

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö ja seminaari

HITSILIITOSTEN VÄSYMISTARKASTELU ERI MENETELMILLÄ

FATIGUE ANALYSIS OF WELDED JOINTS WITH DIFFERENT METHODS

Lappeenrannassa 6.6.2017

Matias Tourula

Tarkastaja Prof. Timo Björk, DI Heli Mettänen

Ohjaaja Prof. Timo Björk, DI Heli Mettänen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Matias Tourula

Hitsiliitosten väsymistarkastelu eri menetelmillä

Kandidaatintyö

2017

38 sivua, 25 kuvaa, 5 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: Prof. Timo Björk, DI Heli Mettänen

Ohjaaja: Prof. Timo Björk, DI Heli Mettänen

Hakusanat: Väsyminen, väsymiskestävyys, 3R-menetelmä, ENS, rakenteellisen jännityksen menetelmä, nimellisen jännityksen menetelmä

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on vertailla S960-teräksestä valmistettujen hitsiliitosten väsymiskestävyyttä nimellisen jännityksen, rakenteellisen jännityksen, tehollisen lovijännityksen sekä 3R-menetelmällä. Saatuja tuloksia verrataan väsytykskoikeissa saatuihin tuloksiin sekä pohditaan syitä mahdollisten erojen taustalla. Laskenta suoritetaan käsin laskentana sekä hot spot -, ENS- ja 3R-menetelmissä numeerisen laskennan (FEA) avulla.

Tulosten perusteella nimellisen jännityksen, rakenteellisen jännityksen tai tehollisen lovijännityksen menetelmä eivät pysty antamaan kovin tarkkoja väsymiskestoikatuloksia S960-teräksestä valmistettuja hitsiliitoksia tarkasteltaessa. Käytössä olevien perinteisten väsymislaskentamenetelmien FAT-arvot on määritetty matala lujuuksisille koekappaleille, eivätkä ne tästä syystä kuvaa oikein suurlujuusterästen väsymiskäyttäytymistä. Muita syitä ovat menetelmien sopimattomuus vaihtelevaan hitsilaatuun, sekä suurlujuusteräksen voimakas reagointi esimerkiksi huonoon hitsilaatuun tai alkusäröihin.

3R-menetelmä tuotti suhteellisen hyviä laskentatuloksia, mutta niiden saavuttaminen vaati tarkkaa lähtötilanteen määrittystä. Jos lähtötilanne oli epäselvä, saattoi menetelmä antaa merkittävästi väsytykskoikeen tuloksesta eroavia kestoikatuloksia.

3R-menetelmä on siten oikein käytettynä toimiva menetelmä hitsiliitosten väsymiskestoiän laskentaan, riippumatta käytetystä teräslaadusta tai yksittäisten alkutilanteiden eroista. Huolimattomasti käytettynä menetelmä voi kuitenkin johtaa tuloksiin, jotka ovat kaukana todellisuudesta. 3R-menetelmä pystyy siten vastaamaan tulevaisuuden tarpeisiin mukautumalla yksittäiseen tarkastelutapaukseen ja antamaan muita väsymislaskentamenetelmiä tarkemman kestoikäarvion tilanteesta riippumatta.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Matias Tourula

Fatigue analysis of welded joints with different methods

Bachelor's thesis

2017

38 pages, 25 figures, 5 tables and 5 appendices

Examiner: Professor Timo Björk, M.Sc. (Tech.) Heli Mettänen

Supervisor: Professor Timo Björk, M.Sc. (Tech.) Heli Mettänen

Keywords: Fatigue, ENS, 3R-method, high strength steel, nominal stress method, structural stress method

The aim of this thesis is to compare the fatigue strength of welded joints made from S960 steel with nominal stress method, structural stress method, ENS-method and the 3R-method. The results are then compared to laboratory test results. The calculation is done by hand and in ENS-, hot spot - and 3R-methods with the help of numerical calculation (FEA). The question is that do the older generation methods work with high strength steels or is the 3R-method the only way to go in assessing the fatigue life of joints made of high strength steel.

Based on the results, nominal stress method, structural stress method and ENS-method are not very suitable for fatigue analysis of welded joints made of S960-steel. One reason is the incompatibility of current known FAT-values with the high strength of the steel and another is that high strength steel reacts very powerfully for example to low quality welds or initial cracks.

Instead, the 3R-method produced good results, though to get them it was important to obtain very good knowledge of the qualities of the joint. If this was not done properly, the results would differ drastically from the laboratory tests, but properly done the 3R-method did produce relatively accurate results.

Thereby, the 3R-method is at its best a working method for determining the fatigue life of welded joints regardless of the steel type used, even though, badly executed it will lead to misleading results. But when used well, it will answer to the future demands and be capable to adapt to different kind of situations and give an accurate fatigue life evaluation regardless of the initial situation.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

1	JOHDANTO	8
1.1	Tutkimuskysymykset.....	9
2	VÄSYMISLASKENTAMENETELMÄT	10
2.1	Nimellisen jännityksen menetelmä.....	10
2.2	Rakenteellisen jännityksen menetelmä (Hot spot -menetelmä).....	12
2.3	ENS-menetelmä (Effective Notch Stress -method).....	14
2.4	3R-menetelmä.....	15
3	MENETELMIEN SOVELLUS HITSILIITOKSIIN	18
3.1	X-liitos.....	18
3.1.1	Nimellisen jännityksen menetelmä X-liitoksen tapauksessa.....	18
3.1.2	Rakenteellisen jännityksen menetelmä X-liitoksen tapauksessa.....	19
3.1.3	Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä) X-liitoksen tapauksessa.....	20
3.1.4	3R/4R -menetelmä X-liitoksen tapauksessa.....	22
3.2	T-liitos.....	22
3.2.1	Nimellisen jännityksen menetelmä T-liitoksen tapauksessa.....	23
3.2.2	Rakenteellisen jännityksen menetelmä T-liitoksen tapauksessa.....	23
3.2.3	Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä) T-liitoksen tapauksessa.....	24
3.2.4	3R-menetelmä T-liitoksen tapauksessa.....	25
3.3	Päittäisliitos.....	25
3.3.1	Nimellisen jännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa.....	26
3.3.2	Rakenteellisen jännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa.....	27
3.3.3	Tehollisen lovijännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa.....	27
3.3.4	3R-menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa.....	28
4	TULOKSET	30

5	JOHTOPÄÄTÖKSET	33
5.1	Menetelmien toimivuus	34
6	POHDINTA	35
6.1	Tutkimuksen virhetarkastelu sekä jatkotutkimustarve	35
7	YHTEENVETO	36
	LÄHTEET	37
	LIITTEET	

LIITE I: FAT-taulukot.

LIITE II: ENS-menetelmän laskenta.

LIITE III: Hot Spot paksuuden yli, X-liitos.

LIITE IV: Hot Spot paksuuden yli, T-liitos.

LIITE V: Hot Spot paksuuden yli, päittäisliitos.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

A	Poikkipinta-ala [mm ²]
c	Etäisyys taivutusakselilta [mm]
F	Voima [N]
f_y	Myötölujuus [MPa]
I	Jäyhyys [mm ⁴]
K_s	rakenteellisen jännityksen kerroin
k_s	Paksuuskorjauskerroin
M	Momentti [Nmm]
m	S-N –käyrän kulmakerroin
N_f	Kestoikä [sykliä]
R	Jännityssuhde
R_{local}	Paikallinen jännityssuhde
R_m	Murtolujuus [MPa]
r	Pyöristyssäde [mm]
t	paksuus [mm]
γ	materiaalin osavarmuuskerroin
σ	Jännitys [MPa]
σ_{nim}	Nimellinen jännitys [MPa]
σ_{rak}	Rakenteellinen jännitys [MPa]
σ_{res}	Jäännösjännitys [MPa]
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu [MPa]
$\Delta\sigma_{ENS}$	ENS-jännitysvaihtelu [MPa]
$\Delta\sigma_{ekv}$	Ekvivalentti jännitysvaihtelu [MPa]
$\Delta\sigma_{hs}$	Ekvivalentti rakenteellinen jännitysvaihtelu [MPa]
$\Delta\sigma_{nim}$	Ekvivalentti nimellinen jännitysvaihtelu [MPa]
ENS	Effective Notch Stress, tehollinen lovijännitys
FAT	Väsymisherkkyuden (fatigue) osoittava arvo [MPa]
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä
SWT	Smith-Watson-Topper

TIG Tungsten Inert Gas

1 JOHDANTO

Tulevaisuudessa entistä lujempien teräslaatuojen käyttö tulee väistämättä lisääntymään niiden tarjoamien mahdollisuuksien myötä ja väsymislaskenta niiden parissa tulee siten myös luonnollisesti lisääntymään. Suurempi lujuus mahdollistaa optimaalisempien, eli usein kevyempien ja kestävämpien rakenteiden valmistamisen, mikä useassa sovelluskohteessa on merkittävä edistysaskel. Edut eivät kuitenkaan tule ilmaiseksi, vaan ne tuovat mukanaan haasteita, erityisesti väsymistarkastelun parissa.

Suurulujuusterästen, eli Pirisen (2013, s. 17) mukaan yli 550 MPa myötölujuuksisten terästen etu väsymiskestävyyttä ajatellen pienempi lujuuksiin (myötölujuus $f_y < 550$ MPa) teräksiin verrattuna tulee erityisesti entistä pidemmästä väsymissärön ydintymisajasta. Suuremman lujuuden tuomista ominaisuuksista johtuen suurulujuusteräs on todennäköisesti kuitenkin alttiimpi kaikenlaisille alkuvioille ja virheille, jotka syntyvät esimerkiksi hitsausvaiheessa. Toisin sanoen alkusäröllisen liitoksen väsymiskestoikä suurulujuusteräksestä valmistettuna voi olla lyhytkin.

Edellä mainittu johtaa siihen, että suurulujuusteräksiä tutkittaessa ja niitä hyödyntäviä rakenteita suunnitellessa väsymisanalyysillä on erittäin suuri painoarvo ja toimivien analyysimenetelmien löytäminen on tärkeää. Suuremman lujuuden tuomat edut väsymismielessä jäävät haittojen varjoon, jos väsymiseen liittyviä ilmiöitä ei saada hallittua. Pystyvätkö siis nykyisin yleisessä tiedossa olevat väsymiskestoajan laskentamenetelmät, nimellisen jännityksen menetelmä, rakenteellisen jännityksen menetelmä ja tehollisen lovijännityksen menetelmä antamaan käyttökelpoisia tuloksia, vaikka ne ovatkin erittäin paljon yksinkertaistettuja menetelmiä, vai onko esimerkiksi uusi Lappeenrannan teknillisessä yliopistossa kehitetty 3R/4R-menetelmä tai vastaava enemmän muuttujia huomioon ottava väsymislaskentamenetelmä toimivampi ratkaisu?

Tässä työssä verrataan TIG-jälkikäsitellyn (Tungsten Inert Gas) SSAB:n Strenx S960-suurulujuusteräksestä valmistetun X-hitsiliitoksen sekä hitsatussa tilassa (ei jälkikäsitelyä) olevien samasta S960-teräksestä valmistettujen päittäis- ja T-liitoksien väsymiskestävydestä eri väsymistarkastelumenetelmillä saatuja tuloksia

laboratoriokokeissa saatuihin tuloksiin, sekä pohditaan syitä tulosten taustalla. Työssä selvitetään myös teoria eri laskentamenetelmien taustalla ja pohditaan niiden vaikutusta tuloksiin. Työn tavoitteena on siten selvittää eri väsymislaskentamenetelmien toimivuus suurlujuusteräksestä valmistettuihin rakenteisiin, sekä eri väsymislaskentamenetelmien perusteoria.

1.1 Tutkimuskysymykset

Hitsatun liitoksen väsymiskestoikää voidaan arvioida monella eri menetelmällä. Yleisesti käytössä ovat nimellisen jännityksen menetelmä, rakenteellisen jännityksen menetelmä, ENS-menetelmä (Effective Notch Stress -method), sekä uudempana 3R/4R-menetelmä, jossa otetaan muihin menetelmiin verrattuna tarkemmin eri alkutilanteet huomioon. (Tässä työssä käytetään jatkossa nimitystä 3R-menetelmä.) Menetelmien välillä työmäärä ja tarvittava numeerinen laskenta vaihtelevat, mutta myös tarkkuudet ovat eri luokkaa. Siten käytettävä menetelmä on usein tapauskohtainen. Tutkimuskysymyksinä ovat

- Kuinka tarkkoja eri menetelmien antamat väsymiskestoikatulokset ovat väsytykokeeseen verrattuna?
- Miten menetelmät reagoivat suurempaan teräslujuuteen ja erilaisiin alkutilanteisiin?

Todennäköisesti vähemmän laskentatyötä vaativat menetelmät antavat tulokseksi epätarkemman kestoikatuloksen. Työmäärän kasvaessa laskennan tulos lähestyy kokeellisesti saatua kestoikää. Näin siis ainakin, kun käsitellään tällä hetkellä laajassa käytössä olevia teräslaatuja, esimerkiksi S235-, S355- ja S420 -lujuusluokkia. Kysymyksenä on kuitenkin tutkittavan teräslaadun korkean lujuuden vaikutus väsymislaskentaan. Lisäksi kestoikälaskenta perustuu kokeellisesti määritettyihin käyttäytymismalleihin (S-N -käyrät), jotka on määritetty matala lujuuksisille teräksille. Uudemmassa 3R-menetelmässä otetaan kuitenkin huomioon enemmän muuttujia kuin muissa menetelmissä, joten kestoikäanalyysikin on tällöin tarkempi.

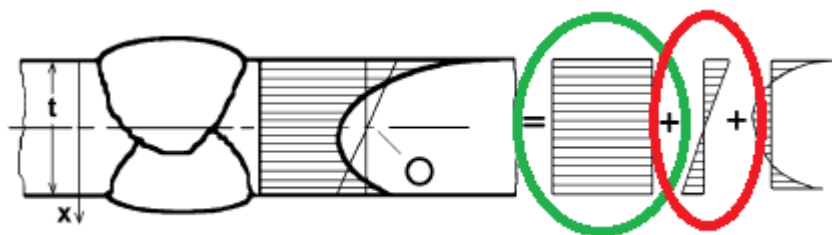
Tutkimusmenetelminä käytetään analyttistä laskentaa, joka suoritetaan kaupallisella PTC Mathcad 15 -ohjelmistolla, sekä FE-analyysiä, joka suoritetaan kaupallisella elementtilaskentaohjelmistolla FEMAP 11.3.1, johon on integroitu ratkaisija NX Nastran 10. Lisäksi käytetään hyödyksi asiaan liittyvää kirjallisuutta.

2 VÄSYMISLASKENTAMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi työssä käytetyt eri väsymislaskentamenetelmät. Menetelmien yksityiskohtaisempi sovellus eri tarkastelutapauksiin on esitetty luvussa 3.

2.1 Nimellisen jännityksen menetelmä

Nimellisen jännityksen menetelmässä otetaan huomioon ainoastaan kuvassa 1 vihreällä värillä (vasen soikio) ympyröity nimellinen jännitys, eli tässä tapauksessa suoraan kuorman kappaleeseen aiheuttama jännitys hitsin lovijännityksen vaikutusalueen ulkopuolella (Hobbacher 2013, s. 17). Kuvan 1 tilanteessa kappale on rasitettu pitkittäissuuntaisella voimalla, mutta tilanteessa, jossa rasitus aiheuttaa rakenteeseen taivutusmomentin, on nimellinen jännitys jakauma paksuuden yli lineaarisesti muuttuva. (kuvassa 1 punaisella ympyröidyn kaltainen, oikean puolinen soikio.)



Kuva 1. Nimellisen jännityksen osuus on ympyröity vihreällä (muok. Niemi & Kemppi 1993, s. 235).

Nimellisen jännityksen menetelmän etu muihin menetelmiin verrattuna on suhteellisen pieni työmäärä. Laskennassa tarvittavat kertoimet saadaan standardeista tai muusta kirjallisuudesta, ja tarvittava laskenta on hyvin yksinkertaista. Menetelmä soveltuu siten esimerkiksi alhaisempaa tarkkuutta vaativiin tapauksiin, jotka voidaan mitoittaa reilusti turvallisuudelle puolelle, sekä yksinkertaisiin liitosmuotoihin.

Nimellisen jännityksen menetelmä kuitenkin rajoittuu melko yksinkertaisiin geometrioihin. Monimutkaisissa geometrioissa ja rasiustilanteissa nimellisen jännityksen määrittäminen ei ole yksiselitteistä, sillä esimerkiksi makrogeometrisilla epäjatkuvuuksilla, kuten isoilla

rei'illä tai vaihtelevalla ainevahvuudella on vaikutus nimelliseen jännitykseen, jonka määrittäminen voi siten olla vaikeaa. (Niemi & Kemppi 1993, s. 232.)

Nimellinen jännitys σ_{nim} lasketaan molemmissa rasitustapauksissa (veto tai taivutus) kaavalla (Niemi & Kemppi 1993, s. 232)

$$\sigma_{nim} = \frac{F}{A} + \frac{Mc}{I} \quad (1)$$

jossa F on rakenteeseen vaikuttava voima, A poikkipinta-ala, M momentti, c etäisyys taivutusakselilta tarkastelupisteeseen ja I taivutusjäyhyys. (Niemi & Kemppi 1993, s. 232.)

Väsymiskestojen laskennassa tarvittava $\Delta\sigma$ -arvo on vakioamplitudisesti rasitetussa tapauksessa suoraan minimijännitys vähennettynä maksimijännityksestä. Muuttuva-amplitudisesti rasitetussa tapauksessa täytyy määrittää ekvivalentti jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{ekv}$, joka voidaan selvittää esimerkiksi ns. Rainflow-menetelmällä. (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, s. 7.) Sen jälkeen saatu nimellinen jännitysvaihtelu $\Delta\sigma_{nim}$ sijoitetaan kaavaan

$$\Delta\sigma_{nim}^m * N_f = FAT^m * 2 * 10^6 \quad (2)$$

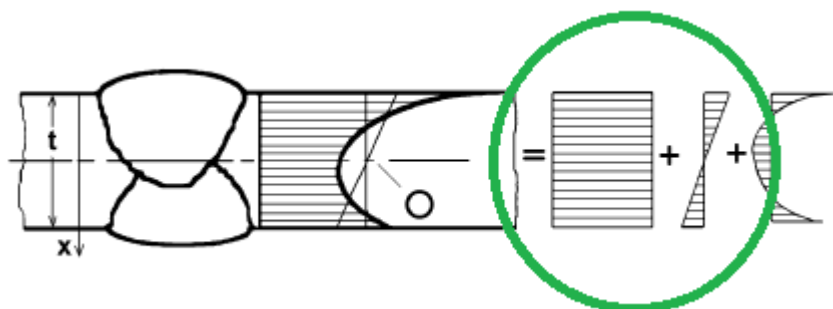
josta selvitetään kestoikä.

$$N_f = \left[\frac{k_s * FAT}{\gamma * \Delta\sigma_{nim}} \right]^m * 2 * 10^6 \quad (3)$$

FAT-arvo on kullekin liitostyypille omanlainen ja perustuu suuren väsytyiskoemäärän avulla luotuihin S-N -käyriin. Lukuarvo perustuu kunkin käyrän kahden miljoonan syklin kestoikään johtavaan jännitysvaihteluväliin. Eli esimerkiksi FAT=100 MPa tarkoittaa, että kyseinen liitostyyppi murtuu jännitysvaihtelulla 100 MPa kahden miljoonan syklin kohdalla. m -arvo kertoo käyrän laskunopeuden (väsymisnopeuden) log-log-asteikolla ja on useimmissa tapauksissa $m=3$. k_s -kerroin on paksuuskorjauskerroin, joka on materiaalipaksuuteen 25 mm asti $k_s=1$. γ -kerroin on materiaalin osavarmuuskerroin, joka on useimmissa tapauksissa $\gamma=1$. (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, s. 13-14.)

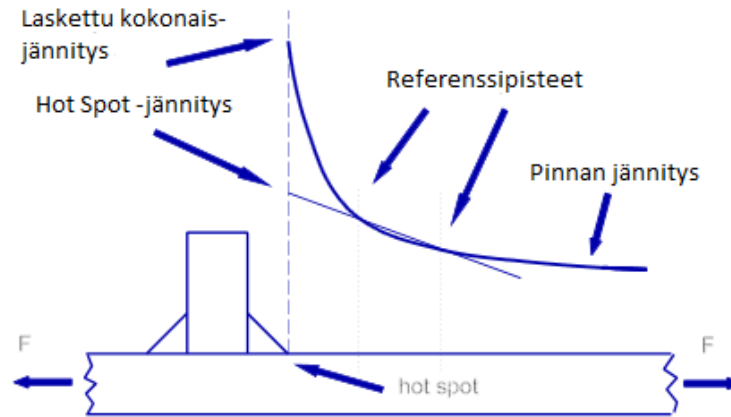
2.2 Rakenteellisen jännityksen menetelmä (Hot spot -menetelmä)

Rakenteellisen jännityksen menetelmässä nimellisen jännityksen lisäksi tarkasteluun otetaan mukaan rakenteellinen-, eli hot spot -jännitys. Hot spot -jännitys aiheutuu geometrisista epäjatkuvuuskohdista tai virheistä, kuten esimerkiksi kulmavirheestä. Muita epäjatkuvuuskohtia ovat esimerkiksi erilevyisten tai eripaksuisten levyjen päittäisliitos tai erilaiset jäykisteet. Kuvan 2 tapauksessa rakenteellisen jännitysjakauman on aiheuttanut kulmavirhe, josta aiheutuu sekundäärinen taivutusjännitys. Sekundäärinen taivutusjännitys lisättyä nimelliseen jännitykseen muodostaa rakenteellisen-, eli hot spot -jännityksen, joka on kuvassa 2 ympyröityjen jännityskomponenttien summa. (Niemi & Kemppi 1993, s. 235-236.)



Kuva 2. Rakenteellisen jännityksen osuus (muok. Niemi & Kemppi 1993, s. 235).

Hot spot -jännitys määritetään joko kirjallisuudesta saaduilla tai erillisillä kaavoilla lasketuilla K_s -kertoimilla, jotka on määritetty erilaisille liitostyypeille, tai FEM:n (Finite element method, suom. elementtimenetelmä) avulla. Lisäksi jännitys voidaan määrittää venymäliuskojen avulla lineaarisella ekstrapolaatiolla (kuva 3). Tulos ekstrapoloidaan siten, että ekstrapolaatiopisteet ovat lovijännityksen vaikutusalueen ulkopuolella. Käytännössä lähin mittauspiste on hyvä valita noin $0.4t$ (t =ainepaksuus) etäisyydeltä rajaviivasta. (Hobbacher 2013, s. 22.)



Kuva 3. Hot spot –jännityksen määrittäminen (muok. Hobbacher 2013, s. 20).

Tarkin hot spot -jännityksen laskentatapa on paksuuden yli integrointi, jossa FEM-mallin avulla määritetystä kokonaisjännityksestä poistetaan epälineaarisen lovijännityksen osuus. Poistaminen tapahtuu siten, että integrointikaavoilla eritellään kokonaisjännityksestä nimellinen jännitys jakauma

$$\sigma_{nim} = \frac{1}{t} \int_0^t \sigma(x) dx \quad (4)$$

sekä rakenteellinen jännitys jakauma

$$\sigma_{rak} = \frac{6}{t^2} \int_0^t \sigma(x) * \left(\frac{t}{2} - x\right) dx \quad (5)$$

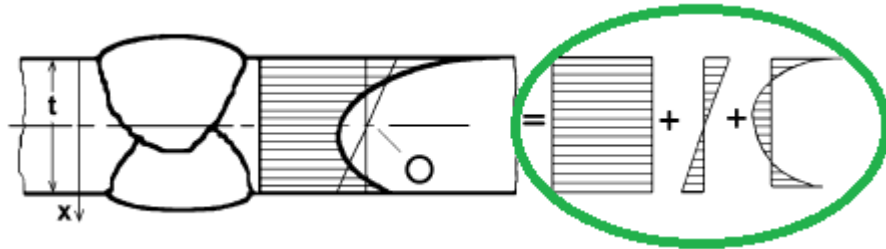
jotka summaamalla saadaan hot spot -menetelmässä käytetty jännitys. Summauksessa etumerkki tulee valita siten, että sekundäärisen jännityksen vaikutus on sama kuin tarkasteltavassa liitoksessa. (Hobbacher 2007, s. 20.)

Rakenteellisen jännitysvaihtelun määrittämisen jälkeen väsymiskestoikä lasketaan sijoittamalla saatu $\Delta\sigma_{hs}$ kaavaan

$$N_f = \left[\frac{k_s * FAT}{\gamma * \Delta\sigma_{hs}} \right]^m * 2 * 10^6 \quad (6)$$

2.3 ENS-menetelmä (Effective Notch Stress -method)

Effective Notch Stress (ENS) -menetelmässä aikaisemmissa menetelmissä huomioon otettujen jännityskomponenttien lisäksi otetaan huomioon myös lovikohdissa vaikuttava lovijännitys. Lovijännitys eroaa muista jännityksistä siten, ettei se muuta rakenteessa vaikuttavaa kokonaisjännityksen arvoa, vaan jakaa jännityksen kuvan 4 mukaisesti huipuiksi rakenteen pinnoille ja vastakkaismerkkiseksi jakaumaksi levyn keskialueelle (vetokuormituksessa). Lovivaikutuksen aiheuttama jännitysjaakauma on kuvassa 4 viimeinen summattava jakaumakuvio ja ENS-menetelmässä huomioon otettava kokonaisjännitys on ympyröity vihreällä.



Kuva 4. ENS-menetelmän osuus (muok. Niemi & Kemppe 1993, s. 235).

ENS-menetelmässä hitsin rajapinnalle mallinnetaan säteellä 1 mm oleva pyöristys, tai vaihtoehtoisesti pyöristys 1 mm + mitattu todellinen pyöristyssäde (Hobbacher 2013, s. 29, Radaj et al. 2006, s. 96-97). Pyöristyssäde voidaan luoda joko filled-menetelmällä tai undercut-menetelmällä. Saatu kriittinen jännitysvaihteluväli $\Delta\sigma_{ENS}$ sijoitetaan kaavaan

$$N_f = \left[\frac{FAT}{\gamma \cdot \Delta\sigma_{ENS}} \right]^m * 2 * 10^6 \quad (7)$$

jossa ENS-menetelmässä FAT-arvo perustuu laskennassa käytettävään vertailujännitykseen taulukon 1 mukaisesti, sekä materiaalipaksuuteen.

Taulukko 1. ENS-menetelmässä käytettävät FAT-arvot (Sonsino et al. 2010, s. 4).

Vertailujännitys	FAT
Von Mises	200 MPa
Pääjännitykset	225 MPa

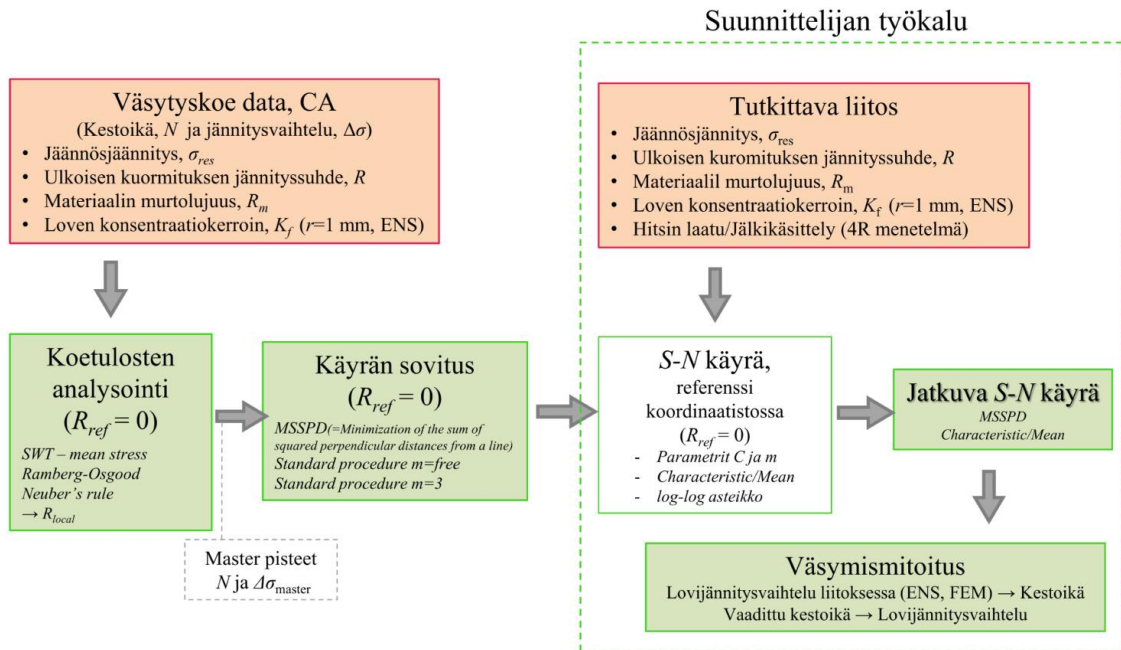
Jos kyseessä on alle 5 mm materiaalipaksuus, käytetään rajaviivan pyöristyssäteenä $r=0,05$ mm ja FAT-arvona 630 MPa (pääjännitykset) (Fricke 2010, s. 4-19, Sonsino et al. 2010, s. 4).

FEM-mallin verkotus tehdään kriittisillä alueilla (rajaviivat ja juuren puoli) riittävän tarkaksi, jotta jännitys voidaan luotettavasti lukea. Elementit pyritään tarkasteltavalla alueella myös pitämään mahdollisimman lähellä optimaalista muotoa. Myös parabolisten elementtien käyttö on perusteltua korkeaa tarkkuutta tavoiteltaessa. Elementtikoon tarkasteltavalla alueella tulisi lineaarisilla elementeillä olla korkeintaan 1/6 mallinnetusta pyöristyssäteestä ja parabolisilla elementeillä korkeintaan 1/4 pyöristyssäteestä. (Hobbacher 2013, s. 30.)

2.4 3R-menetelmä

Siinä missä edellä esitellyt menetelmät perustuvat valmiiksi luotuihin S-N –käyriin ja ovat siten sidottuja niiden asettamiin rajoihin (materiaalilujuus, jälkikäsitteily jne.), luodaan 3R-menetelmässä joka tilanteelle oma jatkuva S-N –käyrä. Eri tilanteiden yksilöllisyys perustuu kriittisessä kohdassa vaikuttavaan paikalliseen jännityssuhteeseen R_{local} , jota esimerkiksi ENS-menetelmä ei ota huomioon. Paikalliseen jännityssuhteeseen R_{local} vaikuttavat tarkastelupisteessä oleva jäännösjännitys σ_{res} , materiaalin murtolujuus R_m , sekä jännityssuhde R . Paikallinen jännityssuhde R_{local} lasketaan käyttämällä SWT (Smith-Watson-Topper) -parametria ja Neuberin sääntöä. Materiaalimallina 3R-menetelmässä on käytetty Ramberg-Osgood -mallia. (Nykänen et al. 2016, s. 179-180.)

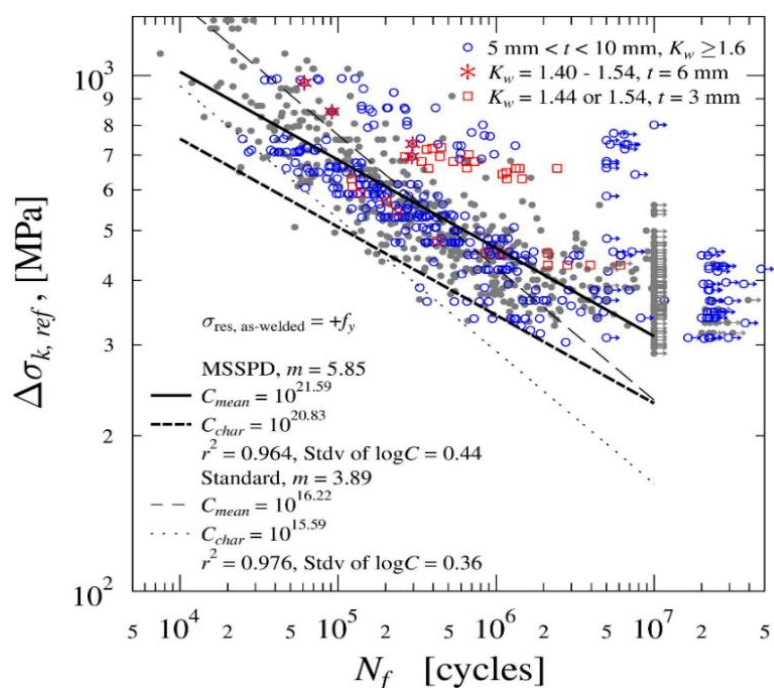
Kuvassa 5 on esitetty 3R-menetelmän laskennan kulku, kun kuormitus on vakioamplitudista.



Kuva 5. 3R-menetelmän laskennan kulku (Mettänen 2017).

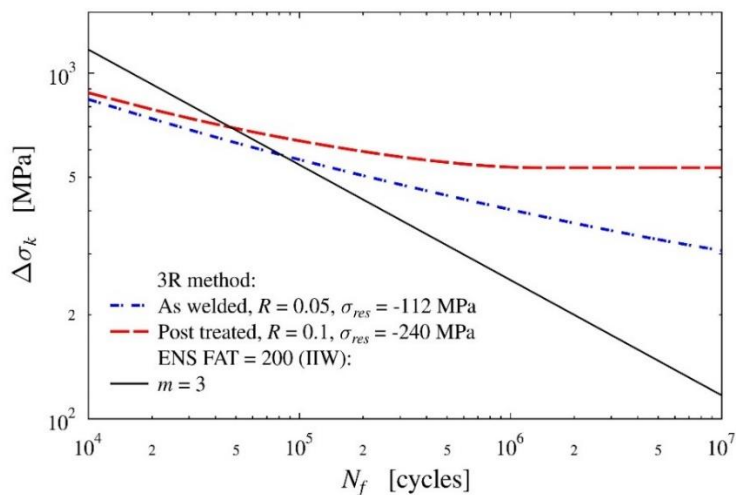
Menetelmä perustuu koetuloksista luotuun ns. master S-N –käyrään (kuva 6, käyrä referenssikoordinaatistossa), jossa koekappaleiden ENS-jännitykset on määritetty FEM:n avulla käyttäen 1 mm rajaviivan pyöristystä tai kirjallisuudesta löytyvien kaavojen avulla. Kuvassa 6 jokaisen koekappaleen $\Delta\sigma_{ENS}$ on muutettu vastaamaan $R_{local}=0$ -tulosta, jolloin koetulokset ovat vertailtavissa keskenään.

Master S-N –käyrän avulla voidaan muodostaa mille tahansa kuormitus- ja liitostyypille oma jatkuva S-N –käyrä, joka ottaa huomioon jännösjännityksen, materiaalin lujuuden ja jännityssuhteen. On hyvä huomata, että 3R-menetelmästä saatava S-N –käyrä on nyt jatkuva, eli käyrässä ei ole selkeää taitekohtaa, vaan kestoian pidentyessä käyrä loivenee tasaisesti ja siten vastaa paremmin kulloistakin tilannetta. (Nykänen et al. 2016, s. 178-180, Nykänen & Björk 2016, s. 566-582.)



Kuva 6. Referenssikoordinaatistossa esitetyt ENS-jännitykset ja kestoikäkoetulokset log-log-asteikolla, sekä niiden perusteella luotu master S-N –käyrä. Harmaat pisteet ovat ENS-jännityksiä suoraan ENS-malleista. (Nykänen & Björk 2016, s. 569.)

Kuvassa 7 on esitetty 3R-menetelmän luomia jatkuvia S-N –käyriä 1100 MPa lujuusluokan teräkselle erilaisilla jäännösjännityksillä ja jälkikäsittelyillä, sekä myös hitsatussa tilassa oleville liitoksille. Kuvasta huomataan, että alkutilanteesta riippuen S-N –käyrät eroavat toisistaan, minkä 3R-menetelmä siis kykenee muista väsymislaskentamenetelmistä poiketen ottamaan huomioon.



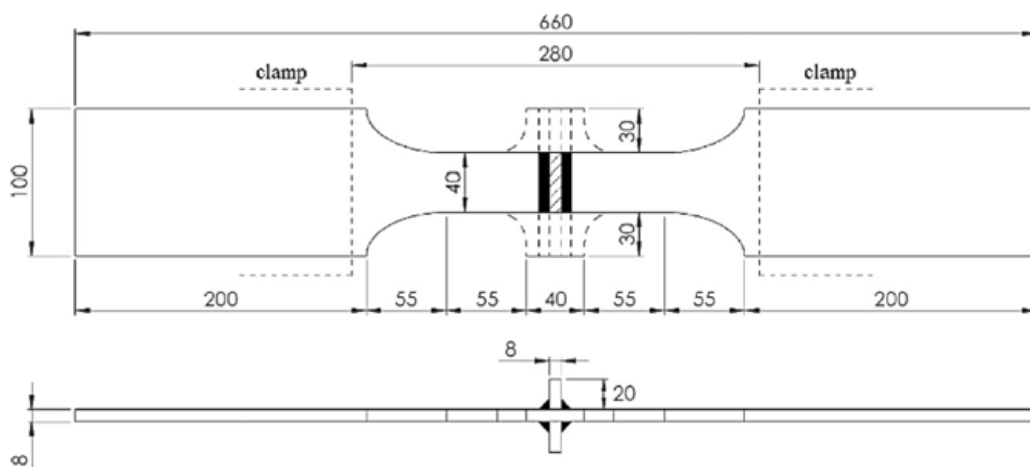
Kuva 7. 3R-menetelmän mukaisia jatkuvia S-N-käyriä (Mettänen 2017).

3 MENETELMIEN SOVELLUS HITSILIITOKSIIN

Tässä luvussa esitetään väsymislaskentamenetelmien sovellus X-, T- ja päittäishitsiliitokseen. Materiaalina kaikissa koekappaleissa oli SSAB Strenx 960 MC -teräs, jonka murtolujuus oli 1125 MPa.

3.1 X-liitos

Tarkasteltu koetilanne oli kuvan 8 mukainen. Kappaleeseen vaikutti vaakasuunnassa vakioamplitudinen voimavaihtelu 135 kN. Geometriat lähellä hitsiä olivat korkeus 39,75 mm ja ainevahvuus 7,9 mm. Hitsin mitattu rajaviivan pyöristyssäde oli 3,678 mm, eli ENS-mallissa 4,678 mm. Mitattu jäännösjännitys σ_{res} oli -390 MPa mitattuna hajonneelta rajaviivalta (ennen koetta). Jännityssuhde R oli 0,40.



Kuva 8. Koekappale.

3.1.1 Nimellisen jännityksen menetelmä X-liitoksen tapauksessa

Lasketaan kappaleessa vaikuttava nimellinen jännitys sijoittamalla voima ja poikkileikkauksen pinta-ala kaavaan 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{135000N}{39,75mm * 7,9mm} = 429,9 MPa$$

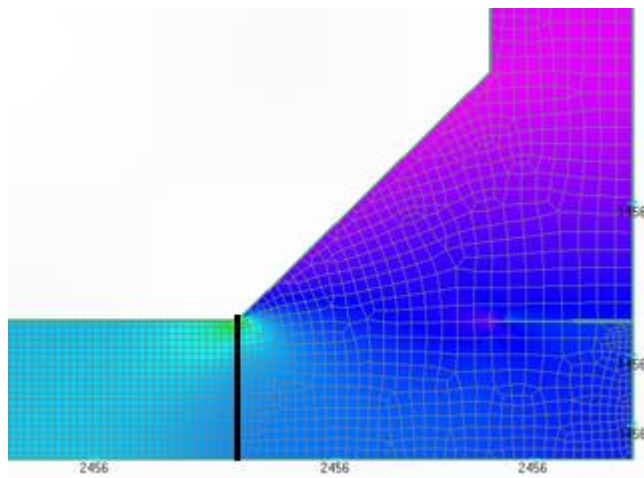
Sijoitetaan saatu jännitys kestoiän kaavaan 3. Nyt $k=1$, $\gamma=1$ ja $m=3$. FAT-arvona voitaisiin käyttää kirjallisuudesta (liite I) saatavaa arvoa 100 MPa tapauksesta ”Two sided fillets, toe ground” koska se on lähimpänä tarkasteltavaa tilannetta (Hobbacher 2013, s. 63). Tarkasteltava liitos on kuitenkin TIG-jälkikäsitelty, joten voidaan FAT-luokkaa kasvattaa arvoon 112 MPa (Hobbacher 2013, s. 87).

$$N_f = \left[\frac{1 * 112 \text{MPa}}{1 * 429,9 \text{MPa}} \right]^3 * 2 * 10^6 = 35366 \text{ (kpl)}$$

Huomattavaa on, että nyt $k_s=1$, koska materiaalipaksuus on alle 25 mm. Lisäksi γ -kerroin on myös 1.

3.1.2 Rakenteellisen jännityksen menetelmä X-liitoksen tapauksessa

Rakenteellisen jännityksen mukainen väsymiskestoikä laskettiin FEM-mallista (kuva 9) määrittämällä $\Delta\sigma_{hs}$ paksuuden yli integroimalla, jotta tulos on vertailukelpoinen muihin menetelmiin nähden. Laskenta suoritettiin luvussa 2 esitetyllä tavalla erittelemällä tarkastellusta kohdasta saadusta kokonaisjännityksestä nimellisen ja rakenteellisen jännityksen osuus. Jännitysarvot poimittiin suoraan rajaviivan alapuolelta (musta viiva kuvassa 2) X-suuntaisina solmujännityksinä. Paksuuden yli integrointi ja väsymiskestoiän tarkempi laskenta on esitetty liitteessä III.



Kuva 9. X-liitoksen hot spot -malli.

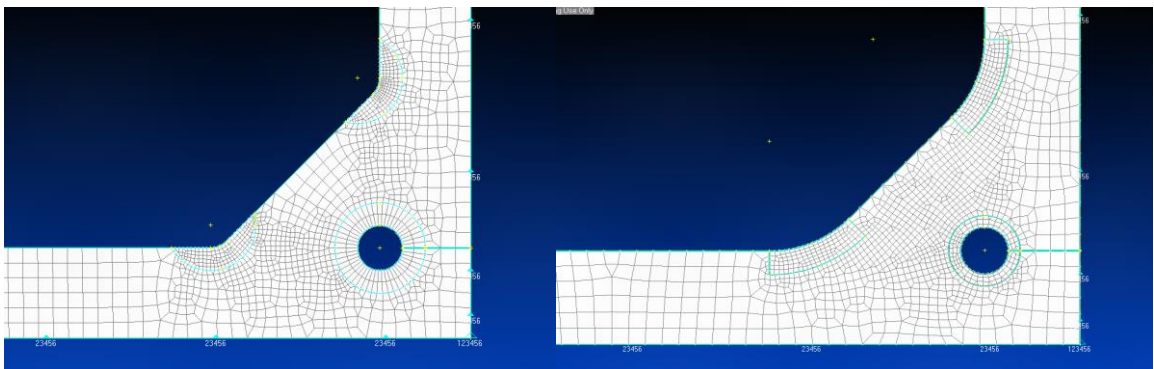
Väsymiskestoian laskennassa käytettävänä jännityksenä voidaan myös käyttää venymäliuskoilta saatua jännitystä, joka oli koekappaleesta mitattuna 440 MPa. Kaavan 6 mukaisesti laskentaan tarvitaan lisäksi vakiot k_s ja γ sekä FAT_{hs} , joka tässä tapauksessa on 100 MPa (Hobbacher 2013, s. 76). k_s - ja γ -arvot ovat molemmat 1 ja $m=3$. Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan venymäliuskaajännityksen mukainen kestoikätuloks.

$$N_f = \left[\frac{1 * 100MPa}{1 * 440MPa} \right]^3 * 2 * 10^6 = 23480 \text{ (kpl)}$$

3.1.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä) X-liitoksen tapauksessa

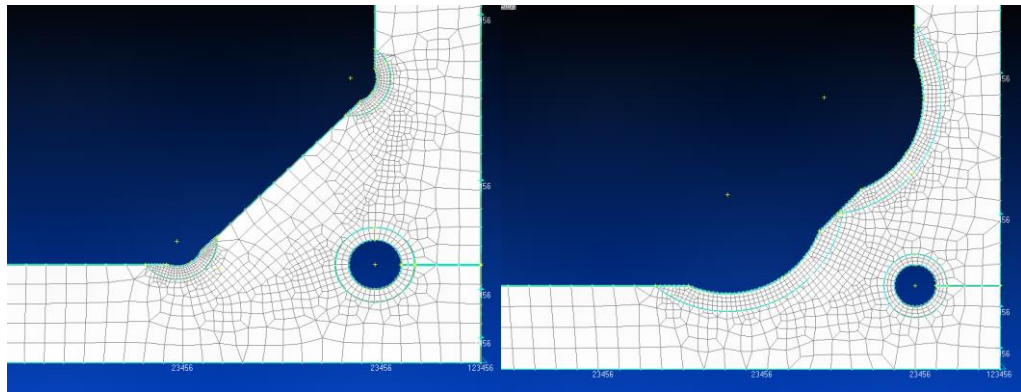
Koekappaleesta mallinnettiin symmetrian perusteella yksi neljäsosa kuvan 8 koetilanteesta ja käytettiin symmetriareunaehtoja, sekä puolitettiin kappaleeseen vaikuttava voima, koska voiman vaikutusalue puolittui. Pyöritys toteutettiin filled- ja undercut-menetelmällä. Verkotus tehtiin parabolisilla suorakulmioelementeillä ja sitä tihennettiin tutkittavilla alueilla.

Kuvassa 10 pyöritys on toteutettu filled-menetelmällä, eli materiaalia on lisätty loven pohjalle halutun pyörityssäteen saavuttamiseksi. Pyöritys toteutettiin pyörityssäteillä $r=1$ mm ja todellisella pyörityssäteellä $r=3,678$ mm (mallissa 4,678 mm).



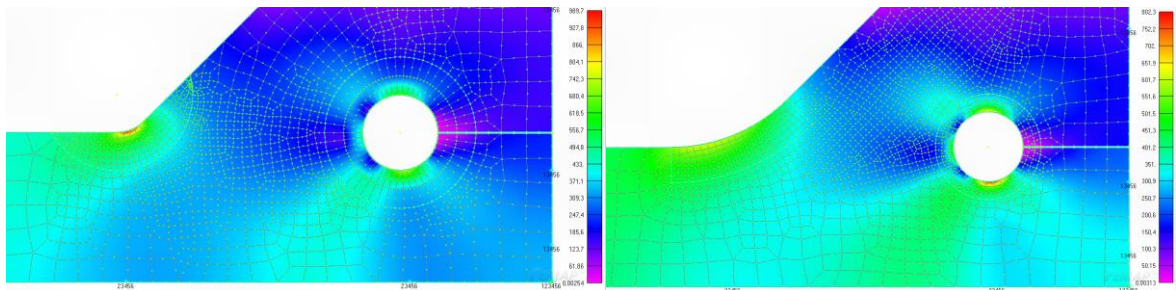
Kuva 10. Rajaviivan pyöritys fillet-menetelmällä.

Kuvassa 11 pyöritys on toteutettu undercut-menetelmällä, jolloin materiaalia poistettiin siten, että haluttu pyörityskaari sivusi alkuperäistä lovenpohjaa.

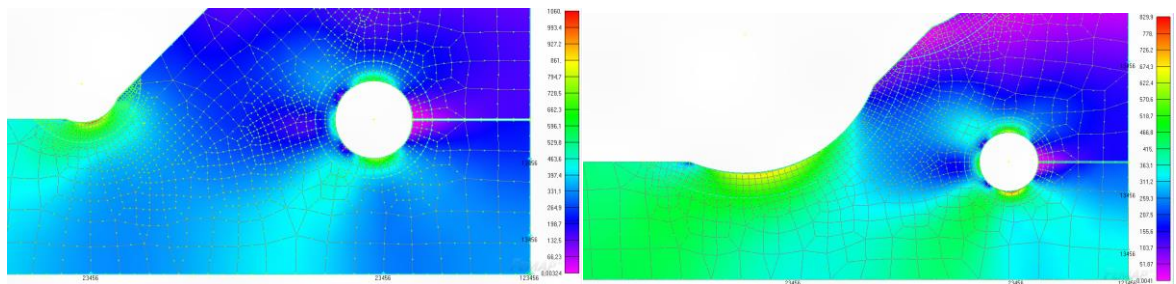


Kuva 11. Rajaviivan pyöristys undercut-menetelmällä.

Molemmissa tapauksissa 1 mm pyöristyssäde aiheutti suurimman jännityksen hitsin rajaviivalle, mutta todellinen pyöristyssäde näyttäisi aiheuttavan suurimman jännityksen juuren puolelle (kuvat 12 ja 13). FEM-mallissa juuren puolelle syntyy kuitenkin todellista suurempi jännityskeskittymä, joten laskennassa käytetyksi jännitykseksi valittiin rajaviivalla esiintyvä suurin jännitys. Koekappaleen myös tiedetään hajonneen rajaviivan puolelta. Kestoikien laskenta on esitetty liitteessä II.



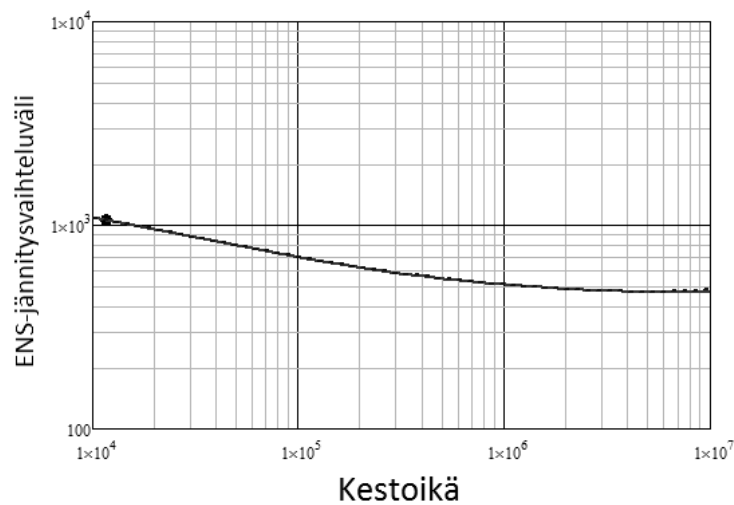
Kuva 12. Laskennan tulos filled-menetelmällä Von Mises -jännityksiä käyttäen.



Kuva 13. Laskennan tulos undercut-menetelmällä Von Mises -jännityksiä käyttäen.

3.1.4 3R/4R -menetelmä X-liitoksen tapauksessa

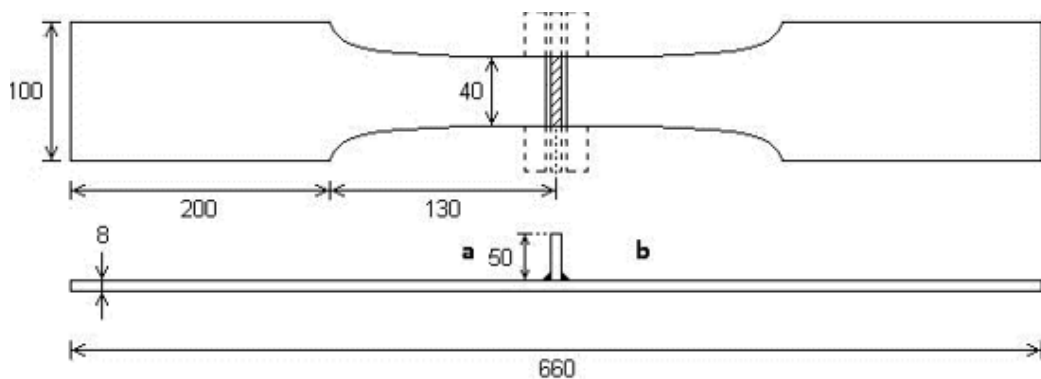
Tarkastelu suoritettiin kaikilla määritetyillä ENS-jännityksillä, joista lähimpänä koetuloksen arvoa oleva kestoikä verrattuna koetulokseen saatiin rajaviivan todellisen pyöristyssäteen filled-menetelmän ENS-jännityksellä. Kestoiäksi tällä mallinnustavalla 3R-menetelmällä saatiin 180500 sykliä, joka on samaa luokkaa väsytkoetuloksen kanssa. Kuvassa 14 on esitetty 3R-menetelmän X-liitokselle luoma S-N -käyrä.



Kuva 14. 3R-menetelmän luoma S-N -käyrä X-liitokselle.

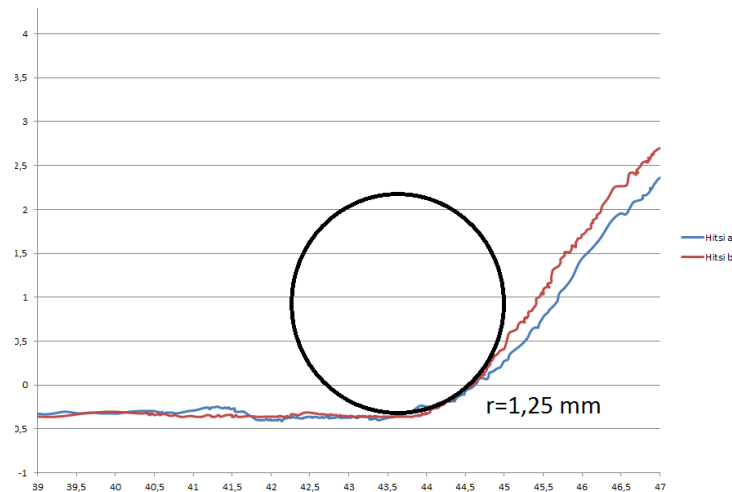
3.2 T-liitos

Koekappaleeseen (kuva 15) vaikuttaneen vaakasuuntaisen vakioamplitudisen voiman vaihtelu oli 70,45 kN ja geometria oli korkeus 40 mm ja ainevahvuus 8 mm. Kappale oli hitsatussa tilassa, eli ilman minkäänlaista jälkikäsitelyä. Jännityssuhde R oli 0,10 ja jäännösjännitys oli -78 MPa hajonneelta rajaviivalta mitattuna.



Kuva 15. Koetilanne, T-liitos.

Lasermittausdatasta (kuva 16) mitattu pienempi (b-rajaviivan) pyöristyssäde oli 1,25 mm, eli ENS-mallissa pyöristyssäteeksi saadaan 1,25 mm+1 mm=2,25 mm.



Kuva 16. Rajaviivan pyöristyksen määrittäminen lasermittausdatasta.

3.2.1 Nimellisen jännityksen menetelmä T-liitoksen tapauksessa

Lasketaan poikkileikkauksessa vaikuttava nimellinen jännitys kaavalla 1.

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{70450N}{40mm * 8mm} = 220,2 MPa$$

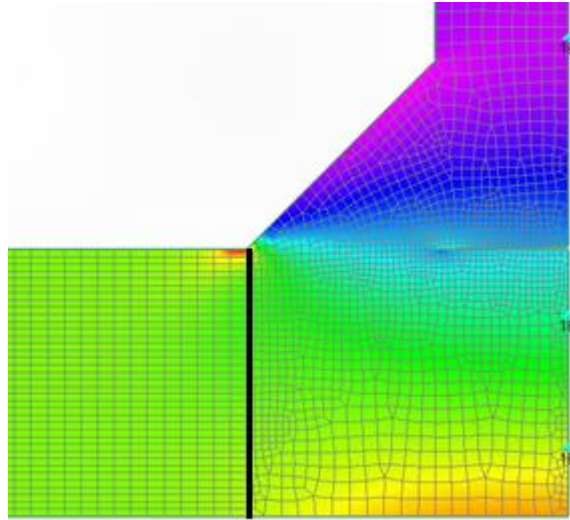
Ja sijoitetaan saatu jännitys kestoajan laskukaavaan. Nyt FAT-arvona käytetään arvoa 80 MPa (Hobbacher 2013, s. 63, tapaus 511). Muut arvot ovat kuten X-liitoksen tapauksessa.

$$N_f = \left[\frac{1 * 80MPa}{1 * 220,2MPa} \right]^3 * 2 * 10^6 = 95910 (kpl)$$

3.2.2 Rakenteellisen jännityksen menetelmä T-liitoksen tapauksessa

Rakenteellisen jännityksen mukainen väsymiskestoikä T-liitokselle laskettiin X-liitoksen tapaan myös määrittämällä $\Delta\sigma_{hs}$ paksuuden yli integroimalla FEM-mallista (kuva 17). Jännitysarvot poimittiin suoraan rajaviivan alapuolelta vaakasuuntaisina solmujännityksinä. Integrointi ja väsymiskestoajan laskenta on esitetty liitteessä IV. Liitteen IV laskennassa rakenteellisen jännityksen osuus on esitetty itseisarvona (positiivisena), mutta nyt sillä on

kuitenkin miinusmerkkinen puristava vaikutus rajaviivalla. Rakenteellisen jännityksen osuus on kuitenkin niin pieni, ettei sillä ole merkittävää vaikutusta lopputulokseen.



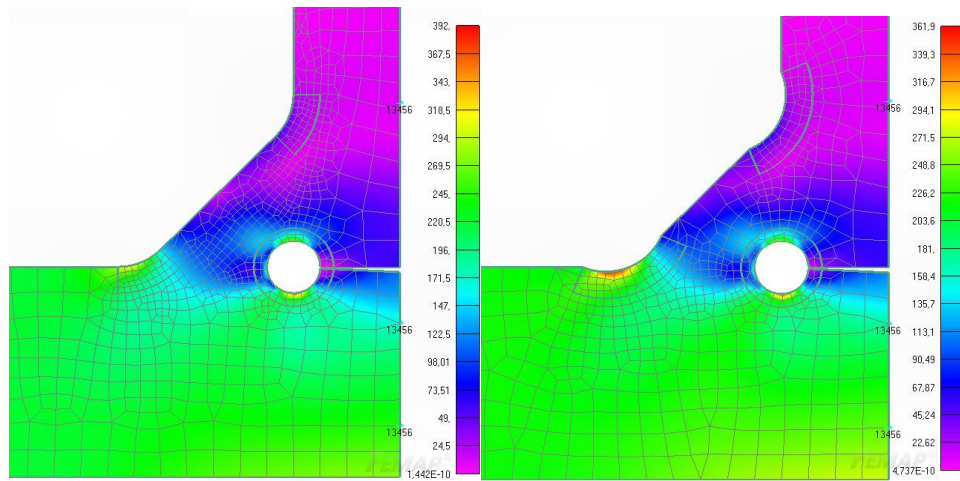
Kuva 17. Hot Spot -FEM-malli T-liitoksen tapauksessa

Väsymiskestoikä määritettiin myös venymäliuskejännityksen perusteella. FAT_{hs} on T-liitoksen tapauksessa 100 MPa (Hobbacher 2013, s. 76) ja $\Delta\sigma_{hs}$ on venymäliuskamittauksella määritetty koekappaleesta 261 MPa. k_s - ja γ -arvot ovat molemmat 1 ja $m=3$. Sijoittamalla arvot kaavaan 6 saadaan venymäliuskejännityksen mukainen väsymiskestoikä.

$$N_f = \left[\frac{1 * 100MPa}{1 * 261MPa} \right]^3 * 2 * 10^6 = 112500 \text{ (kpl)}$$

3.2.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä) T-liitoksen tapauksessa

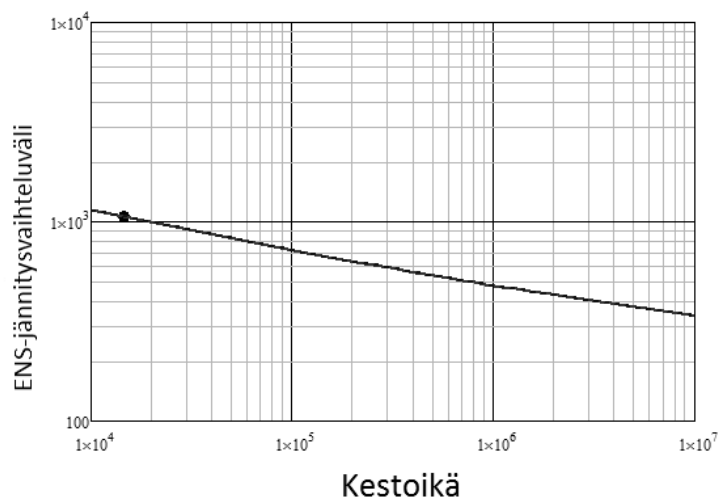
T-liitoksen ENS-menetelmän mukainen väsymiskestoikä määritettiin todellisella (todellinen+1 mm), sekä 1 mm rajaviivan pyöristyssäteellä. Käytettäessä todellisen pyöristyssäteen filled-menetelmää näyttää FEM-malli kriittisen jännityskeskittymän muodostuvan juuren puolelle, mutta kuten X-liitoksen tapauksessa, todellisuudessa jännitys juuren puolella ei kasva niin suureksi. Siten laskennassa käytetään filled-tapauksessa suurinta rajaviivalla esiintyvää jännitystä. Undercut-menetelmällä kriittinen jännitys asettui kuitenkin suoraan rajaviivan puolelle. Laskennan tulos näkyy kuvassa 18. Analyytinen laskenta ja kestoajat on esitetty liitteessä II.



Kuva 18. T-liitoksen ENS-mallin tulos filled- ja undercut-menetelmillä mallinnettuna todellisella rajaviivan pyörityssäteellä, Von Mises -jännityksillä.

3.2.4 3R-menetelmä T-liitoksen tapauksessa

T-liitosta tarkasteltaessa 3R-menetelmällä käytettiin ENS-jännityksenä kaikkia neljää määritettyä ENS-jännitystä. Väsytyiskoetta lähimpänä oleva tulos saatiin 1 mm undercut -rajaviivan pyörityksellä, joka oli 1707000 sykliä. Kuvassa 19 on esitetty 3R-menetelmän luoma S-N -käyrä T-liitokselle.

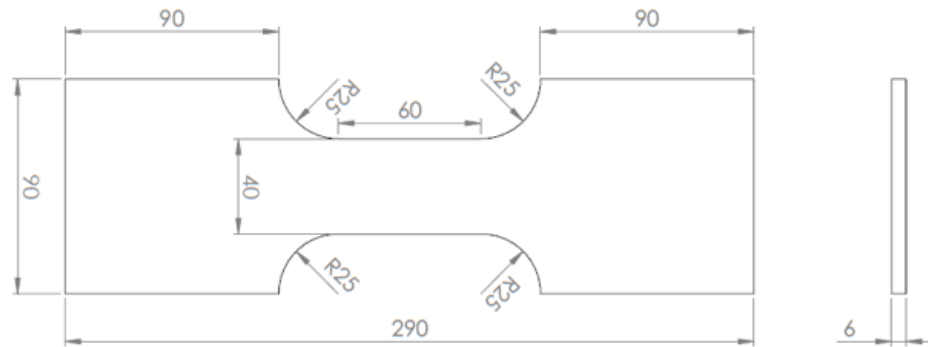


Kuva 19. 3R-menetelmän mukainen jatkuva S-N -käyrä T-liitokselle.

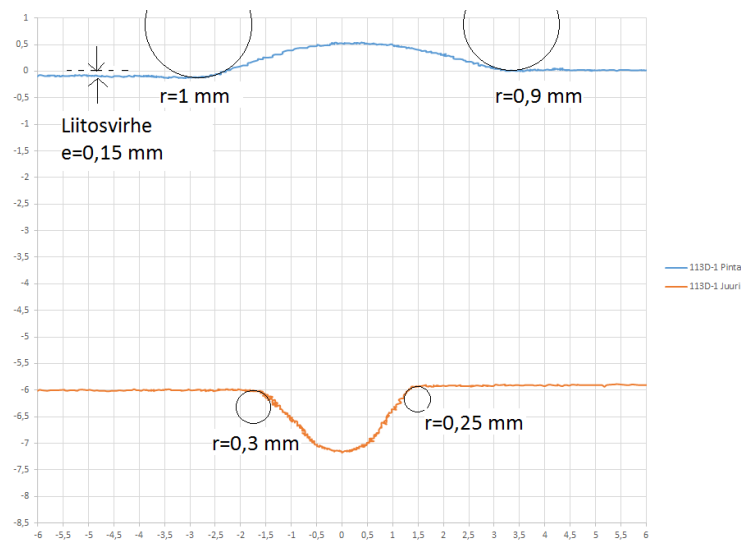
3.3 Päittäisliitos

Päittäisliitoksessa (kuva 20) vaakasuuntaisen vakioamplitudisen voiman vaihtelu oli 46,84 kN. Kappaleen korkeus oli 40 mm ja ainevahvuus 6 mm. Hitsin rajaviivojen pyöritykset

olivat lasermittausdatasta arvioimalla kuvan 21 mukaiset. Lisäksi kappaleessa oli liitosvirhe 0,15 mm, joka huomioitiin FEM-mallissa. Jännityssuhde R oli 0,72, sekä jäännösjännitys -80 MPa hajonneelta rajaviivalta mitattuna.



Kuva 20. Päittäisliitos-koekappale.



Kuva 21. Päittäisliitoksen lasermittausdatasta arvioidut pyöristyssäteet, sekä 0,15 mm liitosvirhe.

3.3.1 Nimellisen jännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa

Nyt $FAT=71$ MPa (Hobbacher 2013, s. 48, tapaus 216). Sijoitetaan arvot nimellisen jännityksen laskukaavaan

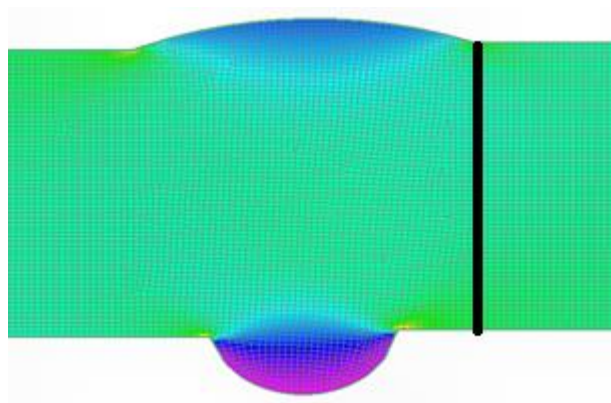
$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{46840N}{40mm * 6mm} = 195,2 MPa$$

ja lasketaan menetelmän mukainen väsymiskestoikä

$$N_f = \left[\frac{1 * 71 \text{MPa}}{1 * 195,2 \text{MPa}} \right]^3 * 2 * 10^6 = 96240 \text{ (kpl)}$$

3.3.2 Rakenteellisen jännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa

FEM-mallista luvun 2.2 mukaisesti paksuuden yli integroimalla laskettu väsymiskestoikä on esitetty liitteessä V. Jännitysarvot poimittiin rajaviivan kohdalle määritetyltä viivalta X-suuntaisina solmujännityksinä (kuva 22). Liitteen V laskennassa rakenteellisen jännityksen osuus summattiin nimellisen jännityksen osuuteen positiivisena (itseisarvona), jolloin Rakenteellisen jännityksen menetelmän mukainen kestoikä määräytyy juuren puolelle, mistä koekappale oli myös hajonnut.



Kuva 22. Päittäisliitoksen Hot Spot –malli.

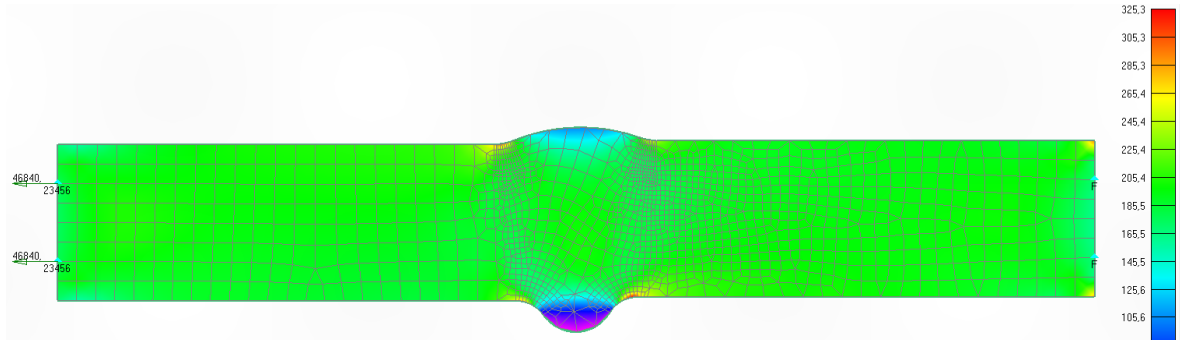
Lisäksi väsymiskestoikä laskettiin käyttämällä venymäliuskamittauksella määritettyä hot spot -jännitystä, joka oli 179 MPa. FAT_{hs} on nyt 100 MPa (Hobbacher 2013, s. 76). Sijoitetaan lukuarvot kaavaan 6 ja lasketaan väsymiskestoikä.

$$N_f = \left[\frac{1 * 100 \text{MPa}}{1 * 179 \text{MPa}} \right]^3 * 2 * 10^6 = 348700 \text{ (kpl)}$$

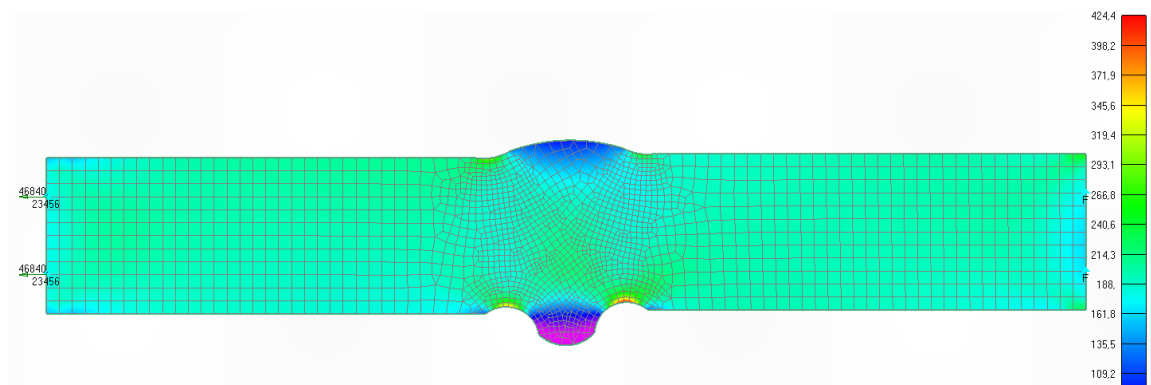
3.3.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa

Päittäisliitoksen tapauksessa symmetrian puuttuessa (hitsin kupu on epäsymmetrinen) mallinnettiin ENS-malliin koko kappale. Jälleen hitsin rajaviivojen pyöristykset ylä- ja

alapinnalla mallinnettiin lasermittausdatasta mitatun todellisen rajaviivan pyöristyksen perusteella, sekä 1 mm pyöristyssäteellä (kaikki 4 rajaviivaa samassa mallissa samalla periaatteella mallinnettu). Kriittinen piste syntyi kappaleen alareunaan, kuvien 23 ja 24 mukaisesti. Väsytykskoikeessa väsytetty kappale murtui myös samasta paikasta. Laskenta on esitetty liitteessä II.



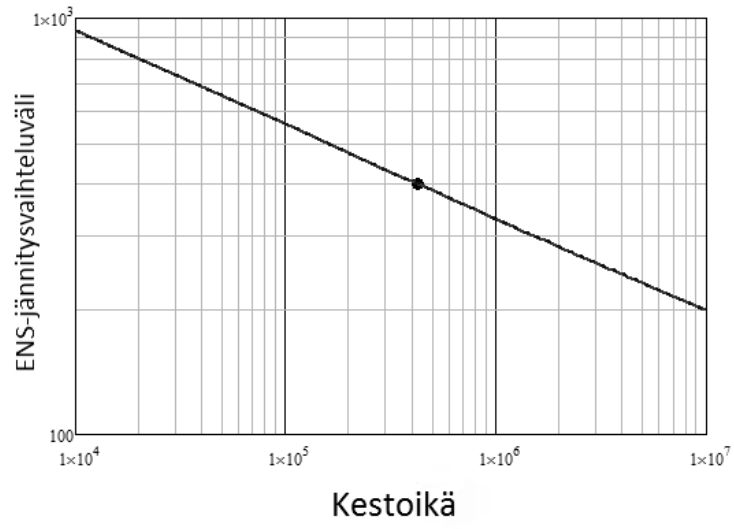
Kuva 23. ENS-laskennan tulos päittäisliitoksessa filled-menetelmällä Von Mises -jännityksillä.



Kuva 24. ENS-laskennan tulos päittäisliitoksen tapauksessa undercut-menetelmällä Von Mises -jännityksillä.

3.3.4 3R-menetelmä päittäisliitoksen tapauksessa

Kuten muissakin tapauksissa, 3R-menetelmän laskenta päittäisliitokselle suoritettiin kaikilla määritetyillä ENS-jännityksillä. Kuvassa 25 on esitetty päittäisliitokselle 3R-menetelmän luoma jatkuva S-N -käyrä.



Kuva 25. 3R-menetelmän mukainen jatkuva S-N –käyrä päittäisliitokselle.

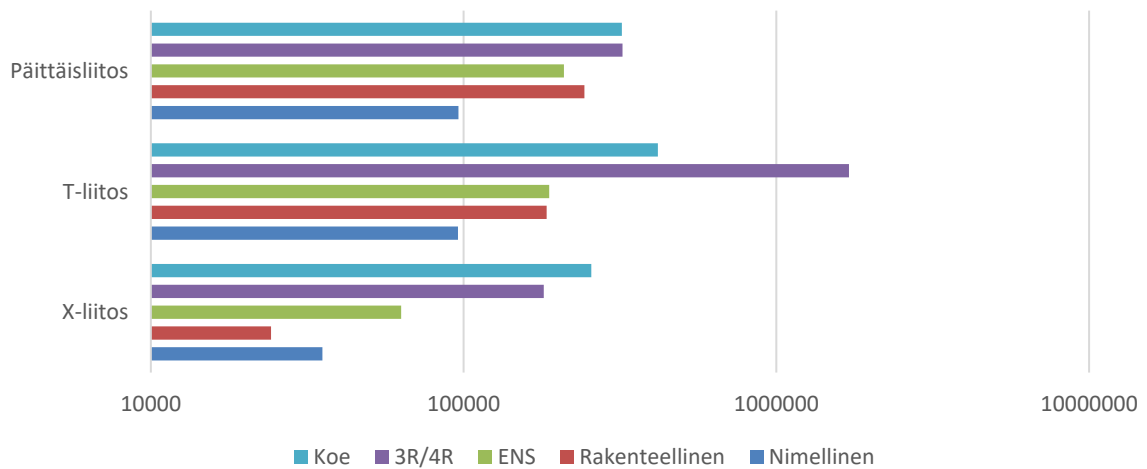
4 TULOKSET

Taulukkoon 2 on koottu kestoikätulokset kaikista menetelmistä siten, että rakenteellisen jännityksen menetelmän jännitysarvona on FEM-mallista paksuuden yli määritetty Hot Spot -jännitys ja ENS-menetelmän jännityksistä on otettu 3R-menetelmän kannalta lähimmäs väsytykskokeen tulosta johtava jännitysarvo. Tulokset on esitetty graafisesti taulukossa 3.

Taulukko 2. Taulukoidut tulokset.

Liitos	Menetelmä	$\Delta\sigma$	Kestoikä
X-liitos	Väsytykskoe	-	256168 sykliä
	Nimellinen	429,9 MPa	35366 sykliä
	Rakenteellinen	435,3 MPa	24240 sykliä
	ENS	632,7 MPa	63170 sykliä
	3R/4R	632,7 MPa	180500 sykliä
T-liitos	Väsytykskoe	-	418064 sykliä
	Nimellinen	220,2 MPa	95910 sykliä
	Rakenteellinen	221,4 MPa	184200 sykliä
	ENS	440 MPa	187800 sykliä
	3R/4R	440 MPa	1707000 sykliä
Päittäisliitos	Väsytykskoe	-	320641 sykliä
	Nimellinen	195,2 MPa	96240 sykliä
	Rakenteellinen	201,8 MPa	243300 sykliä
	ENS	424,4 MPa	209300 sykliä
	3R/4R	424,4 MPa	322300 sykliä

Taulukko 3. Kestoiät.



Huomattavaa on, että T-liitokselle ei ollut alkutiedoissa ilmoitettu lainkaan kulmavirhettä. Venymäliuskoilta saatu jännitys 261 MPa on kuitenkin suurempi kuin nimellinen jännitys 220,2 MPa, joista laskemalla K_s -kertoimeksi (rakenteellinen jännitys jaettuna nimellisellä jännityksellä) saadaan 1,19, mikä kertoo merkittävästä rakenteellisesta jännityksestä. Siten koekappaleessa on täytynyt olla todennäköisesti hitsauksesta aiheutunut kulmavirhe.

ENS- ja 3R-menetelmien mukaiset väsymiskestoiät rajaviivan eri pyöristysmenetelmien ja pyöristyssäteiden perusteella laskettuna on koottu taulukkoon 4. Taulukossa 5 on esitetty rakenteellisen jännityksen menetelmän mukaiset jännitysvaihtelut sekä kestoiät venymäliuskojen ja FEM-mallin perusteella laskettuna.

Taulukko 4. ENS ja 3R/4R.

		ENS	3R/4R
X-liitos Koe: 256168 sykliä	filled 1 mm	16500 sykliä	16440 sykliä
	filled todellinen + 1 mm	63170 sykliä	180500 sykliä
	undercut 1 mm	13430 sykliä	11700 sykliä
	undercut todellinen + 1 mm	46030 sykliä	96660 sykliä
T-liitos Koe: 418064 sykliä	filled 1 mm	246100 sykliä	3045000 sykliä
	filled todellinen + 1 mm	445200 sykliä	11380000 sykliä
	undercut 1 mm	187800 sykliä	1707000 sykliä
	undercut todellinen + 1 mm	337600 sykliä	6094000 sykliä
Päittäisliitos Koe: 320641 sykliä	filled 1 mm	393390 sykliä	827800 sykliä
	filled todellinen + 1 mm	464800 sykliä	1060000 sykliä
	undercut 1 mm	207254 sykliä	322300 sykliä
	undercut todellinen + 1 mm	209300 sykliä	327000 sykliä

Taulukko 5. Hot Spot - jännitykset

	Venymäliuskat		Hot Spot paksuuden yli	
X-liitos	440 MPa	23480 sykl.	435,3 MPa	24240 sykl.
T-liitos	261 MPa	112500 sykl.	221,4 MPa	184200 sykl.
Päittäisliitos	179 MPa	348700 sykl.	201,8 MPa	243400 sykl.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Perinteiset väsymislaskentamenetelmät, eli nimellisen jännityksen, rakenteellisen jännityksen ja tehollisen lovijännityksen (ENS) menetelmä perustuvat kokeellisesti määritettyihin FAT-luokkiin ja ovat siten sidottuja niihin materiaaliominaisuuksiin joilla ne on aikanaan testattu ja joiden perusteella S-N –käyrät on luotu. Käytännössä menetelmät ovat toimivia matalampi lujuuksisille materiaaleille, aina noin 500 MPa myötölujuuteen asti.

Lujemmat teräkset verrattuna pienemmän lujuuden teräksiin kuitenkin mahdollistavat suurempien jännitysten esiintymisen rakenteissa, jota perinteiset väsymislaskentamenetelmät eivät ota mitenkään huomioon (FAT-arvo on vakio). Toinen merkittävä ero matala- ja korkealujuuksisten terästen välillä on väsymissärön ydintymisaika, joka on suurilujuuksisilla teräksillä merkittävästi pidempi. Sen takia esimerkiksi hyvälaatuisen hitsiliitoksen väsymiskestoikä on lujemmasta teräksestä tehtynä merkittävästi pidempi kuin matalamman lujuuden teräksestä tehtynä, vaikka hitsi itsessään olisi identtinen ja kuormitus sama. Toisaalta huonolla hitsilaadulla vaikutus saattaa olla päinvastainen.

Tuloksista huomattiin muiden menetelmien kuin 3R-menetelmän toimivan heikosti X-liitoksen tapauksessa, jossa hitsilaatu ja jälkikäsitteily olivat todella hyvät ja rakenteessa vaikuttanut jännitysvaihtelu suuri. T-liitoksessa ja päittäisliitoksessa hitsiä ei sen sijaan ollut mitenkään käsitelty ja niissä esiintyneet jännitysvaihtelut olivat suhteellisen pieniä verrattuna X-liitoksen tapaukseen. Kuten tuloksista nähdään, nyt ENS-menetelmä ja rakenteellisen jännityksen menetelmä osuivat molemmat verrattain lähelle väsytykskokeessa saatua kestoikää. Voidaan siis päätellä, että lujasta teräksestä valmistettu rakenne suhteellisen pienillä jännitysvaihteluilla ilman merkittävää jälkikäsitteilyä (suurta puristusjäännösjännitystä) käyttäytyy tutkituissa tapauksissa lähes samoin kuin matalamman lujuuden teräkset, jolloin muutkin menetelmät 3R-menetelmän lisäksi antavat oikeansuuntaisia tuloksia.

T-liitoksen tapauksessa 3R-menetelmän tulos erosi kuitenkin todella paljon väsytyiskoetuloksesta. 3R-menetelmän mukaan T-liitoksen väsymiskestoikä olisi ollut erittäin pitkä, noin nelinkertainen väsytykskokeeseen verrattuna. T-liitoksesta oli kuitenkin

mitattu merkittävä (n. 40 MPa, $K_s=1,19$) rakenteellinen jännitys, jolloin kappaleessa on suurella todennäköisyydellä ollut hitsauksesta aiheutuvaa kulmavirhettä. Sitä ei kuitenkaan mallinnettu ENS-malliin, josta saatua jännitysarvoa käytetään myös 3R-menetelmässä. Tämä selittäisi 3R-menetelmän antaman todella pitkän väsymiskestoiän, koska kulmavirheellisessä ENS-mallissa jännitykset olisivat korkeampia ja menetelmien antamat väsymiskestoiät lyhyempiä. Se selittäisi myös, miksi ENS-menetelmä ei antanut lyhyttä kestoikää väsytyksokeeseen verrattuna, kuten muissa tapauksissa (jännitys pienempi kuin todellisuudessa kulmavirheen puutteesta johtuen). Jos kulmavirhe olisi tiedossa ja ENS-malli sen mukainen, voisi 3R-menetelmän tulos olla lähempänä väsytyksoetulosta.

5.1 Menetelmien toimivuus

Tulosten perusteella 3R-menetelmä antaa suhteellisen tarkkoja kestoikätuloksia, jos tarkasteltavan tilanteen lähtötiedot (rajaviivan pyöristys, jäännösjännitykset, geometria ja niin edelleen) ovat tiedossa ja luotettavia. Jos esimerkiksi ENS-malli on virheellinen tai rajaviivan pyöristys on puutteellisesti määritetty, saattaa tulos kuitenkin erota merkittävästi todellisesta väsymiskestoiästä. Paras tulos saatiin käyttämällä ENS-mallin rajaviivan pyöristyssäteen mallinnukseen mahdollisimman paljon tositilannetta muistuttavaa tapaa, eli X-liitoksen tapauksessa filled-menetelmää (TIG-jälkikäsitelty hitsi) ja T-liitoksen sekä päittäisliitoksen tapauksissa undercut-menetelmää (jälkikäsittelemätön hitsi).

T-liitoksen puutteellisten alkutietojen takia ei voida juurikaan tehdä johtopäätöksiä 3R-menetelmän toimivuudesta. X-liitoksen ja päittäisliitoksen tapauksissa 3R-menetelmä näyttäisi kuitenkin toimivan odotusten mukaan, eli antavan merkittävästi parempia tuloksia muihin väsymislaskentamenetelmiin verrattuna.

Nimellisen jännityksen menetelmän toimivuus vaikuttaisi olevan suhteellisen tasaista testatuissa tapauksissa, vaikka tulokset ovatkin melko kaukana todellisesta väsymiskestoiästä. Menetelmän voimakkaasta yksinkertaistuksesta johtuen pienellä kappalemäärällä tehdyn tutkimuksen tuloksista ei kuitenkaan voida lopullisia johtopäätöksiä tehdä. ENS-menetelmän ja rakenteellisen jännityksen menetelmän tarkkuudet vaihtelivat tapausten välillä, mikä kertoo osaltaan väsymiskestoiän arvioinnin haastavuudesta suurlujuus- ja ultralujia teräksiä tarkasteltaessa. Parempi toimivuuden arviointi vaatisi suuremman koekappale-erän.

6 POHDINTA

Voidaan todeta, että tutkimuksen alussa asetettuihin tavoitteisiin päästiin ja tutkimuskysymyksiin vastattiin. Eri väsymislaskentamenetelmien teorian käytiin läpi, minkä jälkeen eri menetelmien toimivuutta testattiin kolmeen erilaiseen S960-suurlujuusteräksestä valmistettuun hitsiliitokseen. Menetelmien antamia tuloksia verrattiin toisiinsa sekä laboratoriossa suoritettuihin väsytykokeisiin ja pohdittiin syitä tulosten taustalla.

Väsymislaskentamenetelmistä 3R-menetelmä nousi esille antamalla muita menetelmiä merkittävästi tarkempia tuloksia muissa paitsi T-liitoksen tapauksessa, jossa mitä todennäköisimmin alkutilanne oli huonosti tiedossa ja sen takia FEM-malli puutteellinen. T-liitoksen tapaus kuitenkin hyvin osoitti alkukartoituksen tärkeyden hyviä tuloksia tavoiteltaessa.

6.1 Tutkimuksen virhetarkastelu sekä jatkotutkimustarve

Jotta eri menetelmien toimivuutta voitaisiin analysoida tarkemmin, pitäisi samanlainen tutkimus tehdä huomattavasti suuremmalle koekappale-erälle. Kolmen väsytykokeen perusteella yksittäiset viat ja väsymiskestoikien yleinen hajonta nousevat liian voimakkaasti esille. Lisäksi 3R-menetelmässä käytetty S-N -käyrä oli niin sanottu mean-, eli keskiarvokäyrä, jonka mukaan 50 % liitoksista hajoaa sitä suuremmilla jännitysarvoilla. Muut menetelmät sen sijaan käyttivät laskennassa karakterista suunnittelukäyrää, jonka mukaan 95 % liitoksista hajoavat käyrää suuremmilla jännitysarvoilla. Siten ainoastaan 3R-menetelmä oli suoraan vertailukelpoinen väsytykokeen kanssa. Tämän tutkimuksen puitteissa FAT-luokkia ei kuitenkaan muunnettu mean-arvoiksi.

Luotettavimmat tulokset vaatisivat siten huomattavasti suuremman koekappale-erän. Tällöin myös 3R-menetelmän mukautuminen eri alkutilanteisiin tulisi paremmin esille, koska kappaleet olisivat muiden väsymislaskentamenetelmien näkökulmasta samanlaisia. Kappaleiden välillä esimerkiksi jäännösännitykset olisivat kuitenkin erilaisia, mikä johtaisi erilaisiin väsymiskestoikiin, minkä pitäisi näkyä 3R-menetelmän tuloksissa.

7 YHTEENVETO

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli selvittää eri väsymislaskentamenetelmien perusteoria sekä soveltaa menetelmiä kolmeen erilaiseen hitsattuun liitokseen. Menetelmien antamia kestoikätuloksia oli myös tarkoitus verrata toisiinsa ja pohtia syitä mahdollisille eroille. Vertailun pohjana käytettiin laboratorioissa väsytyскоestettuja koekappaleita.

Nimellisen jännityksen menetelmän etu muihin väsymislaskentamenetelmiin verrattuna on sen vaatima pieni työmäärä. Menetelmä ei myöskään vaadi minkäänlaista FEM-laskentaa tai mittausta, joita muut menetelmät vaativat. Voimakkaasta yksinkertaistuksesta johtuen nimellisen jännityksen menetelmän kestoikätulokset ovat kuitenkin jossain määrin kyseenalaisia, eivätkä ne tässä työssä olleetkaan erityisen tarkkoja.

Rakenteellisen jännityksen menetelmä sekä ENS-menetelmä vaativat FEM-mallin tai vaihtoehtoisesti rakenteellisen jännityksen menetelmässä voidaan myös käyttää suoraan kappaleesta esimerkiksi venymäliuskoilla mitattuja jännitysarvoja. Tarkastelutapauksiin sovellettaessa antoivat molemmat menetelmät vaihtelevia kestoikätuloksia. X-liitoksen tapauksessa molempien menetelmien kestoikätulokset jäi reilusti alle väsytyскоokeen tuloksen. Syynä tähän oli todennäköisesti liitoksen erittäin hyvä hitsilaatu, sekä suuri puristusjäännösjännitys, jota rakenteellisen jännityksen menetelmä tai ENS-menetelmä eivät osaa ottaa huomioon. Päittäisliitoksen ja T-liitoksen tapauksessa molemmat menetelmät osuivat suhteellisen lähelle väsytyскоokeen kestoikätulosta.

3R-menetelmän tulokset olivat X- ja päittäisliitoksessa merkittävästi muita menetelmiä tarkempia. T-liitoksen tapauksessa 3R-menetelmän antamat väsymiskestoikä tulokset olivat reilusti väsytyскоokeen kestoikätulosta pidempiä, mutta mallin todennäköisestä kulmavirheen puutteesta johtuen tulosten perusteella ei voida johtopäätöksiä tehdä. Tapaus kuitenkin osoitti, että 3R-menetelmän toimivuus perustuu tarkasteltavan tilanteen hyvään tuntemukseen.

LÄHTEET

Fricke, W. 2010. IIW recommendations for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. 36 s.

Hobbacher, A. 2007. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2151-07/XV-1254-07. 148 s.

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

Mettänen, H. 2017. Mittausdataa [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Matias Tourula. Lähetetty 30.3.2017 klo 14:58 (GMT +0200). Liitetiedostot: ”K3TB2.xls”, ”113D-I-levyaihio.xlsx”, ”Alkuarvot.xlsx”

Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet. 1. painos. Helsinki: Painatuskeskus. 337 s.

Nykänen, T. & Björk, T. 2015. A new proposal for assessment of the fatigue strength of steel butt-welded joints improved by peening (HFMI) under constant amplitude tensile loading. In: Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures. S. 566-582.

Nykänen, T., Mettänen, H., Ahola, A., Skriko, T., Hämäläinen, O-P & Björk, T. 2016. 3R-menetelmän käyttö vaihtuva-amplitudisesti kuormitettujen hitsausliitosten väsymisanalysoinnissa. Rakenteiden Mekaniikka, 49: 4. S. 176-201.

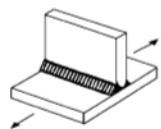
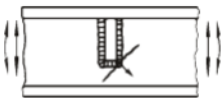
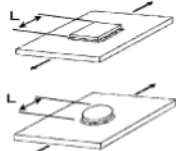
Pirinen, M. 2013. The effects of welding heat input on the usability of high strength steels in welded structures [verkkodokumentti]. Lappeenranta: Toukokuu 2013 [viitattu 20.3.2017]. Väitöskirja. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, teknillinen tiedekunta.

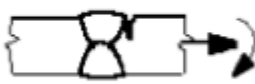
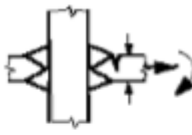

Radaj, D, Sonsino C.M & Fricke, W. 2006. Fatigue assessment of welded joints by local approaches. 2. Painos. Cambridge: Woodhead publishing limited. 346 s.

SFS EN-ISO-1993-1-9. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. 2008. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 41 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä. Korjattu 2008.

Sonsino, C. M., Fricke, W., de Bruyne, F., Hoppe, A., Ahmadi, A. & Zhang, G. 2010. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – Background and applications. *International Journal of Fatigue*, 34: 1. S. 2-1

Ylempi nimellisen jännityksen taulukko, alempi rakenteellisen jännityksen taulukko.

No.	Structural Detail	Description (St.= steel; Al.= aluminium)	FAT St.	FAT Al.	Requirements and Remarks
500 Non-load-carrying attachments					
511		Transverse non-load-carrying attachment, not thicker than main plate K-butt weld, toe ground Two sided fillets, toe ground Fillet weld(s), as welded thicker than main plate	100 100 80 71	36 36 28 25	Grinding marks normal to weld toe An angular misalignment corresponding to $k_m = 1.2$ is already covered
512		Transverse stiffener welded on girder web or flange, not thicker than main plate. K-butt weld, toe ground Two-sided fillets, toe ground fillet weld(s): as welded thicker than main plate	100 100 80 71	36 36 28 25	
513		Non-load-carrying rectangular or circular flat studs, pads or plates. $L \leq 50$ mm $L > 50$ and ≤ 150 mm $L > 150$ and ≤ 300 mm $L > 300$ mm	80 71 63 50	28 25 20 18	

No.	Structural detail	Description	Requirements	FAT Steel	FAT Alu.
1		Butt joint	As welded, NDT	100	40
2		Cruciform or T-joint with full penetration K-butt welds	K-butt welds, no lamellar tearing	100	40
3		Non load-carrying fillet welds	Transverse non-load carrying attachment, not thicker than main plate, as welded	100	40

X-liitos**filled 1 mm**

$$\Delta\sigma := 989.7\text{MPa}$$

$$N_f := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1.65 \times 10^4$$

undercut 1 mm

$$\Delta\sigma_2 := 1060\text{MPa}$$

$$N_{f2} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_2}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1.343 \times 10^4$$

undercut todellinen

$$\Delta\sigma_3 := 703.1\text{MPa}$$

$$N_{f3} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_3}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 4.603 \times 10^4$$

filled todellinen

$$\Delta\sigma_4 := 632.7\text{MPa}$$

$$N_{f4} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_4}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 6.317 \times 10^4$$

T-liitos**filled todellinen**

$$\Delta\sigma_5 := 330\text{MPa}$$

$$N_{f5} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_5}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 4.452 \times 10^5$$

undercut todellinen

$$\Delta\sigma_6 := 361.9\text{MPa}$$

$$N_{f6} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_6}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 3.376 \times 10^5$$

filled 1 mm

$$\Delta\sigma_9 := 402.1\text{MPa}$$

$$N_{f9} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_9}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.461 \times 10^5$$

undercut 1 mm

$$\Delta\sigma_{10} := 440\text{MPa}$$

$$N_{f10} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{10}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1.878 \times 10^5$$

Päittäisliitos**filled todellinen**

$$\Delta\sigma_7 := 325.3\text{MPa}$$

$$N_{f7} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_7}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 4.648 \times 10^5$$

undercut todellinen

$$\Delta\sigma_8 := 424.4\text{MPa}$$

$$N_{f8} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_8}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.093 \times 10^5$$

filled 1 mm

$$\Delta\sigma_{11} := 343.9\text{MPa}$$

$$N_{f11} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{11}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 3.934 \times 10^5$$

undercut 1 mm

$$\Delta\sigma_{12} := 425.8\text{MPa}$$

$$N_{f12} := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{12}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.073 \times 10^5$$

X-liitoksen hot spot -kestoikä

0	1423.902
0.094048	1037.192
0.188096	650.4812
0.282144	604.1898
0.376192	557.8983
0.47024	526.6026
0.564288	495.3069
0.658336	477.4838
0.752384	459.6606
0.846432	447.7896
0.94048	435.9186
1.034528	427.6305
1.128576	419.3424
1.222624	413.4512
1.316672	407.5601
1.41072	402.745
1.504768	397.9298
1.598816	393.8041
1.692864	389.6784
1.786912	386.4725
1.88096	383.2666
1.975008	380.4264
2.069056	377.5862
2.163104	375.5652
2.257152	373.5444
2.3512	371.8844
2.445248	370.2245
2.539296	368.8647
2.633344	367.505
2.727392	366.3984
2.82144	365.2917
2.915488	364.4048
3.009536	363.5178
3.103584	362.8214
3.197632	362.1249
3.29168	361.6107
3.385728	361.0965

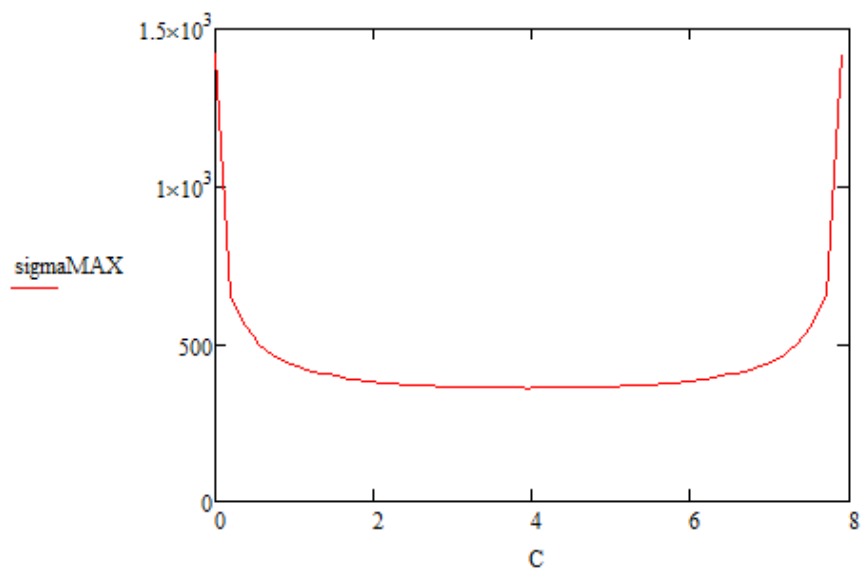
$C_{xx} =$	3.479776	360.7191
	3.573824	360.3418
	3.667872	360.1414
	3.761192	359.941
	3.855968	359.8997
	3.950016	359.8584
	4.044064	359.8997
	4.138112	359.941
	4.23216	360.1414
	4.326208	360.3418
	4.420256	360.7191
	4.514304	361.0965
	4.608352	361.6107
	4.7024	362.1249
	4.796448	362.8214
	4.890496	363.5178
	4.984544	364.4048
	5.078592	365.2917
	5.17264	366.3984
	5.266688	367.505
	5.360736	368.8647
	5.454784	370.2245
	5.548832	371.8844
	5.64288	373.5444
	5.736928	375.5652
	5.830976	377.5862
	5.925024	380.4264
	6.019072	383.2666
	6.11312	386.4725
	6.207168	389.6784
	6.301216	393.8041
	6.395264	397.9298
	6.489312	402.745
	6.58336	407.5601
	6.677408	413.4512
	6.771456	419.3424
	6.865504	427.6305
	6.959552	435.9186

sigmaMAX :=

vsMAX := cspline(C, sigmaMAX) =

	0
0	0
1	3
2	2
3	-6.208·10 ⁴
4	-0.09
5	6.208·10 ⁴
6	-1.741·10 ⁴
7	7.574·10 ³
8	-2.707·10 ³
9	3.255·10 ³
10	-1.175·10 ³
11	1.446·10 ³
12	-570.591
13	836.465
14	-344.818
15	...

0.999992	435.3110
7.0536	447.7896
7.147648	459.6606
7.241696	477.4838
7.335744	495.3069
7.429792	526.6026
7.52384	557.8983
7.617888	604.1898
7.711936	650.4812
7.805984	1037.192
7.900032	1423.902



t := 7.9

$$\sigma(x) := \text{interp}(vsMAX, C, \text{sigmaMAX}, x)$$

$$\sigma_{m_max} := \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) dx = 435.311$$

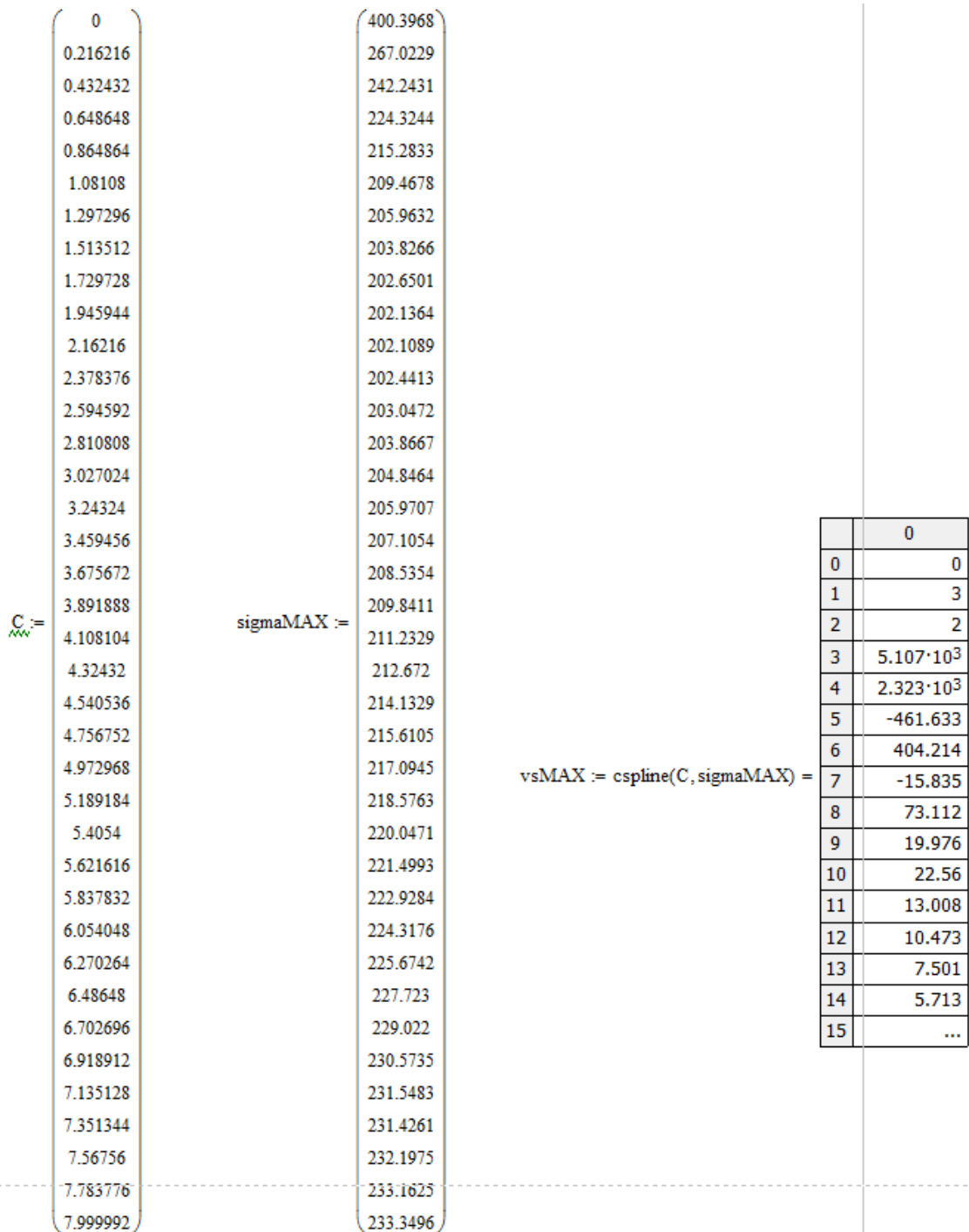
$$\sigma_{b_max} := \left(\frac{6}{t^2}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \cdot \left[\left(\frac{t}{2}\right) - x\right] dx = 0.012$$

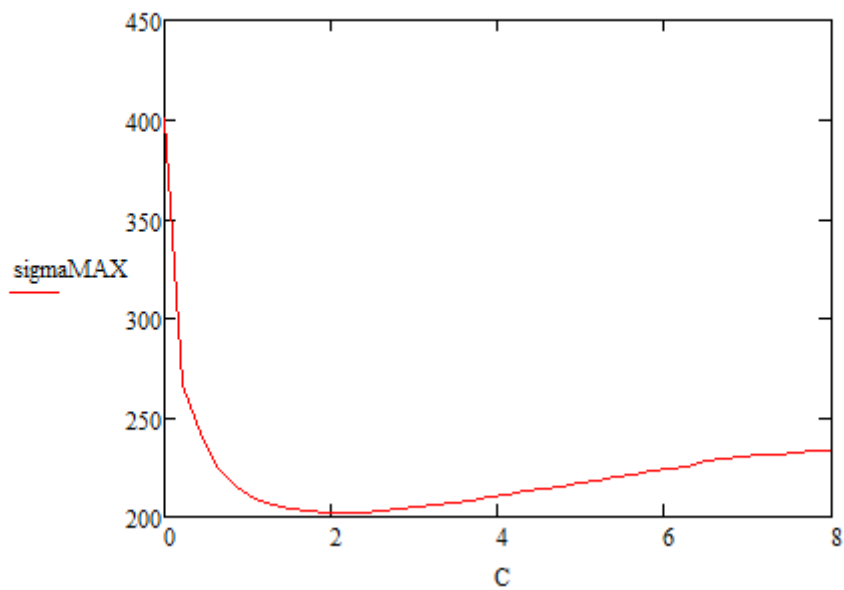
$$\Delta\sigma_{hs} := |\sigma_{m_max}| + |\sigma_{b_max}| = 435.323$$

$$FAT := 100$$

$$N := \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_{hs}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.424 \times 10^4$$

T-liitoksen hot spot -kestoikä





$t := 8$

$\sigma(x) := \text{interp}(\text{vsMAX}, C, \text{sigmaMAX}, x)$

$$\sigma_{m_max} := \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \, dx = 219.94 \qquad \sigma_{b_max} := \left(\frac{6}{t^2}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \cdot \left[\left(\frac{t}{2}\right) - x\right] \, dx = -1.477$$

$$\Delta\sigma_{hs} := |\sigma_{m_max}| + |\sigma_{b_max}| = 221.417 \qquad \text{FAT} := 100$$

$$N := \left(\frac{\text{FAT}}{\Delta\sigma_{hs}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 1.842 \times 10^5$$

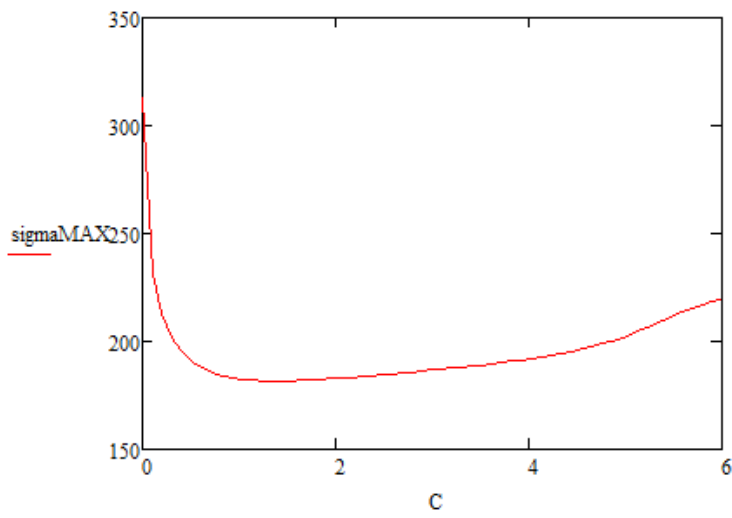
Päätisliitoksen hot spot -kestoikä

	0		313.2701
	0.103448		231.6374
	0.206896		213.2149
	0.310344		201.7346
	0.413792		195.1134
	0.51724		190.7012
	0.620688		187.7173
	0.724136		185.6353
	0.827584		184.1761
	0.931032		183.162
	1.03448		182.4745
	1.137928		182.0338
	1.241376		181.7817
	1.344824		181.6763
	1.448272		181.6849
	1.55172		181.7826
	1.655168		181.9489
	1.758616		182.1718
	1.862064		182.4414
	1.965512		182.7477
	2.06896		183.0808
	2.172408		183.4354
	2.275856		183.8068
	2.379304		184.192
	2.482752		184.5879
	2.5862		184.9926
	2.689648		185.4048
	2.793096		185.8245
	2.896544		186.2549
$C_w :=$	2.999992	$\text{sigmaMAX} :=$	186.6996
	3.10344		187.1527
	3.206888		187.6153
	3.310336		188.0904
	3.413784		188.5798
	3.517232		189.0869
	3.62068		189.6164
	3.724128		190.1738

5.827070
3.931024
4.034472
4.13792
4.241368
4.344816
4.448264
4.551712
4.65516
4.758608
4.862056
4.965504
5.068952
5.1724
5.275848
5.379296
5.482744
5.586192
5.68964
5.793088
5.896536
(5.999984)

190.7001
191.3979
192.076
192.8079
193.6064
194.4818
195.4287
196.4695
197.6403
198.9374
200.3623
201.9221
203.6159
205.435
207.3615
209.361
211.3853
213.3692
215.2353
216.8952
218.2635
(219.2665)

+



$$t := 6$$

$$\sigma(x) := \text{interp}(vsMAX, C, sigmaMAX, x)$$

$$\sigma_{m_max} := \left(\frac{1}{t}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \, dx = 194.208$$

$$\sigma_{b_max} := \left(\frac{6}{t^2}\right) \cdot \int_0^t \sigma(x) \left[\left(\frac{t}{2}\right) - x\right] \, dx = -7.598$$

$$\Delta\sigma_{hs} := |\sigma_{m_max}| + |\sigma_{b_max}| = 201.805$$

$$FAT := 100$$

$$N := \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_{hs}}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 2.434 \times 10^5$$