

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

**VOIMALIITOKSEN VÄSYMISLUJUUDEN PARANTAMINEN MUOTOILUN  
AVULLA**

**ENHANCING THE FATIGUE STRENGTH OF LOAD-CARRYING WELDS US-  
ING IMPROVED STRUCTURAL DESIGN**

Lappeenrannassa 24.3.2023

Jesse Turunen

Tarkastajat: TkT Antti Ahola

Prof. Timo Björk

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Jesse Turunen

### **VOIMALIITOKSEN VÄSYMISKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN MUOTOILUN AVULLA**

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

31 sivua, 15 kuvaa

Tarkastajat: TkT Antti Ahola ja Prof. Timo Björk

Avainsanat: Väsymiskestävyys, FE-analyysi, jännityskonsentraatiokerroin, muotoilu, FAT-luokka

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli tutkia liitettävän levyn muotoilun vaikutusta kylkihitsatun voimaliitoksen väsymiskestävyyteen. Tavoitteena oli löytää FE-analyysin pohjalta liitettävälle levyille muotoilu, jolle voitaisiin muodostaa korotettu FAT-luokka.

Referenssitapauksena pidettiin EC3-standardista löytyvää suorakulmaista muotoilua, jonka FAT-luokaksi on määritetty FAT 50. Vaihtoehtoisia muotoja liitettävälle levyille oli neljä kappaletta: sisäänpäin tehty viiste, ulospäin tehty viiste, pyöristyksen tekeminen levyyn sekä sisäänpäin tehtävän viisteen ja levyn pyöristyksen yhdistelmä. Vaihtoehtoisia muotoja analysoitiin 2D-keskipintamalleilla, jonka jälkeen parhaimmaksi osoittautunutta muotoa analysoitiin vielä 3D-tilavuuselementtimalleilla.

Paras muotoiluvaihtoehto eli alhaisimmat jännityskonsentraatiopiikit saatiin muodolla, jossa yhdistyi 30° sisäänpäin tehtävä viiste ja levyn leveyden kasvattaminen pyöristyssäteellä  $R = 220$  mm. Pienentyneiden jännityskonsentraatiopiikkien perusteella liitokselle voitiin muodostaa laskennallinen FAT-luokka, jonka arvoksi saatiin FAT 63. Korotetun FAT-luokan ansioista liitoksen laskennallinen kestoikä kasvoi noin 100 %.

## **ABSTRACT**

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

Jesse Turunen

### **ENHANCING THE FATIGUE STRENGTH OF LOAD-CARRYING WELDS USING IMPROVED STRUCTURAL DESIGN**

Bachelor's thesis

2023

31 pages, 15 figures

Examiners: D.Sc. (Tech.) Antti Ahola and Prof. Timo Björk

Keywords: Fatigue strength, FE-analysis, stress concentration factor, structural design, FAT-class

The purpose of this bachelor's thesis was to examine the effect of structural design on the fatigue performance of longitudinally loaded lap joint with side fillet welds. The goal is to use FE-analysis to find a shape for connected plate which would allow for raised FAT-class.

The reference shape for connected plate was rectangular and EC3-standard states that its FAT-class is FAT 50. Four different shapes were analysed: inward bevel, outward bevel, rounding the plate and combination of inward bevel and rounding the plate. Research started with analysing 2D-midsurface models to find the best shape. After that, 3D-solid element models were created to obtain more accurate results.

The best design was obtained with shape that combined 30° inward bevel and rounding the plate with radius  $R = 220$  mm. Due to lowered maximum values of stress concentration spikes we were able to raise FAT-class from FAT 50 into FAT 63. Calculated fatigue durability for this joint was increased by 100 % due raised FAT-class.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

|                    |  |       |
|--------------------|--|-------|
| $a_{\text{hitsi}}$ | hitsin a-mitta                         | [mm]  |
| $E$                | kimmomoduuli                           | [GPa] |
| FAT                | väsymisluokka                          | [MPa] |
| $L_{\text{hitsi}}$ | hitsin pituus                          | [mm]  |
| $N_{\text{FAT50}}$ | rakenteen kestoikä sykleittäin, FAT 50 | [kpl] |
| $N_{\text{FAT63}}$ | rakenteen kestoikä sykleittäin, FAT 63 | [kpl] |
| $N_{\text{cycle}}$ | rakenteen kestoikä sykleittäin         | [kpl] |
| $R$                | pyöristyssäde                          | [mm]  |
| $t_{\text{levy}}$  | levyn paksuus                          | [mm]  |

### Kreikkalaiset

|                      |                                |       |
|----------------------|--------------------------------|-------|
| $\alpha$             | viisteen kulma                 | [°]   |
| $\Delta\sigma$       | ekvivalentti kuormitusvaihtelu | [MPa] |
| $\sigma_{\text{hs}}$ | hot spot -jännitys             | [Mpa] |

### Dimensiottomat luvut

|       |                              |
|-------|------------------------------|
| $K_S$ | Jännityskonsentraatiokerroin |
| $m$   | SN-käyrän kaltevuus          |
| $\nu$ | Poissonin vakio              |

## Alaindeksit

|      |                    |
|------|--------------------|
| ref  | referenssitapaus   |
| vert | vertailtava tapaus |

## Lyhenteet

|      |                                    |
|------|------------------------------------|
| EC3  | Eurocode 3                         |
| FEA  | Finite Element Analysis            |
| HFMI | High Frequency Mechanical Impact   |
| TIG  | Tungsten Inert Gas                 |
| IIW  | International Institute of Welding |

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### SISÄLLYSLUETTELO

|          |  |    |
|----------|--|----|
| <b>1</b> | <b>JOHDANTO</b> .....  | 7  |
| 1.1      | Tutkimusongelman kuvaus ja tutkimuksen tavoitteet.....                           | 7  |
| 1.2      | Työn suorittaminen ja rajaus .....   | 8  |
| <b>2</b> | <b>KIRJALLISUUSKATSAUS</b> .....   | 9  |
| <b>3</b> | <b>TEORIAA</b> .....   | 13 |
| 3.1      | Jännityskonsentraatiokertoimen määrittäminen.....                                | 13 |
| 3.2      | SN-käyrät ja FAT-luokat.....   | 14 |
| 3.3      | Laskennallisen kestoajan määrittäminen nimellisen jännityksen menetelmällä ..... | 16 |
| 3.4      | Hot spot- jännityksen määrittäminen ja laskennallinen FAT-luokka .....           | 17 |
| <b>4</b> | <b>TUTKIMUSMENETELMÄT</b> .....  | 18 |
| 4.1      | Referenssitapauksen mallintaminen 2D-keskipintamalleilla .....                   | 19 |
| 4.2      | Vaihtoehtoiset muotoilut liitettävälle levyille .....                            | 21 |
| <b>5</b> | <b>TULOKSET</b> .....  | 23 |
| <b>6</b> | <b>TULOSTEN ANALYSOINTI</b> .....  | 24 |
| <b>7</b> | <b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....  | 29 |
|          | <b>LÄHTEET</b> .....   | 31 |

# 1 JOHDANTO

Teräsrakenteiden ja koneenosien mitoittaminen pelkän staattisen kestävyuden kriteereillä ei usein riitä, sillä rakenteiden väsyminen voi olla mitoittava tekijä jopa myötörajaa pienemmillä nimellisen jännityksen arvoilla. Ilmiönä väsyminen lähtee liikkeelle vaihtelevan kuormituksen aiheuttamista jännityksistä tai mahdollisista alkuvirheistä, mitkä aiheuttavat särön ydintymisen. Ydintymisvaiheen jälkeen seuraa särön kasvu, joka johtaa lopulta murtumaan. Rakenteiden ja liitosten kestoikää voidaan arvioida käyttämällä esimerkiksi EC3:sta (Eurocode 3) tai IIW:stä (International Institute of Welding) löytyviä esimerkkitapauksia, joille on kokeellisesti määritetty eri väsymisloukkia eli FAT-loukkia.

## 1.1 Tutkimusongelman kuvaus ja tutkimuksen tavoitteet

Tämän kandidaatintyön tutkimusongelmana on kylkihitsatulle liitokselle asetettu alhainen FAT-loukka. EC3:ssa (SFS-EN 1993-1-9 2005, s. 25) ja IIW:ssä (Hobbacher 2016, s. 55) on käsitelty vain suorakaiteen muotoista geometriaa liitettävälle levyille. Kyseisen liitoksen FAT-loukaksi on ilmoitettu FAT 50. Tämä on hyvin alhainen luokitus hitsatulle liitokselle, mutta liitettävän levyn muotoilun avulla FAT-loukkaa voitaisiin mahdollisesti korottaa. Liitettävän levyn muotoilun tarkoituksena on saada pienennettyä hitsissä ja liitettävässä levyssä havaittavia jännityskonsentraatiopiikkejä. Levyn muotoilu voidaan toteuttaa helposti modernilla termisillä leikkausmenetelmillä ilman lisäkustannuksia.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on löytää vaihtoehtoinen muotoilu kylkihitsatun liitoksen liitettävälle levyille, jotta liitoksen FAT-loukkaa voitaisiin korottaa. Liitettävän levyn geometriaa haetaan FE-analyysien (FEA, Finite element analysis) pohjalta, joista saatavia jännityskonsentraatiopiikkejä verrataan suorakaiteen muotoiseen referenssitapaukseen. Jännityskonsentraatiopiikkien vertailu ei ole absoluuttisesti oikea ratkaisu ongelman ratkaisemiseksi, koska rajoittavaksi tekijäksi voi muodostua muukin tekijä kun hitsissä vaikuttava leikkausjännitys tai levyssä vaikuttava normaalijännitys. Jännityskonsentraatiopiikkien vertailulla saadaan kuitenkin suuntaa antavia tuloksia, jos elementtikoko pidetään vakiona eri analysoitavien mallien välillä.

Tässä tutkimuksessa pyritään myös vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Voidaanko liitettävän levyn muotoilulla parantaa kylkihitsatun liitoksen väsymiskestävyyttä?
- Millaisia erilaisia vaihtoehtoisia muotoja liitettävälle levyille voitaisiin käyttää?
- Voidaanko vaihtoehtoisella muotoilulla korottaa FAT-luokkaa?

## 1.2 Työn suorittaminen ja rajaus

Tutkimus aloitetaan mallintamalla referenssitapaus (kuva 7, detalji 612), jossa suorakaiteen muotoinen levy liitetään aluslevyyn ideaalisella pienaliitoksella. Geometrian mallinnuksen jälkeen referenssitapaus analysoidaan Femap-ohjelmistolla käyttämällä 2D-keskipintamallia. Tämän jälkeen lähdetään etsimään erilaisia muotoiluja liitettävälle levyille ja analysoidaan käytettyjen pyöristysten ja viisteiden vaikutusta jännityskonsentraatiopiikkeihin. Saatut tulokset taulukoidaan ja jännityskonsentraatiopiikkejä verrataan referenssitapauksesta saatuihin arvoihin, jotta eri tapausten vertailu olisi helpompaa. Tässä kohtaa tavoitteena on löytää liitettävälle levyille geometria, jossa jännityskonsentraatiopiikki olisi mahdollisimman alhainen sekä hitsissä että levyssä. Eri muotoilujen vertailu suoritetaan rakenteellisen jännityksen tasolla, joka ei ota huomioon esimerkiksi rajaviivan mahdollista särömäisyyttä. Parhaimmaksi todetun muotoilun löydyttyä analyysi suoritetaan uudelleen käyttäen 3D-tilavuuselementtejä, jotta tulokset olisivat tarkempia, ja siten luotettavimpia. Lopuksi parhaimmaksi todetulle muotoilulle lasketaan teoreettinen FAT-luokka (kaava 3.5) 3D-tilavuuselementtimallien tuloksien perusteella.

Kuormituksena käytetään yksikkövoiman suuruista voimaa, joten analyyseista saatavat tulokset ovat suoraan jännityskonsentraatiokertoimia. Kuormituksen ajatellaan olevan puhdasta vetoa eli levyjen epäkeskisyydestä syntyvää momenttia ei oteta huomioon suoritetuissa analyyseissa. Tämä reunaehto toteutetaan estämällä tasosta pois päin suuntautuvat siirtymät analyysoitavissa rakenteissa. Aluslevyn oletetaan olevan jäykästi kiinnitetty sen ulkoreunoista, ja sen geometria pidetään samana analyyksien välillä. Elementtiverkon koko ja hitsien pituudet ja a-mitat pidetään vakioina analyyksien välillä, jotta saatut tulokset olisivat



vertailukelpoisia keskenään. Kaikkien analysoitavien mallien oletetaan olevan yhteen ker-  
taan symmetrisiä, joten analyyseissa voidaan hyödyntää rakenteista tehtyjä puolimalleja.

## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Kylkihitsatun liitoksen väsymiskestävyyden parantamisesta muotoilun avulla ei löytynyt aiempia tutkimuksia, mutta rajausta laajentamalla löytyi samankaltainen tutkimus. Kyseisen tutkimuksen otsikkona on Turveperävaunun väsymiskestävyyden parantaminen (Hartikainen 2013).

Hartikaisen (2013) suorittaman tutkimuksen tavoitteena oli ketjupurkuperävaunun runkorakenteen väsymiskestävyyden parantaminen. Hartikaisen tutkimuksessa mainitaan seuraavat tutkimuskysymykset:

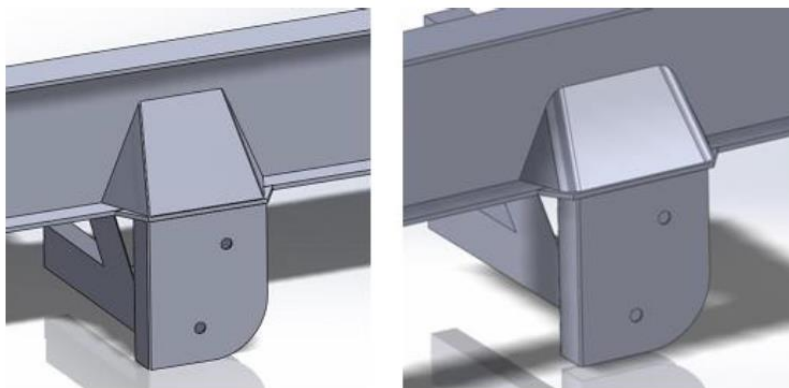
- Mikä on nykyisen runkorakenteen väsymiskestoikä oletetuilla kuormanvaihteluilla?
- Millä ratkaisulla väsymiskestävyyttä voitaisiin parantaa?
- Kuinka paljon väsymiskestoikä paranisi uudella ratkaisulla verrattuna jo käytössä olevaan rakenneratkaisuun?

Runkorakenteen kriittinen osa on asiakaspalautteen mukaan rungon ja renkaiden välillä olevat konsolit, joiden läheisyydessä on havaittu väsymissäröjä jo muutaman vuoden käytön jälkeen. Tutkimuksessaan Hartikainen (2013, s. 22–24) lähti parantamaan runkorakenteen väsymiskestävyyttä muokkaamalla ja uudelleenmitoittamalla kuvassa 1 esitettyä kriittiseksi osaksi todettua konsolia. Hartikainen käytti tutkimusmenetelmänä FE-analyysia, jonne hän toi runkorakenteen geometrian.



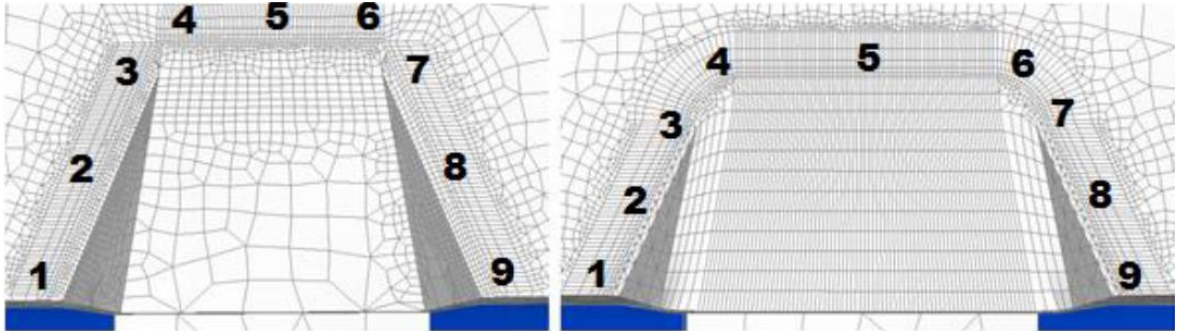
Kuva 1. Analysoitavan konsolin rakenne (Hartikainen 2013, s. 23)

Tutkimuksessaan Hartikainen (2013, s. 24–28) esitti eri tapoja konsolin muokkaukselle. Hartikainen päätyi pienentämään konsolin ulkonemaa 20 mm verran sekä kasvattamaan konsolilevyn taivutussädettä 40 mm:iin. Hartikainen perusteli tekemiään muutoksia muun muassa voimavuon jouhevan kulkeutumiseen vedoten. Kuvassa 2 vasemmalla on esitetty alkuperäisen konsolin rakenne ja oikealla on Hartikaisen esittämä paranneltu versio.

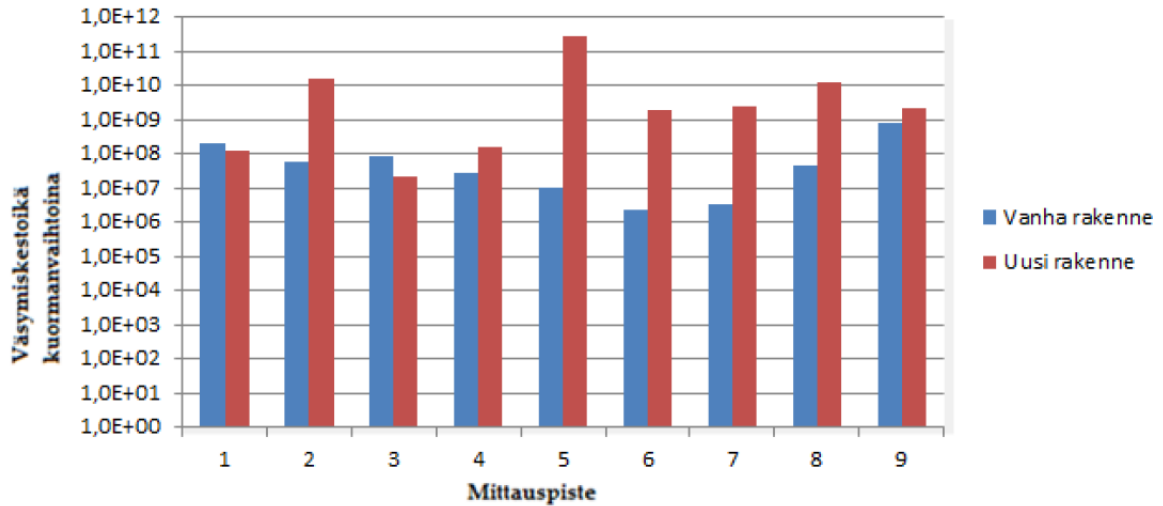


Kuva 2. Alkuperäinen sekä paranneltu rakenneratkaisu (Hartikainen 2013, s. 36)

Hartikainen (2013, s. 33–34) suoritti rakenteiden vertailun luomalla useita pisteitä analysoitaviin rakenteisiin, joiden kohdalle hän laski hot spot -jännitykset. Kuvassa 3 on esitetty rakenteisiin asetettujen pisteiden sijainnit ja kuvassa 4 on esitetty kyseisten laskentapisteitä vastaavat laskennalliset kestoiät.



Kuva 3. Rakenteisiin sijoitettujen laskentapisteiden sijainnit (Hartikainen 2013 s. 37)



Kuva 4. Laskentapisteiden laskennalliset kestoiät 10 000 kg kuormituksella (Hartikainen 2013 s. 38)

Hartikaisen (2013, s. 38) tutkimuksen tulokset ovat nähtävissä kuvassa 4. Vanhan rakenteen kriittiseksi kohdaksi osoittautui mittauspiste kuusi, jonka väsymiskestoikä oli noin 2,4 miljoonaa sykliä. Uuden konsolin rakenteen kriittiseksi kohdaksi osoittautui mittauspiste kolme, jonka väsymiskestoikä on noin 23 miljoonaa sykliä. Hartikaisen tavoitteena oli

nelinkertaistaa rakenteen väsymiskestoikä, joten Hartikaisen asettama tavoite on saavutettu hänen tutkimustuloksiinsa vedoten.

Hartikaisen (2013) tekemän tutkimuksen perusteella näyttäisi siltä, että voimavuon sujuva kulkeutuminen rakenteesta toiseen auttaa parantamaan tarkasteltavan kokonaisuuden väsymiskestävyyttä. Hartikaisen analysoimaan rakenteeseen kohdistui leikkausvuon lisäksi kuormituksen epäkeskisyydestä aiheutunutta taivutusta, mutta tässä tutkimuksessa liitettävän levyn epäkeskisyydestä aiheutuvaa taivutusta ei oteta huomioon. Voimavuon sujuvan kulkeutumisen sekä jouhevien muotojen huomioonottaminen on todennäköisesti avainasemassa myös kylkihitsatun liitoksen väsymiskestävyyttä parantaessa.

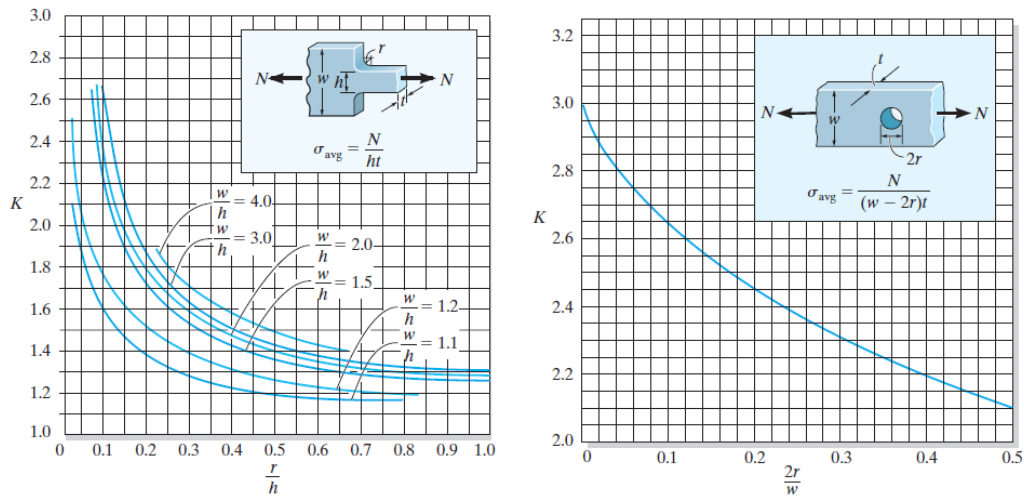
## 3 TEORIAA

Tämän luvun tavoitteena on antaa yleiskatsaus tähän kandidaatintyöhön liittyviin keskeisiin käsitteisiin ja sovellettuihin teorioihin.

### 3.1 Jännityskonsentraatiokertoimen määrittäminen

Geometriset epäjatkuvuuskohdat eli äkilliset poikkipinta-alan muutokset aiheuttavat jännityskeskittymiä kappaleeseen. Geometrisia epäjatkuvuuskohtia ovat esimerkiksi leveyden muuttuminen sekä kappaleeseen tehdyt lovet, pyöristykset ja reiät. Jännityskeskittymät aiheuttavat nimellistä jännitystä suuremman jännityksen, jota voidaan kuvata jännityskonsentraatiokertoimen  $K_s$  avulla. Jännityskonsentraatiokerroin kuvaa kappaleessa vaikuttavan suurimman jännityksen ja nimellisen jännityksen suhdetta. (Hibbeler 2017, s. 181–183)

Staattisesti kuormitetun rakenteen tarkastelussa jännityskonsentraatiokertoimia ei usein oteta huomioon, mutta jos rakenne on hauras tai väsytytysti kuormitettu niin jännityskonsentraatiokertoimet on otettava huomioon. Kirjallisuudesta löytyy tavanomaisille tapauksille kokeellisesti määritettyjä kuvaajia, joista voidaan tulkita jännityskonsentraatiokertoimien arvoja. Kuvassa 5 on esitetty kahden erilaisen epäjatkuvuuden vaikutus jännityskonsentraatiokertoimeen. (Hibbeler 2017, s. 181–183)

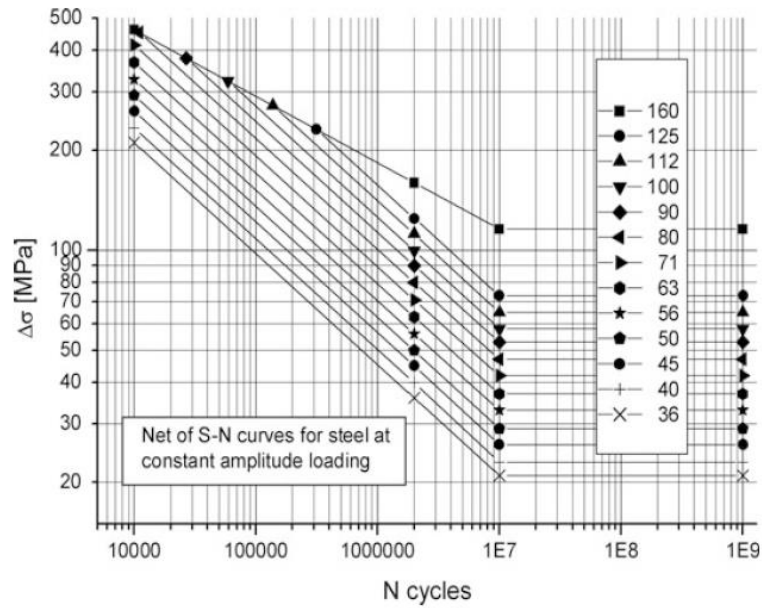


Kuva 5. Kahden eri tapauksen jännityskonsentraatiokertoimia (Hibbeler 2017, s. 182)

### 3.2 SN-käyrät ja FAT-luokat

Wöhler- eli S-N-käyrää voidaan käyttää väsytykskoekiden tulosten esittämisessä. Kirjaimella S viitataan termiin *Stress range* (jännitysheilahdus) ja kirjaimella N viitataan termiin *Number of cycles* (murtumiseen johtavaa jännitysjaksojen lukumäärää). SN-käyrä esitetään kaksoislogaritmisella asteikolla, jolloin väsytykskoekiden tuloksista saadaan muodostettua laskeva suora. Standardeissa esitettyjä S-N-käyriä laadittaessa väsytykskoekiden tuloksista saadut kuvaajat ovat hitsatussa tilassa oleville liitoksille pakotettuina kaltevuuteen 1:3, jotta tulokset soveltuisivat myös todellisten rakenteiden väsymistarkasteluun. (Niemi 2003, s. 95)

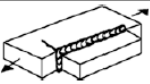
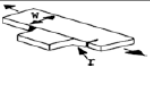
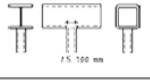
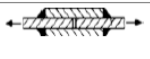

Kuvassa 6 on esitetty usealla eri vakioamplitudisella kuormituksella olleen teräksestä valmistetun kappaleen väsytykskoekiden tulokset S-N-käyrällä, jonne on myös merkattu rakenteen FAT-luokkia eli väsymisloukkia. FAT-luokat kuvaavat nimellisen jännitysvaihtelun arvoa, jolloin kappale kestää tilastollisesti 97.7 % todennäköisyydellä kyseisen jännitysvaihtelun  $2 \cdot 10^6$  jakson kohdalla (Niemi 2003, s. 96).



Kuva 6. S-N-käyrät ja niitä vastaavat FAT-luokat vakioamplitudilla kuormitetulle teräkselle (Hobbacher 2016, s. 38)

Erilaisten hitsattujen detaljien FAT-luokkia on koottu esimerkiksi EC3:seen (SFS EN 1993-1-9 s. 20–29) ja IIW:hen (Hobbacher 2016, s. 43–59). Kuvassa 7 on esitettyä osa IIW:stä löytyvän taulukon detaljien FAT-arvoja. Tämän kandidaatintyön sisältämän tutkimuksen referenssitapauksena on kuvassa 7 esitetty detalji numero 612, jonka FAT-luokka aluslevyn sekä hitsin murtumisen suhteen on FAT 50. Jos tarkasteltavana kohteena on monimutkainen tai yllä mainituista taulukoista löytymätön detalji, tällöin FAT-luokan määrittämisessä voidaan hyödyntää esimerkiksi Hot spot -menetelmää (Niemi 2003, s. 100–103).

Table 3.1 (continued)

| No.                   | Structural Detail   | Description<br>(St. = steel; Al. = aluminium)   | FAT<br>St.     | FAT<br>Al.     | Requirements and remarks  |
|-----------------------|---|---|----------------|----------------|---|
| 525                   |  | In-plane or out-of-plane longitudinal gusset welded to plate or beam flange edge, gusset length $l$<br>$l < 150$ mm<br>$l < 300$ mm<br>$l > 300$ mm                 | 50<br>45<br>40 | 18<br>16<br>14 | For $t_2 < 0.7 t_1$ , FAT rises 12 %<br>$t_1$ is main plate thickness<br>$t_2$ is gusset thickness  |
| 526                   |  | Longitudinal flat side gusset welded on edge of plate or beam flange, radius transition ground<br>$r > 1.50$ or $r/w > 1/3$<br>$1/6 < r/w < 1/3$<br>$r/w < 1/6$     | 90<br>71<br>50 | 36<br>28<br>22 | Smooth transition radius formed by grinding the weld area in transition in order to remove the weld toe completely. Grinding parallel to stress |
| 531                   |  | Circular or rectangular hollow section, fillet welded to another section. Section width parallel to stress direction $< 100$ mm, else like longitudinal attachment  | 71             | 28             | Non load-carrying welds. Width parallel to stress direction $< 100$ mm  |
| <b>600 Lap joints</b> |   |   |                |                |   |
| 611                   |  | Transverse loaded lap joint with fillet welds<br>Fatigue of parent metal<br>Fatigue of weld throat  | 63<br>45       | 22<br>16       | Stresses to be calculated in the main plate using a plate width equal to the weld length<br>Buckling avoided by loading or design!              |
| 612                   |  | Longitudinally loaded lap joint with side fillet welds<br>Fatigue of parent metal<br>Fatigue of weld (calc. on max. weld length of 40 times the throat of the weld) | 50<br>50       | 18<br>18       | Buckling avoided by loading or design<br>For verification of parent metal, the higher stresses of the two members must be taken                 |

(continued)

Kuva 7. Erialaisten detaljien taulukoituja FAT-arvoja (Hobbacher 2016, s. 55)

### 3.3 Laskennallisen kestoian määritys nimellisen jännityksen menetelmällä

Hitsatun rakenteen kestoikää voidaan määrittää väsytykskoekiden lisäksi myös laskennallisesti käyttäen nimellisen jännityksen menetelmää. Laskentaa varten pitää selvittää ekvivalentti kuormitusvaihtelu sekä kyseisen detaljien FAT-luokka. Laskennallista kestoikää voidaan arvioida seuraavan kaavan mukaan:

$$N_{cycle} = \left( \frac{FAT}{\Delta\sigma} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6, \quad (3.1)$$

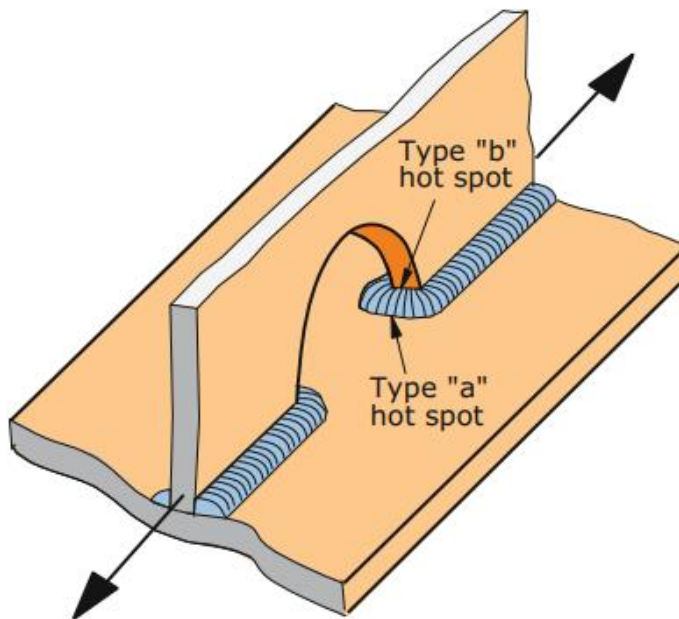
missä  $N_{cycle}$  = rakenteen kestoikä sykleittäin laskettuna [kpl],  $FAT$  = detaljien FAT-luokka [MPa],  $\Delta\sigma$  = (ekvivalentti) kuormitusvaihtelu [MPa] ja  $m$  = S-N-käyrän kaltevuus.

Ekvivalentin kuormitusvaihtelun määritys on enemmän tai vähemmän arvio todellisesta kuormituksesta, koska sen määritys voi olla hyvinkin vaikeaa eri muuttujien takia. Yksi usein käytetty tapa määrittää ekvivalentti kuormitusvaihtelu on käyttää ns. vesihana-analogiaa (Rainflow method), joka perustuu kuormitushistoriasta havaittujen jännitysvaihteluiden ja niiden määrän analysointiin.



### 3.4 Hot spot- jännityksen määrittäminen ja laskennallinen FAT-luokka

Hot spot-jännitys kuvaa hitsin rajaviivalla sijaitsevaa kriittistä rakenteellista jännitystä, jota voidaan merkitä symbolilla  $\sigma_{hs}$ . Hot spot-jännitykset voidaan jakaa tyyppiin "a" ja "b". Tyyppiä "a" käytetään silloin, kun rakenteellinen jännityskeskittymä jakautuu levyn tasossa ja epälineaarinen jännityspiikki levyn paksuuden yli. Tyyppiä "b" käytetään silloin kun tyyppiä "a" ei voida käyttää, eli kun esimerkiksi kuvan 8 tapauksessa aukosta aiheutuva jännityskeskittymä ja hitsin lovivaikutus jakaantuvat epälineaarisesti levyn tasossa. (Niemi 2003, s. 99–101)



Kuva 8. Havainnollistava kuva, jossa esiintyy tyyppin "a" ja "b" hot spot -jännityksiä (Niemi 2018, s. 19)

Hot spot -jännityksien määrittämiseen on esitetty kolme eri tapaa, jotka perustuvat venymäliuskamittauksiin, elementtimenetelmään ja jännityskonsentraatiokertoimien käyttöön. Elementtimenetelmään pohjautuvassa hot spot -jännitysten määrittämisessä on ideana lukea rakenteeseen vaikuttavia jännityksiä tietyiltä etäisyyksiltä tutkittavasta kohdasta. Tyyppin "a" hot spot -jännityksen laskentaan käytetään jännityksiä, jotka luetaan etäisyydellä  $0.4t$  ja  $t$

tutkittavasta kohdasta, jossa  $t$  on kyseisen levyn paksuus. Tyypin ”b” hot spot-jännitys määritetään käyttäen jännityksiä, jotka ovat etäisyydellä 4 mm, 8 mm ja 12 mm tutkittavasta kohdasta. Tyypin ”a” hot spot -jännityksen laskennan kaava on esitetty kaavassa 3.2 ja tyypin ”b” kaavassa 3.3. (Niemi 2003, s. 99–101)

$$\sigma_{hs,a} = 1.67 \cdot \sigma_{0,4t} - 0.67 \cdot \sigma_t \quad (3.2)$$

$$\sigma_{hs,b} = 3 \cdot \sigma_{4mm} - 3 \cdot \sigma_{8mm} + \sigma_{12mm} \quad (3.3)$$

Liitoksen laskennallinen FAT-luokka voidaan laskea referenssitapauksen ja verrattavan tapauksen hot spot -jännityksien suhdeluvun ja referenssitapauksen FAT-luokan tulona kaavan 3.4 mukaan (Hobbacher 2016, s. 62). Elementtiverkon koon pysyessä samana laskennallinen FAT-luokka voidaan laskea korvaamalla hot spot -jännitykset jännityskonsentraatiokertoimilla kaavan 3.5 mukaan.

$$FAT_{\text{vert}} = \frac{\sigma_{hs,\text{ref}}}{\sigma_{hs,\text{vert}}} \cdot FAT_{\text{ref}} \quad (3.4)$$

$$FAT_{\text{vert}} = \frac{K_{\text{ref}}}{K_{\text{vert}}} \cdot FAT_{\text{ref}} \quad (3.5)$$

Jossa alaindeksillä ref viitataan referenssitapaukseen liittyviin parametreihin ja alaindeksillä vert viitataan verrattavaan tapaukseen liittyviin parametreihin.

## 4 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tässä luvussa käydään läpi tutkimuksen suorittamisen vaiheet. Tutkimuksen alussa analysoidaan muutamaa perusmuotoa liitettävälle levyille, jonka jälkeen parhaimmaksi todettua geometriaa lähdetään optimoimaan kohti parempaa tulosta. Tässä vaiheessa geometrian haku suoritetaan käyttämällä 2D-keskipintamalleja, jotta tutkimuksen eteneminen olisi mahdollisimman tehokasta. Parhaimman geometrian löydyttyä voidaan suorittaa löydetyn

geometrian ja referenssitapauksen uudelleenmallintaminen käyttäen 3D-tilavuuselementtejä tarkemman tuloksen saamiseksi. Analysoitavat geometriat luodaan Solidworks-ohjelmalla ja analysointi suoritetaan Femap-ohjelmistolla. Kaikki mallit tehdään symmetriseksi, jotta voidaan käyttää puolimalleja. Luvussa 4.1 käydään läpi referenssitapauksen analysoinnin suorittaminen käyttäen 2D-keskipintamalleja.

Materiaalina käytetään S355 rakenneterästä, jonka kimmomoduuli  $E = 210$  GPa ja Poissonin vakio  $\nu = 0.3$ . Aluslevyn mitat ovat 300 mm x 225 mm x 5 mm ja aluslevyn oletetaan olevan jäykästi kiinnitetty sen reunoista. Hitsien pituus  $L_{\text{hitsi}} = 125$  mm ja a-mitta  $a_{\text{hitsi}} = 4$  mm pidetään eri mallien välillä samana, jotta tulokset olisivat vertailukelpoisia. Liitettävän levyn paksuus  $t_{\text{levy}} = 10$  mm pidetään vakiona eri mallien välillä. 2D-keskipintamallit luodaan verkottamalla kaikki rakenteet elementtikoolla 1 mm. 3D-tilavuuselementtejä käytettäessä hitsin läheisyydessä olevat alueet verkotetaan elementtikoolla 1 mm ja laskennan tehostamiseksi muut alueet voidaan verkottaa harvemmillä elementtikoolla. 3D-tilavuuselementtimalleissa levyjen väliseksi ilmaraoksi asetetaan 0.1 mm.

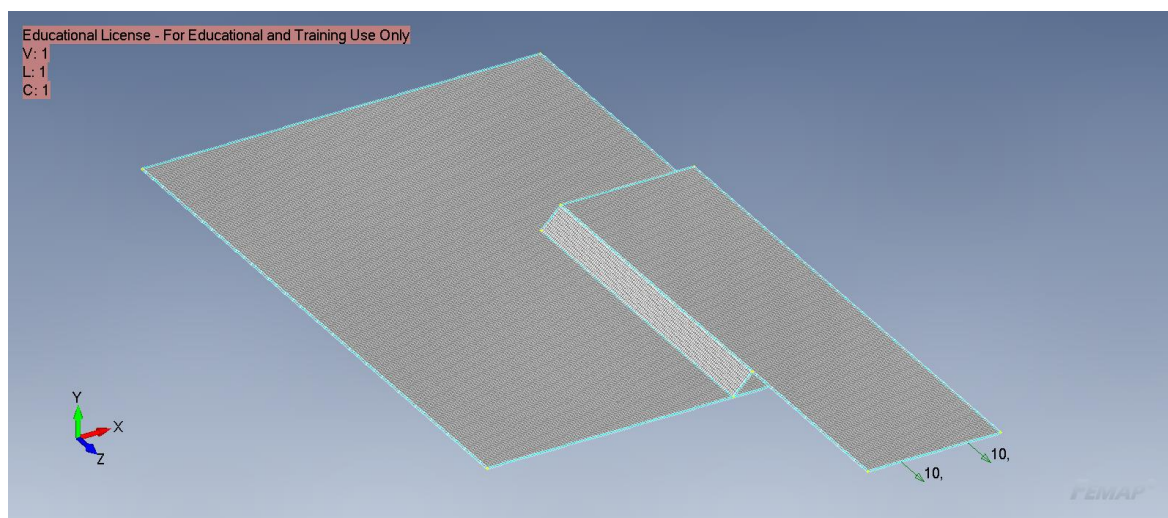
#### 4.1 Referenssitapauksen mallintaminen 2D-keskipintamalleilla

Tämän tutkimuksen referenssitapauksena liitettävästä levystä käytetään suorakulmion muotoista levyä, jonka mitat ovat 100 mm x 200 mm x 10 mm. Kuvassa 3 on esitetty referenssitapauksen puolimallin geometria, joka viedään Femap-ohjelmistoon analysoitavaksi.



Kuva 9. Referenssitapauksen puolimallin geometria

Femap-ohjelmistoon tuotua kuvan 9 mukaista mallia pitää muokata ennen analyysin suorittamista. Tuodusta geometriasta luodaan ensin keskipinnat midsurface-komennolla, jonka jälkeen voidaan asettaa käytetyt reunaehdot sekä yksikkövoimaa vastaava kuormitus. Seuraavaksi luodaan käytettävä materiaali (S355,  $E = 210$  GPa,  $\nu = 0.3$ ), jonka jälkeen pinnat voidaan verkottaa elementtikoolla 1 mm. Ennen analyysin suorittamista on hyvä tarkastaa ettei mallissa ole päällekkäisiä solmupisteitä. Tässä vaiheessa mallin pitäisi näyttää samalta kuin kuvassa 10 (huom. asetetut reunaehdot ovat kuvan selkeyden takia piilotettuina). Seuraavaksi levyille ja hitsille luodaan omat ryhmät groups-komennolla, jotta elementtijännityksien konvertointi solmujännityksiksi olisi suoraviivaisempaa.

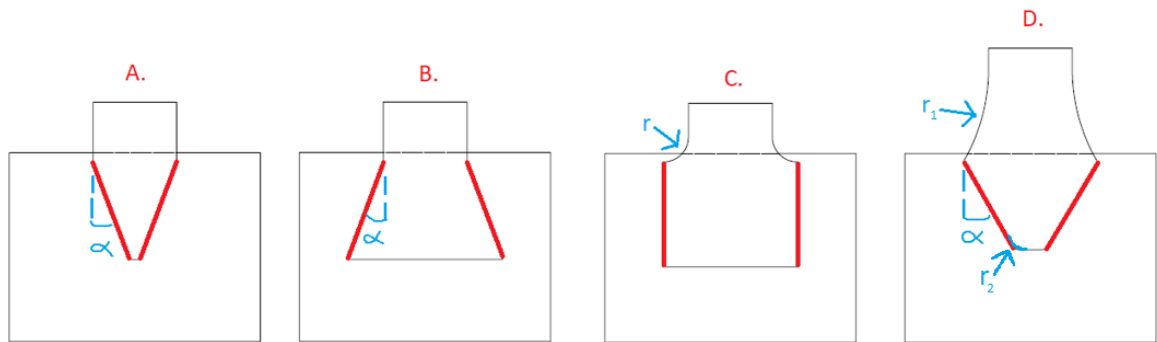


Kuva 10. Plate-elementeillä verkotettu FEMAP-malli referenssitapauksesta

Tässä vaiheessa voidaan suorittaa lineaarielastinen analyysi referenssitapaukselle. Analyysin suorituksen jälkeen solmujännitykset konvertoidaan käyttämällä lähimpien elementtien tuottamaa maksimijännitystä. Levyn tapauksessa konvertoitava tulosvektori on levyn yläpinnalla vaikuttava normaalijännitys (Plate Top X Normal Stress) ja hitsin tapauksessa XY-suuntainen leikkausjännitys (Plate Top XY Shear Stress). Tulosvektoreiden konvertoinnin jälkeen tulokseksi saadaan rakenteessa vaikuttavat jännityskonsentraatiokertoimet, joita voidaan havainnollistaa esimerkiksi Contour-valinnalla. Näiden vaiheiden suorittamisen jälkeen suurimmat jännityskonsentraatiopiikit taulukoidaan ja vaihtoehtoisen muodon hakeminen voidaan aloittaa. Tutkimuksessa käytetyt vaihtoehtoiset muodot on esitetty luvussa 4.2.

#### 4.2 Vaihtoehtoiset muotoilut liitettävälle levyille

Tässä tutkimuksessa analysoitavat vaihtoehtoiset muotoilut liitettävälle levyille on esitetty kuvassa 11. Kuvassa 11 hitsejä on merkattu punaisella värillä ja muutettavaa parametria on merkattu sinisellä värillä.



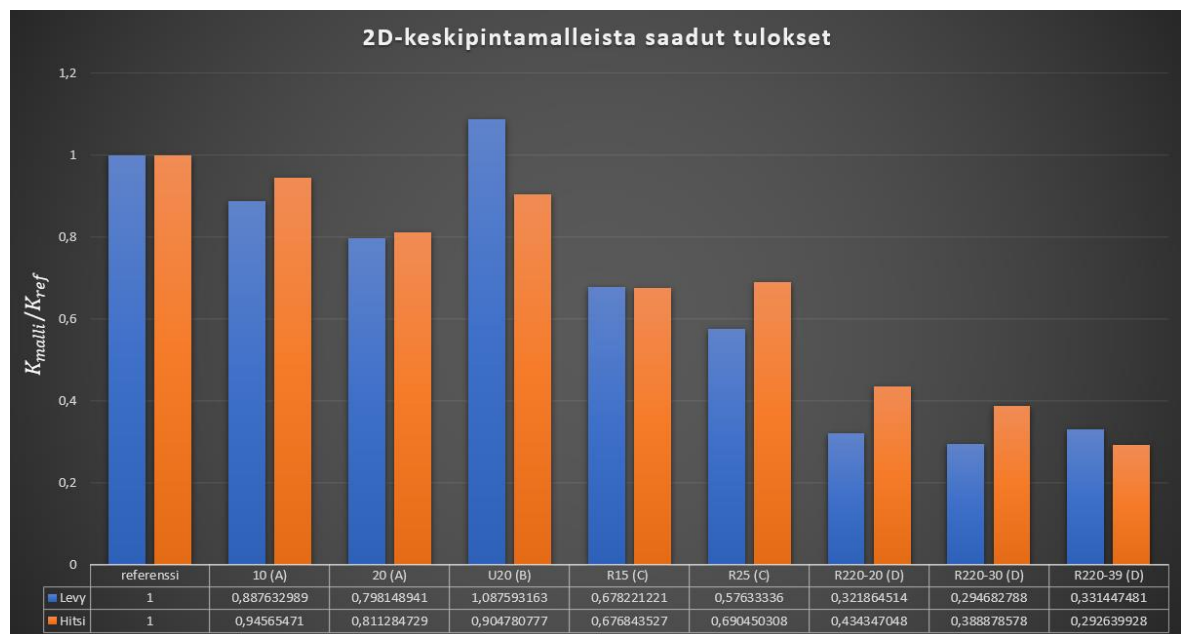
Kuva 11. Erilaisia muotoja liitettävälle levyllä

Aluksi analysoitavia muotoja oli kolme kappaletta: viiste sisäänpäin (muoto A), viiste ulospäin (muoto B) ja pyöristyksen tekeminen levyn reunaan (muoto C). Tutkimuksen edetessä 2D-keskipintamalleista saatujen tulosten perusteella neljänneksi analysoitavaksi muodoksi lisättiin muotoilujen A ja C yhdistelmä, jossa yhdistyy levyyn tehtävä pyöristys ja sisäänpäin tehtävä viiste (muoto D). Yksinkertaisuuden vuoksi mahdolliset vaakasuuntaiset hitsit liitetävän levyn ylä- ja alareunoilla on rajattu pois.

## 5 TULOKSET

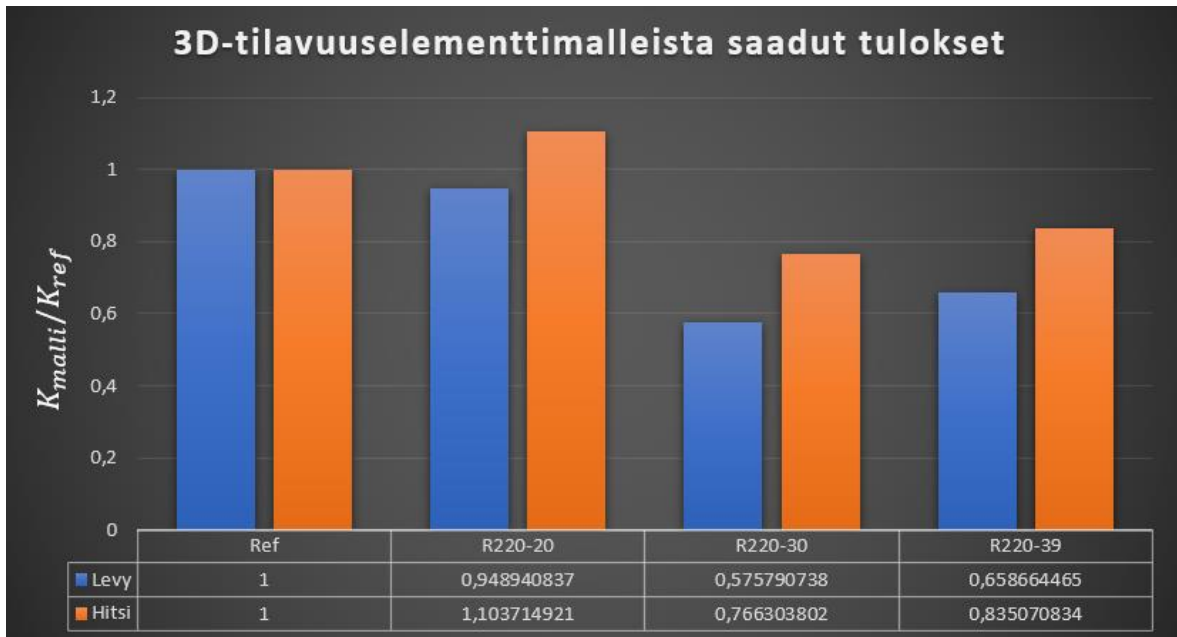
Tässä osiossa esitetään FE-analyseista saatuja tuloksia. Kaikki esitetyt tulokset ovat suhteutettu referenssitapaukseen, eli kuvaajissa näkyvät luvut ovat laskettu käyttäen yhtälöä  $\frac{K_{malli}}{K_{ref}}$ . Eri muotoihin viitataan kirjaimilla A-D, joita vastaavat muodot on esitetty kuvassa 11.

Kuvassa 12 on esitetty 2D-keskipintamalleista saadut tulokset. Sisäänpäin viistettyä muotoa A analysointiin viisteen kulman  $\alpha$  ollessa  $10^\circ$  ja  $20^\circ$ . Ulospäin viistettyä muotoa B analysointiin viisteen kulman  $\alpha$  ollessa  $20^\circ$ . Pyöristyksen tekemistä levyn reunaan eli muotoa C analysoitiin pyöristyssäteillä  $R = 15$  mm ja  $R = 25$  mm. Muodolla D tehtiin kolme analyysia, joissa pyöristyssäteinä käytettiin  $R_1 = 220$  mm ja  $R_2 = 10$  mm ja viisteen kulmina  $\alpha$  käytettiin  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  ja  $39^\circ$ .



Kuva 12. 2D-keskipintamalleista saadut tulokset

Kuvassa 12 esitettyjen tulosten perusteella muoto D oli muita vaihtoehtoisia muotoja parempi, joten 3D-tilavuuselementtimalleilla suoritettava tarkastelu toteutettiin muodolle D viisteen kulman ollessa 20°, 30° ja 39°. 3D-tilavuuselementtimalleja tehtiin yhteensä neljä kappaletta ja niistä saadut tulokset on esitetty kuvassa 13.



Kuva 13. 3D-tilavuuselementtimalleista saadut tulokset

## 6 TULOSTEN ANALYSOINTI

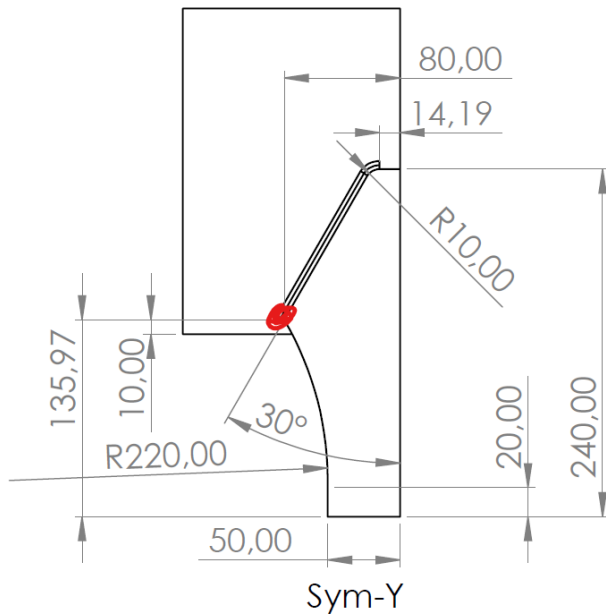
Kuvassa 12 on esitetty 2D-keskipintamalleista saadut tulokset. Tutkimus jatkui referenssitapauksen analysoinnin jälkeen sisäänpäin viistetyn muodon A analysoinnilla, joka toteutettiin kulmilla  $\alpha = 10^\circ$  ja  $\alpha = 20^\circ$ . Saadut tulokset olivat hieman parempia kun referenssitapauksessa ja viisteen kulmaa kasvattamalla jännityskonsentraatiopiikit laskivat. Ulospäin tehdyn viisteen kulman ollessa 20° levyn jännityskonsentraatiopiikki oli referenssitapausta suurempi, joten muodon B analysointia ei ollut syytä jatkaa. Muodon C eli pyörityksen tekeminen levyn reunaan toteutettiin ensin pyörityssäteellä  $R = 15$  mm. Saadut tulokset olivat lupaavia, sillä levyn ja hitsin jännityskonsentraatiopiikit olivat noin 32 % pienempiä verrattuna referenssitapaukseen. Muodon C analyysi toistettiin vielä pyörityssäteellä  $R = 25$



mm, mutta pyöristyssäteen kasvattaminen ei laskenut hitsissä vaikuttavaa jännityskonsentraatiopiikkiä, joten pyöristyssädettä ei lähdetty enää kasvattamaan.

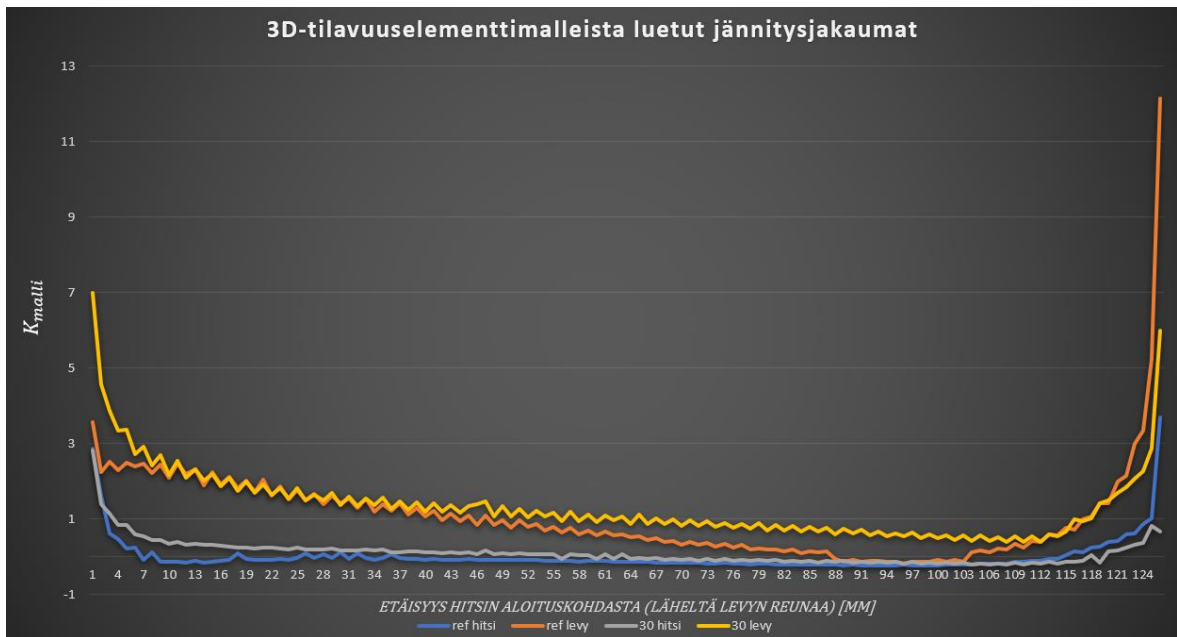
Sisäänpäin tehtävällä viisteellä ja leveyden kasvattamisella pyöristyssäteen avulla oli positiivinen vaikutus jännityskonsentraatiopiikkeihin, joten analyysi suoritettiin vielä näiden kahden muodon yhdistelmälle eli muodolle D. Pyöristyssäteeksi asetettiin  $R = 220$  mm, jonka tarkoituksena oli kasvattaa levyn leveyttä mahdollisimman jouhevasti. Sisäänpäin tehtävä viiste toteutettiin ensin  $20^\circ$  kulmalla ja hitsien lopetuskohtiin lisättiin pyöristyssäteellä  $R_2 = 10$  mm olevat pyöristykset. Tästä kyseisestä analyysistä (R220-20) saadut tulokset olivat parhaimpia tähän mennessä, joten analyysi suoritettiin myös viisteen kulman ollessa  $30^\circ$  ja  $39^\circ$ . Sisäänpäin tehtävän viisteen kulman kasvattaminen paransi tuloksia ja viisteen kulman ollessa  $39^\circ$  sekä levyssä ja hitsissä vaikuttavat jännityskonsentraatiopiikit olivat pienentyneet noin 40 % verrattuna referenssitapaukseen.

Kuvassa 13 esitettyjen tulosten perusteella analysoitava muoto D oli selkeästi muita vaihtoehtoisia muotoja parempi, joten 3D-tilavuuselementtimalleilla suoritettava tarkastelu toteutettiin muodolle D viisteen kulman ollessa  $20^\circ$ ,  $30^\circ$  ja  $39^\circ$ . 3D-tilavuuselementtimalleille tehtyjen analyysien perusteella viisteen kulman kasvattamisella oli positiivinen vaikutusta levyssä havaittaviin jännityskonsentraatiopiikkeihin. Viisteen kulman ollessa  $20^\circ$  hitsin juuressa vaikuttava jännityskonsentraatiopiikki oli kasvanut noin 10 % referenssitapaukseen verrattuna. Kahdella muulla tapauksella hitsin juuressa vaikuttava jännityskonsentraatiopiikki oli laskenut referenssitapaukseen verrattuna. Parhaimmat tulokset saatiin muodolla D, kun sisäänpäin tehtävän viisteen kulma on  $30^\circ$ . Referenssitapaukseen verrattuna suurin jännityskonsentraatiopiikki levyssä oli laskenut 42 % ja hitsissä 23 %. Kuvassa 14 on esitetty muodon D puolimallin geometria viisteen kulman ollessa  $30^\circ$ .



Kuva 14. Parhaaksi todettu muoto (D) viisteen kulman ollessa  $30^\circ$ , johon on merkattu punaisella pisteellä hitsin aloituskohta

Kuvassa 15 on esitetty 3D-tilavuuselementtianalyseista muodostetut jännitysjaakaumat hitsin juuresta sekä levyn alareunassa vaikuttavista jännityskonsentraatiokertoimista referenssitapaukselle ja muodolle D viisteen ollessa  $30^\circ$ . Referenssitapauksessa levyssä vaikuttava normaalivoiman aiheuttama jännityskonsentraatiopiikki muodostui hitsin lopetuskohtaan, kun taas muodolla D kyseinen jännityskonsentraatiopiikki havaittiin hitsin aloituskohdassa. Hitsissä vaikuttavan leikkausjännityksen aiheuttama jännityskonsentraatiopiikki havaittiin referenssitapauksessa hitsin lopetuskohdassa ja muodolla D hitsin aloituskohdassa. Liitoksen keskikohdalla vaikuttavat jännityskonsentraatiokertoimet ovat huomattavasti alemmat kuin hitsin aloitus- tai lopetuskohdassa.



Kuva 15. Hitsin juuresta sekä levyn alareunasta luetut jännitys jakaumat referenssitapaukselle ja muodolle D (30° viisteellä)

Vaihtoehdoiselle muodolle D voidaan määrittää laskennallinen FAT-luokka sekä levyn että hitsin suhteen sijoittamalla jännityskonsentraatiopiikkien arvot ja referenssitapauksen FAT-luokka (FAT 50) kaavaan 3.5. Saadut tulokset pyöristetään alaspäin seuraavaan FAT-luokkaan.

$$FAT_{\text{hitsi}} = \frac{K_{\text{ref,hitsi}}}{K_{\text{vert,hitsi}}} \cdot FAT_{\text{ref}} = \frac{3.69}{2.83} \cdot 50 = 65.25 \rightarrow 63 \quad (6.1)$$

$$FAT_{\text{levy}} = \frac{K_{\text{ref,levy}}}{K_{\text{vert,levy}}} \cdot FAT_{\text{ref}} = \frac{12.14}{6.99} \cdot 50 = 86.84 \rightarrow 80 \quad (6.2)$$

Muodon D laskennallinen FAT-luokka hitsin leikkautumisen suhteen on esitetty kaavassa 6.1 ja kaavassa 6.2 on esitetty FAT-luokka levyn murtumisen suhteen. Hitsin leikkautumisen suhteen FAT-luokka on FAT 63 ja levyn murtumisen suhteen FAT 80. Näistä tuloksista alempi FAT-luokka on rajoittava tekijä, eli liitoksen laskennalliseksi FAT-luokaksi voidaan

asettaa tämän tutkimuksen tuloksien perusteella FAT 63. Referenssitapaukseen (FAT 50) verrattuna FAT-luokkaa on saatu korotettua kahdella luokalla. Tulos perustuu elementtimalleilla saatuihin tuloksiin ja ottaa huomioon vain rakenteellisen jännityksen aiheuttamat jännityskonsentraatiopiikit. FAT-luokan todentamiseksi olisi hyvä suorittaa kokeellinen väsytestaus laboratoriossa, koska edellä esitetty FAT 63 on vain FE-malleihin perustuva teoreettinen tulos. Referenssitapauksen FAT-luokka on määritetty liitettävän levyn murtumisen ja hitsin leikkautumisen suhteen, mutta muodolle D rajoittavaksi tekijäksi voi ilmentyä jokin muu väsymiseen liittyvä ilmiö, jolloin FAT-luokkaa jouduttaisiin laskemaan. FAT-luokan korotus voitaisiin toteuttaa myös muilla vaihtoehtoisilla tavoilla, kuten esimerkiksi HFMI-jälkikäsittelyllä (High Frequency Mechanical Impact), TIG-sulatuksella (Tungsten Inert Gas) tai hitsin lokaalin geometrian muotoilulla.

FAT-luokan korotuksen merkitys kestoikään voidaan todeta sijoittamalla esimerkkiarvot kaavaan 3.1, minkä tuloksena voidaan vertailla FAT 50 ja FAT 63 välistä väsymiskestoikää sykleittäin. Sijoitetaan ekvivalentin kuormitusvaihtelun arvoksi 100 MPa ja lasketaan kuormitusta vastaavat kestoiät kahden eri FAT-luokan välillä. Kaavassa 6.3 on esitetty FAT 50 vastaava kestoikä ja kaavassa 6.4 FAT 63 vastaava kestoikä.

$$N_{FAT50} = \left(\frac{50}{100}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 250\,000 \text{ [kpl]} \quad (6.3)$$

$$N_{FAT63} = \left(\frac{63}{100}\right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6 = 500\,094 \text{ [kpl]} \quad (6.4)$$

Kaavojen 6.3 ja 6.4 tulosten perusteella FAT-luokan kasvattaminen kahdella luokalla (*FAT 50* → *FAT 63*) kasvattaa liitoksen väsymiskestoikää noin 100 %. Saatu hyöty väsymiskestoiän näkökulmasta on merkittävä, joten liitettävän levyn muotoilua olisi syytä harkita jos referenssitapausta vastaavan liitoksen väsymiskestoikä muodostuu rajoittavaksi tekijäksi.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena oli tutkia liitettävän levyn muotoilun vaikutusta kylkihitsatun voimaliitoksen väsymiskestävyyteen. Tavoitteena oli löytää FE-analyysin perusteella liitettävälle levyille muotoilu, joka laskee mahdollisimman paljon levyssä ja hitsissä vaikuttavia jännityskonsentraatiopiikkejä. Alhaisemmat jännityskonsentraatiopiikit mahdollistaisivat liitokselle FAT-luokan korotuksen.

Referenssitapauksena pidettiin standardeista löytyvää suorakulmaista muotoilua, jonka FAT-luokaksi on määritetty FAT 50. Vaihtoehtoisia muotoja liitettävälle levyille oli neljä kappaletta: sisäänpäin tehty viiste, ulospäin tehty viiste, pyöristykseen tekeminen levyyn sekä sisäänpäin tehtävän viisteen ja levyn pyöristykseen yhdistelmä. Vaihtoehtoisia muotojen lähdeksi analysoimaan 2D-keskipintamalleilla, jonka jälkeen parhaimmaksi osoittautunutta muotoa analysoitiin vielä 3D-tilavuuselementtimalleilla. Kaikkien analysoitavien mallien välillä käytettiin samaa elementtiverkon tiheyttä ja hitsien pituutta tulosten vertailun mahdollistamiseksi. Analysoitaviin malleihin asetettiin 1 MPa suuruinen puhdas vetokuormitus, jonka seurauksena analyysin tulokset olivat suoraan jännityskonsentraatiokertoimia.

Parhaimman tuloksen eli alhaisimmat jännityskonsentraatiopiikit saatiin muodolla, jossa yhdistyi  $30^\circ$  sisäänpäin tehtävä viiste ja levyn leveyden kasvattaminen pyöristysäteellä  $R = 220$  mm. Referenssitapaukseen verrattuna levyssä vaikuttava jännityskonsentraatiopiikki pieneni 42 % ja hitsin juuressa jännityskonsentraatiopiikki pieneni 23 %. Pienentyneiden jännityskonsentraatiopiikkien perusteella liitokselle voitiin muodostaa laskennallinen FAT-luokka, jonka arvoksi saatiin FAT 63. FAT-luokkaa saatiin korotettua kahdella luokalla, joka on merkittävä parannus liitoksen väsymiskestoikään. Korotetun FAT-luokan ansiosta liitoksen väsymiskestoikä kasvoi noin 100 % referenssitapaukseen verrattuna. Tutkimuskysymyksiin on löydetty vastaus FE-analyyseista saatuihin tuloksiin vedoten, sillä parhaimmaksi todetulle muodolle saatiin korotettua FAT-luokkaa kahdella luokalla.

FAT-luokan korotus kahdella luokalla on huomattava parannus liitoksen väsymiskestävyyden näkökulmasta. Tulos pohjautuu kuitenkin vain FE-analyyseista saatuihin jännityskonsentraatiopiikkien vertailuun, joten väsytykskoekokeiden tekeminen kyseiselle muodolle voisi mahdollisesti antaa alhaisemman FAT-luokan erilaisten vauriomuotojen takia.

Tässä tutkimuksessa kuormana on käytetty vain puhdasta vetojännitystä, vaikka todellisuudessa voimaliitokseen kohdistuu usein myös taivutusjännitystä. Hot spot -jännitysten laskeminen ja hyödyntäminen saattaisi tuottaa hieman erilaiset tulokset, mutta jännityskonsentraatiokertoimien vertailulla saadaan suuntaa antavia tuloksia. Tässä tutkimuksessa parhaana pidetty muoto ei todennäköisesti ole absoluuttisesti paras muoto, joten sitä voisi lähteä vielä optimoimaan jatkotutkimusten merkeissä. Mahdollisissa jatkotutkimuksissa voisi tutkia monimutkikkaampia muotoiluja.

## LÄHTEET

Hartikainen, M. 2013. Turveperävaunun väsymiskestävyyden parantaminen. Kandidaatintyö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

Hibbeler, R. C. 2017. Mechanics of materials, SI edition. 10th ed. Pearson.

Hobbacher, A. 2016. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Second Edition. International Institute of Welding. Cham: Springer International Publishing. 143 s.

Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiainfo Teknova. 136 s.

Niemi, E., Fricke, W. & Maddox, S. J. 2018 Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components Designer's Guide. 2nd ed. Singapore: Springer Singapore.

Petinov, S. V. 2018. In-Service Fatigue Reliability of Structures. Cham: Springer International Publishing.

SFS EN 1993-1-9. 2006. EUROCODE 3: TERÄSRAKENTEIDEN SUUNNITTELU. OSA 1–9: VÄSYMINEN. European Committee for Standardization.