotavaa suunnitella rakenne mahdollisimman vähin liitoksin niin, että liitosten osat ovat mahdollisimman yksinkertaiset valmistaa konepajalla sekä asentaa työmaalla. Hitsiliitokset on pyrittävä tekemään konepajalla ja työmaalla kiinnittämään rakenneosat ruuviliitoksin.

Työmaalla hitsaaminen on kallista, koska osat joudutaan kohdistamaan ja pitämään paikoillaan väliaikaisesti. Hitsausliitoksen työstäminen saattaa myös vaatia ylimääräisiä asennusaikaisia ruuvikiinnityksiä. Työasennot ja hitsaussuunnat ovat työmaalla hankalia, koska rakenneosia ei voi kääntää. Tämä altistaa myös hitsausvirheille. Hitsaustyölle pitää järjestää turvalliset työtilat ja -olosuhteet. Sääolosuhteet hankaloittavat tai jopa estävät hitsaamisen ja työn suorittamiseksi vaaditaan vähintään sääsuoja. Edellä mainittujen seikkojen lisäksi lisäkustannuksia aiheutuu tarkastuksista, korjauksista sekä hitsien pintakäsittelyistä. Hitsaaminen voi myös olla työmaalla kokonaan kiellettyä. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 316)

Suunnittelussa tulee huomioida myös kuumavalssattujen rakenteiden valmistustoleranssit ja niiden vaikutus. Esimerkiksi jos jäykisteet suunnitellaan täyttämään koko laippojen väli, valmistuskustannukset ovat suuremman tarkkuuden vuoksi korkeammat. Mikäli kestävyys sen sallii, on kannattavampaa suunnitella liitos osittaisilla jäykisteillä.

5 Teräsrakenteiden liitosten toimintaperiaatteet

Tämän pääluvun alla esitellään opinnäytetyöhön valittujen teräsrakenteiden pääliitokset sekä niiden toimintaperiaatteet. Liitettävät pilarit ja palkit ovat putki- sekä avoprofiileita ja ristikot putkiprofiileita.

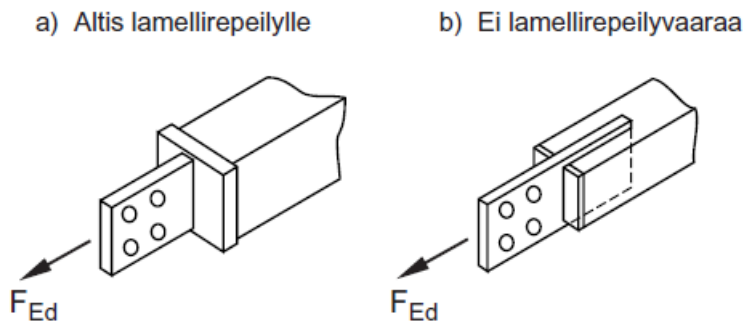
Liitosten toteutuksen perusperiaatteena pidetään sitä, että hitsaukset suoritetaan konepajalla ja asennus työmaalla pulttikiinnityksin.

5.1 Sideliitos

Teräsrunko jäykistetään usein pituussuunnassa siteiden tai diagonaalisauvojen muodostamilla ristikkorakenteilla. Diagonaalisauvan liitos pilariin on esitetty kuvassa 13. Jäykistävissä siderakenteissa käytetään usein putkiprofiileja.

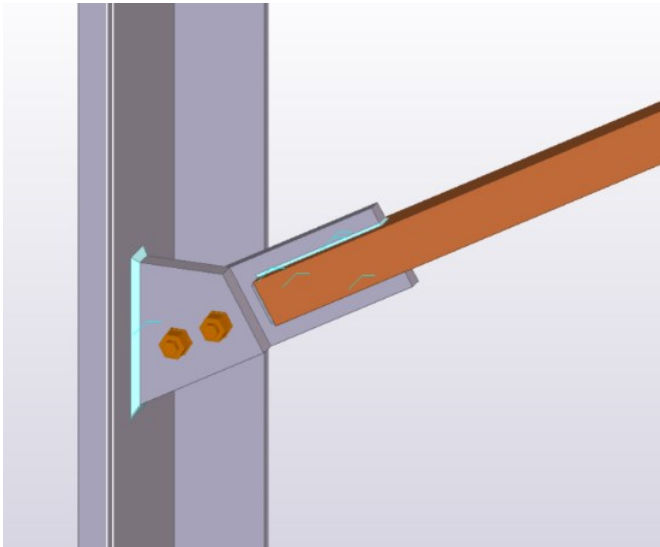
Rakenneputkien ruuviliitokset toteutetaan rakenneputkeen liitetyn osan avulla, koska rakenneputkien seinämät eivät kestä suurta kuormaa (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 478). Raskaasti kuormitetuissa liitoksissa ja pienissä rakenneputkissa putkiprofiilin lovettuun päähän hitsataan liitoslevy, joka kiinnitetään ruuvein pilariin tai palkkiin hitsattuun liitoslevyn vastakappaleeseen. Kevyesti kuormitetussa liitoksessa on edullisempaa leikata liitoslevy putken sijaan. Putkiprofiilin päähän voidaan myös hitsata päätylevy, johon liitoslevy kiinnitetään hitsaamalla. Tällöin tulee huomioida päätylevyn alttius lamellirepeilylle, koska kohtisuora veto kohdistuu päätylevyn pintaan. (Ongelin & Valkonen, 2010, ss. 471–472 & 476) Lamellirepeilyn huomioiminen erilaisissa putkiprofiilin päätyleiitoksissa on esitetty kuvassa 12.

Kuva 12 Lamellirepeilyn vaara vedetyssä liitoksessa (Ongelin & Valkonen, 2010, s. 472).



Kuvassa 13 on esimerkki seinän jäykistysiteen liitoksesta. Liitos mitoitetaan siderakenteen normaalivoimalle, joten liitos suunnitellaan nivelelliseksi. Jotta liitokselle ei aiheudu poikkisuuntaista rasitusta, tulee siderakenteen sijaita sisempänä kattorakenteita kannattelevista rakenteista (Teräsrakenneyhdistys, 2023). Liitoslevyt tulee suunnitella mahdollisimman lyhyiksi, jottei levyn nurjahdus mitoita liitosta. Leikkausvoiman rasittamassa ruuviliitoksessa liitetyn sauvan ruuvin vartta kohtisuorassa vaikuttava normaalivoima siirtyy ruuvin varren leikkausjännityksen sekä liitoslevyjen ja ruuvin varren välisen reunapuristuksen välityksellä. Yksileikkeisessä liitoksessa tulee huomioida, että epäsymmetrisen liitoksen epäkeskeisyys aiheuttaa reunapuristuksen epätasaisen jakautumisen ruuvin varressa. Jos pilarina toimii putkiprofiili, on liitoslevyn kiinnityksessä huomioitava putken pinnan kestävyys. Ruuvit ja hitsit on molemmat mitoitettava erikseen koko leikkausvoiman mitoitusarvolle, koska näiden jäykkyyden eroavat toisistaan. (Kangaspuoskari ym., 2020, s. 21, ss. 164–165)

Kuva 13 Vinositeen sideliitos pilariin.



5.2 Palkki-palkki liitokset

Palkkijatkoksia käytetään pitkissä palkkirakenteissa, kuten jatkuvissa palkeissa, nosturiradoissa ja kattokannattajissa. Rakenneosien pituutta rajoittaa varastoinnin ja kuljettamisen enimmäispituus sekä palkin kiepahdusvakavuus nostotilanteessa.

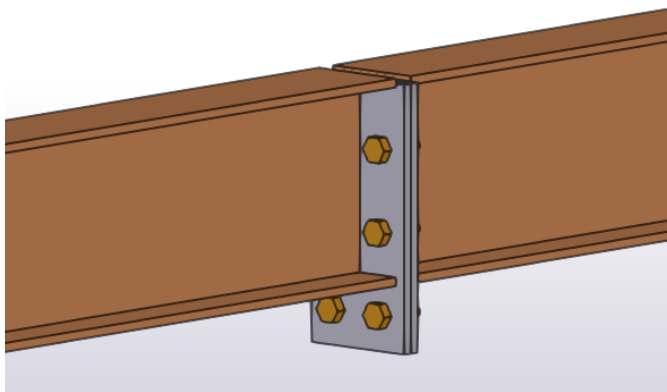
Jatkoksen sijaintia suunniteltaessa on huomioitava asennettavuus ja mahdollisuuksien mukaan sijoitettava jatkos vähiten rasitettuun kohtaan, mikä pienentää liitoksen kustannuksia. (RIL 167-2, 1992, s. 177)

5.2.1 Momenttijäykkä jatkos

Palkkijatkoksen tulee usein kyetä siirtää momenttia jatkettavien rakenneosien välillä. Kustannusten pienentämiseksi jatkos voidaan mitoittaa kestäämään taivutusta vähemmän kuin palkki, mutta enemmän kuin jatkoskohdassa laskettu momentti. Varmalle puolelle mitoittaessa jatkos mitoitetaan vähintään yhtä vahvaksi palkkiprofiilien kanssa. (RIL 167-2, 1992, s. 177)

Kuvassa 14 on esitetty palkin momenttijäykkä jatkosliitos. Konepajalla tehtävät jatkokset tehdään aina hitsattuina. Hitsattu jatkos on mahdollista tehdä myös työmaalla asennusjatkoksena, mutta se on työlästä ja kallista, joten asennusaikaiset jatkokset tehdään usein ruuvikiinnitteisenä jatkoksena tai ruuvikiinnitteisenä ja hitsattuna jatkoksena. Ruuvikiinnitteinen päätylevyjatkos on nopea asentaa. Jos käytetään palkin laipan alapuolelle ulottuvia päätylevyjä ja alimmat ruuvit sijoitetaan palkin alalaipan molemmin puolin, jatkokselle saadaan yhtä suuri taivutuskestävyys kuin palkilla. Harjajatkoksessa ja erikorkuisten palkkien jatkoksissa käytetään pidennettyjä päätylevyjä. Mikäli jatkosliitos ei saa olla palkkikorkeutta suurempi, tulee huomioida jatkoksen heikompi taivutuskestävyys. (RIL 167-2, 1992, ss. 178–179)

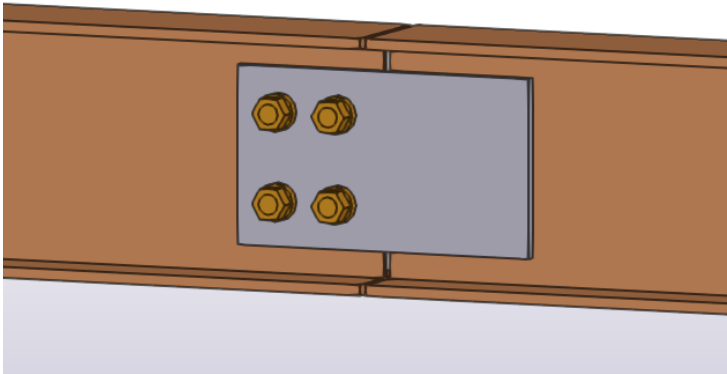
Kuva 14 Palkin jäykkä jatkos päätylevyillä toteutettuna.



5.2.2 Niveljatkokset

Nivelellisiä palkkijatkoksia, kuva 15, käytetään erityisesti sekundäärikannatteisissa katto- ja seinäorsissa. Mikäli jatkuva palkki suunnitellaan niveljatkoksella, jatkoskohta sijoitetaan lähelle momentin nollakohtaa. Liitoslevy voidaan kiinnittää molempien palkkien uumiin ruuvikiinnityksellä. Mikäli liitoksen liitoslevy hitsataan toisen palkin palkin uumaan, tulee ruuvit ja hitsit mitoittaa erikseen mitoittavalle leikkausvoimalle. Kun liitoksessa käytetään soikeita ruuvinreikiä, valmistuksessa ja asennuksessa sallittavat toleranssit ovat suuremmat. Liitoksesta saadaan jäykkä yhdistämällä palkkien ylä- ja alalaipat liitoslevyillä. (Teräsrakenneyhdistys, 2023; ks. myös RIL 167-2, 1992, s. 181)

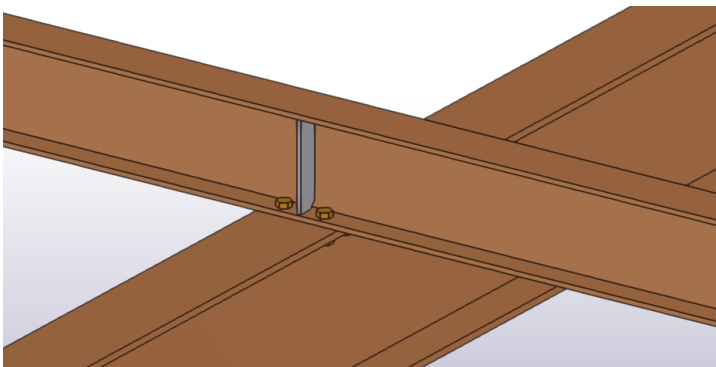
Kuva 15 Palkin levyliitosjatkos ruuvi- ja hitsikiinnityksellä.



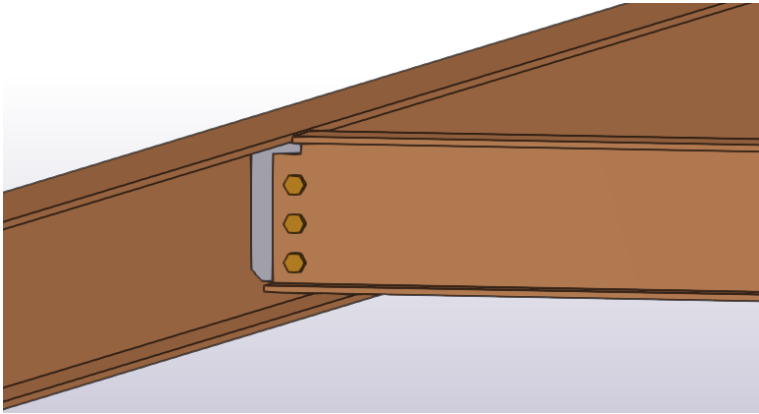
5.2.3 Risteävien palkkien liitokset

Sekundääripalkki on yksinkertaisinta ja kustannustehokkainta asentaa primääripalkkien päälle, kuten kuvassa 16. Kattorakenteiden orsikannattajat ovat yleensä kokonaan tai osittain jatkuvia palkkeja, jotka kiinnitetään laipoistaan alapuolisiin kattokannattajiin. Mikäli palkkirakenteen korkeus ei saa ylittää primääripalkin korkeutta, kiinnitetään sekundääripalkki niiden uumaan, kuten kuvassa 17 tai risteävien palkkien osalta kuvassa 18. Tällaisia rakenneratkaisuja voidaan käyttää myös aukotuksien tukemisessa. (Kinnunen ym., 2001, s. 139)

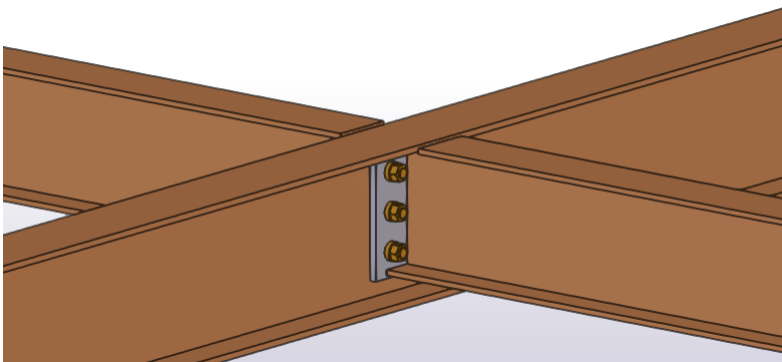
Kuva 16 Yksinkertainen risteävien palkkien liitos.



Kuva 17 Palkki-palkki nivelellinen liitos.

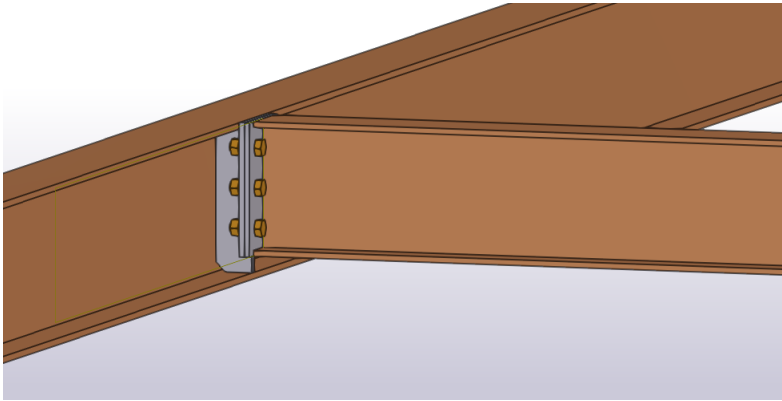


Kuva 18 Risteävien palkkien tasakorkea liitos.



Väännön huomioiminen on tärkeää erityisesti avoimia profiileita käytettäessä niiden herkän kiepahdustaipumuksen vuoksi. Sekundääripalkin ylä- tai alalaippoja joudutaan usein leikkaamaan, mikäli palkit ovat tasakorkeita tai palkkien yläpintojen tulee sijaita samassa korkeudessa. Palkin laippojen loveaminen sekä leikkauslevyliitoksen käyttö aiheuttaa yleensä sen, ettei palkin pään liitos ole vääntöjäykkä. Jäykkä liitos tasakorkeiden palkkien välillä voidaan toteuttaa niin, että primääripalkin uumaan hitsataan täyte- ja päätylevy, johon sekundääripalkki ruuvataan päätylevystään, kuten kuvassa 19. (RIL 167-2, 1992, s. 183; Stark, 2023, luku 1 s. 6)

Kuva 19 Palkkien välinen jäykkä liitos.

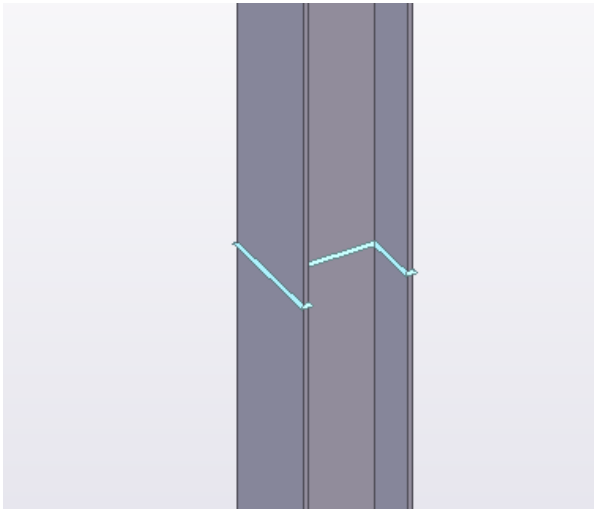


5.3 Pilarijatkokset

Pilarijatkoksia tarvitaan korkeissa rakennuksissa, jolloin jatketarve johtuu kuljetuksen maksimipituudesta, nostorajoituksista tai asennustilanteen vaatimuksista. Turvallisinta on valita jatkospaikka siten, ettei se sijaitse maksimimomentin kohdalla ja asennukselle jää tarpeeksi tilaa. Jatkos on suositeltava mitoittaa tasalujaksi yläpuolisen pilarin profiilin kanssa. Mikäli jatkos mitoitetaan pilaria pienemmälle normaalivoimalle, on huomioitava, että heikomman jäykkyytensä vuoksi tämä pienentää myös pilarin puristus- sekä nurjahduskestävyyttä. (RIL 167-2, 1992, s. 58)

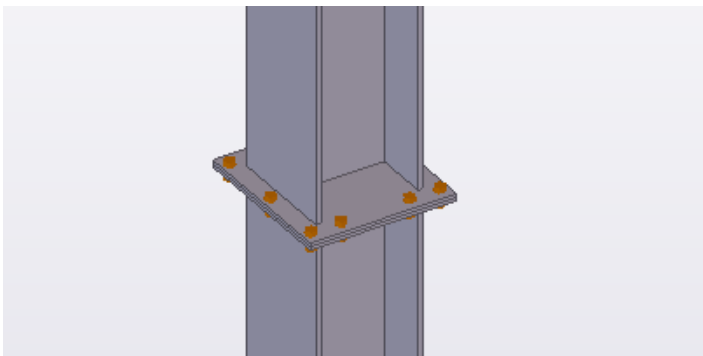
Pilarijatkos voidaan toteuttaa hitsaamalla käyttäen apuna päätylevyjä, kulmarautoja tai liitoslevyjä. Jatkos voidaan kiinnittää hitsauksen ajaksi ruuviliitoksella tai/ja käyttää ohjauslevyjä jatkettun pilarin suoruuden varmistamiseksi. Mikäli jatkettavan pilarin poikkileikkauksen geometria muuttuu jatkoksessa, on huomioitava päätylevyyn kohdistuva momentti, joka voidaan tarvittaessa ottaa vastaan päätylevyn alapuolisilla jäykisteillä. Yksinkertaisin pilarin hitsattu jatkosliitos on esitetty kuvassa 20.

Kuva 20 Hitsattu pilarijatkos.



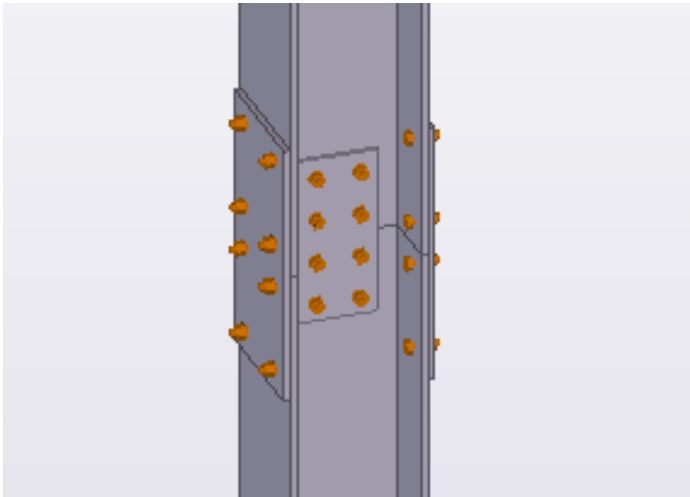
Päätylevyillä ruuvein kiinnitettyä pilarijatkosta, kuva 21, käsitellään jäykkänä tai osittain jäykkänä liitoksena. Pilarin suoruus tulee varmistaa konepajalla tehtävässä koekasaamisessa, jolloin pilarin päätylevy hitsataan valvotuissa olosuhteissa pilari suoraksi linjattuna. Pilarin kulmamuutos jatkoksessa aiheuttaa merkittävän siirtymän pilarin yläpäähän ja heikentää olennaisesti pilarin nurjahduskestävyyttä. Jos liitos suunnitellaan täydelle kosketuspaineelle, tulee päätylevyt mitoittaa kestämään neljänneksen pilarin maksimi puristusvoimasta. Pohjalevyjen kitkaa ei huomioida leikkausvoiman välityksessä, ainoastaan liitoksen ruuvit siirtävät veto- ja leikkausvoimaa. (RIL 167-2, 1992, s. 59; Teräsrakenneyhdistys, 2023)

Kuva 21 Pilarijatkos päätylevyillä ruuvikiinnityksenä.



Kuvassa 22 nähdään liitoslevyillä toteutettu pilarin jäykkä tai osittain jäykkä jatkosliitos. Uumalevyn ruuvit mitoitetaan uuman suuntaisen leikkausvoiman sekä ruuviryhmän keskiön ja pilarin pään välisen etäisyyden aiheuttamalle momentille. Laippalevyjen ruuvit mitoitetaan laippojen suuntaisen leikkausvoiman sekä ruuviryhmän keskiön ja pilarin pään välisen etäisyyden aiheuttamalle momentille. Puristava normaalivoima on suositeltavaa mitoittaa täyden kosketuspaineen kautta pilarilta toiselle. Pilarien päät tulee tarvittaessa työstää suoraksi eikä pilarien väliin saa jäädä asennettaessa rakoa. (Teräsrakenneyhdistys, 2023)

Kuva 22 Pilarin kylkilevyjatkos.



5.4 Palkki-pilariliitokset

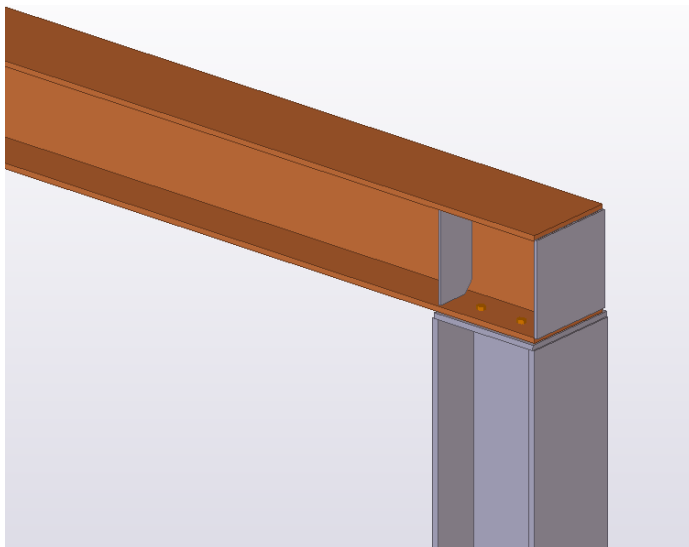
Palkki-pilariliitokset ovat yksinkertaisimmillaan pilariväliin vapaasti tuetun palkin liitoksia. Pilarin ja sen päälle asennetun palkin nivelliitos ei siirrä mainittavaa momenttikuormaa pilarille, eikä näin ollen vaadi suurempaa pilarin profiilia.

Jäykkä palkkipilariliitos voi toimia kehärakenteen jäykisteenä ja olla näin osa rakennuksen jäykistysjärjestelmää. (RIL 167-2, 1992, s. 189) Osittain jäykkä liitos kykenee siirtämään leikkausvoiman, mutta momenttia vain tietyn verran palkin taivutuskestävyyteen verrattuna.

5.4.1 Nivelellinen palkki-pilariliitos

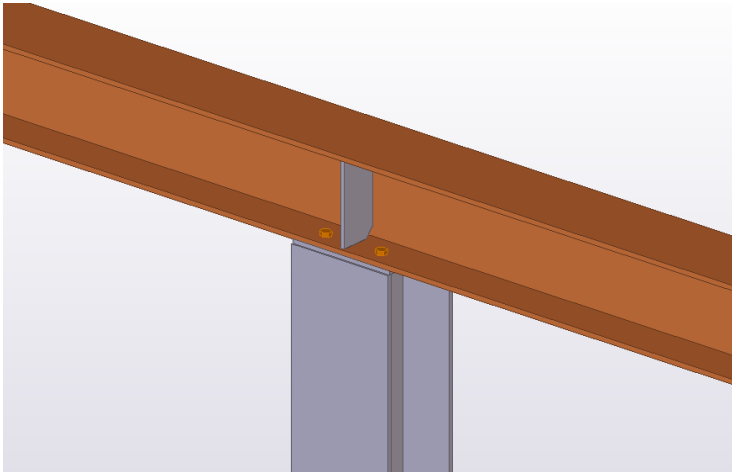
Yksinkertainen tapa liittää yläpohjan palkki pilariin, on asentaa palkki tukeutumaan pilarin päälle, kuten kuvassa 23. Palkki kiinnitetään ruuveilla pilarin päähän hitsattuun päätylevyyn. Kuumavalssattujen palkkiprofiilien uuma ei välttämättä vaadi päätylevyn lisäksi muuta jäykistystä. Hitsatut ohutuumaiset palkit saattavat päätyjäykisteen lisäksi vaatia uuman jäykisteen pilarin sisälaipan kohdalla, joka mitoitetetaan palkin tukireaktion voimalle. Pilarin päätylevyn paksuus tulee valita niin, että levy myötää taivutuksesta. Jos levy mitoitetetaan liian jäykäksi, liitoksen mitoittaa ruuvien vetomurtuma ja liitoksen murtumistapa on hauras. (Kinnunen ym., 2001, s. 132)

Kuva 23 Nivelellinen palkki-pilariliitos.



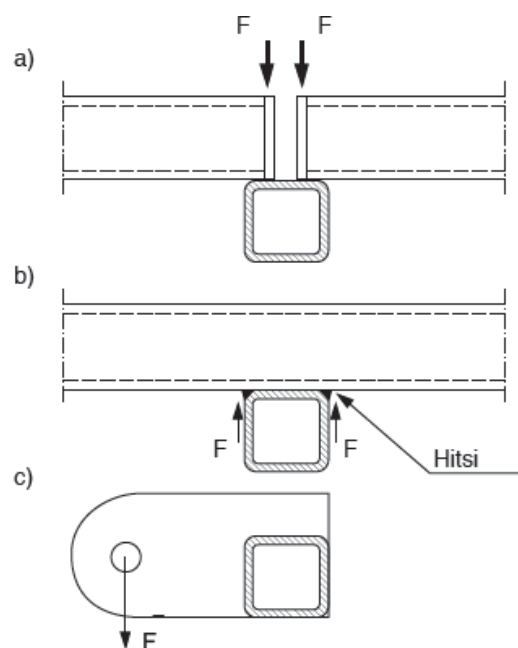
Kuvassa 24 nähdään jatkuvan palkin ja pilarin liitos. Käytettäessä jatkuvaa päätypalkkia, kenttämomentti jää pienemmäksi ja näin palkkina voidaan käyttää pienempää profiilia. Kun liitoskohdat suunnitellaan huolellisesti ja oikein, myös nivelelliset palkkijatkokset ovat mahdollisia. Päätypalkkia kuormittaa pystysuunnassa kattorakenteen tukireaktiot sekä erityisesti tuulen vaakakuorman aiheuttama normaalivoima. Jatkuvan I-palkin liitos tuelle voidaan toteuttaa ruuvikiinnityksellä pilarin päättyyn hitsattuun päätylevyyn. Palkki siirtää pystysuoran kuormituksen pilarille jäykisteiden kosketuspaineen avulla. (Stark, 2023, luku 1 s. 13)

Kuva 24 Jatkuva palkki tuella.



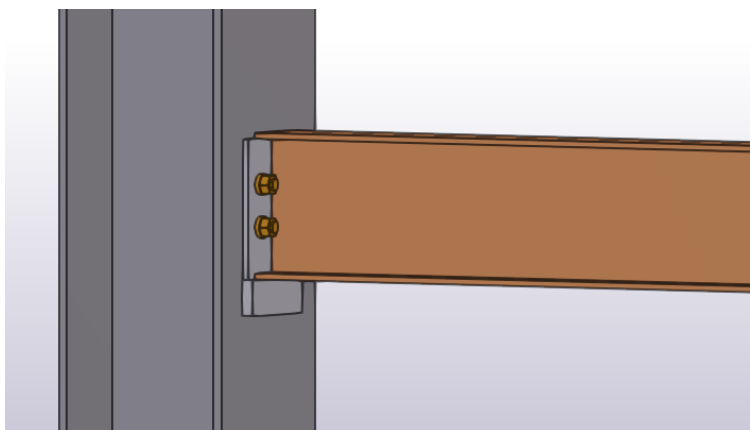
Mikäli päätypalkki toteutetaan putkiprofiilista, palkin pää on suositeltavaa jäykistää hitsatun päätylevyn avulla, jotta palkin tukireaktio siirtyy uumien kautta tuelle ilman profiilin poikkileikkauksen muodonmuutosta. Putkiprofiili kiinnitetään sen alapintaan sekä pilarin päähän hitsattujen teräslevyjen ruuviliitoksella. Myös välituella on lommahduksen vaara, ellei kulmanpyöristykseen ja suoran putken välistä rakoa täytetä hitsillä. Kuvassa 25 on havainnollistettu päätyjen vahvistus sekä putkiprofiilin vinouman estäminen. (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 416)

Kuva 25 Putkiprofiilin vinouman estäminen (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 416).



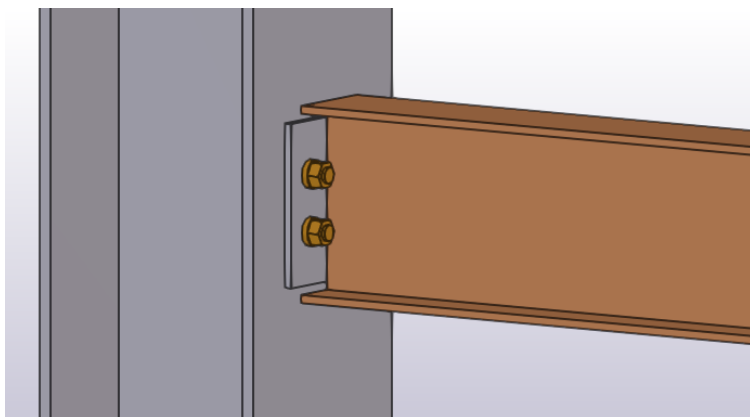
Välipohjapalkki voidaan liittää kannake- ja päätylevyn liitoksena, kuva 26, jolloin palkin pituudelle sallitaan suuremmat toleranssit, koska mittapoikkeamat on mahdollista korjata asennuslevyjen avulla. Mikäli kannakelevyn käyttö palkin alapuolella ei ole mahdollista, voidaan kannake vaihtoehtoisesti sijoittaa palkin uuman kohdalle, jolloin liitoksen tilantarve jää pienemmäksi. Tämä ratkaisu vaatii kannakkeen vastinosan hitsaamista palkin päätylevyyn, joka aiheuttaa suuremmat valmistuskustannukset verrattuna palkin alapuolelle sijoitettuun kannakkeeseen. Kannakepalallinen liitos helpottaa asennusta, koska palkkia ei tarvitse erikseen kannatella ruuviliitosta kiinnitettäessä.

Kuva 26 Pilarin ja palkin välinen kannakepalallinen päätylevyliitos.



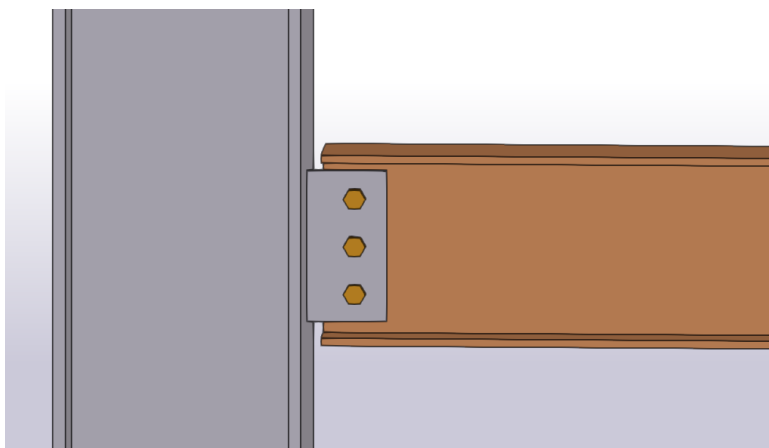
Kuvassa 27 esitetty nivelellinen päätylevyliitos on luja ja jäykkä. Sen valmistuskustannukset ovat kuitenkin suuret konepajalla tehtävän hitsaustyön takia. Päätylevyn vuoksi palkki vaatii kuljetuksessa enemmän tilaa ja asennustyö on hankalaa palkin tuennantarpeen vuoksi.

Kuva 27 Pilarin ja palkin päätylevyliitos.



Leikkauslevyliitos, kuva 28, sallii palkin pituudelle suuremmat toleranssit, jos leikkauslevyssä käytetään ylisuuria ruuvireikiä. Myös leikkauslevyllisen liitoksen asennus on helppoa. Liitos ei ole erityisen luja ja liitoslevyt saattavat vääristyä hitsatessa tai vahingoittua kuljetuksen aikana. Pilarit vaativat kuljetuksessa enemmän tilaa, koska pilareita ei voida pinota tiiviisti liitoslevyjen vuoksi. (Stark, 2023, luku 1 s. 11)

Kuva 28 Pilarin ja palkin välinen leikkauslevyliitos.

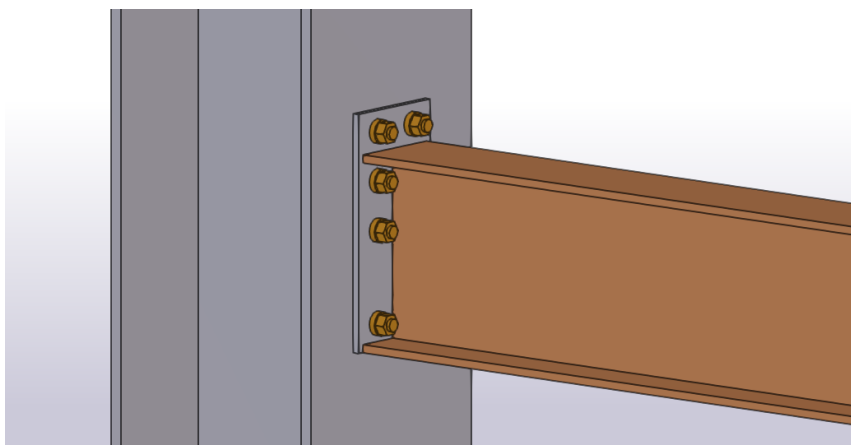


5.4.2 Palkki-pilari jäykkä liitos

Momenttijäykät liitokset toteutetaan usein palkin päähän hitsatun päätylevyn ja jäykisteiden avulla, kuten kuvassa 29. Jäykisteet voidaan sijoittaa pilarin uuman vaakasuuntaisesti palkin laippojen tasolle tai sen lisäksi myös vinottain estämään pilarin uuman paikallista lommahdusta, pilarin uumaan kanssa samansuuntaisesti lisäämään uuman leikkauskestävyyttä tai pilarin laippojen taakse estämään laippojen taivutuksesta johtuvan myötäämisen ja lisäämään lävistyskestävyyttä.

Momenttijäykässä liitoksessa palkin päätylevy on sen poikkileikkauksen korkeutta suurempi. Ylin tai ylimmät ruuvirivit sijoitetaan palkin ylälaippojen yläpuolelle, jolloin ruuvit estävät tai vähintään rajoittavat palkin pään kiertymää. Liitoksen kiertokeskiön yläpuolen ruuvit ottavat leikkausvoiman lisäksi vastaan vetoa sekä päätylevyn taivutuksesta aiheutuvia vipuvoimia ja palkin alalaippa sekä kiertokeskiön alapuolella sijaitsevat ruuvit leikkausta ja puristusta. Jos pilarin uumassa ei käytetä jäykisteitä, jää usein jäykän liitoksen vaatimukset täyttymättä ja liitos luokitellaan osittain jäykäksi. Palkin päätylevyn paksuudeksi on hyvä valita pilarin laippojen paksuus mitoittamisen yksinkertaistamiseksi. (Kinnunen ym., 2001, s. 134; Stark, 2023, luku 1 s. 6)

Kuva 29 Pilarin ja palkin välinen jäykkä päätylevyliitos.

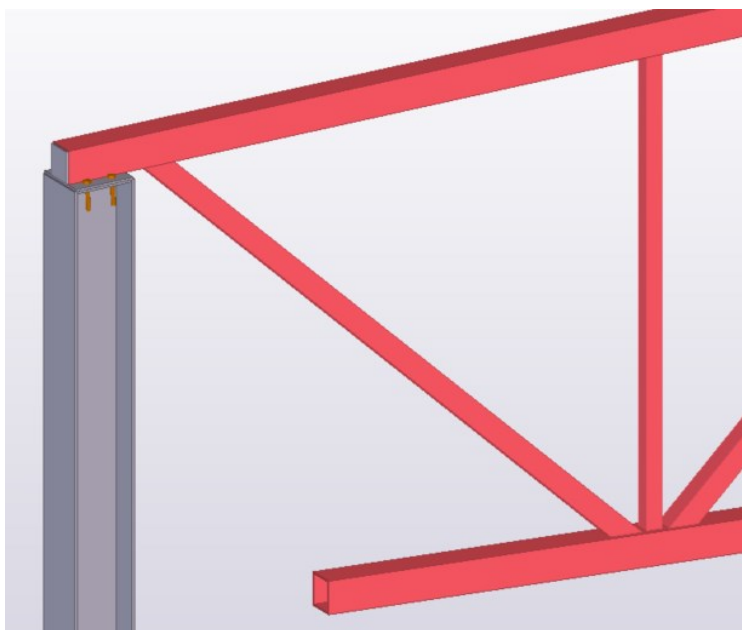


5.5 Kattoristikon nivelellinen liitos pilariin

Tasoristikko on palkkimainen rakenne, jossa uumasauvat yhdistävät ylä- ja alapuolen paarresauvat toisiinsa. Uumasauvat voivat olla diagonaali- ja tai vertikaalisauvoja. Ristikossa uumasauvat vastaanottavat vain ristikkoon kohdistuvan leikkausvoiman, joten uumasauvoihin kohdistuu ainoastaan normaalivoimaa. Paarresauvat ottavat vastaan ristikon taivutuksen, vedon ja puristuksen. Ristikoille kuormitukset siirretään sekundäärirakenteiden, kuten orsien tai profiilipellin kautta. Jos ristikkoa kuormitetaan ristikon solmupisteistä, paarteisiin ei kohdistu taivutusrasitusta. Mikäli kuorma kohdistuu paarteiden pituudelle, huomioidaan myös siihen kohdistuva taivutusmomentti ja paarre mitoitetetaan jatkuvana palkkina. (RIL 167-2, 1992, s. 63; Kinnunen ym., 2001, s. 85)

Kuvassa 30 on kattoristikon nivelellinen liitos pilariin. Kattoristikon tukireaktio siirtyy pilarille taivutusmomenttina, jos diagonaalisauvan, paarteiden ja pilarin painopisteakselit eivät sijaitse samassa leikkauspisteessä. Pieni epäkeskeisyys voidaan sallia, mikäli se edesauttaa liitoksen edullisemman valmistamisen. Paarteiden pää jäykistetään päätylevyllä, jotta rakenneosan pistekuormakestävyys saadaan riittäväksi. Liitoskohdassa paarre mitoitetetaan normaali- ja leikkausvoiman sekä taivutuksen yhteisvaikutukselle. (Ongelin & Valkonen, 2016, s. 434)

Kuva 30 Ristikon nivelellinen liitos pilariin.

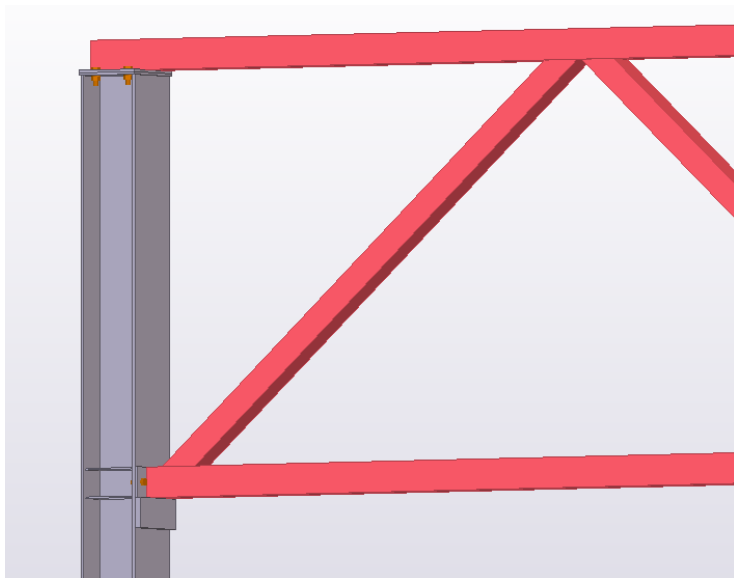


5.6 Kattoristikon jäykkänurkkainen liitos pilariin

Kuvassa 31 esitetään ristikon jäykän nurkkaliitoksen kiinnitys pilariin. Pilarin yläpäähän hitsattuun päätylevyyn kiinnitetään ruuvikiinnityksellä ristikon yläpaarteen pään alapintaan hitsattu liitoslevy. Paarteen pääty on vahvistettu hitsatulla tukkolevyllä. Alapaarteen päätyyn on hitsattu liitoslevy, joka kiinnitetään ruuvikiinnityksellä pilarin laippoihin. Alapaarre tukeutuu pilarin laippoihin hitsattuun konsolilevyyn, joka helpottaa asennusta. Alapaarteessa voidaan käyttää lisäksi asennuslevyjä.

Vaikka kummankin paarteen liitokset pilariin ovat nivelellisiä, kokonaisuutena niillä saadaan toteutettua ristikon osittain jäykkä, momenttia siirtävä liitos, joka mitoitetaan ristikon voimille. Pystykuormat tuodaan pilarille alapaarteen kautta konsolilevyn välityksellä. Alapaarteen ruuvikiinnitys ottaa vastaan alapaarteen normaalivoiman. Alapaarteen ja reunimmaisena uumasauvan epäkeskeisyyden aiheuttama momentti tulee huomioida pilarin ja alapaarteen liittyvissä osissa. Alapaarteen liitoksessa voidaan käyttää lisäksi asennuslevyjä asennustoleranssin lisäämiseksi. (Teräsrakenneyhdistys, 2023)

Kuva 31 Ristikon ja pilarin jäykkänurkkainen liitos.

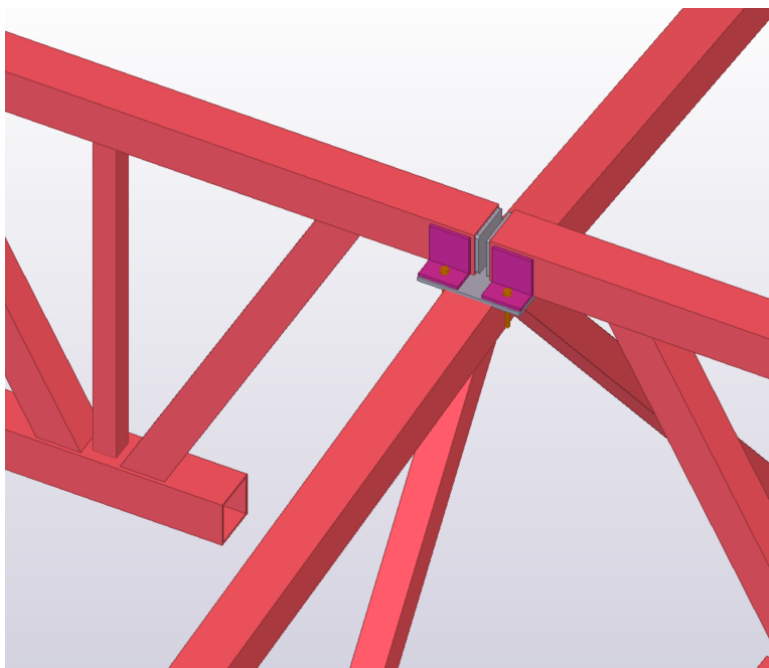


5.7 Primääri- ja sekundääriristikoiden liitos

Kuvassa 32 on primääri- ja sekundääriristikoiden nimellisesti nivelellinen liitos. Primääriristikon yläpaarteen päälle hitsataan liitoslevy, jonka varaan asennetaan sekundääriristikoiden yläpaarteet. Sekundääriristikoiden yläpaarteiden päiden molemmin puolin on konepajalla hitsatut kulmateräksset. Kulmateräksset ja liitoslevy kiinnitetään työmaalla ruuviliitoksella. Paarteiden päät suljetaan tukkolapuilla. Liitos mitoitetaan pystykuormalle sekä ristikoiden yläpaarteiden suuntaisille normaalivoimille. (Teräsrakenneyhdistys, 2023)

Mikäli paarteiden pistekuormakestävyys ei ole riittävä, hitsataan päihin paksummat päätylevyt. Paarteiden päätyjen kulmateräksset estävät putkiprofiilin vinouman ja lisäävät pistekuormakestävyyttä.

Kuva 32 Primääriristikon ja sen päälle asennettujen sekundääriristikoiden liitos.



5.8 Teräspilarin pulttiliitos perustuksiin

Teräspilarin puristuskestävyys $235\text{--}440\text{ N/mm}^2$ pinta-alayksikköä kohden on huomattavasti suurempi betoniin $30\text{--}80\text{ N/mm}^2$ puristuskestävyyteen verrattuna. Perustusliitoksessa teräspilarin jännitys tulee jakaa aluslevyn avulla niin laajalle alueelle, että betoni kykenee vastaanottamaan sen murtumatta. (RIL 167-2, 1992, s. 46)

Pilariliitos perustuksiin voidaan toteuttaa nivelellisenä tai jäykkänä liitoksena. Täysin nivelellinen liitos vaatii laakerin, jonka asennus on työmaalla hankalaa. Liitokset toteutetaankin useimmiten nimellisesti nivelellisinä, jolloin liitoksella on kuormitukseen nähden riittävä kulmanmuutoskyky, eikä liitos siksi siirrä merkittävää määrää momenttia. (RIL 167-2, 1992, s. 46) Nivelellinen liitos toteutetaan usein kahden pultin kiinnityksellä tai sijoittamalla pultit riittävän lähekkäin, jolloin toiminta perustuu paikalliseen myötäämiseen (Kinnunen ym., 2001, s. 122).

Jäykkä pilarin liitos perustuksiin on mahdollista tehdä peruspulttikiinnityksellä, tartuntalevyn avulla tai holkkikiinnityksellä perustusten sisään. Liitos, joka toteutetaan hitsaamalla pilari tartuntalevyyn, soveltuu vain pienille pilareille, jotka eivät ole kokoonsa nähden raskaasti kuormitettuja. (RIL 167-2, 1992, s. 46)

Peruspulttiliitoksessa, kuva 33, pilarin alapäähän hitsataan pohjalevy, joka kiinnitetään perustuksiin valettuihin pultteihin. Pilarissa vaikuttavat voimat siirtyvät pohjalevyn kautta perustuspulteille ja betoniin. Mikäli pilari asennetaan vapaasti seisovana eikä asennustilanteessa rakennetta tueta, tulee perustusliitoksessa käyttää vähintään neljää pulttia. Peruspulttiliitos antaa toleranssivaran pystysuunnassa peruspulttien kiristämisen sekä vaakasuunnassa pohjalevyn rei'ityksen välyksen avulla. Jos pohjalevyn välys on enemmän kuin 2 mm peruspultin halkaisijaa suurempi, mutterien alla tulee käyttää asennuksen jälkeen pohjalevyyn hitsattavia neliön muotoisia aluslevyjä. Jotta pulttien sijainti betonissa vastaisi mahdollisimman tarkkaan suunnitelmia, peruspultit voidaan hitsata konepajalla esimerkiksi kulmateräksiin ja asentaa esivalmisteisena pulttiryhmänä. (RIL 167-2, 1992, ss. 47–48; Kinnunen ym., 2001, s. 122)

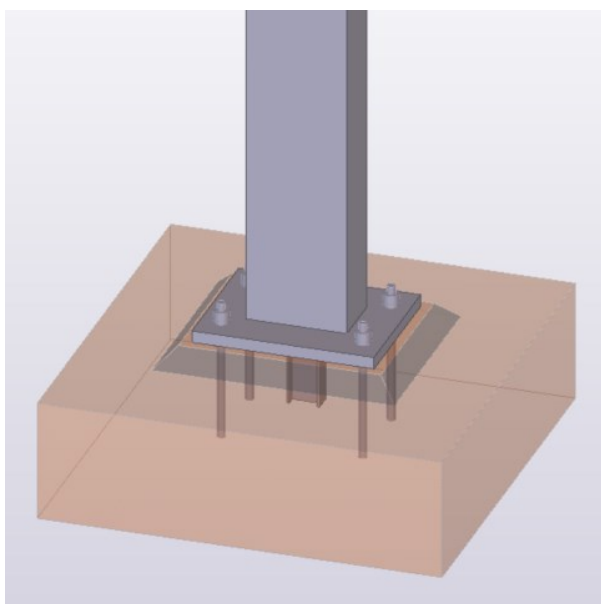
Vapaasti seisova pilari on asennustilanteessa täysin perustuksiin valettujen peruspulttien varassa. Pultit toimivat puristettuina ja taivutettuina sauvoina, joihin vaikuttaa pystykuorma sekä erityisesti tuulen vaakavoima. Pultit mitoitetaan epäkeskeiselle puristukselle, joka aiheutuu normaalivoiman ja taivutusmomentin yhteisvaikutuksesta sekä samanaikaisesti vaikuttavalle leikkausvoimalle. Normaalitilanteessa keskeinen puristus voidaan jakaa tasan

pohjalevyn kantavalle puristetulle pinta-alalle. Staattisen tasapainon tarkastelussa sekä epäkeskeisesti puristetun pilarin tapauksessa pulteille muodostuu vetoa. Jotta vetovoimat saadaan johdettua perustuksille, peruspultit ankkuroidaan betoniin. Jos vetovoimat ankkuroidaan tartuntaan perustuen, ankkurointipituus voi muodostua hyvin suureksi. Tätä voidaan rajoittaa taivutetuilla ankkurointiteräksillä tai hitsaamalla peruspultteihin erilaisia ankkurointikappaleita. (Kinnunen ym., 2001, ss. 125–126) Leikkausvoimat siirretään perustusruuvien tai kitkan avulla. Mikäli leikkausvoimat ovat erittäin suuria, pohjalevyyn voidaan hitsata erillinen leikkauspala, joka siirtää leikkausvoimat perustuksille. (Teräsrakenneyhdistys, 2023)

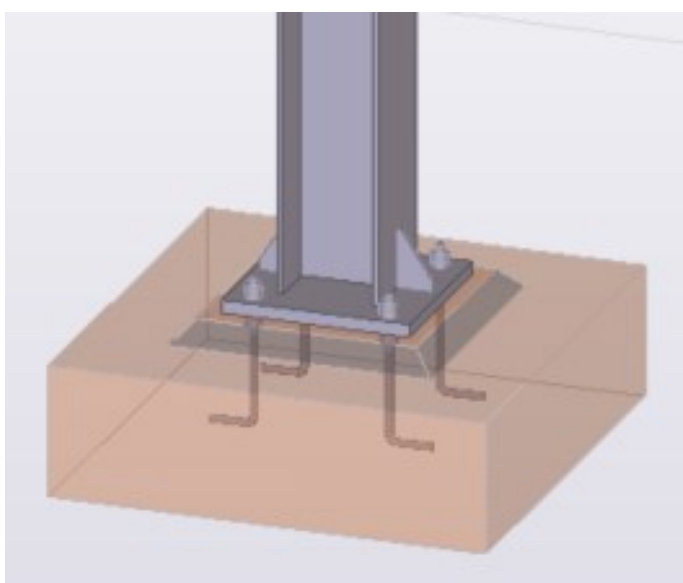
Pohjalevyn koko valitaan sellaiseksi, ettei sen alla olevan betonirakenteen puristuskestävyys ylitä ja pultin reikien reunaetäisyydet toteutuvat. Pohjalevy mitoitetaan taivutukselle ja vaadittu paksuus valitaan kimmo- tai plastisuusteorian mukaisen taivutusvastuksen mukaisesti. Mikäli pohjalevyn paksuus ylittäisi 60 mm, voidaan pohjalevy jakaa jäykisteiden avulla pienempiin kenttiin, kuten kuvassa 34, ja näin pienentää taivutusmomenttia. Pohjalevyn lamellirepeily on tarkistettava ja tarvittaessa käytettävä levyä, joka on tarkistettu paksuussuuntaisten virheiden varalta. Liitos kykenee vastamaanottamaan sille lasketun täyden kuormituksen, kun perustusrakenteen ja pilarin aluslevyn välinen jälkivalu on saavuttanut täyden lujuutensa. (Kinnunen ym., 2001, ss. 123–126)

Peruspulttiliitoksen toimiminen osittain jäykkänä tai jähkänä, eli riittävän kulmamuuutoskyvyn omaavan liitoksen kiertymisjäykkyys saadaan aikaiseksi peruspulttien sijainneilla, pohjalevyn paksuudella, liitoksen jäykistyksellä sekä teräsosien eri lujuuden valinnalla. Näiden komponenttien oikealla yhdistelmällä perustusliitos saadaan toteutettua myös pääsuuntaan jähkänä ja toiseen suuntaan nivelellisenä.

Kuva 33 Putkipilarin leikkauspalalla vahvistettu peruspulttiliitos.



Kuva 34 Avoprofiilipilarin vahvan suunnan lisävahvistettu jäykkä liitos.



6 Liittorakenteet

Liittorakenne muodostuu useammasta eri materiaalista, jotka kuormitettaessa toimivat yhdessä. Liittorakenteen yhteistoiminta varmistetaan mekaanisilla liittimillä tai tartuntaan perustuvalla liitoksella niin, etteivät rakenneosat pääse liukumaan toisiinsa nähden. Tässä

opinnäytetyössä keskitytään betoni-teräслиittorakenteisiin sekä erityisesti WQ-palkin ja liittoputkipilarin eräisiin yleisimpiin liitoksiin. Betoni-teräслиittorakenteessa yhdistyy betonin hyvä puristuslujuus ja jäykkyys sekä teräksen vetokestävyys. Näin aikaansaadaan hoikempia, kevyempiä ja kestävämpiä rakenneosia, joissa voidaan hyödyntää betonin ja teräset hyvät ominaisuudet asennus-, kuormitus- ja palotilanteessa. (Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry, 2012, s. 13, 57; RIL 167-2, 1992, s. 26)

Tässä opinnäytetyössä liittopilarilla tarkoitetaan putkiliittopilaria. Betonitäyteinen teräspuutkipilari onkin yksi yleisimmistä liittorakenteista. Putkiliittopilarissa teräskuoren sisällä oleva raudoitettu tai raudoittamaton betoni jäykistää pilarin rakennetta, jolloin pilarin stabiilius nurjahdusta vastaan kasvaa. Teräskuoren ansiosta liittopilarin asennus on yksinkertaista. Teräsputki toimii valumuottina, kestää mekaanista rasitusta sekä mahdollistaa pilarin hoikemman ja kevyemmän rakenteen. Betonointi antaa usein tarvittavan palonkestävyyden ilman erillistä palosuojauksia. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 7) Putkiliittopilareissa käytetään lähes poikkeuksetta betoniraudoitusta, koska muutoin palonkestävyyden vaatimukset eivät täyty. (Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry, 2012, s. 185).

WQ-palkki on hitsaamalla levyistä valmistettu matalarakenteinen, koteloprofiilinen leukapalkki. Hitsatun palkin materiaalimenekki on mahdollista optimoida seinämäpaksuuden ja profiilin ulkomittojen avulla vastaamaan vaadittua kestävyyttä. Palkin kotelo jätetään usein tyhjäksi, mutta erityisten vaatimusten vuoksi se voidaan myös täyttää betonilla. WQ-palkkeja käytetään usein yhdessä ontelo- tai umpilaattojen kanssa, jolloin laatat tukeutuvat palkin alalaippaan. Onteloelementtien rengasteräiset asennetaan usein kulkemaan WQ-palkkien läpi, jolloin valun yhteydessä laattakenttä ja kotelopalkki muodostavat liittorakenteen. Betoni suojaa palkkia palolta kolmelta sivulta. Jos palonkestävyydeltä vaaditaan enemmän kuin 30–60 minuuttia, alalaipat tulee palosuojata. Matalarakenteen lopullinen jäykkyys saavutetaan, kun saumavalut ja pintabetoni ovat saavuttaneet suunnitellun lujuutensa. Vaikka koteloprofiililla on suuri vääntöjäykkyys avoprofiileihin verrattuna, tulee asennusaikana huomioida tuennan tarve palkin päissä pitkittäissuuntaista vääntöä vastaan ja suosia laattojen symmetristä asennusta palkin kiertymisen estämiseksi. Matalapalkit ovat usein yksinkertaisesti tuettuja ja kehärungon jäykistys hoidetaan yleensä ristikoilla sekä jäykistystorneilla. (Kangaspuoskari ym., 2020, ss. 140–143; Aalto & Saarni, 1996, ss. 21–22)

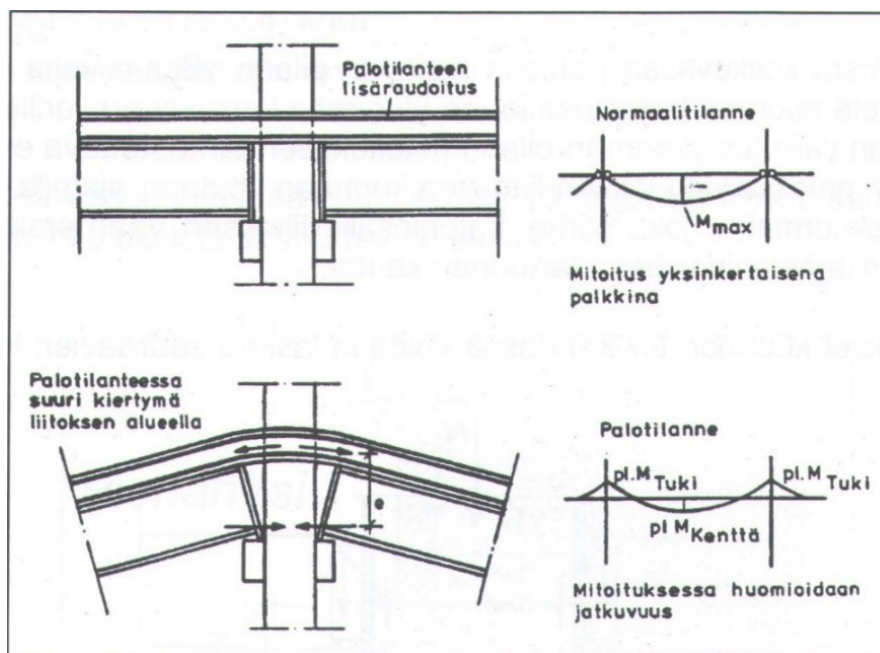
6.1 Liittorakenteiden liitosten toimintaperiaatteet

Betoni-teräs-liittorakenteiden suunnittelun yleisiä sääntöjä ja rakennuksia koskevia sääntöjä käsittelevän standardin SFS-EN 1994-1-1 +AC kohdan 8.3.1 mukaan liittorakenteisen palkki-pilariliitosten ja liittorakenteiden jatkosten suunnittelun perusteena voidaan käyttää teräsrakenteiden liitosten suunnittelun standardia SFS-EN 1993-1-8 lukua 6 H- tai I-profilien väliset liitokset (2005, ss. 64–109).

Sivusiirtymättömissä rakenteissa liittopilarien ja palkkien liitokset oletetaan nivelellisiksi. Liitosten mitoituksessa ei huomioida liitoksen jäykkyydestä aiheutuvia kiinnitysmomenteja, jolloin liitokset mitoitetaan palkin tukireaktion aiheuttamalle leikkausvoimalle. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 37)

Liitos tulee suunnitella niin, että rakenteen toimivuus taataan myös palotilanteessa, eli kuormituksen on siirryttävä liittopilarin toimivalle osalle teräskuoren menetettyä kantokykyä. Kuvassa 35 esitetään, kuinka oikeanlaisella liitossuunnittelulla välipohjapalkkien momenttikestävyyttä palotilanteessa voidaan parantaa. Palotilanteessa teräksen vetokestävyys heikkenee, josta seuraa palkin suurempi taipuma. Taipuma lisää palkin pään kiertymää, kunnes palkin pään alareuna tukeutuu pilariin. Vaikka palkin ja pilarin liitoksia käsitellään nivelellisinä, todellisuudessa ne ovat osittain jäykkiä. Jäykkyyden ansiosta palotilanteen taipuma aiheuttaa kiinnitysmomenteja, ja pilarin läpi kulkevan lattateräksen varmistamassa rakennetta, välipohjapalkkien jatkuvuus aktivoituu. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 37)

Kuva 35 Palkin käyttäytyminen palotilanteessa (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 37).

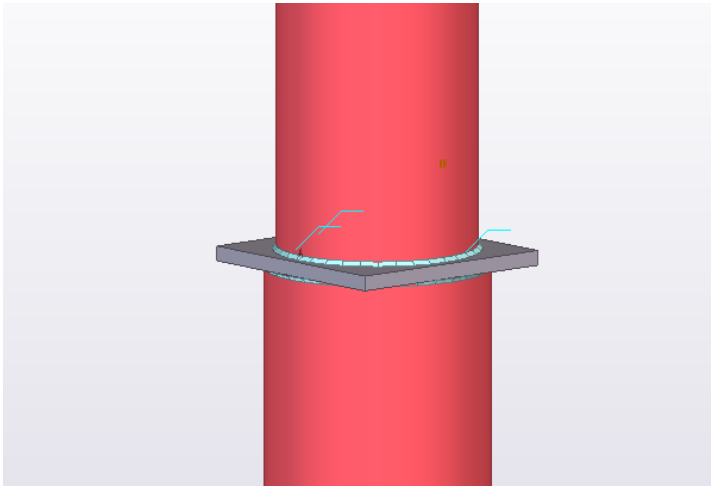


6.2 Liittopilarin jatkosliitokset

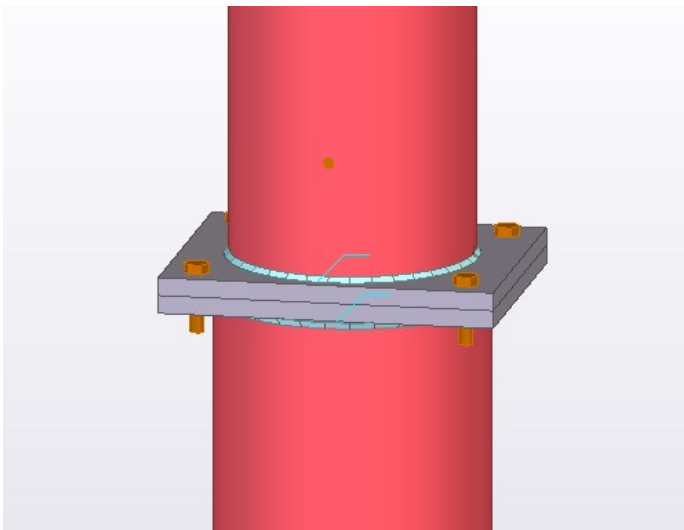
Liittopilarin jatkoskohdat sijoitetaan yleensä välipohjan kohdalle, jossa betoni suojaa liitosta lämmönvaihteluilta. Jatkos voidaan toteuttaa hitsaamalla tai keskeltä rei'itettyjen päätylevyjen avulla ruuviliitoksella. Molemmissa tapauksissa liittopilarin pääteräkset jatketaan liitoksen yli. Vaadittavan ankkurointipituuden tulee täyttyä liitoksen ylä- ja alapuolella. Näin turvataan liittopilarin toimintakyky palotilanteessa, jossa teräsvaippa menettää kantokykynsä. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, ss. 37–38)

Kuvassa 36 on esitetty liittopilarin jatkos hitsaamalla ja kuvassa 37 pilarin päätylevyistä ruuveilla kiinnitettävällä päätylevyliitoksella. Normaalitilanteessa pilarin ja välipohjan betonin saavutettua riittävän lujuuden, liitosta rasittaa ainoastaan pilarin normaalivoima. Liitoksen suunnittelussa tulee kiinnittää huomiota asennusaikaiseen normaali- ja leikkausvoiman sekä niiden yhteisvaikutuksesta aiheutuviin kuormituksiin, joita jatkokseen kohdistuu ennen välipohjan betonin riittävää lujittumista.

Kuva 36 Liittopilarin hitsattu jatkosliitos.



Kuva 37 Liittopilarin jatkos, ruuviliitos päätylevyillä.



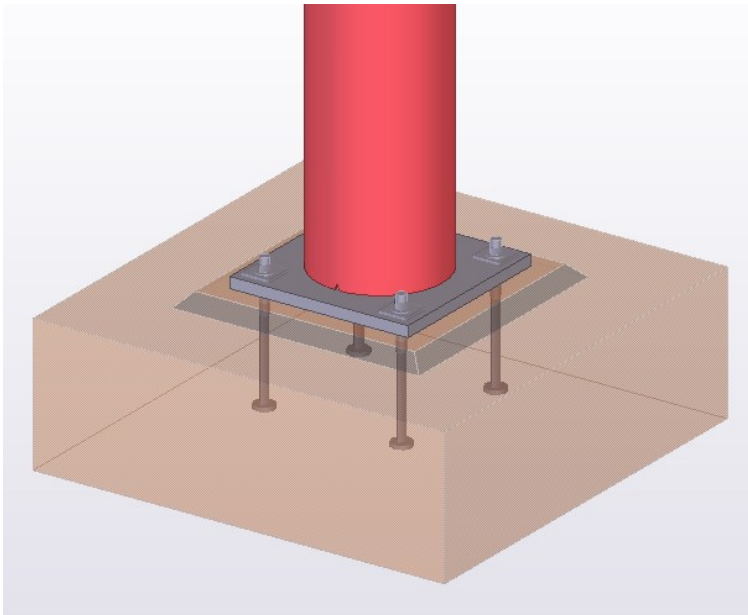
6.3 Liittopilarin peruspulttiliitos perustuksiin

Liittopilarin perustusliitos, kuva 38, noudattaa samoja periaatteita, kuin teräspilarin peruspulttiliitos perustuksiin, jonka toimintaperiaate on esitelty aiemmin luvussa 5.8. Mitoituksessa suurin eroavaisuus on siinä, että liittopilarin koko poikkileikkaus toimii puristettuna kantavana pinta-alana. Mikäli perustusliitos mitoitetaan toimimaan

palotilanteessa jäykkänä liitoksena, perustuksien tartuntateräksiset ankkuroidaan liittopilarin betoniraudoitukseen.

Asennustilanteessa liittopilari mitoitetaan mastopilarina, ellei pilaria tueta asennuksen aikana. Liittopilari mitoitetaan usein normaalitilanteessa teräspilarina ja palotilanteessa betonipilarina.

Kuva 38 Liittopilarin peruspulttiliitos perustuksiin.



6.4 Liittopilarin ja WQ-palkin liitokset

Vaaka- ja tasorakenteiden pystykuormat siirtyvät palkeilta pilareiden kautta perustuksille ja maapohjaan. Tässä opinnäytetyössä rakenteen oletetaan sivusiirtymättömäksi, jolloin liittopilarin ja WQ-palkin liitoksia käsitellään nivelellisinä. Liitokset mitoitetaan leikkaus- ja normaalivoimalle ja liitoksen jäykkyyden aiheuttama kiinnitysmomentti jätetään huomioimatta. Liitoksen sijainnin epäkeskeisyys tulee huomioida liittopilarin mitoituksessa. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 37)

Jotta liittopilari käyttäytyy suunnitellusti, kuorman tulee jakautua tasaisesti koko liittopilarin poikkileikkaukselle ja sen materiaaleille. Kuorman siirtyminen pilarissa normaalivoimana

edellyttää, että kuormat jakautuvat teräkseltä betonille joko materiaalien välisen leikkausjännityksen tai mekaanisten kiinnikkeiden välityksellä. Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus – Eurocode 4 -oppikirja BY58:ssa annetaan kolme eri tapaa, kuinka kuormitus tuodaan putkirakenteiselle liittopilarille.

Kun vaakakuormat johdetaan vain teräsputkelle, teräs suppeutuu. Suppeuma aiheuttaa lopulta tartunnan menetyksen ja teräksen irtoamisen betonista, jolloin liittorakenteen yhteisvaikutus häviää ja pilarin kantokyky vastaa teräskuoren poikkileikkauksen kantokykyä. Betonitäyttö rajoittaa puristuskestävyytensä ansiosta teräksen paikallista lommahdusta. (Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry, 2012, s. 216)

Kuormitettaessa ainoastaan betonitäyttöä, teräsputki estää betonin mahdollisuuden laajentua. Tämä lisää betonin ja teräksen välistä tartuntavoimaa, jonka ansiosta kuormitus siirtyy lopulta myös teräskuorelle. Tätä kuormansiirtoa käytetään hyväksi lähinnä perustuspaaluissa. (Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry, 2012, s. 216)

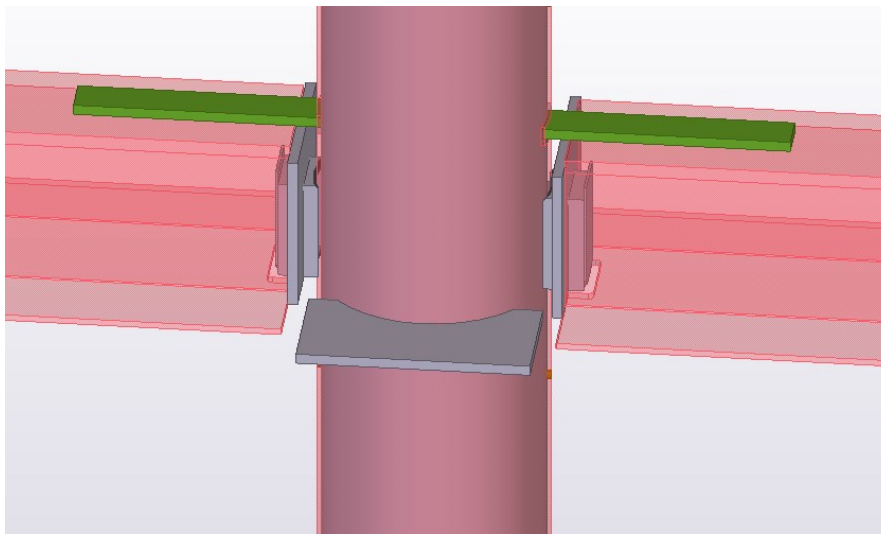
Standardissa SFS-EN 1994-1-1 kohdassa 6.7.4.2(1) edellytetään, että kuormiensiirtoalueelle, jossa betonin ja teräksen välinen leikkauslujuus ylittyy, tulee leikkausliitoksessa käyttää mekaanisia liittimiä. Tällä tavoin hyödynnetään koko poikkileikkauksen kestävyys.

Teräspilarin ja betonin välinen tartunnan riittävyys on tarkistettava erityisesti palotilanteessa, jolloin teräksen lujuus alenee huomattavasti. Kuorman siirtyminen teräskuorelta betoniin voidaan varmistaa mekaanisilla hitsattavilla vaarnatapeilla tai ammuttavilla nauloilla. Palotilanteessa kitkaa ei huomioida, vaan kuorma viedään betonille ainoastaan leikkausliittimien kautta. (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, ss. 38–40) Leikkausliittimien tulee sijaita vain kuormien tuontikohdassa, jossa ne ovat betonirakenteen sisässä palolta suojattuna eikä betonista haihtuvan vesihöyryn etenemistä viileämpiin osiin estetä muualla rakenteessa. (Suomen Betoniyhdistys ry & Teräsrakenneyhdistys ry, 2012, s. 216)

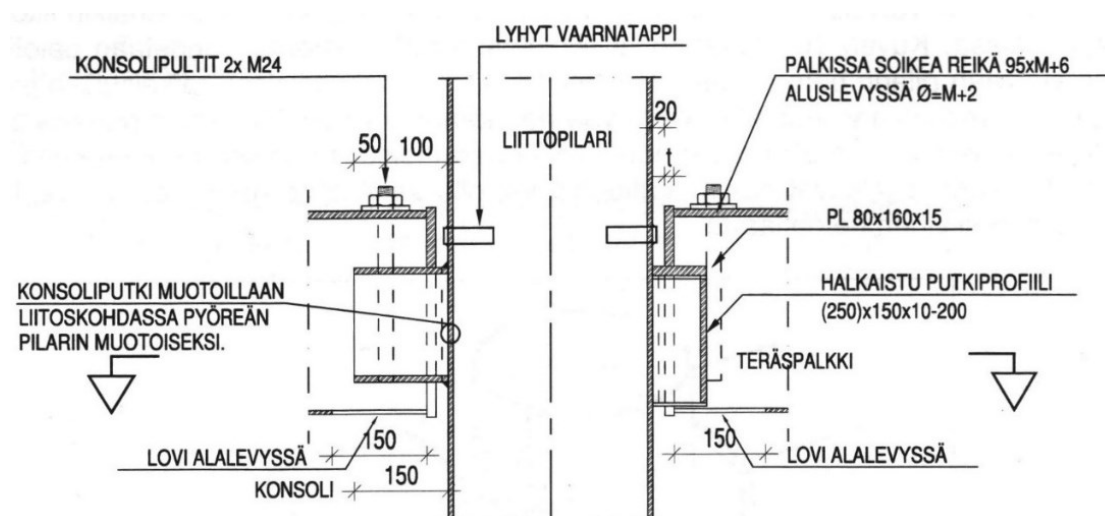
Kuvassa 39 on esitetty WQ-palkin putkikonsoliliitos liittopilariin. Teräsputkikonsoli hitsataan konepajalla pilarin kylkeen ja päätylevyt WQ-palkkien uumiin tasalujilla hitseillä. Jos kyseessä on pyöreä liittopilari, konsoliputken pää muotoillaan pilariin sopivaksi. Liitosta käsitellään rakennemallissa nivelellisenä, joten liitoksen putkikonsoli mitoitetaan ainoastaan palkin tukireaktion aiheuttamalle leikkaukselle sekä palkin normaalivoimalle. Reunapilarin liitoksessa, ja mikäli asennusaikaista tuentaa ei käytetä, tulee liitoksen mitoituksessa huomioida epäkeskeisen kuormituksen aiheuttama vääntörasitus. Liitoksessa tulee tarkistaa

myös WQ-palkin päätylevyn ja konsoliputken välinen paikallinen puristuskestävyys sekä WQ-palkin päätylevyn palamurtuminen. Jos WQ-palkki on osa laattakentän rengasraudoitusta, tulee palkin päihin hitsata onnettomuustilanteen kestävä lattateräs, joka kulkee pilarin läpi. (Teräsrakenneyhdistys, 2023) Kuvassa 40 on leikkauspiirustus putkikonsoliliitoksesta sekä kuorman siirtymisen koko poikkileikkaukselle varmistavista vaarnatapeista.

Kuva 39 WQ-palkin ja liittopilarin putkikonsoliliitos.

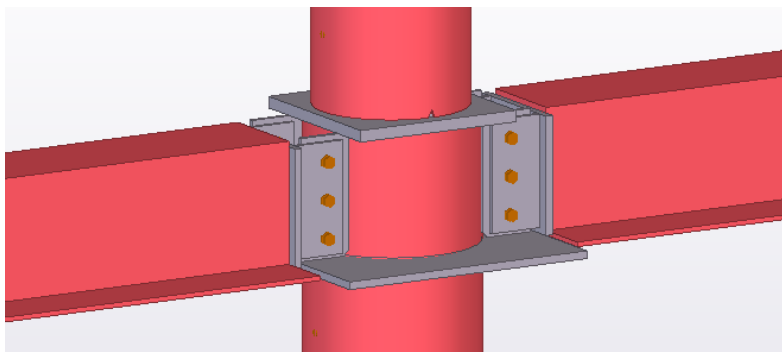


Kuva 40 Putkikonsoliliitos ja vaarnatappi (Teräsrakenneyhdistys ry, 2004, s. 42).



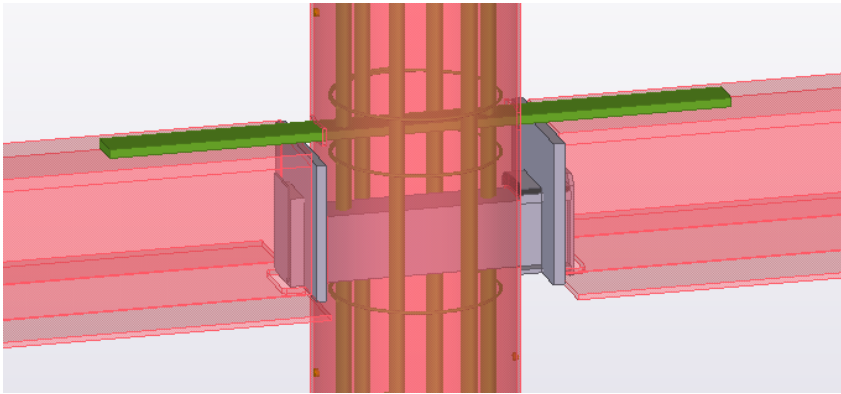
WQ-palkin levyliitosta liittopilariin, kuvassa 41, käsitellään rakennemallissa nivelellisenä. Liitoksen toiminnan edellytyksenä on riittävä muodonmuutoskyky, joka saavutetaan sitkeällä murtotavalla. Liitos mitoitetaan palkin tukireaktion aiheuttamalle leikkausvoimalle sekä normaalivoimalle. Mikäli WQ-palkkia ei tueta asennustilanteessa, tulee mitoituksessa huomioida myös toispuoleisen kuormituksen aiheuttama vääntörasitus. Levyliitoksien yksileikkeisyydestä johtuva epäkeskeisyys aiheuttaa taivutusmomenttia, joka on huomioitava niin palkin kuin pilarinkin liitoslevyissä sekä ruuvien ja pilarin vaipan kestävyyksissä. Kuorman jakautuminen liittopilarin betoniosalle varmistetaan mekaanisilla leikkausliittimillä. (Teräsrakenneyhdistys, 2023) Mikäli rakenne altistuu suurelle kuormitukselle, liitoslevyt voidaan tuoda liittopilarin läpi jatkuvana rakenteena.

Kuva 41 WQ-palkin ja liittopilarin ruuviliitos.



Raskaasti kuormitettu WQ-palkki voidaan liittää liittopilariin leikkauslattakonsoliliitoksella, kuten kuvassa 42 nähdään. Liittopilarin läpi kulkeva leikkauslatta hitsataan pilarin vaippaan sekä konsolirakenteeseen. Jos WQ-palkki on osa laattakentän rengasraudoitusta, pilarin läpi tuodaan onnettomuuskuormat kestävä WQ-palkin päihin hitsattava lattateräs. Palotilanteessa leikkauslatta välittää kuorman suoraan betonille ja varmistaa liittoranteen toiminnan normaalitilanteessa. Muutoin leikkauslattakonsoliliitos mitoitetaan samoin kuin putkikonsoliliitos.

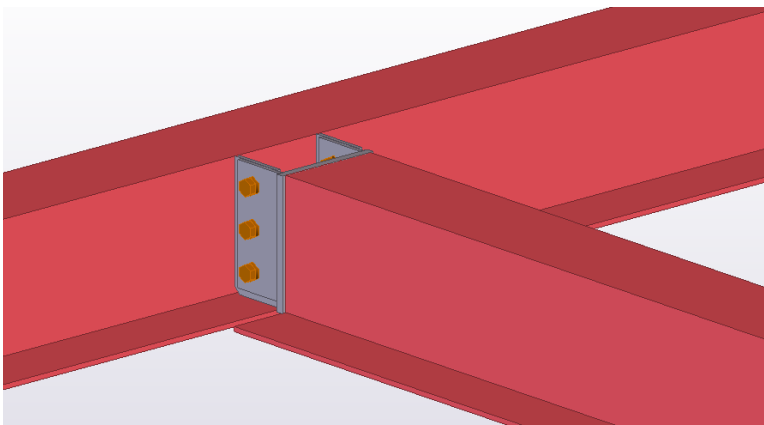
Kuva 42 WQ-palkin ja liittopilarin lattateräskonsoliliitos.



6.5 Poikittaisen WQ-palkin liitos WQ-palkkiin

Poikittaisen WQ-palkin liitos WQ-palkkiin, kuva 43, voidaan toteuttaa levyliitoksena samalla periaatteella kuin aiemmin esitelty WQ-palkin levyliitos liittopilariin kuvassa 41. Primääripalkin kylkeen ja sekundääripalkin päähän hitsattuun päätylevyyn hitsataan liitoslevyt sekundääripalkin uumien kohdalle ja kiinnitetään ruuveilla. Liitos on nivelellinen, ja sitä kuormittaa sekundääripalkin tukireaktion aiheuttama leikkausvoima. Mikäli sekundääripalkki kiinnitetään vain toiselle puolelle primääripalkkia, tulee huomioida primääripalkkiin ja liitokseen sekä lopputilanteessa tason saumaraudoitukseen kohdistuva vääntörasitus.

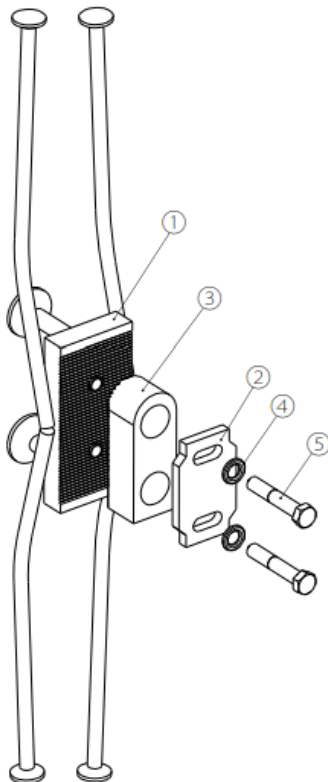
Kuva 43 WQ-palkin ruuviliitos WQ-palkin kylkeen.



6.6 WQ-palkin liitos betoniseinään PCs-konsolin avulla

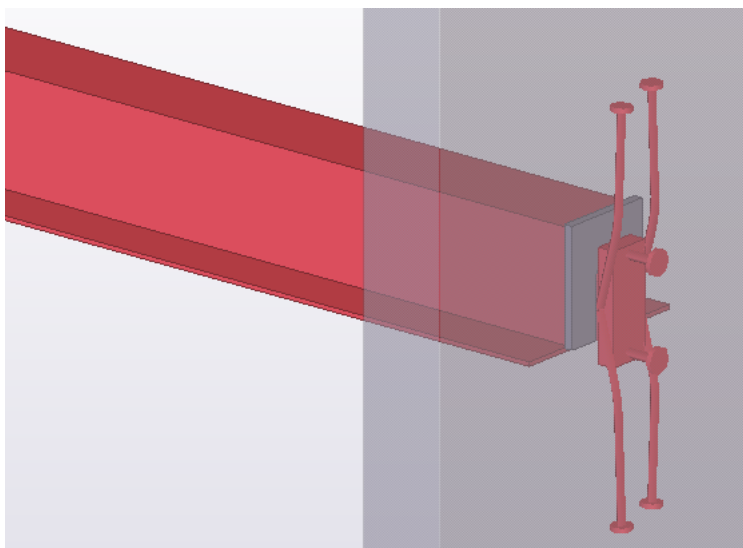
PCs-konsoli on Peikko Groupin kehittämä piilokonsolijärjestelmä, jonka avulla WQ-palkki voidaan kiinnittää betoniseinään tai -pilariin niin, että vapaa kerrokorkeus pysyy vakiona koko WQ-palkin ja siihen liittyvän tasoalueen kohdalla. Kuvassa 44 on PCs-konsolin hajotuskuva, jossa on eritelty siihen kuuluvat osat. Osa 1 on betonirakenteen sisään valettava pilariosa, jossa teräslevyyn on hitsattu pysty- ja vaakasuuntaiset ankkuriosat. Pilariosa ja sen lisäraudoitus asennetaan betonirakenteeseen pääraudoituksen yhteyteen. Konsoliosa koostuu konsolilevystä (osa 3), aluslevystä (osa 2), ruuveista (osa 5) ja ruuvien aluslevyistä (osa 4). Konsoliosa kiinnitetään ruuveilla pilariosan teräslevyyn betonirakenteen valamisen ja muotin purkamisen jälkeen. Konsoli- ja teräslevyn pinnat ovat hammastettu, joten osat liittyvät toisiinsa tiiviisti ja muodostavat kestävä mekaanisen liitoksen. (Peikko Group, 2019, s. 4)

Kuva 44 PCs-konsoli (Peikko Group, 2014, s. 4).



Kuvassa 45 esitetään WQ-palkin nivelellinen liitos betoniseinään PCs-konsolin avulla. PCs-konsoli kykenee vastaanottamaan pysty- ja vaakasuuntaisia voimia sekä vääntöä. WQ-palkin päässä on hitsattu päätylevy, jonka aukon muodon tulee olla PCs-konsoliin sopiva. Palkin pysty- ja vääntökuormat siirtyvät päätylevyn tukipinnan kautta konsoliin ja sen ankkuroinnin kautta betonirakenteelle. Palkin vaakakuormat siirtyvät palkin päätylevyn kautta konsolin aluslevyyn ja siitä betonirakenteeseen. Mikäli WQ-palkki kiinnittyy vain toiselle puolelle seinärakennetta, tulee huomioida betonirakenteeseen kohdistuva toispuoleisen kuormituksen aiheuttama momentti sekä kuormitetun palkin kiertymän aiheuttama lisämomentti. WQ-palkin tukemisella voidaan poistaa asennusaikaisen väännön aiheuttamat rasitukset betoniseinään sekä WQ-palkkiin ja minimoida väännön aiheuttama kiertymä palkkiin. (Peikko Group, 2019, ss. 6 & 36)

Kuva 45 WQ-palkin liitos betoniseinään PCs-konsolin avulla.

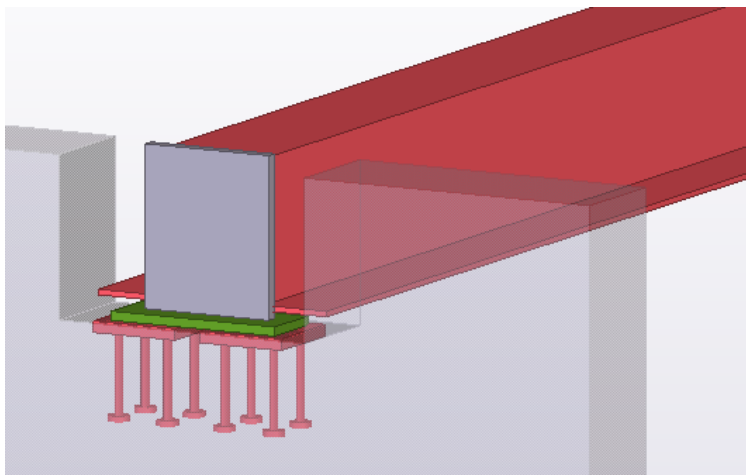


6.7 WQ-palkin liitos betoniseinään tartuntalevyihin hitsaamalla

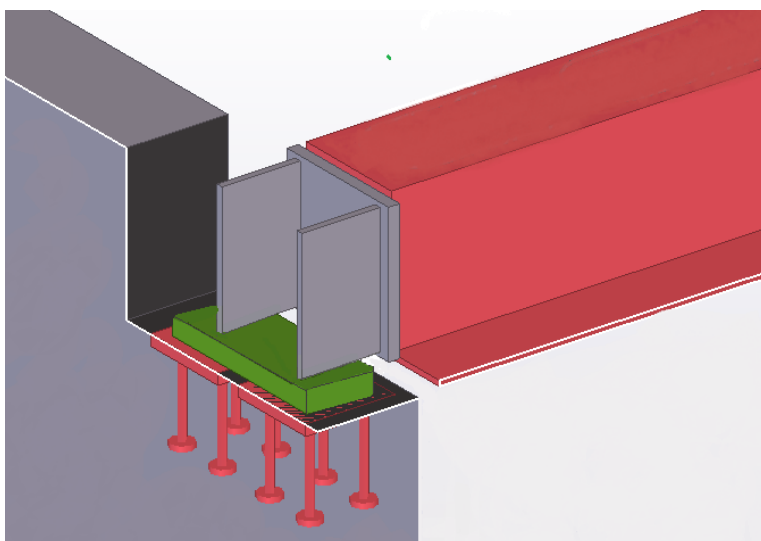
Toinen yleinen tapa liittää WQ-palkki betoniseinään, on toteuttaa liitos betoniseinään tehdyn kolovarauksen alapintaan valettujen kiinnityslevyjen avulla. Kiinnityslevyissä on harjaterästartunnat, joiden kautta liitoksen välittämät kuormat siirretään betonirakenteelle. Tartuntalevyt vaativat toimiakseen aina SFS-EN 1992-1-1 mukaisen miniraudoituksen. (Betoniteollisuus ry ym., 2019, s. 4)

Kuvassa 46 on WQ-palkin pää on hitsattu asennuspaloihin ja betoniseinään valettuihin tartuntalevyihin. Asennuspaloilla varmistetaan palkin oikea korkeusasema. Kun tartuntalevyt on sijoitettu betoniseinän sisälle pystyasentoon, saadaan WQ-palkin tukireaktion epäkeskeisyys minimoituja, eikä liitokseen synny leikkausrasitusta. Kuten kuvassa 47, WQ-palkin päähän voidaan myös hitsata päätylevy, johon hitsataan uumien kohdalle liitoslevyt. Liitoslevyt hitsataan kiinnityslevyyn hitsattuihin asennuspaloihin. Rakennemallissa molemmat liitokset luokitellaan nivelelliseksi. Liitoslevyt mitoitetaan palkin pään tukireaktion aiheuttamalle leikkaukselle sekä mahdollisille normaalivoimille. Hitsien tulee olla liitoslevyjä vahvemmat. Palkin pään tukireaktio siirtyy liitoslevyiltä asennuspaloille ja niiltä kiinnityslevyjen kautta betonirakenteeseen. Vaakavoimat voivat vaatia kiinnityslevyn harjaterästen ankkuroinnin. WQ-palkin ja betoniseinän liitos tuetaan yleensä aina työnaikaisesti, jolloin väännön aiheuttamaa rasitusta ei pääse syntymään.

Kuva 46 WQ-palkin liitos betoniseinään, palkin pää tuella.



Kuva 47 WQ-palkin liitos betoniseinään, leikkauslevyliitos.



7 Lopputulokset

Opinnäytetyö alkoi perehtymällä teräs- ja liittorakenteisiin sekä niiden yleisimpien liitosten toimintaperiaatteisiin. Liittorakenteiden liitoksista keskityttiin liittopilarin peruspulttiliitokseen perustuksiin, liittopilarin hitsattuun sekä ruuvijatkosliitokseen, liittopilarin ja WQ-palkin ruuvi-, leikkauslatta- ja putkikonsoliliitokseen, poikittaisen WQ-palkin liitokseen toiseen WQ-palkkiin ja WQ-palkin liitokseen betoniseinään PCs-konsolin avulla sekä kahtena erilaisena hitsausliitoksena.

Teräsrakenteisen hallin tyypiliitoksiksi oli valittu pilarin peruspulttiliitos perustuksiin, kattoristikon nivelellinen ja jäykkänurkkainen liitos pilariin, sidepalkin liitos kattoristikoon, päätypalkkiin sekä pilariin, katon läpivientien tukipalkkien liitokset sekä ovi- ja ikkunapielien liitokset. Palkit ja pilarit olivat avo- sekä putkiprofiileita, kattoristikot, sidepalkit ja aukotusten tukirakenteet putkiprofiileita.

Opinnäytetyön ohella lisäaineistona tilaajalle luotiin Tekla Structures -esimerkkimallit. Tekla Structures on yksi suunnittelutoimistojen yleisimmin käytetyistä tietomallinnusohjelmista, joten liitoskirjaston luominen sen avulla oli luonnollinen valinta. Lisäaineistossa mallinnettiin kaksi teräsrakenteista hallia sekä viimeisteltiin aiemmin aloitettu liittorakenteiden esimerkkimalli. Tyypiliitoksien geometriassa huomioitiin myös ympäröivät rakenneosat sekä niiden sijainnit toisiinsa nähden, jolloin liitosalue käsittää enemmän kuin kaksi yhdistettävää

rakenneosaa. Tekla Structures -mallien kautta suunnittelija voi yksityiskohtaisemmin tarkastella liitosten geometriaa sekä niissä käytettyjä mallinnustyökaluja. Työkaluihin on mahdollista tallentaa esiasetuksia liitoksien mallinnusta varten, joka myös osaltaan tehostaa ajankäyttöä.

Teräsrakenteiden esimerkkihalliksi valittiin hallityyppi, jonka rakenneratkaisut tunnistettiin yleisimmiksi. Kokeneiden rakennesuunnittelijoiden sekä teräsrakentamisen asiantuntijoiden kesken pyrittiin löytämään liitokset, joissa huomioitiin liitoksien toimivuus, valmistus sekä asennus ja näistä muodostuva kustannustehokkuus. Lisäksi mallinnuksessa huomioitiin ohjeistuksen mukainen osien nimeäminen ja numerointi, joiden avulla mallista saadaan suodatettua piirustuksiin ja luetteloihin vain halutut ja tarkoituksenmukaiset osat sekä tiedot.

8 Pohdinta

Opinnäytetyössä käsiteltiin yleisesti liitossuunnittelua osien kestävyyttä suurempana kokonaisuutena. Lisäksi työssä esiteltiin liitto- ja teräsrakenteiden yleisiä pääliitoksia sekä niiden toimintaperiaatteet. Nämä osiot muodostivat yhtenäisen perustietopaketin suunnittelun tueksi. Opinnäytetyön ohella työn tilaajana toimineelle Sweco Finland Oy:lle koottiin uudenaikainen 3D-liitoskirjasto Tekla Structures -ohjelmalla. Tilaaja oli materiaalin erittäin tyytyväinen. Työ vastasi tilaajan tarpeita ja materiaalin koettiin hyödyttävän rakennesuunnittelun parissa työskenteleviä suunnittelijoita valtakunnallisella tasolla. Tyypiliitosten kokoaminen helposti saataville yhteen sijaintiin tehostaa työskentelyä sekä mahdollistaa yhtenäisen ja tasalaatuisen liitosdetaljiikan suunnittelijasta riippumatta.

Tulevaisuudessa teräshalleihin valitut liitokset esitellään konepajalle, joka kommentoi ja arvioi niitä omalta osaltaan. Tämän jälkeen tarvittaessa liitosten detaljeja täsmennetään ja lopulta arviointiprosessin läpikäyneet liitokset ja Tekla-mallit jaetaan Sweco Finland Oy:n teknologiayksikön kautta muiden rakennesuunnittelijoiden saataville. Tämän opinnäytetyön myötä on aloitettu nykyaikaisen liitoskirjaston luominen, jonka kehitystä jatketaan myös tulevaisuudessa.

Opinnäytetyöprosessin edetessä kävi selväksi, ettei ollut yksinkertaista valita vain yhtä mahdollisimman moneen tilanteeseen soveltuvaa universaalia liitosta. Opinnäytetyön aikana tunnistettiin erään yleisimmän teollisuushallin rakenneratkaisut ja niiden vaatimat liitokset. Työn aikana tunnistettiin myös liitoksia, joiden mallinnukseen ei ole vielä mallinnustyökaluja.

Kehitystyön jatkuessa mietitään, toisiko uuden työkalun luominen ajansäästöä vai esiintyykö kyseinen liitos juuri tämänlaisena niin harvoin, että suunnittelijan kannattaa jatkossakin mallintaa se itse alusta lähtien.

Opinnäytetyön edetessä itseäni alkoi kiinnostaa liitosten detaljien kustannusvaikutukset. Olisi mielenkiintoista selvittää kuinka suuri kustannusero syntyy, jos esimerkiksi liitos suunnitellaan kannakepalallisena, jolloin asennusaikaista tuentaa ei tarvita, ja verrata tätä kustannuksiin, jotka aiheutuvat työläämmästä asennustavasta ja edullisemmasta liitoksesta. Johdonmukaisesti ajateltuna, mitä suuremmasta rakenneosasta on kyse ja mitä enemmän nostolaitteita ja asennushenkilöitä tarvitaan, sitä tarkemmin tulisi huomioida asennettavuus liitosta suunniteltaessa.

Pyrkimyksenäni oli laajentaa ymmärrystä liitossuunnittelusta, sillä aiemman kokemukseni mukaan liitoksia tarkastellaan usein yksipuolisesti kestävyysnäkökulmasta. Opinnäytetyön aikana selvisi, kuinka monitahoinen ja vaikeasti yksinkertaistettava prosessi liitossuunnittelu on. Se vaikuttaa merkittävästi rakenteen kestävyys, toimivuus sekä kustannuksiin niin suoraan kuin välillisestikin. Kokonaisuutena opinnäytetyöprosessi on ollut monella tavalla hyvin opettavainen kokemus, joka on vahvistanut mielenkiintoani ja innostustani teräsrakenteiden suunnittelua kohtaan.

Lähteet

- Aalto T., Saarni R. (1996). *Teräsrakentaminen*. Tampereen teknillinen korkeakoulu.
Rakennustieto Oy
- Antila A-M., Karppinen M., Leskelä M., Mölsä H., Pohjakallio M. (2014). *Tekniikan kemia*.
Edita Publishing Oy
- Betoniteollisuus ry, Anstar Oy, Peikko Finland Oy, R-Group Oy, Semiko Oy. (2019). *KL-
kiinnityslevyt Betonirakenteiden hitsausliitoksiin*. Rakennusteollisuus ry,
Betoniteollisuus ry.
<https://media.peikko.com/file/dl/i/VcuqZw/zRnvH9viNt41HT9ltk1q7w/KLFI001TMAWeb.pdf?fv=5b31>
- Haapio J., Heinisuo M. (28.10.2010). Minimum cost steel beam using semi-rigid joints
Rakenteiden Mekaniikka, 43(1)
http://rmseura.tkk.fi/rmlehti/2010/nro1/RakMek_43_1_2010_1.pdf
- Kangaspuoskari M., Lahdenmaa J., Lehtimäki E., Malaska M., Mela K., Papula S., Tiainen T.
(2020). *Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 3 -oppikirja*.
Teräsrakenneyhdistys ry
- Kinnunen J., Saarinen E., Tiira S., Ulvinen S., Väänänen E. (2001). *Teräsrakenteiden
suunnittelu*. Teräsrakenneyhdistys ry.
- Laitinen K. (13.6.2012). *Korroosio*. Teräsrakenneyhdistys ry.
<https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/151/8ac778e/korroosio.pdf>
- Metallinjalostajat ry. (2014). *Teräskirja*. Metallinjalostajat ry.
https://teknologiateollisuus.fi/sites/default/files/teraskirja_flip/mobile/index.html#p=52
- Ongelin P., Valkonen I. (2010). *Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja*. Rautaruukki Oyj
- Ongelin P., Valkonen I. (2016). *SSAB domex tube Rakenneputket EN 1993 -käsikirja*. SSAB
Europe Oy

Peikko Group. (2019). *PCs -konsolin tekninen käyttöohje*.

https://media.peikko.com/file/dl/i/GiEOLw/VKNkKd67AfcjAiXC4fI1bQ/PCs_konsoli_fi-002.pdf?fv=3658

Piironen, E., Saarni, R. (1998). *Teräs julkisessa rakentamisessa*. Rakennustieto Oy.

RIL 167-2. (1992). *Teräsrakenteet II*. Suomen rakennusinsinöörien liitto RIL ry.

SFS-EN 1090-2:2018. (2018). *Teräs- ja alumiinirakenteiden toteutus*.

Osa 2: Teräsrakenteiden tekniset vaatimukset. SFS Online.

SFS-EN 1993-1-1. (2005). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt*. SFS Online.

SFS-EN 1993-1-3 + AC. (2006). *Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3: Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille*. SFS Online.

SFS-EN 1993-1-8. (2005). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu*.

Osa 1–9: Väsyminen. SFS Online.

SFS-EN 1993-1-9. (2005). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu*.

Osa 1–8: Liitosten mitoitus. SFS Online.

SFS-EN 1993-1-10. (2005). *Eurocode 3. Teräsrakenteiden suunnittelu*.

Osa 1–10: Materiaalin sitkeys ja paksuussuuntaiset ominaisuudet. SFS Online.

SFS-EN ISO 4063:2023. (2023). *Hitsaus, kovajuotto, juotto ja leikkaus. Prosessien nimikkeet ja numerotunnukset*. SFS Online.

SFS-EN ISO 5817:2023. (2023). *Hitsaus. Teräksen, nikkelin, titaanin*

ja niiden seosten sulahitsaus (paitsi sädehitsaus). Hitsiluokat. SFS Online.

SFS-EN ISO 12944-4:2017. (2017). *Maalit ja lakat. Teräsrakenteiden korroosionesto suojamaaliyhdistelmillä. Osa 4: Pintatyypit ja pinnan esikäsittely*. SFS Online.

- Stark, J. W. B. (2023). *Steel Design 3 Connections : Behaviour of Connections in Steel Structures and Design of Mechanical Fasteners and Welds According to Eurocode 3*. Wilhelm Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische.
- Suomen betoniyhdistys ry, Teräsrakenneyhdistys ry. (2012). *Liittorakenteiden suunnittelu ja mitoitus: Eurocode 4 -oppikirja BY58*. Suomen betoniyhdistys, Teräsrakenneyhdistys.
- The Steel Construction Institute (2013). *Joints in Steel Construction: Moment-Resisting Joints to Eurocode 3*. Ascot, The Steel Construction Institute.
- Teräsrakenneyhdistys (2023). *Teräsrakenteiden suunnittelumateriaali. TEPWP3-liitokset. Rakenneyksityiskohdat*. Teräsrakenneyhdistys ry.
<https://www.terasrakenneyhdistys.fi/fin/terasrakenteiden-suunnittelumateriaali/>
- Teräsrakenneyhdistys Oy (17.3.2015). *Teräs kosketuksissa muiden materiaalien kanssa – Korroosionkestävyys*. Teräsrakenneyhdistys Oy.
https://www.terasrakenneyhdistys.fi/document/1/152/89718ce/teras_kosketuksissa_muiden_materiaalien_kanssa_1703_2015.pdf
- Teräsrakenneyhdistys ry. (2004). *Betonitäyteen teräsluottopilarin suunnitteluohje*. Teräsrakenneyhdistys ry.