

Elsa Viljamaa

**ERÄIDEN TERÄSRAKENTEIDEN LIITOSTEN MITOITUS EURO-
KODI EN 1993-1-8 MUKAAN**

ERÄIDEN TERÄSRAKENTEIDEN LIITOSTEN MITOITUS EURO- KODI EN1993-1-8 MUKAAN

Elsa Viljamaa
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Rakennustekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Rakennustekniikan koulutusohjelmat, Rakennesuunnittelu

Tekijä(t): Elsa Viljamaa
Opinnäytetyön nimi: Teräsrakenteiden liitosten mitoitus Eurokoodin EN1993-1-8 mukaan
Työn ohjaaja(t): Kai Kuula
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Kevät 2016 Sivumäärä: 42 + 2 liitettä

Liitosten osuus teräsrakennesuunnittelussa on merkittävä, koska niiden suunnittelu ja valmistuskustannukset ovat usein suuria. Laskenta on monivaiheista ja käsin tehtynä virhealtista. Tämän vuoksi laskennan automatisointi on välttämätöntä.

Opinnäytetyön aiheeksi valittiin teräsrakenteiden liitosten mitoitus. Käsiteltävät tapaukset rajattiin muutamaan Neste Jacobs Oy:n yleisesti käyttämään liitostyyppiin, joista tehtiin laskentapohjat Excel-ohjelmistolle.

Liitoslaskentaan perehdyttiin Eurokoodin EN1993 standardien ja teräsrakenteita käsittelevän kirjallisuuden avulla, minkä jälkeen teoriaa sovellettiin valittuihin liitoksiin. Liitosten laskennasta laadittiin kolme Excel-pohjaista mitoitusohjelmaa. Käsiteltävistä liitoksista kaksi oli palkki-palkkiliitoksia, joissa sekundääripalkki kiinnittyy ruuveilla primääripalkin uumaan hitsattuun kiinnityslevyyn, sekä yksi päätylevyllinen pilari-palkkiliitos. Ohjelmissa suunnittelijan tulee itse valita liitokselle geometriset mitat ja teräslujuudet, joiden perusteella ohjelma laskee liitoksen kestävyden. Pohjien tarkastuslaskenta suoritettiin käsin.

Neste Jacobs Oy:n rakennesuunnittelijat koekäyttivät laskentapohjia kuukauden ajan. Testeissä laskentapohjat todettiin toimiviksi. Työn tuloksena saadut mitoitusohjelmat tulevat yrityksessä työskentelevien rakennesuunnittelijoiden käyttöön.

Asiasanat: teräsrakenteet, liitokset, rakennesuunnittelu

ABSTRACT

Oulu University of Applied Sciences
Civil engineering, Structural engineering

Author(s): Elsa Viljamaa

Title of thesis: Calculations of steel constructed joints according to EN1993-1-8.

Supervisor(s): Kai Kuula

Term and year when the thesis was submitted: Spring 2016 Pages: 42+ 2 appendices

Design of joints play a significant part in steel structure design because design and fabrication costs are often high. Calculation of joints is complex and error-prone when made by hand. Therefore automation of calculations is necessary.

The theme of this thesis was calculation of connections of steel construction according to Eurocode standards. The subject was outlined to handle only three commonly used joints by Neste Jacob's designers. The calculation programs for the connection design was made by using Microsoft Excel.

Calculation of joints was studied through Eurocode EN1993 standards and steel construction literature. After that theory was applied to chosen joints. Calculations were drawn up with Excel-program which can be used for designing process. Two of the chosen joints were typical beam-beam joints where a secondary beam was bolted to a steel plate which had been welded to primary beam. The third joint was a column-beam joint where an end plate has been used. In the programs, a designer has to choose geometry and the strength of the used steel. With that information the programs calculate the full strength of the joints. The audit counting was made by hand.

The result of the thesis will be given to use of the orderer's civil engineering department.

Keywords: steel construction, connections, structural designing

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	1
1 JOHDANTO	5
2 LASKENTAPERUSTEET	6
2.1 Mitoituksen lähtötiedot	7
2.1.1 Materiaalien valinta	7
2.1.2 Kiinnikkeet	7
2.1.3 Liitoksen geometria	9
2.2 Palkki-palkkiliitos, kiinnitys uumaan hitsattuun teräslevyyn	10
2.2.1 Voimien jakautuminen ruuviryhmässä	11
2.2.2 Sekundääripalkin leikkaus	12
2.2.3 Ruuvien kestävyysien mitoitusarvo	13
2.2.4 Hitsien mitoitus	15
2.2.5 Sekundääripalkin palamurtuminen	19
2.3 Palkki-palkkiliitos, jossa ulokkeellinen kiinnityslevy	20
2.3.1 Kiinnityslevyn leikkaus- ja taivutuskestävyys	21
2.3.2 Kiinnityslevyn palamurtuminen	22
2.4 Pilari-palkki päätylevyliitos	23
2.4.1 Leikkauskapasiteetti	25
2.4.2 Hitsien kestävyys	27
2.4.3 Ruuveihin vaikuttavat voimat	28
2.4.4 Ekvivalentti T-osa	29
2.4.5 Pilarin uumaosan veto	33
2.4.6 Palkin puristettu laippa ja uuma	34
2.4.7 Palkin vedetty uuma	34
2.4.8 Jäykisteiden kestävyuden tarkastelu	35
3 LASKENTAPOHJIEN ESITTELY	36
3.1 Laskentapohjien ulkoasu	36
3.2 Laskentapohjien käyttö	36
3.3 Kehitysideoita	40

4 YHTEENVETO	41
LÄHTEET	43
Liite 1 palkki-palkkiliitos, vuokaavio	44
Liite 2 pilari-palkkiliitos, vuokaavio	46

1 JOHDANTO

Mitoitusohjelmien käyttö kuuluu rakennesuunnittelijan arkipäivään. Ne nopeuttavat laskentaa ja vähentävät käsinlaskennassa tapahtuvia virheitä. Suunnittelijan on silti tärkeää ymmärtää teoria kaavojen takana sekä pystyttävä tarkastamaan laskelmansa. Useimmat mitoitusohjelmat on tehty käyttäen yksinkertaisia Excel- tai Mathcad-ohjelmistoja, mutta laskennassa voidaan käyttää myös kehittyneempiä laskentaohjelmia.

Työn tavoitteena on tehdä tilaajalle Excel-pohjaisia laskentaohjelmia standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan. Mitoitettavat liitokset on rajattu kolmeen Neste Jacobsissa yleisesti käytössä olevaan liitostyyppiin.

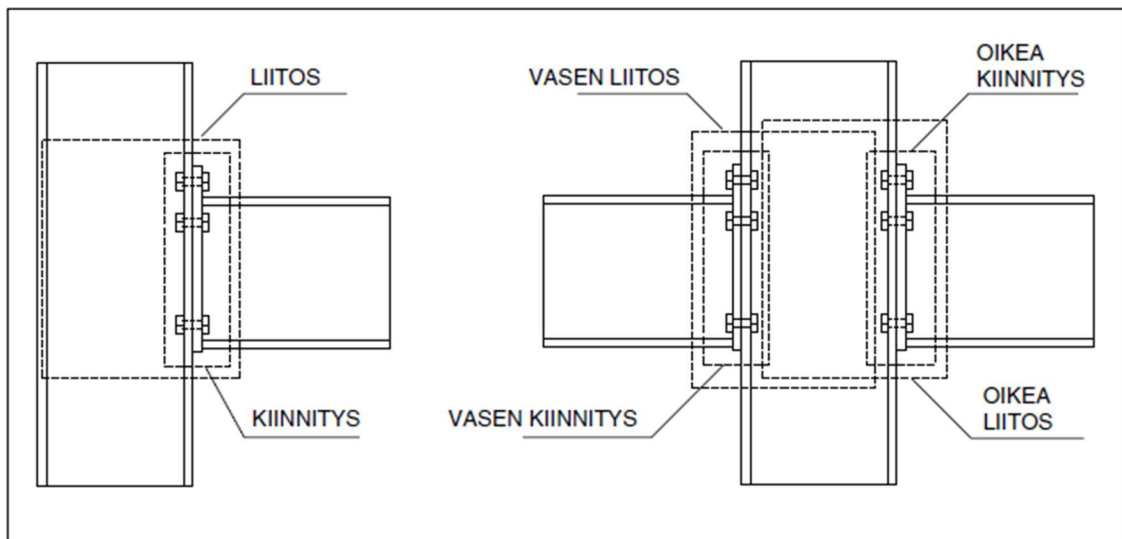
Opinnäytetyössä tehtävien laskentapohjien on tarkoitus olla helppokäyttöisiä ja –lukuisia, jotta käyttäjällä ei kulu liikaa aikaa ohjelman käytön opetteluun. Laskentapohjat toteutetaan niin, että liitoksen kestävyuden tarkastelu on mahdollista muidenkin kuin mitoittavan tapauksen mukaan. Tämä lisää käyttäjän ymmärrystä koko liitoksen toiminnasta. Laskentapohjista on myös mahdollista tuottaa yhteenveto osaksi laskentaraporttia.

Työn tilaajana toimii Neste Jacobs Oy, jonka pääkonttori sijaitsee Porvoon Kilpilahdessa. Lisäksi yrityksellä on toimistot Turussa ja Kotkassa ja useita toimistoja ulkomailla. Yritys tarjoaa suunnittelu ja projektinjohtoa öljyn, kaasun, petrokemian- ja kemianteollisuuden alalla. Rakennesuunnittelussa on keskitytty betoni-, teräs- ja geotekniseen suunnitteluun teollisuuden alalla.

Rakennesuunnittelu on yrityksessä tuore, mutta nopeasti kasvava osasto ja sillä ei vielä ole käytössä omia laskentapohjia. Tähän saakka laskentaa on tehty käsin, jolloin virheiden todennäköisyys kasvaa, tai laskentaohjelmalla, jonka käyttö on monimutkaista ja vaatii harjaannusta. Tässä opinnäytetyössä tehtävät ohjelmat tulevat yrityksen rakennesuunnittelijoiden käyttöön tehostamaan suunnittelua ja helpottamaan liitoslaskentaa.

2 LIITOSTEN LASKENTAPERUSTEET

Liitoksella tarkoitetaan peruskomponenteista muodostuvaa kokonaisuutta, jossa vähintään kaksi teräs-sauvaa kiinnittyy toisiinsa. Peruskomponentteja ovat esimerkiksi ruuvit, hitsit päätylevyt, kulmateräkset, pilarin uuma ja laippa. Kiinnityksellä taas tarkoitetaan paikkaa, jossa sauvat liittyvät toisiinsa. Kiinnityksen käsite sisältää myös käytetyn kiinnitystavan, yleisimmin ruuvi- tai hitsikiinnitys. Liitoksen ja kiinnityksen eroa on havainnollistettu kuvassa 1. (1, s.301.)



KUVA 1. Liitoksen ja kiinnityksen ero (1, s.301)

Liitostapaa valittaessa on huomioitava rakenteen toimintapa sekä voimasuureiden jakautuminen. Hitsiliitos on usein kustannustehokkain ratkaisu, mutta asennusteknisesti heikosti toteutettavissa työmailla, joissa sääolosuhteita ei voida optimoida ja laadunvalvontaa on vaikea toteuttaa. Työmaalla hitsattavien osien pintakäsittelyn uusiminen aiheuttaa myös lisäkustannuksia. Nyrkkisääntönä voidaan pitää sitä, että teräsosat toteutetaan konepajalla hitsiliitoksina mahdollisimman suurina lohkoina, jotka kiinnitetään työmaalla toisiinsa ruuviliitoksin. (1, s. 301.)

2.1 Mitoituksen lähtötiedot

2.1.1 Materiaalien valinta

Standardi SFS EN 1993-1-1 koskee taulukossa 1 esitetyistä teräslajeista valmistettujen profiilien suunnittelua. Taulukosta 1 poiketen teräslajille S355 käytetään korjausliitteen mukaista vetomurtolujuuden nimellisarvoa $f_u = 490 \text{ N/mm}^2$. (3, s.26; 4, s.9.) Tässä opinnäytetyössä on keskitytty tarkastelemaan I- ja H-profiilien välisiä liitoksia.

TAULUKKO 1. Kuumavalssattujen rakenneterästen myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (3, s.26)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 80 mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550

2.1.2 Kiinnikkeet

Kiinnitysten suunnittelussa käytettävien ruuvien tulee olla SFS EN1993-1-8 viitestandardin mukaisia. Taulukossa 2 on esitetty standardin mukaiset myötörajo-

jen ja vetomurtolujuuksien nimellisarvot (5, s.21). Suomessa on yleisesti käytössä ainoastaan lujuusluokkien 8.8 ja 10.9 ruuveja. Liitoksissa voidaan käyttää kiinnikkeinä myös niittejä, joskaan tämä ei ole kovin yleistä eikä niihin tässä opinnäytetyössä paneuduta.

TAULUKKO 2. Ruuvien myötörajan ja vetomurtolujuuden nimellisarvot (5, s.21)

Ruuvien lujuusluokka	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

Ruuvit jaetaan kahteen pääryhmään riippuen siitä, rasittaako niitä leikkaus- vai vetovoima. Leikkausvoiman rasittamat kiinnitykset kuuluvat johonkin seuraavista ryhmistä:

- Kiinnitysluokka A, joka käsittää reunapuristustyyppiset kiinnitykset. Tässä kiinnitysluokassa käytetään kaikkia lujuusluokkia eikä ruuveja tarvitse esijännittää.
- Kiinnitysluokka B, jossa käytetään käyttörajatilassa liukumisen estäviä kiinnityksiä. Kiinnitysluokassa käytetään lujuusluokkien 8.8 ja 10.9 esijännitettäviä ruuveja. Liukumista ei saa tapahtua käyttörajatilassa.
- Kiinnitysluokka C, jossa käytetään murtorajatilassa liukumisen estäviä kiinnityksiä. Myös tässä kiinnitysluokassa on käytössä esijännitetyt lujuusluokkien 8.8 ja 10.9 ruuvit. Liukumista ei sallita murtorajatilassa. Lisäksi, jos kiinnityksessä vaikuttaa vetorasitus, on tarkastettava plasti-suusteorian mukainen vetokestävyys reikien kohdalla. (1, s. 319.)

Vetovoiman rasittamat kiinnitykset tulee suunnitella jonkun seuraavan luokan mukaan:

- Kiinnitysluokka D, jossa käytetään esijännittämättömillä ruuveilla tehtyjä kiinnityksiä. Tässä luokassa käytetään esijännittämättömiä ruuveja kaikista lujuusluokista. Jos kiinnitykseen kohdistuu vaihteleva vetovoima, ei tätä luokkaa tule käyttää. Tavallista tuulikuormaa ei kuitenkaan huomioida.

- Kiinnitysluokassa E käytetään esijännitetyillä ruuveilla tehjä kiinnityksiä. Kiinnitysluokassa käytetään vain esijännitettyjä lujuusluokkien 8.8 ja 10.9. (1, s. 320.)

Yleisimmät käytössä olevat ruuvikoot on esitelty taulukossa 3. Kirjaimella M viitataan kuusioruuviin ja numerolla ruuvin nimellishalkaisijaan (2, s.89).

TAULUKKO 3. Ruuvikoot ja pinta-alat (1, s.314)

Ruuvi ^{a)}	M12	M16	M20	(M22)	M24	(M27)	M30	M36
Varren bruttopinta-ala A (mm ²)	113	201	314	380	452	573	707	1018
Jännityspinta-ala A_s (mm ²) ^{b)}	84,3	157	245	303	353	459	561	817

a) Sulkuihin merkittyjen kokojen saatavuus on syytä varmistaa.
b) Ruuvin poikkipinta-ala varren kierteellisellä alueella. Voimassa taulukoissa 3.2 - 3.4 esitetyillä ruuveilla.

2.1.3 Liitoksen geometria

Ruuvien geometrian suunnittelussa tulee huomioida reikien sijoittelu siten, että vältetään korroosion syntymistä sekä paikallista lommahtamista ruuvien välissä. Etäisyyksien tulee olla määrätyissä rajoissa, jotta saavutetaan riittävä kestävyys ruuvien mitoitusarvo reunapuristukselle. Suuremmat keskiövälit myös helpottavat osien asennustyötä. Taulukossa 4 on esitetty minimiarvot ja suositukset etäisyyksille. (2, s.90.)

TAULUKKO 4. Suositellut reunaetäisyydet ja keskiövälit (1, s.319)

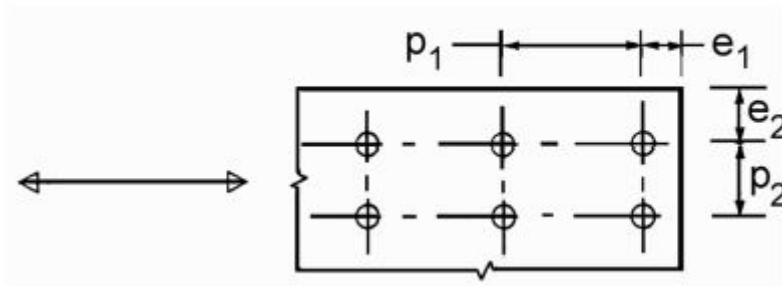
Ruuvi ^{a)}	Reikä ^{b)} d_0 (mm)	e_1 (mm)		e_2 (mm)		p_1 (mm)		p_2 (mm)	
		minimi	suositus	minimi	suositus	minimi	suositus	minimi	suositus
M12	13	16	30	16	25	29	40	32	40
M16	18	22	40	22	30	40	55	44	55
M20	22	27	50	27	40	49	70	53	70
(M22)	24	29	55	29	45	53	75	58	75
M24	26	32	60	32	50	58	80	63	80
(M27)	30	36	70	36	55	66	90	72	90
M30	33	40	75	40	60	73	100	80	100
M36	39	47	90	47	70	86	120	94	120

a) Sulkuihin merkittyjen kokojen saatavuus on syytä varmistaa.
b) Reikäkoot, ks. myös taulukko 3.7

Taulukossa esitetyt lähteen [45] mukaiset suositusetäisyydet mahdollistavat ruuvien kiristämisen koneellisesti.

Taulukko ei päde standardin EN 14399-8 mukaisille soviteruuveille, koska niiden varren nimellishalkaisija sekä käytettävät reikäkoot poikkeavat tavallisista ruuveista.

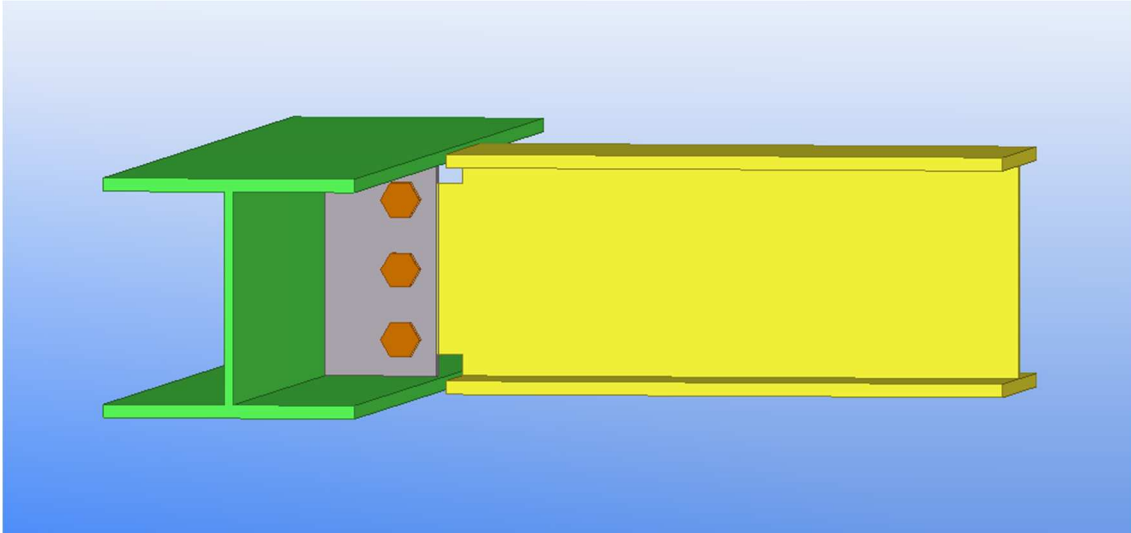
Muuttujalla p_1 merkitään voiman suunnassa olevaa ruuvien välistä etäisyyttä ja e_1 samassa suunnassa olevaa reunaetäisyyttä. Merkintä p_2 tarkoittaa ruuvien voimaa vastaan kohtisuoraa etäisyyttä ja e_2 vastaavaa reunaetäisyyttä. Näitä mittoja on havainnollistettu kuvassa 2. (2, s.91.)



KUVA 2. Kiinnittimien välisten etäisyyksien merkintätavat (3, s.25)

2.2 Palkki-palkkiliitos, kiinnitys uumaan hitsattuun teräslevyyn

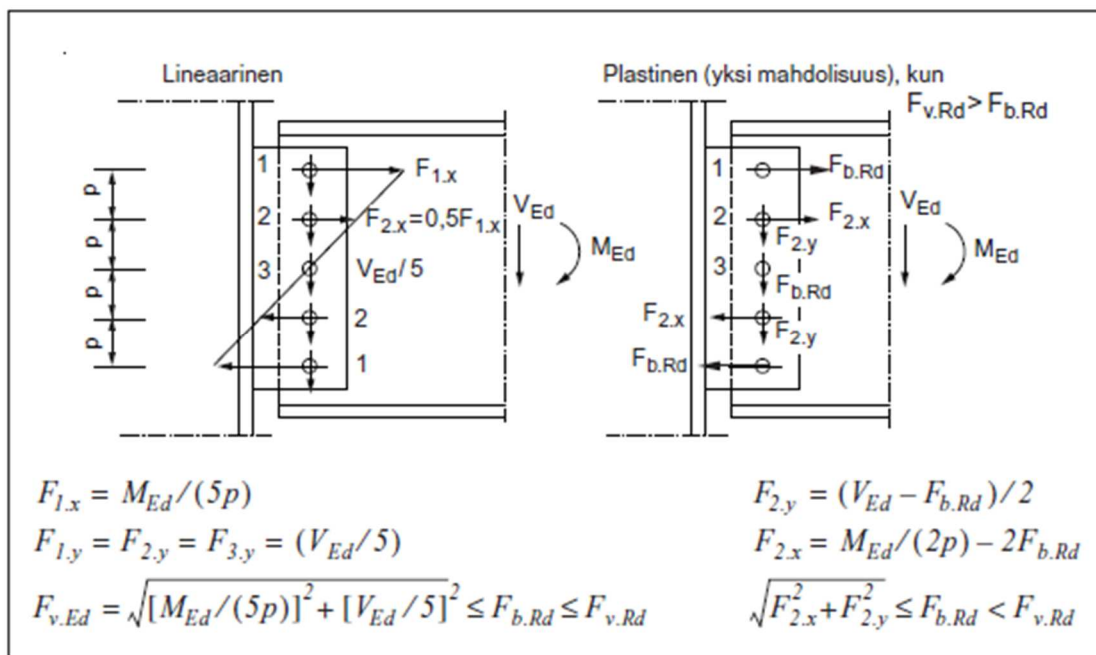
Kuvassa 3 oleva kiinnityslevyllinen palkki-palkkiliitos on nivelellinen leikkausvoiman rasittama liitos, jossa levyyn kiinnitettyt ruuvit siirtävät sekundääripalkin leikkausrasituksen jäykisteen hitsin kautta primääripalkille. Liitoksen ruuvikiinnitystä rasittaa leikkausvoiman epäkeskisyydestä aiheutuva momentti. Sekundääripalkin tukireaktion oletetaan vaikuttavan primääripalkin uuman keskellä, jolloin epäkeskisyyttä syntyy leikkausvoiman vaikutuskohdan ja ruuviryhmän kierto-keskiön välille. Liitoksessa sekundääripalkin ylälaippa sekä tarvittaessa myös alalaippa leikataan. (7, s.230.)



KUVA 3. Palkki-palkkiliitos

2.2.1 Voimien jakautuminen ruuviryhmässä

Voimien jakautumista ruuviryhmän ruuveille voidaan käsitellä joko plastisuusteorian mukaan, jolloin jokainen tasapainossa oleva jakautuma hyväksytään samalla kuitenkin edellyttäen että komponenttien kestävyys on riittävä. Voimien määrittämiseksi voidaan käyttää myös kimmoteorian mukaista lineaarista jakautumaa, jolloin leikkausvoima jakautuu tasan kaikille ruuveille ja normaalivoimia pidetään suoraan verrannollisina ruuviryhmän kiertokeskiöön. Tästä seuraa, että ruuviryhmän reunimaiset ruuvit ovat rasitetuimpia. Kimmoteorian mukaista lineaarista jakautumaa voidaan käyttää aina. (1, s.322; 5, s.38.)



KUVA 4. Voimien jakautuminen ruuviryhmässä (1, s.322)

2.2.2 Sekundääripalkin leikkaus

Laskettaessa liitoksen kestävyttä tulee kyseeseen tarkistaa myös sekundääripalkin poikkileikkauksen leikkauskestävyys. Tämä tehdään standardin SFS EN1993-1-1 mukaan. Leikkauskestävyys lasketaan plastisuusteorian mukaan. (3, s.54.)

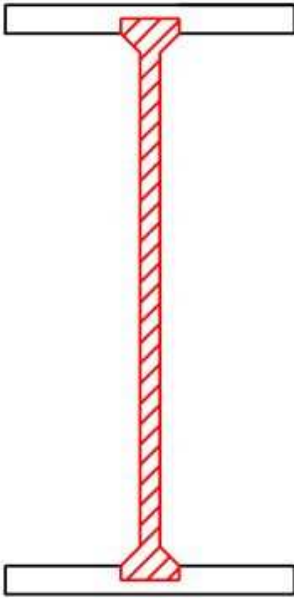
Leikkauskestävyyden mitoitusehto saadaan kaavasta 1 (3, s.54).

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} \leq 1,0 \quad \text{KAAVA 1}$$

Plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys saadaan kaavasta 2 (3, s.54).

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \left(\frac{f_y}{\sqrt{3}} \right)}{\gamma_{M0}} \quad \text{KAAVA 2}$$

Leikkauspinta-ala A_v , jota on havainnollistettu kuvassa 5, lasketaan kaavasta 3. Tämä kaava pätee vain valssatuille I- ja H-profiileille, joissa kuormitus on uuman suuntainen (3, s.54).



KUVA 5. Leikkauspinta-ala

$$A_v = \min \left\{ \begin{array}{l} A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f \\ \eta h_w t_w \end{array} \right. \quad \text{KAAVA 3}$$

η = kansallisessa liitteessä määritelty kerroin, Suomessa käytetään 1,2

h_w = uuman korkeus

2.2.3 Ruuvien kestävyysien mitoitusarvo

Leikkausvoiman rasittamassa liitoksessa tulee tarkistaa, että leikkausvoiman mitoitusarvo ei ylitä ruuvien leikkauskestävyyden ja reunapuristuksen mitoitusarvoa. Ruuviryhmän kestävyys mitoitusarvo valitaan yhtä suureksi kuin koko ruuviryhmän reunapuristuskestävyyden mitoitusarvo $F_{b,Rd}$. Tämä edellyttää kuitenkin, että yksittäisen ruuvin reunapuristuskestävyys on pienempi tai yhtä suuri

kuin samaisen ruuvien leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{v,Rd}$. Mikäli edellä mainittu ehto ei toteudu, saadaan ruuviryhmän kestävyys kertomalla kiinnitinryhmän pienin kestävyys, joko $F_{b,Rd}$ tai $F_{v,Rd}$, ruuvien lukumäärällä. (1, s.326.)

Leikkauskestävyys

Yksittäisen ruuvien leikkauskestävyyden laskemiseksi käytetään kaavaa 4 (5, s.28).

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

KAAVA 4

missä kerroin α_v riippuu ruuvien lujuusluokasta siten, että luokille 4.6, 5.6 ja 8.8 käytetään arvoa $\alpha_v=0,6$ ja luokille 4.8, 5.8, 6.8 ja 10.9 arvoa $\alpha_v=0,5$.

f_{ub} = ruuvien vetomurtolujuus

A_s = ruuvien jännityspinta-ala, kun ruuvien kierteet ovat leikkaustasossa

γ_{M2} = kestävyysosavarmuusluku 1,25

Koko ruuviryhmän leikkauskestävyys saadaan kertomalla yksittäisen ruuvien leikkauskestävyys kiinnittimien lukumäärällä (5, s. 28).

Reunapuristuskestävyys

Liitoksen reunapuristuskestävyys tarkastetaan sekä sekundääripalkin, että kiinnityslevyn osalta kaavan 5 mukaan yhdelle ruuville (5, s.28).

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

KAAVA 5

d = ruuvien nimellishalkaisija

t = tarkasteltavan levyn paksuus

f_u = tarkasteltavan levyn nimellismurtolujuus

γ_{M2} = kestävyysosavarmuusluku 1,25

Kertoimet k_1 ja α_b riippuvat ruuvien sijainnista. α_b levyn pään ruuveille saadaan kaavasta 6 (5, s.28).

$$\alpha_b = \min(1, 0; f_{ub}/f_u; e_1/3d_0) \quad \text{KAAVA 6}$$

Muille ruuveille kuin pään ruuveille kertoimet lasketaan kaavasta 7 (5, s.28).

$$\alpha_b = \min(1, 0; f_{ub}/f_u; p_1/3d_0 - 1/4) \quad \text{KAAVA 7}$$

Kohtisuorassa siirrettävään voimaan nähden k_1 on reunarivin ruuveille pienin kaavan 8 tekijöistä (5, s.28).

$$k_1 = \min(2, 5; 2, 8e_2/d_0 - 1, 7) \quad \text{KAAVA 8}$$

Sisemmille ruuveille käytetään kaavaa 9 (5, s.28).

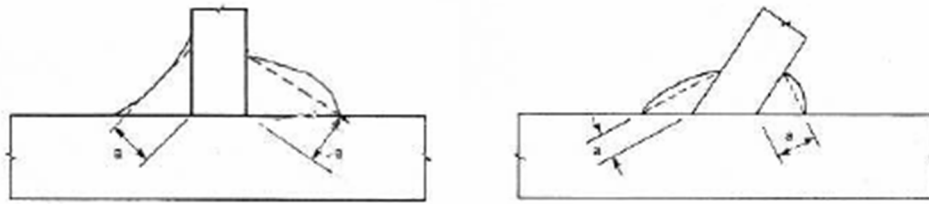
$$k_1 = \min(2, 5; 1, 4p_1/d_0 - 1, 7) \quad \text{KAAVA 9}$$

Koko ruuviryhmän reunapuristuskestävyys saadaan laskemalla yhteen kaikki yksittäisten ruuvien reunapuristuskestävyydet. Jos ruuviin kohdistuu vinosti suuntautunut voima, voidaan se jakaa komponentteihin ja tarkastella reunapuristuskestävyyttä komponenttien suunnissa erikseen. (1, s. 330.)

2.2.4 Hitsien mitoitus

Palkki-palkkiliitoksessa kiinnityslevy hitsataan primääripalkkiin kaksipuoleisella pienahitsillä, kiinnityspintojen välisen kulman tulee tällöin olla välillä 60°-120°. Tehollisena pituutena l_{eff} käytetään täysikokoisen hitsin kokonaispituutta, jos hitsin tehollinen pituus on pienempi kuin 30 mm tai kuusi kertaa hitsin a-mitta, ei hitsiä käsitellä voimia siirtävänä. (2, s.105.)

Hitsin a-mittana käytetään levyn ja palkin kulmaan muodostuvan suurimman kolmion korkeutta. Pienahitsin pienimmäksi a-mitaksi on määritetty 3 mm. Efektiiäinen a-mitta on havainnollistettu kuvassa 6. (2, s.106.)



KUVA 6. Pienahitsin efektiivinen a-mitta (5, s.45)

Yksinkertainen menetelmä

Hitsin kestävyuden laskemiseksi on määritetty kaksi tapaa. Yksinkertaistettua menetelmää käytetään käsinlaskussa. Yksinkertaisessa menetelmässä vaikuttavaa voimaa käsitellään pelkästään leikkauksena. Yksinkertainen menettely johtaa ylimitoitukseen, mikäli hitsiin vaikuttaa muu kuin leikkausvoiman suuntainen voima. (1, s. 353.)

Yksinkertaisessa menettelyssä mitoitusehto on kaavan 10 mukainen (5, s.47).

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad \text{KAAVA 10}$$

$F_{w,Ed}$ = hitsin pituusyksikköä kohti vaikuttavan voiman mitoitusarvo

$F_{w,Rd}$ = hitsin kestävyuden mitoitusarvo, joka lasketaan kaavasta 11 (5, s.47)

$$F_{w,Rd} = f_{yw,d} a \quad \text{KAAVA 11}$$

a = hitsin a-mitta

$f_{yw,d}$ = hitsin leikkauslujuuden mitoitusarvo (N/mm²), joka saadaan kaavasta 12 (5, s.47)

$$f_{yw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{KAAVA 12}$$

f_u = heikomman liitettävän osan murtolujuus (N/mm²)

γ_{M2} = Kestävyuden osavarmuusluku, käytetään arvoa 1,25

β_w = hitsin lujuudesta riippuva korrelaatiokerroin. Kerroin määritetään taulukosta 5

TAULUKKO 5. Pienahitsin korrelaatiokerroin (5, s.47)

Teräslaji	Hitsin lujuuskerroin β_w
S235	0,8
S275	0,85
S355	0,9
S420	1,0
S460	1,0
S500-S700	1,0

Komponenttimenetelmä

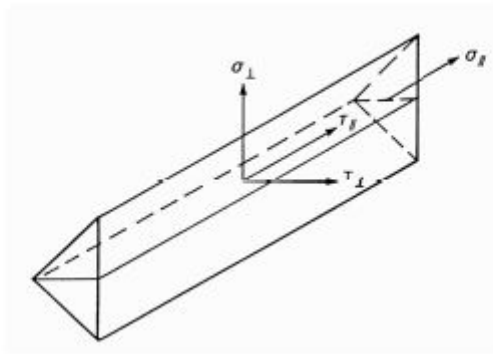
Hitsin kestävyuden tarkempaan tarkasteluun käytetään komponenttimenetelmää. Komponenttimenetelmässä voimat jaetaan hitsin akselin ja laskentapinnan suuntaisiin komponentteihin. Komponentit on havainnollistettu kuvassa 7. Akselin suuntainen normaalijännitys σ_{\parallel} ei vaikuta kestävyuden laskentaan, joten sitä ei huomioida laskennassa. Hitsin pinta-alan mitoitusarvona käytetään A_w , joka saadaan kaavasta 13. (5, s.45 - 46.)

$$A_w = \sum a l_{eff}$$

KAAVA 13

a = hitsin a-mitta (mm)

l_{eff} = hitsin pituus (mm)



KUVA 7. Pienahitsin jännityskomponentit (5, s.46)

σ_{\perp} = laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys

σ_{\parallel} = hitsin akselin suuntainen jännitys

τ_{\perp} = akselia vastaan kohtisuora leikkausjännitys

τ_{\parallel} = akselin suuntainen leikkausjännitys

Hitsin kestävyys on riittävä, jos seuraavat kaavan 14 ja 15 mukaiset mitoitus ehdot on voimassa (5, s.46).

$$\sqrt{\sigma_{\perp} + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad \text{KAAVA 14}$$

$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} \quad \text{KAAVA 15}$$

f_u = hitsin vetolujuus (N/mm²)

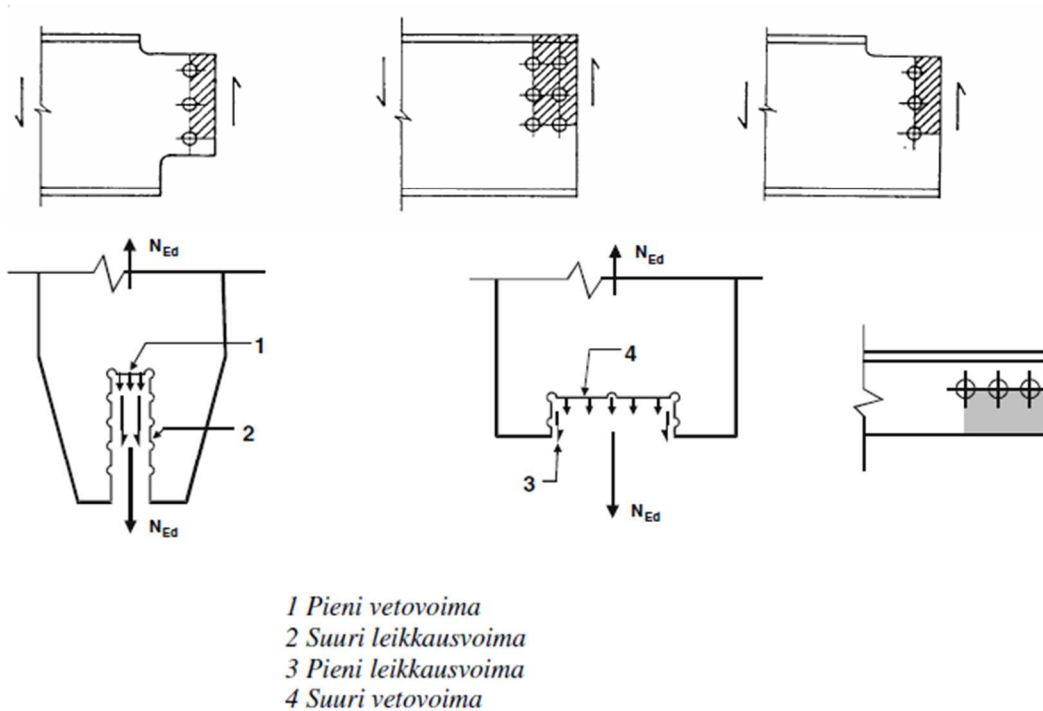
β_w = korrelaatiokerroin, taulukosta 5

γ_{M2} = 1,25

Tasakylkisille pienahitseille kaava 14 muodostuu aina määrääväksi (1, s.349).

2.2.5 Sekundääripalkin palamurtuminen

Palamurtumisessa tarkastellaan sekä leikkauspinnan että vedetyn pinnan murtumista samanaikaisesti. Murtuminen tapahtuu pitkin ruuvin keskilinjoja, kuten kuvassa 8 on esitetty. Palamurtuminen voi tulla kyseeseen mitoittavana kestävyytinä, jos käytetään korkeaa teräslujuutta ja pieniä reunaetäisyyksiä. (1, s.340.)



KUVA 8. Palkin pään palamurtuminen (5, s.35)

Kun ruuviryhmä on symmetrinen ja siihen kohdistuu keskeinen kuorma, voidaan palamurtumisen mitoitusarvo laskea kaavasta 16 (5, s.34).

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

KAAVA 16

A_{nt} = vedetyn osan pinta-ala (mm²)

A_{nv} = leikkauksen rasittama pinta-ala (mm²)

f_u = palkin vetomurtolujuus (N/mm²)

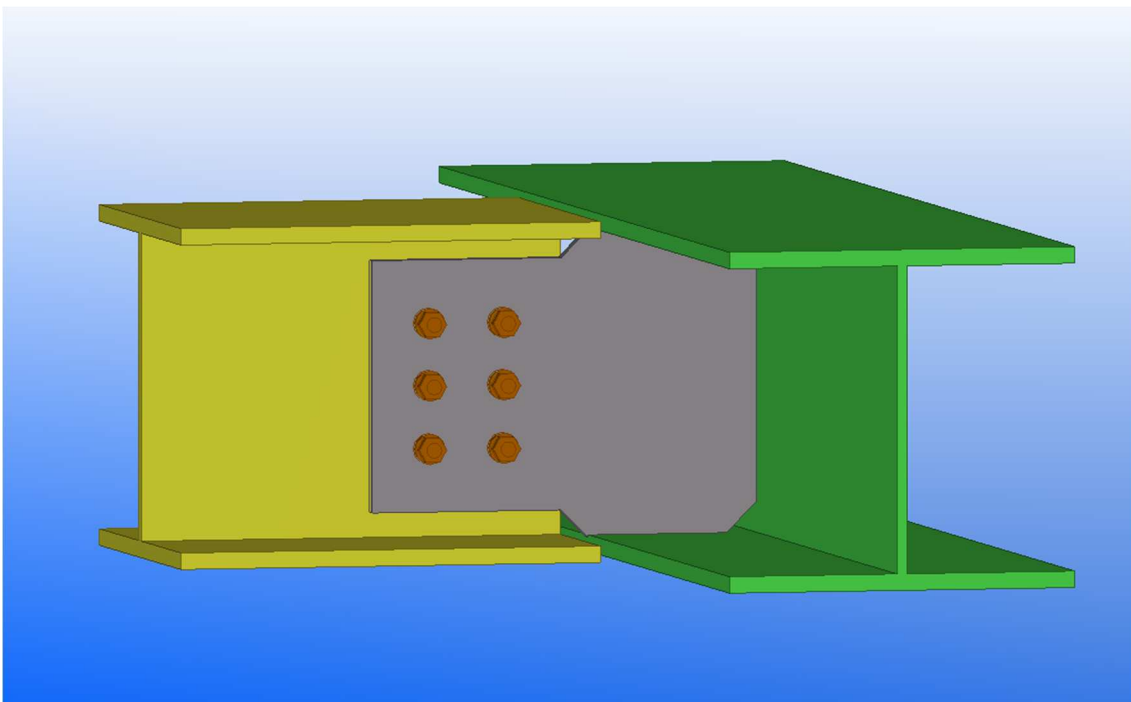
f_y = palkin myötöraja (N/mm²)

γ_{M2} = 1,25

γ_{M0} = 1,0

2.3 Palkki-palkkiliitos, jossa ulokkeellinen kiinnityslevy

Kuvassa 9 olevan ulokkeellisen palkki-palkki uumalevyliitoksen kestävyys laskenta noudattaa suurelta osin aiemmin luvussa 2.2 käsitellyä laskentaa. Kiinnityslevyn ulottuessa kauemmas primääripalkin uuman keskeltä, myös ruuviryhmään syntyvä epäkeskisyyden arvo e_k kasvaa. Tästä seuraa, että ruuviryhmään vaikuttavan momentin arvo kasvaa. Tässä liitoksessa epäkeskisyys mitataan primääripalkin keskeltä ensimmäisen ruuvirivin keskelle, sillä ruuviryhmän voidaan ajatella vastustavan levyn taivutusta. Tällöin tulee aiheelliseksi tarkastaa kiinnityslevyn leikkaus- ja taivutuskestävyys. (7, s.230; 8.)



KUVA 9. Palkki-palkki liitos, ulokkeellinen kiinnityslevy

2.3.1 Kiinnityslevyn leikkaus- ja taivutuskestävyys

Kiinnityslevyn leikkauskestävyys tarkastetaan kuten kohdassa 2.2.2. Leikkauspinta-alassa huomioidaan reikien vaikutus. Kiinnityslevyn minimipaksuus valitaan niin, että lommahdusta ei tapahdu. Kiinnityslevyn minimipaksuus saadaan johtamalla kaavasta 17. Muunnetun hoikkuuden arvona käytetään $\lambda_p = 0,673$. (6, s.16.)

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad \text{KAAVA 17}$$

σ_{cr} = kimmoteorian mukainen lommahdusjännitys, joka lasketaan kaavasta 18

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)a^2} \quad \text{KAAVA 18}$$

E = kimmokerroin, teräkselle käytetään arvoa 210 GPa

ν = poissonin luku, teräkselle käytetään arvoa 0,3

a = jäykistämättömän levyosan pituus

Kaavasta 17 voidaan ratkaista kiinnityslevyn minimipaksuus. Levyn minimipaksuus lasketaan kaavan 19 mukaan.

$$t_{min} = \sqrt{\frac{12(1-\nu^2)a^2 f_y}{\lambda_p^2 \pi^2 E}} \quad \text{KAAVA 19}$$

Ruuvien välissä tapahtuvan paikallisen lommahtamisen välttämiseksi kiinnityslevyn minimipaksuutta rajaa myös kaavassa 20 esitetty ehto (5, s.24).

$$\frac{p_1}{t_{min}} \leq 9\varepsilon \quad \text{KAAVA 20}$$

Koska kiinnityslevyn lommahdus on estetty, taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kimmoteorian mukaan poikkileikkausluokassa 3. Taivutuskestävyyden laskennassa huomioidaan leikkausvoimasta aiheutuva vähennys, kun

$V_{Ed} \geq 0,5V_{pl,Rd}$, jolloin taivutuskestävyyden mitoitusarvoa pienennetään arvolla $(1-\rho)$. (3, s.57.)

Pienennystekijän ρ arvo saadaan laskettua kaavan 21 mukaisesti (2, s.57).

$$\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2 \quad \text{KAAVA 21}$$

V_{Ed} = leikkausvoiman mitoitusarvo (kN)

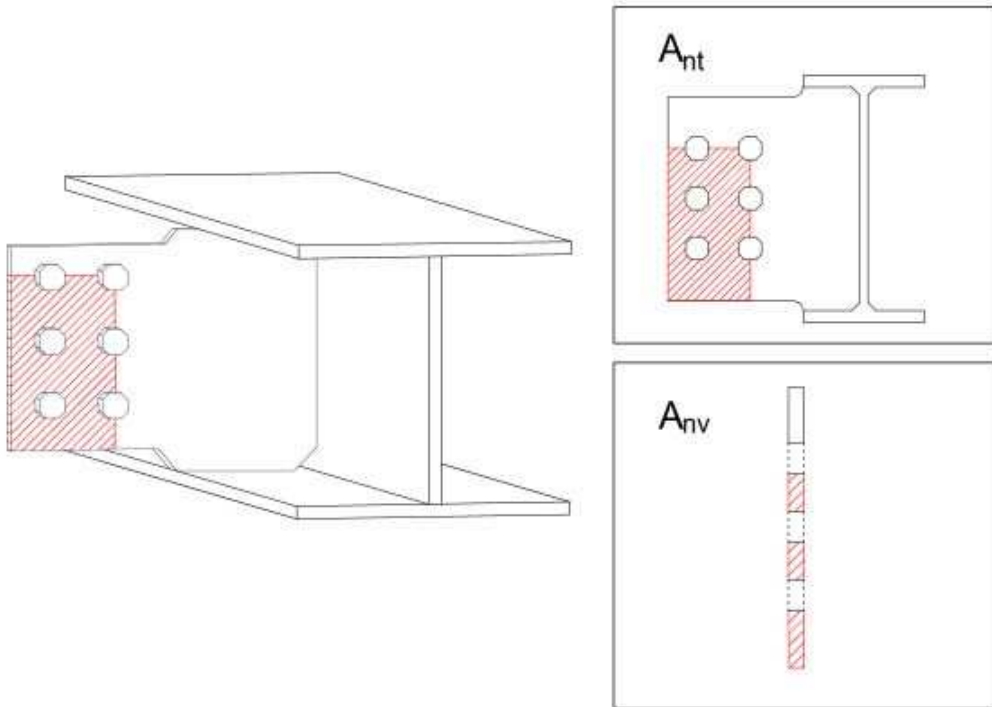
$V_{pl,Rd}$ = plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyys (kN)

Taivutuskestävyyden mitoitusarvo lasketaan käyttäen pienennettyä lujuutta $f_{yr} = (1-\rho)f_y$ kaavan 22 mukaan.

$$M_{el,V,Rd} = \frac{W_{el}(1-\rho)f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{KAAVA 22}$$

2.3.2 Kiinnityslevyn palamurtuminen

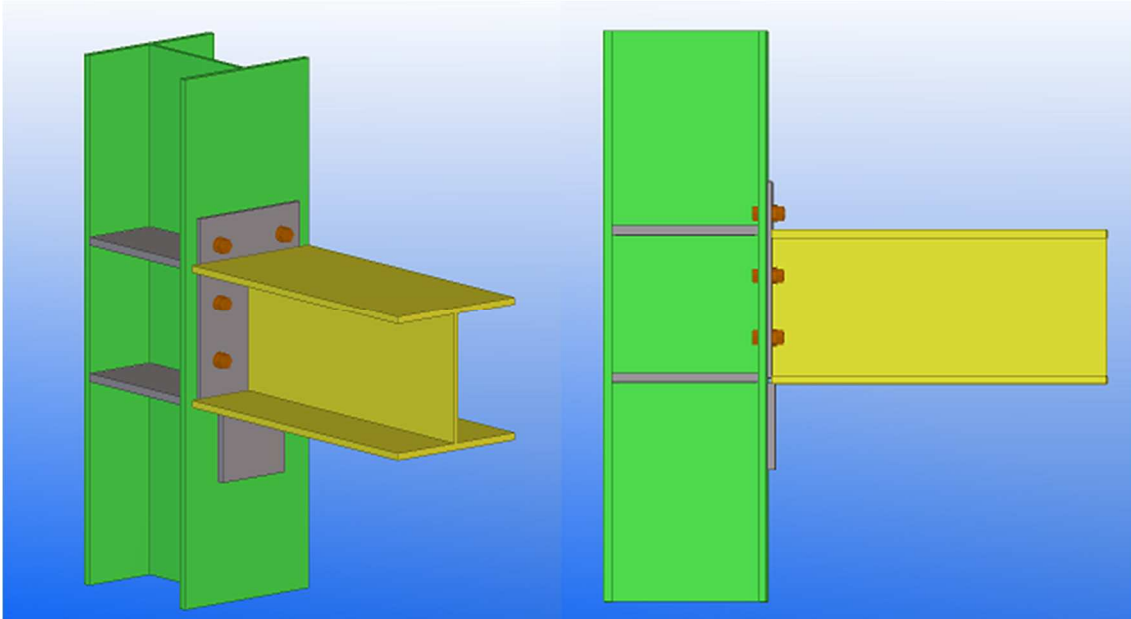
Kiinnityslevyn ulottuessa primääripalkin laippojen ulkopuolelle tulee aiheelliseksi tarkastaa myös kiinnityslevyn palamurtuminen. Laskentaan käytetään samoja kaavoja kuin tarkasteltaessa sekundääripalkin palamurtumista luvussa 2.2.5. Kuvassa 10 on havainnollistettu kiinnityslevyn leikkausrasitetun ja vedetyn pinnan murtumisaloja.



KUVA 10. Kiinnityslevyn palamurtuminen

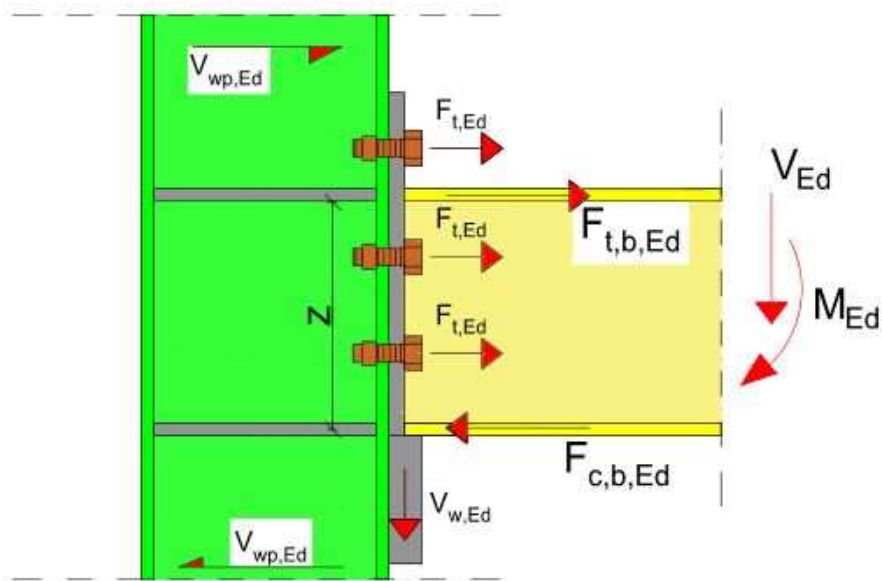
2.4 Pilari-palkki päätylevyliitos

Kuvan 11 mukaisessa päätylevyliitoksessa palkin päähän on hitsattu levy, joka on ruuveilla kiinnitetty pilarin laippaan. Pilarin kestävyuden parantamiseksi on käytetty hitsattuja jäykisteitä palkin kummankin laipan kohdalla. Tarkasteltava liitos pidetään jäykkänä liitoksena, jota rasittaa, sekä leikkausvoima että taivutusmomentti. Suositeltavaa on käyttää palkin alla pilarin laippaan hitsattua tukilevyä, joka ottaa palkissa vaikuttavan leikkauksen ja päätylevyn ruuvit toimivat ainoastaan vedettyinä. Mikäli tukilevyä ei käytetä, tulee ruuvien kestävyys tarkastella yhdistetyn leikkauksen ja vedon osalta. (9, s.409.)



KUVA 11. Pileri-palkki päätylevyliitos

Liitoksessa puristuskeskiön oletetaan sijaitsevan palkin puristetun laipan keskilinjalla. Momenttivarren arvona voidaan käyttää puristuskeskiön etäisyyttä kahden äärimmäisen vedetyn ruuvirivin keskilinjasta. Kuvassa 12 momenttivartta on merkitty muuttujalla z . Pileriin kiinnitetyn palkin ylälaippa on vedetty ja alalaippa puristettu. Pilarin uumassa vaikuttava leikkausrasitus on huomioitu tarkastamalla uuman leikkauskestävyys luvussa 2.4.1. (5, s.94.)



KUVA 12. Kiinnityksen vaikuttavat rasitukset

Päätylevyn paksuus valitaan niin, ettei lommahdusta tapahdu. Minimipaksuus saadaan kaavasta 23 (6, s.16).

$$t_{min} = \frac{b_p}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma\lambda_p}}$$

KAAVA 23

b_p = päätylevyn leveys (mm)

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$$

k_σ = lommahduskerroin

$\lambda_p=0,748$ muunnettu hoikkuus

2.4.1 Leikkauskapasiteetti

Pilari-palkkiliitoksessa tulee tarkastella sekä palkin että pilarin leikkauskestävyys. Palkin poikkileikkauksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan ku-

ten kohdassa 2.2.2. Käsiteltävässä päätylevyliitoksessa on pilarin uumaan hitsattu jäykisteet, jotka lisäävät sen leikkauskestävyyttä. Poikittaiset jäykisteet tulee asentaa liittyvän palkin laippojen kohdalle. Pilarin uuman plastisuusteorian mukainen leikkauskestävyyden mitoitusarvo lasketaan kaavan 24 mukaan. (5, s.77-78.)

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,ww}A_{vc}}{\sqrt{3}\gamma_{M0}}$$

KAAVA 24

$f_{y,wc}$ = pilarin uuman myötöraja (N/mm²)

A_{vc} = pilarin uuman leikkauspinta-ala (mm²)

γ_{M0} = 1,0

Jäykisteistä saatava lisäys leikkauskestävyyteen saadaan kaavasta 25 (4, s.78).

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s}$$

KAAVA 25

Leikkauskestävyyden lisäys ei kuitenkaan saa ylittää kaavan 26 mukaista arvoa (4, s.78).

$$V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s}$$

KAAVA 26

d_s = jäykisteiden keskilinjojen välinen etäisyys (mm)

$M_{pl,fc,Rd}$ = Pilarin laipan plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)

$M_{pl,st,Rd}$ = Jäykisteen plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)

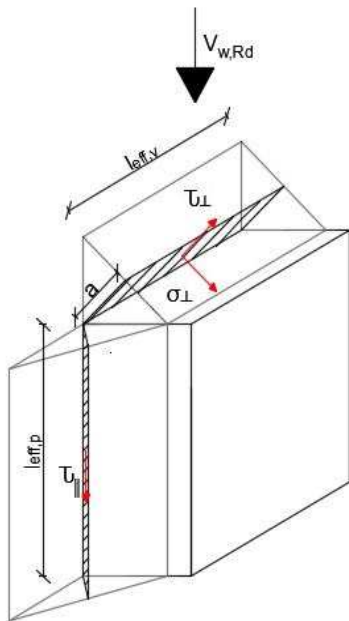
2.4.2 Hitsien kestävyys

Päätylevyn hitsien kestävyys

Päätylevy hitsataan liittyvään palkkiin kaksipuoleisella pienahitsillä. Voimia siirtävänä hitsinä käsitellään palkin uuman ja levyn välistä hitsiä. Hitsin efektiivinen mitta l_{eff} on yhtä suuri kuin palkin uuman korkeus h_w . Hitsin kestävyys lasketaan käyttäen kohdassa 2.2.4 esiteltyä komponenttimenetelmää.

Tukilevyn hitsit

Tukilevyn hitsit mitoitetaan palkin leikkaukselle. Hitsin kestävyys laskenta tehdään komponenttimenetelmällä kuten kohdassa 2.2.4. Kuvassa 13 on havainnollistettu tukilevyn hitseissä vaikuttavia jännityksiä.



KUVA 13. Tukilevyn hitsien jännitykset

Tukilevyn pystysuuntaisille hitseille tulee akselin suuntaista jännitystä, joka lasketaan kaavan 27 mukaan (10).

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{w,Rd}}{2a_{eff}}$$

KAAVA 27

Tukilevyn vaakasuuntaisille hitseillä voidaan lisätä kestävyyttä huomioimalla ne kestävyuden laskennassa. Tukilevyn poikittaissuuntaiset hitsit käsitellään 3 mm pienahitseinä, joille tulee kohtisuoraa normaalijännitystä kaavan 28 mukaan (10).

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{V_{w,Rd}}{2\sqrt{2}a_{eff}}$$

KAAVA 28

2.4.3 Ruuveihin vaikuttavat voimat

Liitoksessa tulee tarkastaa ruuvien kestävyys yhdistetyn leikkauksen ja vedon osalta. Suositeltavaa on kuitenkin käyttää päätylevyn alla tukilevyä, joka ottaa liitoksessa vaikuttavan leikkausvoiman. Tällöin ruuvien kestävyys tarkastetaan vain vedon osalta. Leikkauskestävyyden arvo lasketaan kohdan 2.2.3 mukaan. Yksittäisen ruuvin vetokestävyys saadaan kaavasta 29. (5, s.28.)

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

KAAVA 29

$k_2 = 0,63$ uppokantaisille ruuveille, muille käytetään arvoa 0,9

f_{ub} = ruuvien vetomurtolujuus (N/mm²)

A_s = ruuvien jännityspinta-ala

$\gamma_{M2} = 1,25$

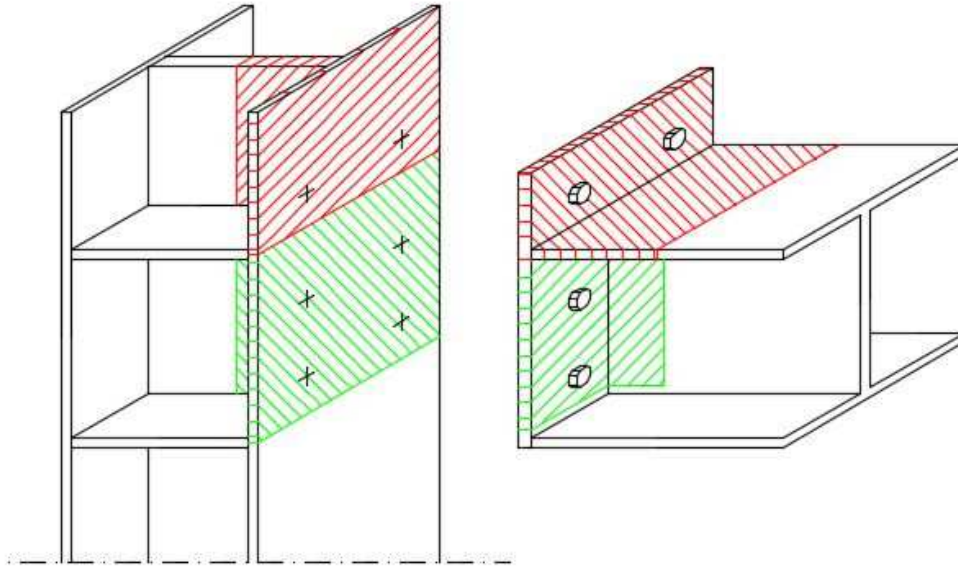
Mikäli liitoksessa ei käytetä tukilevyä, tulee tarkastaa, että vedon ja leikkauksen yhteisvaikutukselle kaavassa 30 annettu ehto täyttyy (5, s.28).

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

KAAVA 30

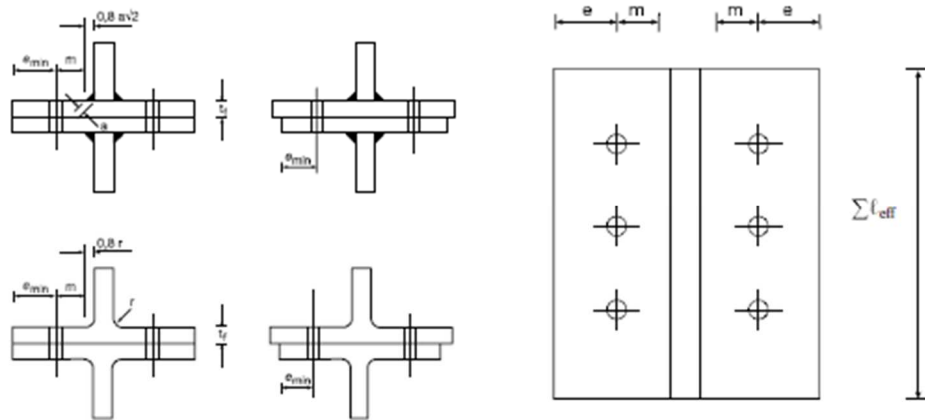
2.4.4 Ekvivalentti T-osa

Ekvivalenttia T-osaan käytetään mallinnettaessa pilarin laipan ja palkin päätylevyn taivutusta. Jäykistetty laippa mallinnetaan erillisinä T-osina. T-osat mallinnetaan sekä pilarin että palkin päätylevyn puolelta jäykisteiden molemmin puolin, kuten kuvassa 14 on esitetty. (5, s.85.)



KUVA 14. Ekvivalentin T-osan mallintaminen päätylevyliitoksessa

T-osan tehollinen pituus l_{eff} on teoreettinen pituus eikä välttämättä vastaa todellista pituutta. T-osan mitat valitaan kuvan 15 mukaan.

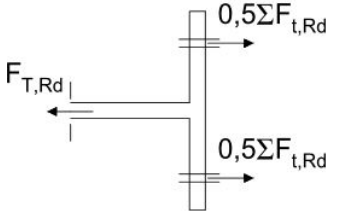
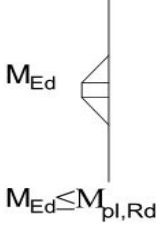


KUVA 15. Ekvivalentin T-osan mitat (5, s.73)

T-osan kestävyysmitoitussarvo lasketaan jokaiselle ruuviriville. Jokaisen T-osan kohdalla tulee tarkastaa kolme murtumismallia, jotka ovat täyden mekanismin syntyminen pilarin laipassa, ruuvien murtuminen laipan myötäessä tai ruuvien murtuminen. Murtumismuotojen laskentakaavat on esitelty taulukossa 6. (1, s.324.)

TAULUKKO 6. T-osan kestävyysmitoitussarvo (1, s.382; 5, s.74)

MURTUMISMALLI		VOIMAKUVIO	MOMENTTIKUVIO
Täyden mekanismin syntyminen	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd}}{m}$		
Ruuvien murtuminen laipan myötäessä	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,Rd} + n\Sigma F_t}{m}$		

<p>Ruuvien murtuminen</p>	$F_{T,3,Rd}$ $= \Sigma F_{t,Rd}$		
---------------------------	----------------------------------	--	---

$$M_{pl,Rd} = 0,25 \Sigma l_{eff} t_f f_y / \gamma_{M0}$$

KAAVA 31

l_{eff} = T-osan tehollinen pituus

t_f = käsiteltävän osan paksuus

f_y = nimellinen myötölujuus

Pilarin laipan taivutus

Pilarin laipan taivutuskestävyys tarkastetaan laskemalla jokaisen vedetyn yksittäisen ruuvirivin kestävyys. Pilarin laippa mallinnetaan kahtena ekvivalenttina T-osana, joista yksi muodostuu jäykisteen yläpuolisesta vedetystä ruuvirivistä ja toinen jäykisteen alapuolisista riveistä. Taulukossa 7 on annettu tehollisten pituuksien laskentakaavat kunkin tapauksen kohdalla. Molemmista T-osista tarkastetaan kaikki murtumismuodot taulukon 6 mukaan. Näistä määräävä valitaan laipan taivutuksen kestävyuden mitoitusarvoksi. (5, s.85.)

TAULUKKO 7. Pilarin jäykistetyn laipan tehollinen leveys (5, s.86)

Ruuvirivin sijainti	Ruuviriviä tarkastellaan yksittäisenä ruuvirivinä		Ruuviriviä tarkastellaan ruuvirivien ryhmän osana	
	Pyöreä myötökuvio $l_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{eff,nc}$	Pyöreä myötökuvio $l_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{eff,nc}$
Jäykisteen viereinen ruuvirivi	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Muu sisempi ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Muu reunan ruuvirivi	Pienempi arvoista: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Pienempi arvoista: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	Pienempi arvoista: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Pienempi arvoista: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Jäykisteen viereinen reunimmainen ruuvirivi	Pienempi arvoista: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	Ei relevantti	Ei relevantti
Murtumismalli 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mutta $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mutta $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Murtumismalli 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	
α määritetään kuvasta 6.11.				

Päätylevyn taivutus

Päätylevyn taivutuskestävyys mallinnetaan vedetyn ekvivalentin T-osan mukaan. Päätylevyn kestävyudeksi valitaan T-osan kestävyuden mitoitusarvoista pienin. T-osan kestävyuden määrittämiseksi tarkastellaan jokainen vetoa siirtävä ruuvirivi tai ruuvirivien ryhmä. Mikäli liitoksessa käytetään jäykisteitä, käsitellään jäykisteen molemmin puolin olevat ruuvirivit erillisinä T-osina. T-osan tehollinen leveys määritellään taulukon 8 mukaan. (5, s.86.)

TAULUKKO 8. Päätylevyn teholliset leveydet (5, s.87)

Ruuvirivin sijainti	Ruuviriviä tarkastellaan yksittäisenä ruuvirivinä		Ruuviriviä tarkastellaan ruuvirivien ryhmän osana	
	Pyöreä myötökuvio $l_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{eff,nc}$	Pyöreä myötökuvio $l_{eff,cp}$	Ei-pyöreä myötökuvio $l_{eff,nc}$
Palkin vedetyn laipan ulkopuolella oleva ruuvirivi	Pienin arvoista: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	Pienin arvoista: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Palkin vedetyn laipan alapuolella oleva ensimmäinen ruuvirivi	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Muu sisempi ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Muu reunan ruuvirivi	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Murtumismalli 1:	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mutta $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$ mutta $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Murtumismalli 2:	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	
α määritetään kuvasta 6.11.				

2.4.5 Pilarin uumaosan veto

Kun uumaan kohdistu poikittaista vetoa, sen kestävyys määritetään kaavan 32 mukaan (5, s.82).

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$$

KAAVA 32

ω = leikkausjännityksen huomioon ottava pienennystekijä.

$b_{eff,t,wc}$ = uuman tehollinen leveys (mm)

t_{wc} = pilarin uuman paksuus (mm)

$f_{y,wc}$ = pilarin uuman myötöraja (N/mm²)

$\gamma_{M0} = 1,0$

Pienennystekijän arvo riippuu muunnosparametrin β ja sen arvo määritetään taulukosta 9. Uuman teholliseksi leveydeksi $b_{eff,t,wc}$ valitaan aiemmin määritetty pilarin laippaa kuvaavan efektiivisen T-osan leveys. (5, s.82.)

TAULUKKO 9. Pienennystekijä määrittäminen (4, s.80)

Muunnosparametri β	Pienennystekijä ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2(b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$
A_{vc} on pilarin leikkauspinta-ala, ks. 6.2.61; β on muunnosparametri, ks. 5.3(7).	

2.4.6 Palkin puristettu laippa ja uuma

Palkin laipan ja viereisen uuman puristuskestävyyden resultantin oletetaan vaikuttavan puristuskeskiössä. Resultantin suuruus saadaan kaavasta 33. (5, s.89.)

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{(h - t_{fb})} \quad \text{KAAVA 33}$$

$M_{c,Rd}$ = poikkileikkauksen taivutuskestävyyden mitoitusarvo (Nmm)

h = palkin korkeus (mm)

t_{fb} = palkin laipan paksuus (mm)

2.4.7 Palkin vedetty uuma

Kun liitoksessa käytetään ruuveilla kiinnitettyä päätylevyä, saadaan palkin vedetyn uuman kestävyys määritettyä kaavasta 34 (5, s.90).

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}}$$

KAAVA 34

$b_{eff,t,wb}$ = palkin uuman tehollinen leveys (mm)

t_{wb} = palkin uuman paksuus (mm)

$f_{y,wb}$ = palkin uuman myötöraja (N/mm²)

$\gamma_{M0} = 1,0$

Teholliseksi leveydeksi $b_{eff,t,wb}$ valitaan kohdassa 2.4.4 määritetty päätylevyn tai vutuksen perusteella valittu T-osan tehollinen leveys (5, s.90).

2.4.8 Jäykisteiden kestävyden tarkastelu

Pilarin kestävyttä voidaan lisätä käyttämällä poikittaisia tai diagonaalijäykisteitä pilarin laippojen välissä. Poikittaisjäykisteet asennetaan kiinnittyvän palkin laippojen kohdalle. (5, s.78.)

Jäykisteitä käsitellään päistään nivellellisesti tuettuina sauvoina. Jäykisteiden kestävyys tarkastetaan puristuspuolella olevien jäykisteiden puristuskestävyyden osalta kaavan 35 mukaan. (3, s.53.)

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

KAAVA 35

A= puristuspinta-ala (mm²)

f_y = jäykisteen myötöraja (N/mm²)

$\gamma_{M0} = 1,0$

Jotta lommahdusta ei tapahdu, tulee jäykisteiden paksuuden olla suurempi kuin aiemmin kaavassa 18 esitetty minimipaksuus. Jäykisteiden osalta käytetään muunnetun hoikkuuden arvona lukua $\lambda_p = 0,673$. (6, s.16.)

3 LASKENTAPOHJIEN ESITTELY

Opinnäytetyössä laadittiin luvussa 2 tarkastelluista liitoksista Excel-pohjaiset mitoitusohjelmat. Palkki-palkki liitosten mitoitusohjelmat laskevat liitoksen leikkauskestävyyden ja pilari-palkki liitoksessa leikkauskestävyyden lisäksi myös taivutuskestävyyden. Kussakin mitoitusohjelmassa on mahdollista mitoittaa kymmenen erilaista liitosta samanaikaisesti. Laskentapohjat tehtiin noudattamaan yhtenäistä ulkoasua.

3.1 Laskentapohjien ulkoasu

Laskentapohjat on jaettu neljään eri välilehteen, joista itse liitoksen mitoitus tapahtuu mitoitustaulukko-välilehdellä. Välilehdellä on esitelty liitoksen geometria, kestävyksien mitoitusarvot sekä apuarvot, jotta laskennat välitulokset ovat tarkasteltavissa.

Tuloste-välilehden tarkoituksena on selkeyttää tuloksia. Välilehdelle on koottu jokaisen liitoksen mitoittava tapaus ja sen kestävyys sekä lisäksi liitoksen merkittävimmät geometriset tiedot. Tuloste-välilehti on tarkoitettu liitettäväksi osaksi laskentaraporttia eikä käyttäjällä ole valtuuksia vaikuttaa soluihin valittaviin arvoihin tällä välilehdellä.

Ohje-välilehdellä on lyhyesti esitelty pohjien toimintaa sekä käyttöä. Laskenta-teoria-välilehdelle on koottu kunkin liitoksen mitoituksessa käytetyt Eurokoodin mukaiset kaavat ja avattu niiden käyttöä käsitellyssä liitoksessa.

3.2 Laskentapohjien käyttö

Suunnittelijan tulee itse valita liitoksen geometriset tiedot. Geometrian valinta tapahtuu sinisellä värjättyissä soluissa joko syöttämällä luvut käsin tai valitsemalla arvo pudotusvalikosta. Raja-arvojen syöttösolujen yläpuolella näkyvät punaisella värjätty luvut ovat suositusarvoja, jotka eivät osallistu laskentaan. Lasken-

tapohjassa on mahdollistettu ainoastaan valssattujen IPE-, HEA- ja HEB-profiilien käyttö. Profiilien poikkileikkaustiedot määräytyvät automaattisesti profiilikirjasto-välilehdelle syötettyjen arvojen mukaan.

Geometriaa suunniteltaessa soluihin syötettävät arvot on rajattu niin, että ne täyttävät EN1993-1-8:ssa annetut ehdot. Näitä ehtoja on tarkasteltu tämän opinäytetyön luvussa 2. Geometrian lisäksi suunnittelijan tulee valita sopivat lujuudet poikkileikkauksille, ruuveille ja hitseille. Lujuudet valitaan taulukossa 10 näkyvästä teräslajien valinta sarakkeesta. Ohjelma antaa ilmoituksen, mikäli ehdot eivät täyty ja laskenta keskeytyy. Jos solussa oleva arvo menee raja-arvojen ulkopuolelle muita soluja täytettäessä, kyseisen solun alle ilmestyy punainen x-merkintä. Laskennan oletuksena on, että ruuvit ovat liitoksessa symmetrisesti. Laskentataulukkoon on lisätty taulukon 10 mukainen periaatekuva liitoksesta havainnollistamaan liitoksen mittoja.

TAULUKKO 10. Geometriatietojen syöttö

Teräslajit	f_y	f_u	β_w
	N/mm ²		
Primääripalkki	355	490	
Sekundääripalkki	355	490	
Levy	355	490	
Hitsi	355	490	0,9
Ruuvit	8,8	640	800
Ruuvirivien lukumäärä	2		
Alalaippa leikattu	EI		

		Lähtöarvot						Ruuvit					hitsi	Liitoslevy				
Primääri palkki	Sekundääri palkki	h	b	tf	tw	r	d	p1	n	e1	e2	p2	a	lp	bp	tp	s	h1
IPE240	LIITOS 1.	240	120	9,8	6,2	15		35		25	25	35						
	IPE140	140	73	6,9	4,7	7	10	40	2	25	25	35	5	125	124	15	5	0

Palkki-palkkiliitoksissa on mahdollisuus valita, käytetäänkö ehjää vai leikattua alalaippaa. Alalaipan leikkaus on huomioitu sekundääripalkin leikkauspinta-alan vähennyksenä. Palkki-palkkiliitoksessa, jossa sekundääripalkki kiinnittyy primääripalkkiin hitsattuun jäykisteeseen, tehtiin oletus, että liitoksessa käytetään

vain yhtä ruuviriviä. Todettiin, että raja-arvojen ja ruuvikokojen puolesta hyvin harvoin tulee tapauksia, joissa kahta ruuviriviä olisi annettujen raja-arvojen täyttyessä mahdollista käyttää. Toisessa palkki-palkki-liitoksessa, jossa kiinnityslevy ulottuu primääripalkin ulkopuolelle, on mahdollistettu useamman ruuvirivin käyttö.

Taulukossa 11 on osa Excelin laskentapohjasta, johon on koottu liitoksen komponenttien kestävyudet. Mitoittavaksi kestävyudeksi valikoituu komponenttien kestävyyksistä pienin sekä tapauksen numero äärimmäiseksi oikealla olevaan sarakkeeseen.

TAULUKKO 11. Liitoksen kestävyden valinta

LEIKKAUSKESTÄVYYS										
Palkin uuman leikkauskapasiteetti	Palkin pään leikkauskapasiteetti reikien kohdalla	Uuman reunapuristuskestävyys	Levyn reunapuristuskestävyys	Ruuvien leikkauskapasiteetti resultanttivoimalle	Hitsin kestävyys	Sekundääripaikkin palamurtuminen	Kiinnityslevyn leikkauskapasiteetti	Kiinnityslevyn taivutuksen huomioiva leikkaus	Kiinnikelevyn palamurtuminen	MITOITAVA
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	
$V_{pI,Rd}$ kN	$V_{I,pI,Rd}$ kN	$V_{Ub,Rd}$ kN	$V_{p,b,Rd}$ kN	$V_{v,Rd}$ kN	$V_{w,Rd}$ kN	$V_{eff,2,Rd}$ kN	$V_{p,pI,Rd}$ kN	$V_{p,pI,M,Rd}$ kN	$V_{p,eff,2,Rd}$ kN	V_{Rd} kN
156,7	135,5	102,7	416,3	65,6	282	110,9	384,3	144,7	384,6	5 65,6

Pilari-palkkiliitosten mitoitusohjelma noudattaa samankaltaista ulkoasua ja toimintaa kuin aiemmin esitetyjen palkki-palkki liitostenkin. Pilari-palkkiliitoksessa on mahdollisuutena valita, käytetäänkö tukilevyä, jolloin leikkausvoima siirtyy levyn kautta pilarille ja ruuvit toimivat pelkästään vedettyinä, vai toteutetaanko liitos ilman tukilevyä, jolloin ruuvit ovat sekä vedettyjä että leikkausvoiman rasittamia. Solu, joka valitsee mitoittavan kestävyuden, huomioi tukilevyn olemassaolon. Käytettävä tukilevy on määrätty vähintään yhtä paksuksi kuin päätylevy.

Muut levyn mitat tulee suunnittelijan valita itse. Tällöin suunnittelijan tulee huolehtia liitoksen järjestyksestä, jotta riittävä tukipinta-ala saavutetaan tai ettei tukilevyn koko kasva suhteettoman suureksi. Päätylevyissä käytetään kahta pitkitäissuuntaista ruuviriviä. Liitoksessa on myös aina yksi ruuvirivi palkin ylälaipan yläpuolisella päätylevyn osalla ja, mikäli liitos tehdään ilman tukilevyä, tulee myös palkin alalaipan alapuoliselle osalle sijoittaa yksi vaakasuuntainen ruuvirivi. Liitoksen geometrian syöttö on esitetty taulukossa 12.

TAULUKOSSA 12. Pilari-palkkiliitoksen geometrian valinta

Teräslajit	f_y	f_u	β_w
	N/mm ²		
Pilari	355	490	
Palkki	355	490	
Päätylevy	355	490	
Hitsi	355	490	1
Jäykisteet	235	360	
Ruuvit	10,9	900	1000
Uppokantaiset			
Tukilevy	Ei		

		Lähtöarvot						Ruuvit				hitsi	Päätylevy				Kannakelevy				Jäykisteet			
PILARI	PALKKI	h	b	t_f	t_w	r	d	n	p1	p2	e1	e2	a	h_p	b_p	t_p	h_kl	b_kl	t_kl	a_kl	b_s	l_s	t_s	a_s
		mm	mm	mm	mm	mm	mm	kpl	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
HEA200	LITOS 1.	190	200	10	6,5	18										9,0							8,0	
	IPE160	160	82	7	5	9	12	8	63	40	30	30	4	250	100	9	100	100	10	4	96,8	170	10	4,0

Pilari-palkkiliitoksessa lasketaan sekä leikkaus- että taivutuskestävyys. Ohjelma valitsee liitoksen leikkauskestävyydeksi pienimmän arvon neljästä ensimmäisestä sarakkeesta. Mitoittavan kestävyden valitseva solu huomioi liitoksessa käytettävän tukilevyn. Taivutuskestävyys kapasiteetin laskemiseksi on tehtävä leikkausrasituksen arvaus, jonka tulee olla suurempi kuin puolet plastisuusteorian mukaisesta kestävydestä. Ohjelma antaa ilmoituksen, mikäli oletus ei toteudu. Liitoksen taivutuskestävyys valitaan taulukossa 12 näkyvistä sarakkeista 5-13 riippuen siitä, käytetäänkö liitoksessa tukilevyä vai ei. Laskentapohjille suoritettiin tarkastus käsin laskennalla erilaisia esimerkkitapauksia käyttäen.

TAULUKKO 12. Mitoittava kestävyys pilari-palkkiliitoksessa

LEIKKAUSKESTÄVYYS					TAIVUTUSKESTÄVYYS										
Palkin uuman leikkauskapasiteetti	Pilarin uuman leikkauskapasiteetti	Kannakkelevyn hitsien kestävyys	Päätylevyn puristuskestävyys	Mitoittava	Leikkausvoima $20,5 V_{p,led}$	Ruuvien vetokestävyys	Ruuvien yhdistetty leikkaus ja veto	Päätylevyn hitsien kestävyys	Pilarin laipan taivutus	Päätylevyn taivutus	Pilarin uumaosan veto	Palkin puristettu laippa	Palkin vedetty uuma	Jäykisteiden puristuskestävyys	MITOITAVA
1.	2.	3.	4.			5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	13.	
$V_{pl,b,Rd}$ kN	$V_{wp,Rd}$ kN	$V_{kl,w,Rd}$ kN	$N_{c,Rd}$ kN	V_{Rd} kN	V_{Ed} kN	$M_{T,Rd}$ kNm	$M_{T,v,Rd}$ kNm	$M_{w,p,Rd}$ kNm	$M_{i,fc,Rd}$ kNm	$M_{j,ep,Rd}$ kNm	$M_{t,wc,Rd}$ kNm	$M_{c,fb,Rd}$ kNm	$M_{t,wb,Rd}$ kNm	$M_{c,s,Rd}$ kN	M_{Rd} kNm
197,9	376,5	386,0	319,5	1	100	43,7	22,7	30,1	26,6	36,3	83,1	43,3	51,4	80,5	6
				198											23

3.3 Kehitysideoita

Näissä mitoitusohjelmissa on mahdollista mitoittaa kymmenen liitosta samalle teräslajille sekä ruuvilujuudelle. Laskennan kannalta hyväksi voisi olla teräslajin valinta jokaiselle liitokselle erikseen. Tämä vaatisi kuitenkin pohjien ulkoasun uudelleen suunnittelua, jotta lisääntyvä parametrien määrä ei heikentäisi ohjelmien ymmärrettävyyttä.

Pilari-palkkiliitoksessa on yksinkertaistettu T-osan efektiivisen pituuden laskenta siten, että tekijän α arvoksi on oletettu minimiarvo $\alpha=4,45$. Tämä johtaa laskennan edetessä ylimitoitukseen. Mikäli α arvoa haluttaisiin tarkentaa, voitaisiin laskentaan lisätä taulukko, josta α :n arvo iteroituisi tarkemmin. Toinen vaihtoehto olisi, että suunnittelija itse syöttäisi haluamansa arvon. Tämä vaatisi kuitenkin suunnittelijan omaa perehtymistä ja lisäisi mahdollisten virheiden määrää.

4 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli perehtyä teräsrakenteisten liitosten laskentaan. Tavoitteena oli tehdä Eurokoodin mitoitusmääräyksiin pohjautuvat laskentapohjat kahdesta nivel-liitoksesta ja yhdestä momenttiliitoksesta. Mitoitus-taulukon lisäksi laskentapohjiin sisältyivät niiden käyttöohje ja laskentateorian tiivistelmä. Tarkasteltaviksi liitoksiksi valittiin Neste Jacobs Oy:ssa paljon käytössä olevat liitokset.

Liitosten laskennan ongelmia ovat laskennan työläys ja monimutkaisuus, sillä tarkastettavia komponentteja on useita. Kokenut suunnittelija kykenee arvioimaan aiempien tapausten perusteella, mikä on liitoksen heikon kohta. Laskentapohjissa tehty yksityiskohtainen tarkastelu antaa kuitenkin suunnittelijalle laajemman ja kokonaisvaltaisemman käsityksen liitosten toiminnasta.

Ongelmaksi teorian tietoa tutkittaessa ilmeni se, että kirjallisuudessa harvoin tarkastellaan liitoksia kokonaisuutena. Tavallisesti käsitellyt esimerkkitapaukset keskittyvät lähinnä yksittäisten komponenttien tarkasteluun.

Laskentapohjia tehdessä haasteeksi tuli parametrien runsaus. Etenkin liitoksen geometriaa suunniteltaessa oli haastavaa luoda mitoille sellaiset raja-arvot, jotka pätevät joka tilanteessa. Suunnitteluvaiheessa pyrittiin rajaamaan syötettävien parametrien määrä minimiin, jotta laskentapohjien käyttö pysyisi yksinkertaisena. Laskennasta tehtiin aluksi Excel:iin raakaversiot, joiden käyttöä testattiin esimerkkitapausten avulla. Koekäytössä huomattujen puutteiden perusteella laskentapohjat kehitettiin lopulliseen muotoonsa.

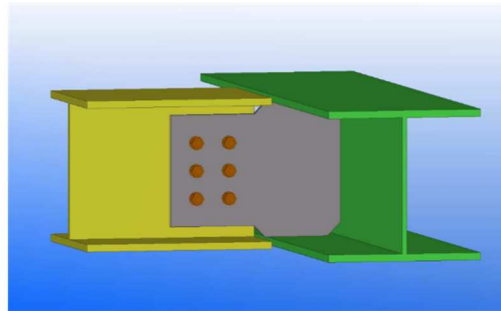
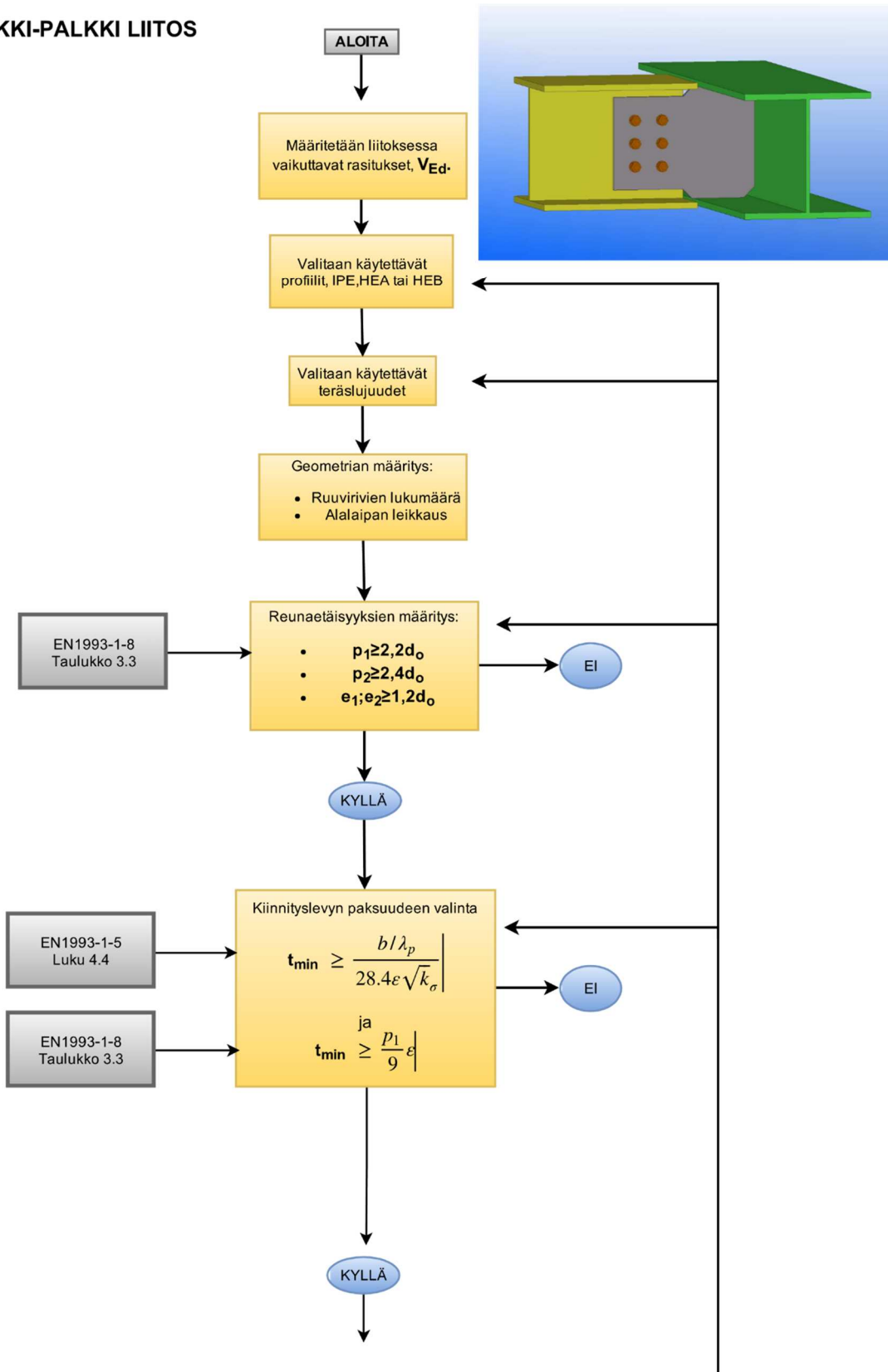
Ohjelmia tehtäessä huomattiin myös, että kaavojen syöttö on herkkää virheille, minkä vuoksi ohjelmat vaativat useita tarkastuskertoja. Pohjien tarkastus tehtiin käsin laskennalla, josta saatuja tuloksia verrattiin Excel-laskennan vastaaviin. Tarkastusta helpotti se, että laskentapohjissa on näkyvillä myös sekundääriset tulokset.

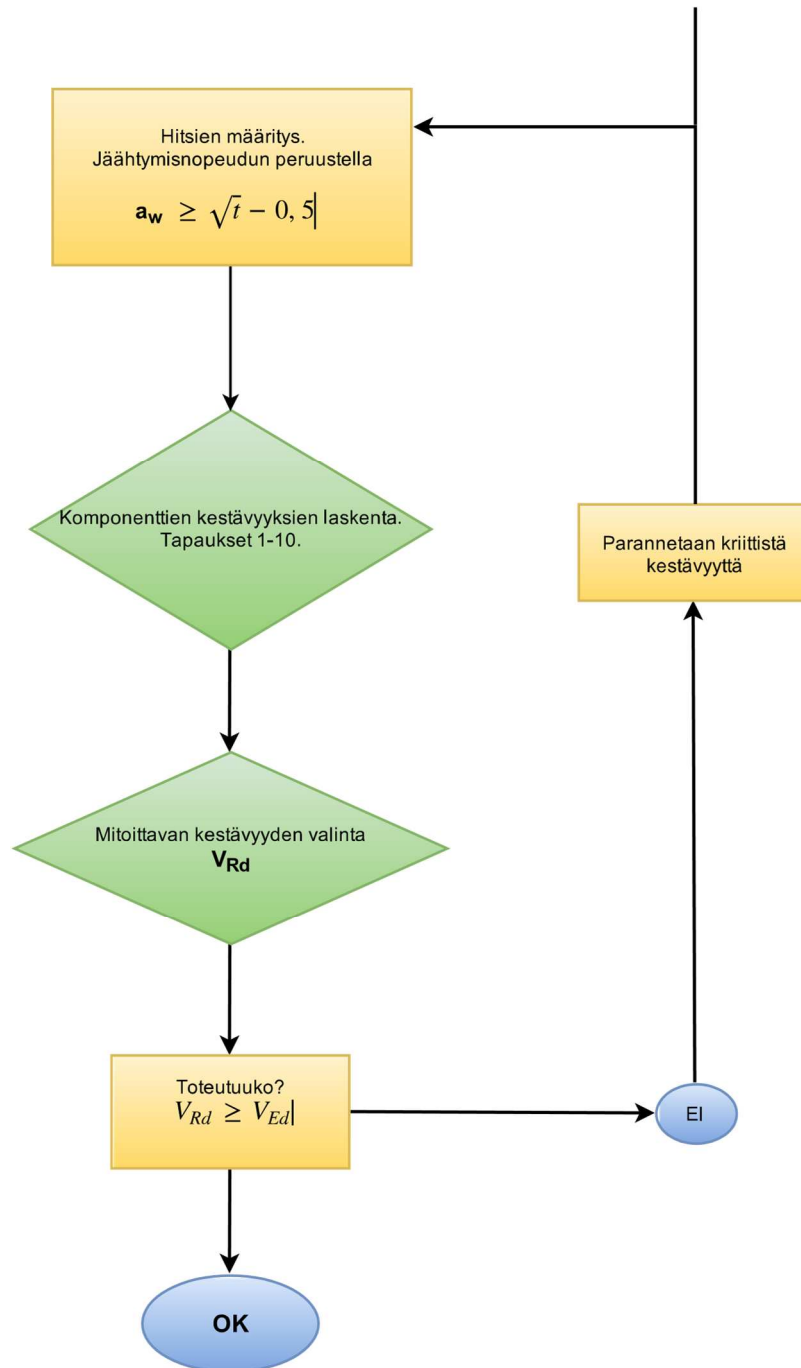
Työn tuloksena saadut laskentapohjat ovat koekäytössä tilaajalla, minkä jälkeen ne esitellään Neste Jacobs Oy:n rakennesuunnittelijoille, jotka voivat käyttää ohjelmia töissään. Laskentapohjia on mahdollista kehittää tulevaisuudessa toimivimmiksi, jos käytön yhteydessä syntyy uusia ideoita. Pohjien ulkoasua ja toimintaa voidaan hyödyntää myös muunlaisista liitoksista tehtäviin laskentapohjiin.

LÄHTEET

1. Hitsatut profiilit. 2010. Rautaruukki Oyj. Keuruu
2. Teräsrakenteiden suunnittelu ja mitoitus Eurocode 3-oppikirja. 2014. Teräsrakenneyhdistys ry. Helsinki
3. SFS EN1993-1-1. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
4. SFS EN1993-1-1. 2005. AC Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt, korjausliite. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
5. SFS EN1993-1-8. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-8 Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
6. SFS EN1993-1-5. 2005. Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-5 Levyrakenteet. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS.
7. Martin, Lawrence – Purkiss, John 2008. Structural design of steelwork to EN1993 and EN 1994. Oxford: Butterworth-Heinemann.
8. Lemetti, Sergei 2016. Manager, Civil & Structural Engineering, Neste Jacobs Oy. Keskustelu 19.1.2016.
9. Bradford, M.A – Gardner, L – Nethercot, D.A – Trahair, N.S 2010. The behaviour and design of steel structures to EC3. New York: Taylor and Francis.
10. Kuula, Kai 2015. T512804 Teräsrakenteet 2 4op. Opintojakson luennot syksyllä 2015. Oulu: Oulun ammattikorkeakoulu, tekniikan yksikkö.

PALKKI-PALKKI LIITOS





PILARI-PALKKI LIITOS

