

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
LUT Metalli
Teräsrakenteiden laboratorio
BK10A0400 Kandidaatintyö ja seminaari

ULTRALUJAN TERÄKSEN KIINNITYSHITSIEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN MÄÄRITYS

Lappeenrannassa 20.1.2012

Heli Hakala

SISÄLLYS

SYMBOLILUETTELO

1	JOHDANTO	4
2	KIINNITYSHITSIT	5
2.1	Jännitykset kiinnityshitsissä.....	6
2.2	Kiinnityshitsien väsymiskestävyyden luokka	7
2.3	Kiinnityshitsien väsymiskestävyyden parantaminen	10
3	VÄSYTYSKOE.....	11
3.1	Käytetty materiaali ja hitsauslisäaine	14
3.2	Koekappaleiden profiilit ja hitsit	15
4	VÄSYTYSKOKEEN TULOKSET	17
5	TULOSTEN TARKASTELU	18
5.1	Koekappaleisiin syntyneet säröt	19
5.2	Makroskooppikuvat murtopinnasta	26
6	KOTELOPALKIN JÄNNITYKSET.....	29
7	HITSIN RAJAVIIVAN FE-ANALYYSI.....	30
8	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
	LÄHTEET	34

LIITTEET:

LIITE 1: Koetulokset

LIITE 2: Jännityssuhdekuvaajat

LIITE 3: S-N-käyrä ($m = 3$)

LIITE 4: S-N-käyrä ($m = 5$)

LIITE 5: Jännityslaskut

SYMBOLILUETTELO

a	[mm]	Hitsin a-mitta
E	[MPa]	Materiaalin kimmokerroin
F	[N]	Voima
I_x	[mm ⁴]	Taivutusjäyhyys x-akselin suhteen
K_t	[-]	Lovenmuotoluku
M	[Nm]	Momentti
N_f	[-]	Kuormanvaihtojen lukumäärä
Q	[N]	Leikkausvoima
R	[-]	Jännityssuhde
S	[mm ³]	Staattinen momentti
W	[mm ³]	Taivutusvastus
β_w	[-]	Materiaalin lujuuskerroin
γ_{M2}	[-]	Kestävyyden osavarmuuskerroin
ε	[-]	Suhteellinen venymä
σ_y tai f_y	[MPa]	Materiaalin myötölujuus
σ_u tai f_u	[MPa]	Materiaalin murtolujuus
σ	[MPa]	Taivutusjännitys
$\Delta\sigma$	[MPa]	Jännitysvaihtelu
σ_{II}	[MPa]	Hitsin pituussuuntainen aksiaali-jännitys
τ	[MPa]	Leikkausjännitys
τ_{II}	[MPa]	Hitsin pitkittäinen leikkausjännitys
δ	[mm]	Siirtymä
max	Suurin havaittu arvo	
min	Pienin havaittu arvo	
FEM	Finite element method, elementtimenetelmä	
FAT	Fatigue resistance value, väsymiskestävyysluokka	
FAT _{50%}	Keskimääräinen väsymisluokka	
FAT _{kar}	Karakteristinen väsymisluokka	
EC3	Eurocode 3, teräsrakenteiden suunnittelustandardi	
IIW	International Institute of Welding	

1 JOHDANTO

Kiinnityслиitos on yksi neljästä hitsiliitostyyppistä. Kiinnityshitsejä on esimerkiksi palkeissa ja pitkittäisissä jäykisteissä. Kiinnityслиitosten ominaisuudet ja väsymiskestävyys eroavat voimaliitoksista. Luvussa 2 esitellään kiinnityслиitoksen ominaisuudet tarkemmin. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan ultralujien terästen kiinnityshitsien väsymislujuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Ultralujan teräksen kiinnityshitsien väsymiskestävyysominaisuuksia ei tunneta vielä yhtä hyvin kuin perinteisestä rakenneteräksestä valmistettujen vastaavanlaisten liitosten. Ultralujien terästen käyttö on kuitenkin yleistynyt nopeasti viime vuosina, joten teollisuudessa on kysyntää tällaisille tutkimuksille. Tämän kandidaatintyön ja tulevien jatkotutkimusten avulla pyritään määrittämään kiinnityshitsien suunnittelussa kaivattuja mitoitustietoja.

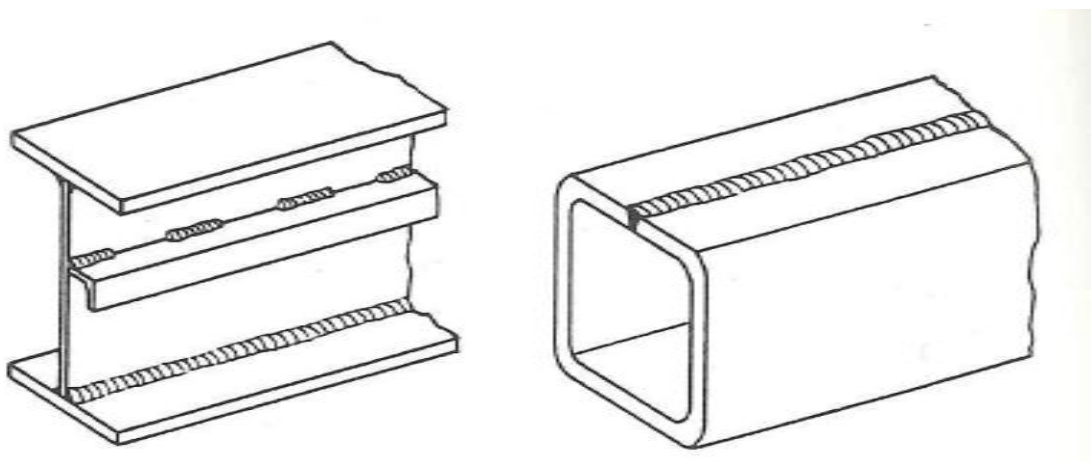
Tämä kandidaatintyö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa. Osa työssä käytetyistä hitsauksista suoritettiin Steelpolis Raahessa. Kandidaatintyö on osa TeOS -tutkimushanketta. Työ keskittyy Ruukin Optim 960 QC teräksestä valmistetun kotelopalkin väsymiskestävyuden tutkimukseen. Kotelopalkin väsymiskestävyyttä tutkitaan nelipistetaivutuksella, jossa kuormituksena käytetään vakioamplitudista taivutusmomenttia. Nykyisten standardien mukaan kiinnityshitsien väsymisluokka on parhaimmillaan 125, jos kiinnityслиitos on hitsattu molemmilta puolilta läpi automatisoidusti tai mekanisoidusti ilman aloitus- ja lopetuskohtia (Hobbacher 2003, s. 55–56). Työssä tutkittavat kiinnityshitsit on hitsattu yhdeltä puolelta mekanisoidusti laser- tai MAG-prosessilla. Kiinnityshitsien väsymisluokkaa ei voida parantaa samalla tavalla kuin voimaliitoksien, koska kiinnityshitsien väsymisluokka on jo lähtökohdiltaan korkeampi kuin voimaliitosten. Tutkimuksissa suurin huomio kohdistuukin kiinnityshitsin juuren puolen rajaviivan tasaisuuteen.

Työn tavoitteena on määrittää kiinnityshitsien väsymiskestävyys ja löytää perustelut kiinnityshitsien FAT-luokan kasvattamiselle. Kiinnityshitsien väsymiskestävyudessa särön ydintymisen oletetaan olevan merkittävä tekijä, jolloin teräksen suuri myötölujuus parantaa väsymiskestävyyttä. Tällöin ultralujilla teräksillä väsymisluokan tulisi olla nykyisten rakenneterästen FAT-luokkaa 125 korkeampi. Kotelopalkeille tehtävien väsytykskokeiden ja jatkotutkimusten tavoitteena on pystyä perustelemaan tämä hypoteesi.

2 KIINNITYSHITSIT

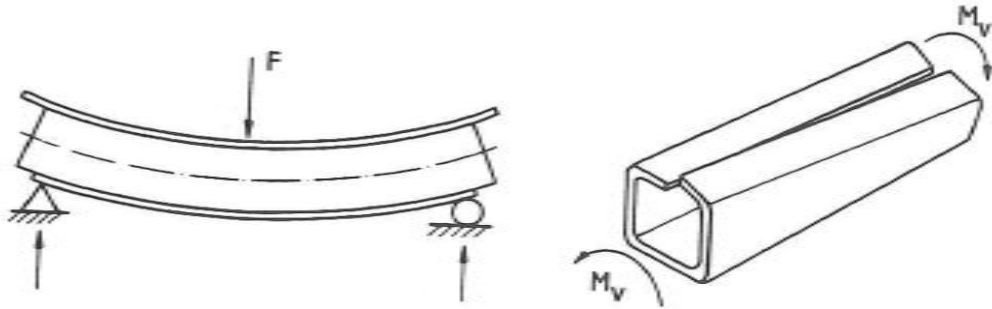
Hitsiliitokset voidaan jakaa kuormitustyyppin mukaan voima-, kiinnitys-, side- ja varusteluhitseihin. Voimaliitoksessa kaksi kappaletta on liitetty sarjaan, jolloin hitsi välittää veto-, puristus- ja leikkausvoiman sekä momentin kappaleesta toiseen. Voimaliitokseen kohdistuu tällöin kuormituksesta syntyviä primäärisiä rasituksia. Sideliitos taas ei ota vastaan primäärisiä rasituksia vaan sekundäärisiä. Sideliitosta voidaan käyttää esimerkiksi stabiiliuden parantamiseen. Varusteluhitsin nimikin jo kertoo, että hitsi toimii vain varusteiden kiinnittämisessä. Varusteluhitsin mitoitus ei perustu liitokseen kohdistuvaan rasitukseen vaan muihin kriteereihin, kuten lämmöntuontiin. Seuraavissa luvuissa tarkastellaan kiinnityshitsejä ja niiden ominaisuuksia tarkemmin. (Niemi 1993, s. 16–20)

Kiinnityshitsit liittävät yhteen levykenttiä, jotka muodostavat yhtenäisen profiilin. Kiinnityshitsit ovat esimerkiksi kotelopalkin laipan ja uuman välinen liitos, kylmämuovattun suorakaideprofiilin kiinnityshitsi ja erilaisten pitkittäisten jäykisteiden liitokset. Kuvassa 1 on esitetty esimerkkejä tyypillisistä kiinnityshitseistä. Usein kiinnityshitsit ovat koko kappaleen mittaisia. Kiinnityshitsit voivat olla yhdeltä puolelta tai molemmilta puolilta hitsattuja. Vaativissa kohteissa molemmilta puolilta hitsaus on suositeltavaa. (Niemi 2003, s. 19)



Kuva 1. Esimerkkejä kiinnityshitseistä (Niemi 2003, s. 18)

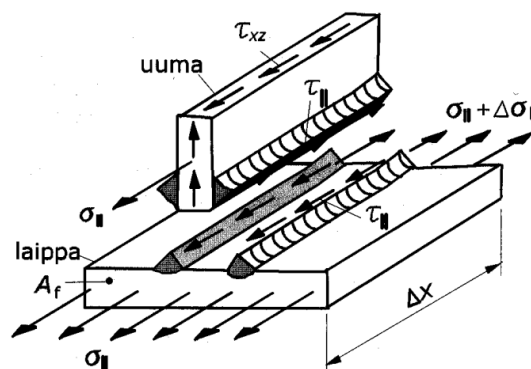
Kuvassa 2 on esitetty kiinnitysliitoksen puutteesta aiheutuvat liukumukset. Ilman kiinnityshitsiä profiilin osat pääsevät liikkumaan toistensa suhteen. Putkipalkissa kiinnityshitsin puute saa aikaan vääntöjäykkyyden pienenemisen. Avoin profiili kestää vääntöä huomattavasti vähemmän kuin suljettu profiili. Kiinnityshitsit siis jäykistävät rakennetta. (Niemi 2003, s. 62–64)



Kuva 2. Kiinnityshitsien puuttumisesta aiheutuvat liukumukset (Niemi 2003, s. 18)

2.1 Jännitykset kiinnityshitsissä

Kuvassa 2 esitettyjen liukumien vuoksi kiinnitysliitoksiin syntyy leikkausjännityksiä. Kiinnityshitsiin syntyvät jännitykset nähdään kuvassa 3. Kiinnityshitseihin kohdistuu hitsin pituussuuntaisia jännityksiä σ_{\parallel} , joita kutsutaan aksiaalijännityksiksi. Tällaisia jännityksiä syntyy esimerkiksi palkin taivutuksesta. Jos kuvassa 2 esitetyt liukumukset estetään, syntyy hitsiin pitkittäisiä leikkausjännityksiä τ_{\parallel} . Syntyvät leikkausjännitykset ovat kiinnityshitsin primäärisiä jännityksiä. Aksiaalijännitysten merkitys kiinnitysliitoksessa on sekundäärinen. Kiinnityshitseihin kohdistuvat voimat ovat voimaliitoksiin kohdistuvia voimia pienempiä. (Niemi 2003, s. 62–64)



Kuva 3. Kiinnityshitsiin syntyvät jännitykset (Niemi 1993, s. 18)

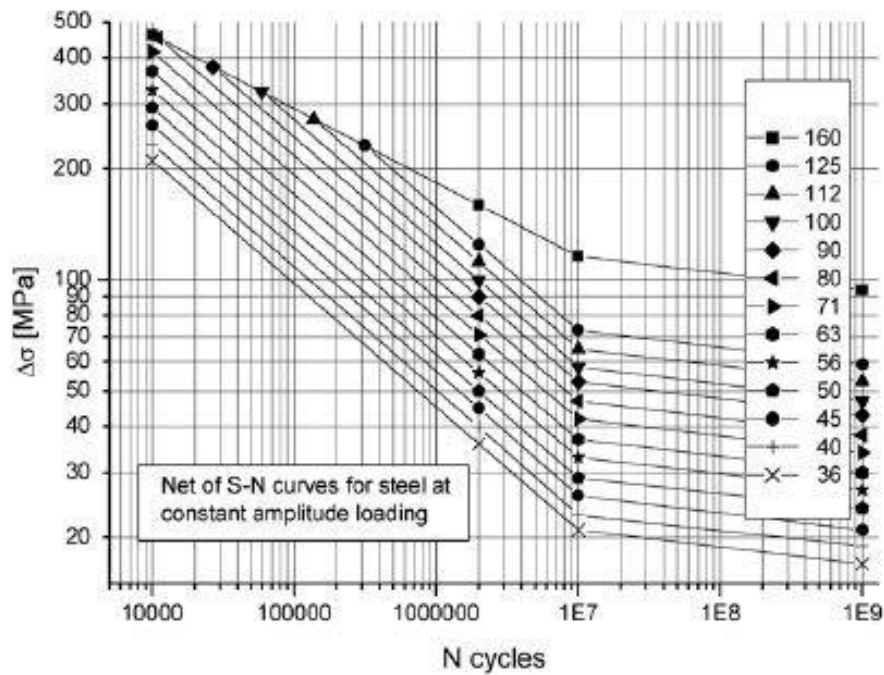
Kiinnitysliitoksissa käytettävä hitsin a -mitta määräytyy pitkittäisten leikkausjännitysten τ_{II} perusteella. Kaavasta 1 saadaan laskettua hitsin vaadittu a -mitta.

$$\tau_{II} = \frac{Q \cdot S}{2a \cdot I_x} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \cdot \beta_w \cdot \gamma_{M2}}, \quad (1)$$

Kaavassa Q on palkkiin kohdistuva suurin leikkausvoima (N), S staattinen momentti (mm^3), a hitsin vaadittu a -mitta (mm), I_x taivutusjäyhyys (mm^4), f_u materiaalin murtolujuus (MPa), β_w materiaalin lujuuskerroin ja γ_{M2} kestävyuden osavarmuuskerroin. Kaava 1 soveltuu kuvassa 3 esitetyle molemmilta puolilta hitsatulle kiinnitysliitokselle. Mitoittavana voimana käytetään palkkiin kohdistuvaa suurinta staattista kuormaa. Väsyttävällä kuormituksella ei ole merkitystä kiinnityshitsin a -mittaan. (Björk 2011a)

2.2 Kiinnityshitsien väsymiskestävyysluokka

Hitsien väsymisluokka kertoo, kuinka paljon kuormanvaihtoja liitos kestää tietyllä jännitysvaihtelulla. Hitsiliitoksen väsymisluokka voidaan määrittää kokeellisesti. Tavallisimmille liitostyypeille on valmiiksi taulukoitu väsymisluokat, joita voidaan soveltaa väsymiskestävyyslaskennassa. Kiinnityshitsien väsymisluokkia on esitetty useissa standardeissa. Standardeissa ilmoitetut väsymiskestävyysluokat voivat erota hieman toisistaan, koska myös ne on määritetty kokeellisesti saatujen tulosten perusteella. Yleisesti käytettyjä ovat Hobbacherin (2003) IIW julkaisussa ja Eurocode 3:ssa ilmoitetut väsymisluokat. Väsymiskestävyysluokkien yhteydessä käytetään S-N-käyrää eli jännityskestoikäkäyrää. Kuvassa 4 on esitetty IIW:n suositus vakioamplitudisen kuormituksen S-N-käyrästä. Vaaka-akselilla on kuormanvaihtojen eli syklien määrä ja pystyakselilla jännitysvaihtelu. Kuvaajasta voidaan määrittää hitsausliitoksen kestävyys eli syklien määrä eri jännitysvaihteluilla. Kuvaajaan piirretyt käyrät vastaavat eri väsymiskestävyysluokkia. Logaritmiselle asteikolle piirrettyjen käyrien kulmakertoimet ovat samat. Väsymiskestävyysluokan FAT-arvo kertoo, kuinka suuren jännitysvaihtelun liitos kestää, kun murtumiseen johtaneiden kuormanvaihtojen määrä on $2 \cdot 10^6$.



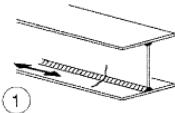
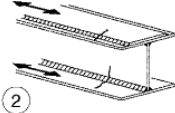
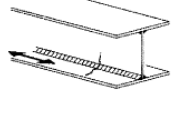
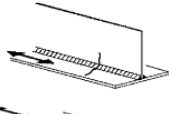
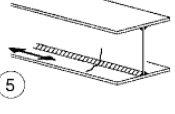
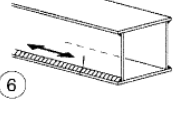
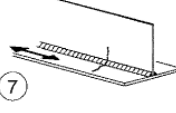
Kuva 4. Vakioamplitudisen kuormituksen S-N-kuvaaja (Hobbacher 2007)

Väsymislujuus voidaan selvittää kokeellisesti väsyttämällä kappaletta vakio- tai vaihtuvaliitoksella kuormituksella, kunnes koekappale murtuu. Murtumaan johtaneiden sylien määrän ja jännitysvaihtelun avulla voidaan laskea kappaleen väsymiskestävyys- eli FAT-luokka. Väsymiskestävyysluokka saadaan kaavasta 2

$$FAT = \Delta\sigma \cdot \sqrt[m]{\frac{N_f}{2 \cdot 10^6}} \quad (2)$$

jossa N_f on liitoksen vaurioon johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä ja $\Delta\sigma$ jännitysvaihtelu (MPa), jolla väsytysoike on suoritettu. Kerroin m on hitsatuilla rakenteilla 3. Samaa kaavaa voidaan käyttää hitsausliitoksen väsymiskestävyuden määrittämiseen. Jos liitoksen väsymisloukka ja jännitysvaihtelu tiedetään, voidaan vaurioon johtavien kuormanvaihtojen lukumäärä arvioida. Mitä suurempi FAT-loukka liitoksella on, sitä kauemmin sen kestää kuormanvaihtoja. FAT-loukan ja kestoian suhde ei ole lineaarinen kuten kaavasta 2 nähdään. FAT-loukan kasvaessa esimerkiksi kaksinkertaiseksi kestoikä N_f kasvaa 2^m -kertaiseksi, jos jännitysvaihtelu säilyy samana.

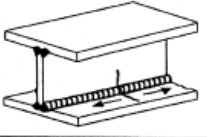
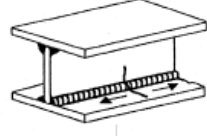
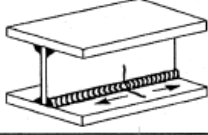
Standardi SFS-EN 1993-1-9 eli Eurocode 3 (EC3) osa 1–9 ilmoittaa kiinnityshitsien väsymisluokan olevan 100–125. Kuvassa 5 on esitetty EC3:n väsymiskestävyysluokat kiinnityshitseille. Väsymiskestävyysluokka on paras silloin, kun hitsaus on suoritettu automatisoidusti tai mekanisoidusti ilman aloitus- ja lopetuskohtia. Hitsin täytyy olla jatkuva koko matkalta. Jos hitsi sisältää aloitus- tai lopetuskohtia, väsymisluokka on vain 112. Käsini hitsatuille kiinnityskohdille FAT-luokaksi luvataan vain 100. (SFS-EN 1993-1-9)

Väsymisluokka	Rakenneyksikohta	Kuvaus	Vaativuudet
125	 	Jatkuvat pituussuuntaiset hitsit: 1) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut kaksipuoliset päittäishitsit. 2) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut pienahitsit. Peitelevyn päät tarkistetaan taulukon 8.3 rakenneyksikohtien 6) tai 7) mukaan.	Yksityiskohtat 1) ja 2): Lopetus/aloituskohtia ei sallita, paitsi jos korjaus tehdään asiantuntijan toimesta ja tehdään tarkastus sen toteamiseksi, että korjaus on tehty asianmukaisesti.
112	 	3) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti hitsatut kaksipuoliset piena- tai päittäishitsit, mutta ne sisältävät lopetus- tai aloituskohtia. 4) Automatisoidusti tai täysmekanisoidusti yhdeltä puolelta hitsatut päittäishitsit jatkuvaa juuritukea käytettäessä, mutta ilman lopetus- tai aloituskohtia.	4) Kun tämä rakenneyksikohta sisältää lopetus/aloituskohtia käytetään väsymisluokkaa 100.
100	 	5) Käsivaraisesti hitsatut piena- tai päittäishitsit. 6) Kaikki yhdeltä puolelta hitsatut päittäishitsit, erityisesti koteloprofiilit.	Rakenneyksikohtissa 5) ja 6) laippa- ja uumalevyjen välinen erittäin hyvä sovitus on oleellinen. Uuman reunat valmistetaan siten, että juuripinta on sopiva riittävän säännöllisen keskeyttömän tunkeuman saavuttamiseksi.
100		7) Kaikki hitsattujen piena- tai päittäishitsien korjaukset väsymisluokissa 1)...6).	7) Korjaaminen asiantuntijan tekemällä hiomisella kaikkien näkyvien jälkien poistamiseksi ja riittävä varmistus voivat palauttaa alkuperäisen väsymisluokan.

Kuva 5. Väsymisluokkia kiinnityskohdille (SFS-EN 1993-1-9, s. 21)

Kiinnityshitseille annetut väsymisluokat vaihtelevat hieman eri lähteissä. Hobbacherin (2003) IIW -julkaisussa käsini hitsatulle K- tai pienahitsille annetaan väsymisluokaksi vain

90 (kuva 6). Hobbacherin mukaan väsymisluokka 125 vaatii automatisoidusti hitsatun K-hitsin. Jos kiinnityслиitos ei ole läpihitsattu, väsymisluokka on vain 100.

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; AL= aluminium)	FAT St.	FAT AL	Requirements and Remarks
321		Continuous automatic longitudinal fully penetrated K-butt weld without stop/start positions (based on stress range in flange) NDT	125	50	No start-Stop position is permitted except when the repair is performed by a specialist and inspection is carried out to verify the proper execution of the weld.
322		Continuous automatic longitudinal double sided fillet weld without stop/start positions (based on stress range in flange)	100	40	
323		Continuous manual longitudinal fillet or butt weld (based on stress range in flange)	90	36	

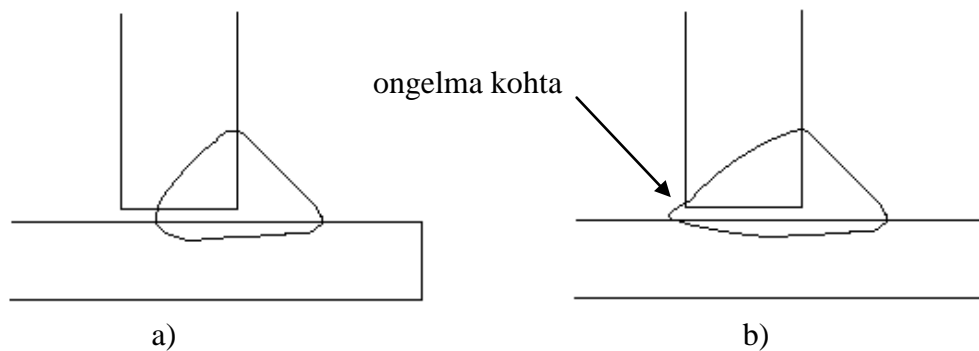
Kuva 6. Väsymisluokkia kiinnityshitseille (Hobbacher 2003, s. 55–56)

2.3 Kiinnityshitsien väsymiskestävyyden parantaminen

Voimaliitoksien väsymiskestävyyttä voidaan parantaa useilla hitsin jälkikäsittelemenetelmillä. Nämä väsymiskestävyyttä parantavat menetelmät eivät kuitenkaan päde kiinnityshitseille. Kiinnityслиitoksen hitsauksessa ei myöskään voida käyttää vaaputusta samoin kuin voimaliitoksilla, koska vaaputus aiheuttaa hitsin rajaviivalle epäjatkuvuuskohtia, joihin väsymissäro voi ydintyä. Vaaputuksen synnyttämät lovet ovat kuormitukseen nähden kohtisuorassa toisin kuin poikittain kuormitetuissa voimahitseissä. Kiinnityshitsin rajaviivan ja juuren puolen tulisi olla mahdollisimman tasainen. Tämän vuoksi automatisoidusti hitsatulle kiinnityслиitokselle voidaan taata parempi väsymiskestävyys. Hitsauksen aloitus- ja lopetuskohdat ovat kiinnityshitseissä kriittisiä, koska näihin kohtiin syntyy vaaputuksen kaltaisia epäjatkuvuuskohtia, jotka toimivat särön ydintymiskohtina. (Björk 2011a)

Vaikean hitsattavuuden vuoksi koteloprofiileissa hitsaus on usein tehty vain yhdeltä puolelta. Tällöin hitsin tunkeuman jatkuvuutta on vaikea kontrolloida hitsin pituussuunnassa ilman juuritukea. Kuvassa 7 on esitetty kaksi erilaista kiinnityshitsin

hitsaustapaa. Juuren puoli voidaan pyrkiä hitsaamaan läpi ilman juuritukea (kuva 7b) tai vajaalla tunkeumalla (kuva 7a). Juuren puoli on yhdeltä puolelta hitsatuissa kiinnityshitseissä kriittinen, joten siihen tulee kiinnittää eniten huomiota. Kiinnityshitsiin kannattaa jättää hitsaamaton juuripinta, jos se takaa jatkuvan juuren muodon. Ilman juuritukea läpi hitsattaessa juuren rajaviivalle syntyy epäjatkuvuuskohtia, joiden vuoksi läpihitsatun profiilin väsymiskestävyys on huonompi. Myös silloitusten paikat tulee miettiä tarkasti, koska ne aiheuttavat hitsiin samanlaisia epäjatkuvuuskohtia, jotka huonontavat väsymiskestävyttä. Silloituksia tulisi välttää maksimikuormituksen alueilla. (Björk 2011b)

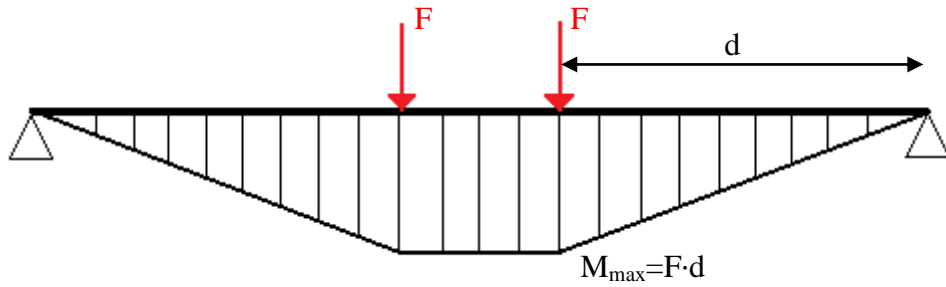


Kuva 7. Yhdeltä puolelta hitsatun kiinnityshitsin kaksi erilaista juuren puolta

Hitsattaessa kiinnityshitsi vajaalla tunkeumalla on perusaineen leikattu reuna työstettävä. Ultralujien terästen laser- ja plasmaleikkauksessa saattaa syntyä mikrohalkeamia, jotka voivat toimia hitsin alkusäröinä silloin, kun leikattu reuna jää hitsauksessa sulamatta. Työstetty reuna mahdollistaa myös tasaisemman ilmaraon uuman ja laipan välille, jolloin tunkeumakin on tasaisempi. Jos läpihitsautuminen voidaan taata, ei leikattua reunaa tarvitse työstää pois. (Niemi 1993, s. 18)

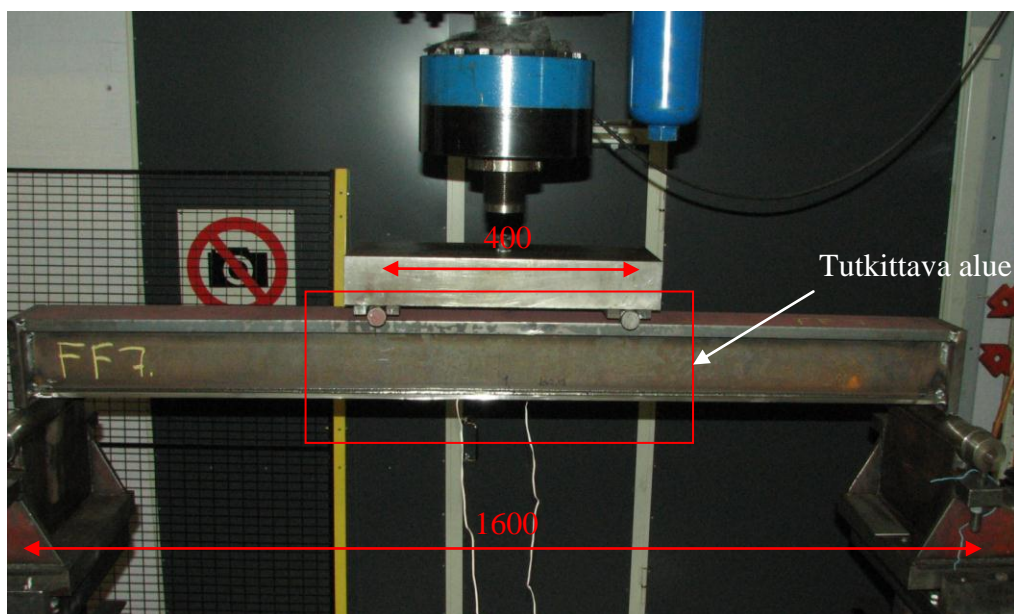
3 VÄSYTYSKOE

Väsytykskoe suoritettiin nelipistetaivutuksella, jolloin kiinnityshitseihin syntyy pitkittäisiä jännityksiä. Nelipistetaivutuksella palkin keskelle saadaan aikaiseksi vakiomomentti kuvan 8 mukaisesti. Kotelopalkkiin syntyy vakiomomentista taivutusjännitys, joka palkin yläreunassa on puristus- ja alareunassa vetojännitystä kuormituksen ollessa kuvan 8 mukaisesti alaspäin.



Kuva 8. Momenttijakauma nelipistetäivutuksessa.

Väsytykokeet suoritettiin 400 kN väsytyshäällä Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa. Kuvassa 9 on esitetty käytetty koejärjestely. Kotelopalkin tukiväli oli 1600 mm ja sylinterin painimien välimatka 400 mm. Kotelopalkin päihin hitsattiin paksut päätylaput muodonmuutosten estämiseksi ja tuennan helpottamiseksi. Hitsauksen jälkeen päätylappujen alareunaan työstettiin urat, joihin tukikelkat voitiin kiinnittää. Kotelopalkki niveltettiin kummastakin päästä. Kumpikin tukikelkka pääsi liikkumaan rullatukien päällä, jolloin palkkiin ei kohdistunut aksiaalivoimaa sen taipuessa. Palkkiin saatiin kuormitus hydraulisyylinterillä, jonka voima jakautui tasan kummallekin painimelle. Kuvasta 9 nähdään tutkittavan alueen koko. Tutkittava alue ulottuu noin 100 mm kummankin painimen ulkopuolelle. Tällä alueella kiinnityshitsien rajaviivan tulisi olla mahdollisimman tasainen hitsin pituussuunnassa.



Kuva 9. Koejärjestely

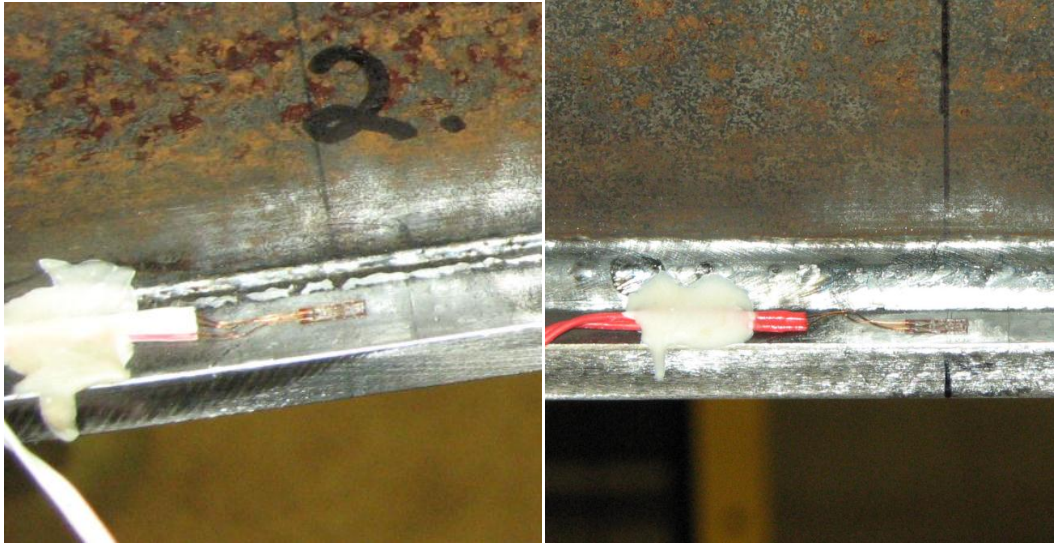
Väsytykskokeessa käytettiin kuormituksen vakioamplitudista voimanvaihtelua, jonka jännityssuhde $R \approx 0,1$. Tämä tarkoittaa sitä, että kotelopalkin alalaippa on koko ajan vetojännityksessä. Jännityssuhde R saadaan kaavasta 3.

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (3)$$

Koekappaleesta mitattiin jännitykset venymäliuskoilla. Venymäliuskojen avulla voidaan mitata materiaalista pieniäkin venymän muutoksia. Venymien mittausta perustuu venymäliuskassa olevan vastuslangan resistanssin muutokseen langan venyessä. Vastuslangan venyessä sen pinta-ala pienenee ja resistanssi kasvaa. Kokeen aikana venymäliuskoilta saatiin venymätiedot yksikössä μStr . Jos materiaaliin syntyvät jännitysvaihtelut ovat myötölujuutta matalampia ja kyseessä on aksiaalinen jännitystilä, voidaan venymäliuskoilta saadut venymät muuttaa Hooken lain avulla jännityksiksi (kaava 4).

$$\sigma = E\varepsilon \quad (4)$$

Kaavassa σ on jännitys (MPa), E materiaalin kimmokerroin (MPa) ja ε suhteellinen venymä. Ultralujan teräksen kimmokerroin on 210 GPa. Venymäliuskat asetettiin koekappaleisiin pituussuunnassa kotelopalkin keskelle alalaipan yläpinnalle hitsin viereen. Kuvassa 10 on esitetty käytetty venymäliuska ja sen sijoituskohta laser- ja MAG-hitsin viereen. Venymiä mitattiin alalaipan kummankin hitsin vierestä. Kokeen aikana venymäliuskoilta saatiin määrätyn mittausvälein suurin ja pienin venymä, joista jännitysvaihtelu alalaipassa voitiin laskea. Venymätietojen lisäksi kokeen aikana tallennettiin arvot sylinterivoimista, sylinterin siirtymästä sekä syklien määrästä. Kokeista saatujen jännitysarvojen ja kuormanvaihtojen lukumäärän avulla koekappaleille voitiin laskea väsymiskestävyysluokka eli FAT-luokka.



Kuva 10. Väsytykskoeksissa käytetty venymäliuska ja sen sijainti

3.1 Käytetty materiaali ja hitsauslisäaine

Kaikki koekappaleet valmistettiin Ruukin ultralujasta Optim 960 QC -teräksestä. Optim 960 QC -teräs on suorakarkaistu ja mikrorakenteeltaan bainiittis-martensiittinen. Sen kovuus on keskimäärin 300 HB, joka on noin kaksinkertainen perusrakenneteräksiin verrattuna. Standardin EN 10149-1:1995 mukaan Ruukin suorittama aineenkoetus antaa teräksen myötölujuudeksi vähintään 960 MPa ja murtolujuudeksi 1000 MPa. Korkean murtolujuuden ja kovuuden vuoksi teräksen kulumiskestävyys on hyvä. Tämä myös vaikeuttaa materiaalin työstämistä. Murtovenymä Optim 960 QC -teräksellä on noin 7 %. Ultralujien terästen murtovenymät jäävät huomattavasti perinteisten rakenneterästen arvoja pienemmiksi. Koekappaleita hitsattiin laser- ja MAG-prosesseilla. MAG-hitsauksessa hitsauslisäaineena käytettiin Böhlerin Union X96 -lisäainetta.

Taulukossa 1 on esitetty aineodistuksesta saatu Optim 960 QC -teräksen kemiallinen koostumus. Ultralujien terästen hiilipitoisuus ei ole korkea, joten hitsattavuus on kohtalaisen hyvä. Optim 960 QC -teräksen hiiliekvivalentti on 0,52–0,57 (Rautaruukki). Hiiliekvivalentin mukaan hitsauksessa suositellaan käytettävän esilämmitystä. Ultralujien terästen päästövaikutuksen vuoksi esilämmitystä ei kuitenkaan käytetty. Ultralujien teräksien hitsattaessa lämmöntuonti ei saa nousta liian suureksi, jotta muutosvyöhyke ei

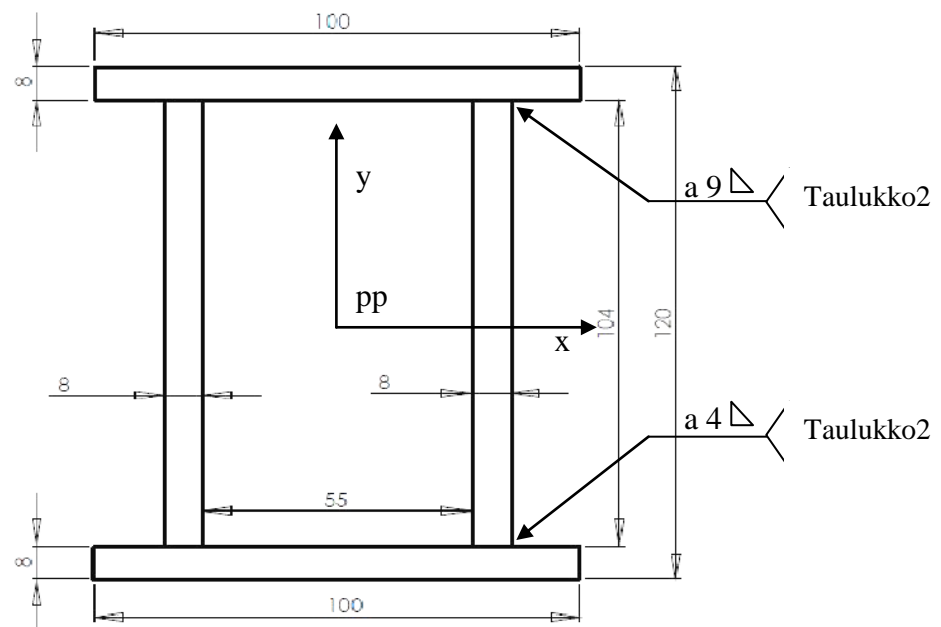
pehmine liian suurelta alueelta ja näin heikennä liitoksen lujuutta. Tästä ei kuitenkaan yleensä ole vaaraa pitkittäin kuormitetuissa kiinnityshitseissä.

Taulukko 1. Optim 960 QC -teräksen kemiallinen koostumus (Rautaruukki)

	C	Si	Mn	P	S	Al	N	Cu	Cr	Ni	Mo	Sn
%	0,091	0,19	1,06	0,007	0,002	0,030	0,005	0,023	1,12	0,05	0,156	0,002

3.2 Koekappaleiden profiilit ja hitsit

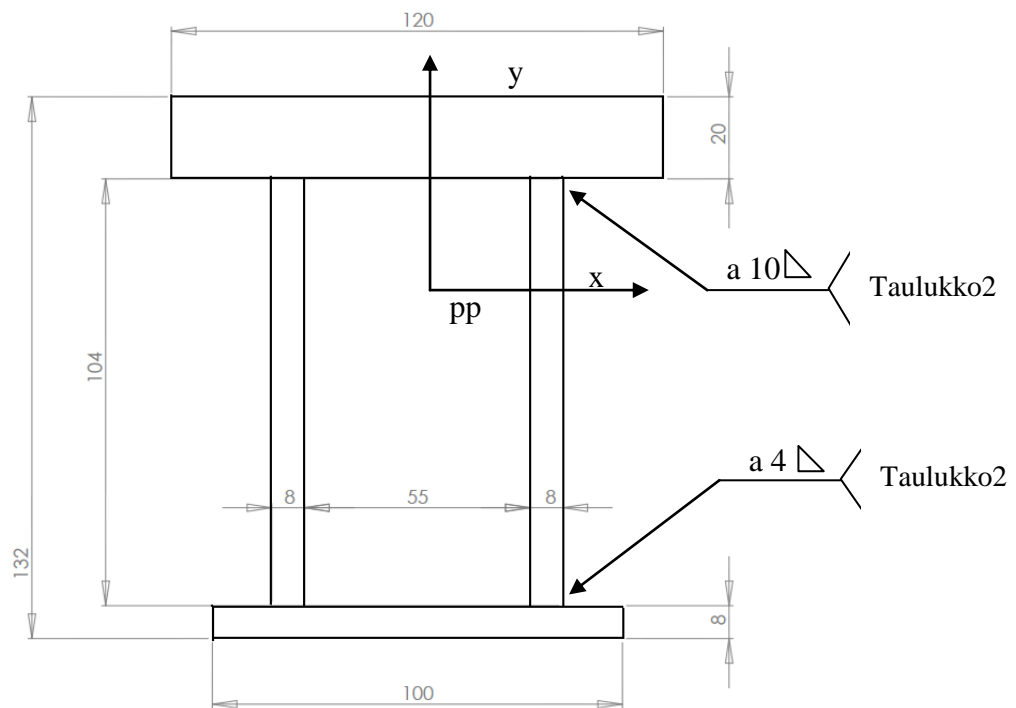
Kaikki väsytykset suoritettiin kotelopalkeille, joiden laipan ja uuman liitos hitsattiin yhdeltä puolelta. Väsytykset tehtiin kahdeksalle koekappaleelle. Koekappaleet nimettiin FF1–FF8. Koekappaleista 3 ensimmäistä eli FF1–FF3 olivat profiililtaan kaksoissymmetrisiä. Profiilit valmistettiin ainepaksuudeltaan 8 mm levyistä. Kuvassa 11 on esitetty koekappaleiden FF1–FF3 profiilin muoto. Profiilin mitat valittiin niin, ettei lommahdusta pääse tapahtumaan uumassa eikä ylälaipassa, joka on puristuskuormitettu.



Kuva 11. Koekappaleiden FF1–FF3 profiili ja hitsit

Ensimmäisten väsytykskeiden jälkeen koekappaleiden profiilia muutettiin. Väsytykskeessä FF1–FF3 säröt syntyivät ylälaippaan puristuspuolelle. Ylälaippaan

syntyy painimista johtuvia y-akselin suuntaisia jännityksiä, jotka heikentävät väsymiskestävyyttä painimien kohdalla. Tutkimuksen varsinainen kohde oli kuitenkin koko ajan vedolla olevan alalaipan väsymiskestävyys, joten profiilia muutettiin niin, että neutraaliakseli siirtyi ylöspäin. Kuvassa 12 on esitetty koekappaleiden FF4–FF8 muutettu profiili. Koekappaleissa FF4–FF8 ylälaippa on valmistettu ainepaksuudeltaan 20 mm:n levystä, joka kasvattaa hieman profiilin kokonaiskorkeutta. Paksun ylälaipan ansiosta profiilin neutraaliakselia saatiin siirrettyä ylöspäin, jolloin palkin alalaippaan syntyy itseisarvoltaan suurempi jännitys kuin ylälaippaan. Uudessa profiilissa painopiste on 81,4 mm:n korkeudella alalaipan alareunasta. Samoilla kuormituksilla koekappaleisiin saatiin vetopuolelle suuremmat jännitykset, jolloin säröt syntyivät alalaippaan.



Kuva 12. Koekappaleiden FF4–FF8 profiili ja hitsit

Koska kotelopalkkien hitsauksessa läpätunkeumaa ei voitu varmistaa, pyrittiin kiinnityshitsit tekemään vajaalla tunkeumalla. Tavoitteena oli saada tunkeumasta tasainen koko hitsin matkalla. Tunkeuma kuitenkin vaihteli, koska ilmarakoa ei saatu tasaiseksi leikattujen levyjen käyryyden vuoksi. Vajaan tunkeuman vuoksi levyjen reunoista työstettiin pois rosainen leikkauks jälki (noin 1 mm). Tällöin leikkauksen aiheuttamat mahdolliset mikrosäröt saatiin pois ja ilmarako tasaisemmaksi. Taulukossa 2 on esitetty

kotelopalkeissa käytetyt hitsit. Koekappaleissa FF1–FF4 ylälaippa hitsattiin läpi suurella a-mitalla, jotta painimista syntyvät y-akselin suuntaiset jännityskeskittymät eivät väsyttäisi ylälaipan hitsejä. Kaikki hitsaukset suoritettiin niin, ettei aloitus- ja lopetuskohtia syntynyt tutkittavalle alueelle. Silloituksia oli tutkittavalla alueella vain koekappaleessa FF3. Hitsaukset suoritti Steelpolis Raahessa ja Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Taulukko 2. Koekappaleiden hitsien hitsausprosessi ja a-mitat

ID	ylälaippa		alalaippa		Huomioita
		a-mitta		a-mitta	
FF1	MAG	9	MAG	4	8 mm ylälaippa
FF2	MAG	9	MAG	4	8 mm ylälaippa, tutkittavaa aluetta ei silloitettu
FF3	MAG	9	MAG	4	8 mm ylälaippa, palkki silloitettu koko matkalta
FF4	MAG	10	MAG	4	20 mm ylälaippa
FF5	laser	-	laser	-	20 mm ylälaippa
FF6	laser	-	laser	-	20 mm ylälaippa
FF7	laser	-	MAG	4	20 mm ylälaippa
FF8	laser	-	MAG	4	20 mm ylälaippa

4 VÄSYTYSKOKEEN TULOKSET

Liitteessä 1 on esitetty väsytykskokeissa saadut jännitysvaihtelut ja murtumiseen johtaneiden kuormanvaihtojen määrä. Liitteessä 2 on esitetty kokeista saadut jännityssuhdekuvaajat kaikista koekappaleista FF1–FF8. Kuvaajien y-akselilla on venymäliuskoilta saadun jännitysvaihtelun $\Delta\sigma_L$ ja teoreettisen jännitysvaihtelun $\Delta\sigma_{teor}$ suhde. Teoreettinen jännitysvaihtelu on sylinterivoimista kaavalla 5 laskettu jännitys. Teoreettisen ja liuskoilta saadun jännitysvaihtelun tulisi olla yhtä suuret säröttömässä koekappaleessa, jolloin niiden suhde on 1. Teoreettinen jännitys on kuitenkin suurempi kaikissa koekappaleissa, joten jännitysvaihteluiden suhde jää alle yhden. Jännityssuhteen avulla kuvaajista on saatu suodatettua pois sylinterikuormituksen vaihtelut. Sylinterikuorman kasvaessa myös liuskoilta saatu jännitys kasvaa, jolloin jännitysten suhde pysyy samana. Jännityssuhteen muutos kuvaajissa kertoo siis koekappaleisiin syntyneistä väsymissäröistä. Kuvaajissa merkintä L1 vastaa liuskalta 1 ja L2 liuskalta 2 saatua tulosta.

5 TULOSTEN TARKASTELU

Liitteessä 1 on esitetty koetulokset taulukoituna. Taulukossa on ilmoitettu väsymissärön murtumiseen johtaneiden kuormanvaihtojen lukumäärä, keskimääräinen jännitysvaihtelu ja niistä lasketut FAT-luokat. Taulukossa jännitysvaihtelut on ilmoitettu sen liuskan puolelta, jolle särö syntyi. Tällöin FAT-arvo kertoo kotelopalkin minimiväsymiskestävyyden. Tällöin säröttömän hitsin väsymiskestävyyden luokka on laskettua FAT-luokkaa korkeampi. FAT-luokat on laskettu m -kertoimella 3 ja 5 (kaava 2). Tämä tarkoittaa, että S-N-käyrät ovat kaltevuuskulmassa $1/3$ ja $1/5$. Liitteessä 3 on esitetty koetulosten perustella piirretty S-N-kuvaajat, joissa kaltevuuskulma on $1/3$. Liitteessä 4 on samoista koetuloksista piirretyt S-N-kuvaajat kaltevuuskulmalla $1/5$. Pisteet sijoittuvat S-N-käyrillä samalle jännitystasolle, koska jännitysvaihtelu pyrittiin pitämään samana kaikissa koekappaleissa vertailun yksinkertaistamiseksi. Menetelmän haittapuoli on, ettei kotelopalkin väsymiskestävyys tuloksista voida arvioida S-N-käyrän todellista kaltevuutta. Kuvaajiin on piirretty pystyviiva $2 \cdot 10^6$ syklin kohdalla, joka kertoo FAT-luokan suuruuden. Kuvaajista (liite 3 ja 4) ja taulukosta (liite 1) nähdään, että FAT-luokat ovat suurempia kertoimen m ollessa 5.

Koetulosten vähyyden vuoksi FAT-luokalle voidaan antaa vain 50 %:n varmuus, jonka vuoksi kuvaajiin (liite 3 ja 4) on merkitty $FAT_{50\%}$ -arvot. $FAT_{50\%}$ -arvot muutettiin karakteristisiksi jakamalla ne kertoimella 1,36 (Nykänen). Liitteeseen 1 on merkitty jokaisen yksittäisen koekappaleen karakteristiset arvot m -kertoimella 3 ja 5.

Liitteessä 1 ilmoitettu jännitysvaihtelu $\Delta\sigma$ on keskiarvo kokeen aikana esiintyneistä maksimi- ja minimijännitysten erotuksista. Koekappaleiden FF1–FF3 jännitysvaihtelu oli lähempänä vaihtuva-amplitudista kuin vakioamplitudista kuormitusta. Tällöin FAT:n laskentakaavassa (kaava 2) jännitysvaihtelun tilalla tulisi käyttää rainflow-analyysillä saatua ekvivalenttia jännitysvaihtelua. Ekvivalentti jännitys korvaa vaihtuva-amplitudisen jännityksen vakioamplitudisella. Ekvivalenttia jännitystä ei kuitenkaan laskettu koekappaleille FF1–FF3. Koekappaleiden FF4–FF8 jännitysvaihtelut vastaavat lähes vakioamplitudista kuormitusta, joten ekvivalenttijännitysvaihtelu ei juuri eroa keskiarvolla lasketusta.

Liitteessä 2 esitetyistä jännityssuhdekuvaajista nähdään, milloin jännitykset kasvavat tai pienenevät liuskojen kohdalla. Jännityssuhteen muutos ilmaisee särön kasvun. Jos särö syntyy lähelle venymäliuskaa, venymäliuskan mittaama jännitys pienenee ja vastakkaisella puolella olevan venymäliuskan jännitys kasvaa. Särön kohdalla voimavuo joutuu kiertämään särön, jolloin voimavuo tihenee vastakkaisella puolella olevan venymäliuskan kohdalla. Jos särö syntyy kauaksi venymäliuskasta, ei jännitysvaihteluissa näy muutoksia.

Koekappaleista saadut jännitysvaihtelut ovat 375–405 MPa. Analyyttisellä laskennalla jännitykseksi saadaan alalaipassa liuskan kohdalla 417 MPa (liite 5). Analyyttinen tulos on siis todellista jännitystä suurempi. Tämä sama näkyy liitteessä 2 esitetyissä jännityssuhdekuvaajissa. Liuskoilta saadun ja teoreettisen eli sylinterivoimista lasketun jännityksen suhde on alle yksi säröttömässä kappaleessa.

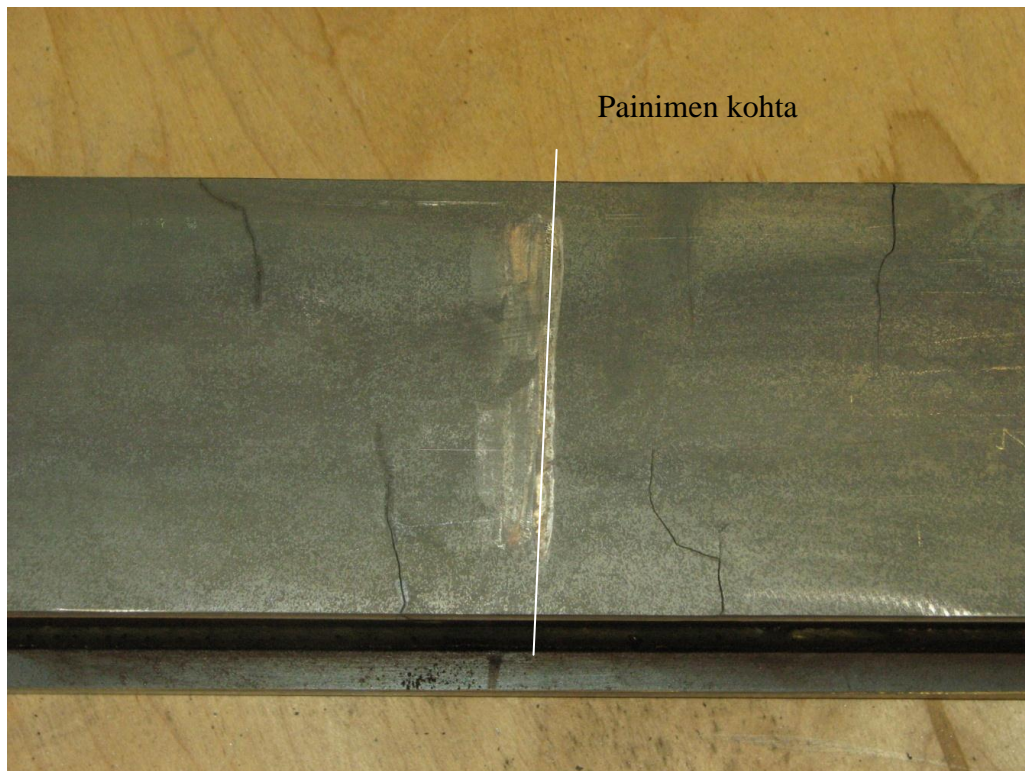
5.1 Koekappaleisiin syntyneet säröt

Liitteen 1 taulukossa on esitetty mihin kohtaan koekappaletta säröt syntyivät. Taulukossa merkintä L1 tarkoittaa liuskan 1 puolta ja L2 liuskan 2 puolta. Tässä luvussa esitellään koekappaleisiin syntyneet säröt ja niiden ydintymiskohdat. Kuvassa 13 nähdään koekappaleeseen FF1 alalaippaan syntynyt särö. Särö ydintyi kiinnityshitsin epäjatkuvuuskohdasta liuskan 1 puolelta ja rikkoi alalaipan. Särön ydintymiskohta oli alalaipassa painimen ulkopuolella.



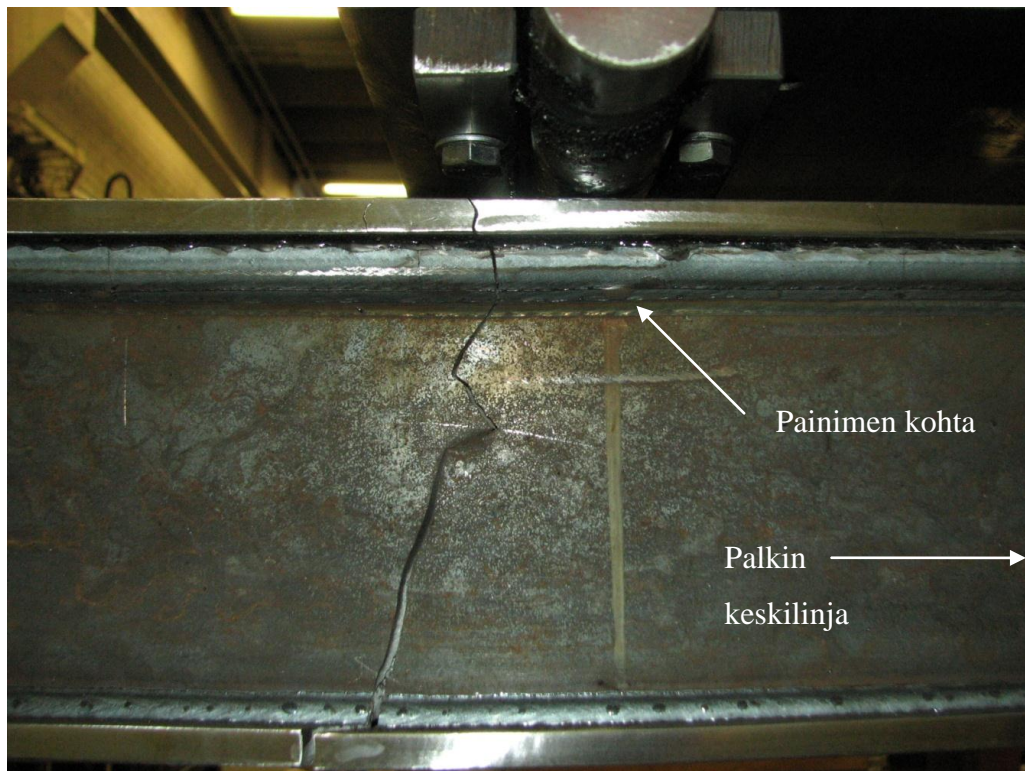
Kuva 13. Koekappaleeseen FF1 syntynyt särö

Koekappaleessa FF2 ylälaippaan syntyi useista säröjä painimien kohdalle, minkä vuoksi koe keskeytettiin. Alalaippaan ei ollut syntynyt yhtään säröä keskeytykseen mennessä. Kuvassa 14 on esitetty toisen painimen ympärille syntyneitä säröjä. Koekappaleissa FF1–FF3 kotelopalkin profiili oli symmetrinen, jolloin ylälaippaan syntyi momentista yhtä suuri taivutusjännitys kuin alalaippaan. Painimien takia ylälaippaan syntyy myös paikallinen y-akselin suuntainen jännitys, jonka vuoksi ylälaipan kiinnityshitsit hitsattiin läpi. Läpihitsattujen kiinnityshitsien huono juuren puolen laatu sai aikaan ylälaipan väsymisen. Tästä syystä kotelopalkin profiilia muutettiin. Uudessa profiilissa ylälaipan jännitys on pienempi, jolloin taivutusjännityksen ja painimilta tulevan paikallisen y-suuntaisen jännityksen yhteisvaikutus jää alalaipan jännitystä pienemmäksi eikä ylälaipan kiinnityshitsejä tarvitse hitsata läpi. Todellisessa rakenteessa ei yleensä ole vastaavanlaisia painimista syntyviä jännityksiä. Koekappaleen FF2 väsyminen ei johtunut silloituksen aiheuttamista epäjatkuvuuskohdista, koska tutkittavaa aluetta ei silloitettu

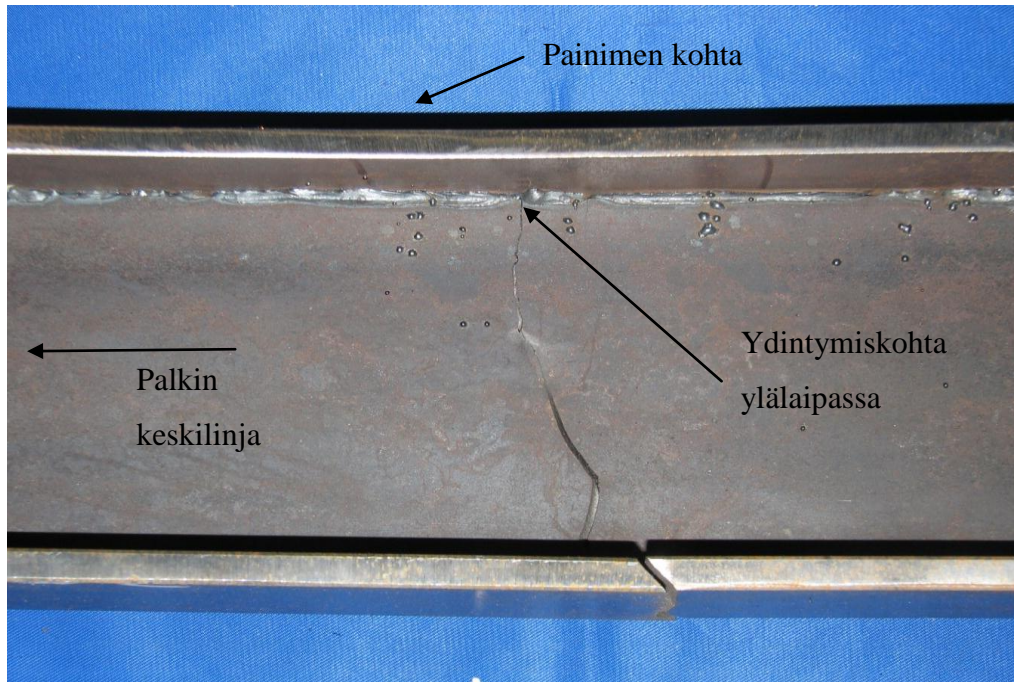


Kuva 14. Koekappaleeseen FF2 syntyneitä säröjä

Koekappaleeseen FF3 syntyi useita säröjä ylälaippaan painimien kohdalle ja palkin keskilinjalle. Ylälaippaan syntyneet säröt johtuivat läpihitsauksesta samoin kuin koekappaleessa FF2. Ylälaippaan syntyneiden säröjen lisäksi kotelopalkin alalaippa murtui. Kuvassa 15 on esitetty koekappaleen FF3 ylälaipasta alalaippaan kasvanut särö. Särö oli ydintynyt ylälaipan hitsin epäjatkuvuuskohdasta painimen ulkopuolelta, missä leikkausjännitys on suurimmillaan. Kuvasta 16 nähdään kotelopalkki sisäpuolelta. Kotelopalkki halkaistiin, jotta voitiin tutkia juuren puolen tasaisuus. Osa ylälaipan säröistä oli ydintynyt hitsin juuren puolen epäjatkuvuuskohdista. Koekappale oli silloitettu koko matkalta, jolloin myös tutkittavalla alueella oli silloituksesta syntyneitä epäjatkuvuuskohtia.

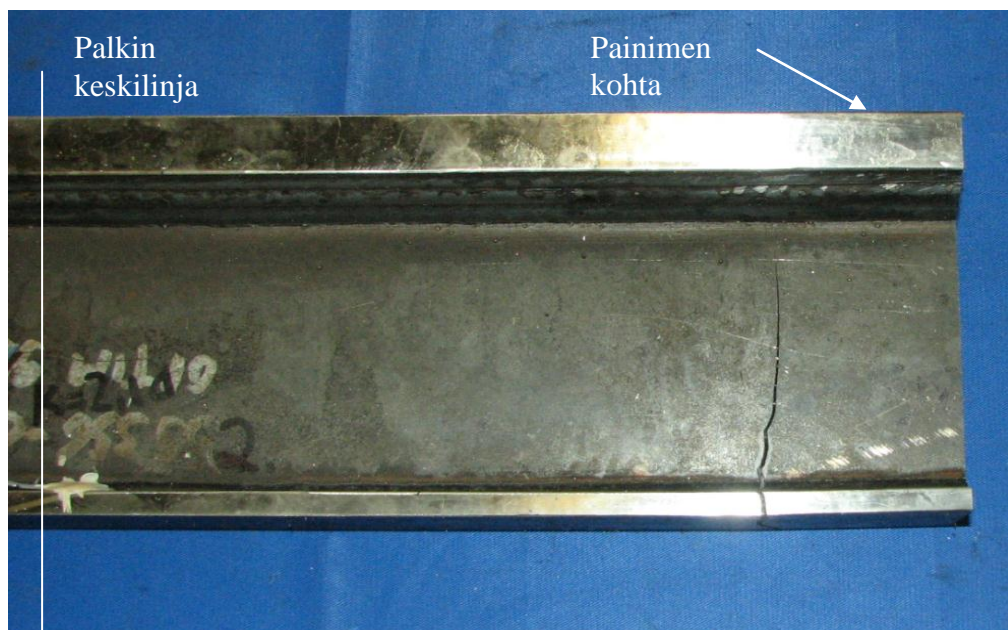


Kuva 15. Koekappaleeseen FF3 syntynyt särö



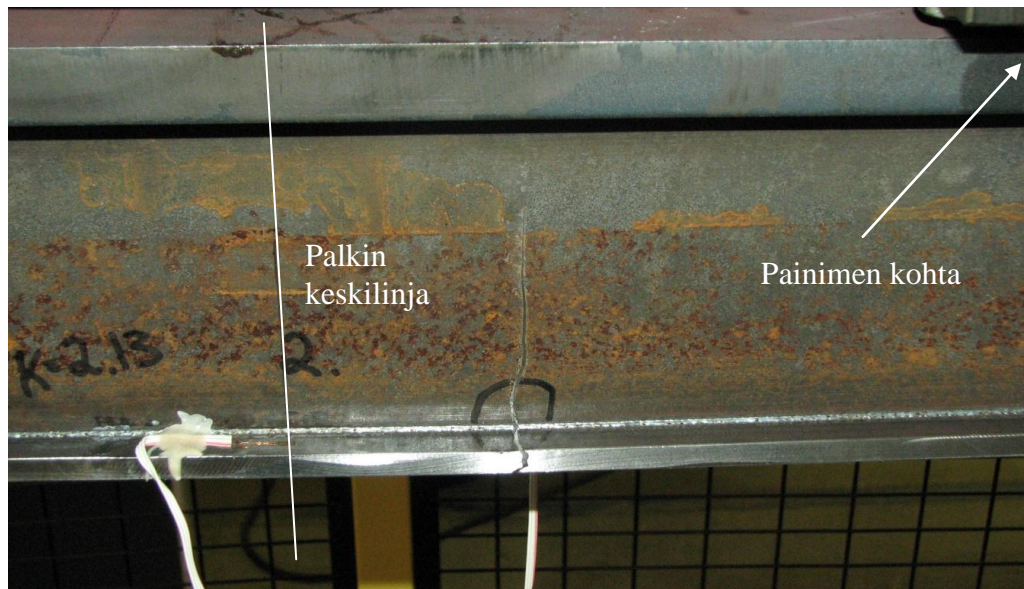
Kuva 16. Koekappaleeseen FF3 syntyneen särön ydintymiskohta palkin sisäpuolelta

Kuvassa 17 on esitetty koekappaleeseen FF4 syntynyt särö. Koekappaleessa FF4 on uusi profiilin muoto, jolloin ylälaippaan ei enää syntynyt säröjä. Alalaipan rikkonut särö lähti ydintymään alalaipasta liuskan 2 puolelta. Särön ydintymiskohta oli halutusti painimen ja palkin keskilinjan välissä.



Kuva 17. Koekappaleeseen FF4 syntynyt särö

Koekappaleen FF5 ala- ja ylälaippa hitsattiin laserilla. Kuvassa 18 on esitetty koekappaleeseen FF5 syntynyt särö. Särö ydintyi liuskan 2 puolelta alalaipasta. Ydintymiskohta oli palkin keskilinan ja painimen välissä. Alalaippaan syntynyt särö eteni uumaan ja laippaan. Ydintymiskohdan vastakkaisella puolelle särö ei jatkanut kasvamista uumaan, kuten tavallisesti, koska laipan ja uuman kiinnityshitsi oli jo murtunut palkin suuntaisesti. Kuvasta 19 nähdään laipan ja uuman välisen laserhitsin pituussuuntainen murtuminen. Laserhitsattujen kiinnityshitsien tunkeuma oli reilusti alle puolet levyn ainepaksuudesta, joka vaikutti laserhitsin pituussuuntaiseen väsymiseen. Väsytykskokeessa koekappaleen FF5 3 kiinnityshitsiä murtui palkin pituussuunnassa. Koekappaleeseen FF5 syntyi myös pieniä säröjä alalaippaan painimen alle.

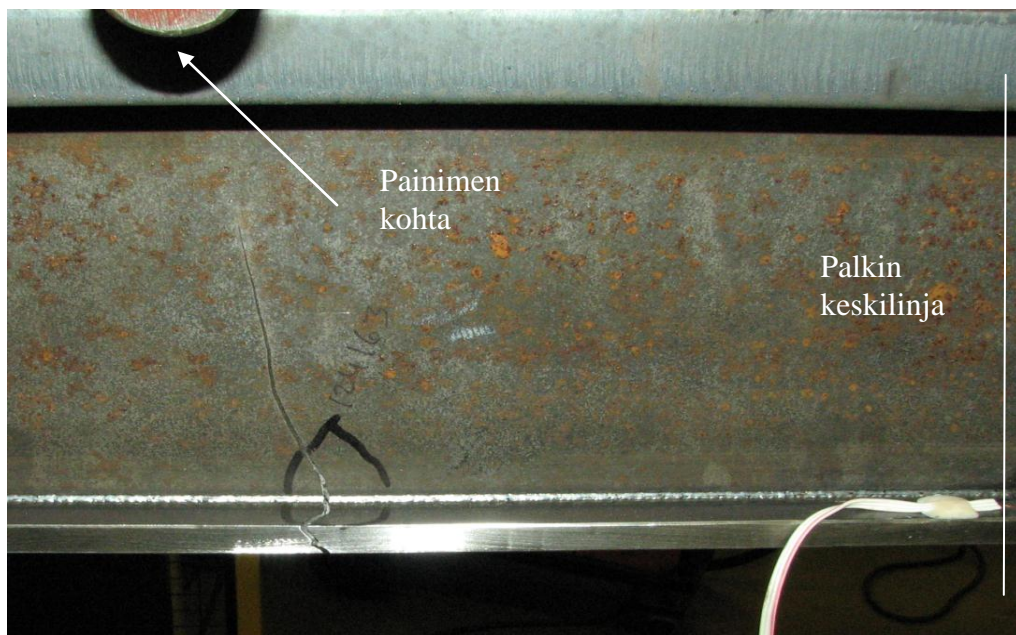


Kuva 18. Koekappaleeseen FF5 syntynyt särö



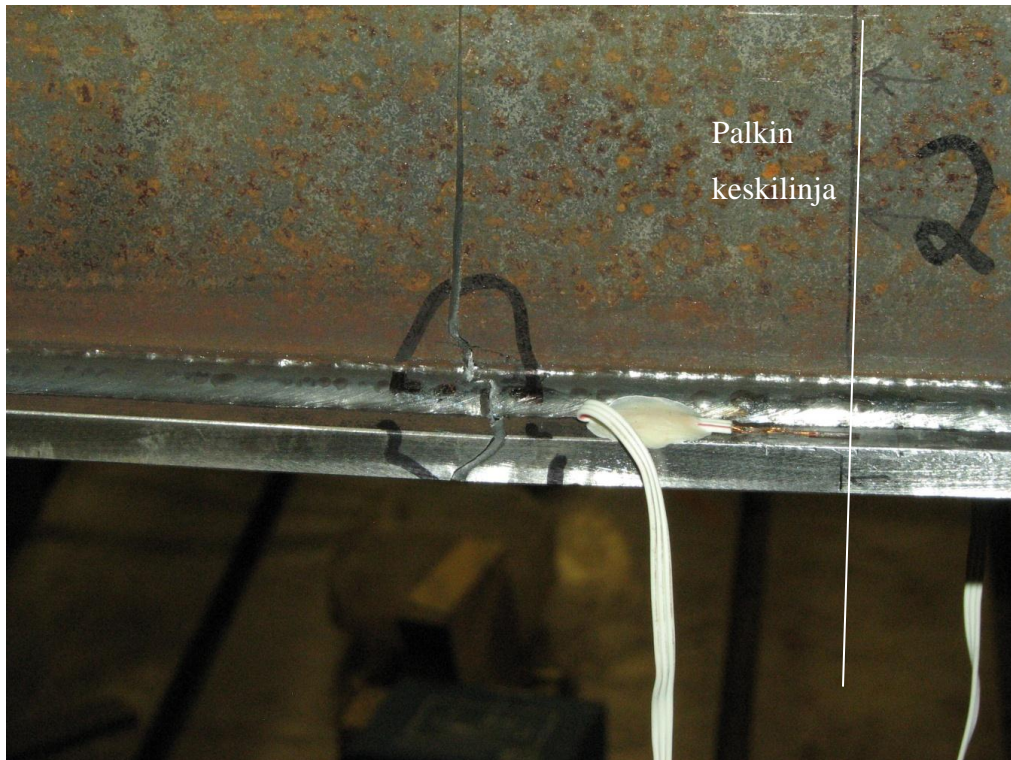
Kuva 19. Koekappaleeseen FF5 syntyneen särön eteneminen alalaipan läpi

Koekappaleessa FF6 särö syntyi liuskan 2 puolelle lähes painimen alle. Kuvasta 20 nähdään särön ydintymiskohta. Särö rikkoi alalaipan ja eteni samalla tavalla kuin koekappaleessa FF5. Laserhitsit murtuivat väsytykskoeksessa pituussuunnassa. Alalaippaan syntyi myös pienempiä säröjä tutkittavalle alueelle kummankin liuskan puolelle.



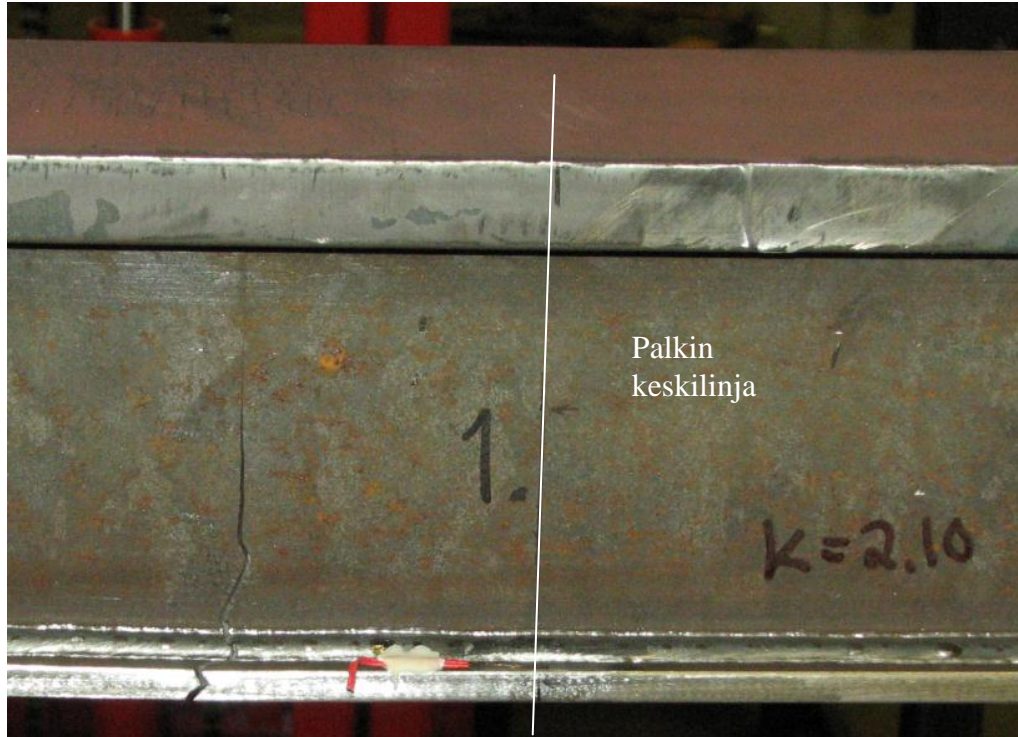
Kuva 20. Koekappaleeseen FF6 syntynyt särö

Koekappaleen FF7 ylälaippa hitsattiin laserilla ja alalaippa MAG:lla. Kuvasta 21 nähdään alalaipan rikkonut särö. Särö lähti ydintymään alalaipasta liuskan 2 puolelta. Särön ydintymiskohta on lähes palkin keskilinjalla liuskan 2 vieressä, jolloin väsytykskoeksessa venymäliuskoilta saaduista jännitysarvoista nähdään särön kasvun merkkejä. Liitteessä 2 esitettyssä koekappaleen FF7 jännityssuhdekuvaajasta havaitaan, että liuskan 1 puolella jännitys alkaa kasvaa samaan aikaan kun liuskan 2 jännitys pienenee. Tällöin voimavuo alkaa kiertää syntyvää säröä ja saa aikaan vuon tihentymisen särön vastakkaisella eli liuskan 1 puolella. Liitteestä 2 nähdään, että särö on luultavasti syntynyt 80 000 syklin kohdalla.



Kuva 21. Koekappaleeseen FF7 syntynyt särö

Kuvassa 22 on esitetty koekappaleeseen FF8 syntynyt särö. Särö lähti ydintymään liuskan 1 puolelta alalaipan keskilinjalta ja rikkoi alalaipan. Särö syntyi lähelle liuskaa, kuten koekappaleessa FF7. Koekappaleen FF8 jännityssuhdekuvaajista (liite 2) voidaan tutkia särön kasvua samoin, kuten koekappaleella FF7. Noin 130 000 syklin kohdalla liuskan 2 jännitys alkaa kasvaa, kun särö liuskan 1 puolella saa aikaan voimavuon tihentymisen. Liuskassa 1 jännitys pienenee vastaavasti voimavuon vaikutuksesta.



Kuva 22. Koekappaleeseen FF8 syntynyt särö

5.2 Makroskooppikuvat murtopinnasta

Koekappaleista FF5, FF7 ja FF8 tutkittiin tarkemmin syntyneitä murtopintoja makroskooppikuvien avulla. Näihin koekappaleisiin säröt syntyivät lähelle palkin keskilinjaa ja liuskoja. Koekappaleet FF7 ja FF8 oli MAG-hitsattu ja FF5 laserhitsattu. MAG-prosessilla hitsattujen koekappaleiden FF7 ja FF8 särön ydintymiskohtaa tutkittiin tarkemmin, koska väsytykskoessa koekappaleet saivat huonoimmat tulokset. Silmämääräisesti koekappaleiden FF7 ja FF8 kiinnityshitsien rajaviivat näyttivät kuitenkin tasaisilta. Laserhitsatun koekappaleen FF5 väsytykskokeen tulos oli kohtuullisen hyvä, mutta kiinnityshitsin laatu näytti silmämääräisesti huonolta. Alalaipan laserhitsi oli suomuinen koko palkin matkalta. Tutkittavista koekappaleista haluttiin varmistaa, olivatko säröt ydintyneet rajaviivan vai juuren puolelta.

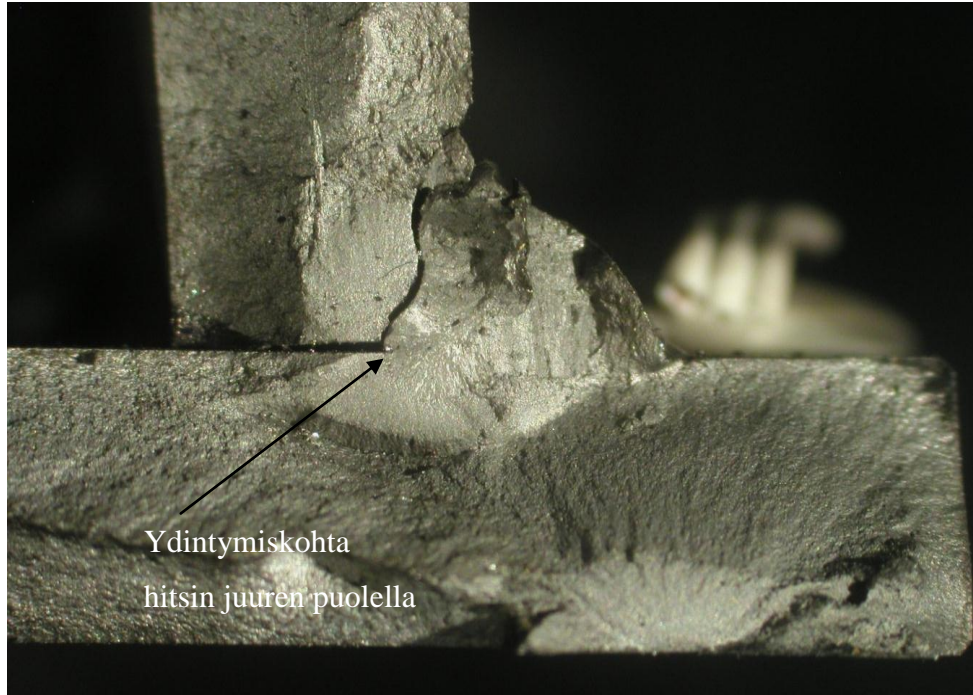
Tutkittavista koekappaleista irrotettiin noin 10 cm palat särön kummaltakin puolelta. Tällöin koekappaleista saatiin näkyville alalaipan katkaisseen särön murtopinnat. Samoista paloista tutkittiin myös hitsin juuren puolen muotoja, jonka vuoksi hitsit murrettiin hauraasti. Kuvassa 23 on esitetty koekappaleen FF5 murtopinta. Makroskooppikuvasta

nähdään särön kasvun elliptinen muoto. Särö on lähtenyt ydintymään hitsin rajaviivalta, joka näkyy kuvasta syvennyksenä. Koekappaleen FF5 laserhitsatun kiinnityshitsin pinnanlaatu oli suomuinen ja huono. Suomuisuudesta johtuvat epäjatkuvuuskohdat saivat aikaan hitsin väsymisen. Murtopintaa irrotettaessa ilmeni, että laserhitsit olivat väsyneet myös pitkittäissuunnassa. Pitkittäissuuntainen väsyminen oli tapahtunut ennen särön kasvua alalaipassa, koska alalaippaan syntynyt särö ei ollut edennyt ydintymiskohdan vastakkaisella puolella uumaan. Kuvasta 23 nähdään myös, kuinka pieni tunkeuma laserhitseissä oli.



Kuva 23. Makroskooppikuva koekappaleen FF5 murtopinnasta

Kuvissa 24 ja 25 on esitetty koekappaleiden FF7 ja FF8 murtopinnat. Laipan ja uuman välinen kiinnitysliitos on haurasmurrettu ennen makroskooppikuvien ottamista. Molemmista murtopinnoista nähdään, että särö on ydintynyt hitsin juuren puolelta. Kuvasta 25 näkyy selvemmin särön kasvun elliptinen muoto. Silmämääräisellä tarkastuksella juuren puoli oli kummassakin koekappaleessa melko tasainen pitkittäissuunnassa. Särön ydintymiskohdissa ei myöskään näkynyt silmämääräisessä tarkasteluissa suuria epäjatkuvuuskohtia, joilla voisi selittää koekappaleiden FF7 ja FF8 huonoa väsymiskestävyyttä.



Kuva 24. Makroskooppikuva koekappaleen FF7 murtopinnasta



Kuva 25. Makroskooppikuva koekappaleen FF8 murtopinnasta

6 KOTELOPALKKIN JÄNNITYKSET

Kotelopalkkiin syntyy nelipistetäivutuksessa leikkausjännitystä ja taivutusjännitystä. Taivutusjännitys muuttuu lineaarisesti kotelopalkin korkeussuunnassa. Profiilin neutraaliakselilla taivutusjännitys on nolla ja ulkoreunoilla maksimissa. Kaavasta 5 saadaan laskettua kotelopalkkiin kohdistuvat taivutusjännitykset.

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I_x} = \frac{M}{W} \quad (5)$$

Kaavassa M on maksimimomentti (Nmm), c tutkittavan pisteen etäisyys painopisteestä (mm), I_x taivutusjäyhyys x-akselin suhteen (mm^4) ja W taivutusvastus (mm^3). Taivutusvastus $W = I_x/c$. Koekappaleissa FF1–FF3 taivutusjännitys on yhtä suuri palkin ylä- ja alapinnalla, koska neutraaliakseli on symmetrisen palkin keskellä. Koekappaleissa FF4–FF8 neutraaliakseli on korkeammalla, jolloin jännitys alalaipassa on itseisarvoltaan suurempi. Liitteessä 5 on laskettu koekappaleisiin FF4–FF8 syntyvä taivutusjännitys, kun sylinterivoiman vaihtelu ΔF on 210 kN. Sylinterivoima vaihteli kaikissa väsytykskoikeissa, joten laskenta on tehty keskimääräisellä voiman arvolla. Taivutusjännitysvaihtelu ylälaipassa on tällöin 287 MPa ja alalaipassa 462 MPa. Venymäliuskan kohdalla laskettu jännitysvaihtelu on 417 MPa.

Myös leikkausjännityksiin vaikuttaa painopisteen sijainti. Nelipistetäivutuksessa painimien välille syntyy tasainen momentti, jolloin leikkausjännitys on nolla. Painimien ulkopuolella leikkausjännitys on vakio. Teoriassa leikkausjännitys muuttuu painimien kohdalla maksimiarvosta nollaan. Käytännössä näin ei kuitenkaan käy. Kotelopalkin poikkileikkauksessa leikkausjännitys on suurimmillaan profiilin painopisteessä. Profiilin ylä- ja alapinnalla leikkausjännitys on nolla. Uuman ja laipan liitoksessa leikkausjännitykseen syntyy hyppäys, kun materiaaliipaksuus muuttuu. Kotelopalkkiin syntyvät leikkausjännitykset voidaan laskea kaavalla

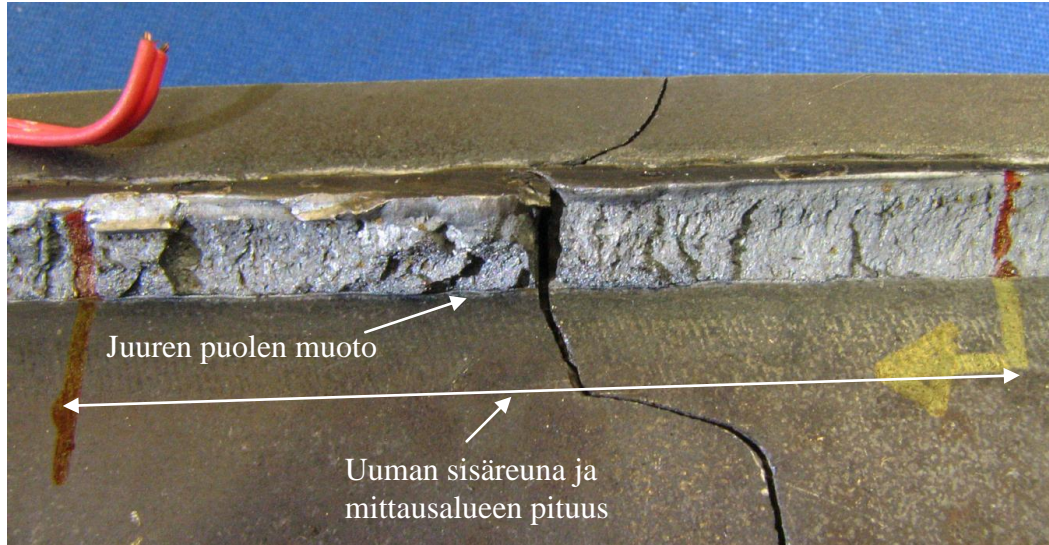
$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I_x \cdot t}, \quad (6)$$

jossa τ on leikkausjännitys (MPa), S staattinen momentti (mm^3), Q leikkausvoima (N), I_x taivutusjäyhyys x -akselin suhteen (mm^4) ja t tutkittavan kohdan paksuus (mm). Jos leikkausjännitystä lasketaan hitsissä, $t = 2a$. Kiinnityshitseihin syntyvät leikkausjännitykset ovat primäärisiä jännityksiä. Liitteessä 5 on laskettu 4 mm:n a -mitalla hitseihin syntyvä leikkausjännitys. Leikkausjännitys on tällöin 37 MPa. Laserhitseissä leikkausjännitys on suurempi, koska laserhitsin a -mitta oli pienempi. Kaavalla 6 laskettua leikkausjännitystä voidaan käyttää myös hitsin a -mitan määrittämisessä, kuten kaavassa 1 on osoitettu.

7 HITSIN RAJAVIIVAN FE-ANALYYSI

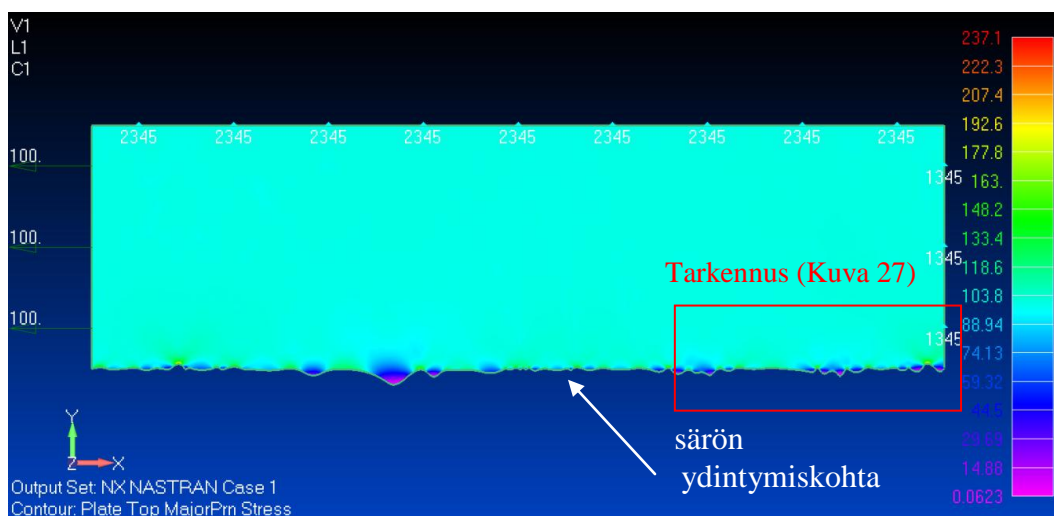
Hitsin epätasaisuuden, vajaankeuman, aloitus- ja lopetuskohtien sekä siltahitsien takia hitsiin syntyy lovia. Lovien pohjalle syntyy jännityshuippuja, jotka saavat väsyttävän kuormituksen seurauksena aikaan särön ydintymisen. Hitsin rajaviivan ja juurenpuolen muoto vaikuttavat syntyvien jännityshuippujen suuruuteen. FE-analyysin avulla hitsin rajaviiva voidaan mallintaa ja sen perusteella määrittää lovenmuotoluku K_t (theoretical stress concentration factor) hitsin epäjatkuvuuskohdille. Lovenmuotoluku ilmoittaa loven kärkeen syntyvän jännityshuipun ja nimellisjännityksen suhteen.

Lovenmuotolukua tutkittiin koekappaleesta FF8, jossa koekappaleen murtanut särö lähti ydintymään hitsin juuren puolelta (kuva 25). Hitsin juuren puolen muodon tallentamiseksi koekappaleesta irrotettiin noin 10 cm pituinen pala liitosalueelta särön kummaltakin puolelta. Irrotettu pala murrettiin hauraasti hitsin pituussuunnassa, jäädyttämällä se noin -40-asteiseksi ja taivuttamalla sitä. Näin hitsin juuren puoli saatiin näkyviin vahingoittamatta itse rajaviivaa. Juuren puolen geometria tallennettiin lasermittauslaitteella. Kuvassa 26 on esitetty koekappale FF8 juuren puolen rajaviiva. Kuvasta nähdään mittausalueen pituus. Lasermittauspäättä liikutettiin rajaviivaa pitkin, jolloin rajaviivan korkeuserot saatiin tallennettua. Lasermittauksessa saadun mittausdatan avulla tehtiin 2D FEM -malli.



Kuva 26. Koekappaleen FF8 juuren puolen rajaviiva

Rajaviivan mallinnus tehtiin Femap/NxNastran-ohjelmalla. Hitsin juuren puolen rajaviiva mitattiin noin 50 mm matkalta. Silmämääräisesti tarkasteltuna rajaviiva oli tasainen, eikä suuria epäjatkuvuuskohtia ollut. Lopullinen FEM-malli tehtiin vain 17,5 mm:n alueelta. Mielenkiintoinen alue oli särön ydintymiskohtan ympärillä. FE-analyysin avulla voitiin varmistaa oliko särö lähtenyt ydintymään suurimman jännityshuipun kohdalta. Kuvassa 27 on esitetty 2D-malli rajaviivasta. Kuvaan on merkitty koekappaleen murtumiseen johtaneen särön ydintymiskohta. Ydintymiskohtan geometriaa oli vaikea tarkkaan määrittää syntyneen särön vuoksi.

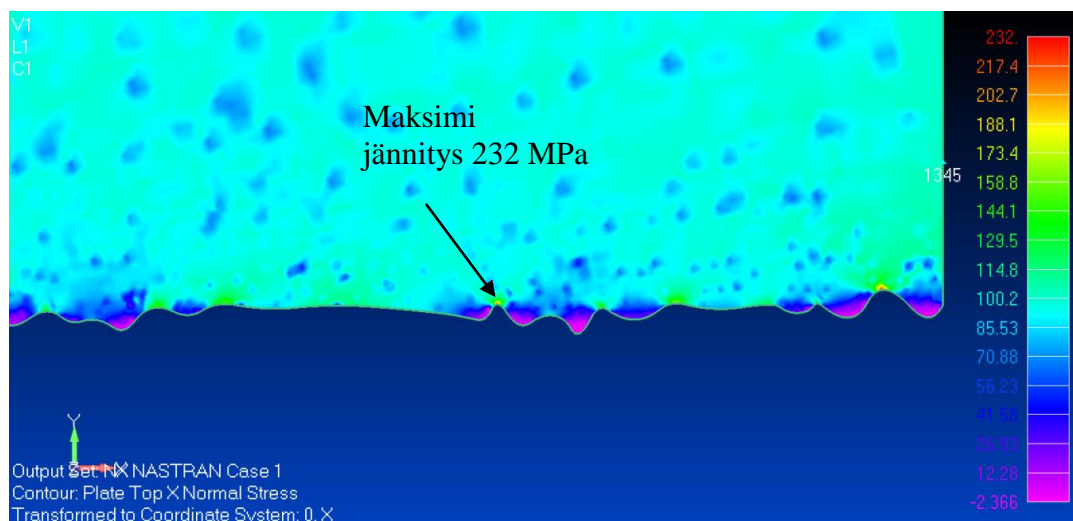


Kuva 27. Koekappaleen FF8 juuren puolen muoto

Kuvassa 28 on esitetty tarkennus FEM-mallista. Kuormitukseksi asetettiin 100 MPa, joka kuvaa nimellisjännitystä. Kuvassa 28 esitetyt jännitykset ovat ulkoisen voiman eli x-akselin suuntaisia. Tällöin lovien pohjalle syntyvistä jännityshuipuista saadaan suoraan lovenmuotoluku jakamalla jännitysarvo 100:lla. Maksimijännitys mallissa on 232 MPa eli silloin kyseisen loven lovenmuotoluvuksi K_t saadaan 2,3 (kuva 28). Suurin jännitys FEM-mallissa ei syntynyt syvimmän loven pohjalle.

Kuvasta 27 nähdään, että särön ydintymiskohdalla jännitys on maksimijännitystä pienempi. Tämän FEM-mallin perusteella särö ei lähde ydintymään maksimijännityksen kohdasta, jos hitsin rajaviiva on suhteellisen tasainen. Toisaalta särön ydintymiskohdan geometriasta ei voida olla täysin varmoja. Tällainen FEM-malli tulisi tehdä ennen koekappaleen väsyttämistä, jolloin jokaisen loven pohjan jännityshuippu tiedettäisiin. Juuren puolen geometrian mittaaminen ehjästä kappaleesta on kuitenkin lähes mahdotonta.

Rajaviivasta tehty 2D-malli on karkea pelkistys. FEM-malli ei kuvasta todellista tilannetta, mutta sen avulla saadaan mielikuva hitsin rajaviivan käyttäytymisestä. Pienen ilma-aoon vuoksi rajaviivan epäjatkuvuuskohtiin syntyvät jännityskeskittymät ovat todellisuudessa väsymisteholtaan näin määritettyjä K_t -lukuja pienempiä (Björk 2011b).



Kuva 28. Tarkennus FEM-mallista

8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kiinnityshitsien väsymiskestävyys $FAT_{50\%}$ oli kaikilla koekappaleilla standardien lupaamaa väsymiskestävyyttä parempi. Kertoimella $m = 3$ $FAT_{50\%}$ -arvoiksi saatiin 134–204 ja kertoimella $m = 5$ 204–267. Karakteristinen arvo FAT_{kar} oli kertoimella $m = 3$ 98–150 ja kertoimella $m = 5$ 150–196. Tuloksista nähdään, että väsytykskoikeissa hajonta oli merkittävä. Väsytykskoikeiden tulokset eivät anna perusteita väsymiskestävyysluokan kasvattamiselle pienen koekappalemäärän vuoksi. Väsytykskoikeita tulisi suorittaa enemmän, jotta voitaisiin varmistua, käyttäytykö kiinnityshitsin S-N-käyrä kulmakertoimen 1/3 vai 1/5 mukaan. Kertoimella $m = 5$ saadut karakteristiset arvot antoivat nykyistä standardia parempia FAT-arvoja.

Yhdeltä puolelta hitsattujen kiinnityshitsien väsymiskestävyyttä voidaan parantaa paremmalla hitsin tunkeuman ja rajaviivan hallinnalla. Läpi hitsattujen koekappaleiden väsytykskoikeissa saatiin väsymiskestävyydeltä huonoimmat tulokset, joten läpihitsausta ei voida, tämän tutkimuksen perusteella, suositella yhdeltä puolelta hitsattaessa. Läpi hitsatun kiinnityshitsin juuren puolen on ilman juuritukea hitsattaessa epätasainen, joka huonontaa väsymiskestävyyttä. Hitsin rajaviivojen, juuren puolen, suomaisuuden, silloitushitsien sekä aloitus- ja lopetuskohtien synnyttämät epäjatkuvuuskohdat ovat kriittisimpiä tekijöitä yhdeltä puolelta hitsatuille kiinnityshitseille. Molemmilta puolilta hitsattaessa juuren puoli ei ole kriittinen, jos tunkeuma on läpi. Yhdeltä puolelta hitsattu kiinnityshitsi on väsymiskestävyuden kannalta parempi hitsata vajaalla tunkeumalla. Tällöin juuren puolen rajaviivasta saadaan tasaisempi. Kiinnityshitsien hitsin rajaviivan ja juuren puolen laatu ovat merkittävimmät väsymiskestävyuden parantamiskeinot.

FEM-mallin mukaan hitsin rajaviivalla suurin jännityskeskittymä ei synny suurimman epäjatkuvuuskohdan loven pohjalle. Suurin jännityskeskittymä syntyy loveen, jossa pohjan pyörityssäde on pieni. Särö ei myöskään, analyysin perusteella, synny silmämääräisesti tasaisen hitsin rajaviivan suurimman jännityshuipun kohdalle. FE-analyysillä suurimmaksi lovenmuotoluvuksi saatiin 2,3. Särön ydintymiskohdalla lovenmuotoluku oli 1,6.

Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratorio jatkaa kiinnityshitsien väsymiskestävyuden parantamisen tutkimista. Jatkossa tutkimukset kohdistuvat molemmilta puolilta hitsatun I-palkin väsymiskestävyuden tarkasteluun. Tällöin juuren puolen väsyminen ei ole ongelma.

LÄHTEET

Björk, T. 2011a. Luentomoniste, Teräsrakenteet II. Lappeenranta: LUT Digipaino

Björk, T. 2011b. Henkilökohtainen tiedonanto. Professori. Teräsrakenteet. Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Hobbacher, A. 2007. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document. XII-2151/XV-1254-07

Hobbacher, A. 2003. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document. XII-1965-03/XV-1127-03. 73 s.

Maddox, S. J. 1991. Fatigue strength of welded structures. Cambridge: Abington Publishing. 198 s.

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu, Tekninen tiedote 2/2003, Kerava: Teknologia teollisuus. 136 s.

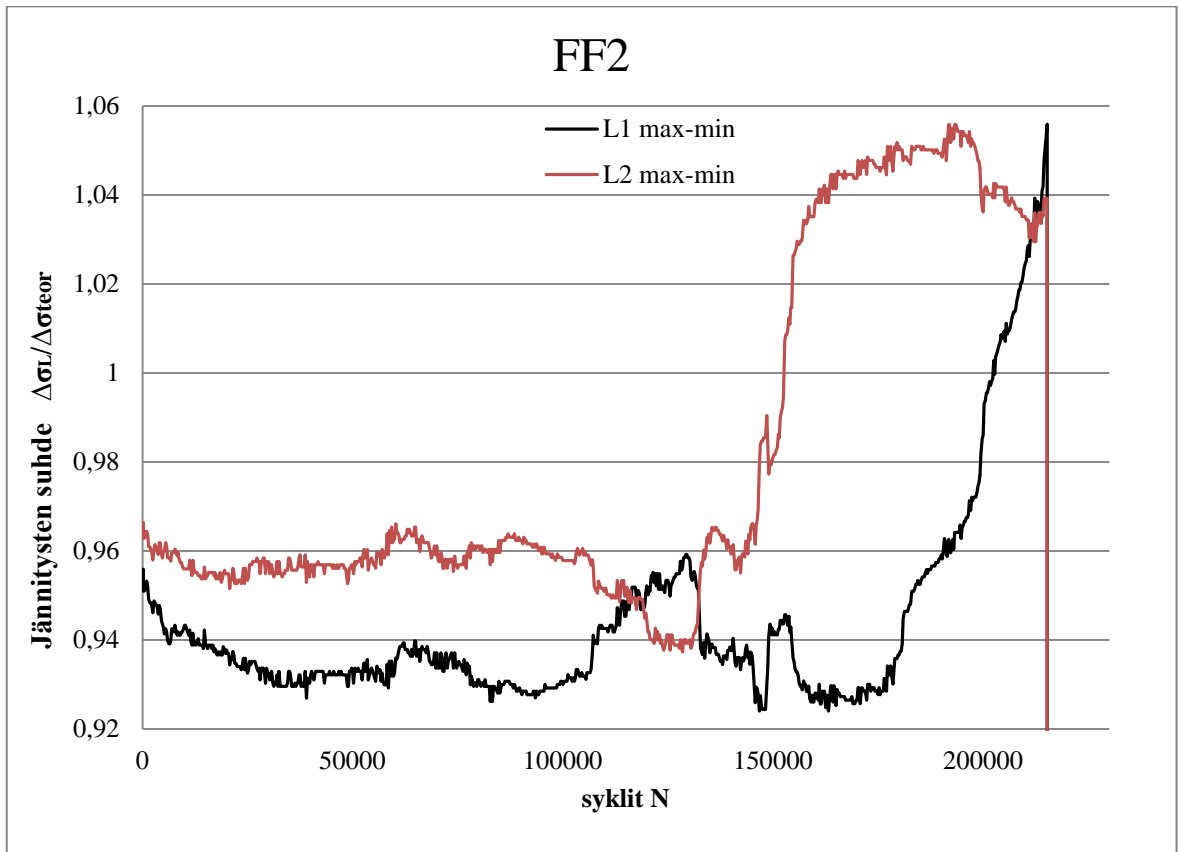
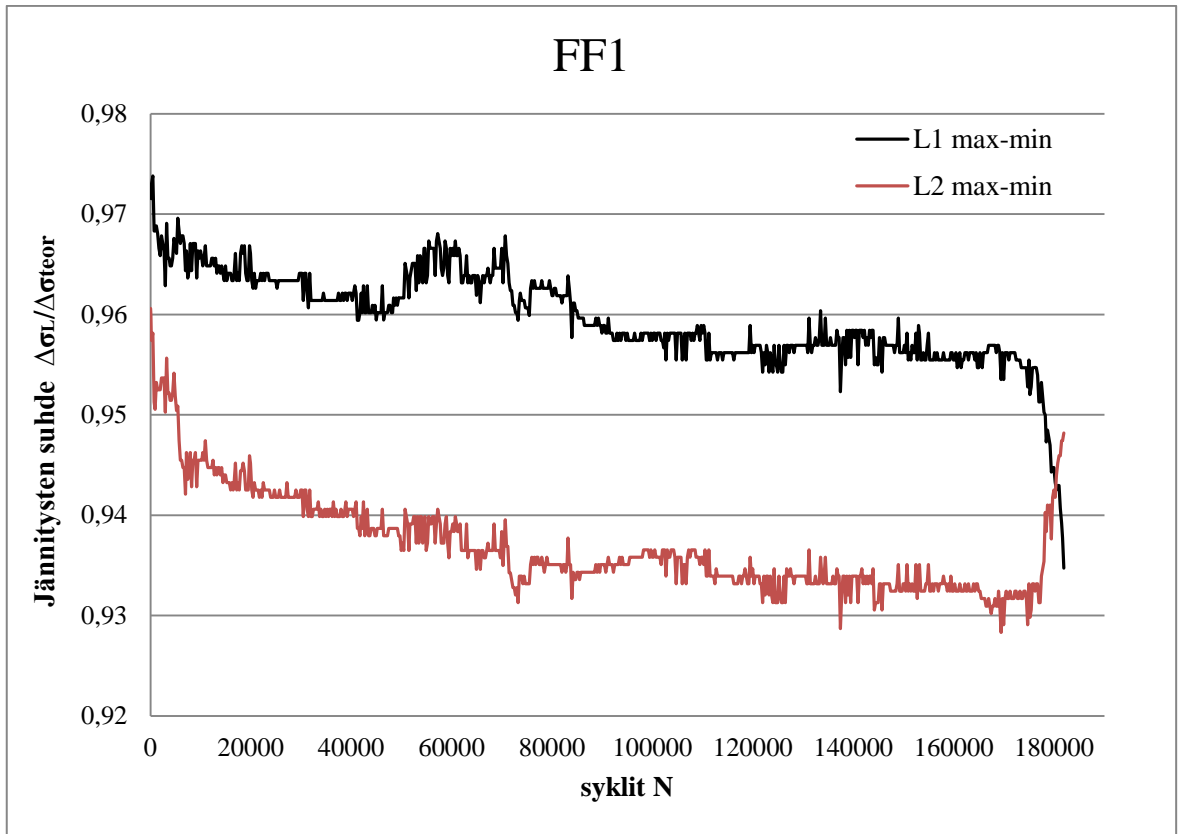
Niemi, E. Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet, Helsinki: Painatuskeskus Oy. 337 s.

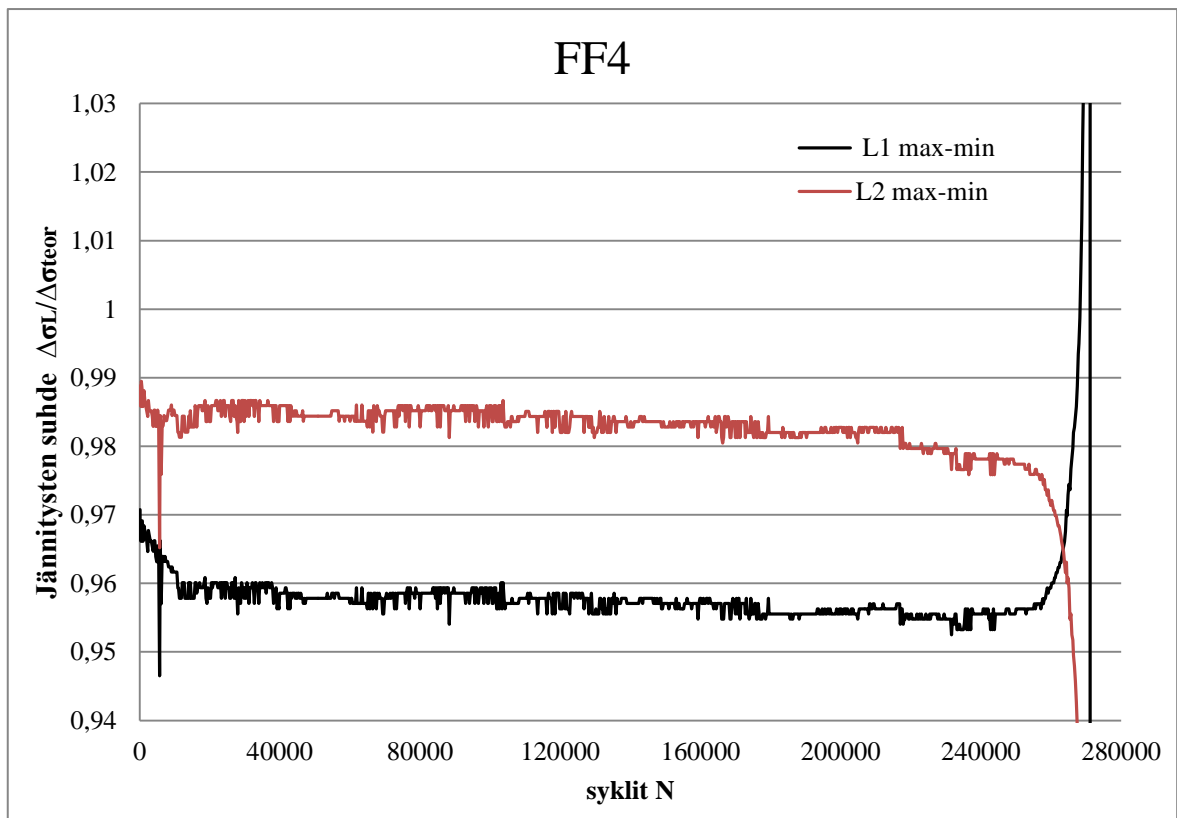
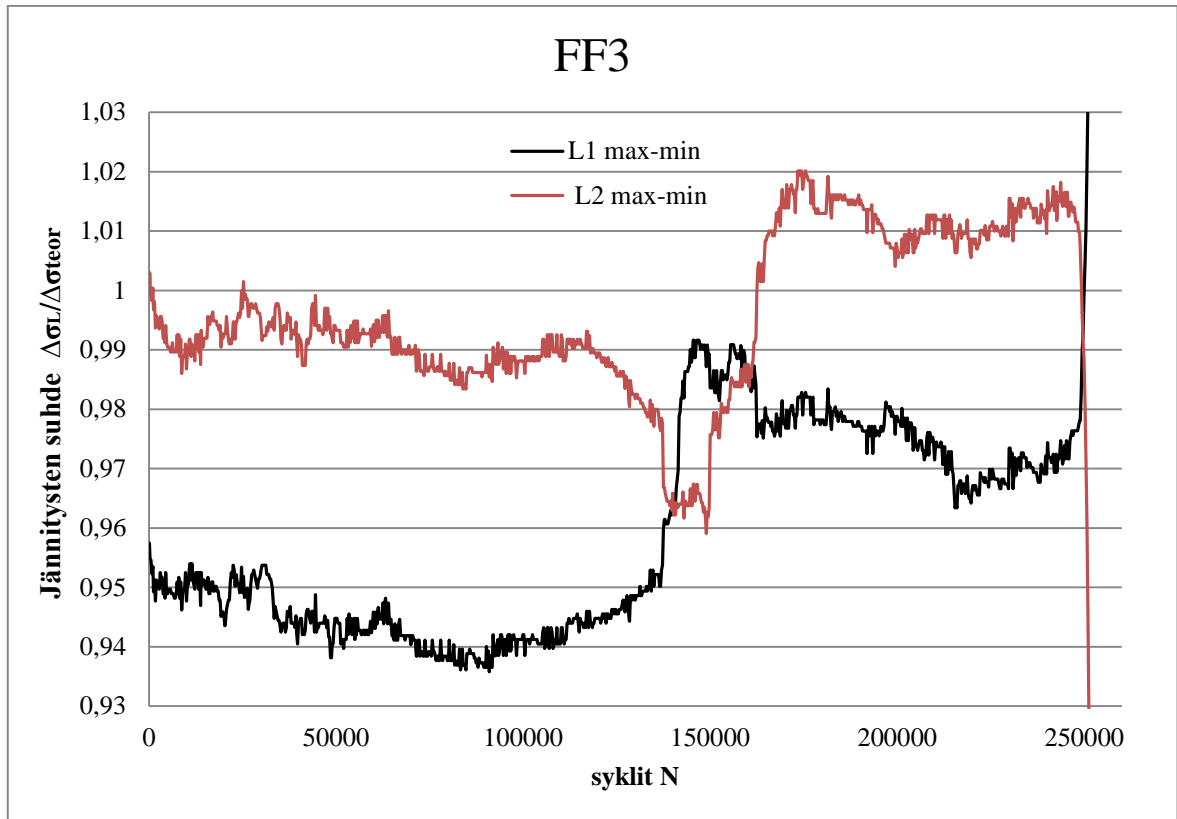
Nykänen, T. Björk, T. Laitinen, R. Fatigue strength prediction of ultra high-strength steel butt welded joints. 10 s.

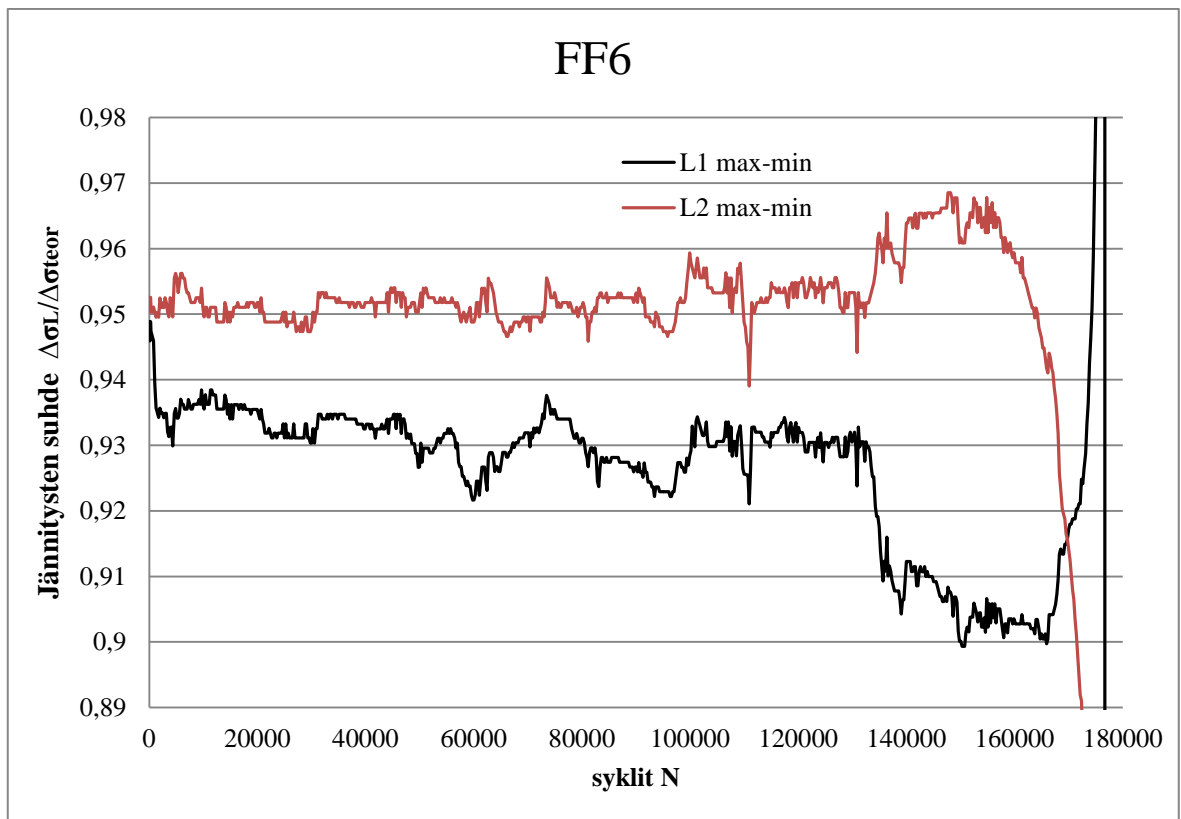
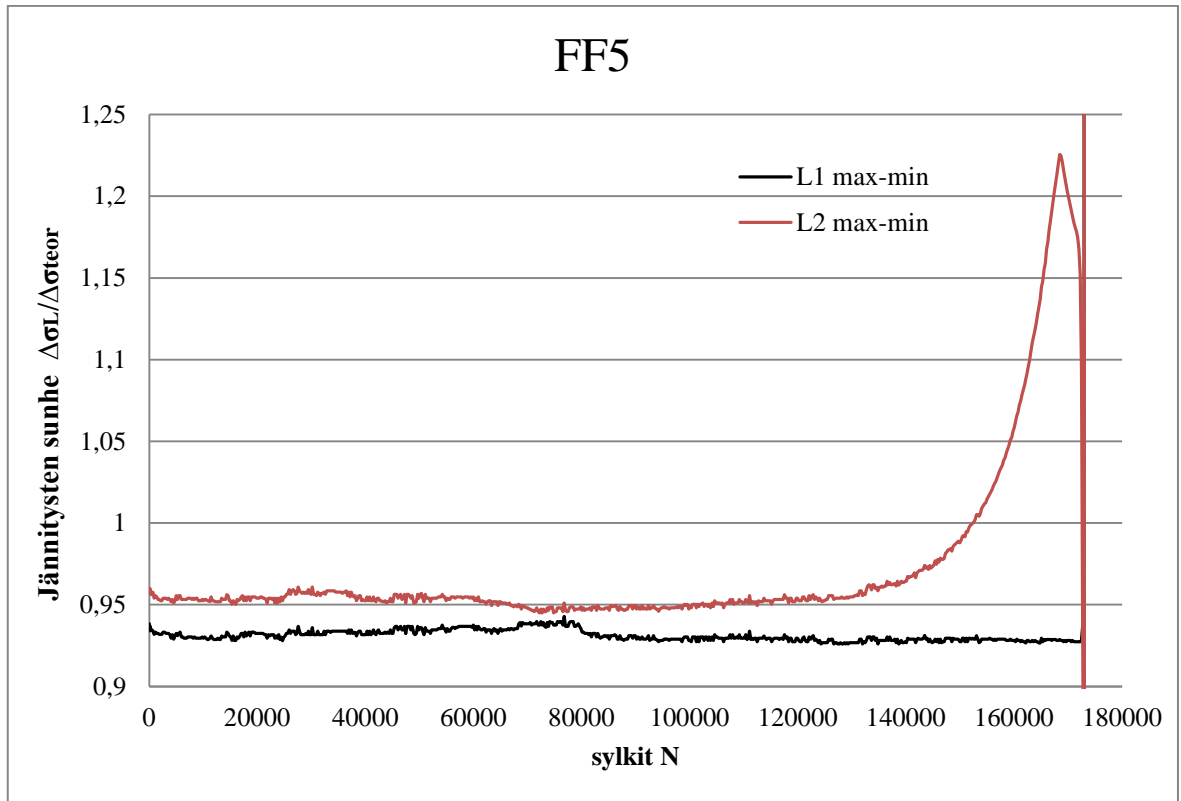
Rautaruukki Oyj. Optim QC rakenneteräkset [viitattu 7.12.2011]. Saatavissa:
<<http://www.ruukki.fi/Tuotteet-ja-ratkaisut/Terastuotteet/Kuumavalssatut-terakset/Rakenneterakset/Optim-QC/#tab3>>

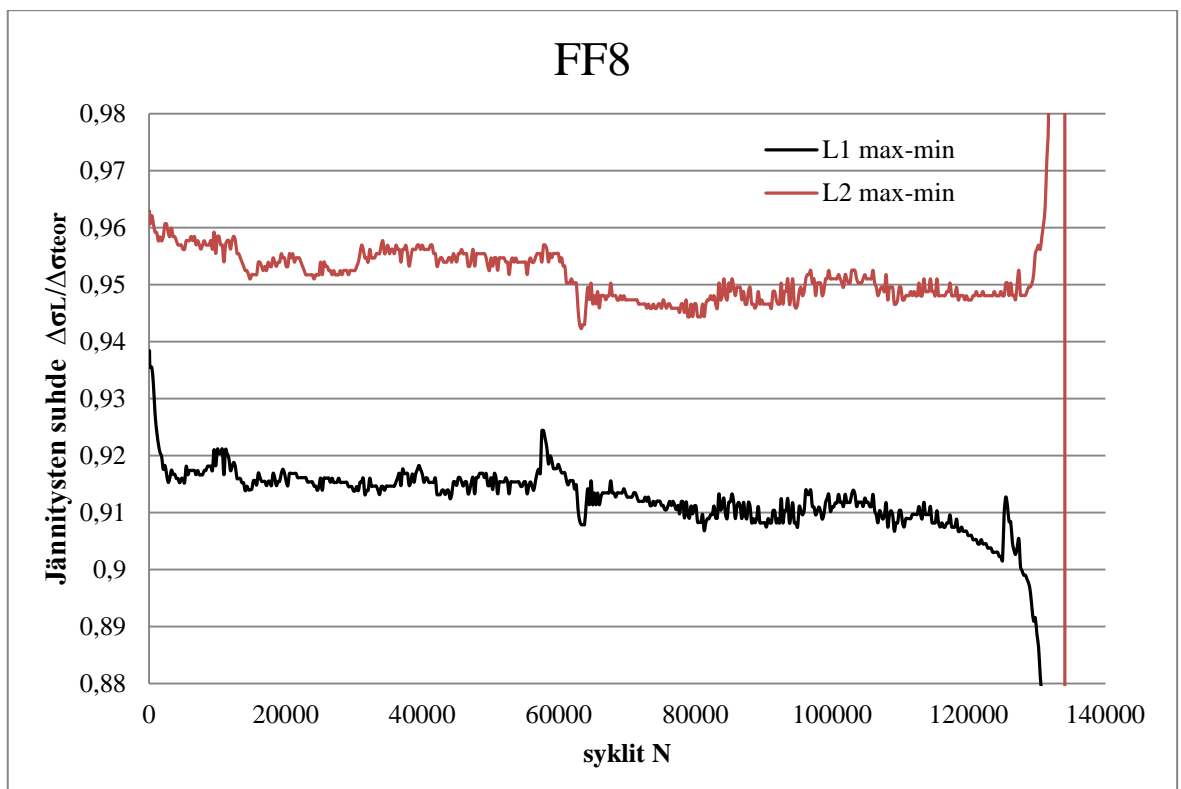
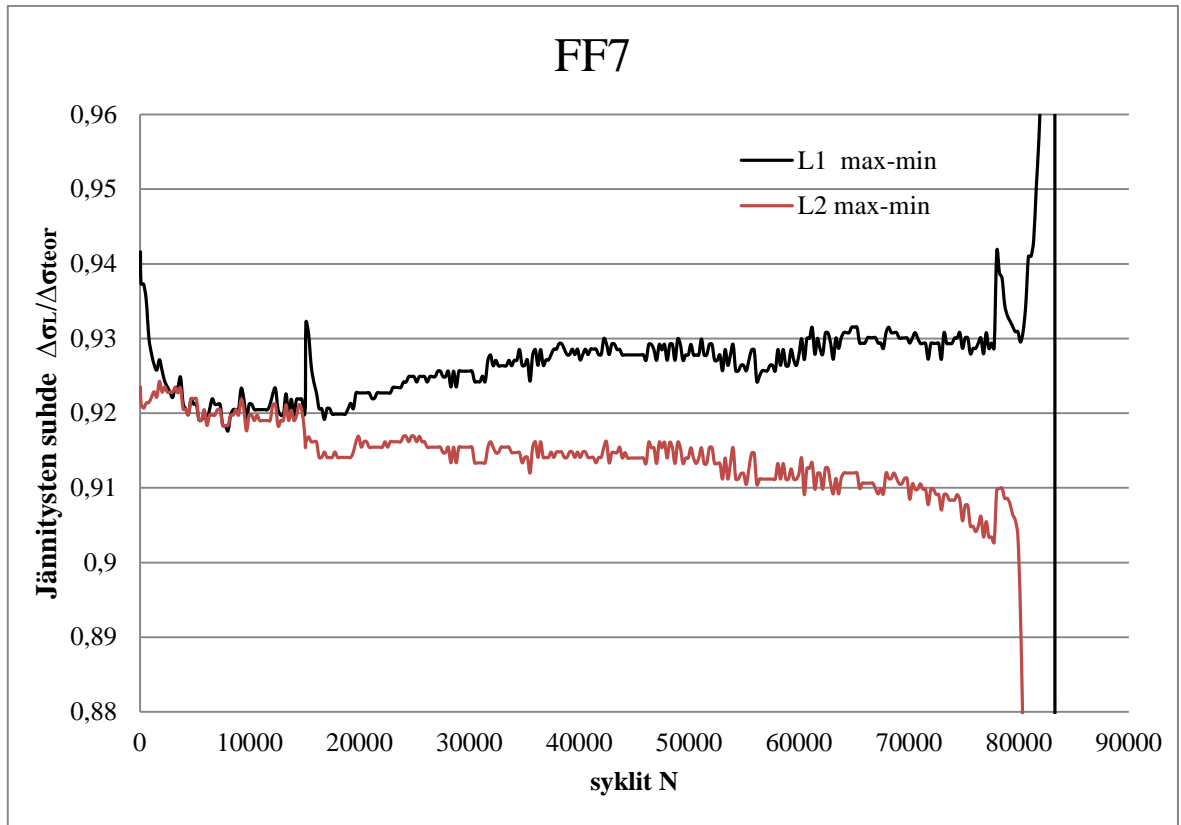
SFS-ENV 1993-1-1. 1993 Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1 – 1: Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 324 s.

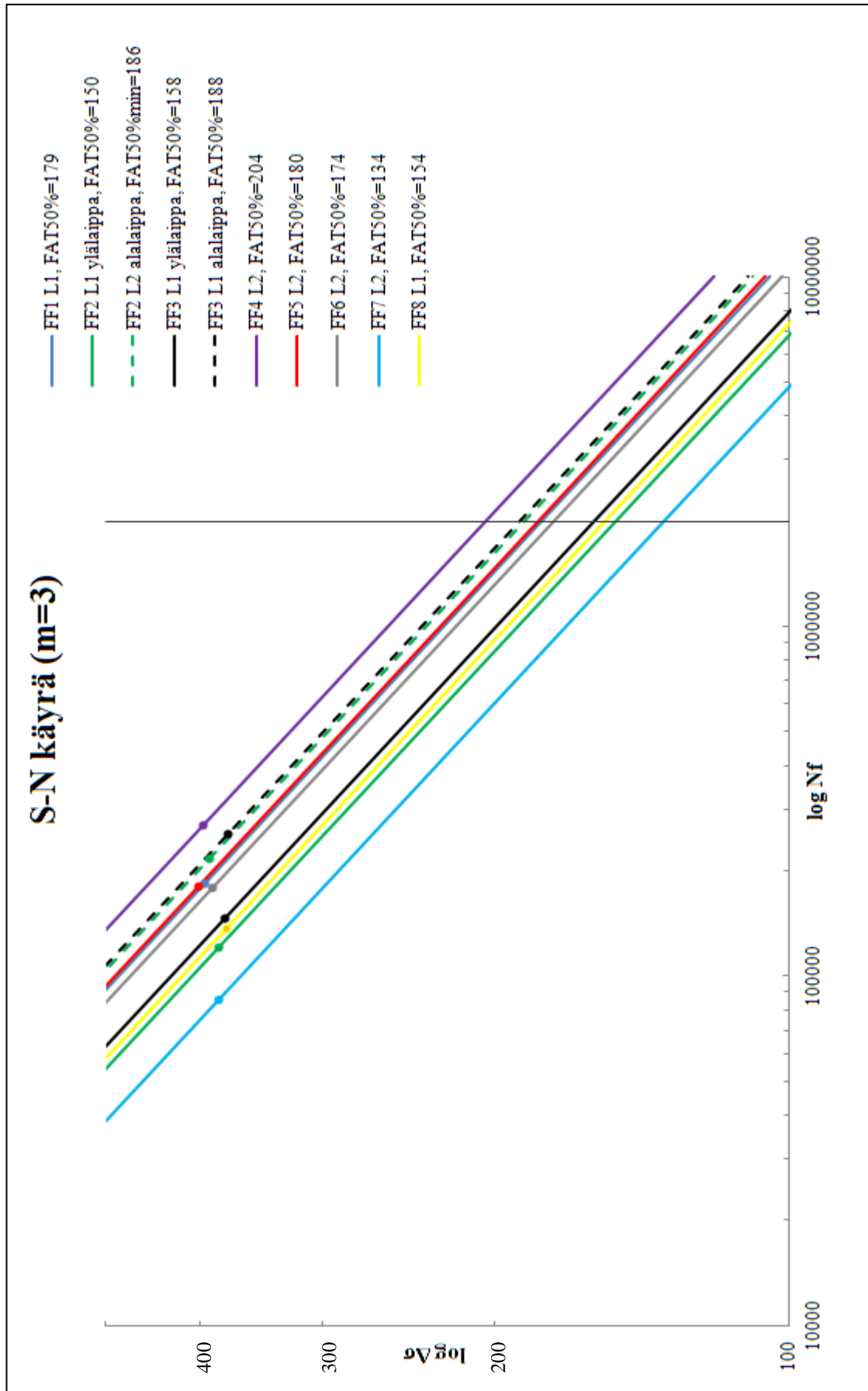
ID	Syklit N	$\Delta\sigma$ (MPa)	FAT _{50%}		FAT _{kar}		Huomioita
			m=3	m=5	m=3	m=5	
FF1	181822	397	179	246	131	181	Alalaippa rikki vakiomomentti alueen ulkopuolelta, särö ydintynyt alalaipassa L1 puolelta
FF2	120000	384	150	218	110	161	Ylälaipan FAT - useita säröjä ylälaipassa painmien kohdalla
	215252	392	186	251	137	184	Alalaipan minimi FAT - koe keskeytetty, alalaipassa ei säröjä
FF3	145565	378	158	224	116	165	Ylälaipan FAT - useita säröjä ylälaipassa painmien kohdalla ja palkin keskellä
	251952	375	188	248	138	182	Alalaipan FAT - alalaippa rikki painimen kohdalta
FF4	268889	398	204	267	150	196	Alalaippa rikki, särö ydintynyt L2 puolelta painimen alta
FF5	179953	403	180	249	133	183	Alalaippa rikki, särö ydintynyt L2 puolelta palkin keskeltä, säröjä myös alalaipassa painimen alla
FF6	176689	390	174	240	128	176	Alalaippa rikki, särö ydintynyt L2 puolelta painimen alta, alalaipassa molemmilla puolilla pieniä säröjä
FF7	84495	384	134	204	98	150	Alalaippa rikki, särö ydintynyt L2 puolelta palkin keskeltä
FF8	136169	377	154	220	113	162	Alalaippa rikki, särö ydintynyt L1 puolelta palkin keskeltä

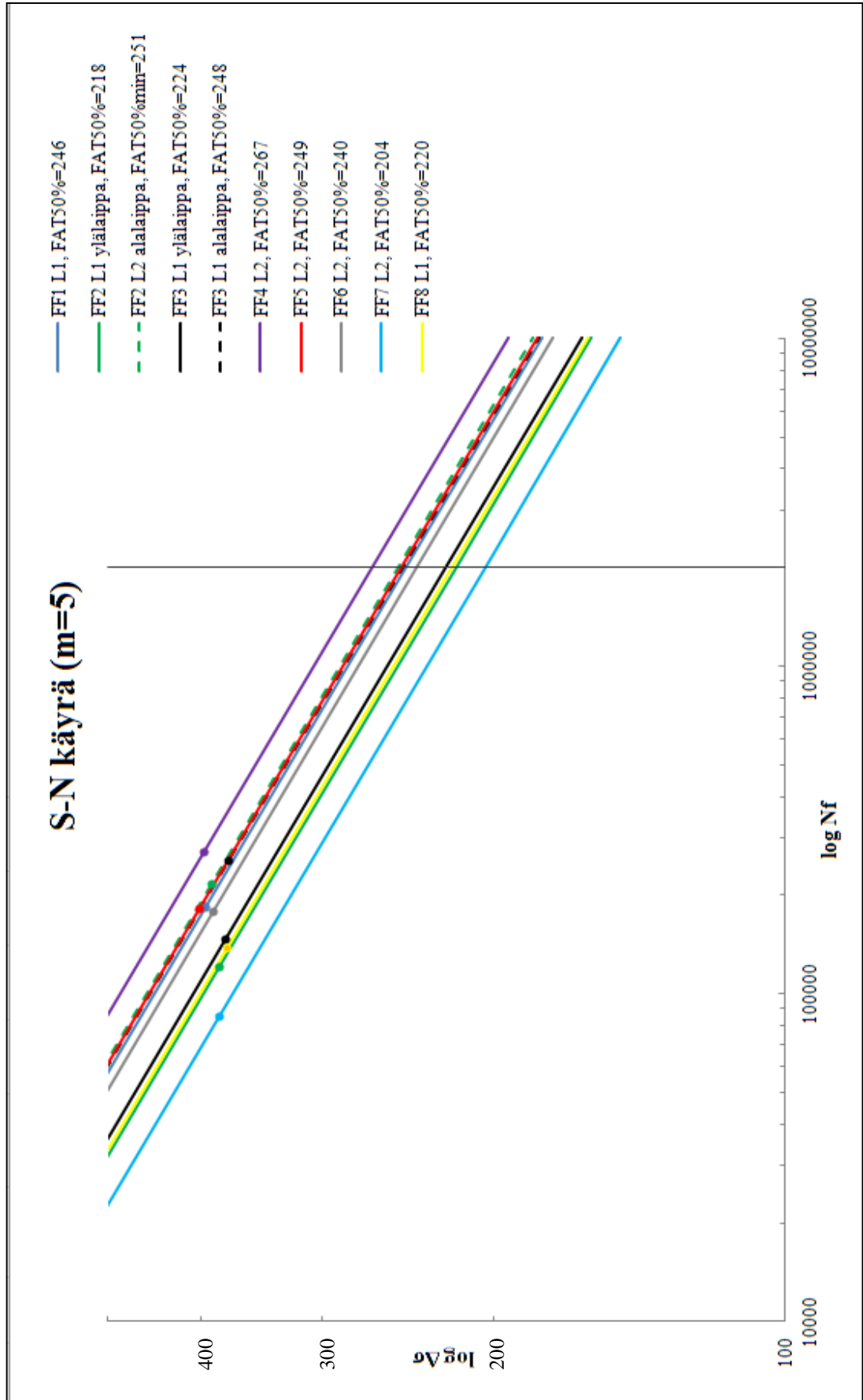












Taivutusjännitys

$$\Delta F = 210 \text{ kN}$$

$$\Delta M_{max} = 63 \text{ kNm}$$

$$I_x = 11094801,1 \text{ mm}^4$$

$$W_{ylä} = 219178,2 \text{ mm}^3$$

$$W_{ala} = 136333,3 \text{ mm}^3$$

$$W_{liuska} = 151196,5 \text{ mm}^3$$

$$\Delta\sigma_{ylä} = \frac{63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{219178,2 \text{ mm}^3} = 287 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{ala} = \frac{63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{136333,3 \text{ mm}^3} = 462 \text{ MPa}$$

$$\Delta\sigma_{liuska} = \frac{63 \cdot 10^6 \text{ Nmm}}{151196,5 \text{ mm}^3} = 417 \text{ MPa}$$

Leikkausjännitys alalaipan hitseissä

$$Q_{max} = 105 \text{ kN}$$

$$S_x = 61904 \text{ mm}^3$$

$$a = 4 \text{ mm}$$

$$t = 2a = 8 \text{ mm}$$

$$\tau = \frac{105 \cdot 10^3 \text{ N} \cdot 61904 \text{ mm}^3}{11094801,1 \text{ mm}^4 \cdot 8 \text{ mm}} = 73 \text{ MPa}$$