

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

KAKSIPUOLEISEN PITKITTÄISEN RIVAN PORRASTUKSEN VAIKUTUS  
JÄNNITYSKONSENTRAATIOIHIN  
EFFECT OF TWO-SIDED LONGITUDINAL GUSSET OFFSET TO STRESS  
CONCENTRATIONS

Lappeenrannassa 22.5.2018

Juho Lahtinen

Tarkastaja DI Antti Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

LUT Energijärjestelmät

LUT Kone

Juho Lahtinen

### **Kaksipuoleisen pitkittäisen rivan porrastuksen vaikutus jännityskonsentraatioihin**

Kandidaatintyö

2018

32 sivua, 11 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: DI Antti Ahola

Hakusanat: pitkittäinen ripa, kuormaa kantamaton liitos, jännityskonsentraatiokerroin, FEM, porrastus, hot spot -menetelmä, ENS-menetelmä

Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on selvittää kaksipuoleisen pitkittäisen rivan porrastuksen vaikutus jännityskonsentraatioihin. Porrastukset toteutetaan leveys- ja pituussuunnissa, sekä niiden yhdistelmässä. Porrastuksen vaikutuksia jännityskonsentraatioihin tutkitaan veto- ja taivutuskuormituksilla. Jännityskonsentraatioiden määrittäminen suoritetaan äärellisten elementtien menetelmällä ohjelmistoavusteisesti.

Porrastuksen vaikutusta jännityskonsentraatiokertoimiin tarkasteltiin rakenteellisen ja lovijännityksen tasolla, selvittäen  $K_s$ ,  $K_{tot}$  sekä  $K_r$  kertoimet. Vaikutukset laskettiin kasvattaen porrastussuhdetta  $e/t$ . Tulosten perusteella porrastus voi sekä kasvattaa että pienentää liitoksessa esiintyviä suurimpia jännityskonsentraatioita. Porrastaminen vaikuttaa maksimijännityksen sijaintiin rakenteessa. Veto- ja taivutuskuormituksen tapauksissa jännityskonsentraatiokertoimien muutoksen poikkeavat toisistaan. Taivutuskuorma vaikuttaa eniten lovenmuotolukuun  $K_r$ , kun vetokuormituksella suurin vaikutus kohdistuu  $K_{tot}$ -kertoimeen.

## **ABSTRACT**

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

Juho Lahtinen

### **Effect of two-sided longitudinal gusset offset to stress concentrations**

Bachelor's thesis

2018

32 pages, 11 figures, 4 tables and 1 appendix

Examiner: M. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: cruciform joint, non-load carrying joint, stress concentration factor, FEM, offset, hot spot method, ENS method

Objective of this bachelor's thesis is to study the effect of two-sided longitudinal gusset offset on stress concentration. Offset is set on width direction, longitudinal direction and their combination. Examined joint is loaded separately with pure membrane stress and bending stress. Stress concentration factors are obtained using FEM software.

Offset effects on stress concentration factors were examined on structural stress and notch stress.  $K_s$ ,  $K_{tot}$  and  $K_t$  factors were obtained. Effects were calculated increasing  $e/t$  offset ratio. According to results, offset can increase or decrease stress concentration factors. Offset effects on location of maximum stress concentrations. Membrane stress and bending stress results vary from each other. Bending stress effects mostly to  $K_t$  while membrane stress has more effect on  $K_{tot}$ .

## **ALKUSANAT**

Haluan kiittää Ilkka Pöllästä ja Antti Aholaa mielenkiinnon herättämisestä FE-menetelmää kohtaan. Erityisesti opetuksen laadusta ja mielekkyydestä on ollut iloa ja hyötyä.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### ALKUSANAT

### SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTOELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	<b>8</b>
1.1	Tavoitteet ja kysymykset .....	8
1.2	Rajaus.....	8
1.3	Hypoteesi.....	9
1.4	Tarkoitus .....	9
1.5	Kirjallisuuskatsaus.....	9
<b>2</b>	<b>TUTKIMUSMENETELMÄT</b> .....	<b>11</b>
2.1	Äärellisten elementtien menetelmä .....	11
2.2	Nimellisen jännityksen menetelmä .....	11
2.3	Hot spot -menetelmä.....	12
2.4	Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä).....	13
<b>3</b>	<b>MALLIEN ANALYYSI</b> .....	<b>15</b>
3.1	Materiaalimalli .....	15
3.2	Analyysityyppi .....	15
3.3	Liitosten mallinnus.....	15
3.3.1	Hot spot- ja ENS-menetelmän vaatimukset.....	18
3.3.2	Liitosrakenteiden kuormitukset ja reunaehdot .....	20
3.4	Analyysin kulku .....	21
<b>4</b>	<b>TULOKSET</b> .....	<b>22</b>
<b>5</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>26</b>
5.1	Vetokuormitus .....	26
5.2	Taivutuskuormitus .....	27
5.3	Porrastuksen vaikutukset .....	27
<b>6</b>	<b>POHDINTA</b> .....	<b>29</b>
6.1	Hypoteesin analysointi .....	29
6.2	Jatkotutkimustarve .....	29
6.3	Virhetarkastelu ja teorian puutteet.....	30
6.4	Tulosten hyödyntäminen .....	30

<b>7</b>	<b>YHTEENVETO.....</b>	<b>31</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>32</b>
	<b>LIITTEET</b>	

Liite 1: Jännityskonsentraatioiden laskenta ja tarkat arvot

## SYMBOLILUETTELO JA LYHENTEET

$A$	Poikkipinta-ala [m <sup>2</sup> ]
$E$	Kimmomoduuli [GPa]
$e$	Porrastus [mm]
$e/t$	Porrastussuhde [-]
$F$	Voima [N]
$I$	Jäyhyysmomentti [m <sup>4</sup> ]
$K_s$	Rakenteellinen jännityskonsentraatiokerroin [-]
$K_t$	Lovenmuotoluku [-]
$K_{tot}$	Jännityskonsentraatiokerroin, kokonaisjännitys [-]
$M$	Taivutusmomentti [Nm]
$t$	Levynpaksuus [mm]
$y$	Etäisyys neutraaliakselista [mm]
$\nu$	Poissonin vakio [-]
$\rho$	Tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma_{ENS}$	Tehollinen lovijännitys [MPa]
$\sigma_{hs}$	Rakenteellinen hot spot -jännitys [MPa]
$\sigma_{max}$	Kokonaisjännitys [MPa]
$\sigma_{nim}$	Nimellinen jännitys [MPa]
$ENS$	Effective notch stress – tehollinen lovijännitys
$FAT$	Fatigue class – väsymisluokka
$FEM$	Finite element method – äärellisten elementtien menetelmä
$FEMAP$	Finite element modelling and postprocessing – mallinnusohjelmisto
$IIW$	International Institute of Welding – kansainvälinen hitsausinstituutti
$LSE$	Linear surface extrapolation – lineaarinen pinnan jännitysten ekstrapolointi

## 1 JOHDANTO

Hitsatut rakenteet joutuvat alttiiksi erilaisille kuormituksille ja rasiutilanteille. Tyypillisiä hitsattujen rakenteiden kohtaamia kuormitusmuotoja ovat veto- ja taivutus. Vetokuormituksessa rakenteeseen kohdistuva voima suuntautuu poispäin rakenteesta. Taivutuskuormitus syntyy, kun voima kohdistuu muualle kuin kohtisuoraan rakenteen tukipisteeseen. Tällöin tukipisteen ja kuorman välille syntyy voiman varsi, joka aiheuttaa taivutusmomentin tukipisteeseen. Veto- ja taivutuskuormitukset synnyttävät suuria jännityksiä hitsattujen rakenteiden liitoskohtiin, jotka ovat usein rakenteiden kestävyyskannalta merkittäviä. Kuormitettuun hitsausliitokseen muodostuu jännityskonsentraatioita, jotka määrittävät liitoksen paikallisesti kohtaaman todellisen jännityksen verrattuna rakenteeseen vaikuttavaan kuorman aiheuttamaan nimelliseen jännitykseen. Hitsatun liitoksen jännityskonsentraatioihin vaikuttaa oleellisesti liitoslevyn ja hitsin geometria. Hitsin geometria koostuu hitsin a-mitasta, hitsin muodosta, hitsin rajaviivalle muodostuneesta lovesta, tunkeumasta, liittymäkulmasta sekä hitsin pituudesta.

### 1.1 Tavoitteet ja kysymykset

Tämän kandidaatintyön tavoite on selvittää kaksipuoleisen pitkittäisen rivin porrastuksen vaikutus jännityskonsentraatioihin. Tutkimus keskittyy kuormaa kantamattoman hitsausliitoksen alueella esiintyviin jännityskonsentraatioihin, kun liitosrakennetta kuormitetaan vedolla ja taivutuksella. Liitoksen porrastusta tarkastellaan pituussuunnassa, leveysuunnassa, sekä näiden yhdistelmässä. Kandidaatintyössä pyritään selvittämään:

- Aiheuttaako kaksipuoleisen pitkittäisen rivin porrastus muutoksia jännityskonsentraatioihin?
- Miten jännityskonsentraatiot muuttuvat erilaisilla kuormituksilla ja porrastuksen suunnilla?
- Mitä vaikutuksia mahdollisilla jännityskonsentraatioiden muutoksilla on?

### 1.2 Rajaus

Työ rajataan siten, että se keskittyy vain yhden liitosgeometrian tutkimiseen. Tällöin liitosgeometriassa ei tapahdu muita muutoksia, kuin mitä liitoksen porrastaminen edellyttää. Liitosgeometriaa tutkitaan vain yhdellä levynpaksuudella. Liitosgeometriaan vaikuttavat hitsauksesta aiheutuvat kulmavirheet rajataan pois tutkimuksesta. Liitosgeometria esitetään mallien analysoinnin yhteydessä.



### 1.3 Hypoteesi

Kandidaatintyön suunnitteluvaiheessa kehitettiin tutkimushypoteesi. Lähtökohtana hypoteesille oli porrastamaton kaksipuoleisen pituussuuntaisen rivan ja peruslevyn liitos, johon muodostuu vetokuormituksella symmetriset jännityskonsentraatiot niin pysty- kuin vaaka-akselin suhteen. Taivutuskuormitetun porrastamattoman liitoksen jännityskonsentraatioiden oletettiin muodostuvan symmetriseksi kappaleen pystyakselin suhteen. Vaaka-akselin suhteen odotettiin jännityskonsentraatioiden muodostuvan epäsymmetrisiksi siten, että peruslevyn yläpuolisen hitsin alueelle muodostuu huomattavasti suurempi jännityskonsentraatio kuin alapuolisen hitsin alueelle. Pituussuunnan porrastuksen oletettiin vaikuttavan jännityskonsentraatioiden muodostumiseen molemmissa kuormitustapauksissa enemmän kuin leveyssuunnan porrastuksen. Yhdistetyn porrastuksen vaikutusten oletettiin sijoittuvan pituus- ja leveyssuuntien tulosten välimaastoon. Leveyssuunnan porrastuksen vaikutukseksi arveltiin aiheuttavan rakenteeseen jonkin asteista kiertymistä vetokuormituksella.

### 1.4 Tarkoitus

Kandidaatintyö tehdään Lappeenrannan teknillisen yliopiston Teräsrakenteiden laboratoriolle. Tietous porrastuksen vaikutuksesta rakenteessa vaikuttaviin jännityksiin on tähän mennessä ollut vajavaista. Työn tulosten on tarkoitus lisätä perustietoutta teräsrakenteissa vaikuttavista väsyttävistä ilmiöistä. Tarkoituksena on myös selvittää, löytyykö aiheesta tutkimustuloksia tai muita aiheeseen liittyviä tietoja ja verrata näitä tämän tutkimuksen tuloksiin. Tulokset ovat perustutkimusta, joista saatua tietoa voidaan tulevaisuudessa hyödyntää muissa tieteellisissä, opetuksellisissa ja teollisissa sovellutuksissa.

### 1.5 Kirjallisuuskatsaus

Kandidaatintyön tulosten paikkansapitävyyden tukemiseksi suoritettiin selvitys aiheeseen liittyvien tutkimusten menetelmistä ja tuloksista. Selvitys suoritettiin hakemalla kansainvälisistä tietokannoista erilaisia aiheeseen liittyviä artikkeleita, tutkimusraportteja ja kirjallisuusaineistoja. Hakusanoina käytettiin seuraavia sanoja sekä niiden yhdistelmiä:

- cruciform joint – ristiliitos
- stress concentration factor – jännityskonsentraatiokerroin
- plate offset – levyn porrastus
- misalignment – epäkeskeisyys
- non-load carrying joint – kuormaa kantamaton liitos
- longitudinal gusset – pituussuuntainen ripa

Kirjallisuuskatsauksen tuloksena selvisi, että tutkimusaiheesta ei ole käytännössä tehty aikaisemmin vastaavan kaltaista ja vertailukelpoista tutkimusta. Kuormaa kantamattoman liitoksen jännityskonsentraatiokertoimia on maailmalla tutkittu, mutta tutkimukset ovat olleet kuormitustapauksiltaan tai geometrioiltaan liian poikkeavia, jotta niiden tuloksia voitaisiin vertailla tämän kandidaatintyön tulosten kanssa.

Tutkimusmenetelmissä löytyy yhteneväisyyttä jokseenkin samankaltaisten liitosrakenteiden tutkimusten kanssa. Esimerkiksi yksipuoleisen poikittaisrivan konsentraatiokertoimia on tutkittu Lappeenrannan teknillisen korkeakoulun (nyk. LUT, Lappeenranta University of Technology) Konetekniikan osaston toimesta. Konetekniikan osaston Tutkimusraportti 25:ssä (1998) on hyödynnetty jännitysten ekstrapolointia hitsin rajaviivalle konsentraatiokertoimia laskettaessa. Ekstrapoloinnissa on yleensä käytetty seuraavaa yhtälöä (Kilki, Niemi & Poutiainen 1998, s. 4):

$$\sigma_{hs} = \sigma_{0,4t} + \frac{2}{3} * (\sigma_{0,4t} - \sigma_{1,0t}) \quad (1)$$

Yhtälössä 1  $\sigma_{hs}$  tarkoittaa rakenteellista hot spot -jännitystä.  $\sigma_{0,4t}$  on kohtisuora jännitys 0,4 kertaa levynpaksuuden päässä hitsin rajaviivasta levyn pinnalta mitattuna.  $\sigma_{1,0t}$  on kohtisuora jännitys 1,0 kertaa levynpaksuuden päässä hitsin rajaviivasta levyn pinnalta mitattuna. Yhtälö antaa hot spot -jännitykseksi hieman poikkeavia arvoja verrattuna tässä työssä käytettyyn hot spot -jännityksen yhtälöön, jota IIW (International Institute of Welding) suosittelee käytettävän. Käytännön kannalta yhtälöiden poikkeavuudet ovat niin pieniä (tuhannesosia tai vähemmän), että ne häviävät muiden laskennan osien aiheuttamiin virhemarginaaleihin.

## 2 TUTKIMUSMENETELMÄT

Tutkimusmenetelmissä käsitellään työssä käytetyt mallinnus- ja laskentamenetelmät. Menetelmien hyödyntäminen tutkittavaan liitostyyppiin käsitellään erikseen.

### 2.1 Äärellisten elementtien menetelmä

Tutkimus suoritetaan äärellisten elementtien menetelmää (Finite Element Method, FEM) käyttämällä. Menetelmällä selvitetään tarkasteltavien rakenteiden jännityskonsentraatiokertoimien muutoksia sekä niiden sijaintia. FEM on siirtymien ja jännitysten ratkaisemiseksi luotu laskentatapa. Se antaa numeerisen vastauksen ratkaistavaan ongelmaan. Vastausta ei voi pitää yleispätevänä, vaan se sopii ainoastaan tietylle yksittäiselle tapaukselle. Vastausta ei voi myöskään pitää täysin tarkkana, ellei määritelty ongelma ole erittäin yksinkertainen. Tällaisia tapauksia varten on olemassa yleensä myös tarkka ja suora matemaattinen kaava. Käytännössä FEM toimii siten, että tarkasteltava rakenne jaetaan elementteihin ja elementtejä yhdistäviin solmuihin. Solmuille ja elementeille kohdistetaan rakenteeseen vaikuttavat kuormat ja tukireaktiot. Näiden perusteella lasketaan rakenteeseen aiheutuvat siirtymät, kiertymät ja jännitykset, sekä mahdollisesti ominaistajuudet. (Cook 1995, s. 1.)

FEM-analyysit suoritetaan FEMAP (Finite Element Modeling and Postprocessing) v.11.4.0 ohjelmistolla, jonka ratkaisijaohjelmana toimii NX Nastran. FEMAP on tarkoitettu mallien luomiseen ja muokkaamiseen, kun NX Nastran ratkaisee laskimen tavoin malleille asetettuja tapauksia. FEM-tulosten muokkaamisessa ja tarkemmassa analysoinnissa käytetään Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmistoa.

### 2.2 Nimellisen jännityksen menetelmä

Rakenteeseen kohdistuva nimellinen jännitys  $\sigma_{nim}$  muodostuu suoraan rakenteeseen vaikuttavasta kuormasta. Nimellinen jännitys ei huomioi rakenteen mikrogeometrisia epäjatkuvuuskohtia kuten hitsejä, mutta suuret rakenteen makrogeometriset muodon epäjatkuvuuskohdat tulevat huomioiduiksi (Hobbacher 2014, s. 15). Nimellinen normaalijännitys voi olla vetojännitystä tai taivutusjännitystä riippuen rakenteen kuormituksesta (Niemi & Kemppi 1993, s. 232):

$$\sigma_{nim} = \frac{F}{A} + \frac{My}{I} \quad (2)$$

Yhtälössä 2  $F$  on rakenteeseen vaikuttava voima ja  $A$  poikkipinta-ala vetokuormituksella.  $M$  on rakenteeseen vaikuttava taivutusmomentti,  $y$  etäisyys neutraaliakselilta ja  $I$  rakenteen poikkipinta-alan perusteella määritettävä jäyhyysmomentti.

### 2.3 Hot spot -menetelmä

Rakenteen muodon epäjatkuvuuskohdista, kuten hitsauksen aiheuttamista kulman muutoksista, aiheutuu rakenteeseen jännityskeskittymiä. Rakenteellinen jännityskeskittymä jakautuu lineaarisesti rakenteen paksuuden yli. Epäjatkuvuuskohdista aiheutuvia jännityksiä kutsutaan rakenteellisiksi jännityksiksi. Rakenteellinen jännitys muodostuu levymäisessä rakenteessa kalvo- ja taivutusjännityksestä. Epäjatkuvuusalue alkaa hitsin rajaviivasta ja rakenteellinen jännityskeskittymä kohdistuu siihen. Tätä hitsin rajaviivalle syntyvää rakenteellista jännitystä kutsutaan hot spot -jännitykseksi. (Niemi et al. 1993, s. 234–235.)

Hot spot jännitys voidaan määrittää kirjallisuudesta löytyvillä jännityskonsentraatiokertoimilla. Rakenteessa vaikuttava nimellinen jännitys kerrotaan tällöin tapaukseen sopivalla rakenteellisella jännityskonsentraatiokertoimella  $K_s$ . Jos sopivaa kerrointa ei löydy, voidaan hot spot -jännitys ja konsentraatiokerroin määrittää FEM-analyysiä hyödyntämällä. Todellisista rakenteista on myös mahdollisuus suorittaa venymämittaukset, jolloin rakenteen fyysisten muodonmuutosten perusteella voidaan laskea hot spot -jännitys. (Niemi et al. 1993, s. 234–235.)

Hot spot -jännitys  $\sigma_{hs}$  määritetään FEM-malleista ekstrapoloimalla jännitys lineaarisesti rakenteen pinnalta 0,4 ja 1,0 kertaa levyn paksuuden etäisyydeltä (0,4t ja 1,0t) hitsin rajaviivasta. Tuloksena saadaan rakenteellinen jännitys hitsin rajaviivalla. (Hobbacher 2014, s. 24.) IIW:n suosittelemaa menetelmää voidaan kutsua lineaariseksi pinnan jännitysten ekstrapoloinniksi (Linear Surface Extrapolation, LSE):

$$\sigma_{hs} = 1,67\sigma_{0,4t} - 0,67\sigma_{1,0t} \quad (3)$$

Yhtälössä 3  $\sigma_{0,4t}$  on kohtisuora jännitys 0,4 kertaa levynpaksuuden päässä hitsin rajaviivasta levyn pinnalta mitattuna.  $\sigma_{1,0t}$  on kohtisuora jännitys 1,0 kertaa levynpaksuuden päässä hitsin rajaviivasta levyn pinnalta mitattuna. Yhtälö ekstrapoloi rakenteellisen jännityksen hitsin rajaviivalle.

$K_s$ -kerroin määritetään hot spot -jännityksen ja nimellisen jännityksen avulla. Hot spot -jännitys on jännityskonsentraatiokertoimen ja nimellisen jännityksen tulo (Niemi et al. 1993, s. 235). Saman kaavan perusteella voidaan ratkaista myös  $K_s$ -kerroin, jos nimellinen jännitys ja hot spot -jännitys ovat tiedossa:

$$K_s = \frac{\sigma_{hs}}{\sigma_{nim}} \quad (4)$$

Yhtälössä 4  $\sigma_{hs}$  kuvaa hot spot -jännitystä ja  $\sigma_{nim}$  kuvaa nimellistä jännitystä.  $K_s$ -kerroin määrittää rakenteen muodon epäjatkuvuuden vaikutuksen jännitykseen.

#### 2.4 Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS-menetelmä)

Hitsi aiheuttaa rakenteen pinnalle paikallisen loven lisäaineen ja rakennemateriaalin rajalle. Lovi aiheuttaa muotonsa vuoksi rakenteeseen epälineaaraisesti jakautuvan jännityksen, jonka huippuarvo kohdistuu lähelle rakenteen pintaan. Tehollinen lovijännitys, ENS (Effective Notch Stress), muodostuu kalvo-, taivutus- ja huippujännityksestä. Koska huippujännityksen mittaaminen on hankalaa, se lasketaan yleensä hot spot -jännityksen ja lovenmuotoluku  $K_t$ :n tulona.  $K_t$  voidaan laskea erikseen myös kalvo- ja taivutuskomponenteille. (Niemi et al. 1993, s.235–236.)

$K_t$  tulee määrittää kullekin tapaukselle omakohtaisesti.  $K_t$  määritetään FEM-mallista kokonaisjännityksen ja hot spot -jännityksen kautta:

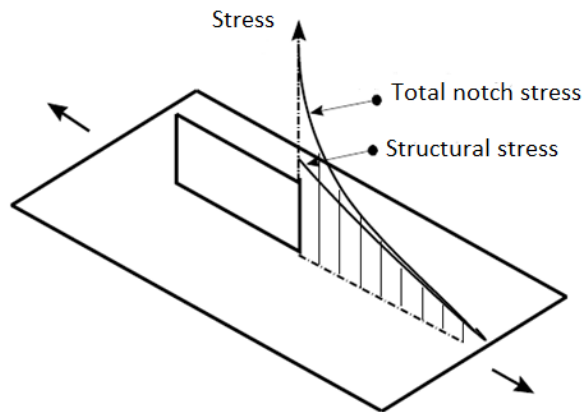
$$K_t = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{hs}} \quad (5)$$

Kaavassa 5  $\sigma_{max}$  tarkoittaa loven kohdalla vaikuttavaa kokonaisjännitystä ja  $\sigma_{hs}$  rakenteellista hot spot -jännitystä.

Rakenteessa vaikuttava kokonaisjännitys  $\sigma_{max}$  huomioi nimellisen jännityksen, rakenteellisen jännityksen ja lovenmuodon vaikutuksen. Tässä kandidaatintyössä tuon kokonaisjännityksen suhdetta nimelliseen jännitykseen kuvaa jännityskonsentraatiokerroin  $K_{tot}$ . Se saadaan yhtälöstä:

$$K_{tot} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nim}} \quad (6)$$

Rakenteellisen jännityksen ja loven huomioivan kokonaisjännityksen eroa havainnollistaa kuva 1. Loven vaikutus jännityspiikkiin hitsin rajaviivalla on merkittävä. Kuva esittää kuormaa kantamattoman liitoksen vedolla kuormitettua tapausta.



**Kuva 1.** Rakenteellisen hot spot -jännityksen ja loven huomioivan kokonaisjännityksen jakautuminen (muok. Hobbacher 2014, s. 13).

### 3 MALLIEN ANALYYSI

Kaksipuoleisen pitkittäisen rivan porrastamisen vaikutusten analysointi suoritetaan FEM-analyysiä, hot spot -menetelmää ja ENS-menetelmää käyttämällä. Hot spot -menetelmällä FEM-malleista ratkaistaan  $K_s$ -kerroin ja ENS-menetelmällä ratkaistaan  $K_{tot}$ -kerroin.  $K_s$ - ja  $K_{tot}$ -kertoimien avulla ratkaistaan lisäksi lovenmuotoluku  $K_t$ . Jännityskonsentraatiokertoimien muutoksia tarkastellaan, kun liitosrakennetta porrastetaan. Porrastus toteutetaan levynpaksuuteen suhteutettuna. Porrastus  $e$  määrittää porrastuksen pituuden millimetreissä. Porrastukset suhteutetaan levynpaksuuteen  $t$  siten, että ensimmäisen porrastuksen suhdeluku  $e/t$  on 0. Porrastusta kasvatetaan neljä kertaa  $e/t$ -suhteella 0,5. Viimeiseksi porrastussuhteeksi muodostuu näin ollen 2.

#### 3.1 Materiaalimalli

Liitosrakenteen materiaalina toimii teräs. Teräksen tiheys  $\rho$  on  $7850 \text{ kg/m}^3$ , Poissonin vakio  $\nu$  on 0,3 ja kimmomoduuli  $E$  on 210 GPa.

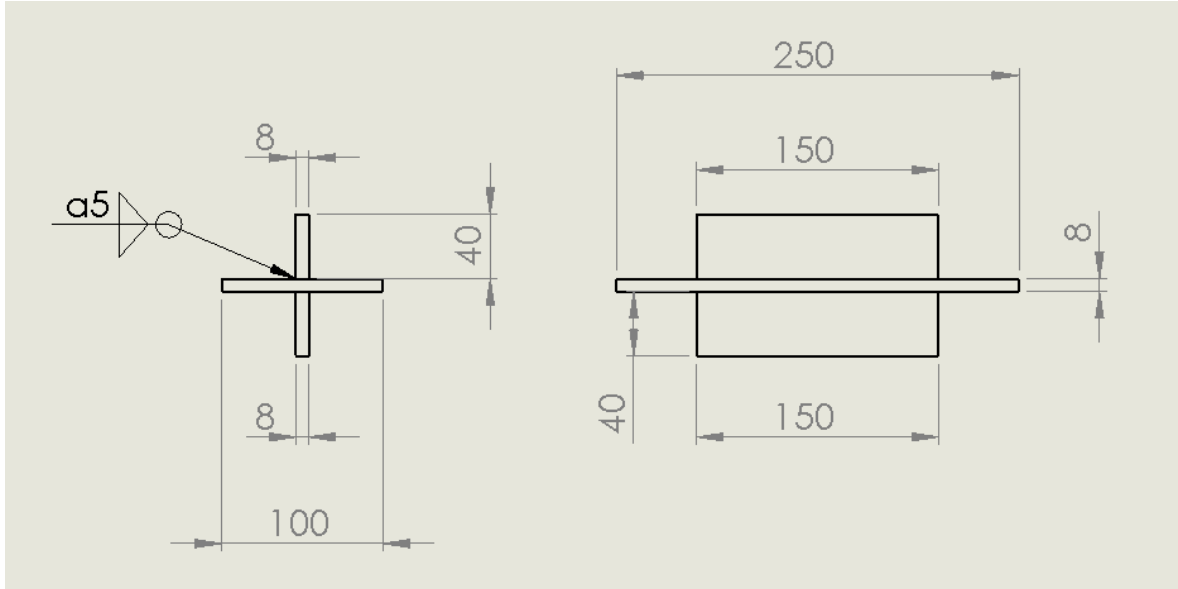
#### 3.2 Analyysityyppi

Analyysityyppinä FEM-mallinnuksessa käytetään lineaarista analyysiä. Lineaarinen analyysi pitää rakenteisiin kohdistuvia kuormia ja reunaehtoja muuttumattomina ajan suhteen, myös kuormien suunnat pysyvät samoina. Mallin materiaalin, teräksen, ajatellaan pysyvän kimmoisalla alueella. Lineaarisen analyysin tuloksiin ei välity rakenteen deformaation vaikutuksia, kuten esimerkiksi geometrisesti epälineaarisen analyysin tapauksessa. Tämä on huomioitava määritettäessä alkuperäisen rakenteen jännityskonsentraatiokertoimia.

#### 3.3 Liitosten mallinnus

Liitosten rakenne muodostuu peruslevystä, sekä sen ylä- ja alapuolelle hitsatuista pystylevyistä. Pystylevyjen porrastus tehdään levynpaksuuteen suhteutettuna pituus- ja leveyssuunnassa, sekä näiden yhdistelmässä. Porrastus tehdään peruslevyn keskilinjojen suhteen symmetrisesti. Porrastettaessa rakennetta leveyssuunnassa, peruslevy ja pystylevyt pysyvät mitoiltaan muuttumattomina. Kun porrastus tehdään pituussuunnassa, porrastettavan pystylevyn pituus muuttuu porrastuksen verran. Pituussuunnan porrastus tehdään lyhentämällä peruslevyn alapuolista pystylevyä. Peruslevyn pituussuuntainen vapaa-alue pystylevyn hitsin rajaviivalta pysyy kaikissa tapauksissa 50 mm mittaisena, jotta rakenteista voidaan laskea tarvittavat jännityskonsentraatiot. Kuvassa 2 esitetään

porrastamattoman liitoksen mitat ja muodot. Porrastamaton liitos määrittää lähtötilanteen ja mitat FEM-malleihin.

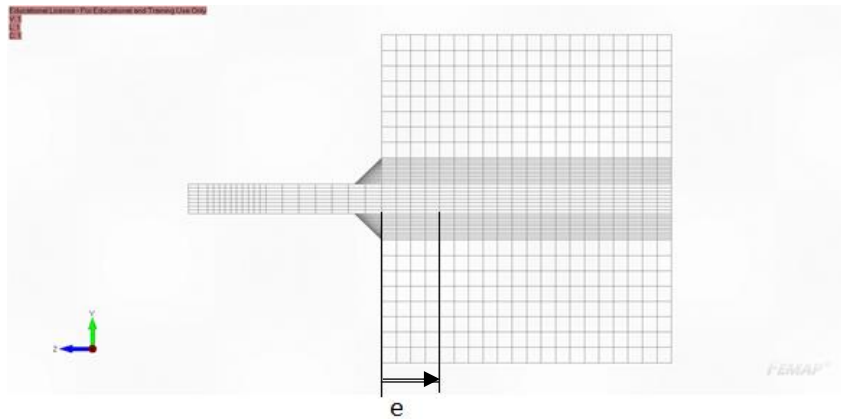


**Kuva 2.** Porrastamaton liitos.

FEM-mallien elementtityyppinä käytetään tilavuuselementtejä (solid element). Tilavuuselementtien avulla on mahdollista mallintaa ja laskea kolmiulotteisia tapauksia, joka on välttämätöntä porrastuksen tapahtuessa kahden akselin suuntaan. Tilavuuselementit mahdollistavat myös hitsausgeometrian oikeanlaisen muodostamisen.

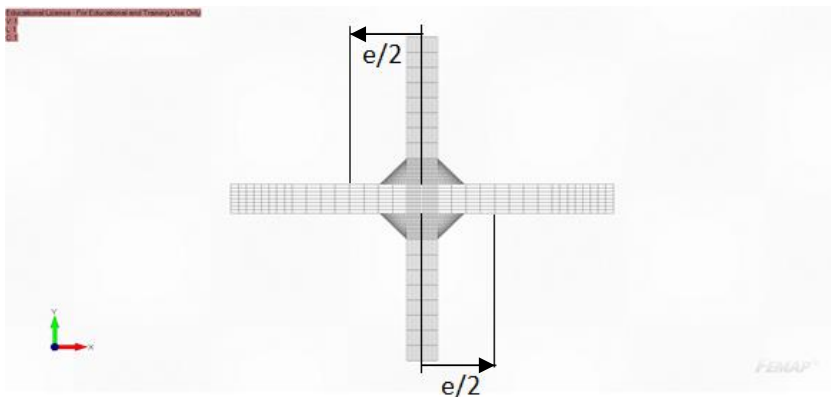
FEM-mallit luodaan puolimalleiksi todellisiin mittoihin nähden. Mallit katkaistaan pituussuunnan keskijalalta, jolloin peruslevyn pituudeksi muodostuu 125 mm. Mallien puolitus on mahdollista symmetrisyydestä johtuen. Puolittaminen vaatii reunaehtojen asettamisen FEM-mallin katkaistuun pätyyn eli todellisen mallin keskijalalle. Kuvassa 3 esitetään porrastamattoman liitoksen FEM-malli yz-tasossa. Kuvaan merkitty porrastus e määrittää porrastuksen suunnan. Porrastus toteutetaan peruslevyn alapuolisen pystylevyn pituutta lyhentämällä.





**Kuva 3.** Porrastamaton liitos yz-tasossa, FEMAP-malli.

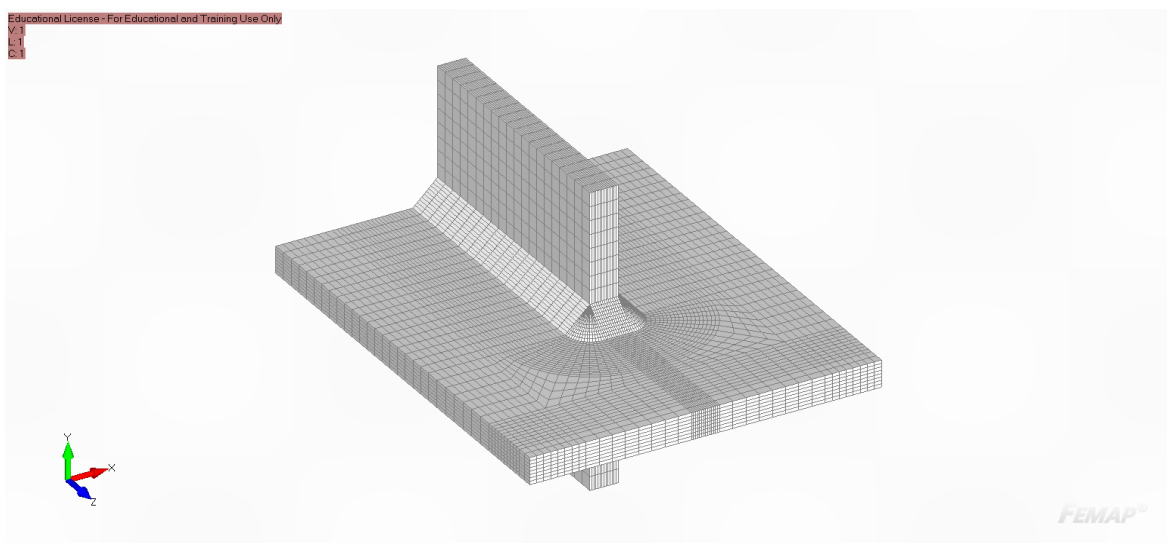
Leveys suunnan porrastus esitetään kuvassa 4. Porrastus  $e$  toteutetaan peruslevyn keskilinjalta symmetrisesti siten, että peruslevyn alapuolinen pystylevy siirtyy puolet porrastuksesta x-akselin suuntaan ja peruslevyn yläpuolinen pystylevy siirtyy puolet porrastuksesta vastakkaiseen suuntaan.



**Kuva 4.** Porrastamaton liitos xy-tasossa, FEMAP-malli.

Yhdistetyssä porrastuksessa porrastussuhteet ovat samat kuin pituus- ja leveys suunnan tapauksissa. Yhdistetyssä porrastuksessa porrastus tapahtuu sekä pituus- että leveys suuntaan samaan aikaan.

Kuvassa 5 on porrastamattoman FEM-mallin geometria hot spot -menetelmälle. Tarkastelualueen eli hitsin alueen verkotustiheys on korkeampi kuin muun rakenteen, jotta tuloksista muodostuisi riittävän tarkkoja. Elementtikoossa on huomioitu IIW:n suositukset, jotta rakenteellisen hot spot -jännityksen ekstrapolointi mallin solmuilta onnistuisi tarkasti.



**Kuva 5.** Porrastamaton hot spot -menetelmän malli.

FEM-mallinnuksessa on hyödynnetty liimakontaktin käyttöä. Liimakontakti muodostaa elementtipintojen välille kontaktielementin, joka välittää rakenteessa vaikuttavat fysikaaliset ilmiöt. Liimakontaktia käytetään, kun kahden elementtipinnan solmut eivät kohtaa keskenään, vaikka niiden olisi tarkoitus kohdata. Tällöin normaalisti solmujen välittämät siirtymät välittyvät elementeille kontaktielementin avulla.

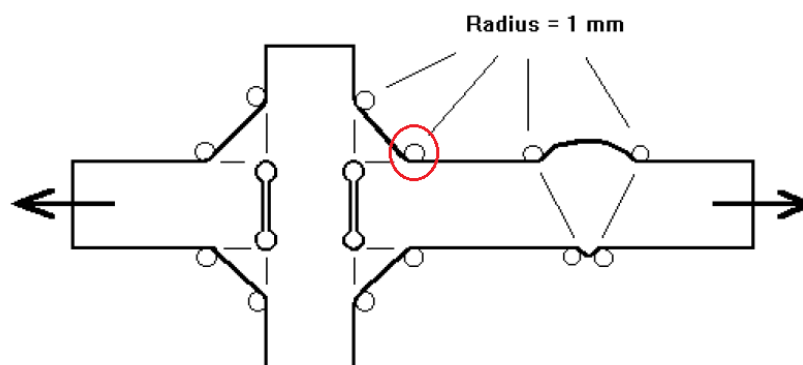
FEM-mallit on rakennettu siten, että peruslevyn paksuuden keskilinjalla käytetään liimakontaktia. Tällöin pystylevyjen porrastus voidaan suorittaa yksinkertaisesti siirtämällä keskilinjan alapuolista peruslevyn ja pystylevyn yhdistelmää ilman, että solmujen kohdistuksesta aiheutuisi ongelmaa. Siirron jälkeen liitosgeometria pursotetaan elementeiltään muotoonsa.

### 3.3.1 Hot spot- ja ENS-menetelmän vaatimukset

FEM-malleissa on käytetty IIW:n suosituksia liitosalueen geometrian osalta. Tärkeimpiä vaatimuksia ovat elementtikoko ja hitsin rajaviivan pyöristyssäteet. IIW suosituksissa levynpaksuutta merkitään symbolilla  $t$ .

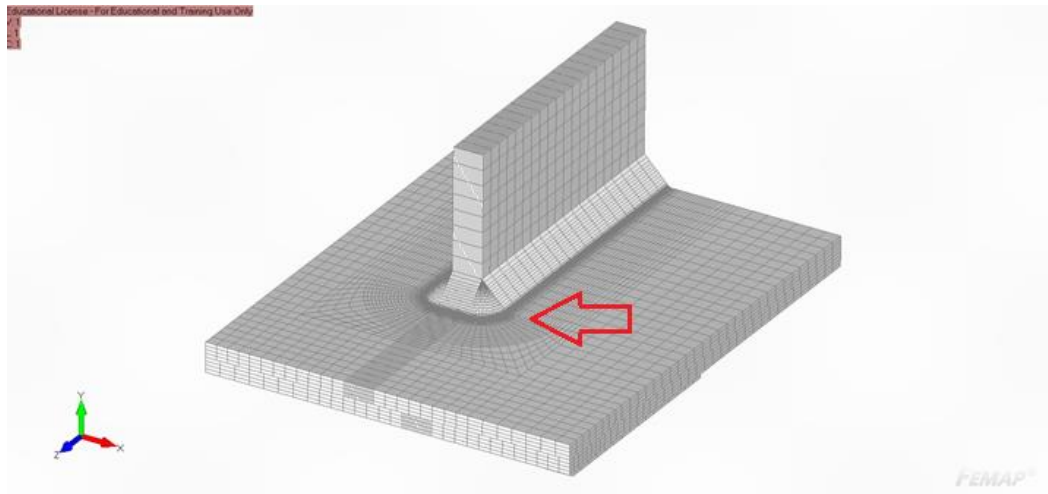
IIW määrittää a-tyyppin mallit siten, että tilavuuselementtien tulee olla pienempiä kuin  $0,4t * t$ . Solmujen tulee sijaita  $0,4t$  ja  $1,0t$  etäisyyksillä hitsin rajaviivasta, jotta tarvittava jännitys voidaan ekstrapoloida kyseisiltä etäisyyksiltä. (Hobbacher 2014, s. 24–26.) Hot spot -menetelmän FEM-mallit on rakennettu suhteellisen tarkoiksi, a-tyyppin mukaisiksi. Liitosrakenne on mallinnettu siten, että hot spot -menetelmän ekstrapolointi voidaan suorittaa mistä tahansa suunnasta solmuilta laskettaessa.

ENS-menetelmää voidaan soveltaa levynpaksuuksille  $t > 5$  mm. Todellinen hitsin loven muoto korvataan menetelmässä pyöristyksellä  $r$ , joka on 1 mm. Pyöristys on voimassa rakenneteräksillä ja alumiiniseoksilla. Pyöristyssäteen käyttö on verifioitu. (Hobbacher 2014, s. 29–31.) Hitsin rajaviivalla, hitsin ollessa 45 asteen kulmassa, suositellaan käytettäväksi vähintään kolmea elementtiä pyöristyskaarella pyöristyssäteen ollessa 1 mm. Näin ollen suurimmaksi sallituksi elementtipituudeksi saadaan 0,25 mm. Samaa elementtikokoa suositellaan jatkettavan myös jonkin verran pyöristyksen jälkeisellä suoralla, sillä jännityshuippu saattaa muodostua hieman pyöristyksen ulkopuolelle. (Fricke 2010, s. 11.) ENS-menetelmän mukaisissa FEM-malleissa yhden millimetrin pyöristyssädettä on käytetty hitsin rajaviivalla. Käytetty pyöristyksen sijainti esitetään kuvassa 6.



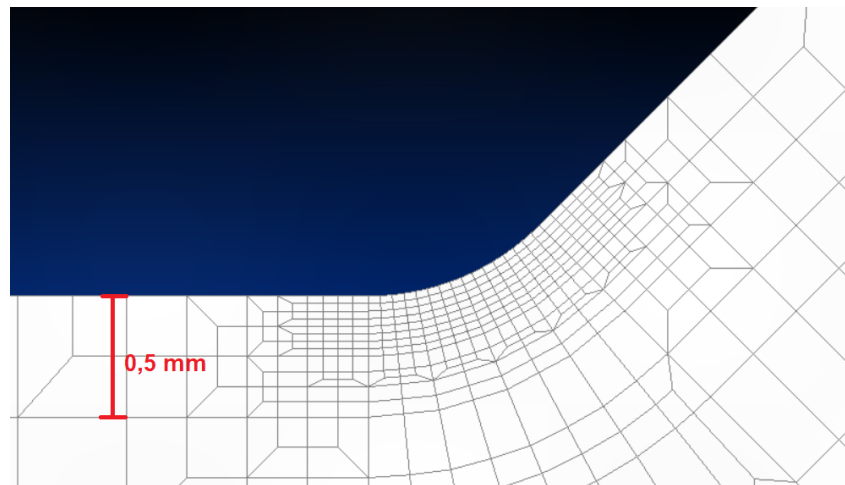
**Kuva 6.** ENS-menetelmän pyöristykset hitsausliitoksissa (muok. Hobbacher 2014, s. 30).

ENS-menetelmän malleissa yhden millimetrin pyöristyssäde on huomioitu ainoastaan kuvan 7 osoittaman punaisen nuolen alueelle hitsin rajaviivalle. Jännityskonsentraatiot lasketaan kyseiseltä alueelta, jolloin pyöristyssäteen käyttäminen muilla alueilla ei ole relevanttia. Pystylevyjen hitsaus peruslevyyn on mallinnettu siten, että niiden solmut eivät ole levynpaksuudelta kiinni peruslevyssä, jolloin analyysiin ei synny läpihitsatun rakenteen vaikutuksia.



**Kuva 7.** ENS-malli.

ENS-mallien hitsin rajaviivalle muodostettu pyöritys on esitetty kuvassa 8. Kuva havainnollistaa myös verkotustiheyden kasvamisen pyörityssäteen alueella, sekä elementtien mittakaavan.



**Kuva 8.** Elementtikoko ENS-mallissa hitsin rajaviivalla.

### 3.3.2 Liitosrakenteiden kuormitukset ja reunaehdot

Sekä ENS- että hot spot -mallien reunaehdot asetetaan rakenteen katkaistuun päähän, todellisen rakenteen pituussuunnan symmetrialinjalle. Reunaehdoksi asetetaan jäykkä tuenta. Solmujen liike estetään x-, y- ja z-akseleiden suunnissa. Reunaehto ottaa huomioon, että rakenne jatkuisi todellisuudessa kyseisestä päädyistä symmetrisenä. Samalla reunaehto poistaa jäykän kappaleen liikkeen.

Kuormitukset asetetaan FEM-malleihin siten, että analyysin tuloksena saadaan jännityskonsentraatiokerroin. Jokainen FEM-malli analysoidaan erikseen vetokuormituksella ja taivutuskuormituksella. Vetokuormitus asetetaan tasaisesti jakautuneeksi peruslevyn pystylevyistä vapaaseen pätyyn z-akselin suuntaiseksi. Vetokuorman suuruudeksi asetetaan 1 N/mm, jolloin rakenteeseen muodostuu 1 MPa suuruinen nimellinen jännitys. Nimellisen jännityksen ollessa 1 MPa voidaan konsentraatiokertoimet lukea suoraan analyysin jännitystuloksista yhtälöiden 3 ja 5 perusteilla. Taivutuskuorma asetetaan peruslevyn pätyyn samaan tapaan ensiksi 1 MPa nimelliseksi jännitykseksi. Taivuttava osuus kuormaan asetetaan levynpaksuuden huomioivalla yhtälöllä:

$$f(x) = 0,25y + 1 \quad (7)$$

Yhtälö asettaa peruslevyn paksuudelle taivutusjännitysjakauman siten, että levyn neutraaliakselin yläpuolella on vetoa ja alapuolella puristusta. Tällöin peruslevyn taivutus suuntautuu alaspäin.

### 3.4 Analyysin kulku

FEM-malleista saadaan lineaarisen analyysin perusteella hot spot -tapauksessa jännitykset  $\sigma_{0,4t}$   $\sigma_{1,0t}$  ja ENS-tapauksessa kerroin  $K_{tot}$ .  $K_S$ -kertoimet lasketaan hot spot -tapauksista saaduilla jännitysarvoilla yhtälöiden 3 ja 4 avulla. Saatujen  $K_S$ - ja  $K_{tot}$ -kertoimien avulla määritetään FEM-mallien  $K_T$ -kertoimet yhtälön 5 avulla siten, että  $K_{tot}$  vastaa jännitystä  $\sigma_{max}$  ja  $K_S$  vastaa jännitystä  $\sigma_{hs}$ . Kun kaikki kertoimet on määritetty, niistä muodostetaan kuvaajat porrastuksen  $e/t$  suhteen vetokuormitus- ja taivutuskuormitustapauksille.

#### 4 TULOKSET

Tässä osiossa esitellään FEM-mallien perusteella saadut konsentraatiokertoimet. Konsentraatiokertoimet on laskettu lineaarisella analyysillä. Taulukoissa esitetään jokaisesta porrastus- ja kuormitustapauksesta syntyvät tapauskohtaiset konsentraatiokertoimet. Taulukon sarake  $e/t$  määrittää porrastuksen  $e$  suhdetta levynpaksuuteen  $t$ . Sarakkeet *Leveys*, *Pituus* ja *Yhdistetty* määrittävät porrastuksen suunnan leveys- ja pituussuunnassa, sekä niiden yhdistelmässä. Numeeristen tulosten perusteella muodostetut kuvaajat havainnollistavat kuormitusten ja porrastusten vaikutusta konsentraatiokertoimiin.

Vetokuormitetuista FEM-malleista lasketut konsentraatiokertoimet  $K_s$  ja  $K_{tot}$  on esitetty taulukossa 1. Tulokset on pyöristetty kahden desimaalin tarkkuudella.

*Taulukko 1. Kokonaisjännityksen  $K_{tot}$  ja hot spot -jännityksen  $K_s$  konsentraatiokertoimet vetokuormitetussa liitoksessa.*

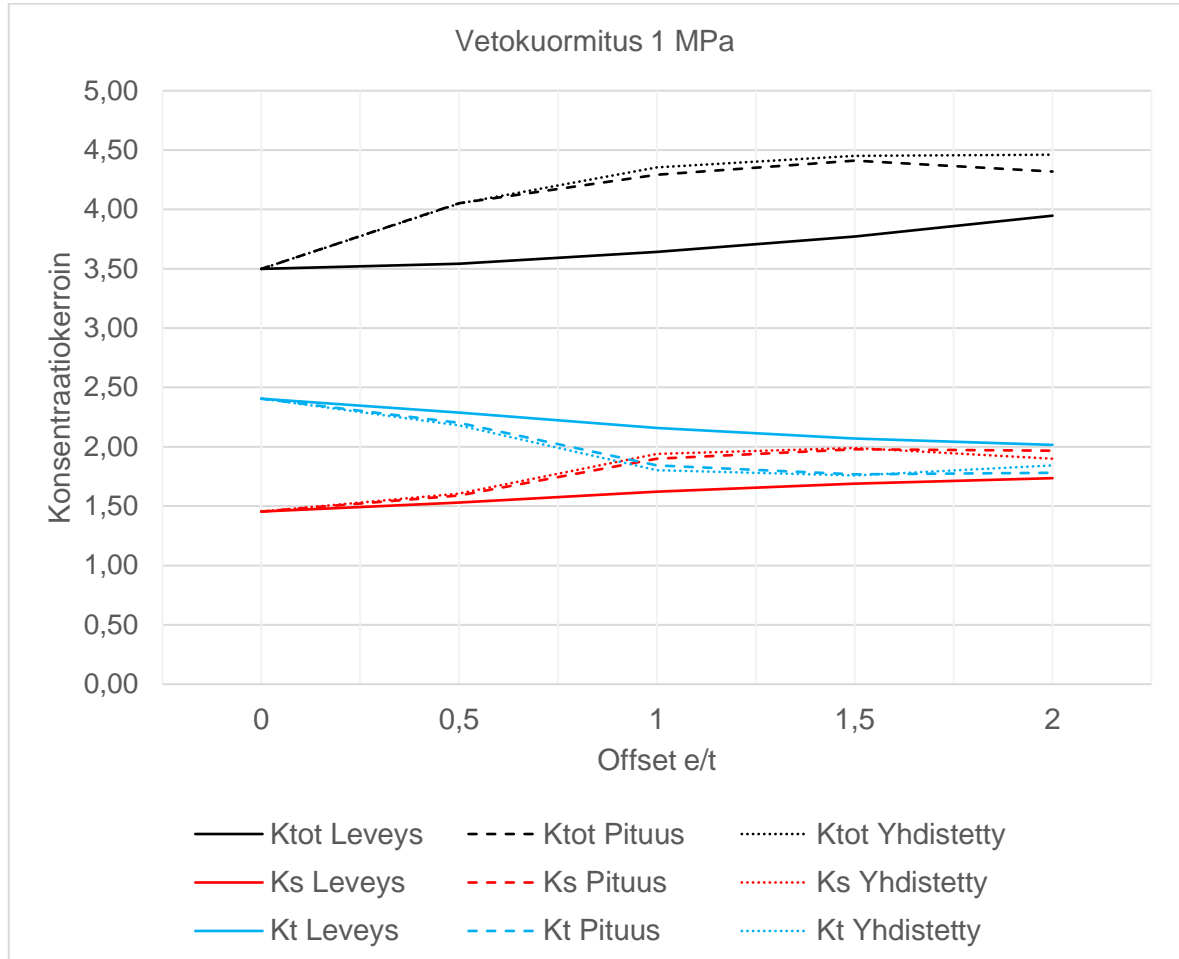
VETO	ENS $K_{tot}$			HS $K_s$		
	e/t	Leveys	Pituus	Yhdistetty	Leveys	Pituus
0	3,50	3,50	3,50	1,45	1,45	1,45
0,5	3,54	4,05	4,05	1,53	1,59	1,60
1	3,64	4,29	4,35	1,62	1,90	1,94
1,5	3,77	4,41	4,45	1,69	1,98	1,99
2	3,95	4,32	4,46	1,74	1,97	1,90

$K_s$  ja  $K_{tot}$  kertoimien perusteella on laskettu lovenmuotoluku  $K_t$ . Lovenmuotoluku saadaan, kun  $K_{tot}$ -kerroin jaetaan  $K_s$ -kertoimella. Lovenmuotoluvut vetokuormitetusta liitoksesta ovat taulukossa 2.

*Taulukko 2. Lovenmuotoluku  $K_t$  vetokuormitetussa liitoksessa.*

VETO	$K_t$		
	e/t	Leveys	Pituus
0	2,41	2,41	2,41
0,5	2,29	2,20	2,18
1	2,16	1,84	1,80
1,5	2,07	1,77	1,76
2	2,02	1,78	1,84

Vetokuormitetun liitoksen konsentraatiokertoimet ja lovenmuotoluvut ovat kuvassa 9. Kertoimet esitetään tapauskohtaisesti kaikilla porrastussuhteilla.



**Kuva 9.** Konsentraatiokertoimet vetokuormitetussa liitoksessa.

Taivutuskuormitetuista FEM-malleista lasketut konsentraatiokertoimet  $K_s$  ja  $K_{tot}$  on esitetty taulukossa 3. Tulokset on pyöristetty kahden desimaalin tarkkuudella.

*Taulukko 3. Huippujännityksen ja hot spot -jännityksen konsentraatiokertoimet taivutuskuormitetussa liitoksessa.*

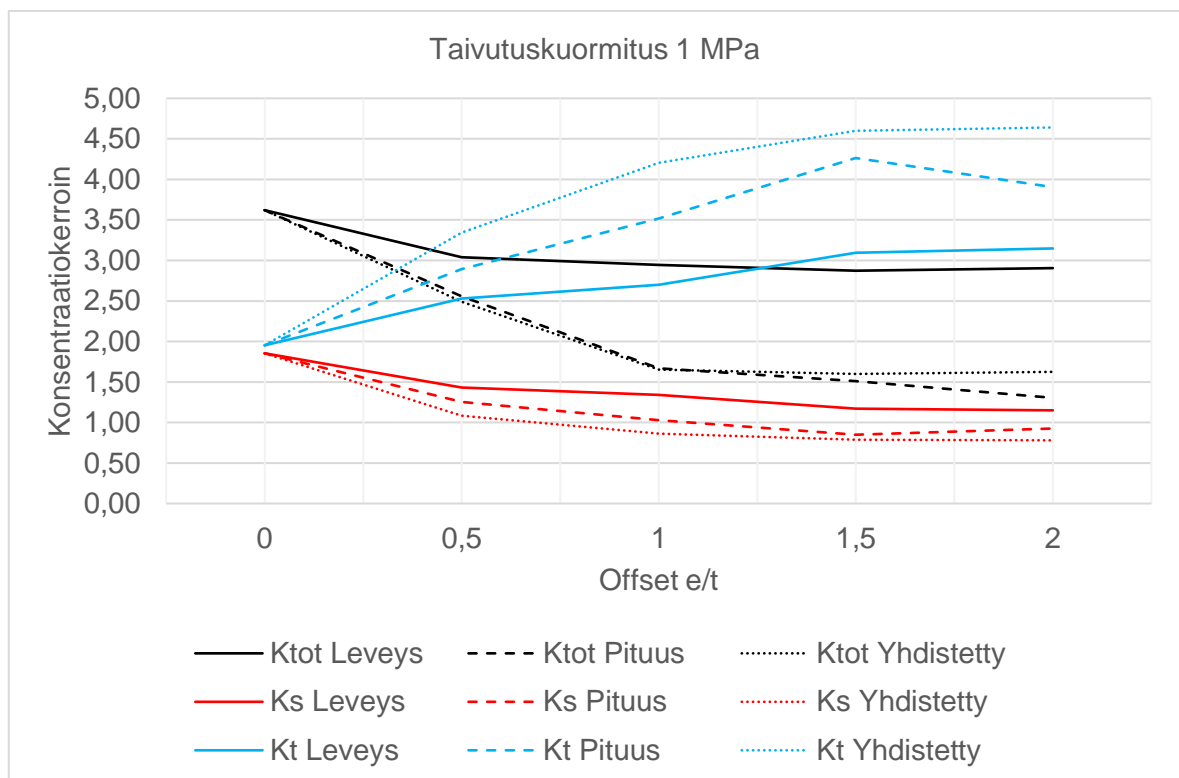
TAIVUTUS e/t	ENS $K_{tot}$			HS $K_s$		
	Leveys	Pituus	Yhdistetty	Leveys	Pituus	Yhdistetty
0	3,62	3,62	3,62	1,85	1,85	1,85
0,5	3,04	2,56	2,49	1,43	1,25	1,08
1	2,95	1,67	1,65	1,34	1,03	0,86
1,5	2,87	1,51	1,60	1,17	0,85	0,79
2	2,91	1,30	1,63	1,15	0,93	0,78

$K_s$  ja  $K_{tot}$  kertoimien perusteella on laskettu lovenmuotoluku  $K_t$ . Lovenmuotoluku saadaan, kun  $K_{tot}$ -kerroin jaetaan  $K_s$ -kertoimella. Lovenmuotoluvut taivutuskuormitetusta liitoksesta ovat taulukossa 4.

Taulukko 4. Lovenmuotoluku  $K_t$  taivutuskuormitetussa liitoksessa.

TAIVUTUS e/t	$K_t$		
	Leveys	Pituus	Yhdistetty
0	1,95	1,95	1,95
0,5	2,53	2,89	3,34
1	2,70	3,52	4,21
1,5	3,09	4,26	4,60
2	3,15	3,91	4,64

Taivutuskuormitetun liitoksen konsentraatiokerroimet ja lovenmuotoluvut ovat kuvassa 10. Kertoimet esitetään tapauskohtaisesti kaikilla porrastussuhteilla.

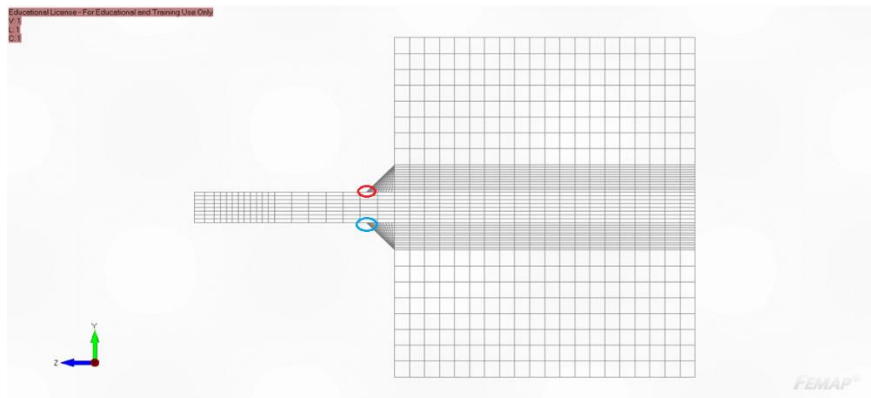


Kuva 10. Konsentraatiokerroimet taivutuskuormitetussa liitoksessa.

FEM-malleista määritetyt konsentraatiokerroimet ovat aina kunkin porrastus- ja kuormitustapauksen maksimiarvoja. Konsentraatiokerroin on otettu siltä puolelta liitosrakennetta, minne muodostuu suurin arvo. Kuva 11 havainnollistaa maksimiarvojen sijaintia suhteessa peruslevyyn. Leveyssuunnan porrastus ja vetokuormitus luovat



tilanteen, jossa suurin konsentraatio muodostuu kääntäen symmetrisesti sekä peruslevyn ylä- ja alapinnoille (sininen ja punainen alue hitsien rajaviivoilla). Pituussuunnan porrastus ja vetokuormitus luovat suurimman konsentraation porrastetun levyn puolelle (sininen alue hitsin rajaviivalla). Yhdistetyssä porrastuksessa suurin konsentraatio muodostuu vetokuormituksella pituussuuntaan porrastetun levyn puolelle (sininen alue hitsin rajaviivalla). Taivutuskuormitettuun rakenteeseen suurin konsentraatio muodostuu aina peruslevyn yläpinnalle (punainen alue hitsin rajaviivalla).



**Kuva 11.** Maksimijännitysten sijainti.

FEM-mallien konsentraatiokertoimien pyöristämättömät tulokset ja laskut löytyvät liitteistä. Niihin on kirjattu jännitykset  $\sigma_{0,4t}$  ja  $\sigma_{1,0t}$ , niiden kautta lasketut  $K_s$ -kertoimet sekä  $K_{tot}$ -kertoimet.

Tulokset on luettu FEM-malleista käyttämällä maksimipääjännityskriteeriä. Tulokset on otettu hot spot -tapauksien FEM-malleista solmuilta ja ENS-tapauksissa suurimpana jännityksenä elementeiltä. Analyysin tulokset eivät huomioi hitsauksen mahdollisesti aiheuttamia kulmavirheitä.

## 5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Porrastuksen vaikutukset jännityskonsentraatioihin muodostuvat pitkälti kuormituksen perusteella. Vetokuormituksen vaikutus porrastuksen kanssa poikkeaa huomattavasti taivutuskuormituksen vaikutuksista.

### 5.1 Vetokuormitus

Vetokuormituksen tapauksessa ENS-menetelmän mukaisten mallien tuottamat  $K_{tor}$ -kertoimet kasvavat porrastuksen kasvaessa, riippumatta porrastuksen suunnasta. Erityisesti pituussuunnan ja yhdistetyn porrastuksen konsentraatiokertoimien kasvu on merkittävää. Yhdistetty konsentraatio saavuttaa suurimman arvon, mistä voidaan päätellä porrastuksen yleisesti kohottavan vetokuormituksessa syntyviä kokonaisjännityskonsentraatioita.

Rakenteelliset jännitykset aiheutuvat hitsatun rakenteen epäjatkuvuuskohdista. Esimerkiksi erilaiset levyyn hitsatut rivat aiheuttavat rakenteellista jännitystä. (Niemi et al. 1993, s. 234) Sama ilmiö voidaan huomata hot spot -menetelmän mukaisista malleista, joiden  $K_s$ -kertoimet kasvavat vetokuormituksen tapauksessa samalla kun porrastus kasvaa. Porrastaminen lisää rakenteen muodon epäjatkuvuutta, mikä korostuu erityisesti suuremmilla porrastussuhteilla. Pituussuunnan porrastuksen vaikutus on suurempaa verrattuna leveyssuunnan porrastukseen.

$K_s$ - ja  $K_{tor}$ -kertoimien tapauksissa pituussuunnan ja yhdistetyn porrastuksen kasvattaminen kasvattaa molempia kertoimia hyvin yhtäläisesti. Näissä tapauksissa yhdistetty porrastus näyttäisi korreloivan enemmän pituussuunnan porrastusta kuin leveyssuunnan porrastusta.

Vetokuormituksen tapauksessa  $K_t$  pienenee porrastuksen kasvaessa. Pituussuunnan ja yhdistetyn porrastuksen tapauksissa muutos on suurempaa kuin leveyssuunnan porrastuksessa. Ilmiö lovenmuotoluvun kohdalla on lähes käänteinen verrattuna rakenteellisen jännityksen ja kokonaisjännityksen konsentraatiokertoimiin.

Rakenteellisen jännityksen merkitys kasvaa ja lovenmuodon vaikutus pienenee, kun porrastusta kasvatetaan vetokuormitetussa kuormaa kantamattomassa liitoksessa.

## 5.2 Taivutuskuormitus

Taivutuskuorman tapauksessa  $K_{tot}$  pienenee huomattavasti porrastuksen kasvaessa. Pituussuunnan porrastuksen jännityskonsentraatio muuttuu saman suuntaisesti yhdistetyn porrastuksen jännityskonsentraation kanssa, jotka molemmat laskevat huomattavasti porrastussuhteen kasvaessa yhteen. Leveyssuunnan porrastamisen vaikutukset ovat pienempiä.

Rakenteellisen hot spot -jännityksen  $K_s$ -kerroin pienenee porrastuksen kasvaessa. Leveyssuunnan porrastus pienentää konsentraatiokerrointa vähemmän kuin pituussuunnan porrastus. Yhdistetyn porrastuksen muutokset ovat suurimpia porrastusta kasvatettaessa.

Loven vaikutus kasvaa taivutuskuorman tapauksessa. Taivutuskuormalla jännitysjakauman suurin piikki kohdistuu materiaalin pintaan, joka korostaa levyn pinnalla hitsin rajaviivan kohdalla olevaa loven aluetta. Yhdistetyllä porrastuksella lovenmuotoluku kasvaa erittäin paljon  $e/t$ -suhteen kasvaessa verrattuna pituus- tai leveyssuunnan porrastuksiin. Pituussuunnan porrastuksen vaikutus on merkittävämpää kuin leveyssuunnan porrastus lovenmuotoluvulla.

## 5.3 Porrastuksen vaikutukset

Kuormaa kantamattoman liitoksen pystylevyjen porrastaminen vaikuttaa suurimpien jännityskonsentraatioiden sijaintiin rakenteessa. Porrastamattomassa rakenteessa jännityskonsentraatiot ovat yhtä suuret molemmin puolin peruslevyä. Vetokuormituksella pituussuunnan porrastus siirtää korkeimman jännityskonsentraation porrastetun pystylevyn päähän. Sivusuunnan porrastus vetokuormituksella pitää jännitykset kääntäen symmetrisinä vaaka-akselin suhteen siten, että jännitys kohdistuu aina peruslevyn molemmin puolin pystylevyn päädyn kulmaan. Taivutuskuorman tapauksessa suurin jännityskonsentraatio pysyy peruslevyn yläpinnalla.

Porrastuksen yleisistä vaikutuksista kuormaa kantamattomassa liitoksessa tehtiin seuraavat johtopäätökset:

- Kuormaa kantamattoman liitoksen porrastaminen vaikuttaa suurimpien jännityskonsentraatioiden sijaintiin rakenteessa, mikä johtaa murtumalle alttiin pisteen siirtymiseen verrattuna porrastamattomaan rakenteeseen.

- Sivusuunnan porrastus aiheuttaa vetokuormituksella kappaleeseen kiertymistä. Pituussuunnan porrastus korostaa kappaleen taipumista ylöspäin vetokuorman tapauksessa.
- Porrastaminen voi lisätä tai vähentää rakenteessa vaikuttavia jännityskonsentraatioita.
- Jännityskonsentraatioiden muuttuminen pienenee, kun  $e/t$  suhde lähenee kahta.
- Porrastamisen seurauksena rakenteeseen syntyy vetokuormituksen tapauksessa enemmän sekundäärisiä jännityksiä verrattuna porrastamattomaan rakenteeseen.
- Pituussuunnan porrastuksella saavutetaan monesti lähes sama vaikutus kuin yhdistetyllä porrastuksella. Pituussuunnan porrastus korreloi huomattavasti yhdistettyä porrastusta tutkituilla tapauksilla.
- Leveyssuunnan porrastuksella saavutetaan vähäisempiä muutoksia jännityskonsentraatioihin verrattuna pituussuunnan tai yhdistetyn porrastuksen tapauksiin.

## 6 POHDINTA

Tässä työssä päästiin esitettyyn tavoitteeseen. Tavoitteena oli selvittää kaksipuoleisen pituussuuntaisen rivan porrastuksen vaikutus jännityskonsentraatioihin. Myös tutkimuskysymyksiin saatiin vastauksia. Työn tulokset laskettiin esitellyn teorian ja menetelmien mukaisesti, ja lopuksi niistä muodostettiin johtopäätökset. Tulosten tueksi etsittiin myös mahdollisuuksien mukaan vertailukelpoista informaatiota alan kirjallisista julkaisuista ja tutkimuksista. Vertailukelpoista tutkimustietoa aiheesta ei käytännössä ole saatavilla.

### 6.1 Hypoteesin analysointi

Hypoteesina oletettiin pituussuunnan porrastuksen vaikuttavan jännityskonsentraatioihin enemmän kuin leveyssuunnan porrastuksen. Kyseinen hypoteesi pitää tulosten perusteella paikkansa, sillä pituussuunnan porrastuksella vaikuttaa olevan suurempi vaikutus jännityskonsentraatioiden muuttumiseen kuin leveyssuunnan porrastuksella. Yhdistetyn porrastuksen vaikutus ei näytä tulosten perusteella sijoittuvan pituussuunnan ja leveyssuunnan porrastusten välille.

### 6.2 Jatkotutkimustarve

Tutkimuksessa tarkasteltiin kuormaa kantamatonta liitosta levynpaksuudella 8 mm. Tulokset ilmoitettiin suhteutettuna porrastuksen suhteelliseen pituuteen, jolloin jännityskonsentraatioiden muutoksia on tarkoitus voida soveltaa myös muille levynpaksuuksille. Jotta tutkimustuloksista ja niiden mahdollisesta yleispätevyydestä saataisiin suurempi varmuus, tulisi porrastamisen vaikutukset analysoida suhteellisesti samoilla liitosgeometrioiden siten, että levynpaksuutta kasvatettaisiin. Tällöin voitaisiin saada varmuus, että havaitut tulokset ovat yleisesti päteviä. Tuloksilla voitaisiin suorittaa väsymiskestävyyden tutkimista ja mahdollisesti verifioida väsymiskestävyyden tuloksia.

Tutkimus suoritettiin FEM-analyysillä. Tutkimuksesta saatuja tuloksia olisi hyvä verrata myös todellisilla aineenkoetuskokeilla laboratorio-olosuhteissa saataviin tuloksiin. Käytännön tulosten vertaaminen analyttisiin tuloksiin lisäisi tulosten reliabiliteettia. Käytännössä FEM-analyysillä saavutetaan kuitenkin tarkkoja ja riittävän laajoja tuloksia verrattuna laboratoriokokeisiin, jotta pelkkiä jännityskonsentraatioita olisi kannattavaa tutkia laboratoriossa. Väsymiskestävyyden tutkimisen yhdistäminen porrastuksen vaikutuksiin antaa enemmän aihetta laboratoriossa suoritettaville kokeille.

### 6.3 Virhetarkastelu ja teorian puutteet

Kandidaatintyön hot spot -mallien LSE-laskuissa voi esiintyä epätarkkuutta tulkintatavasta riippuen. LSE-menetelmässä hot spot -jännitys ekstrapoloidaan rakenteen pinnan solmuilta kohtisuoraan hitsin rajaviivaa nähden. Hitsin rajaviivan ollessa kaartuva, 0,4t ja 1,0t etäisyydellä olevat solmut eivät välttämättä kohdistu oikealle linjalle, jos verkotustiheys hitsin rajaviivalla ei ole riittävän tarkka kolmiulotteisessa tapauksessa. IIW ei määritä solmutiheyttä hitsin rajaviivan suuntaisesti hitsin rajaviivalle, mikä asettaa hot spot -laskentamenetelmään epätarkkuusmahdollisuuden, kun jännityksiä lasketaan solmuilta. Tulosten tarkkuutta voitaisiin lisätä, kun verkotustiheyttä kasvatettaisiin hitsin rajaviivalla.

### 6.4 Tulosten hyödyntäminen

Tämän kandidaatintyön tuloksia on mahdollista hyödyntää esimerkiksi jatkotutkimusten jälkeen väsymiskestävyyden määrittämisessä porrastetuissa kuormaa kantamattomissa liitoksissa, kun porrastuksen vaikutukset liitosrakenteen jännityskonsentraatioihin tunnetaan. Myös valmistustekniset sovellukset ovat mahdollisia jatkotutkimusten jälkeen.

## 7 YHTEENVETO

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin kaksipuoleisen pitkittäisen rivan porrastuksen vaikutusta jännityskonsentraatioihin. Tutkimustarve syntyi vähäisestä tutkimustiedosta porrastuksen vaikutusten osalta. Työssä oli tarkoitus keskittyä yksinkertaistettuun tapaukseen, josta saadaan perustietoa mahdollisia tarkempia jatkoselvityksiä varten.

Porrastuksen vaikutusten tarkastelu kohdistuu laajasti käytettyihin hot spot- ja ENS-menetelmiin. Näiden menetelmien avulla saatuja tuloksia on käytännöllistä hyödyntää muissa vastaavien liitosrakenteiden tarkasteluissa, kuten väsymisiän määrittämisessä.

Tuloksista ilmenee porrastuksen vaikutukset konsentraatiokertoimiin ja lovenmuotolukuun. Jokaiselle kuormitus- ja porrastustapaukselle on määritetty molemmat konsentraatiokertoimet ja lovenmuotoluku, jolloin tuloksia voidaan tarkastella yksityiskohtaisesti. Tulokset havainnollistavat myös muutosten suuntaa ja suuruutta.

**LÄHTEET**

Cook, R. D. 1995. Finite Element Modeling for Stress Analysis. John Wiley & Sons, Inc. 320 s.

Fricke, W. 2010. Guideline for fatigue assesment by notch stress analysis for welded structures. IIW Document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. 38 s.

Hobbacher, A. 2014. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

Kilki, J., Niemi, E., Poutiainen, I. 1998. Yksipuoleisen poikittaisrivan jännitysanalyysi ja konsentraatiokertoimet. Tutkimusraportti 25. LTKK/Konetekniikan osasto. 9 s.

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



## LIITTEET

Liite I

Jännityskonsentraatioiden laskenta ja tarkat arvot

VETO 1MPa					
	Offset	hot spot			ENS Kt
		0.4t	1.0t	HS Ks	
Nollamalli	0	1,384498	1,279776	1,45466174	3,499
Sivusuunta	0,5t	1,416168	1,247415	1,52923251	3,543
	t	1,471	1,246331	1,62152823	3,642
	1,5t	1,520255	1,266016	1,69059513	3,771
	2t	1,554252	1,28351	1,73564914	3,947
Pituussuunta	0,5t	1,407252	1,135172	1,5895456	4,052
	t	1,56518	1,066776	1,89911068	4,292
	1,5t	1,669653	1,207676	1,97917759	4,411
	2t	1,719234	1,351043	1,96592197	4,32
Yhdistetty	0,5t	1,423172	1,152394	1,60459326	4,048
	t	1,606995	1,108352	1,94108581	4,354
	1,5t	1,703474	1,276017	1,98987019	4,451
	2t	1,697418	1,396701	1,89889839	4,461

TAIVUTUS 1MPa					
	Offset	hot spot			ENS Kt
		0.4t	1.0t	HS Ks	
Nollamalli	0	1,649278	1,344214	1,85367088	3,62
Sivusuunta	0,5t	1,258371	1,001719	1,43032784	3,038
	t	1,191076	0,967591	1,34081095	2,946
	1,5t	1,024799	0,80847	1,16973943	2,873
	2t	1,025419	0,839523	1,14996932	2,906
Pituussuunta	0,5t	1,132087	0,953198	1,25194263	2,557
	t	0,949319	0,829861	1,02935586	1,668
	1,5t	0,768427	0,648169	0,84899986	1,509
	2t	0,819436	0,658922	0,92698038	1,304
Yhdistetty	0,5t	0,98262	0,833538	1,08250494	2,489
	t	0,805859	0,723854	0,86080235	1,653
	1,5t	0,716076	0,610488	0,78681996	1,599
	2t	0,725899	0,645139	0,7800082	1,625