

Teräsristikon liitoksen sitkeyden merkitys vaurion rajoittamisessa

Joonas Forsman

Opinnäytetyö

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Rakennustekniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä(t) Joonas Forsman	
Työn nimi Teräsristikon liitoksen sitkeyden merkitys vaurion rajoittamisessa	
Päiväys 27.04.2012	Sivumäärä/Liitteet 56/26
Ohjaaja(t) lehtori Matti Mikkonen ja DI Tapio Leino	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Finnmap Consulting Oy	
<p>Tiivistelmä</p> <p>Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, kuinka rakenneosan vauriota voidaan rajoittaa sitkeällä liitossuunnittelulla ennakoimattomassa onnettomuustilanteessa. Työ tehtiin Finnmap Consulting Oy:lle osana suunnittelun laadun parantamiseen liittyvää ohjeistusta. Työn tarkoitus on lisätä tietoisuutta sitkeän liitossuunnittelun merkityksestä laajojen sortumien välttämiseksi.</p> <p>Työssä esiteltiin aluksi rakenteiden suunnitteluperusteita ja -olettamuksia sekä kuinka liitoksen eri yksityiskohdat käyttäytyvät murtumistilanteessa. Seuraavaksi työssä selvitettiin toimintastrategia, jolla rakennuksen laaja sortuma voidaan rajata rakenneosan paikalliseksi vaurioksi. Selvityksen yhteydessä pohdittiin tekijöitä, jotka vaikuttavat analyyttisen laskentamallin todenmukaisuuteen. Tämän jälkeen tarkasteltiin esimerkkiliitosten erilaisia mahdollisia murtumistapoja ja arvioitiin liitoksen käyttäytymistä ylikuormitustilanteessa. Esimerkkiliitosten laskennassa käytettiin pääasiassa standardissa SFS-EN 1993-1-8 esitettyjä menetelmiä. Lisäksi yhdestä liitostyyppistä laadittiin FEM-laskentamalli Abaqus-ohjelmalla.</p> <p>Tutkimuksen tuloksena saatiin työ, joka antaa suunnittelijalle tietoa eri tavalla käyttäytyvistä teräs-rakenteiden liitosten yksityiskohdista ja näiden merkityksestä koko liitoksen toimintaan. Työn pohjalta voidaan soveltaa sitkeän liitossuunnittelun periaatteita myös muihin, kuin tässä työssä esitettyihin esimerkkiliitoksiin. Sitkeän liitossuunnittelun tärkeimmät periaatteet ovat liitoksen kaikkien murtumismuotojen tunnistaminen, näiden luokittelu ja ennen kaikkea analyyttisen liitosmallin todenmukaisuus. Mikäli liitoksen analyyttinen laskentamalli ei vastaa todellisuutta, tai liitoksen kestävyyttä kaikkien murtumismuotojen suhteen ei varmisteta, liitoksen sitkeää käyttäytymistä ei voida luotettavasti esittää. Liitoksen sitkeä käyttäytyminen voidaan varmistaa suunnittelemalla liitos siten, ettei sen heikoimmaksi kohdaksi jää mikään sellainen komponentti, jonka murtumismekanismi on hauras tai sillä ei juurikaan ole sitkeyttä.</p>	
Avainsanat teräsristikko, K-liitos, murtumistavat, sitkeys, kiertymiskyky, laippaliitos, liitoslevy, FEM, abaqus	
Luottamuksellisuus Julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme In Construction Engineering			
Author(s) Joonas Forsman			
Title of Thesis Significance of Connection Ductility of Steel Truss in Limiting Failure			
Date	27 April 2012	Pages/Appendices	56/26
Supervisor(s) Mr Matti Mikkonen, Lecturer & Mr Tapio Leino, M.Sc.			
Client Organisation /Partners Finnmap Consulting Ltd			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to study the significance of connection ductility of steel trusses in order to limit the extent of failure in unidentified accidental incidents. The work was commissioned by Finnmap Consulting Ltd. The purpose of this thesis was to be a guide in ductile connection behavior.</p> <p>At first, general limitations and rules for connection design were studied and typical ductile and brittle failure mechanisms were introduced. Next the strategy for limiting the extent of failure and a correspondence between the real structure and the analytical model were considered. Lastly typical steel truss connections were studied and an evaluation of the resistances of every possible failure modes was made. Connection examples were studied adopting mainly methods introduced in standard SFS-EN 1993-1-8. In addition one example was analyzed with Abaqus-program.</p> <p>The result of this thesis was a guide which provides information about different failure mechanisms and the significance of these mechanisms in connection behavior. The principles of ductile connection design can be applied in other connections based on information provided in this thesis. The principles of ductile connection design are identifying all possible failure modes, correct classification of these failure modes and ensuring that the analytical model has a good correspondence with the real joint. If the analytical model does not respond to design assumptions or if the resistance of every possible failure modes is not evaluated ductile connection behavior cannot be guaranteed. In conclusion general ductility for connection can be reached by defining the resistance of ductile mechanism lower than the resistance of any failure mechanism which is brittle or has low ductility.</p>			
<p>Keywords steel truss, K-joint, failure modes, ductility, deformation capacity, flange-plate connection, joint plate, FEM, abaqus</p>			
Confidentiality Public			

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO.....	9
2	RAKENTEIDEN SUUNNITTELUPERUSTEET.....	10
2.1	Yleiset vaatimukset SFS-EN 1990	10
2.2	Liitosten suunnitteluoletukset.....	10
2.3	Onnettomuusmitoitustilanteet	11
2.4	Materiaaliominaisuudet	12
2.5	Analyysimenetelmät.....	13
2.5.1	Kimboteorian mukainen kokonaistarkastelu	14
2.5.2	Plastisuusteorian mukainen kokonaistarkastelu	14
2.6	Poikkileikkausluokitus.....	15
3	TERÄKSEN KÄYTTÄYTYMINEN KUORMITUSTILANTEESSA	16
3.1	Materiaalin käyttäytymisen mallintaminen	16
3.2	Käyttäytyminen murtumistilanteessa	16
3.2.1	Sitkeä käyttäytyminen	17
3.2.2	Hauras käyttäytyminen	19
3.2.3	Hitsin käyttäytyminen	21
4	LAAJAN SORTUMAN RAJOITTAMINEN PAIKALLISEKSI VAURIOKSI.....	22
4.1	Jatkuvaan sortumaan johtava tapahtumaketju	22
4.2	Liitoksen suunnittelu sitkeäksi	23
4.3	Analyttisen mallin todenmukaisuus	24
4.3.1	Teräsristikon kokonaisanalyysi.....	24
4.3.2	Poikkeamat materiaaleissa	26
4.3.3	Poikkeamat laskentakuormissa	26
5	TARKASTELTAVAT ESIMERKKILIITOKSET	27
5.1	K-liitos vapaavälillä	27
5.1.1	Murtumismuodot.....	27
5.1.2	Ongelmatilanteet.....	33
5.1.3	Ratkaisut.....	35
5.1.4	Esimerkkiliitoksen kestävyysien raja-arvot.....	36
5.2	Paarteen laippaliitos N-liitoksessa.....	38
5.2.1	Murtumismuodot.....	38
5.2.2	Ongelmatilanteet.....	42
5.2.3	Ratkaisut.....	43
5.2.4	Esimerkkiliitoksen kestävyysien raja-arvot.....	43
5.3	Poikittaissuuntainen liitoslevy paarteessa	44

5.3.1 Murtumismuodot	45
5.3.2 Ongelmatilanteet	48
5.3.3 Laskenta FEM-ohjelmalla	49
5.3.4 Esimerkkiliitoksen kestävyyksien raja-arvot	51
6 YHTEENVETO.....	53
LÄHTEET	55

LIITTEET

Liite 1 Ehdot standardin SFS-EN 1993-1-8 soveltamiselle

Liite 2 Taulukot SFS-EN 1993-1-8

Liite 3 K-liitos vapaavälillä

Liite 4 Paarteen laippaliitos N-liitoksessa

Liite 5 Poikittaissuuntainen liitoslevy paarteessa

ALKUSANAT

Kiitän lehtori Matti Mikkosta ja Tapio Leinoa työni ohjauksesta. Lisäksi haluan esittää erityiskiitokseni Finnmap Consulting Oy:n kehityspäällikölle DI Tapio Leinolle mielenkiintoisesta opinnäytetyön aiheesta.

Kuopiossa 27.4.2012

Joonas Forsman

MERKINNÄT

Tässä opinnäytetyössä käytetään yleisesti seuraavia merkintöjä:

A_i	sauvan i poikkileikkauksen pinta-ala ($i = 0, 1$ tai 2);
A_v	paarteen leikkauspinta-ala;
a	hitsin efektiivinen a -mitta;
b_i	sauvan i leveys ($i = 0, 1$ tai 2);
b_{eff}	uumasauvan tehollinen leveys sen liittyessä parresauvaan;
b_{ep}	tehollinen leveys lävistysleikkautumista tarkistettaessa;
e	liitoksen epäkeskisyys;
$F_{T,Rd}$	ekvivalentin T-osan laipan vetokestävyyden mitoitusarvo;
$F_{t,Rd}$	ruuvien vetokestävyyden mitoitusarvo ruuvia kohti;
f_{yi}	sauvan i myötöraja ($i = 0, 1$ tai 2);
g	K- tai N-liitoksen uumasauvojen välinen vapaaväli;
h_i	sauvan i korkeus ($i = 0, 1$ tai 2);
k_n	tekijä, joka ilmoitetaan liitteen 2 taulukossa 5;
L_w	hitsin tehollinen pituus;
M_{el}	kimmoteorian mukainen taivutuskestävyys;
M_{pl}	plastisuusteorian mukainen taivutuskestävyys;
$N_{i,Ed}$	sauvan i aksiaalisen voiman mitoitusarvo ($i = 0, 1$ tai 2);
$N_{i,Rd}$	liitoksen kestävyysmitoitussuure, joka ilmaistaa sauvan i aksiaalisen kestävyysmitoitussuurena ($i = 0, 1$ tai 2);
t	ainepaksuus;
t_i	sauvan i seinämän vahvuus ($i = 0, 1$ tai 2);
$V_{pl,Rd}$	plastisuusteorian mukaisen leikkauskestävyyden mitoitusarvo;
W	muodonmuutosenergia;
α	tekijä, joka ilmoitetaan liitteen 2 taulukossa 5;
β	uumasauvojen leveyksien keskiarvojen suhde parresauvan leveyteen;
γ	parresauvan leveyden suhde sen kaksinkertaiseen seinämän paksuuteen;
γ_{Mw}	hitsatun liitoksen kestävyysmitoitussuure;
γ_{M0}	rakenneosien ja poikkileikkausten kestävyysmitoitussuure;
γ_{M5}	rakenneputkien liitoksen kestävyysmitoitussuure;
θ_i	sauvan i ja parreputken välisen kulman suuruus ($i = 1$ tai 2).

1 JOHDANTO

Rakennuksen jatkuva sortuma kuvaa tilannetta, jossa rakenteen yhden kohdan vaurioituminen, myötääminen tai stabiliteetin menetys on johtanut rakennejärjestelmän jatkuvaan vaurioitumiseen ja lopulta sitä kautta sortumaan. Suomessa ei ole vuoteen 2012 mennessä tilastoitu yhtään sortumatilannetta, jossa sortuman ainoaksi syyksi olisi voitu esittää liiallinen lumikuorma rakennuksen katolla. Sortuman syyksi on lumen lisäksi voitu määrittää inhimillinen virhe joko suunnittelussa, valmistuksessa tai toteutuksessa. Laajat sortumat pystytään kuitenkin useimmiten rajoittamaan rakeneosan paikalliseksi vaurioksi, mikäli rakenneosa käyttäytyy ennakoimattomassa onnettomuustilanteessa sitkeästi. (Leino 2012.)

Sitkeä käyttäytyminen tarkoittaa liitosten suunnittelussa sitä, että kuormituksen ylittäessä kestävyuden raja-arvon, liitoksen ensimmäiseksi myötörajalalle joutuva kohta alkaa plastisoitua ja mahdollinen lisäkuorma jakautuu muille rakenneosille. Sitkeä liitos jatkaa toimintaansa menettämättä kuormankantokykyään, kunnes jossakin rakenteen kohdassa saavutetaan murtovenymä tai murtokiertymä.

Yleensä ongelmatilanteet syntyvät, kun liitoksen analyyttinen malli ei lähtökohtaisesti vastaa todellisuutta. Vaikka liitos olisi suunniteltu käyttäytymään sitkeästi, ennakoimattoman rasiustilanteen syntyminen liitoksessa voi aiheuttaa sen kestävyuden enenaikaisen menetyksen, joka pahimmillaan voi johtaa rakennuksen laajaan sortumaan. Liitos on ehkä mallinnettu väärällä oletuksella sen sisäisten voimasuureiden jakautumisesta tai liitoksen kestävyyttä ei ole tarkastettu esimerkiksi onnettomuustilanteista aiheutuvien rasiusten ja kaikkien murtumismuotojen suhteen. Rakenteiden sortumisen suhteen kriittisiä ovat erilaiset ennakoimattomat tilanteet.

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää, kuinka rakennejärjestelmän vaurioitumista voidaan rajoittaa sitkeällä liitossuunnittelulla ennakoimattomassa onnettomuustilanteessa. Työ tehdään Finnmap Consulting Oy:lle osana suunnittelun laadun parantamiseen liittyvää ohjeistusta. Työssä käydään läpi yleisesti käytössä olevia liitostyyppisiä pääasiassa soveltaen standardissa SFS-EN 1993-1-8 esiteltyjä menetelmiä. Lisäksi yhdestä liitostyypistä laaditaan FEM-laskentamalli. Työn on tarkoitus toimia soveltavana ohjeena liitoksen sitkeän käyttäytymisen varmistamisessa.

SFS-EN-standardien kuvien ja taulukoiden käyttämiseen on saatu SFS:n lupa.

2 RAKENTEIDEN SUUNNITTELUPERUSTEET

2.1 Yleiset vaatimukset SFS-EN 1990

Standardi EN 1990 asettaa rakenteille perusvaatimukset, joiden mukaan rakenteen tulee kestää suunnitellun käyttöikänsä ajan kaikki siihen kohdistuvat todennäköiset kuormat ja vaikutukset sekä pysyä käyttökelpoisena vaadittuun tarkoitukseensa. Rakennesuunnittelijan täytyy varmistaa, ettei räjähdys, törmäys tai inhimillinen erehdys suunnittelussa vaurioita rakennetta suhteettoman paljon syystä riippumatta. Mahdollinen vaurion syntyminen pitää estää tai pystyä rajoittamaan esimerkiksi välttämällä mahdollisimman paljon rakennejärjestelmiä, jotka voivat sortua varoittamatta; tai valitsemalla sellainen rakenneratkaisu, joka pystyy hyväksyttävästi sietämään yksittäisen rakenneosan vaurioitumisen. Suunnittelun näkökulmasta perusvaatimukset toteutetaan, kun suunnitellaan rakenne yksityiskohtineen asianmukaisesti ja käytetään soveltuvia materiaaleja. (SFS-EN 1990, 38.)

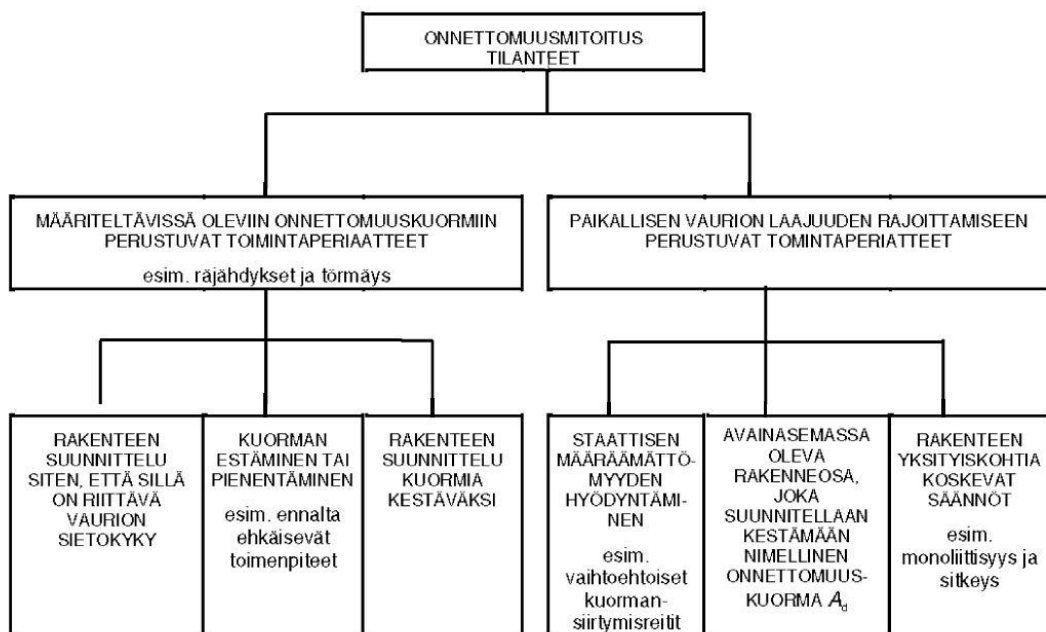
2.2 Liitosten suunnitteluoletukset

Standardin EN 1993-1-8 mukaan liitosten sisäisten voimien jakautumisen määrittelemiseksi käytetään seuraavia oletuksia:

- Analyysissä saadut sisäiset voimat ja momentit sekä liitoksiin vaikuttavat mitoitusvoimat ja –momentit ovat keskenään tasapainossa.
- Liitoksen kaikkien osien kestävyys on vähintään siihen kohdistuvien voimien ja momenttien suuruinen.
- ”voimien ja momenttien jakautumiseen liittyvät muodonmuutokset eivät ylitä kiinnittimien tai hitsien ja liitettävien osien muodonmuutoskykyä”;
- sisäisten voimien oletettu jakautuma valitaan todenmukaiseksi suhteessa liitoksen suhteelliseen jäykkyyteen. (SFS-EN 1993-1-8, 20.)
- ”kimmo-plastiseen materiaalimalliin perustuvan teorian mukaisessa rakennemallissa oletetut muodonmuutoksen perustuvat jäykän kappaleen kiertymiseen ja/tai tasomuodonmuutoksiin jotka ovat fysikaalisesti mahdollisia ja
- käytettävä rakennemalli vastaa koetuloksia (ks. EN 1990).” (SFS-EN 1993-1-8, 20).

2.3 Onnettomuusmitoitustilanteet

Standardi EN 1991-1-7 jakaa onnettomuuskuormat kahteen ryhmään; määriteltävissä oleviin (esimerkiksi törmäys tai räjähdys) ja määrittelemättömästä syystä aiheutuviin kuormiin. Mikäli kuorman syy on tiedossa, rakenne voidaan suunnitella käyttämällä määriteltävissä olevia kuormituksen nimellisarvoja. Jos kuormaa ei tunneta, rakenne tulee suunnitella siten, että ylikuormitustilanteessa vaurio pyritään rajaamaan laajan sortuman sijasta paikalliseksi. Tämä voidaan tehdä kolmella eri tavalla: suosimalla jatkuvia rakenteita, ylimitoittamalla ns. avainelementtejä, tai suunnittelemalla rakenne yksityiskohtineen monoliittiseksi tai käyttäytymään ylikuormitustilanteessa sitkeästi. (SFS-EN 1991-1-7, 24.)



KUVIO 1 Toimintaperiaatteet onnettomuusmitoitustilanteessa (SFS-EN1991-1-7, 24)

Staattisesti määräämättömien rakenneratkaisujen riittävä käyttö lisää kuormille vaihtoehtoisia siirtymisreittejä onnettomuustilanteen jälkeen, eikä uusia ylikuormituskohtia pääse hevin muodostumaan. Ylimitoittamalla esimerkiksi rakennuksen stabiiliuden kannalta avainasemassa olevia rakenneosia, riski rakenteen vaurioitumisesta käyttökeltottomaksi onnettomuustilanteessa pienenee. Suunnittelemalla kantavat rakenneosat sitkeäksi, ne myös pystyvät sitomaan itseensä merkittäviä määriä muodonmuutosenergiaa murtumatta. (SFS-EN 1991-1-7, 26.)

Rakenteen yksityiskohdat tulee suunnitella siten, että rakenteelle saadaan hyväksyttävä vaurionsietokyky. Onnettomuuskuormista johtuvaa paikallista vauriota voidaan pitää hyväksyttävänä silloin, kun se:

- ei vaaranna rakenteen kokonaisstabiiliteettia;
- säilyttää kokonaisuutena kestäväytensä sekä sallii välttämättömien pelastustoimenpiteiden suorittamisen (SFS-EN 1991-1-7, 26).

2.4 Materiaaliominaisuudet

Standardi EN 1993-1-1 asettaa teräsrakenteiden suunnittelulle teräslajia koskevia reunaehtoja. Rakenneputkille käytetään taulukon 1 mukaisia myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u arvoja.

TAULUKKO 1 Rakenneputkien myötörajan f_y ja vetomurtolujuuden f_u nimellisarvot (SFS-EN 1993-1-1, 27)

Standardi ja teräslaji	Nimellispaksuus t [mm]			
	t ≤ 40 mm		40 mm < t ≤ 65 mm	
	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]	f_y [N/mm ²]	f_u [N/mm ²]
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		

Käytetyllä teräksellä tulee olla riittävät sitkeysvaatimukset. Sitkeysvaatimukset ilmaistaan määrittelemällä rajat suhteelle f_u/f_y , murtovenymälle ja tasovenymälle ϵ_u . Suositeltavat arvot ovat $f_u/f_y \geq 1,10$, murtovenymä vähintään 15 % ja tasavenymä

$\varepsilon_u \geq 15\varepsilon_y$, missä ε_y on myötövenymä ($\varepsilon_y = f_y/E$). Taulukon 1 mukaisten rakenneputkien katsotaan täyttävän edellä mainitut suositellut raja-arvot. Mikäli Suomessa käytetään muualta kuin EU:n alueelta tuotuja materiaaleja, toimittajan on selvitettävä niiden vastaavuus taulukossa 1 mainittuihin standardeihin. (SFS-EN 1993-1-1, 25.)

Materiaalilla täytyy olla lisäksi riittävä murtumissitkeys vedettyjen rakenneosien haurasmurtuman välttämiseksi rakenteen käyttöänsä aikana esiintyvässä alhaisimmassa käyttölämpötilassa. Haurasmurtuman suhteen ei tarvitse tehdä erityistä tarkastusta, mikäli standardin SFS-EN 1993-1-10 mukaiset ehdot ovat voimassa rakenteen alhaisimmassa käyttölämpötilassa. (SFS-EN 1993-1-1, 25-26.)

Huom. Kohdassa 3.2.2 mainittua haurasta käyttäytymistä ei tule sekoittaa termiin haurasmurtuma.

Rakenneteräksille käytetään lujuuslaskelmissa seuraavia materiaalivekioiden arvoja:

- kimmokerroin $E = 210000\text{N/mm}^2$;
- liukukerroin $G \approx 81000\text{N/mm}^2$;
- Poissonin luku kimmoisella alueella $\nu = 0,3$ (SFS-EN 1993-1-1, 28).

2.5 Analyysimenetelmät

Rakenneosien sisäiset voimat ja momentit voidaan laskea joko kimmoteorian tai plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun mukaan. Plastisuusteorian mukaista kokonaistarkastelua voidaan käyttää vain silloin, kun liitoksella on riittävä kiertymiskyky, joka mahdollistaa taivutusmomenttien uudelleen jakautumisen. Plastisten nivelten kohdissa vaadittu kiertymiskyky saavutetaan, kun sauva kuuluu plastisen nivelen kohdalla poikkileikkausluokkaan 1. Plastisuusteorian mukaisen kokonaistarkastelun käyttö edellyttää lisäksi sauvojen stabiiliuden takaamista plastisissa nivelissä. (SFS-EN 1993-1-1, 41.)

2.5.1 Kimmoteorian mukainen kokonaistarkastelu

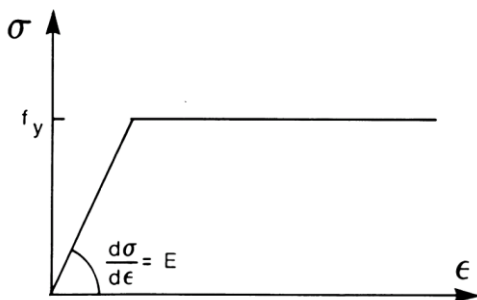
Sisäiset voimat ja momentit voidaan laskea kimmoteorian mukaisen kokonaistarkastelun mukaan kaikissa tapauksissa. Kimmoteorian mukaisen kokonaistarkastelun perusolettamuksena pidetään materiaalin lineaarista jännitys-venymä kuvaajaa jännitystasosta riippumatta. Sisäiset voimat ja momentit voidaan laskea käyttäen plastisuusteorian mukaisia poikkileikkauksen kestävyyksien arvoja. Rakenne voidaan analysoida kimmoteorian mukaisen kokonaistarkastelun mukaisesti myös siinä tapauksessa, kun paikallisen lommahduksen katsotaan rajoittavan poikkileikkauksen kestävyyttä (kuva 2). (SFS-EN 1993-1-1, 41.)

2.5.2 Plastisuusteorian mukainen kokonaistarkastelu

Plastisuusteorian mukaisessa kokonaistarkastelussa materiaalin epälineaarisuus huomioidaan rakennejärjestelmässä vaikuttavia voimia laskettaessa. Rakenneputkien liitoksen toiminta mallinnetaan yhdellä seuraavista menetelmistä:

- kimmo-plastisella analyysillä, jossa liitoksen rakennemalliin muodostuu plastisia niveliä;
- epälineaarinen plastisuusteorian mukainen analyysi, jossa huomioidaan plastisilla alueilla tapahtuva sauvojen osittainen plastisoituminen;
- jäykkä-plastinen analyysi, jossa nivelten välistä kimmoista käyttäytymistä ei huomioida (SFS-EN 1993-1-1, 41).

Plastisuusteorian mukaista kokonaistarkastelua voidaan käyttää ainoastaan silloin, kun liitoksella on riittävä kiertymiskyky, joka mahdollistaa taivutusmomenttien uudelleenjakautumisen. Kaksoislineaarista jännitys-venymä (kuva 1) yhteyttä voidaan käyttää taulukossa 1 esitetyille teräslajeille. (SFS-EN 1993-1-1, 42.)



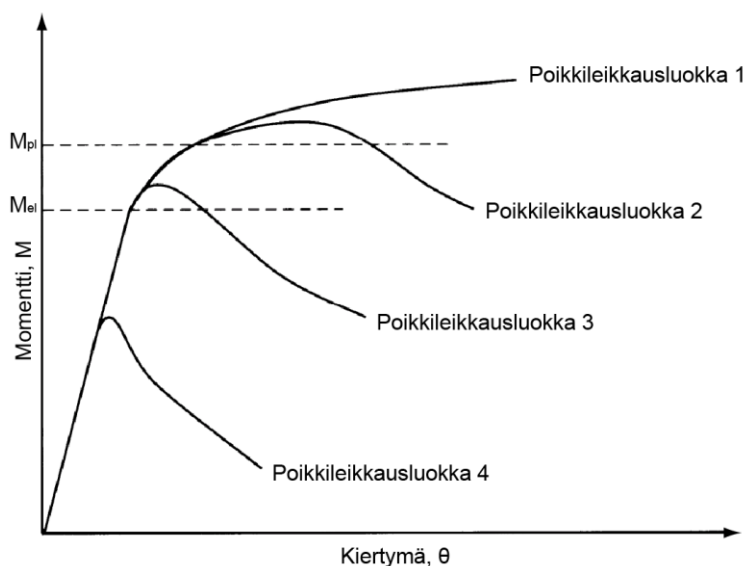
KUVA 1 Kaksoislineaarinen jännitys-venymä yhteys (SFS-EN 1993-1-1, 42)

2.6 Poikkileikkausluokitus

Poikkileikkausluokituksen tarkoituksena on tunnistaa, missä laajuudessa paikallinen lommahdus poikkileikkauksissa rajoittaa niiden kestävyyttä ja kiertymiskykyä (kuva 2). Standardi EN 1993-1-1 määrittelee neljä poikkileikkausluokkaa seuraavasti:

- Poikkileikkausluokan 1 sauvat ovat niitä, joissa plastisuusteorian mukaisen tarkastelun vaatima, riittävän kiertymiskyvyn omaava nivel voi syntyä ilman, että poikkileikkauksen kestävyyttä tarvitsee pienentää.
- Poikkileikkausluokan 2 sauvat ovat niitä, joissa voi kehittyä plastisuusteorian mukaisen sauvan taivutuskestävyys, mutta joilla paikallinen lommahdus rajoittaa kiertymiskykyä.
- Poikkileikkausluokan 3 sauvat ovat niitä, joissa sauvan äärimmäisessä puristetussa reunassa laskettu jännitys voi saavuttaa myötörajan, mutta paikallinen lommahdus estää plastisuusteorian mukaisen momenttikestävyyden kehittymisen.
- Poikkileikkausluokan 4 sauvat ovat niitä, joissa esiintyy paikallinen lommahdus ennen kuin myötöraja saavutetaan poikkileikkauksen jossakin pisteessä. (SFS-EN 1993-1-1, 42.)

Poikkileikkausluokitus määräytyy puristettujen rakenneosien leveys-paksuussuhteen perusteella liitteen 2 taulukon 3 mukaisesti. Poikkileikkauksen puristettuun osaan kuuluu jokainen osa, johon ulkoisen kuormituksen seurauksena jossakin kuormitusyhdistelmässä syntyy edes osittainen puristusjännitys (SFS-EN 1993-1-1, 42-43).

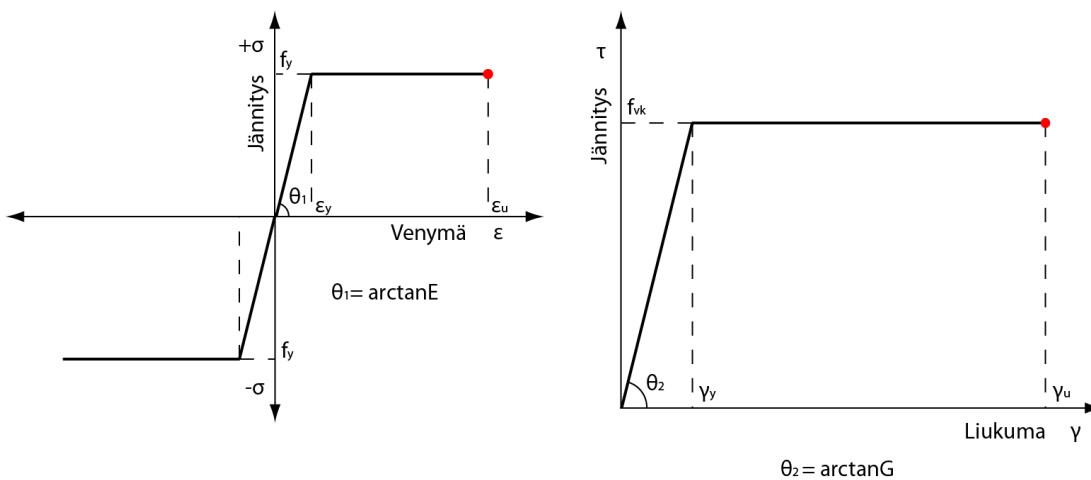


KUVA 2 Eri poikkileikkausluokkien momentti-kiertymäyhteydet

3 TERÄKSEN KÄYTTÄYTYMINEN KUORMITUSTILANTEESSA

3.1 Materiaalin käyttäytymisen mallintaminen

Kimmo-plastisessa analyysissä teräksen katsotaan olevan käyttötilassa riittävän lineaarinen materiaali, joka voi ennen murtumistaan saavuttaa myötörajansa. Tällaisessa tilanteessa rakenteet hyödyntävät plastisoitumisominaisuutensa. Käytännössä riittävään tarkkuustasoon päästään tarkastelemalla materiaalia kimmo-plastisena jättämällä myötölujittuminen huomioon ottamatta. (Leino 2006, 34.)



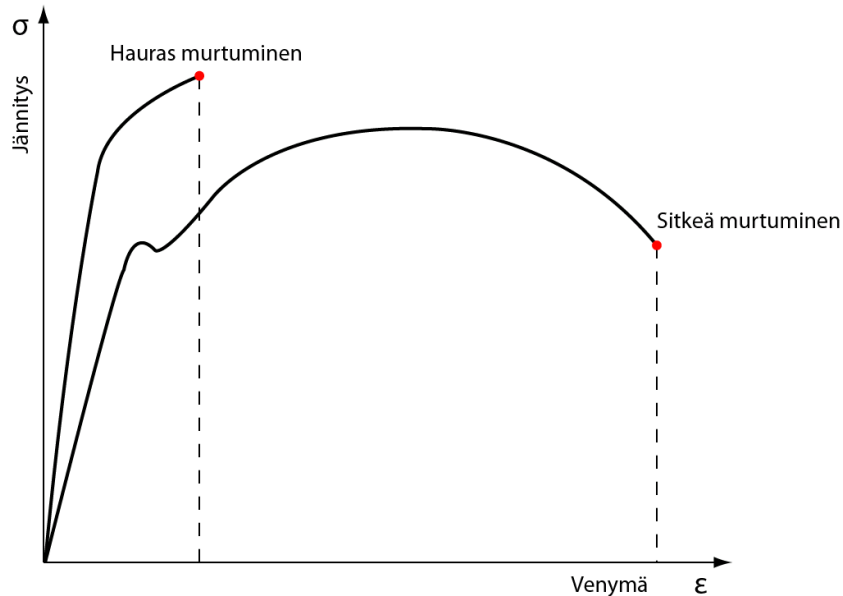
KUVA 3 Materiaalin käyttäytyminen kimmo-plastisessa analyysissä (muokattu lähteestä Leino 2006)

Eurocode 3:n teräsrakenteiden suunnitteluohjeet perustuvat rakenneosien plastiseen kestävyys. Jotta mitoituksessa voidaan huomioida rakenneosan plastisoitumisominaisuudet, täytyy sen täyttää standardissa EN 1993-1-3 esitetyt poikkileikkauksen vaatimukset. Käytännössä tämä edellyttää rakenteen kuulumista joko poikkileikkausluokkaan 1 tai 2. Samanlainen luokittelu koskee myös liitoksia. Tällöin perusolettamus on, että liitoksen kaikki komponentit koostuvat poikkileikkausluokan 1 tai 2 rakenneosista, joihin voi muodostua plastinen nivel. (Leino 2006, 34.)

3.2 Käyttäytyminen murtumistilanteessa

Teräsrakenteet voivat sortua tai vaurioitua joko sitkeästi tai hauraasti. Sitkeässä murtumassa rakenneosa hyödyntää plastisoitumisominaisuutensa ja käyttäytyy dissipatiiv-

visesti. Rakenne pystyy siis sitomaan itseensä muodonmuutokseen kuluva energiaa ennen varsinaista kestävyuden menetystä. Hauraassa käyttäytymisessä rakenneosasta pystyy sitomaan itseensä vain vähän muodonmuutosenergiaa, jolloin rakenneosasta vaurioituu ja menettää äkillisesti kantavuutensa ilman havaittavia merkkejä tai varoittamista. (Leino 2006, 34.)



KUVA 4 Teräksen hauras ja sitkeä käyttäytyminen

Kuvassa 5 esitetään sitkeä ja hauras murtuminen jännitys-venymä käyrien avulla. Käyrän ja ϵ -akselin rajaama pinta-ala kuvastaa rakenteen sitomaa muodonmuutosenergiaa.

3.2.1 Sitkeä käyttäytyminen

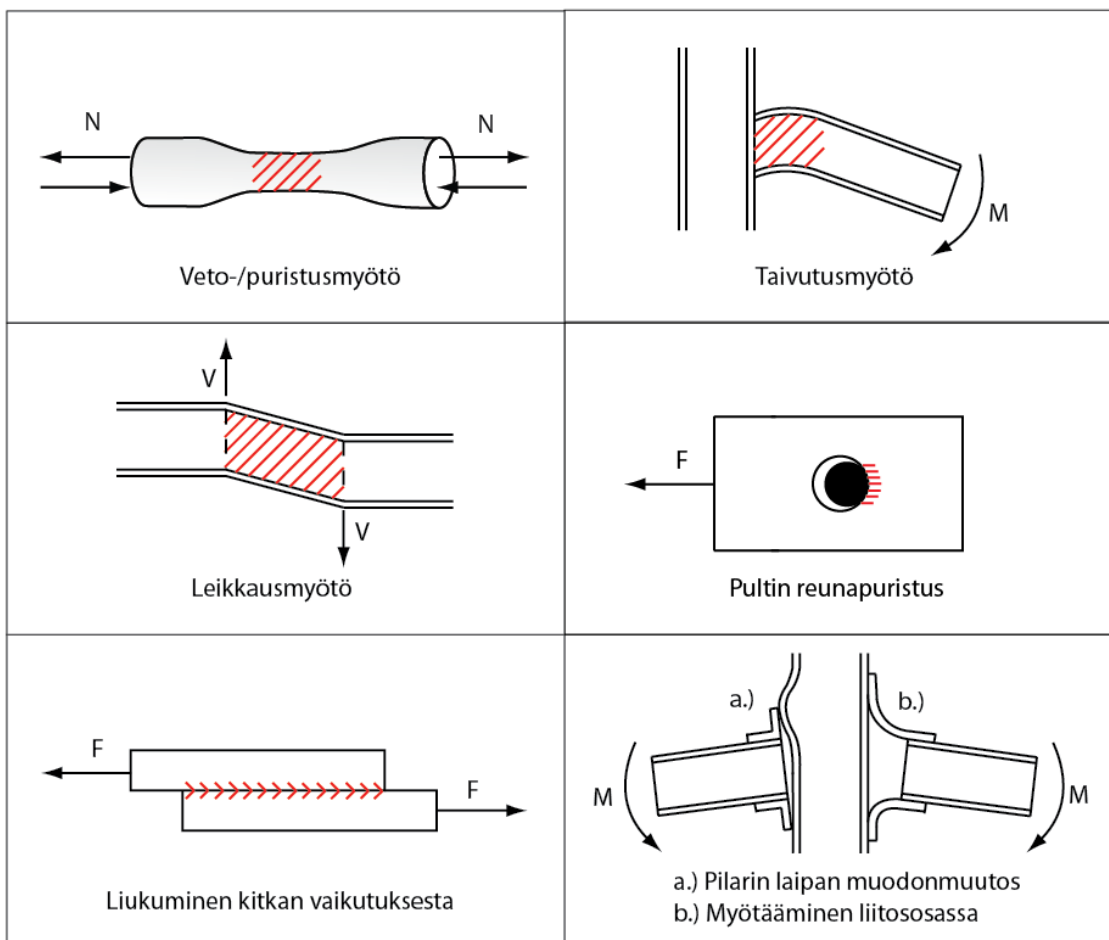
Teräsrakenteisen liitoksen käyttäytyessä ylikuormitustilanteessa sitkeästi, sen ensimmäiseksi myötörajalta joutuvaan kohtaan muodostuu plastisoitua aluetta ja vähitellen plastinen nivel, jolloin lisäkuormitus jakautuu uudelleen muille rakenneosille. Sitkeä liitos säilyttää kuormankantokykynsä ja jatkaa edelleen toimintaansa, pystymättä kuitenkaan kantamaan lisäkuormaa. Sitkeä liitos menettää kestävyytensä vasta silloin, kun jossakin rakenteen kohdassa saavutetaan murtovenymä tai -kiertymä. (Leino 2006, 18.)

Rakenteen sitkeä käyttäytyminen voidaan havaita näkyvistä muodonmuutoksista ja taipumista. Teräsrakenteen taipuma on harvoin ongelma, mikäli se pysyy käyttörajati-

lamitoituksen sallimien taipumarajojen sisällä. Yleensä kuorman poistuttua myös taipuma poistuu. Taipumat ja näkyvät muodonmuutokset ovat ongelma, jos ne jäävät kuorman poistettua pysyviksi. Rakenteeseen syntyy pysyviä muodonmuutoksia, kun se käy lähellä rakenteellista kestävyyttään, eli murtorajaa. Pysyvistä muodonmuutoksista ei voida sanoa kuinka lähellä murtoa todellisuudessa ollaan käyty. (Leino 2006, 37.)

Jatkuvan sortuman estämissä on oleellista, että saavutettaessa myötöraja jossakin rakenneosassa liitos pystyy jakamaan lisäkuormia uudelleen. Joissakin tapauksissa tämä tarkoittaa sitä, että liitoksen pitää tarvittaessa pystyä plastisoitumaan murtumatta tai menettämättä kestävyyttään. (Leino 2006, 37.)

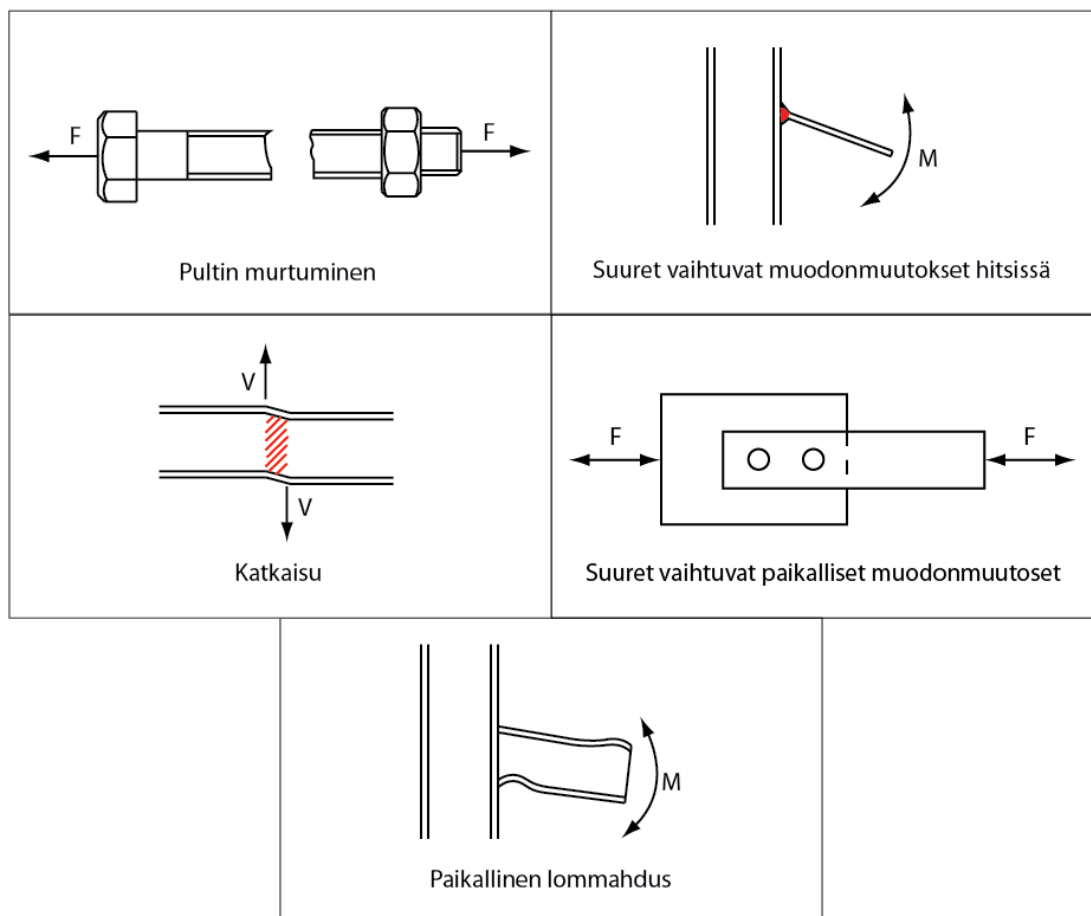
Kuvassa 5 havainnollistetaan Plumierin (1994, 97) esittämiä sitkeästi käyttäytyviä yksityiskohtia.



KUVA 5 Sitkeästi käyttäytyviä yksityiskohtia (muokattu lähteestä Plumier 1994)

3.2.2 Hauras käyttäytyminen

Rakenteen käyttäytyessä hauraasti, se antaa vain harvoin havaittavia merkkejä vauriosta, tai mahdollisesta sortumisesta. Tämä tapahtuu pian sen jälkeen, kun jossakin rakenteen osassa saavutetaan materiaalin myötöraja, murtovenymä tai –kiertymä, tai rakenne menettää stabiilitensä (rakenneosan lommahdus tai nurjahdus). Rakenneosan hauraan käyttäytymisen seuraukset ovat ennakoimattomat ja usein katastrofaaliset. (Leino 2006, 34.) Kuvassa 6 havainnollistetaan Plumierin (1994, 97) ja Leinon (2006, 35) esittämiä hauraasti käyttäytyviä yksityiskohtia.

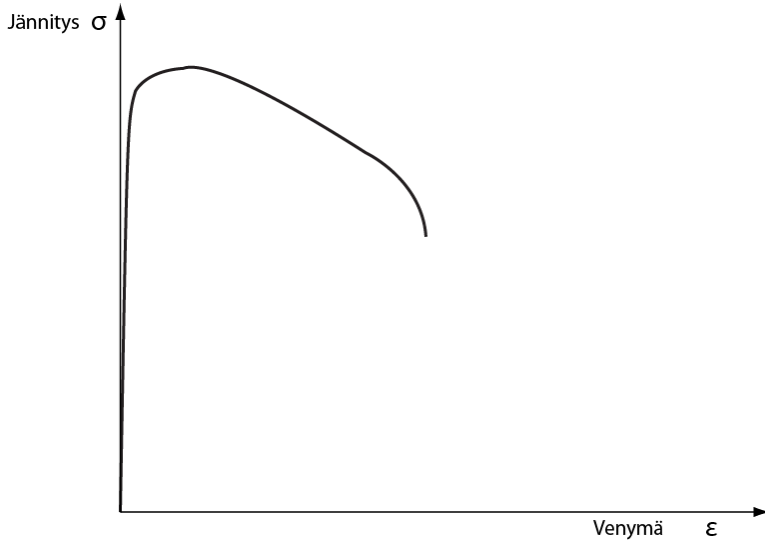


KUVA 6 Hauraasti käyttäytyviä yksityiskohtia (muokattu lähteestä Plumier 1994)

3.2.2.1 Vedetyn pultin murtuminen

Lujilla ruuveilla (esimerkiksi lujuusluokka 10.9) on vaikea määrittää myötölujuutta, koska ruuveilla ei ole selkeää myötörajaa ja muodonmuutokset kuormitettaessa siirtyvät jatkuvasti elastisen ja plastisen muodonmuutoksen välillä. Tällöin teräksen murtuminen voi tapahtua todella nopeasti, vaikka murtuma metalliopillisesti olisikin sitkeä.

Jännitykset ja venymä keskittyvät pienelle alalle ja ainetilavuuteen, jolloin rakenne ei pysty ottamaan vastaan paljoa muodonmuutosenergiaa ja on altis vauriolle. Vedetyissä pulteissa murtovenymä voi keskittyä lyhemmälle pituudelle l kuin yhden ruuvinkierteen korkeus. (Ferrometal; Leino 2006, 34.)



KUVA 7 Vedetyn pultin murtuminen

3.2.2.2 *Katkaisu*

Rakenneosan leikkautuminen tapahtuu sitkeästi. Kuitenkin leikkausvoimaa aiheuttavan voimaparin välisen etäisyyden ollessa hyvin pieni, materiaalin liukuma kohdistuu hyvin pieneen materiaalitilavuuteen eikä rakenne kykene sitomaan paljoakaan muodonmuutosenergiaa (Leino 2006, 36).

Yhtälöstä 3.1 huomataan tilavuuden vaikutus rakenteen kykyyn sitoa muodonmuutosenergiaa:

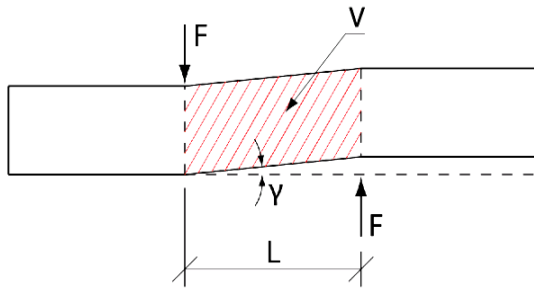
$$W = V \int_0^{\gamma} \tau d\gamma \quad (3.1)$$

jossa:

V on rakenneosan tilavuus;

γ on liukuma;

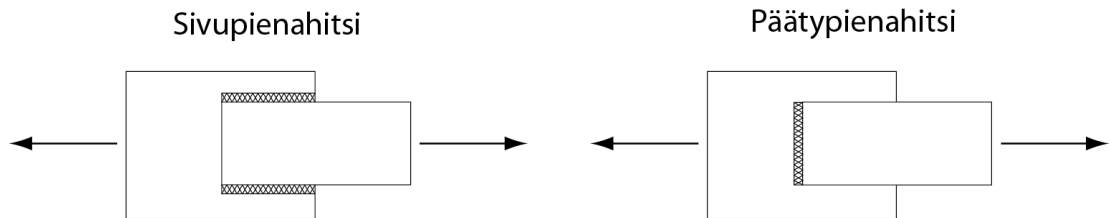
τ on leikkausjännitys (Ylinen 1965, 45).



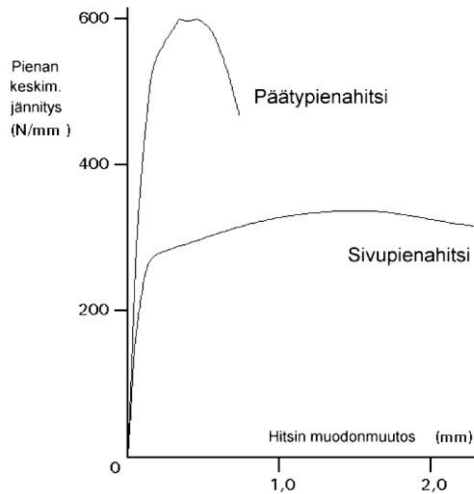
KUVA 8 Voimaparin aiheuttama liukuma

3.2.3 Hitsin käyttäytyminen

Hitsille saadaan huomattavasti parempi sitkeys käyttämällä sivupienahitsiä pääty-pienahitsin sijaan. Tämä johtuu sivupienahitsissä hitsin koko alueella tapahtuvasta tasaisesta materiaalin plastisoitumisesta ennen murtorajan saavuttamista. Absoluuttista murtoa vastaava muodonmuutos on päätypienahitseissä huomattavasti pienempi jonka vuoksi ne käyttäytyvät hauraasti, eikä niissä ole havaittavissa plastisoitumis-käyttäytymistä. (Leino 2006, 27.)



KUVA 9 Sivu- ja päätypienahitsi



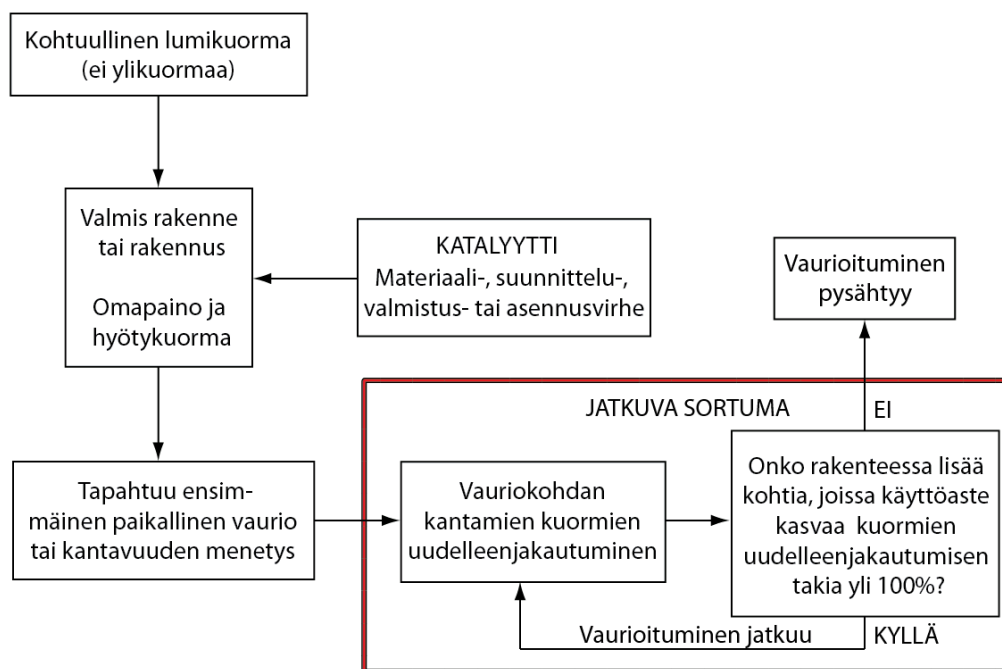
KUVA 10 Pääty- ja sivupienahitsien (σ , ϵ)-käyrät (Leino 2006, 26)

4 LAAJAN SORTUMAN RAJOITTAMINEN PAIKALLISEKSI VAURIOKSI

4.1 Jatkuvaan sortumaan johtava tapahtumaketju

Rakenteiden sortumiseen johtaneita syitä tutkittaessa, on huomattu, että sortumisen takana on vain harvoin rakenteen yhden kohdan vaurioituminen, vaikka vaurio kasvaisi suureksikin. Tämä sitkeä käyttäytyminen johtuu erityisesti teräksen suuresta murtovenymästä, joka voi teräslajista riippuen olla jopa yli 15 %. Yleisin syy sortumiseen on yhden kohdan plastisoitumisen aiheuttama ketjureaktio. Ketjureaktiossa plastisoituneen kohdan rasitukset alkavat jakautua uudelleen, jolloin rakenteen muut kohdat joutuvat ottamaan vastaan vaurioituneen kohdan lisäkuormitukset. Tällöin rakenteeseen muodostuu lisää myötökohtia ja plastisia niveliä, jolloin kuormitus joutuu taas jakautumaan uudelleen. Kun ketjureaktio jatkuu tarpeeksi kauan, muodostuu rakenteeseen nivelmekanismi, joka sortuu. Ketjureaktio tapahtuu sitä nopeammin, mitä useampien rakenneosien käyttöaste on säädetty äärimmilleen. (Leino 2011, 52-53.)

Termillä jatkuva sortuma kuvataan tilannetta, jossa rakenteen yhden kohdan vaurioituminen, myötääminen tai stabiiliteetin menetys johtaa rakennejärjestelmän jatkuvaan vaurioitumiseen ja lopulta sitä kautta sortumaan.



KUVIO 2 Ennakoimaton onnettomuustilanne ja jatkuva sortuma (muokattu lähteestä Korttesmaa & Leino 2006)

4.2 Liitoksen suunnittelu sitkeäksi

Oleellisinta liitossuunnittelussa on, että liitoksen tai sen läheisyydessä olevan sitkeän rakenneosan kestävyysmitoitussarvon täytyy olla pienempi kuin minkään muun sellaisen rakenneosan kestävyysmitoitussarvo, jonka murtumismekanismi on hauras tai rakenteella ei juurikaan ole sitkeyttä. Tällöin liitoksen myötääminen tapahtuu ensin sitkeällä alueella. Käytännössä suunnittelijan täytyy tällöin:

- tunnistaa selvästi liitoksen ja ympäröivien rakenneosien kaikki mahdolliset murtumistavat
- tehdä kvantitatiivinen arvio mahdollisten murtumistapojen kestävyysmitoitussarvoista sekä luokitella liitokset eri kestävyysmitoitussarvojen suhteessa oikein
- varmistaa, että liitoksen analyyttinen malli vastaa todellisuutta. (Plumier 1994, 95.)

Turvallisen ja sitkeän liitoksen suunnitteluun on kehitetty ns. ylimitoitussääntö, jossa liitos suunnitellaan kestävämmän kuormitusta paremmin kuin ympäröivät rakenneosat. Liitoksen kestävyysmitoitussarvolle saadaan standardin SFS-EN 1998-1 mukaan vaatimus:

$$R_d \geq 1,1\gamma_{ov}R_{fy} \quad (4.1)$$

jossa:

R_d on liitoksen kestävyysmitoitussarvo;

R_{fy} on liittyvien osien veto/taivutuslujuuden mitoitussarvo,

γ_{ov} on materiaalin ylimitoituskerroin (suositus $\gamma_{ov}=1,25$) (SFS-EN 1998-1, 146).

Suomessa on yleensä oletettu, että putkipalkkirakenteissa edellä oleva ehto toteutuu esimerkiksi päittäishitsiliitoksissa, kun sauvassa vaikuttaa vetovoima, ja kun putkipalkkien kiinnityksessä pienahitsin a-mitaksi otetaan $1,2t$; missä t on liitettävän sauvan ainepaksuus (Leino, 2012).

On havaittu, että tietyissä olosuhteissa ylimitoitussäännön täyttävä liitos voi käyttäytyä hauraasti; ja toisaalta liitos, joka ei täytä ylimitoitussääntöä voi käyttäytyä sitkeästi. Tämän vuoksi suunnittelijan on tärkeää ymmärtää liitoksen todellisuutta vastaava käyttäytyminen ja huomioitava tämä liitoksen suunnittelussa. (Plumier 1994, 96.) Ta-

voitteena on suunnitella liitokset siten, että niiden ensimmäisenä murtoon joutuva osa käyttäytyy sitkeästi.

4.3 Analyttisen mallin todenmukaisuus

4.3.1 Teräsristikon kokonaisanalyysi

Rakenneputkista valmistetun ristikon analyysi tehdään usein oletuksella, että ristikon sauvojen päihin voidaan kuvitella nivelet. Tällöin liitoksen kestävyys laskenta tapahtuu pelkästään aksiaalisten voimien suhteen. Analyysiä, jossa ristikon liitokset mallinnetaan jäykkänä, ei suositella. Tällöin ristikon uumasauvojen sisäiset momentit kasvavat paljon todellista suuremmaksi, aksiaalisten voimien pysyessä lähes samoina. Standardissa SFS-EN 1993-1-8 tasoristikko suositellaan analysoimaan mallilla, missä paarteet ovat jatkuvia ja uumasauvat ovat nivelpäisiä. Hitsaamalla kootun ristikon päihin voi yleensä kuvitella nivelet, jos ristikon korkeuden suhde sen jänneväliin on välillä $(1/10 \dots 1/16) * L$, missä L on ristikon jänneväli. (Wardenier, Packer, Zhao & van der Vegte 2010, 68; Leino 2011; SFS-EN 1993-1-8, 56.)

Uumasauvojen epäkeskisyydestä aiheutuvat momentit täytyy standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan huomioida, kun seuraava ehto ei ole voimassa:

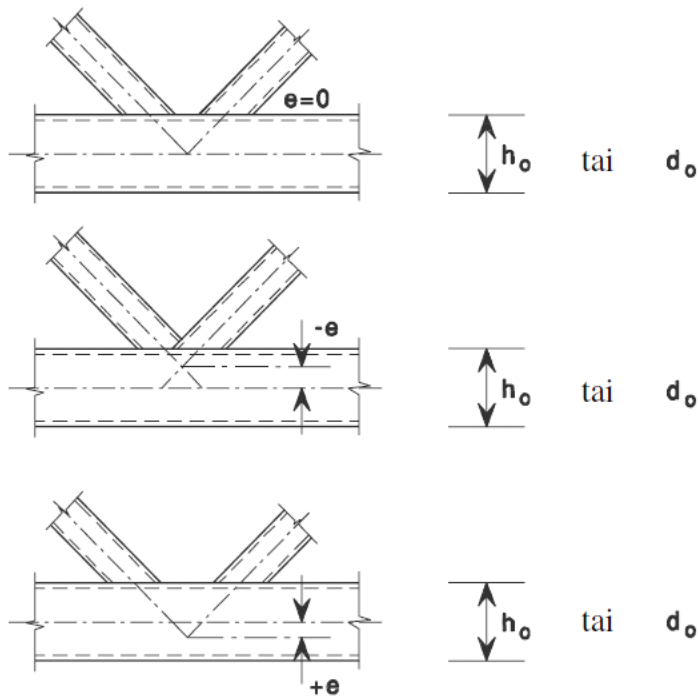
$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \quad (4.2)$$

missä:

e on kuvan 11 mukainen epäkeskisyys,

h_0 on paarteen korkeus ristikon tasossa (SFS-EN 1993-1-8, 57) .

Mikäli epäkeskisyys sauvojen keskilinjojen välillä pysyy hyväksyttävissä rajoissa, epäkeskisyysistä aiheutuvat momentit voidaan jättää huomiotta. Jos epäkeskisyys ei pysy hyväksyttävien rajojen sisällä, voi epäkeskisyydestä aiheutuvilla momenteilla olla merkittävä vaikutus liitoksen kestävyys. Epäkeskisyydestä aiheutuva kokonaismomentti tulee tällöin jakaa liitoksen kaikille sauvoille niiden suhteellisten jäykkyyksien suhteessa. (Wardenier ym. 2010, 68.)



KUVA 11 Liitoksen epäkeskisyys (SFS-EN 1993-1-8, 57)

Sauvan pituussuuntaa vastaan kohtisuorat nurkkapisteiden välillä vaikuttavat kuormitukset täytyy huomioida niiden sauvojen mitoituksessa, johon kyseinen kuorma vaikuttaa. Kohtisuorassa suunnassa vaikuttavista kuormituksesta aiheutuvat momentit huomioidaan kuitenkin vain silloin, kun uuma- ja parresauvojen väliset liitokset oletetaan nivelellisiksi, jolloin uumasauvojen momenteja ei tarvitse jakaa parresauvoille ja päinvastoin. (SFS-EN 1993-1-8, 56.)

Kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat sekundaariset momentit voidaan yleensä jättää huomiotta sekä sauvojen, että liitosten mitoituksessa. Tällöin pitää kuitenkin varmistaa, että liitoksella on riittävä muodonmuutoskyky ja voimat pystyvät jakautumaan liitoksessa uudelleen paikallisen plastisoitumisen jälkeen. Liitoksella katsotaan olevan riittävä muodonmuutoskyky silloin, kun noudatetaan standardissa EN 1993-1-8 esitettyjä liitoksen muotoiluun liittyviä geometrisia ehtoja (liite 2 taulukko 4). (Wardenier ym. 2010, 68.)

4.3.2 Poikkeamat materiaaleissa

Arviot eri murtumismuotoja vastaavista kestävyyksien raja-arvoista perustuvat oletukseen liitoksen ja ympäröivien rakenneosien materiaalin vetokestävyyden absoluuttisesta arvosta. Poikkeavuudet suunnitellun ja todellisen vetokestävyyden arvojen välillä voivat vaikuttaa haitallisesti liitoksen sitkeään käyttäytymiseen, jolloin haurasta murtumismuotoa vastaava kestävyysmitoitusrvo voidaan saavuttaa ensin. Poikkeavuudet johtuvat seuraavista tosiasioista:

- Työmaalle toimitettavien rakenneterästen vetolujuus saattaa todellisuudessa olla jopa 20 % suurempi, kuin valmistajan ilmoittama ominaisarvo.
- Korkealujuuspulttien todellinen vetokestävyys poikkeaa vain harvoin enemmän, kuin 10 % ilmoitetusta kestävyysmitoitusrvosta.
- Hitsien todellinen kestävyys on vain harvoin suurempi kuin 10 % kestävyysmitoitusrvosta, vaikka hitsausaineen lujuus pyritäänkin valitsemaan suuremmaksi kuin perusaineen lujuus. (Leino, 2012; Plumier 1994, 101.)

Kaavassa 4.1 esitettyssä vaatimuksessa termi γ_{vo} huomioi liittyvien osien todellista suuremman kestävyysmitoitusrvon.

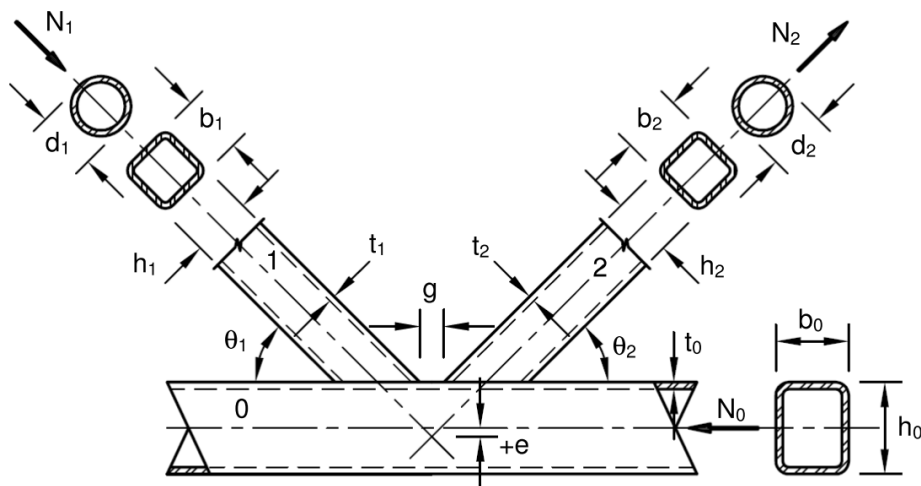
4.3.3 Poikkeamat laskentakuormissa

Liitos saattaa altistua kestävyystään suuremmalle kuormitukselle esimerkiksi silloin, kun kattoelementtien jatkuvuudesta aiheutuvaa lisäkuormitusta ei huomioida kuormien laskennassa tai ristikoihin asennetaan raskaita ripustuksia ilman suunnittelijan suostumusta. Myös laskennalliset luonnonkuormat ylittyvät keskimäärin kerran 50 vuodessa (SFS-EN 1990, 54).

5 TARKASTELTAVAT ESIMERKKILIITOKSET

5.1 K-liitos vapaavälillä

Tässä luvussa tarkastellaan neliön muotoisista rakenneputkista koostuvaa vapaavälisistä K-liitosta. Aluksi selvitetään liitoksen kaikki mahdolliset murtumistavat ja pohditaan analyttisen liitosmallin todenmukaisuutta. Lopuksi pohditaan mahdollisia toimintatapoja erilaisissa ongelmatilanteissa. Liitteessä 3 suoritetaan laskentaesimerkki vapaavälisestä K-liitoksesta, joka ei lähtökohtaiselta geometrialtaan toteuta rakennesuunnitteluohjeissa sille asetettuja vaatimuksia.



KUVA 12 K-liitos vapaavälillä (Wardenier ym. 2010, 73)

5.1.1 Murtumismuodot

Vapaaväliselle suorakaiteen muotoisten rakenneputkien K-liitokselle voidaan esittää seuraavat murtumismuodot:

- hitsin murtuminen;
- lamellirepeytyminen;
- paarteen pinnan murtuminen;
- paarteen lävistysleikkautuminen;
- paarteen leikkausmurtuminen;
- uumasauvan murtuminen;
- puristetun uumasauvan tai paarteen paikallinen lommahdus.

Näistä murtumismuodoista sitkeää käyttäytymistä edustavat paarteen pinnan murtuminen sekä uumasauvan murtuminen (kuva 6). Haurasta käyttäytymistä edustavat lamellirepeytyminen, leikkauslävistyminen sekä paikalliset lommahdukset (kuva 7). Murtumismuodoista paarteen leikkausmurtuminen ja hitsin murtuminen voivat tapahtua joko sitkeästi tai hauraasti. Osa murtumismuodoista voidaan välttää valitsemalla rakenneosalle tai hitsille lähtökohtaisesti riittävät ominaisuudet.

5.1.1.1 Murtumismuodot jotka voidaan välttää

Jotta hitsin murtuminen voidaan välttää, on suositeltavaa suunnitella hitsit vahvemmaksi kuin saamaan liittyvät sauvat. Lisäksi hitsillä täytyy olla riittävä muodonmuutoskyky, jotta hitsin ennenaikaiselta murtumiselta vältytään. Kun hitsit suunnitellaan tällä periaatteella standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisesti, voidaan efektiiviselle a-mitalle käyttää seuraavia minimiarvoja:

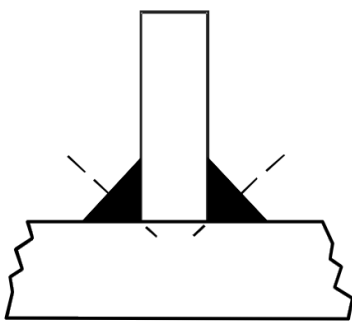
$a \geq 0,92t$, kun materiaali S235 ($f_{yi} = 235\text{N/mm}^2$);

$a \geq 0,96t$, kun materiaali S275 ($f_{yi} = 275\text{N/mm}^2$);

$a \geq 1,10t$, kun materiaali S355 ($f_{yi} = 355\text{N/mm}^2$);

$a \geq 1,42t$, kun materiaali S420 ($f_{yi} = 420\text{N/mm}^2$);

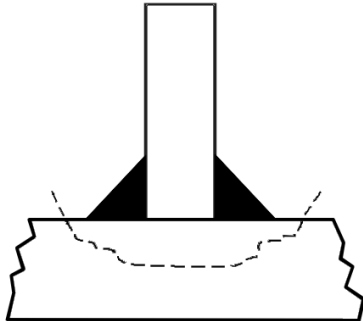
$a \geq 1,48t$, kun materiaali S460 ($f_{yi} = 460\text{N/mm}^2$). (Wardenier ym. 2010, 68-69.)



KUVA 13 Hitsin murtuminen (Wardenier ym. 2010, 79)

Hitsatussa liitoksessa voi tapahtua lamellirepeily, mikäli levyyn kohdistuu sen pinnan vastaan kohtisuoran vetojännitys. Vetojännityksen voi aiheuttaa esimerkiksi hitsauksesta aiheutuvat kutistumisjännitykset tai ulkoisen kuormituksen aiheuttamat vetojännitykset. Varsinkin suurilla materiaalipaksuuksilla ($t > 25\text{mm}$), lamellirepeily voi tapahtua mangaani-sulfaatti pitoisuuksien takia. Lamellirepeily voidaan välttää

valitsemalla rakenneosalle standardin SFS-EN 1993-1-10 mukaiset riittävät paksuussuuntaiset ominaisuudet. Suomalaisilla rakenneputkilla on lamellirepeilyn estävä ominaisuus. (Ongelin, P. & Valkonen, I. 2010, 470; Wardenier ym. 2010, 9.)



KUVA 14 Lamellirepeily (Wardenier ym. 2010, 79)

Rakennesosan paikallinen lommahdus tapahtuu etenkin leveillä ja ohutseinämaisillä rakenneputkilla, joihin kohdistuu puristusjännitys. Rakennesuunnitteluohjeissa esitetään suositellut putken leveyksien ja seinämän paksuuksien välisten suhdelukujen b/t raja-arvot, joilla rajoitetaan rakenneosien paikallisia lommahduksia ja muodonmuutoksia. Lisäksi putkipalkkirakenteet tulee suunnitella käyttäen poikkileikkausluokkien 1 tai 2 sauvoja. (Wardenier ym. 2010, 103.)

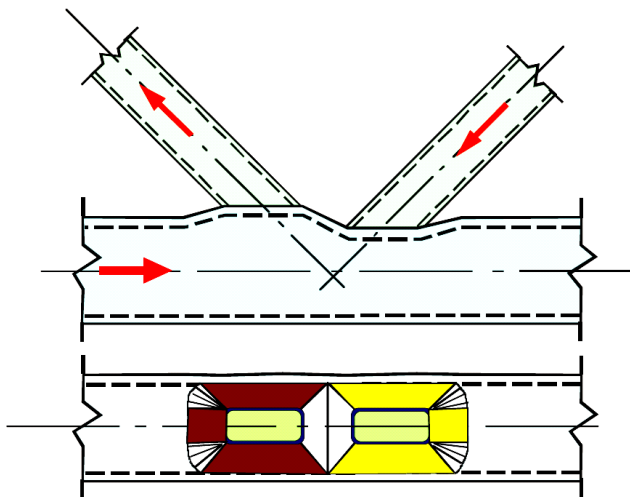
Näin ollen vapaavälisen K-liitoksen osalta tutkittaviksi murtumismuodoiksi jäävät:

- paarteen pinnan murtuminen;
- paarteen leikkausmurtuminen;
- paarteen lävistysleikkautuminen;
- uumasauvan murtuminen.

5.1.1.2 Paarteen pinnan murtuminen

Paarteen pinnan murtuminen tapahtuu, kun puristettu uumasauva puristaa paarteen pintaa sisäänpäin ja vedetty uumasauva vetää paarteen pintaa tasosta ulospäin. Paarteen pinnan murtuminen on mahdollinen, kun kyseessä on ohutseinäinen paarre sekä uumasauvan ja paarrisauvan leveyksien suhde β on pieni. Paarteen pinnan murtuminen on kuormituskokeiden perusteella osoittautunut yleisimmäksi vapaavälisen K-liitoksen murtumismuodoksi, kun $\beta < 0,85$. Keskisuurilla leveyssuhteilla ($0,6 < \beta < 0,8$) paarteen pinnan murtumisen yhteydessä tapahtuu yleensä myös

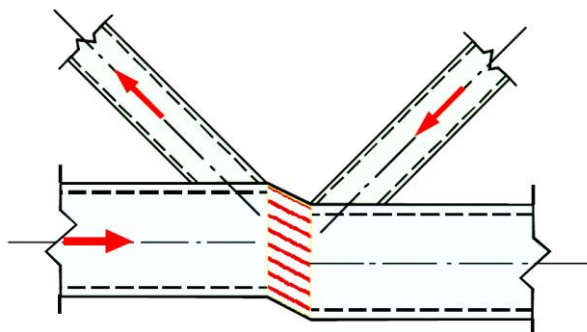
paarteen leikkauslävistymistä, sekä vetorasitetun uumasauvan murtumista. Vetorasitetun uumasauvan murtuminen tarkastellaan kuitenkin vain liitoksissa, joissa esiintyy suhteellisen ohutseinäisiä uumasauvoja. (Packer, Wardenier, Kurobane, Dutta & Yeomans 1992, 28.)



KUVA 15 Paarteen pinnan murtuminen (Wardenier ym. 2010, 119)

5.1.1.3 Paarteen leikkausmurtuminen

Paarteen leikkautuminen tapahtuu vapaavälisessä K-liitoksessa vapaassa välissä uumasauvojen aksiaalisten voimien pystykomponenttien vaikutuksesta. Mahdollisuus paarteen koko poikkileikkauksen alueen leikkausmurtumaan kasvaa, kun uumasauvojen leveyksien suhde parresauvan leveyteen on suuri tai kyseessä on matala ja ohutseinäinen paarre ($\beta \approx 1,0$; $h_0 < b_0$). (Packer ym. 1992, 28; Vainio 2000, 61.)

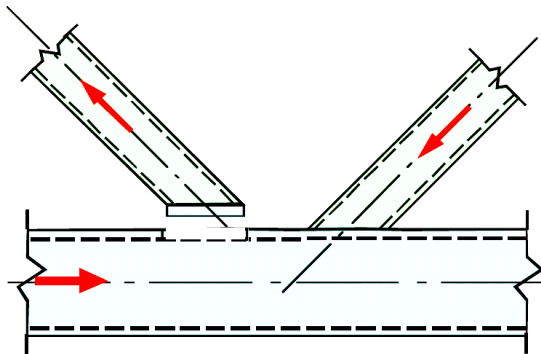


KUVA 16 Paarteen leikkausmurtuminen (Wardenier ym. 2010, 119)

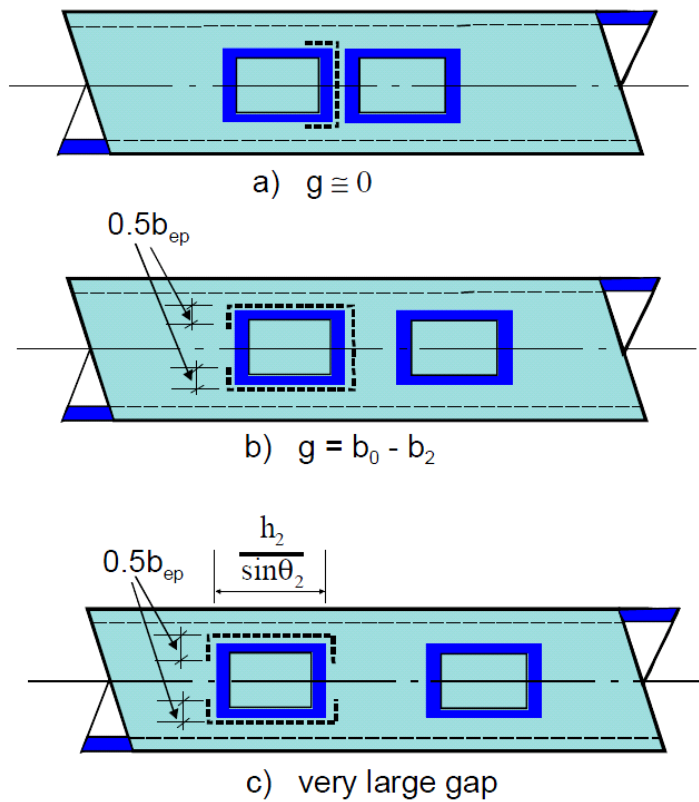
Huomattavaa on, että paarteen leikkauskestävyyden suuruus riippuu merkittävästi vapaasta välistä g . Riittävä plastisoituva tilavuus vapaassa välissä on edellytys, että paarteessa tapahtuu sitkeä leikkausmyötö. Plastisoituvan tilavuuden lähestyessä nollaa, puhutaan katkaisusta, jossa paikallinen vaurio tai murto tapahtuu äkillisesti ilman varoitusta.

5.1.1.4 Paarteen leikkauslävistyminen

Leikkauslävistymisessä parre leikkautuu irti uumasauvan liitoksen piirin alueelta ja uumasauva irtoaa paarteesta. Koska jäykkyys uumasauvan piirin alueella ei ole vakio, muodonmuutoskyky voi joissakin kohtaa olla riittämätön. Tällöin leikkauslävistyskestävyyttä laskettaessa vain tietyt piirin alueet voidaan hyödyntää. Vapaavälisissä K-liitoksissa vapaan välin g mitta on hyvin oleellinen tehollista leikkauslävistymismittaa laskettaessa (kuva 18). Leikkauslävistyminen on yleensä mahdollinen, kun kyseessä ohutseinäinen ja leveä parre sekä uumasauva on hieman parretta kaapeampi. (Vainio 2000, 61; Wardenier ym. 2010, 105.)



KUVA 17 Leikkauslävistyminen (Wardenier ym. 2010, 119)



KUVA 18 Vapaan välin merkitys teholliseen piiriin mittaam (Wardenier ym. 2010, 121)

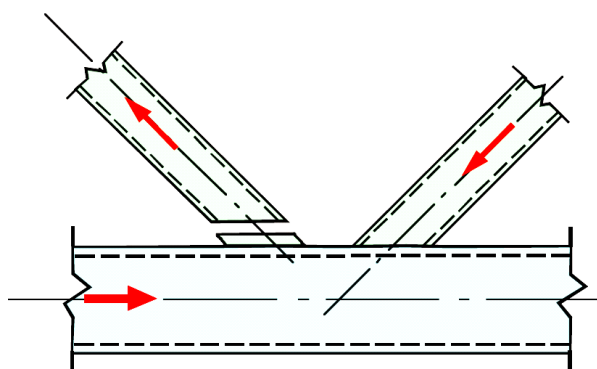


KUVA 19 Leikkauslävistyminen yläpaarteen K-liitoksessa.

Valokuva Tapio Leino. Lupa kuvan käyttämiseen saatu

5.1.1.5 Uumasauvan murtuminen

Kuten paarteen leikkauslävistymisessä, myös uumasauvan murtumismallissa jäykkyys liitoksen piirin alueella ei ole vakio. Lisäksi kestävyysarvoja laskettaessa huomioidaan ainoastaan piirin tehollisen alueen pituus. Uumasauvan murtumisen aiheuttaa sauvavoima, kun paarteen leikkauslävistyksen aiheuttaa sauvavoiman pystysuuntainen komponentti. Kuten leikkauslävistyksessä, liitoksen vapaan välin g tulisi täyttää suunnitteluohjeissa sille asetetut vaatimukset, jotta sauvan täysi kapasiteetti saavutetaan. (Wardenier ym. 2010, 105.)



KUVA 20 Uumasauvan murtuminen (Wardenier ym. 2010, 119)

5.1.2 Ongelmatilanteet

Vapaavälisen K-liitoksen laskentaan liittyy ongelmatilanteita, jolloin liitoksen todellista kestävyyttä ei pystytä nykyisten rakennesuunnitteluohjeiden perusteella arvioimaan.

5.1.2.1 Momenttien huomioiminen

Ongelmatilanne syntyy esimerkiksi kun liitoksen kestävyys ei perustu pelkästään sen aksiaaliseen kestävyden mitoitusarvoon. Tämä voi tapahtua kolmesta syystä:

- Liitoksen liian suuresta epäkeskisyydestä aiheutuvat momentit täytyy huomioida mitoituksessa.
- Liitoksen aiheutuu ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa momenteja.
- Liitoksen kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat sekundaariset momentit täytyy huomioida mitoituksessa.

Yleisesti taivutuksen ja aksiaalisen voiman yhteisvaikutus täytyy huomioida siten, että seuraava ehto on voimassa:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad (5.1)$$

missä:

$M_{ip,i,Ed}$ on sisäisen momentin mitoitusarvo ristikon tasossa;

$M_{ip,i,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo ristikon tasossa;

$M_{op,i,Ed}$ on sisäisen momentin mitoitusarvo ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa;

$M_{op,i,Rd}$ on taivutuskestävyyden mitoitusarvo ristikon tasoa vastaan kohtisuorassa tasossa. (SFS-EN 1993-1-8, 133.)

RHS-putkien välisten K- tai N-liitosten taivutuskestävyyksien mitoitusarvojen laskemiselle ei rakennesuunnitteluohjeista löydy ohjeistusta, joten liitoksen kestävyyttä yhdistetylle taivutukselle ja aksiaaliselle voimalle ei pystytä luotettavasti arvioimaan.

5.1.2.2 Kiertymiskyky

Mikäli vapaa väli g on pienempi kuin standardin SFS-EN 1993-1-8 asettama minimiarvo (liite 2 taulukko 4), vaikuttaa se oleellisesti liitoksen muodonmuutoskykyyn. Liitoksella tulee olla riittävä muodonmuutoskyky, jotta kuormitustilanteessa sisäiset voimasuureet pystyvät uudelleenjakautumaan ja sekundaariset momentit häviävät. Tutkimuksen mukaan tyypillisellä K-liitoksella vapaan välin ollessa reunaehto pienempi, sekundaariset momentit eivät kykene uudelleenjakautumaan riittävästi. Tällöin liitoksella ei ole vaadittavaa kiertymiskykyä, jotta liitokselle voitaisiin suorittaa plastisuusteorian mukainen tarkastelu. (Fleischer & Puthli 2009, 299-300.)

5.1.2.3 Vältettävissä olevat murtumismuodot

Mikäli rakennesuunnitteluohjeiden asettamat geometriaehdot (liite 2 taulukko 4) rakenneosan leveyden ja seinämän paksuuden suhteen eivät ole voimassa, täytyy liitoksen kestävyys sekä paarteen sivun murtumisen suhteen, että liitoksen paikallisen

lommahduksen suhteen tarkistaa. Rakennesuunnitteluohjeista ei löydy ohjeistusta kestävyysien laskentaa paarteen sivun murtumisen tai liitoksen paikallisen lommahduksen suhteen vapaavälisen K-liitoksen osalta.

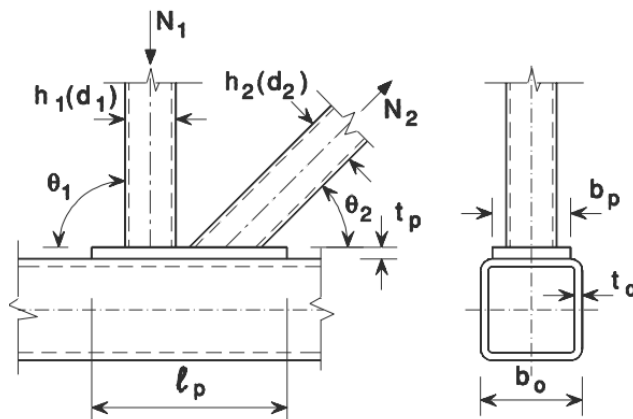
5.1.3 Ratkaisut

5.1.3.1 Liitoksen uudelleenmuotoilu

Ongelmatilanteessa ensisijainen vaihtoehto on aina muotoilla liitos täyttämään sille asetetut geometriaehdot ja liitoksen epäkeskisyyteen liittyvät rajat. Tällöin mitoitus voidaan tehdä standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan luotettavasti pelkästään aksiaalisten kestävyysien suhteen.

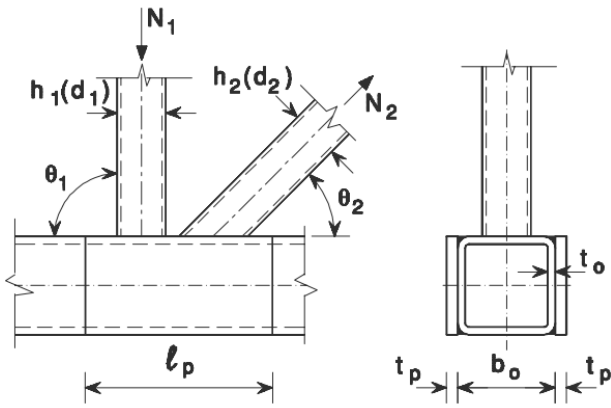
5.1.3.2 Liitoksen vahvistaminen

Mikäli liitosta ei voida muotoilla uudelleen, jää ainoaksi vaihtoehdoksi liitoksen vahvistaminen. Vapaavälinen K-liitos voidaan vahvistaa kolmella eri tavalla, riippuen minkä murtumismuodon suhteen liitoksen kestävyyttä halutaan parantaa. Liitos voidaan vahvistaa laippalevyjä käyttäen (kuva 21), jos sen kestävyyttä paarteen pinnan murtumisen, uumasauvan murtumisen tai lävistymisleikkautumisen suhteen halutaan parantaa (SFS-EN 1993-1-8, 139).



KUVA 21 Liitoksen vahvistaminen laippalevyllä (SFS-EN 1993-1-8, 138)

Pareittaisten vahvistuslevyjen käyttö (kuva 22) lisää liitoksen kestävyyttä leikkausmurtumista vastaan (SFS-EN 1993-1-8, 139).



KUVA 22 Liitoksen vahvistaminen pareittaisilla vahvistuslevyillä (SFS-EN 1993-1-8, 138)

5.1.4 Esimerkkiliitoksen kestävyysien raja-arvot

Liitteessä 3 suoritetaan vapaaväliselle K-liitokselle esimerkkilaskelma. Liitoksen alkuperäinen geometria ei täytä sille asetettuja vaatimuksia (liite 2 taulukko 4), joten liitoksella ei lähtökohtaisesti ole riittävää muodonmuutoskykyä. Liitoksen kestävyysien raja-arvot on tässä kuitenkin laskettu virheellisesti pelkkien aksiaalisten kestävyysien perusteella. Seuraavaksi liitos muotoillaan täyttämään sille asetetut vaatimukset.

a) Kestävyysien mitoitusarvot, kun liitoksella ei ole vaadittua kiertymiskykyä:

- paarteen pinnan murtuminen: $73,73\text{kN}$
- paarteen leikkautuminen: $151,01\text{kN}$
- uumasauvan murtuminen: $162,94\text{kN}$
- lävistysleikkautuminen: $121,55\text{kN}$

b) Liitoksen uudelleenmuotoilun jälkeen:

- paarteen pinnan murtuminen: $73,73\text{kN}$
- paarteen leikkautuminen: $149,95\text{kN}$
- lävistysleikkautuminen: $128,13\text{kN}$
- uumasauvan murtuminen: $162,94\text{kN}$

c) Laippalevyllä vahvistamisen jälkeen:

- paarteen pinnan murtuminen: $793,27\text{kN}$
- paarteen leikkautuminen: $149,95\text{kN}$
- uumasauvan murtuminen: $221,52\text{kN}$
- lävistysleikkautuminen: $485,38\text{kN}$

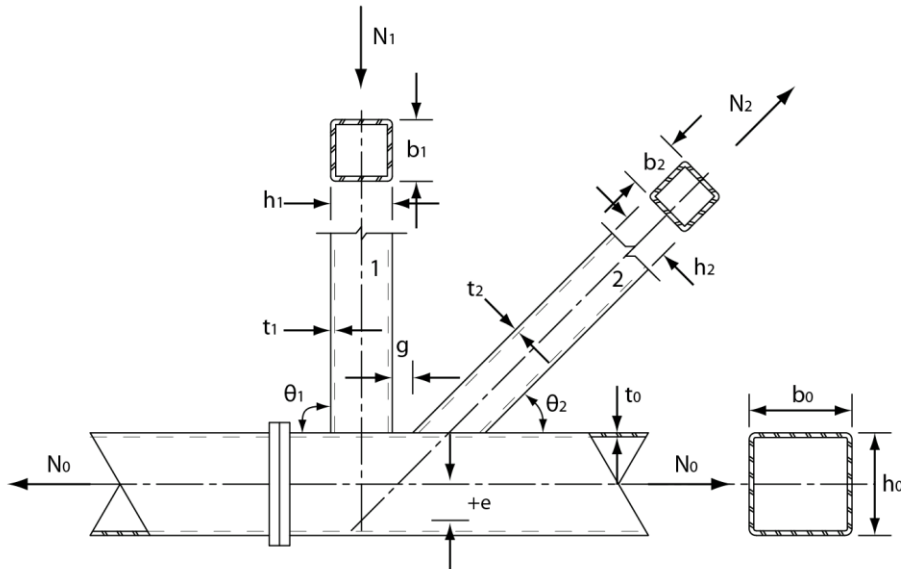
Uudelleenmuotoilun jälkeen liitoksen määrääväksi murtumismuodoksi saadaan paarteiden pinnan murtuminen, joka tapahtuu sitkeästi. Koska liitos on suunniteltu rakennesuunnitteluohjeiden asettamien vaatimusten mukaisesti, voidaan sillä katsoa olevan riittävä muodonmuutoskyky. Tällöin liitos käyttäytyy ylikuormitustilanteessa sitkeästi ja kykenee hyödyntämään plastisoitumisominaisuutensa.

Laippalevyllä vahvistamisen jälkeen liitoksen alkuperäinen vapaa väli saatiin kasvatettua riittävän suureksi, jotta vaatimukset täyttyvät. Liitoksen murtumismuodoksi saadaan paarteiden leikkautuminen. Paarre murtuu lopulta leikkausmyöhdön vaikutuksesta, joten liitoksen voidaan katsoa käyttäytyvän ylikuormitustilanteessa sitkeästi.

Mikäli esimerkkiliitos olisi hyväksytty alkuperäisellä geometrialla, jättämällä rakennesuunnitteluohjeiden asettamat vaatimukset huomiotta, olisi murtumismuodoksi saatu paarteiden pinnan murtuminen. Liitoksen toiminta ylikuormitustilanteessa vaikuttaa tällöin sitkeältä, vaikka todellisuudessa liitoksen käyttäytymistä on lähes mahdotonta ennustaa, koska käytetyt mitoituskaavat eivät huomioi taivutusmomenttien vaikutusta ja eivät näin ollen ole voimassa. Vapaan välin lähestyessä nolaa myös mahdollisuus paarteiden katkaisuun kasvaa huomattavasti (ks. 3.2.2.2)

5.2 Paarteen laippaliitos N-liitoksessa

Tässä luvussa tarkastellaan neliön muotoisista rakenneputkista koostuvaa vapaavälistä N-liitosta, jossa paarre on jatkettu laippaliitoksella. Aluksi määritetään liitoksen murtumismuodot sekä vertaillaan eri murtumistapoja vastaavia kestävyysmitoitussarvoja. Lopuksi pohditaan analyttisen liitosmallin todenmukaisuutta ja liitoksen mitoitukseen liittyviä ongelmatilanteita.



KUVA 23 N-liitos paarteen laippaliitoksella

5.2.1 Murtumismuodot

Kuvan 23 mukaiselle N-liitokselle voidaan esittää seuraavat murtumismuodot:

- hitsin murtuminen uumasauvoissa;
- lamellirepeytyminen;
- paarteen pinnan murtuminen;
- paarteen lävistysleikkautuminen;
- paarteen leikkausmurtuminen;
- uumasauvan murtuminen;
- puristetun uumasauvan paikallinen lommahdus;
- parresauvan paikallinen lommahdus;
- hitsin murtuminen laippalevyssä;
- pultin murtuminen;
- laippalevyn taivutusmyötö.

Kuten luvun 5.1 vapaavälisessä K-liitosesimerkissä, myös vapaavälisen N-liitoksen tapauksessa osa murtumismuodoista voidaan välttää valitsemalla rakenneosalle tai hitsille lähtökohtaisesti riittävät ominaisuudet. Vapaavälisen N-liitoksen kestävyyksien mitoitusarvot perustuvat samoihin murtumismalleihin, joita esiintyy vapaavälisessä K-liitoksessa (ks. 5.1.1), joten tässä luvussa tarkasteltaviksi murtumismuodoiksi jäävät:

- pultin murtuminen;
- laippalevyn taivutusmyötö.

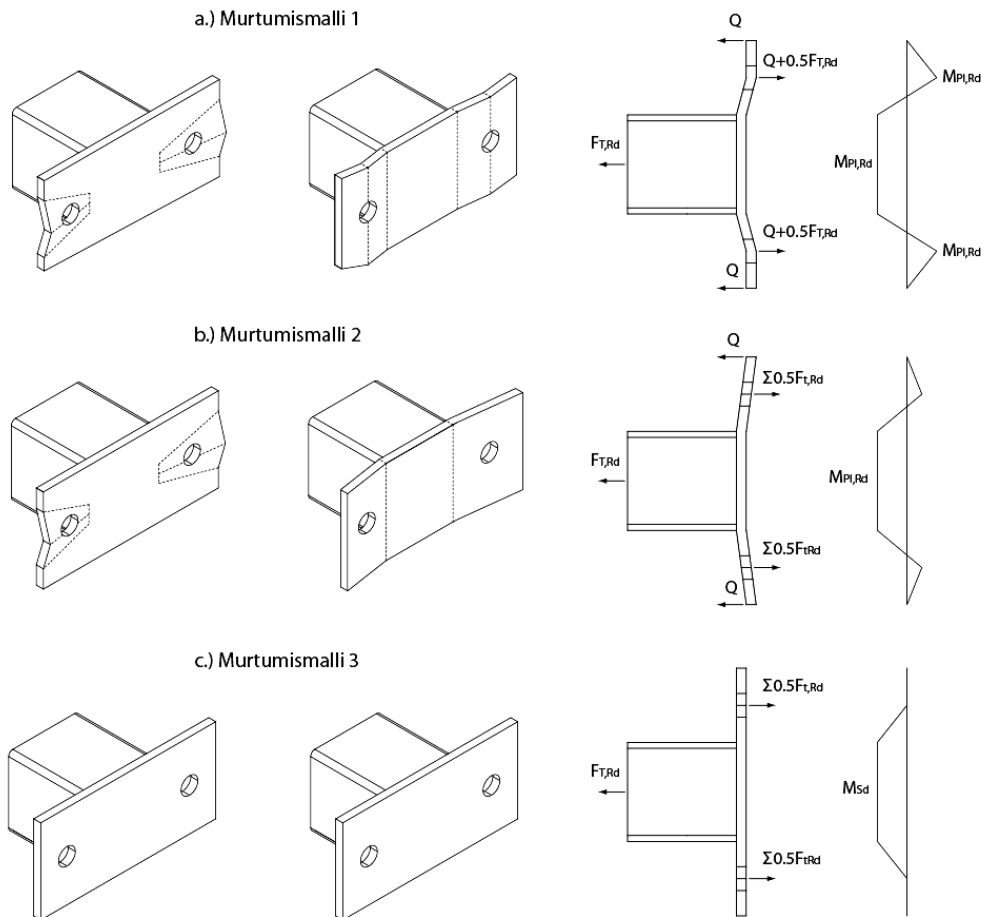
5.2.1.1 Vedetty ekvivalentti T-osa

Päätylevyn taivutuskestävyyttä sekä pulttien vetokestävyyttä voidaan arvioida laske-
malla liitoksen kestävyys vedetyn ekvivalentin T-osan avulla. T-osan muodostavat
parre ja laippa (Vainio 2000, 97).

Ekvivalentille T-osalle voidaan määritellä kuvan 24 mukaisesti kolme erilaista murtu-
mismallia:

- a.) Murtumismalli 1: täyden mekanismin syntyminen laipassa;
- b.) Murtumismalli 2: ruuvin murtuminen, kun laippa samalla myötää;
- c.) Murtumismalli 3: ruuvin murtuminen.

Kuvassa 24 vasemman puoleinen kappale esittää komponentin todellisen käyttäyty-
misen ja oikean puoleinen kappale puolestaan esittää ekvivalentin T-osan käyttäyty-
misen. Termiä ekvivalentti T-osa on käytetty standardissa SFS-EN 1993-1-8 kuva-
maan tyypillistä ruuviliitoksen taivuttamaa levyosaa. Murtumismallissa 1 T-osaan
laippaan syntyy neljä myötöniveltä. Myötönivelistä kaksi syntyvät ruuvin akselin koh-
dalle vipuvoiman Q vaikutuksesta. Toiset kaksi myötöniveltä syntyvät T-osan laipan ja
paarteen sivujen yhtymäkohtiin. Murtumismallissa 1 murtuminen tapahtuu, kun laip-
paan kehittyä myötömekanismi. Murtumismallissa 2 myötönivelet kehittyvät T-osan
laipan ja paarteen sivujen yhtymäkohtiin. Murtumismallissa 2 murtuminen tapahtuu,
kun ruuvit ylittävät vetokestävyytensä ennen kuin laippaan kerkeää kehittyä myötö-
mekanismi. Murtumismallissa 3 murtuminen tapahtuu pelkästään ruuvien vetokestä-
vyyden ylittyessä. (Kouhi 2004, 21; Leino 2012.)



KUVA 24 T-osan murtumismuodot ja voimasuureiden jakautuminen

Murtumismallissa 1 ja 2 ruuveihin voi syntyä vipuvoimia jos:

$$L_b \leq L_b^* \quad (5.2)$$

missä:

” L_b on ruuvin venymäpituus, jonka arvoksi valitaan liitospaksuus (liitettävien materiaalien ja aluslaattojen yhteenlaskettu paksuus) lisättyä arvolla, joka on puolet ruuvin kannan ja mutterin yhteenlasketusta paksuudesta”;

L_b^* saadaan yhtälöstä 5.3 (SFS-EN 1993-1-8, 74).

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s}{l_{eff,1} t_p^3} \quad (5.3)$$

missä:

m on ruuveireiän keskipisteen ja paarteen sivun välinen kohtisuora etäisyys;

A_s on ruuvin jännityspoikkipinta-ala;

$l_{eff,1}$ on tehollisen pituuden arvo murtumismallissa 1;

t_p on laippalevyn paksuus.

Kuvassa 25 esitetään ruuveilla kiinnitetyn T-osan mahdolliset myötömekanismit, kun rakenneosassa on yksi ruuvirivi. Näitä ovat:

- a) Ruuvien ympärille muodostuva pyöreä myötökuvio, jonka tehollinen pituus on:

$$l_{eff,cp} = 2\pi m \quad (5.4)$$

missä:

m on ruuvireiän keskipisteen ja paarteen sivun välinen kohtisuora etäisyys.

- b) Ruuvien ympärille muodostuva ei-pyöreä myötökuvio, jonka tehollinen pituus on:

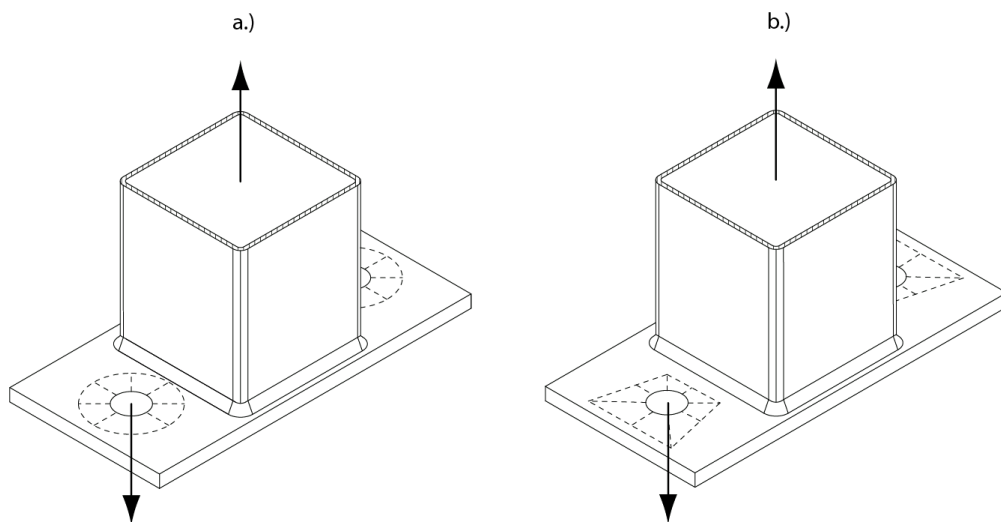
$$l_{eff,nc} = 4m + 1,25n \quad (5.5)$$

missä:

m on ruuvireiän keskipisteen ja paarteen sivun välinen kohtisuora etäisyys;

n on ruuvien reunaetäisyys. (SFS-EN 1993-1-8, 74 ja 84.)

Ruuvirivin tehollisena pituutena mitoituksessa käytetään edellä mainituista lausekkeista pienimpään tulokseen johtavaa arvoa (Vainio 2000, 98).



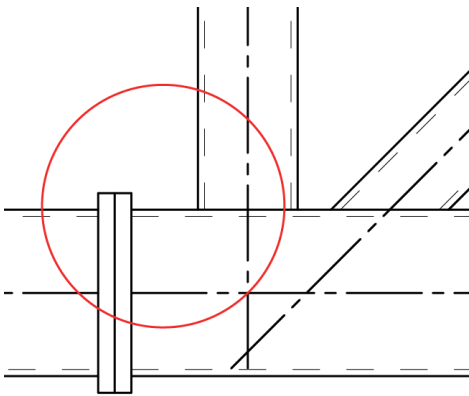
KUVA 25 Ruuvien mahdolliset myötömekanismit yhden ruuvirivin tapauksessa

5.2.2 Ongelmatilanteet

Mikäli vapaavälisen N-liitoksen mitoittamiseen liittyy samoja geometrian muotoiluongelmia tai taivutusta kuin vapaavälisen K-liitoksen mitoittamiseen (ks. 5.1.2), on ainoa vaihtoehto liitoksen uudelleenmuotoilu tai vahvistaminen (ks. 5.1.3).

5.2.2.1 Parre uumasauvan ja laipan välissä

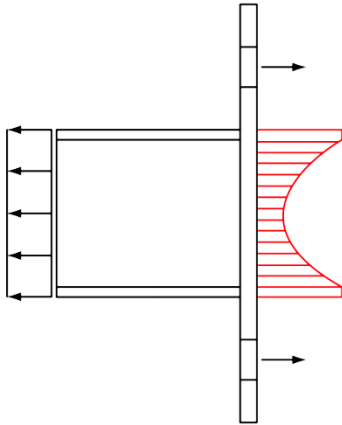
Jännitysten jakautumista laipan taivutuksen ja puristetun uumasauvan yhteisvaikutuksesta paarteessa kuvan 26 osoittamalla alueella on hankala arvioida luotettavasti ilman numeerisia laskentamenetelmiä, joten laippalevyn vähimmäisetäisyydestä uumasauvan reunasta ei pystytä antamaan suosituksia. Yksi arvio voisi olla käyttää vähintään samaa vapaata väliä kuin uumasauvojen välissä.



KUVA 26 Paarteen pinta laippalevyn ja uumasauvan välissä

5.2.2.2 Laippalevyn mitoitus

Menetelmässä, jolla arvioidaan laippalevyn kestävyyttä (ks. 5.2.1.1) parreputki oletetaan täysin jäykäksi, jolloin poikkileikkaus säilyy taivutuksessa tasona. Todellisuudessa parreputken jäykkyys vaihtelee laippalevyn eri kohdissa siten, että putken sivuseinien kohdalla levyn ja putken yhteinen jäykkyys on huomattavan paljon suurempi kuin keskellä (kuva 27).



KUVA 27 Paarreputken vaihteleva jännitys

Kuvasta voidaan päätellä, että voimat siirtyvät nurkkien kohdilta, jolloin hitsaus tulisi ohjeistaa aloitettavaksi putken sivun keskeltä. Tällöin hitsistä aiheutuvat lisäjännitykset eivät kohdistu nurkka-alueille, joissa jännityksen arvot ovat suurimmat (Leino 2012).

5.2.3 Ratkaisut

Todellisen jännitys jakauman selvittämiseksi liitoksessa tarvitaan tarkka numeerinen laskentamalli, jossa laippalevyn ja pulttien välinen vuorovaikutus voidaan mallintaa vastaamaan rakenteen todellista käyttäytymistä. Toisaalta, jos kaikkien samanlaisten liitosten mitoitus tehdään eniten rasitetun liitoksen laskentakuormilla, teräsrakenteen kokonaiskestävyydestä tulee riittävä.

5.2.4 Esimerkkiliitoksen kestävyysien raja-arvot

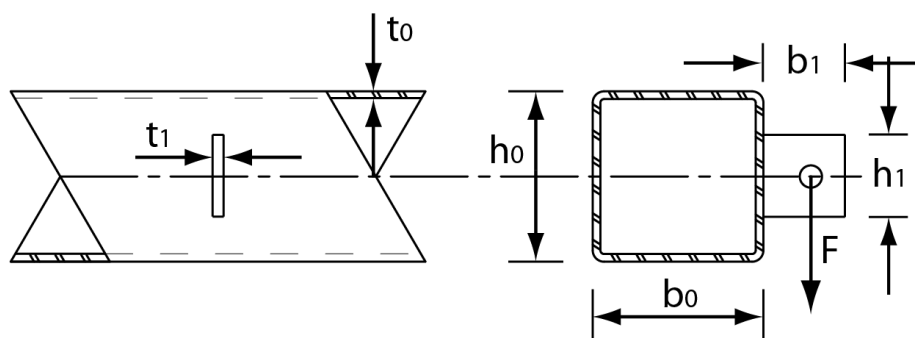
Liitteessä 4 suoritetun laskelman perusteella esimerkkiliitokselle eri murtumismuotoja vastaaville kestävyyksille saadaan seuraavat raja-arvot:

- laippalevyn taivutusmyötö: $186,39kN$
- pultin murtuminen: $406,40kN$
- hitsin murtuminen: $354,06kN$
- paarteen pinnan murtuminen: $63,85kN$
- paarteen leikkautuminen: $129,30kN$
- lävistysleikkautuminen: $121,74kN$
- uumasauvan murtuminen: $162,94kN$

Liitos käyttäytyy ylikuormitusilanteessa sitkeästi. Laippaliitoksen murtumismuodoksi saadaan laippalevyn taivutusmyötö, joka tapahtuu sitkeästi (kuva 6). Huomattavaa on, että pulttien murtumisen tarvittava kuorma suhteessa laippalevyn taivutusmyötöön on yli 2-kertainen, ja laipan kiinnityshitsienkin murtokuorma on lähes 2-kertainen. Tämä varmistaa sen, ettei murtuminen pääse laippaliitoksessa tapahtumaan äkillisesti. Varsinaisessa N-liitoksessa murtumistavaksi saadaan paarteen pinnan murtuminen, joka myös tapahtuu sitkeästi. Lävistysleikkautumisen raja-arvon suhde paarteen pinnan murtumisen kuorman suhteen on melkein 2-kertainen.

5.3 Poikittaissuuntainen liitoslevy paarteessa

Tässä kohdassa tarkastellaan poikittaissuuntaisen liitoslevyn ja parreputken välistä hitsattua liitosta (kuva 28). Poikittainen liitoslevy on hitsattu keskelle parretta. Liitoslevyssä on ruuviliitos, joten myös kestävyudet ruuvin suhteen tarkastellaan. Voima F vaikuttaa 70 mm :n etäisyydellä paarteen pinnasta. Liitoslevy hitsataan parreputkeen 6 mm :n pienahitsillä ympäri.



KUVA 28 Hitsattu liitoslevy paarteessa

Taulukko 2 Liitoksen lähtötiedot

Komponentti	b_i (mm)	h_i (mm)	t_i (mm)	Teräslaji	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)
Parre	250	250	8	S355J2H	355	510
Liitoslevy	120	120	12	S355J2G3	355	510

Liitostyypille ei löydy rakennesuunnitteluohjeista laskentamallia vaikka liitos on yleisesti käytössä oleva varusteliitos. Voima F aiheuttaa liitokseen paarteen poikkileikkauksen suuntaisen taivutusmomentin. Taivutusmomentista aiheutuva jännitysja-

kauma on symmetrinen, johtuen liitoslevyn keskeisestä sijainnista paarteen sivussa. Jännitys jakauma saattaa kuitenkin sisältää arvaamattomia jännityshuippuja.

5.3.1 Murtumismuodot

Kuvan 28 mukaiselle liitostyypille voidaan esittää seuraavat murtumismuodot:

- lamellirepeytyminen;
- hitsin murtuminen;
- paarteen sivun murtuminen;
- paarteen pinnan murtuminen;
- lävistysleikkautuminen;
- liitoslevyn murtuminen;
- ruuvin murtuminen leikkausvoimasta;
- liitoslevyn murtuminen reunapuristuksessa.

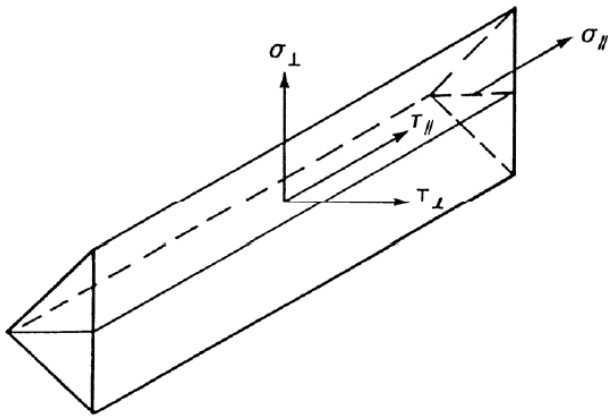
Lamellirepeily voidaan välttää valitsemalla materiaalille riittävät paksuussuuntaiset ominaisuudet (ks. 5.1.1.1). Murtumismuodoista sitkeää käyttäytymistä edustavat paarteen pinnan murtuminen, paarteen sivun murtuminen, liitoslevyn murtuminen, ja ruuvin murtuminen reunapuristuksessa (kuva 6). Paarteen sivun murtuminen ei tässä tapauksessa muodostu kriittiseksi murtumismuodoksi, koska liitoslevy ei ylety paarteen reuna-alueille. Haurasta käyttäytymistä edustavat ruuvin murtuminen leikkausvoimasta ja leikkauslävistyminen. Leikkauslävistymistä ei voida pitää todennäköisenä, johtuen suhteellisen suuresta putken seinämän paksuudesta. Hitsi voi murtua joko sitkeästi tai hauraasti (ks. 3.2.3).

5.3.1.1 Hitsin murtuminen

Pienahitsin kestävyuden mitoitusarvo voidaan määrittää yksinkertaistetun menetelmän tai komponenttimenetelmän mukaan. Komponenttimenetelmässä hitsin yksikköpituuden siirtämät voimat jaetaan hitsin pituuden suuntaisesti yhdensuuntaisiin ja kohtisuoriin komponentteihin sekä hitsin laskentapinnan suuntaisesti yhdensuuntaisiin ja kohtisuoriin komponentteihin. Hitsin poikkipinnalla jännitysten oletetaan jakautuvan tasan, josta seuraa kuvan 29 mukaisesti normaalijännityksiä ja leikkausjännityksiä seuraavasti:

- σ_{\perp} on laskentapintaa vastaan kohtisuora normaalijännitys;
- σ_{\parallel} on hitsin pituuden suuntainen normaalijännitys;

- τ_{\perp} on hitsin pituutta vastaan kohtisuora leikkausjännitys;
- τ_{\parallel} on hitsin pituuden suuntainen leikkausjännitys. (SFS-EN 1993-1-8, 46.)



KUVA 29 Pienahitsien laskentapoikkipinnan jännitykset (SFS-EN 1993-1-8, 46)

Pienahitsin kestävyys standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan on riittävä, jos molemmat seuraavat ehdot ovat voimassa:

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_u / \beta_w \gamma_{M2} \quad (5.6)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 f_u / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

missä:

f_u on heikoimman liitettävän osan vetomurtolujuuden arvo;

β_w on pienahitsin korrelaatiokerroin

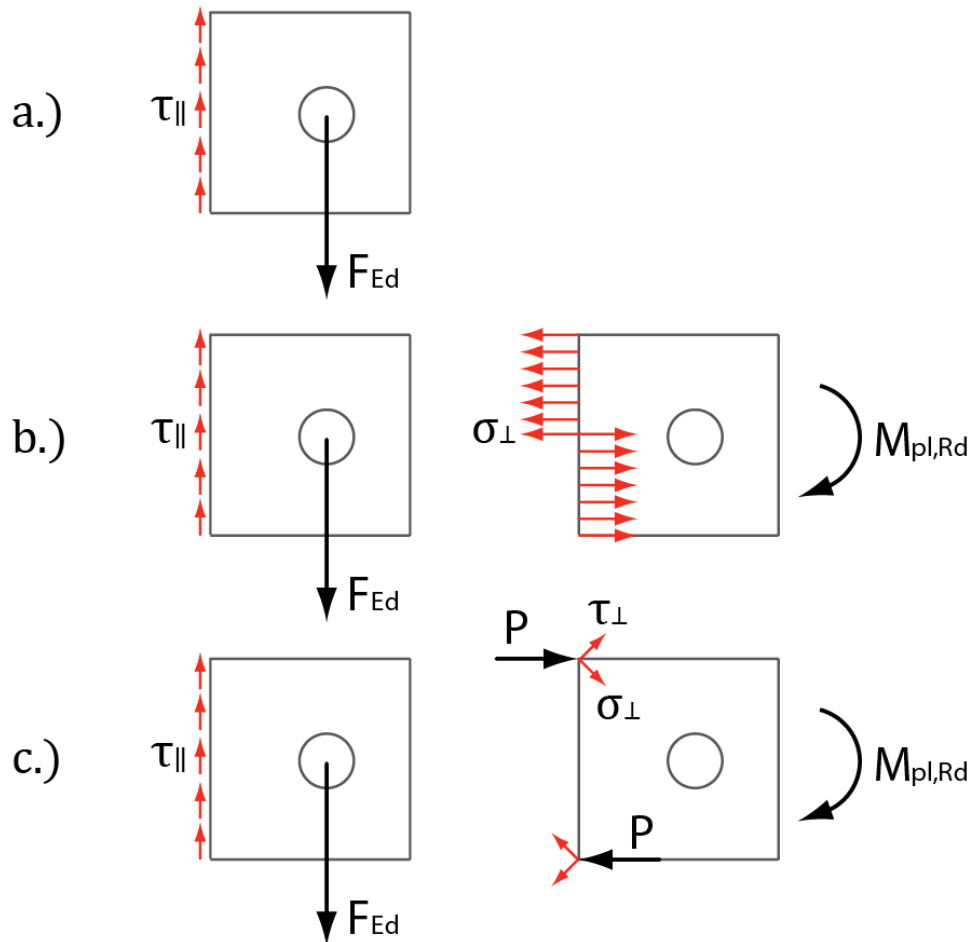
γ_{M2} on liitoksen osavarmuusluku (SFS-EN 1993-1-8, 46).

Tarkastellaan liitoslevyn hitsin vertailujännityksen arvoja (liite 5) kolmessa eri tilanteessa:

- Huomioidaan pystyhitsien mitoituksessa ainoastaan leikkausvoima;
- Huomioidaan pystyhitsien mitoituksessa leikkausvoiman lisäksi taivutusmomentista aiheutuva lisäjännitys;
- Oletetaan, taivutusmomentista syntyvät jännitykset siirtyvät kokonaisuudessaan levyn yläpuoliselle lyhyelle vaakahitsille.

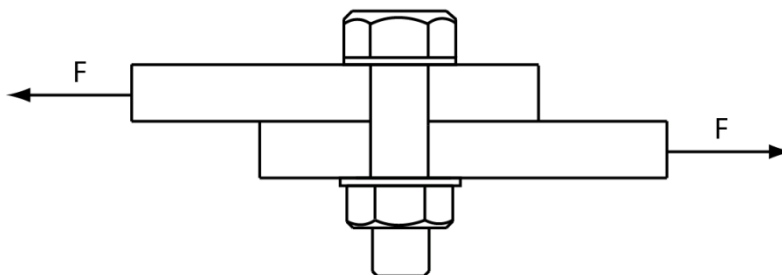
Kuvassa 30 esitetään oletetut vertailujännityksen jakaumat eri tarkastelutilanteissa, missä:

F_{Ed} on liitoslevyssä vaikuttava pystyvoima;
 $M_{pl,Ed}$ on pystyvoimasta aiheutuva momentti;
 P on momentin aiheuttama vaakavoima.



KUVA 30 Rakennemallit liitoslevyn hitsien mitoittamiseksi

5.3.1.2 Ruuvien leikkauskestävyys



KUVA 31 Yksileikkeinen ruuviliitos

Yksileikkeisen ruuviliitoksen leikkauskestävyyden mitoitusarvo $F_{v,Rd}$ voidaan laskea yhtälöstä:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} \quad (5.6)$$

missä:

α_v on ruuvin lujuusluokasta riippuva kerroin;

f_{ub} on ruuvin vetomurtolujuus;

A on ruuvin ruuvin bruttopinta-ala (kun ruuvin kierteet ovat leikkaustasossa $A=A_s$);

γ_{M2} on liitoksen osavarmuusluku (SFS-EN 1993-1-8, 28).

5.3.1.3 Reunapuristuskestävyys

Yksileikkeisissä päällekkäisliitoksissa, joissa on vain yksi ruuvirivi (kuva 30), reunapuristuskestävyys $F_{b,Rd}$ ruuvia kohti rajoitetaan arvoon:

$$F_{b,Rd} = 1,5 f_u d t / \gamma_{M2} \quad (5.7)$$

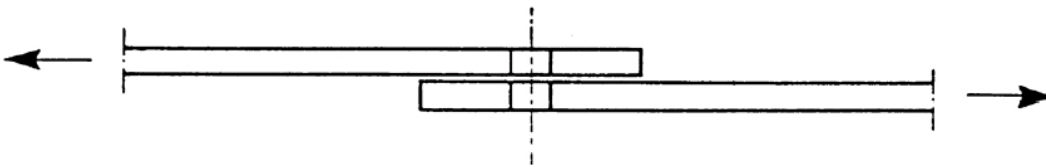
missä:

f_u on liitoslevyn murtolujuus;

d on ruuvin halkaisija;

t on tarkasteltavan osan paksuus;

γ_{M2} on liitoksen osavarmuusluku (SFS-EN 1993-1-8, 26).

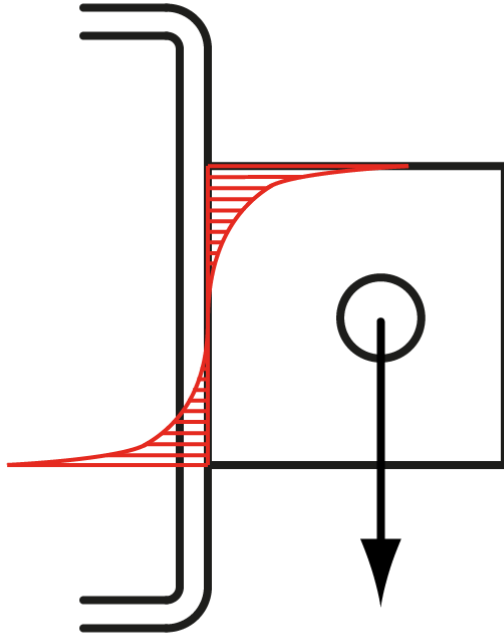


KUVA 32 Yksinkertainen päällekkäisliitos (SFS-EN 1993-1-8, 27)

5.3.2 Ongelmatilanteet

Lähtökohtaisesti paarteen pinta oletetaan hitsiä mitoittaessa täysin jäykäksi, vaikka todellisuudessa pinta ei säily kuormitettaessa tasana. Todelliset liitoslevyn reunajännitysten suuruudet riippuvat paarteen pinnan jäykkyydestä, joka on reunoilla suurem-

pi kuin keskellä. Reuna-alueille voi syntyä arvaamattomia jännityshuippuja, jonka seurauksena rakenne saavuttaa nopeasti myötörajansa ja kuormien uudelleen jakautuminen alkaa.

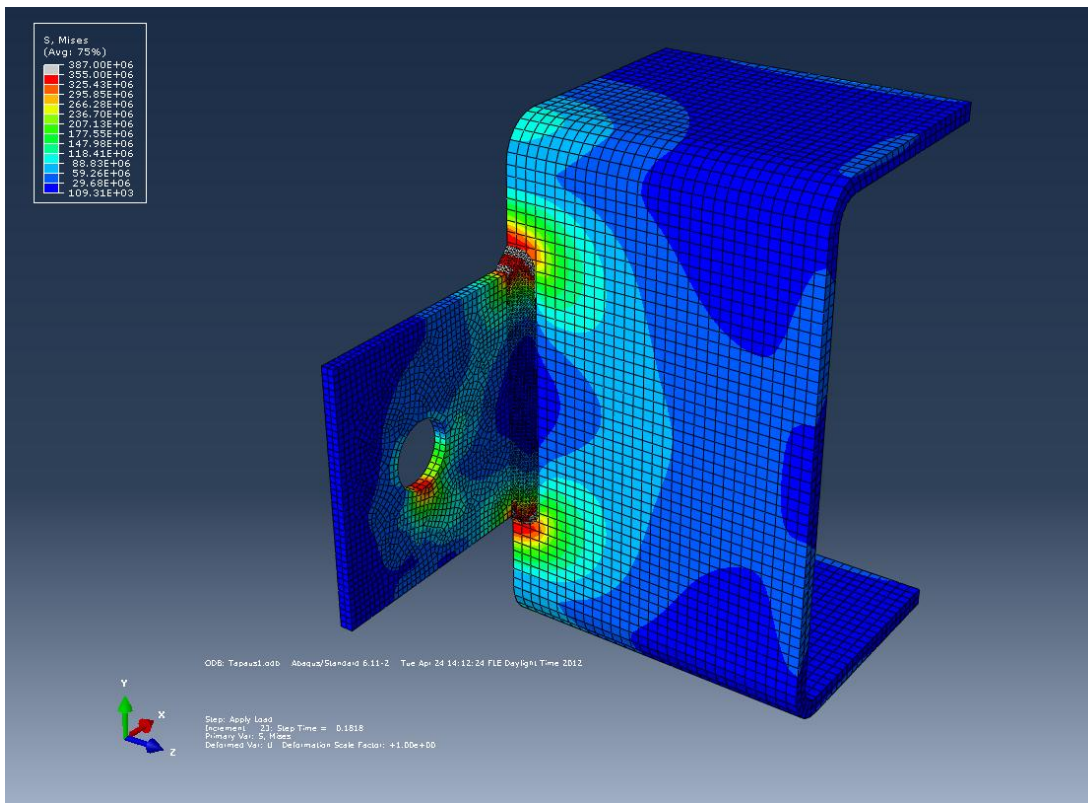


KUVA 33 Liitoslevyn jännitykset

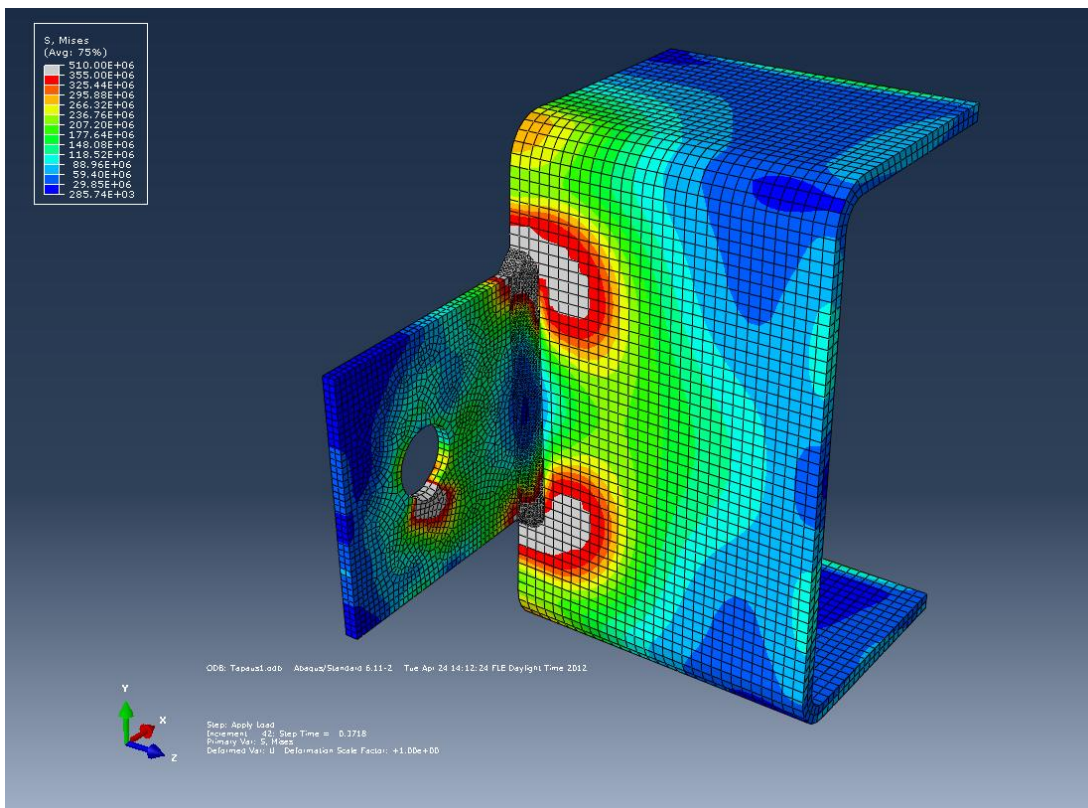
Kuvan 30 tilanteessa c.) tarkasteltava vaakahitsi ei täytä voimaa siirtävälle hitsille asetettuja vaatimuksia. Standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaan hitsin tehollinen pituus tulee olla vähintään 30mm tai 6 kertaa a -mitta, jotta hitsiä voidaan käsitellä voimaa siirtävänä (SFS-EN 1993-1-8, 44).

5.3.3 Laskenta FEM-ohjelmalla

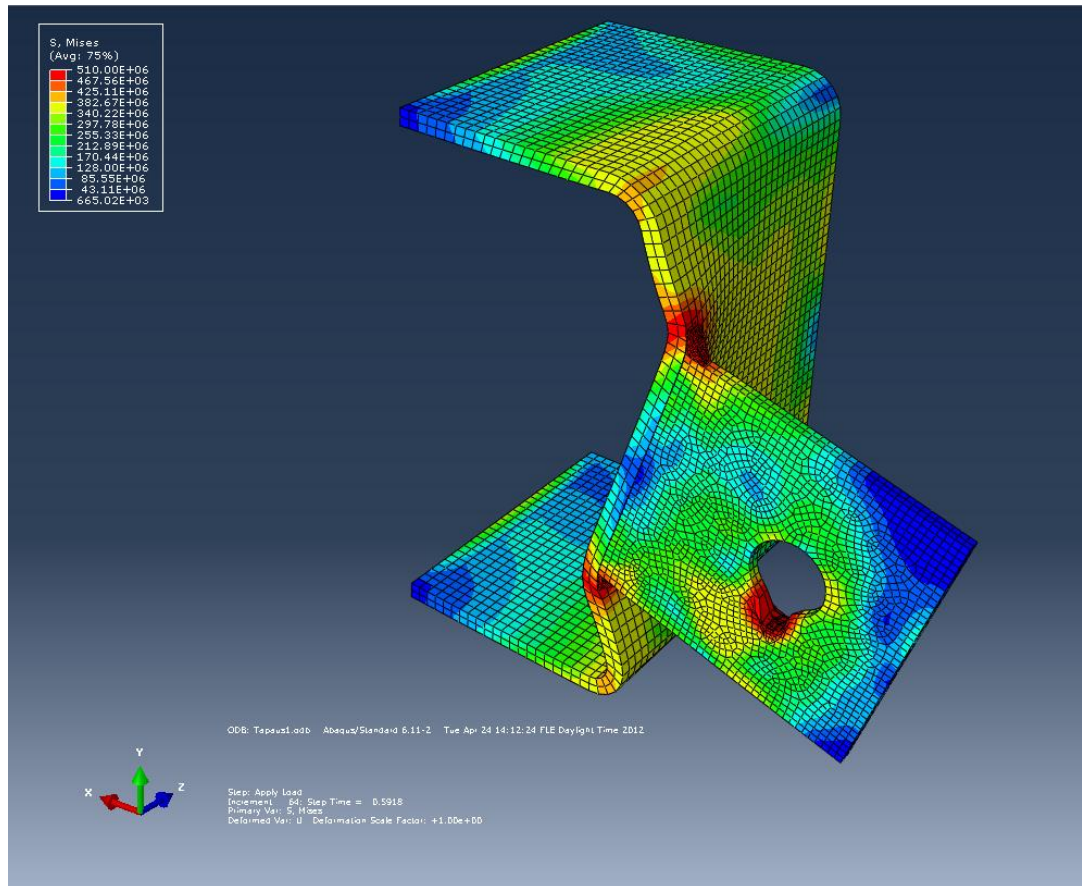
Liitoksen kestävyyttä arvioidaan FEM-mallin avulla. Laskentatulosten perusteella on tarkoitus arvioida sitkeästi ja hauraasti käyttäytyvien osien tai rakenteen kohtien merkittävyys koko liitoksen kestävyuteen. Materiaalin epälineaarisuus huomioidaan laskennassa, jolloin murtovenymäksi oletetaan standardin SFS-EN 1993-1-1 mukainen vähimmäisvaatimus 15 %. Mallinnuksessa käytetään taulukossa 2 esitettyjä lähtötietoja. Liitos voidaan ajatella symmetriseksi liitoslevyn molemmiin puoliin, joten vain toinen puolisko on otettu laskentamalliin mukaan. Liitoslevyyn kohdistuva pystykuorma on myös puolitetty laskentamalliin. Kuvateksteissä ilmoitettu pystykuorma ilmaisee kokonaiseen rakenteeseen kohdistuvaa pystyvoimaa F .



KUVA 34 Myötörajan ylitys paarteen pinnassa. Von Mises -jännitykset, kun pystykuorma on 43,63kN



KUVA 35 Von Mises -jännitykset, kun pystykuorma on 89,23kN. Myötörajan ylittäneet alueet näkyvät kuvassa harmaalla



KUVA 36 Murtorajan ylitys paarteen pinnassa. Von Mises -jännitykset, kun pystykuorma on 142,03kN

5.3.4 Esimerkkiliitoksen kestävyysien raja-arvot

Liitteessä 5 suoritettua laskelmaa perusteella esimerkkiliitoksen kestävyyksille saadaan seuraavat raja-arvot:

- hitsin riittävä kestävyys (tapaus a): 376,89kN
- hitsin riittävä kestävyys (tapaus b): 272,89kN
- hitsin riittävä kestävyys (tapaus c): 67,54kN
- pultin leikkausmurtuminen: 271,43kN
- reunapuristuskestävyys: 220,32kN

FEM-laskennan perusteella saadut kestävyysraja-arvot:

- myötörajan ylittäminen vaakahitsissä: 12,42kN
- paarteen pinnan myötääminen: 43,63kN
- paarteen pinnan murtuminen: 142,03kN

Tuloksista voidaan päätellä, ettei pelkällä hitsien vertailujännitysten laskemisella saada riittävää tietoa liitoksen todellisesta käyttäytymisestä. Tämä johtuu siitä, että hitsien laskennassa paarreputken pinta oletetaan täysin jäykäksi rakenteeksi, johon ei pääse muodostumaan lainkaan muodonmuutoksia. Koska putken sisällä ei ole mitään jäykistystä, todellisuudessa putken jäykkyys on etenkin keskialueilla pieni, josta seuraa paarteiden pinnan myötääminen melko pienillä laskentakuormilla.

Liitos kykenee uudelleen jakamaan kuormia paikallisen myötäämisen jälkeen hyvin. Ensimmäisenä myötörajalta joutuvan lyhyen vaakahitsin kuormitukset jakautuvat paarteiden pinnalle ja liitoslevyn nurkka-alueille. Liitoksen murtumismuodoksi saadaan paarteiden pinnan myötääminen, joka tapahtuu sitkeästi. Vaikka liitos kykenee toimimaan sitkeästi, se johtaa lopulta sortumaan. Myötörajan ylittyessä paarteiden pintaan muodostuu suuria jännityshuippuja ja muodonmuutokset kasvavat suuriksi.

Poikittaisen liitoslevyn tapauksessa suositeltavaa on pyrkiä rajoittamaan paarteiden kokonaismuodonmuutoksia. Tämä voidaan tehdä hitsaamalla paarteiden pintaan vahvistuslevy, viemällä liitoslevy paarreputken läpi tai kasvattamalla liitoslevy koko paarteiden korkuiseksi. Paarteiden pintaan hitsattu vahvistuslevy levittää kuorman suuremmalle alalle ja tasaa muodostuvia jännityshuippuja. Viemällä liitoslevy paarreputken läpi toiselle puolelle rakenteen jäykkyys kasvaa merkittävästi ja paikalliset muodonmuutokset pienenevät. Mikäli liitoslevy on koko paarteiden korkuinen, taivutusmomentista aiheutuva voimapari kohdistuu paarteiden ylä- ja alapintaan ja jännitykset pystyvät jakautumaan suuremmalle tilavuudelle.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää sitkeän liitossuunnittelun merkitys rakenneosan vaurion rajoittamisessa. Työssä esiteltiin aluksi rakenteiden suunnittelu- perusteita ja -olettamuksia sekä kuinka liitoksen eri yksityiskohdat käyttäytyvät murtumistilanteessa. Seuraavaksi työssä selvitettiin toimintastrategia, jolla rakennuksen laaja sortuma voidaan rajata rakenneosan paikalliseksi vaurioksi. Selvityksen yhteydessä pohdittiin tekijöitä, jotka vaikuttavat analyyttisen laskentamallin todenmukaisuuteen. Tämän jälkeen tarkasteltiin esimerkkiliitosten erilaisia mahdollisia murtumistapoja ja arvioitiin liitoksen käyttäytymistä ylikuormitustilanteessa.

Sitkeän liitossuunnittelun tärkeimmät periaatteet ovat liitoksen kaikkien murtumismuotojen tunnistaminen, näiden luokittelu ja ennen kaikkea analyyttisen liitosmallin todenmukaisuus. Mikäli liitoksen analyyttinen laskentamalli ei vastaa todellisuutta, tai liitoksen kestävyyttä kaikkien murtumismuotojen suhteen ei varmisteta, liitoksen sitkeää käyttäytymistä ei voida luotettavasti esittää. Liitoksen sitkeä käyttäytyminen voidaan varmistaa suunnittelemalla liitos siten, ettei sen heikoimmaksi kohdaksi jää mikään sellainen komponentti, jonka murtumismekanismi on hauras tai sillä ei juurikaan ole sitkeyttä.

Vapaavälisen K-liitoksen tapauksessa huomattiin, ettei liitoksen kestävyyttä yhdistetylle taivutukselle ja normaalivoimalle voida nykyisten rakennesuunnitteluohjeiden perusteella arvioida. Tämä johtuu perusolettamuksesta, että liitoksella on riittävä kier- tymiskyky, jolloin sitä voidaan käsitellä nivelenä. Tällöin mitoitus voidaan tehdä luotet- tavasti ainoastaan aksiaalisten voimien perusteella. Mikäli standardien asettamat vaatimukset liitoksen epäkeskisyydelle tai geometrialle eivät täyty, liitokseen kohdis- tuvien taivutusmomenttien vaikutus täytyy ottaa suunnittelussa huomioon. Tällöin myös rakenneosien paikallisten lommahdusten vaikutus liitoksen plastisen kestävyyy- den kehittymiseen tulee tarkistaa, jotta liitoksen sitkeä käyttäytyminen voidaan luotet- tavasti osoittaa.

Paarteen laippaliitokselle ei nykyisistä suunnittelustandardeista löydy suoraa mitoi- tusohjetta. Tässä työssä sovellettiin *Putkipalkkikäsikirjassa* (Vainio 2000, 97) esitettyä menetelmää laippojen ja ruuvien vetokestävyyksien arviointiin. Laskentamallissa on joitakin puutteita, vaikka saadut kestävyysraajat vaikuttavatkin realistisilta. Laskentamenetelmä ei huomioi putkipalkissa vaikuttavaa epälineaarista jännitysja- kaumaa, koska poikkileikkauksen jäykkyys on erisuuruinen putken reuna- ja keski-

alueella. Tällöin oletetaan, ettei putkipalkkiin pääse syntymään lainkaan muodonmuutoksia. Myös suositeltua laippalevyn etäisyyttä uumasauvan reunasta ei laskentamenetelmällä voida esittää. Liitoksen syvällisempi analyysi vaatisi tarkan FEM-laskentamallin, jossa rakenneosien väliset vuorovaikutukset voitaisiin realistisesti esittää.

Paarteeseen hitsatun poikittaissuuntaisen liitoslevyn tapauksessa hitsin kestävyyttä arvioitiin kolmella eri oletuksella voimien jakautumisesta hitseissä. Liitoksesta tehtiin lisäksi FEM-malli, jonka laskentatulosten perusteella arvioitiin sitkeästi ja hauraasti käyttäytyvien osien tai rakenteen kohtien merkittävyys koko liitoksen kestävyyteen. Tuloksena voidaan todeta, ettei liitostyyppi sovellu käytettäväksi vaurion rajoittamiseen ennakoimattoman onnettomuustilanteen varalle, vaikka sen heikoimman komponentin murtumismuoto on sitkeä.

Liitoksen suunnittelu ennakoimattoman onnettomuustilanteen varalle on haastava tehtävä. Tämä johtuu siitä, että liitoksessa tapahtuvan paikallisen myötäämisen jälkeen on vaikeaa arvioida mitä tapahtuu seuraavaksi, koska mahdollisia tapahtumaskenaarioria on useita. Tämä opinnäytetyö antaa kuitenkin mielestäni hyvät perustiedot liitoksen eri yksityiskohtien käyttäytymisestä ja niiden merkityksestä rakenneosan vaurion rajoittamisessa. Rakenneosan vaurioitumisen takana on lähes aina inhimillinen erehdys suunnittelussa, valmistuksessa tai tuotannossa; tällöin rakenneosaa altistuu kestävyyttään suuremmalle kuormitukselle. Vaurion laajuuden päättää kuitenkin aina suunnittelija.

LÄHTEET

Ferrometal Oy. [verkkodokumentti]. [viitattu 12.04.2012]. Saatavissa:

http://www.ferrometal.ee/docs/teknisetsivut/teknisetsivut_mekaanisetominaisuudet.pdf.

Fleischer, O. & Puthli, R. 2009. *Extending existing design rules in EN1993-1-8 (2005) for gapped RHS K-joints for maximum chord slenderness (b_0/t_0) of 35 to 50 and gap size to as low as $4t_0$* . Teoksessa Shen, Chen & Zhao (toim.) Tubular Structures XII. London: Taylor & Francis Group, 293–301.

Kouhi, J. 2004. *Eurocode 3 -käsikirja EN 1993-1-8*. Moniste. VTT.

Leino, T. 2006. *Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus. Staattisesti kuormitettujen hitsausliitosten suunnittelu*. Tutkimusraportti. VTT.

Leino, T. 2011. Ensimmäinen vaurio ja mitä sitten tapahtui. *Rakennustekniikka*. 2011, nro 1, 52–53.

Leino, T. 2012. Kehityspäällikkö. Finnmap Consulting Oy. Helsinki. Keskustelut tammi-huhtikuussa 2012.

Kortesmaa, M. & Leino, T. 2006. *Laajarunkoisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus. Laajarunkoisten teräs- tai puurakenteisten liikuntahallien rakenteellinen turvallisuus ja kunnan tarkastus*. Projektiraportti. VTT.

Ongelin, P. & Valkonen, I. 2010. *Hitsatut profiilit EN 1993 –käsikirja*. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.

Packer, J.A., Wardenier, J., Kurobane, Y., Dutta, D. & Yeomans, N. 1992. *Design guide for rectangular hollow section (RHS) joints under predominantly static loading*. Köln: Verlag TÜV Rheinland GmbH.

Plumier, A. 1994. *Behavior of Connections*. Journal Construct. Steel Research. 1994. nro 29, 95–119.

SFS-EN 1990 2008. Eurocode: Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1991-1-7 2010. Eurokoodi 1: Rakenteiden kuormat osa 1-7: Yleiset kuormat. Onnettomuuskuormat. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-1 2006. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1993-1-8 2006. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu osa 1-8: Liitosten mitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

SFS-EN 1998-1 2005. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS ry.

Vainio, H. 2000. *Rautaruukin Putkipalkkikäsikirja.* Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj.

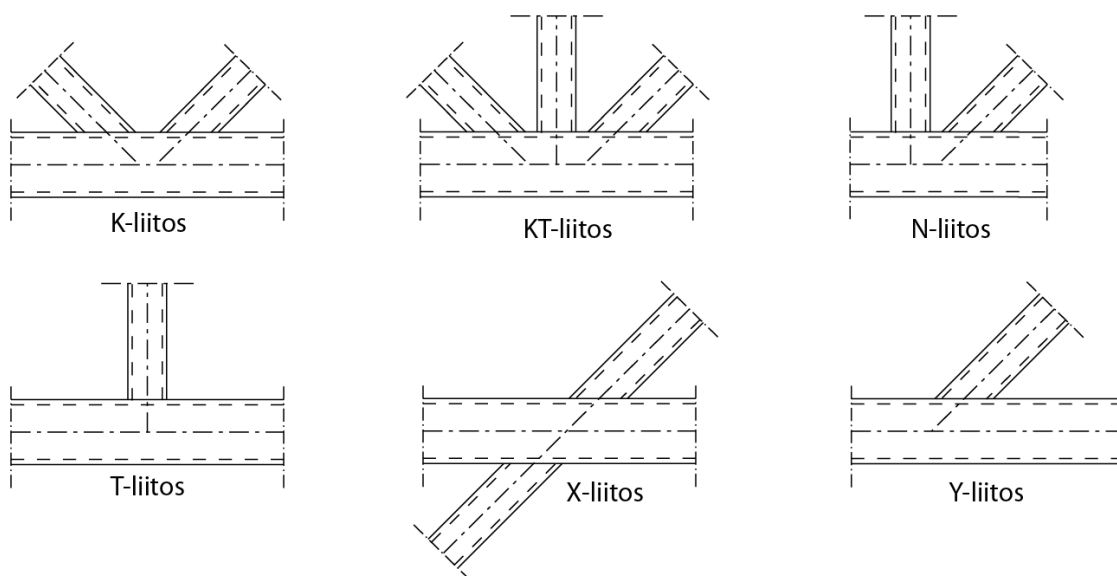
Wardenier, J., Packer, J.A., Zhao, X.-L. & van der Vegte G.J. 2010. *Hollow Sections in Structural Applications.* Geneva: CIDECT.

Ylinen, A. 1965. *Kimmo- ja lujuusoppi 1.* Porvoo: Werner Söderström Osakeyhtiö.

EHDOT STANDARDIN SFS-EN 1993-1-8 SOVELTAMISELLE

Standardi EN 1993-1-8 asettaa yksityiskohtaisia sääntöjä taso- ja avaruusristikoiden liitosten staattisen kestävyuden mitoituskaavojen soveltamiselle. Soveltamisalan piiriin kuuluvat pyöreät, neliön muotoiset ja suorakaiteen muotoiset rakenneputket. Rakenneputkien väliset liitokset voivat lisäksi koostua avoimien profiilien ja rakenneputkien yhdistelmästä. Liitoksen staattinen kestävyys ilmaistaan uumasauvan aksiaalisen kestävyuden ja/tai momenttikestävyuden mitoitusarvona. Standardia voidaan soveltaa, kun käytetään standardin EN 10210 mukaisia kuumavalssattuja, tai standardin EN 10219 mukaisia kylmämuovattuja rakenneputkia. Rakenneputken nimellinen myötöraja saa olla enintään 460N/mm^2 . Mikäli lopputuotteen nimellinen myötöraja on suurempi kuin 355N/mm^2 , staattisten kestävyyksien mitoitusarvot kerrotaan luvulla 0,9. Kaikkien rakenneputkien seinämän nimellisen paksuuden alaraja on 2,5mm, jonka lisäksi paarteen seinämän nimellisen paksuuden yläraja on 25mm; ellei materiaalin riittäviä paksuussuuntaisia ominaisuuksia erikseen varmisteta. Liitosten väsymistarkastelut tehdään standardin EN 1993-1-9 mukaisesti. Kuvassa 29 esitetään liitostyypit, jotka kuuluvat tämän soveltamisalan piiriin (SFS-EN 1993-1-8, 110).

Standardia voidaan soveltaa ainoastaan, kun kaikki edellisen kappaleen ehdot ovat voimassa. Puristettujen sauvanosien tulee täyttää vaatimukset poikkileikkausluokille 1 tai 2, jotka esitetään standardissa EN 1993-1-1. Paarteiden ja uumasauvojen sekä viereisten uumasauvojen välisten kulmien θ_i tulee olla suurempia kuin 30 astetta. Sauvojen poikkileikkauksen muoto ei saa muuttua sauvojen päässä. Vapaavälisissä liitoksissa hitsin riittävän tilan varmistamiseksi vapaan välin g on oltava vähintään $t_1 + t_2$ (SFS-EN 1993-1-8, 110).



KUVA 37 Standardin EN 1993-1-8 soveltamisalan piiriin kuuluvat liitostyyppi

TAULUKOT SFS-EN 1993-1-8

TAULUKKO 3 Puristettujen taso-osien suurimmat leveys-paksuussuhteet (SFS-EN 1993-1-1, 45)

Kahdelta reunalta tuetut puristetut taso-osat						
				Taivutus ko. akselin suhteen Taivutus ko. akselin suhteen		
Poikkileik-kausluokka	Taivutetut taso-osat	Puristetut taso-osat	Taivutetut ja puristetut taso-osat			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
1	$c/t \leq 72\epsilon$	$c/t \leq 33\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{396\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{36\epsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\epsilon$	$c/t \leq 38\epsilon$	$kun \alpha > 0,5: c/t \leq \frac{456\epsilon}{13\alpha - 1}$ $kun \alpha \leq 0,5: c/t \leq \frac{41,5\epsilon}{\alpha}$			
Taso-osan jännitys-jakautuma (puristus positiivinen)						
3	$c/t \leq 124\epsilon$ ¹⁾	$c/t \leq 42\epsilon$ ²⁾	$kun \psi > -1: c/t \leq \frac{42\epsilon}{0,67 + 0,33\psi}$ ³⁾ $kun \psi \leq -1^*): c/t \leq 62\epsilon(1 - \psi)\sqrt{-\psi}$			
$\epsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

*) Arvoa $\psi \leq -1$ käytetään, kun joko puristusjännitys $\sigma < f_y$ tai vedetyn puolen venymä $\epsilon_y > f_y/E$

¹⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 121,43\epsilon$

²⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1993-1-5 mukaan raja-arvoksi saadaan: $c/t \leq 38,25\epsilon$

³⁾ Suomentajan huomautus:

Standardin EN 1995-1-5 mukaan raja-arvo riippuu lommahduskertoimesta k_σ ja jännityssuhteesta ψ .

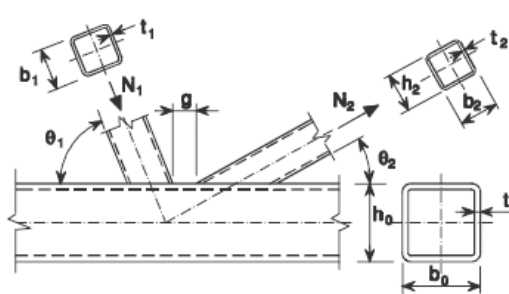
TAULUKKO 4 Pyöreiden tai suorakaiteen muotoisten uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten parresauvojen välisten hitsausliitosten pätevyysrajat (SFS-EN 1993-1-8, 127)

Liitostyyppi	Liitosparametrit [$i = 1$ tai 2 , $j =$ limitetty uumasauva]						
	b_i/b_0 tai d_i/b_0	b_i/t_i ja h_i/t_i tai d_i/t_i		h_0/b_0 ja h_i/b_i	b_0/t_0 Ja h_0/t_0	Vapaavälinen tai limitetty liitos b_i/b_j	
		Puristus	Veto				
T, Y tai X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ ja $h_i/t_i \leq 35$	$b_i/t_i \leq 35$ ja $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$ mutta $\leq 2,0$	≤ 35 ja Poikkileikkausluokka 2	–	
Vapaavälinen K-liitos	$b_i/b_0 \geq 0,35$ ja $\geq 0,1 + 0,01 b_0/t_0$	ja Poikkileikkausluokka 2			≤ 35 ja Poikkileikkausluokka 2	$g/b_0 \geq 0,5(1 - \beta)$ mutta $\leq 1,5(1 - \beta)$ ¹⁾	kuitenkin vähintään $g \geq t_1 + t_2$
Vapaavälinen N-liitos							
Limitetty K-liitos	$b_i/b_0 \geq 0,25$	Poikkileikkausluokka 1			Poikkileikkausluokka 2	$\lambda_{ov} \geq 25\%$ mutta $\lambda_{ov} \leq 100\%$ ²⁾ ja $b_i/b_j \geq 0,75$	
Limitetty N-liitos							
Pyöreä uumasauva	$d_i/b_0 \geq 0,4$ mutta $\leq 0,8$	Poikkileikkausluokka 1	$d_i/t_i \leq 50$	Kuten edellä, mutta b_i korvataan d_i :llä ja b_j korvataan d_j :llä.			

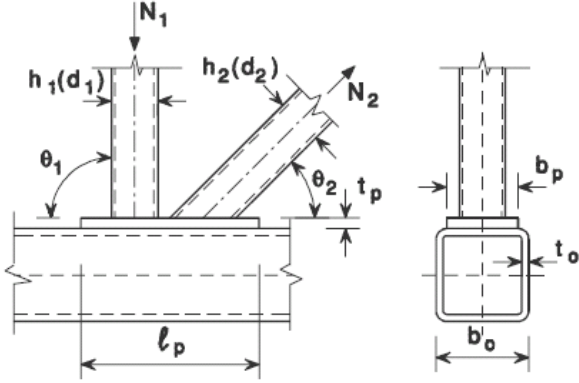
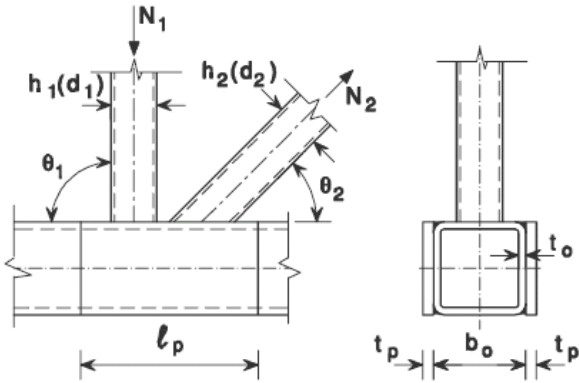
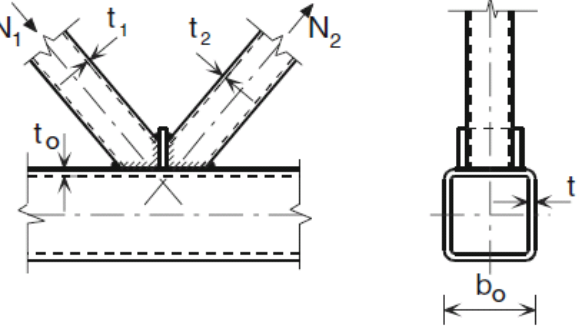
¹⁾ Jos $g/b_0 > 1,5(1 - \beta)$ ja $g > t_1 + t_2$ liitosta käsitellään kahtena erillisenä T- tai Y-liitoksena.

²⁾ Limitystä voidaan kasvattaa, jotta limitetyn uumasauvan reuna voidaan hitsata parresauvaan.

TAULUKKO 5 Suorakaiteen muotoisten tai pyöreiden uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten parresauvojen välisten hitsattujen K- ja N-liitosten aksiaalisten kestävyyksien mitoitusarvot (SFS-EN 1993-1-8, 131)

Liitostyyppi	Kestävyyden mitoitusarvo [$i = 1$ tai 2]
Vapaaväliset K- ja N-liitokset	Paarteen pinnan murtuminen
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma} \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) / \gamma_{M5}}$
	Paarteen leikkautuminen
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$
	$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$
	Uumasauvan murtuminen
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i (2h_i - 4t_i + b_i + b_{eff}) / \gamma_{M5}$
Lävistysleikkautuminen $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$	
$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_i} \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$	
Limitetyt K- ja N-liitokset	Kuten taulukossa 7.10.
Pyöreiden uumasauvojen tapauksessa edellä mainitut kestävyysarvot kerrotaan luvulla $\pi/4$ sekä suureet b_1 ja h_1 korvataan suureella d_1 ja suureet b_2 ja h_2 korvataan suureella d_2 .	
$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) t_0$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0 / t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i \quad \text{mutta } b_{eff} \leq b_i$
Neliön tai suorakaiteen muotoiselle uumasauvalle:	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 / t_0} b_i \quad \text{mutta } b_{e,p} \leq b_i$
$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}$	Kun $n > 0$ (puristus):
Missä g on vapaaväli, ks. kuva 1.3(a).	$k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$
Pyöreälle uumasauvalle: $\alpha = 0$	mutta $k_n \leq 1,0$
	Kun $n \leq 0$ (veto):
	$k_n = 1,0$

TAULUKKO 6 Suorakaiteen muotoisten tai pyöreiden uumasauvojen ja suorakaiteen muotoisten parresauvojen välisten vahvistettujen hitsattujen K- ja N-liitosten kestävyysmitoitussarvot (SFS-EN 1993-1-8, 138-139)

Liitostyyppi	Kestävyyden mitoitussarvo [$i = 1$ tai 2]
<p>Vahvistaminen laippalevyjä käyttämällä paarteen pinnan murtumisen, uumasauvan murtumisen tai lävistymisleikkautumisen välttämiseksi.</p>	
	$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin \theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin \theta_2} \right)$ $b_p \geq b_o - 2t_o$ $t_p \geq 2t_1 \text{ ja } 2t_2$ <p>$N_{i,Rd}$:n arvoksi valitaan taulukon 7.12 mukainen K- tai N-liitoksen $N_{i,Rd}$-arvo, mutta t_o korvataan t_p:llä, kun tarkastellaan paarteen pinnan murtumista, uumasauvan murtumista ja lävistymisleikkautumista.</p>
<p>Pareittaisten vahvistuslevyjen käyttö paarteen leikkausmurtumisen estämiseksi.</p>	
	$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin \theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin \theta_2} \right)$ <p>$N_{i,Rd}$:n arvoksi valitaan taulukon 7.12 mukainen K- tai N-liitoksen $N_{i,Rd}$-arvo, mutta t_o korvataan arvolla $(t_o + t_p)$, kun tarkastellaan paarteen leikkautumista.</p>
<p>Vahvistaminen uumasauvojen välisellä vertikaalisella jakolevyllä riittämättömän limityksen takia.</p>	
	$t_p \geq 2t_1 \text{ and } 2t_2$ <p>$N_{i,Rd}$:n arvoksi valitaan taulukon 7.12 mukainen limitetyn K- tai N- liitoksen $N_{i,Rd}$ -arvo, kun $\lambda_{ov} < 80\%$, mutta taulukon 7.10 mukaisessa $b_{e,ov}$:n lausekkeessa b_j, t_j ja f_{yj} korvataan arvoilla b_p, t_p ja f_{yp}.</p>

K-LIITOS VAPAAVÄLILLÄ STANDARDIN SFS-EN 1993-1-8 MUKAAN

Lähtötiedot:

Sauva	Muotostandardi	Profiili	Teräslaji	f_{yi} (N/mm ²)
Paarre	SFS-EN 10219-2	CFRHS 100x100x3	S355J2H	355
Diag. 1	SFS-EN 10219-2	CFRHS 60x60x3	S355J2H	355
Diag. 2	SFS-EN 10219-2	CFRHS 50x50x3	S355J2H	355

Sauva	b_i (mm)	h_i (mm)	t_i (mm)	L_i (mm)	θ_i (°)	A_i (mm ²)	W_i (mm ³)	N_i (kN)
Paarre	100	100	3			1141	35410	200.23
Diag. 1	60	60	3	1500	63.4°	661		122.3
Diag. 2	50	50	3	1500	63.4°	541		141.02

Liitosparametrit (SFS-EN 1993-1-8)

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M5} = 1,0$$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} = \frac{60\text{mm} + 60\text{mm} + 50\text{mm} + 50\text{mm}}{4 * 100\text{mm}} = 0,55$$

$$k_n = 1,0 \text{ (vedetty paarre)}$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 * t_0} = \frac{100\text{mm}}{2 * 3\text{mm}} = 16,67$$

$$g = 13\text{mm}$$

Paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 * f_{y0} * t_0^2 * \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_i} * \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 63,43^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 71,39\text{kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 63,43^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 71,39\text{kN}$$

Paarteen leikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 * (13\text{mm})^2}{3 * (3\text{mm})^2}}} = 0,1959$$

$$A_v = (2 * h_0 + \alpha * b_0) * t_0 = (2 * 100 + 0,1959 * 100) * 3 = 659\text{mm}^2$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 659}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} / 1,0 = 151,01 kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_2} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 659}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} / 1,0 = 151,01 kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauvojen välillä:

$V_{Ed} = V_{pl,Rd}$ (oletetaan, että paarteessa vaikuttaa täysi leikkausvoima)

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_y * A_v}{\sqrt{3}} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 659}{\sqrt{3}} / 1,0 = 133,46 kN$$

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} - V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$$

$$N_{0,Rd} = \left[(1141 - 659) * 355 + 659 * 355 \sqrt{1 - (133,46/133,46)^2} \right] / 1,0 = 171,11 kN$$

Uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$b_{eff,i} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$$

$$b_{eff,i} \leq b_i$$

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

Uumasauva 1:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 60 = 18 mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 60 - 4 * 3 + 60 + 18) / 1,0 = 198,09 kN$$

Uumasauva 2:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 50 = 15 mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 50 - 4 * 3 + 50 + 15) / 1,0 = 162,94 kN$$

Lävistysleikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

Tarkasteltava kun $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$:

$\beta \leq (1 - 1/\gamma) \rightarrow 0,55 \leq (1 - 1/16,67) \leftrightarrow 0,55 \leq 0,94 \rightarrow$ Lävistysleikkautuminen tarkasteltava

$$b_{e,p,i} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i$$

$$b_{e,p,i} \leq b_i$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * t_0}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} * \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 60 = 18\text{mm} \leq 60\text{mm} \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} * \left(\frac{2 * 60}{\sin 63,43^\circ} + 60 + 18 \right) / 1,0 = 145,86\text{kN}$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 50 = 15\text{mm} \leq 50\text{mm} \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} * \left(\frac{2 * 50}{\sin 63,43^\circ} + 50 + 15 \right) / 1,0 = 121,55\text{kN}$$

Yhteenveto

- Paarteen pinnan murtuminen: $N_{max,Rd} = N_{1,Rd} = 73,73\text{kN}$
- Paarteen leikkautuminen: $N_{max,Rd} = N_{1,Rd} = 151,01\text{kN}$
- Uumasauvan murtuminen: $N_{max,Rd} = N_{2,Rd} = 162,94\text{kN}$
- Lävistysleikkautuminen: $N_{max,Rd} = N_{2,Rd} = 121,55\text{kN}$

$$e = \left(\frac{h_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2}$$

$$e = \left(\frac{60}{2 \sin 63,4^\circ} + \frac{50}{2 \sin 63,4^\circ} + 13 \right) \frac{\sin 63,4^\circ \sin 63,4^\circ}{\sin(63,4^\circ + 63,4^\circ)} - \frac{100}{2} = 24,5\text{mm}$$

Koska epäyhtälö $-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \leftrightarrow -55\text{mm} \leq 24,5\text{mm} \leq 25\text{mm}$ on voimassa, epäkeski-
syydestä aiheutuvat momentit voidaan jättää huomiotta.

Mikäli standardissa EN 1993-1-8 esitetyt hitsiliitoksen kestävyysien mitoitusarvot ovat voimassa, edellyttää se, että liitosparametrit täyttävät seuraavat ehdot (liite 2 taulukko 4):

- 1.) $b_i/b_o \geq 0,35$ ja $b_i/b_o \geq 0,1 + 0,01b_o/t_o$ [$i = 1$ tai 2]
- 2.) $b_1/t_1 \leq 35$ ja $h_1/t_1 \leq 35$ ja poikkileikkausluokka 2
- 3.) $b_2/t_2 \leq 35$ ja $h_2/t_2 \leq 35$
- 4.) $0,5 \leq h_o/b_o \leq 2,0$ ja $0,5 \leq h_i/b_i \leq 2,0$ [$i = 1$ tai 2]
- 5.) $b_o/t_o \leq 35$ ja $h_o/t_o \leq 35$ ja poikkileikkausluokka 2
- 6.) $0,5(1 - \beta) \leq g/b_o \leq 1,5(1 - \beta)$, kuitenkin vähintään $t_1 + t_2$

- 1a.) $60/100 \geq 0,35 \leftrightarrow 0,6 \geq 0,35$ ja $60/100 \geq 0,1 + 0,01 * (100/3) \leftrightarrow 0,6 \geq 0,43 \rightarrow OK$
- 1b.) $50/100 \geq 0,35 \leftrightarrow 0,5 \geq 0,35$ ja $50/100 \geq 0,1 + 0,01 * (100/3) \leftrightarrow 0,5 \geq 0,43 \rightarrow OK$
- 2.) $60/3 \leq 35 \leftrightarrow 20 \leq 35$ ja $60/3 \leq 35 \leftrightarrow 20 \leq 35 \rightarrow OK$
- 3.) $50/3 \leq 35 \leftrightarrow 16,67 \leq 35$ ja $50/3 \leq 35 \leftrightarrow 16,67 \leq 35 \rightarrow OK$
- 4a.) $0,5 \leq 100/100 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0 \rightarrow OK$
- 4b.) $0,5 \leq 60/60 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0$ ja $0,5 \leq 50/50 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0 \rightarrow OK$
- 5.) $100/3 \leq 35 \leftrightarrow 33,33 \leq 35$ ja $100/3 \leq 35 \leftrightarrow 33,33 \leq 35 \rightarrow OK$
- 6.) $0,5 * (1 - 0,55) \leq 13/100 \leq 1,5 * (1 - 0,55) \leftrightarrow 0,225 \leq 0,13 \leq 0,675 \rightarrow EHTO EI TÄYTY!$

Koska liitos ei täytä standardin SFS-EN 1993-1-8 mukaisia muotoiluehtoja, liitoksen kiertymisjäykkyydestä aiheutuvat sekundaariset momentit täytyy huomioida.

Tilanne voidaan ratkaista muotoilemalla liitos uudelleen tai vahvistamalla liitos.

1.) Muotoillaan liitos uudelleen

Päämäärä liitoksen muotoilussa on saada liitokselle riittävä kiertymiskyky. Tällöin sitä voidaan käsitellä nivelenä ja mitoitus voi tapahtua pelkästään aksiaalisten voimien suhteen.

Ehdosta 6 saadaan ylä- ja alarajat vapaalle välille:

$$g_{min} = 0,5(1 - \beta) * b_0 = 0,5 * (1 - 0,55) * 100mm \rightarrow g_{min} = 22,5mm$$

$$g_{max} = 1,5(1 - \beta) * b_0 = 1,5 * (1 - 0,55) * 100mm \rightarrow g_{max} = 67,5mm.$$

Valitaan vapaaksi väliksi $g = 23mm$, jolloin liitos täyttää vaadittavat muotoiluehdot.

Loivennetaan uumasauvojen kulmia, jolloin epäkeskisyydeksi saadaan:

$$e = \left(\frac{60}{2 \sin 60^\circ} + \frac{50}{2 \sin 60^\circ} + 23 \right) * \frac{\sin 60^\circ \sin 60^\circ}{\sin(60^\circ + 60^\circ)} - \frac{100}{2} = 24,9mm$$

Koska epäyhtälö $-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \leftrightarrow -55mm \leq 24,9mm \leq 25mm$ on voimassa, epäkeskisyydestä aiheutuvat momentit voidaan jättää huomiotta.

Liitosparametrit (SFS-EN 1993-1-8)

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} = \frac{60mm + 60mm + 50mm + 50mm}{4 * 100mm} = 0,55$$

$$k_n = 1,0 \text{ (vedetty paarre)}$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 * t_0} = \frac{100mm}{2 * 3mm} = 16,67$$

$$g = 23mm$$

Paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 * f_{y0} * t_0^2 * \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} * \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 60^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 73,73kN$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 60^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 73,73kN$$

Paarteen leikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 * (23mm)^2}{3 * (3mm)^2}}} = 0,1122$$

$$A_v = (2 * h_0 + \alpha * b_0) * t_0 = (2 * 100 + 0,1122 * 100) * 3 = 633,6mm^2$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} / 1,0 = 149,95kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_2} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} / 1,0 = 149,95kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauvojen välillä:

$V_{Ed} = V_{pl,Rd}$ (oletetaan, että paarteessa vaikuttaa täysi leikkausvoima)

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_y * A_v}{\sqrt{3}} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3}} / 1,0 = 129,86kN$$

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} - V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$$

$$N_{0,Rd} = \left[(1141 - 633,6) * 355 + 633,6 * 355 \sqrt{1 - (129,86/129,86)^2} \right] / 1,0 = 180,12kN$$

Uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$b_{eff,i} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$$

$$b_{eff,i} \leq b_i$$

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

Uumasauva 1:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 60 = 18mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 60 - 4 * 3 + 60 + 18) / 1,0 = 198,09kN$$

Uumasauva 2:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 50 = 15mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 50 - 4 * 3 + 50 + 15) / 1,0 = 162,94kN$$

Lävistysleikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

Tarkasteltava kun $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$:

$$\beta \leq (1 - 1/\gamma) \rightarrow 0,55 \leq (1 - 1/16,67) \leftrightarrow 0,55 \leq 0,94 \rightarrow \text{Lävistysleikkautuminen tarkasteltava}$$

$$b_{e,p,i} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i$$

$$b_{e,p,i} \leq b_i$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * t_0}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} * \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 60 = 18mm \leq 60mm \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} * \left(\frac{2 * 60}{\sin 60^\circ} + 60 + 18 \right) / 1,0 = 153,76kN$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 50 = 15mm \leq 50mm \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} * \left(\frac{2 * 50}{\sin 60^\circ} + 50 + 15 \right) / 1,0 = 128,13kN$$

Yhteenveto

- Paarteen pinnan murtuminen: 73,73kN
- Paarteen leikkautuminen: 375,98kN
- Uumasauvan murtuminen: 162,94kN
- Lävistysleikkautuminen: 128,13kN

2) Vahvistetaan liitos laippalevyjä käyttämällä

Laskettaessa vahvistetun liitoksen aksiaalisten kestävyyksien raja-arvoja, $N_{i,Rd}$:n arvoksia valitaan liitteen 2 taulukon 4 mukainen $N_{i,Rd}$:n arvo, mutta termi t_0 korvataan termillä t_p , kun tarkastellaan paarteen pinnan murtumista, uumasauvan murtumista ja lävistymisleikkautumista.

Laippalevyn vähimmäispituus (SFS-EN 1993-1-8)

$$l_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin\theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin\theta_2} \right)$$

$$l_p \geq 1,5 \left(\frac{60}{\sin 63,43^\circ} + 13 + \frac{50}{\sin 63,43^\circ} \right) \geq 204 \text{ mm}$$

Laippalevyn vähimmäisleveys (SFS-EN 1993-1-8)

$$b_p \geq b_o - 2t_0$$

$$b_p \geq 100 - 2 * 3 \geq 94 \text{ mm}$$

Laippalevyn vähimmäispaksuus (SFS-EN 1993-1-8)

$$t_p \geq 2t_1 \text{ ja } 2t_1$$

$$t_p \geq 2 * 3 \geq 6 \text{ mm}$$

Vahvistetun liitoksen vapaa väli

$$g_p = g + t_p [\tan(90^\circ - \theta_1) + \tan(90^\circ - \theta_2)]$$

6mm laippalevyllä vapaaksi väliksi saadaan:

$$g_p = 13 + 6[\tan(90^\circ - 63,43^\circ) + \tan(90^\circ - 63,43^\circ)] = 19 \text{ mm} \leq 22,5 \text{ mm} \rightarrow \text{Ehto 6 ei toteudu!}$$

10mm laippalevyllä vapaaksi väliksi saadaan:

$$g_p = 13 + 10[\tan(90^\circ - 63,43^\circ) + \tan(90^\circ - 63,43^\circ)] = 23 \text{ mm} \geq 22,5 \text{ mm} \rightarrow \text{OK!}$$

Liitosparametrit (SFS-EN 1993-1-8)

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} = \frac{60 \text{ mm} + 60 \text{ mm} + 50 \text{ mm} + 50 \text{ mm}}{4 * 100 \text{ mm}} = 0,55$$

$$k_n = 1,0 \text{ (vedetty paarre)}$$

$$\gamma = \frac{b_0}{2 * t_0} = \frac{100\text{mm}}{2 * 3\text{mm}} = 16,67$$

$$g = 23\text{mm}$$

Paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 * f_{y0} * t_p^2 * \sqrt{\gamma}}{\sin\theta_i} * \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 10^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 63,43^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 793,27\text{kN}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 10^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 63,43^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 793,27\text{kN}$$

Paarteen leikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 * (23\text{mm})^2}{3 * (3\text{mm})^2}}} = 0,1122$$

$$A_v = (2 * h_0 + \alpha * b_0) * t_0 = (2 * 100 + 0,1122 * 100) * 3 = 633,6\text{mm}^2$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} / 1,0 = 149,95\text{kN}$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin\theta_2} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3} * \sin 60^\circ} / 1,0 = 149,95\text{kN}$$

Paarteen leikkautuminen uumasauvojen välillä:

$$V_{Ed} = V_{pl,Rd} \text{ (oletetaan, että paarteessa vaikuttaa täysi leikkausvoima)}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_y * A_v}{\sqrt{3}} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 633,6}{\sqrt{3}} / 1,0 = 129,86\text{kN}$$

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$$

$$N_{0,Rd} = \left[(1141 - 633,6) * 355 + 633,6 * 355 \sqrt{1 - (129,86/129,86)^2} \right] / 1,0 = 180,12 kN$$

Uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$b_{eff,i} = \frac{10}{b_0/t_p} \frac{f_{y0} t_p}{f_{yi} t_i} b_i$$

$$b_{eff,i} \leq b_i$$

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

Uumasauva 1:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/10} * \frac{355 * 10}{355 * 3} * 60 = 200 mm \rightarrow b_{eff,1} = 60 mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 60 - 4 * 3 + 60 + 60) / 1,0 = 242,82 kN$$

Uumasauva 2:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/10} * \frac{355 * 10}{355 * 3} * 50 = 166,7 mm \rightarrow b_{eff,1} = 50 mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 50 - 4 * 3 + 50 + 50) / 1,0 = 221,52 kN$$

Lävistysleikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

Tarkasteltava kun $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$:

$$\beta \leq (1 - 1/\gamma) \rightarrow 0,55 \leq (1 - 1/16,67) \leftrightarrow 0,55 \leq 0,94 \rightarrow \text{Lävistysleikkautuminen tarkasteltava}$$

$$b_{e,p,i} = \frac{10}{b_0/t_p} b_i$$

$$b_{e,p,i} \leq b_i$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * t_p}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} * \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/10} * 60 = 60 mm \leq 60 mm \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 10}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} * \left(\frac{2 * 60}{\sin 63,43^\circ} + 60 + 60 \right) / 1,0 = 582,45 kN$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

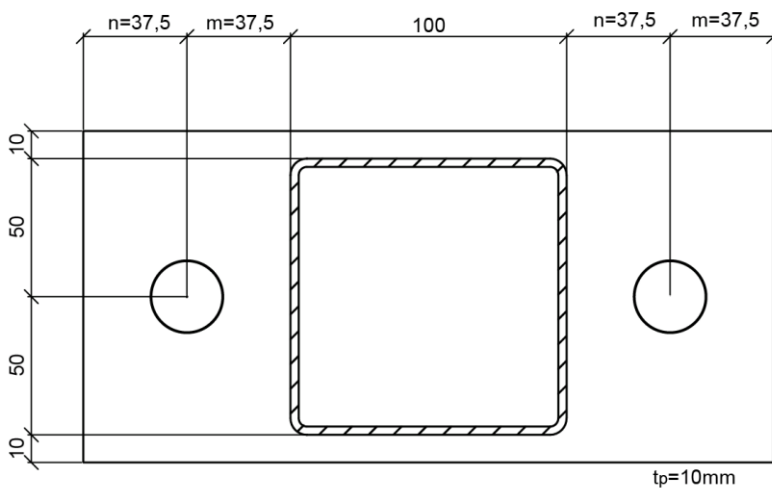
$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/10} * 50 = 50\text{mm} \leq 50\text{mm} \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 63,43^\circ} * \left(\frac{2 * 50}{\sin 63,43^\circ} + 50 + 50 \right) / 1,0 = 485,38\text{kN}$$

Yhteenveto

- Paarteen pinnan murtuminen: $N_{max,Rd} = N_{1,Rd} = 793,27\text{kN}$
- Paarteen leikkautuminen: $N_{max,Rd} = N_{1,Rd} = 149,95\text{kN}$
- Uumasauvan murtuminen: $N_{max,Rd} = N_{2,Rd} = 221,52\text{kN}$
- Lävistysleikkautuminen: $N_{max,Rd} = N_{2,Rd} = 485,38\text{kN}$

N-LIITOS PAARTEEN LAIPPALIITOKSELLE



Vedetty ekvivalentti T-osa (SFS-EN 1993-1-8)

$$L_b = \sum t_p + 0,5 * (k_b + m_b) = (10 + 10) + 0,5 * (15 + 19) = 37\text{mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s}{\sum l_{eff,1} t_p^3} = \frac{8,8 * 37,5^3 * 0,78 * \pi * 12^2}{2 * \pi * 37,5 * 10^3} = 695\text{mm}$$

$$L_b \leq L_b^* \rightarrow \text{Vipuvoimia voi syntyä.}$$

$$l_{eff,cp} = 2\pi m = 2 * \pi * 37,5 = 235,6\text{mm}$$

$$l_{eff,nc} = 4m + 1,25n = 4 * 37,5 + 1,25 * 37,5 = 196,9\text{mm}$$

Murtumismalli 1:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 l_{eff,1} t_p^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$l_{eff,1} = l_{eff,nc}, \text{ mutta } l_{1} \leq l_{eff,cp}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 * 196,9 * 10^2 * 355 / 1,0 = 1,74 * 10^6 \text{Nmm}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 * 1,74 * 10^6}{37,5} = 186399\text{N} = 186,39\text{kN}$$

Murtumismalli 2:

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 l_{eff,2} t_p^2 f_y / \gamma_{M0}$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 l_{eff,nc} t_p^2 f_y / \gamma_{M0} = 0,25 * 196,9 * 10^2 * 355 / 1,0 = 1,74 * 10^6 Nmm$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 * 800 * 0,78 * \pi * 12^2}{1,25} = 203249 N = 203,2 kN$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 * 1,74 * 10^6 + 37,5 * 2 * 203249}{37,5 + 37,5} = 249,6 kN$$

Murtumismalli 3:

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} = 2 * 203249 = 406495 N = 406,4 kN$$

Laipan hitsin mitoitus

Vetojäännitys jakautuu tasaisesti koko hitsin alueelle. Laippa hitsataan koko paarteen ympäri.

$$L_w = 4(b_0 - 2r_0) = 4 * (100 - 2 * 6) = 352 mm$$

Valitaan hitsin a-mitaksi riittävän muodonmuutoskyvyn perusteella (ks. 5.1.1.1):

$$a \geq 1,10t \geq 1,1 * 3 \geq 3,3 mm$$

Valitaan $a = 4 mm$, jolloin kestävyuden mitoitusarvo N_{Rd} :

$$N_{Rd} = \frac{a f_u L_w}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{Mw}} = \frac{4 * 490 * 352}{\sqrt{3} * 0,9 * 1,25} = 354067 N = 354,06 kN$$

Lähtötiedot

Sauva	Muotostandardi	Profiili	Teräslaji	f_{yi} (N/mm ²)
Paarre	SFS-EN 10219-2	CFRHS 100x100x3	S355J2H	355
Diag. 1	SFS-EN 10219-2	CFRHS 60x60x3	S355J2H	355
Diag. 2	SFS-EN 10219-2	CFRHS 50x50x3	S355J2H	355

Sauva	b_i (mm)	h_i (mm)	t_i (mm)	L_i (mm)	θ_i (°)	A_i (mm ²)	$W_{el,y,0}$ (mm ³)
Paarre	100	100	3			1141	35410
Diag. 1	60	60	3	1500	90,0°	661	
Diag. 2	50	50	3	1500	35,0°	541	

Liitosparametrit (SFS-EN 1993-1-8)

$$\gamma_{M0} = \gamma_{M5} = 1,0$$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_0} = \frac{60 + 60 + 50 + 50}{4 * 100} = 0,55$$

$$g = 25 mm$$

$$e = \left(\frac{h_1}{2 \sin \theta_1} + \frac{h_2}{2 \sin \theta_2} + g \right) \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\sin(\theta_1 + \theta_2)} - \frac{h_0}{2}$$

$$e = \left(\frac{60}{2 \sin 90^\circ} + \frac{50}{2 \sin 35^\circ} + 25 \right) \frac{\sin 90^\circ \sin 35^\circ}{\sin(90^\circ + 35^\circ)} - \frac{100}{2} = 19 \text{ mm}$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 \leftrightarrow -55 \text{ mm} \leq 19 \text{ mm} \leq 25 \text{ mm} \rightarrow OK$$

Mikäli standardissa EN 1993-1-8 esitetyt hitsiliitoksen kestävyyksien mitoitusarvot ovat voimassa, edellyttää se, että liitosparametrit täyttävät seuraavat ehdot:

- 1.) $b_i/b_o \geq 0,35$ ja $b_i/b_o \geq 0,1 + 0,01b_o/t_o$ [$i = 1$ tai 2]
- 2.) $b_1/t_1 \leq 35$ ja $h_1/t_1 \leq 35$ ja poikkileikkausluokka 2
- 3.) $b_2/t_2 \leq 35$ ja $h_2/t_2 \leq 35$
- 4.) $0,5 \leq h_o/b_o \leq 2,0$ ja $0,5 \leq h_i/b_i \leq 2,0$ [$i = 1$ tai 2]
- 5.) $b_o/t_o \leq 35$ ja $h_o/t_o \leq 35$ ja poikkileikkausluokka 2
- 6.) $0,5(1 - \beta) \leq g/b_o \leq 1,5(1 - \beta)$, kuitenkin vähintään $t_1 + t_2$

$$1a.) 60/100 \geq 0,35 \leftrightarrow 0,6 \geq 0,35 \text{ ja } 60/100 \geq 0,1 + 0,01 * (100/3) \leftrightarrow 0,6 \geq 0,43 \rightarrow OK$$

$$1b.) 50/100 \geq 0,35 \leftrightarrow 0,5 \geq 0,35 \text{ ja } 50/100 \geq 0,1 + 0,01 * (100/3) \leftrightarrow 0,5 \geq 0,43 \rightarrow OK$$

$$2.) 60/3 \leq 35 \leftrightarrow 20 \leq 35 \text{ ja } 60/3 \leq 35 \leftrightarrow 20 \leq 35 \rightarrow OK$$

$$3.) 50/3 \leq 35 \leftrightarrow 16,67 \leq 35 \text{ ja } 50/3 \leq 35 \leftrightarrow 16,67 \leq 35 \rightarrow OK$$

$$4a.) 0,5 \leq 100/100 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0 \rightarrow OK$$

$$4b.) 0,5 \leq 60/60 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0 \text{ ja } 0,5 \leq 50/50 \leq 2,0 \leftrightarrow 0,5 \leq 1,0 \leq 2,0 \rightarrow OK$$

$$5.) 100/3 \leq 35 \leftrightarrow 33,33 \leq 35 \text{ ja } 100/3 \leq 35 \leftrightarrow 33,33 \leq 35 \rightarrow OK$$

$$6.) 0,5 * (1 - 0,55) \leq 25/100 \leq 1,5 * (1 - 0,55) \leftrightarrow 0,225 \leq 0,25 \leq 0,675 \rightarrow OK$$

Liitosparametrit (SFS-EN 1993-1-8)

$$k_n = 1,0 \text{ (Vedetty paarre)}$$

$$\beta = \frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_o} = \frac{60 + 60 + 50 + 50}{4 * 100} = 0,55$$

$$\gamma = \frac{b_o}{2 * t_o} = \frac{100}{2 * 3} = 16,67$$

$$g = 25 \text{ mm}$$

Paarteen pinnan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$N_{i,Rd} = \frac{8,9 * f_{y0} * t_o^2 * \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_i} * \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4 * b_o} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 90^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 63,85 kN$$

$$N_{2,Rd} = \frac{8,9 * 355 * 3^2 * \sqrt{16,67}}{\sin 35^\circ} * \left(\frac{60 + 50 + 60 + 50}{4 * 100} \right) / 1,0 = 111,32 kN$$

Paarteen leikkautuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 * 25^2}{3 * 3^2}}} = 0,103$$

$$A_v = (2 * h_0 + \alpha * b_0) * t_0 = (2 * 100 + 0,103 * 100) * 3 = 630,9 mm^2$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin \theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 630,9}{\sqrt{3} * \sin 90^\circ} / 1,0 = 129,30 kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$$

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} * A_v}{\sqrt{3} * \sin \theta_2} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 630,9}{\sqrt{3} * \sin 35^\circ} / 1,0 = 225,44 kN$$

Paarteen leikkautuminen uumasauvojen välillä:

$V_{Ed} = V_{pl,Rd}$ (oletetaan, että paarteessa vaikuttaa täysi leikkausvoima)

$$V_{pl,Rd} = \frac{f_y * A_v}{\sqrt{3}} / \gamma_{M5} = \frac{355 * 630,9}{\sqrt{3}} / 1,0 = 129,30 kN$$

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) f_{y0} + A_v f_{y0} \sqrt{1 - (V_{Ed} - V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$$

$$N_{0,Rd} = \left[(1141 - 630,9) * 355 + 630,9 * 355 \sqrt{1 - (60/129,30)^2} \right] / 1,0 = 379,48 kN$$

Uumasauvan murtuminen (SFS-EN 1993-1-8)

$$b_{eff,i} = \frac{10}{b_0/t_0} \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} b_i$$

$$b_{eff,i} \leq b_i$$

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

Uumasauva 1:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 60 = 18mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 60 - 4 * 3 + 60 + 18)/1,0 = 198,09kN$$

Uumasauva 2:

$$b_{eff,1} = \frac{10}{100/3} * \frac{355 * 3}{355 * 3} * 50 = 15mm$$

$$N_{i,Rd} = 355 * 3 * (2 * 50 - 4 * 3 + 50 + 15)/1,0 = 162,94kN$$

Lävistysleikkautuminen

Tarkasteltava kun $\beta \leq (1 - 1/\gamma)$.

$\beta \leq (1 - 1/\gamma) \rightarrow 0,55 \leq (1 - 1/16,67) \leftrightarrow 0,55 \leq 0,94 \rightarrow$ Lävistysleikkautuminen tarkasteltava

$$b_{e,p,i} = \frac{10}{b_0/t_0} b_i$$

$$b_{e,p,i} \leq b_i$$

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} * t_0}{\sqrt{3} * \sin\theta_i} * \left(\frac{2h_i}{\sin\theta_i} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 1:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 60 = 18mm \leq 60mm \rightarrow OK$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 90^\circ} * \left(\frac{2 * 60}{\sin 90^\circ} + 60 + 18 \right) / 1,0 = 121,74kN$$

Lävistysleikkautuminen uumasauva 2:n kohdalla:

$$b_{e,p,1} = \frac{10}{100/3} * 50 = 15mm \leq 50mm \rightarrow OK$$

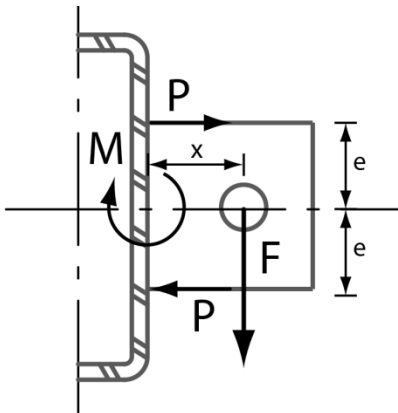
$$N_{1,Rd} = \frac{355 * 3}{\sqrt{3} * \sin 35^\circ} * \left(\frac{2 * 50}{\sin 35^\circ} + 50 + 15 \right) / 1,0 = 256,57kN$$

Yhteenveto

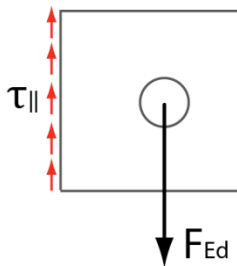
- Laipan taivutusmyötö: 186,39kN
- Pultin murtuminen: 406,40kN
- Hitsin murtuminen: 354,06kN
- Paarteen pinnan murtuminen: 63,85kN
- Paarteen leikkautuminen: 129,30kN
- Lävistysleikkautuminen: 121,74kN
- Uumasauvan murtuminen: 162,94kN

POIKITTAISUUNTAIEN LIITOSLEVY PAARTEESSA

Vertailujännitykset:



a.) Pystyhitsien mitoituksessa huomioidaan ainoastaan leikkausvoimasta aiheutuva jännitys:



Pienahitsin kestävyys on riittävä jos

$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2})$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 0$$

$$[3\tau_{\parallel}^2]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2})$$

$$[3\tau_{\parallel}^2]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2})$$

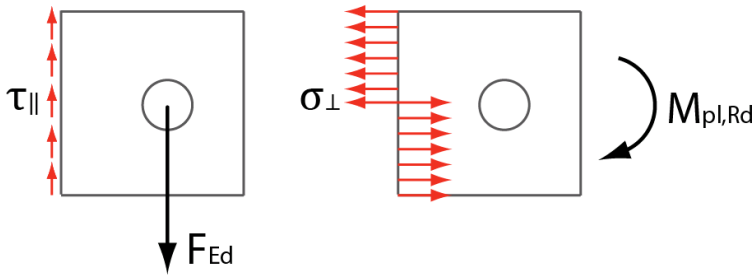
$$\tau_{\parallel} \leq \sqrt{\frac{[f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2}{3}}$$

$$\tau_{\parallel} \leq \frac{f_u / (\beta_w \gamma_{M2})}{\sqrt{3}} \leq \frac{510 / (0,9 * 1,25)}{\sqrt{3}} \leq 261,73 \text{ N/mm}^2$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{Ed}}{aL_w}$$

$$F_{Rd} = \tau_{\parallel} aL_w = 261,73 * 6 * 240 = 376,89 \text{ kN}$$

b.) Huomioidaan pystyhitsien mitoituksessa leikkausvoiman lisäksi taivutusmomentista aiheutuva lisäjännitys:



$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_u/(\beta_w \gamma_{M2})$$

$$\tau_{\parallel} = \frac{F_{Ed}}{aL_w}$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P}{aL_w \sqrt{2}}$$

$$P = \frac{F_{Ed} x}{2e}$$

$$\sigma_{\perp}^2 = \tau_{\perp}^2 = \left(\frac{F_{Ed} x}{2eaL_w \sqrt{2}} \right)^2$$

$$\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \leq [f_u/(\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

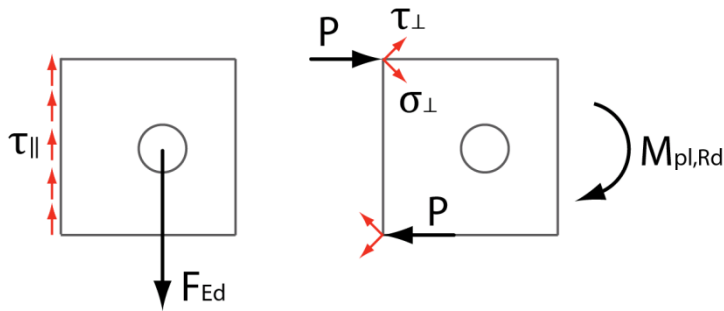
$$\left(\frac{F_{Ed} x}{2eaL_w \sqrt{2}} \right)^2 + 3 \left(\frac{F_{Ed} x}{2eaL_w \sqrt{2}} \right)^2 + 3 \left(\frac{F_{Ed}}{aL_w} \right)^2 \leq [f_u/(\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$\frac{F_{Ed}^2 x^2}{(2eaL_w \sqrt{2})^2} + 3 \frac{F_{Ed}^2 x^2}{(2eaL_w \sqrt{2})^2} + 3 \frac{F_{Ed}^2}{(aL_w)^2} \leq [f_u/(\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$F_{Ed}^2 \left(\frac{x^2}{(2eaL_w \sqrt{2})^2} + \frac{3x^2}{(2eaL_w \sqrt{2})^2} + \frac{3}{(aL_w)^2} \right) \leq [f_u/(\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$F_{Rd} = \sqrt{\frac{[f_u/(\beta_w \gamma_{M2})]^2}{\left(\frac{4x^2}{(2eaL_w \sqrt{2})^2} + \frac{3}{(aL_w)^2} \right)}} = \sqrt{\frac{[510/(0,9 * 1,25)]^2}{\left(\frac{4 * 70^2}{(2 * 60 * 6 * 120 * \sqrt{2})^2} + \frac{3}{(6 * 240)^2} \right)}} = 272,89kN$$

c.) Oletetaan, että taivutusmomentista syntyvät jännitykset siirtyvät kokonaisuudessaan levyn yläpuoliselle lyhyelle vaakahitsille:



$$[\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2})$$

$$\tau_{\parallel} = 0$$

$$\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = \frac{P}{aL_w\sqrt{2}}$$

$$P = \frac{F_{Ed}x}{2e}$$

$$\sigma_{\perp}^2 = \tau_{\perp}^2 = \left(\frac{F_{Ed}x}{2eaL_w\sqrt{2}} \right)^2$$

$$\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \leq [f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$\left(\frac{F_{Ed}x}{2eaL_w\sqrt{2}} \right)^2 + 3 \left(\frac{F_{Ed}x}{2eaL_w\sqrt{2}} \right)^2 \leq [f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$4 \frac{F_{Ed}^2 x^2}{(2eaL_w\sqrt{2})^2} \leq [f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

$$F_{Ed}^2 \left(\frac{4x^2}{(2eaL_w\sqrt{2})^2} \right) \leq [f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2$$

Mikäli hitsin voimaa siirtäväksi pituudeksi oletetaan $L_w = 12mm$:

$$F_{Rd} = \sqrt{\frac{[f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2}{\left(\frac{4x^2}{(2eaL_w\sqrt{2})^2} \right)}} = \sqrt{\frac{[510 / (0,9 * 1,25)]^2}{\left(\frac{4 * 70^2}{(2 * 60 * 6 * 12 * \sqrt{2})^2} \right)}} = 39,56kN$$

Mikäli hitsin voimaa siirtäväksi pituudeksi oletetaan $L_w = 12 + (\sqrt{2} * 6)mm \approx 20,48mm$:

$$F_{Rd} = \sqrt{\frac{[f_u / (\beta_w \gamma_{M2})]^2}{\left(\frac{4x^2}{(2eaL_w\sqrt{2})^2} \right)}} = \sqrt{\frac{[510 / (0,9 * 1,25)]^2}{\left(\frac{4 * 70^2}{(2 * 60 * 6 * 20,48 * \sqrt{2})^2} \right)}} = 67,54kN$$

Pultin leikkauskestävyys:

Oletetaan, etteivät kierteet ole leikkaustasossa.

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 * 800 * (\pi * 15^2)}{1,25} = 271,43 kN$$

Reunapuristuskestävyys:

$$F_{b,Rd} = 1,5 f_u d t / \gamma_{M2} = 1,5 * 510 * 30 * 12 / 1,25 = 220,32 kN$$

