

LUT-yliopisto
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

LEVYKENTÄSSÄ OLEVAN REIÄN YMPÄRILLE HITSATUN JÄYKISTERENKAAN
OPTIMOINTI VÄSYMISKESTÄVYYDEN SUHTEEN

OPTIMIZATION OF A WELDED STIFFENER RING FOR A HOLE IN A PLATE
PANEL UNDER FATIGUE LOADING

Lappeenrannassa 18.12.2020

Väinö Friman

Tarkastaja DI Antti Ahola

Ohjaaja DI Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Väinö Friman

Levykentässä olevan reiän ympärille hitsatun jäykisterenkaan optimointi väsymiskestävyyden suhteen

Kandidaatintyö

2020

28 sivua, 9 kuvaa ja 5 taulukkoa

Tarkastaja: DI Antti Ahola

Ohjaaja: DI Antti Ahola

Hakusanat: jäykisterengas, väsymiskestävyys, hitsausliitos

Tässä kandidaatin työssä tutkittiin levykentässä olevan reiän ympärille hitsatun jäykisterenkaan koon vaikutusta rakennekokonaisuuden väsymiskestävyyteen. Väsyttävän kuormituksen alaisena olevaan rakenteeseen muodostuu jännityskonsentraatioita geometrinen epäjatkuvuuskohtien takia. Levykentässä olevan reiän ympärille jännityskonsentraatioita muodostuu väsymiskriittisille yksityiskohtille, joita ovat hitsin kuormitusta vastaan kohtisuora rajaviiva, levykentän reiän reuna ja kuormituksen kanssa yhdensuuntainen eli pitkittäinen hitsi. Tässä työssä tarkoituksena oli selvittää jäykisterenkaan paksuuden ja leveyden vaikutus näiden väsymiskriittisten yksityiskohtien kestävyys ja määrittää optimaaliset mittasuhteet jäykisterenkaalle siten, että väsymiskriittiset yksityiskohtat olisivat yhtä kestäviä.

Tutkittavalle rakenteelle luotiin erikokoisia jäykisterenkaita erilaisilla mittasuhteilla. Mittasuhdematriisin mukaan väsymiskriittisten yksityiskohtien jännityskonsentraatiot selvitettiin niihin sopivien väsymismitoitusmenetelmien mukaisesti, lineaaristaattisen FE-analyysin avulla. Hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan tarkastelussa käytettiin tehollisen lovijännityksen menetelmää ja levykentän reunan sekä pitkittäisen hitsin tarkastelussa käytettiin nimellisen jännityksen menetelmää. Erikokoisten jäykisterenkaiden väsymiskestävyyttä vertailtiin laskemalla väsymiskriittisille yksityiskohtille nimelliset väsymisluokat, joita pystyttiin vertailemaan keskenään.

Työn tulosten perusteella ei pystytty määrittämään optimaalisia mittasuhteita jäykisterenkaalle, mutta jäykisterenkaan koon vaikutuksista saatiin tuloksia. Tuloksista oli selvää, että pitkittäinen hitsi ei millään mittasuhteilla tule olemaan kriittisin kohta rakenteesta ja jäykisterenkaan koon vaikutus reiän reunan väsymiseen huomattiin olevan erittäin marginaalinen. Toisaalta taas reiän valmistustavalla ja laadulla huomattiin olevan suuri vaikutus reiän reunan väsymiseen.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Väinö Friman

Optimization of a welded stiffener ring for a hole in a plate panel under fatigue loading

Bachelor's thesis

2020

28 pages, 9 figures and 5 tables

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

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

Keywords: stiffener, fatigue strength, welded joint

The objective of this bachelor's thesis was to investigate the effects of welded stiffener ring's size on the fatigue performance of a plate panel with a hole. When a structure is under fatigue loading stress concentrations occur around the geometric discontinuities of the structure. In the investigated structure these geometric discontinuities are the weld toe that is perpendicular to the loading, edges of the hole of the plate panel, and the welds which are parallel to the loading. The aim of this investigation was to find out the effect of the size of the stiffener ring and to optimize the dimensions of the stiffener ring in such a way that all critical points of the structure would be equally durable in terms of fatigue.

Different sizes for stiffener rings were created and gathered into a dimension matrix. This matrix was analyzed utilizing suitable fatigue assessment methods to all critical points of the structure. For the weld toe effective notch stress method was used, and nominal stress method was used for the edges of the hole and the longitudinal weld. Stress concentration factors for these were obtained using linear static FE-method. According to these concentration factors, nominal fatigue classes were calculated for all investigated stiffener sizes, and with these nominal fatigue classes, it was possible to investigate the effects of stiffener sizes to the fatigue life.

The results showed that it was not possible to create optimal dimensions for the stiffener ring with this information. In addition to this the results also showed that the longitudinal weld will never be the critical point in the structure with any sizes of a stiffeners and the effect of stiffener size on the fatigue life of the hole was found to be very marginal. However, the fabrication method of the hole was found to be very important regarding the fatigue strength of the hole.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ	2
ABSTRACT	3
SISÄLLYSLUETTELO	4
SYMBOLILUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
2 VÄSYMISMITOITUSMENETELMÄT	8
2.1 Väsyminen	8
2.2 Jännityskonsentraatiot.....	8
2.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä	9
2.4 Nimellisen jännityksen menetelmä.....	9
2.5 Väsymiskestävyys.....	10
3 MENETELMÄT	11
3.1 Tutkittava rakenne	11
3.2 FE-mallinnus.....	13
3.3 FE-analyysi	15
3.4 Nimellisten väsymisluokkien laskenta.....	17
4 TULOKSET	19
4.1 Elementtimenetelmällä määritetyt jännityskonsentraatiot.....	19
4.2 Väsymiskriittisten yksityiskohtien nimelliset väsymisluokat.....	21
5 TULOSTEN ANALYSOINTI	22
5.1 Tulosten arviointi	22
5.2 Työn rajausten vaikutus tuloksiin	23
5.3 Jatkokehitysehdotukset	24
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	26
LÄHTEET	28

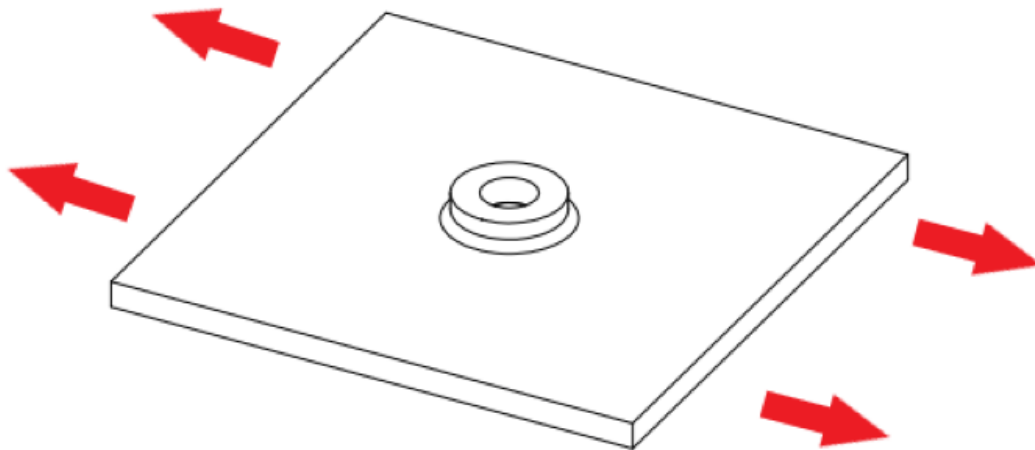
SYMBOLILUETTELO

a	Hitsin a-mitta [mm]
b	Jäykisterenkaan leveys [mm]
d	Levykentän reiän halkaisija [mm]
E	Kimmomoduuli [MPa]
FAT	Väsymisluokka 2 miljoonalla syklillä [MPa]
FAT_{ens}	ENS-menetelmän mukainen väsymisluokka [MPa]
FAT_{hole}	Reiän reunan väsymisluokka [MPa]
FAT_{nom}	Nimellinen väsymisluokka 2 miljoonalla syklillä [MPa]
$FAT_{nom,ens}$	ENS-menetelmän mukainen nimellinen väsymisluokka [MPa]
$FAT_{nom,hole}$	Reiän reunan nimellinen väsymisluokka [MPa]
$FAT_{nom,weld}$	Pitkittäisen hitsin nimellinen väsymisluokka [MPa]
FAT_{weld}	Pitkittäisen hitsin väsymisluokka [MPa]
K	Jännityskonsentraatiokerroin
m	S-N-Kuvaajan kaltevuus
N	Kestoikä
N_f	Teoreettinen kestoikä
r	Hitsin rajaviivan pyöristyssäde [mm]
S	Jännitys [MPa]
t_0	Levykentän levynvahvuus [mm]
t_1	Jäykisterenkaan paksuus [mm]
ν	Poissonin vakio
w	Levykentän sivun pituus [mm]
$\Delta\sigma$	Jännitysvaihtelu [MPa]
σ_{max}	Lokaali maksimijännitys [MPa]
σ_{nom}	Nimellinen jännitys [MPa]
ENS	Tehollinen lovijännitys

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan levykentässä olevan reiän ympärille hitsatun jäykisterenkaan vaikutusta rakennekokonaisuuden väsymiskestävyyteen. Työn aihe saatiin LUT-yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolta. Laboratoriolla on ollut halu selvittää, olisiko levykentässä olevan reiän jäykisteille olemassa optimaaliset mittasuhteet, jolloin kaikki väsymiskriittiset detaljit olisivat yhtä kestäviä. Jos optimaaliset mittasuhteet ovat olemassa, niitä voidaan jatkossa mahdollisesti hyödyntää jäykisteiden mitoituksessa ja tutkia tarkemmin skaalautuvatko ne rakenteen muiden mittasuhteiden muuttuessa samalla tavalla. Työssä tavoitteena on siis selvittää, löytyykö reiän ympärille hitsatulle jäykisterenkaalle optimaaliset mittasuhteet, joilla väsymiskriittiset yksityiskohdat rakenteesta ovat yhtä kestäviä. Lopullisena tarkoituksena määrittää tutkittavalle rakenteelle nämä optimaaliset mitat.

Kuvassa 1 esitetty tutkittava teräksinen rakenne rajattiin tietyn kokoiseksi ja paksuiseksi levykentäksi, jonka omat mittasuhteet ovat symmetriset ja realistiset. Eli ei siis tutkita esimerkiksi poikkeustilannetta, jossa erittäin kapeassa levykentässä on erittäin suuri reikä. Tutkittavan väsymiskuormituksen alaisena olevan teräksisen levykentän sivujen pituudet rajataan 400 mm pituisiksi ja levynvahvuus 20 mm paksuiseksi, levyssä olevan reiän halkaisijan ollessa 40 mm. Näiden mittasuhterajausten lisäksi jäykisterenkaan hitsin a-mitta määritettiin vakioksi 5 mm.



Kuva 1. Tutkittava rakenne.

Tutkittavaa rakennetta tarkasteltiin rakenteen väsymiskriittisten yksityiskohtien kohdilta niihin sopivien väsymismenetelmien mukaisesti, suorittamalla varsinaisen analyysin elementtimenetelmällä FEMAP-ohjelmistoa apuna käyttäen. Tutkittaville jäykisterenkaille luotiin erilaisia mittasuhteita muuttaen niiden paksuutta ja leveyttä. Elementtimenetelmällä määritettiin tutkittavalle rakenteelle tärkeimmät jännityskonsentraatiot ja niiden perusteella vertailtiin rakenteen väsymiskriittisiä yksityiskohtia luokitellen ne nimellisiin väsymisluokkiin. Lopulta nimellisiä väsymisluokkia vertailemalla pyrittiin löytämään jäykisterenkaalle optimaaliset mittasuhteet.

2 VÄSYMISMITOITUSMENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään lyhyesti ongelman ratkaisuun käytettyjen väsymismenetelmien teoria. Tarkasteltavan rakenteen oleelliset yksityiskohdat väsymiskestävyyden puolesta ovat hitsin kuormitusta vastaan kohtisuora rajaviiva, pitkittäinen hitsi ja levykentän reikä. Väsymistarkastelussa selvitettiin näiden yksityiskohtien jännityskonsentraatiot ja niiden mukaan yksityiskohdille laskettiin nimelliset väsymisluokat, joita voidaan vertailla keskenään.

2.1 Väsyminen

Väsymisellä tarkoitetaan vaihtelevasta kuormituksesta johtuvaa rakenteen vauriota. Väsymisvauriossa rakenteessa oleva erittäin pieni särö tai useammat säröt alkavat kasvaa jännityksen vaihtelun takia, johtaen lopulta varsinaiseen murtumiseen. Säröt rakenteessa voivat johtua alun perin valmistusmenetelmästä tai ne voivat muodostua hiljattain rakenteen eliniän edetessä. Hitsatuissa rakenteissa ilmenee helposti väsymiselle alttiita säröjä, koska erityisesti hitsin rajaviivalle muodostuu hitsausprosessissa pieniä säröjä. Tämän lisäksi hitsatut yksityiskohdat rakenteissa muodostavat jännityskonsentraatioita rakenteeseen, jotka altistavat erityisesti hitsien rajaviivan tai hitsien juuren kohdat väsymisvaurioille. (Dowling 2013, s. 25-27.)

2.2 Jännityskonsentraatiot

Rakenteen geometriset epäjatkuvuudet kuten esimerkiksi reiät, urat tai kulmat aiheuttavat kuormituksen alla rakenteeseen jännityskonsentraatioita. Nämä jännityskonsentraatiot saattavat heikentää kyseisiä rakenteellisia yksityiskohtia, tehden niistä rakenteen heikoimpia kohtia. Jännityskonsentraatiolla siis tarkoitetaan rakenteen geometrisestä epäjatkuvuudesta johtuvia korkeita lokaaleja jännityksiä. Jännityskonsentraatioita voidaan mitata jännityskonsentraatiokertoimella K , joka lasketaan lokaalin maksimijännityksen σ_{max} suhteen rakenteen nimelliseen jännitykseen σ_{nom} . Rakenteen nimellinen jännitys toimii siis vertailukohteenä ja lokaali jännityskonsentraatio itsessään voi sisältää rakenteellista jännitystä ja lovi-jännitystä. (Pilkey W., Pilkey D. & Bi 2020, s. 39-40.)

$$K = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \quad (1)$$

2.3 Tehollisen lovijännityksen menetelmä

Tehollisen lovijännityksen menetelmä soveltuu erityisesti hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan lokaaliin väsymistarkasteluun. Tehollisen lovijännityksen menetelmällä eli ENS-menetelmällä (ENS, eng. Effective notch stress) tarkoitetaan väsymiseen vaikuttavan tehollisen lovijännityksen tarkastelua loven rajaviivalta, kun oletetaan materiaalin käyttäytyvän lineaarielastisesti. ENS-menetelmässä hitsin rajaviivan realistinen muoto korvataan fiktiivisellä muodolla. Käytännössä tämä tarkoittaa, että pienahsit mallinnetaan 45° asteen kulmassa ja hitsin rajaviivalle mallinnetaan $r = 1$ mm pyöristyssäde. ENS-menetelmän mukainen jännityskonsentraatio hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoralta rajaviivalta voidaan selvittää esimerkiksi FE-analyysillä, määrittämällä lovijännitys maksimipääjännityksenä tai von Mises vertailujännityksenä. Näillä voidaan tässä työssä laskea kaavan 1 mukaan hitsin kuormitustavastaan kohtisuoran rajaviivan jännityskonsentraatio. (Hobbacher 2016, s. 27-28.)

2.4 Nimellisen jännityksen menetelmä

Ongelin & Valkonen mukaan (2010, s. 430), ”Nimelliseen jännitykseen -- perustuvassa menetelmässä rakenteen jännitykset lasketaan kimmoteorian mukaan eikä rakenteen epäjatkuvuuskohtien vaikutusta oteta huomioon, koska ne sisältyvät kuormituskokeisiin. Sen sijaan ne makrogeometriset vaikutukset, jotka eivät sisälly koetuloksiin, on otettava jännitysten laskennassa huomioon.”

Tässä työssä nimellisen jännityksen menetelmää käytettiin pitkittäisen hitsin väsymistarkasteluun eli kohdalla, jossa jäykisterengasta ympäröivän kaarevan hitsin tangenti on samansuuntainen kuormituksen kanssa. Nimellinen jännitys kuormituksen jakautuminen huomioon ottaen, voidaan pitkittäiselle hitsille määrittää esimerkiksi levyn pinnasta hitsin rajaviivalta. (Hobbacher 2016, s. 15.)

Nimellisen jännityksen menetelmää käytettiin myös rakenteen reiän väsymistarkastelussa. Reikä saa aikaan levyssä makrogeometrisen jännityskonsentraation, joka kasvattaa jännitystä levyssä reiän reunalla, jännityskonsentraatio määritetään siis myös sieltä. (Hobbacher 2016 s 15; Pilkey W et al. 2020, s. 212.)

2.5 Väsymiskestävyys

Väsymiskestävyyttä voidaan tarkastella vertailemalla jännityksiä S kestoiän N suhteen. Wöhler kuvaajien eli S-N-kuvaajien avulla voidaan laskea vakioamplitudisen kuormituksen alaiselle rakenteelle teoreettinen kestoikä. S-N-kuvaajat perustuvat seuraaviin yhtälöihin:

$$\Delta\sigma^m \cdot N_f = C , \quad (2)$$

$$C = (FAT)^m \cdot 2 \cdot 10^6 , \quad (3)$$

$\Delta\sigma$ = jännitysvaihtelu

m = kuvaajan kaltevuus

N_f = kestoikä sykleinä

FAT = väsymisluokka 2 miljoonalla syklillä

Näiden yhtälöiden 2 ja 3 avulla voidaan laskea rakenteen kestoikä seuraavalla kaavalla.

$$N_f = \left[\frac{FAT}{\Delta\sigma} \right]^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (4)$$

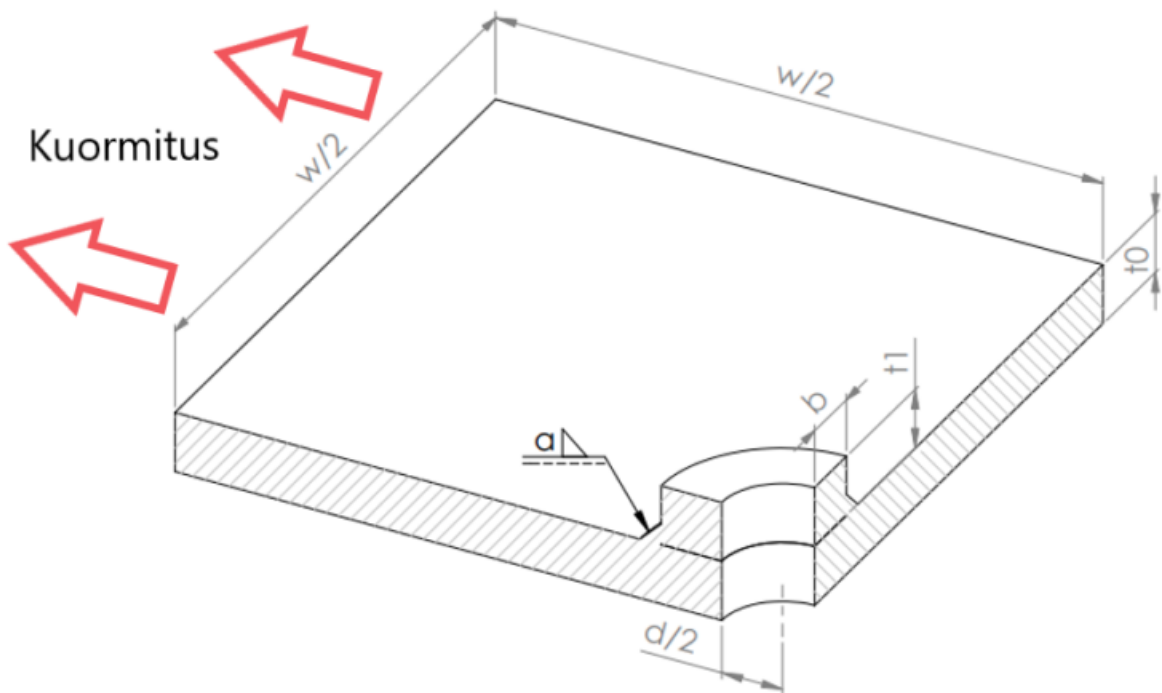
Kun kuvaajan kaltevuudeksi valitaan $m = 3$, nimellisen menetelmän ja ENS-menetelmän tuloksia voidaan vertailla keskenään. (Fricke 2010, s. 17.)

3 MENETELMÄT

Tässä luvussa esitellään tutkimusongelman ratkaisemiseksi käytetyt menetelmät. Työssä tutkittiin rakenteen sisäisiä jännityksiä FE-analyysia hyödyntämällä. FE-analyysi suoritettiin FEMAP-ohjelmistolla, jolla rakenteen geometria mallinettiin neljäsosamallina hyödyntäen rakenteen symmetriaa. Lineaaristaattisen FE-analyysin avulla geometriasta määritettiin jännityskonsentraatiot väsymiskriittisistä yksityiskohdista väsymismitoitusta varten.

3.1 Tutkittava rakenne

Tutkittavaksi levyrakenteeksi valittiin työn rajauksen mukaan neliön muotoinen levy, jonka sivujen pituudet ovat $w = 400$ mm ja levynvahvuus $t_0 = 20$ mm. Levyn keskellä on halkaisijaltaan $d = 40$ mm suuri reikä. Näiden vakiodimensioiden lisäksi jäykisterengasta ympäröivän hitsin a -mitta asetettiin vakioksi $a = 5$ mm. Tutkittavissa malleissa vaihdeltiin reiän jäyksterenkaan paksuutta t_1 ja leveyttä b . Tutkittava rakenne on esitetty kuvassa 2 neljäsosamallina.



Kuva 2. Tutkittavan rakenteen neljäsosamalli, jossa esitettynä työssä tarvittavat dimensioid.

Jäykisterenkaan optimimittasuhteiden löytämiseksi luotiin mittasuhdematriisi, jonka perusteella analysoitiin erikokoisia jäykisterenkaita. Mittasuhdematriisi luotiin siten, että saatiin selvitettyä renkaan paksuuden vaikutus sekä renkaan halkaisijan vaikutus. Tutkittiin jäykisterenkaita, jotka ovat suhteessa levykentän levynvahvuuteen ohuempia, paksumpia ja yhtä paksuja. Samoin jäykisterenkaan leveyttä varioitiin siten, että sen leveys b suhteessa levykentän reiän halkaisijaan d on joko 0.5, 1.0 ja 2.0. Tämä ensimmäinen jäykisterenkaan mittasuhdematriisi on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Jäykisterenkaan mittasuhdematriisi.

	$b/d = 0.5$	$b/d = 1.0$	$b/d = 2.0$
$t_1/t_0 = 0.5$	$t_1=10, b=20$	$t_1=10, b=40$	$t_1=10, b=80$
$t_1/t_0 = 1.0$	$t_1=20, b=20$	$t_1=20, b=40$	$t_1=20, b=80$
$t_1/t_0 = 2.0$	$t_1=40, b=20$	$t_1=40, b=40$	$t_1=40, b=80$

Mittasuhdematriisin mukaan luotiin aluksi yhdeksän mallia, joita tutkittiin lineaaristaattisella FE-analyysillä FEMAP ohjelmistolla. Ensimmäisten tulosten perusteella haluttiin vielä verrata vielä erittäin pienten ja erittäin suurten jäykisterenkaiden vaikutusta. Lopullinen mittasuhdematriisi tutkituille jäykisterenkaille on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Jäykisterenkaan lopullinen mittasuhdematriisi, jossa toisella tarkastelukierroksella luodut uudet mitat korostettuina.

	$b/d = 0.25$	$b/d = 0.5$	$b/d = 1.0$	$b/d = 2.0$	$b/d = 3.0$
$t_1/t_0 = 0.5$	$t_1=10, b=10$	$t_1=10, b=20$	$t_1=10, b=40$	$t_1=10, b=80$	$t_1=10, b=120$
$t_1/t_0 = 1.0$	$t_1=20, b=10$	$t_1=20, b=20$	$t_1=20, b=40$	$t_1=20, b=80$	$t_1=20, b=120$
$t_1/t_0 = 2.0$	$t_1=40, b=10$	$t_1=40, b=20$	$t_1=40, b=40$	$t_1=40, b=80$	$t_1=40, b=120$
$t_1/t_0 = 4.0$	$t_1=80, b=10$	$t_1=80, b=20$	$t_1=80, b=40$	$t_1=80, b=80$	$t_1=80, b=120$

3.2 FE-mallinnus

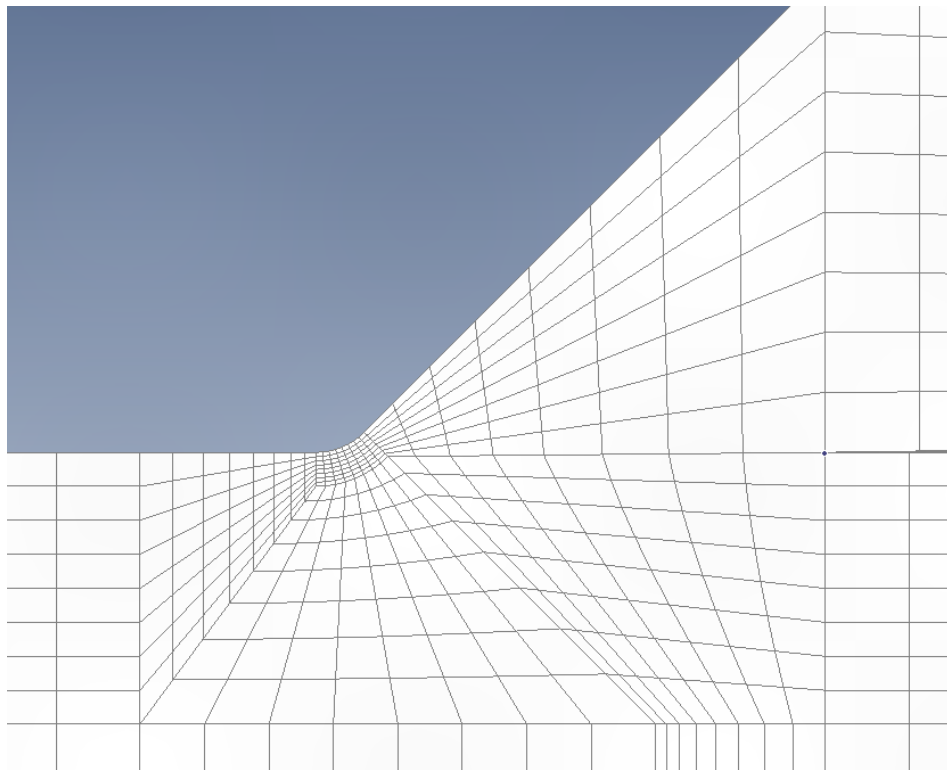
FE-analyysi tutkittaville geometrioille toteutettiin FEMAP-ohjelmistolla, jolla rakenteen geometria mallinnettiin neljäsosamallina, hyödyntäen symmetriaehtoja. Geometrian mallinnuksessa käytettiin lineaarisia solidielementtejä, joiden materiaaliominaisuuksina käytettiin Eurokoodi 3 mukaisia materiaalivakioita:

- Kimmokerroin $E = 210000$ MPa
- Poissonin vakio $\nu = 0,3$

(Ongelin & Valkonen 2010, s. 29.)

Levykentän ja jäykisterenkaan väliin jätettiin ENS-menetelmän mukaisesti pieni 0.1 mm rako, jotta malli toimii todenmukaisesti, eli jäykisterengas on vain hitsin kohdalta sulautunut pohjalevyyn (Hobbacher 2016, s 28).

Kuvassa 3 esitetty elementtiverkotus tehtiin ENS-menetelmän mukaan tiheäksi hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan kohdalle, käyttäen rajaviivalla $r = 1$ mm pyöristystä, jossa elementtejä 45° kaarella on 8 kappaletta ja syvyys suunnassa 0.5 mm syvyyteen 8 kappaletta.

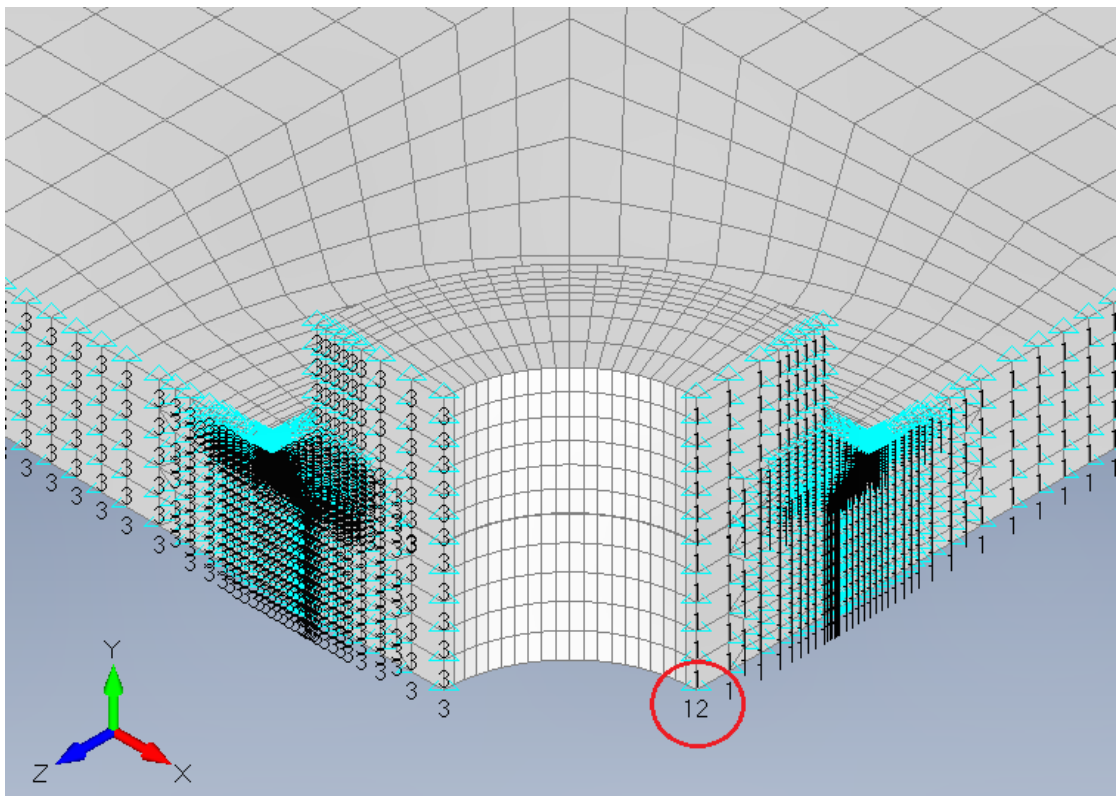


Kuva 3. ENS-menetelmän mukainen elementtiverkotus hitsin rajaviivalla.

Verkotus geometriassa yleisesti luotiin tiheäksi tärkeimmän yksityiskohdan, eli hitsin lähellä ja kauempana mallin reunoilla verkotusta kasvatettiin. Geometria mallinnettiin radiaalisuunnassa pursottamalla levykentän reiän keskipisteen ympäri, asettaen tälle 90° käyrälle 20 kappaletta elementtejä. Lopuksi levykentän tasainen osuus täydennettiin pursottamalla elementtejä reunoille asti, jossa suurimmat elementit olivat 10 mm kokoisia.

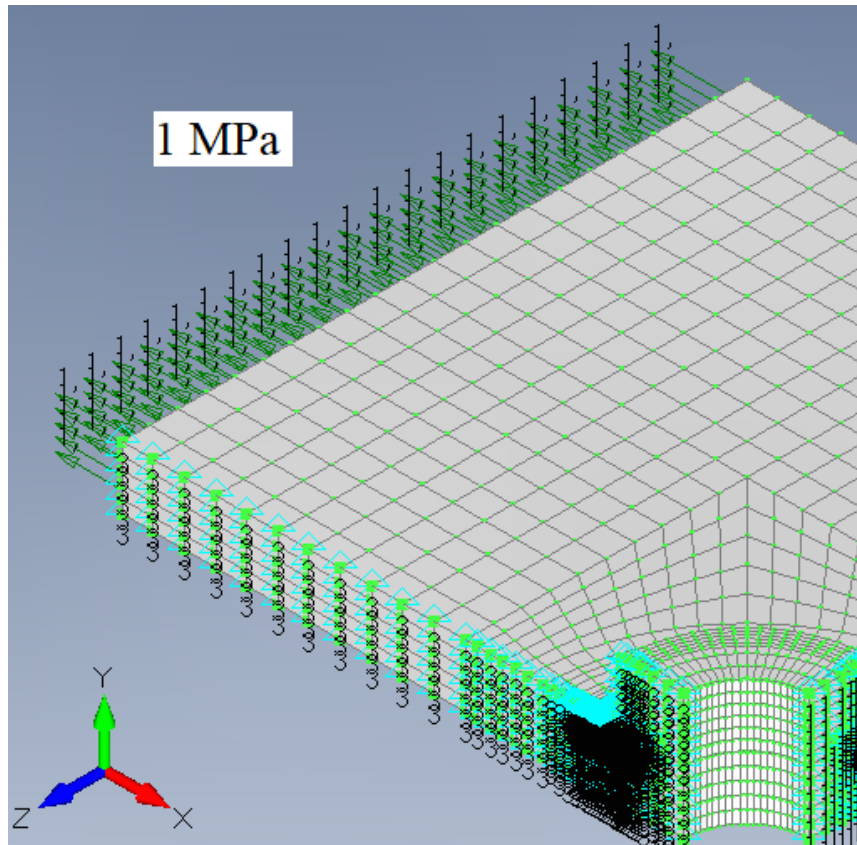
Koska geometriat mallinnettiin neljäsosamalleina, käytettiin symmetriareunaehtoja kuvaamaan koko rakennetta. Symmetriareunaehtojen lisäksi kuormituksen kanssa kohtisuoran suunnan translaatio estettiin myös yhdestä kulmasta. Kuvassa 4 on esitettyä mallin kaikki reunaehdot numeroina, jotka vastaavat estettyjä translaatioita seuraavasti:

- 1 = x-akselin suuntainen translaatio
- 2 = y-akselin suuntainen translaatio
- 3 = z-akselin suuntainen translaatio.



Kuva 4. Mallin reunaehdot. Korostettuna kulma, jossa kuormitusta kohtisuoran suunnan translaatio on estetty.

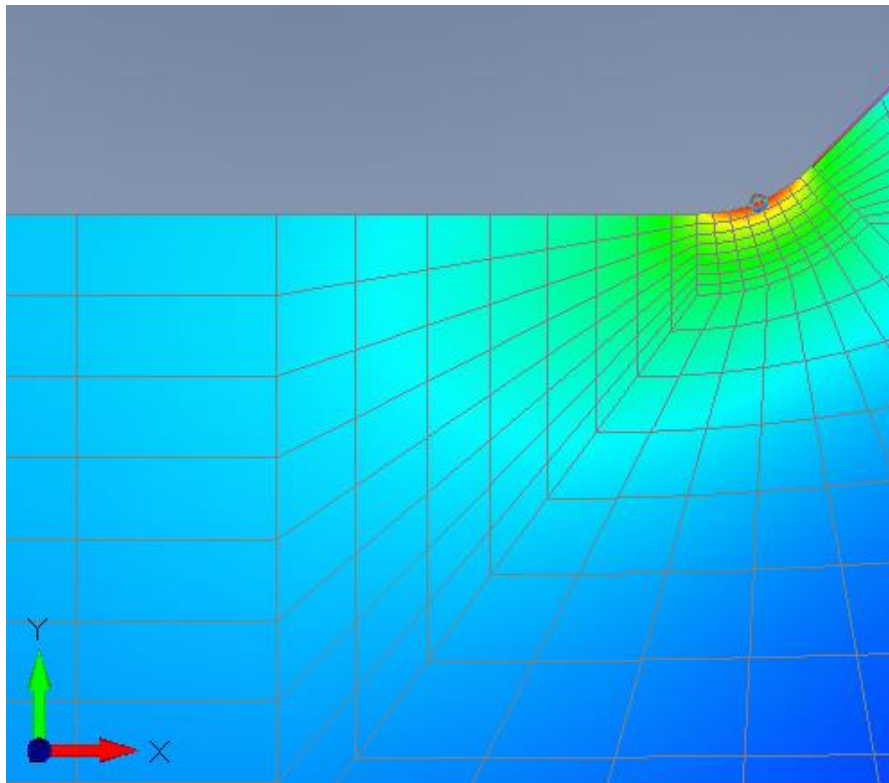
Kuormitus analyysissa asetettiin x-akselin suuntaiseksi vetokuormaksi, 1 MPa suuruisena paineena reunan elementtien pinnalle. Asettamalla painekuorma 1 MPa suuruiseksi, saadaan tuloksista suoraan luettua jännitysten konsentraatiokertoimet maksimipääjännityksenä kaavan 1 mukaisesti. Paineekuorma on esitettyä kuvassa 5.



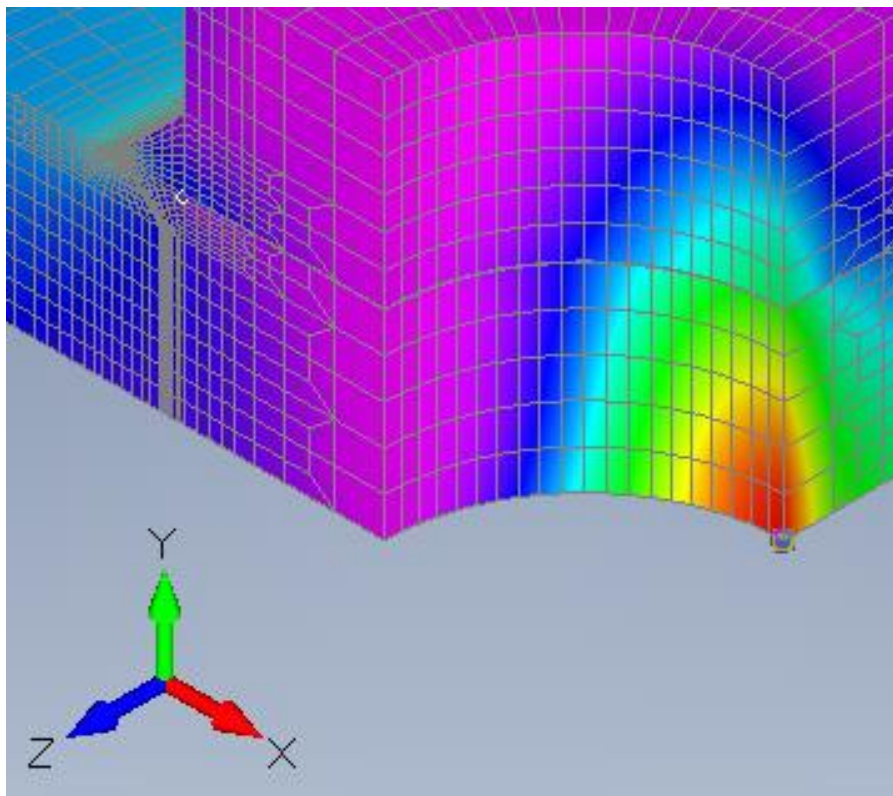
Kuva 5. Paineekuorma 1 MPa levyn reunalla x-akselin suuntaisesti.

3.3 FE-analyysi

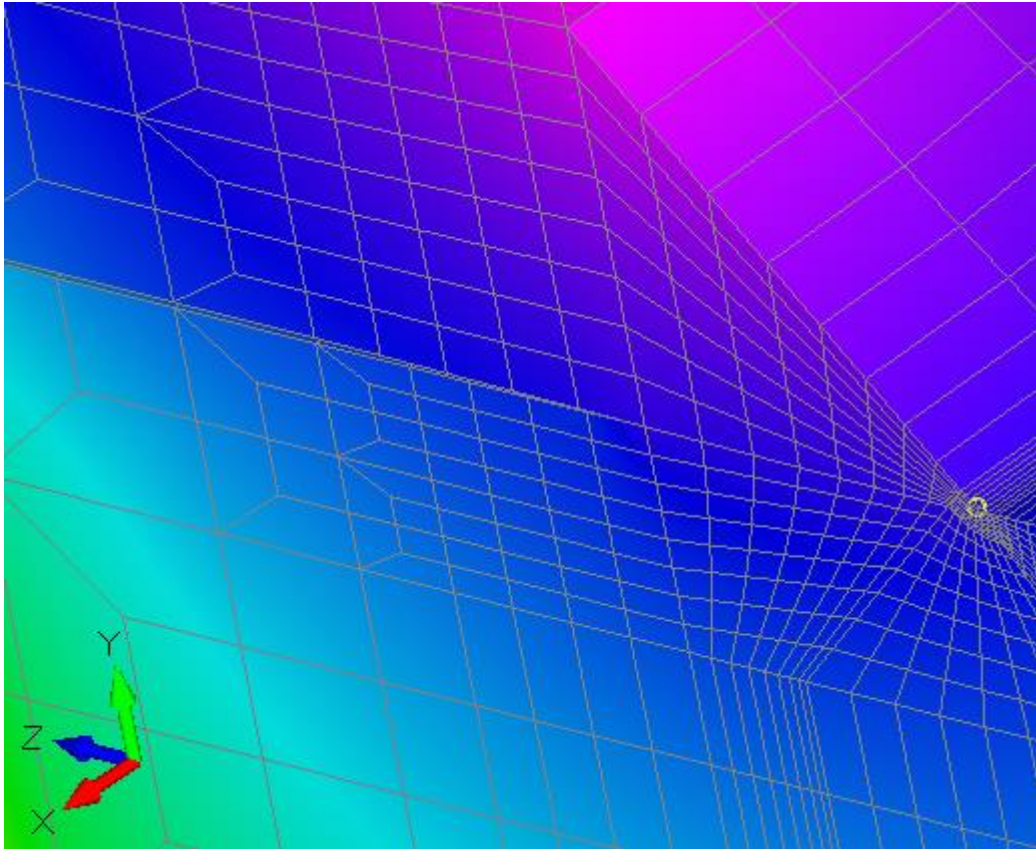
Kaikki tutkittavat geometriat mallinnettiin näiden samojen reunaehtojen mukaan ja samalla kuormituksella. Mallit analysoitiin lineaaristaattisena analyysinä, NX-Nastran ratkaisijalla. Maksimipääjännitykset määritettiin kolmesta kohdasta mallia hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoralta rajaviivalta, reiän pohjalta ja pitkittäisen hitsin poikkileikkauksen rajaviivalta. Maksimipääjännitysten määrittämisskohdat on esitetty kuvassa 6, kuvassa 7 ja kuvassa 8.



Kuva 6. ENS-jännityskonsentraation määrittämyspiste.



Kuva 7. Reiän jännityskonsentraation määrittämyspiste.



Kuva 8. Pitkittäisen hitsin jännityskonsentraation määrittämyspiste.

3.4 Nimellisten väsymisluokkien laskenta

Väsymiskriittisten yksityiskohtien jännityskonsentraatioiden määrittämisen jälkeen niiden tuloksia voidaan vertailla laskemalla eri tapauksille nimelliset väsymisluokat FAT_{nom} . Seuraavana on esitetty, kuinka nimellisen väsymisluokan kaava johdetaan kaavoista 2, 3 ja 4.

$$\begin{aligned}
 N_f &= \left[\frac{FAT}{\Delta\sigma} \right]^m \cdot 2 \cdot 10^6 \\
 (FAT_{nom})^m \cdot 2 \cdot 10^6 &= \Delta\sigma_{nom}^m \cdot N_f \\
 \rightarrow (FAT_{nom})^m \cdot 2 \cdot 10^6 &= \Delta\sigma_{nom}^m \cdot \left[\frac{FAT}{\Delta\sigma} \right]^m \cdot 2 \cdot 10^6 \\
 \rightarrow (FAT_{nom})^m &= FAT^m \cdot \frac{\Delta\sigma_{nom}^m}{\Delta\sigma^m}
 \end{aligned}$$

$$FAT_{nom} = \frac{FAT}{K} \quad (5)$$

Nimellisen väsymisluokan kaavassa 5 muuttujat FAT ja K voivat olla minkä tahansa väsymismitoitusmenetelmän mukaiset väsymisluokat ja konsentraatiokertoimet. Työssä käytettiin tarkasteltujen yksityiskohtien nimellisten väsymisluokkien laskemiseen seuraavia menetelmäkohtaisia väsymisluokkien arvoja

- $FAT_{ens} = 225$ MPa, ENS-menetelmän mukainen väsymisluokka (Fricke 2010, s. 18).
- $FAT_{hole} = 160$ MPa, koneistetun reiän reunan väsymisluokka (Hobbacher 2016 s. 43).
- $FAT_{weld} = 90$ MPa, manuaalisesti hitsatun pitkittäisen hitsin väsymisluokka (Hobbacher 2016, s. 48).

Näiden avulla laskettiin keskenään vertailukelpoiset tulokset tutkittavan rakenteen eri yksityiskohdille. Saaduista tuloksista tehtiin erikokoisille jäykisterenkailla kuvaajat, joita vertailemalla voidaan tarkastella väsymiskestävyyden muutosta jäykisterenkaiden mittoja muutettaessa.

4 TULOKSET

Tässä luvussa esitetään elementtimenetelmällä määritetyt tulokset rakenteen väsymiskriittisille yksityiskohdille taulukoituna. Tämän lisäksi esitetään myös näiden tulosten perusteella lasketut nimelliset väsymiluokat helposti vertailtavassa muodossa, josta nähdään miten jäykisterenkaan koko vaikuttaa väsymiskriittisten yksityiskohtien väsymiskestävyyteen.

4.1 Elementtimenetelmällä määritetyt jännityskonsentraatiot

Taulukossa 3, taulukossa 4 ja taulukossa 5 on esitetty FE-analyysillä määritetyt jännityskonsentraatiot hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoralta rajaviivalta, reiän reunalta sekä kuormituksen suuntaisen hitsin poikkileikkauksen kohdalta. Jännityskonsentraatiot saatiin suoraan määritettyä elementtimenetelmällä pääjännitysten tuloksista kaavan 1 mukaan, koska kuormaksi eli nimelliseksi jännitykseksi oli asetettu 1 MPa.

Taulukko 3. Kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan jännityskonsentraatiot.

	$b/d = 0.25$	$b/d = 0.5$	$b/d = 1.0$	$b/d = 2.0$	$b/d = 3.0$
$t_1/t_0 = 0.5$	2,01	2,85	3,46	3,55	3,31
$t_1/t_0 = 1.0$	2,23	3,15	3,64	3,49	3,13
$t_1/t_0 = 2.0$	2,40	3,29	3,67	3,45	3,09
$t_1/t_0 = 4.0$	2,42	3,32	3,72	3,56	3,25

Taulukko 4. Reiän reunan jännityskonsentraatiot.

	$b/d = 0.25$	$b/d = 0.5$	$b/d = 1.0$	$b/d = 2.0$	$b/d = 3.0$
$t_1/t_0 = 0.5$	3,22	3,15	3,12	3,17	3,29
$t_1/t_0 = 1.0$	3,22	3,15	3,12	3,15	3,23
$t_1/t_0 = 2.0$	3,22	3,13	3,04	2,98	2,98
$t_1/t_0 = 4.0$	3,12	3,08	2,94	2,75	2,66

Taulukko 5. Kuormituksen suuntaisen hitsin poikkileikkauksen jännityskonsentraatiot.

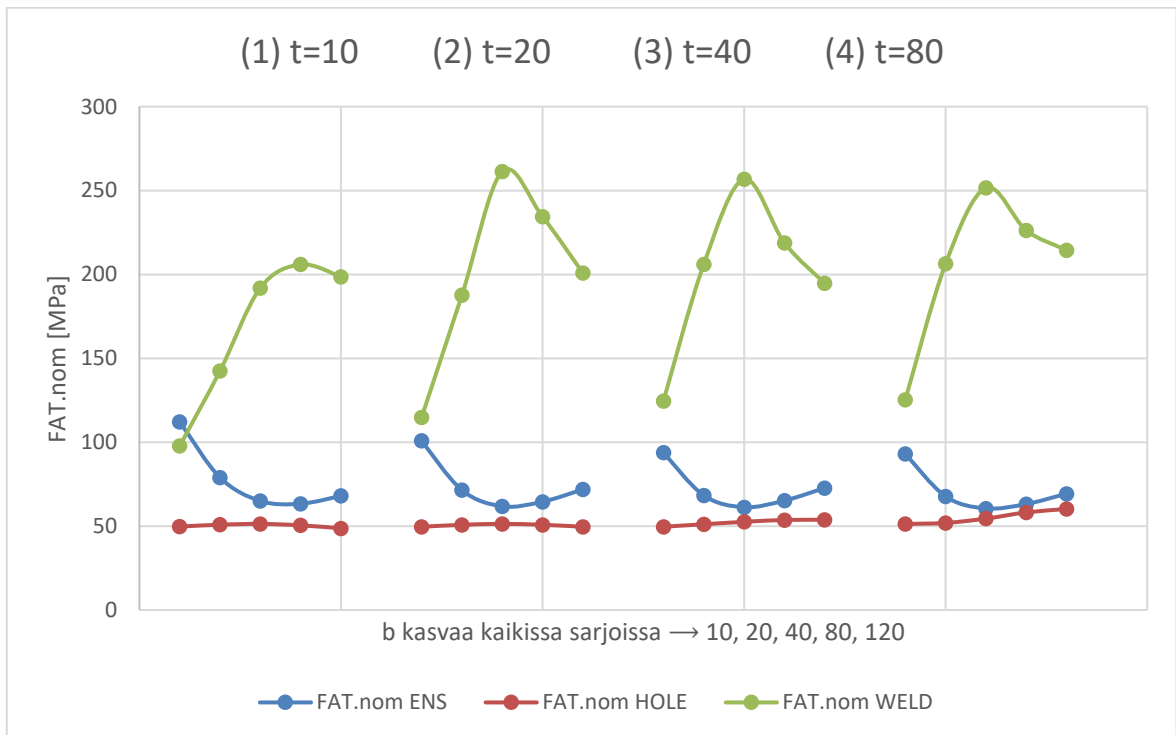
	$b/d = 0.25$	$b/d = 0.5$	$b/d = 1.0$	$b/d = 2.0$	$b/d = 3.0$
$t_1/t_0 = 0.5$	0,92	0,63	0,47	0,44	0,45
$t_1/t_0 = 1.0$	0,78	0,48	0,34	0,38	0,45
$t_1/t_0 = 2.0$	0,72	0,44	0,35	0,41	0,46
$t_1/t_0 = 4.0$	0,72	0,44	0,36	0,40	0,42

4.2 Väsymiskriittisten yksityiskohtien nimelliset väsymisluokat

Kuvassa 9 on esitetty kaavan 5 mukaan lasketut nimelliset väsymisluokat tutkittujen jäykisterenkaiden eri yksityiskohtille ja niiden kuvaajat

- $FAT_{nom,ens}$ = ENS-menetelmän mukainen nimellinen väsymisluokka.
- $FAT_{nom,hole}$ = Reiän reunan nimellinen väsymisluokka.
- $FAT_{nom,weld}$ = Pitkittäisen hitsin nimellinen väsymisluokka.

Kuvassa on neljä sarjaa kaikille tutkituille jäykisterenkkaan paksuuksille t_1 ja sarjojen sisällä jäykisterenkkaan leveys b kasvaa kaikissa samalla tavalla.



Kuva 9. Tutkittujen jäykisterenkaiden yksityiskohtien nimellisen väsymisluokat.

5 TULOSTEN ANALYSOINTI

Tässä luvussa tarkastellaan tutkimuksen tuloksia. Tulosten luotettavuutta arvioidaan ja kommentoidaan tuloksiin vaikuttavia tekijöitä. Sen lisäksi pohditaan työn rajauksen vaikutusta tuloksiin ja tarkennetaan, löydettiinkö työn tavoitteeksi asetetut optimimaaliset mittasuhteet jäykisterenkaalle. Lopuksi pohditaan vielä mitä lisätutkimuksia tarvittaisiin tulosten parantamiseksi ja kuinka tutkimusta voitaisiin jatkokehittää.

5.1 Tulosten arviointi

Jäykisterenkaiden vertailu aloitettiin pienemmällä jäykisterenkaan mittasuhdematriisilla, joka on esitetty taulukossa 1. Sen perusteella mallinnettiin tarvittavat geometriat, joista määritettiin jännityskonsentraatiot ja edelleen geometrian väsymiskriittisten yksityiskohtien nimelliset väsymisloukat. Tuloksista heti aluksi huomattiin, että kuormituksen suuntainen pitkittäinen hitsi ei tule olemaan kriittisin piste, sen nimellinen väsymisloukka on aina selvästi korkeampi kuin $FAT_{nom,ens}$ ja $FAT_{nom,hole}$. Myös toinen selkeä havainto tuloksista oli, että reiän reunan nimellinen väsymisloukka muuttuu erittäin marginaalisesti, kun jäykisterenkaan kokoa muutetaan.

Näiden ensimmäisten nimellisten väsymisloukkien mukaan saatiin lyhyet käyrät, jotka ovat kuvassa 9 esitettyjen käyrien kolme keskimmäistä pistettä. Tavoitelluissa optimimittasuhteiden tilanteessa käyrät tulisivat jossain pisteessä leikkaamaan toisensa, jolloin leikkauspisteestä voitaisiin määrittää optimaaliset mittasuhteet. Näistä lyhyistä kuvaajista kuitenkin huomattiin, että nimelliset väsymisloukkien käyrät eivät välttämättä leikkaa olleenkaan. Jos käyrien kehitys on samanlaista miltä se kolmen pisteen perusteella vaikutti, reiän ja hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan nimelliset väsymisloukat tulevat poikkeamaan toisistaan merkittävästi jäykisterenkaan koon pienentyessä tai suureutuessa. Tämä ensimmäisten tulosten perusteella tehty oletus haluttiin varmistaa ja sen takia luotiin vielä lisää jäykisterenkaiden kokovariaatiota erittäin pienillä ja erittäin suurilla mittasuhteilla. Nämä lopulliset tutkitut mittasuhteet on esitetty taulukossa 2.

Lopulliset tulokset varmistivat tämän oletuksen, että erittäin pienellä ja erittäin suurella jäykisterenkaan koolla hitsin rajaviivan ja reiän reunan nimelliset väsymisloukat poikkeavat

toisistaan huomattavasti. Poikkeus tähän on ainoastaan erittäin suurien jäykisterenkaiden tuloksissa, joissa paksuus $t_1 = 80$ mm ja leveys $b > 80$ mm. Näissä molemmat nimelliset väsymisluokat kasvavat lähes yhdenmukaisesti. Tähän tulokseen tulee kuitenkin suhtautua varoen, koska näin suuren jäykisterengas alkaa vaikuttaa jo koko levykentän käyttäytymiseen. Suhteessa levykentän kokoon näin suuri jäykisterengas saattaisi myös olla todellisessa sovelluksessa epäkäytännöllinen. Tämä tulos todentaa kuitenkin oletuksen, että erittäin suurella ja erittäin pienellä jäykisterenkaalla hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan ja reiän reunan nimelliset väsymisluokat poikkeavat toisistaan huomattavasti. Eli mahdolliset optimimaaliset mittasuhteet jäykisterenkaalle löytyvät todennäköisemmin keskimääräisemmillä mitoilla.

Työssä tutkituilla jäykisterenkaiden mitoilla ei löytynyt optimaalisia mittasuhteita, jossa väsymiskriittiset yksityiskohdat olisivat yhtä kestävä. Tuloksena saatiin kuitenkin selville, että jäykisterenkaan koko vaikuttaa erittäin marginaalisesti reiän reunan väsymiskestävyyteen, se pysyy erikokoisilla jäykisterenkailla samalla tasolla. Tämän lisäksi myös selvää on, että pitkittäinen kuormituksen suuntainen hitsi ei ole missään tilanteessa kriittisin kohta rakenteessa. Työn aikataulun takia ei ollut mahdollista laajentaa tutkittavien jäykisterenkaiden mittasuhdematriisia enempää, jotta olisi voitu selvittää tarkemmin löytyisikö jollain tietyillä mittasuhteilla käyrille leikkauspiste. Työn rajauksilla ja valituilla laskenta-arvoilla saattaa myös olla vaikutusta tuloksiin.

5.2 Työn rajausten vaikutus tuloksiin

Työssä tutkittava rakenne oli rajattu sellaiseksi, että sen tutkiminen olisi helppoa ja sen mitat olisivat todellisissa sovelluksissa yleisesti ilmenevien mittojen mukaisia. Työn tavoitteena oli selvittää, miten jäykisterenkaan koon muuttaminen vaikuttaa sen yksityiskohtien kestävyteen. Työn oletuksena oli, että tällaisella mediaanikokoisella rakenteella saataisiin vähintäänkin hyvät suuntaa antavat tulokset tutkimusongelmaan nähden ja tähän tavoitteeseen päästiin. Työn rajaukset tietysti vaikuttavat saatuihin tuloksiin, koska ne eivät jokaisessa tutkittavassa tapauksessa ole välttämättä parhaat mahdolliset kyseisille mittasuhteille. Työn tuloksiin vaikuttavista rajauksista olennaisimpia ovat vakioksi asetettu hitsin a-mitta ja reiän valmistustavan valinta. Hitsin a-mitta vaikuttaa rakenteen käyttäytymiseen kuormituksen alaisena ja reiän valmistustapa vaikuttaa reiän väsymiskestävyyteen.

Hitsin a-mitta rajattiin työssä vakioksi $a = 5$ mm, tämän tutkimuksen rajoissa se on hyvä ja toimiva vakio, mutta todellisissa rakenteissa saatettaisiin kuitenkin tarvita suurempia a-mittoja. Tämä vaikuttaisi rakenteen väsymiskestävyyteen erityisesti hitsin rajaviivalla, koska tällöin rakenteen väsymiskriittisten yksityiskohtien geometria muuttuu ja rakenne käyttäytyy eri tavalla. Eriäinen hitsi saattaisi myös ohjata jännitystä eri tavalla jäykisterenkaaseen. Itse rakenteen väsymiskriittiset yksityiskohtat pysyvät kuitenkin aina samoina työssäkin tutkittuina yksityiskohtina, mutta niiden suhteet toisiinsa nähden saattaisivat olla erilaisia, jos jäykisterenkaan mitat pidetään samoina kuin tässä tutkimuksessa, mutta hitsin a-mittaa muutetaan.

Toinen tekijä, joka vaikuttaa työn tulokseen huomattavasti, on levyn reiän leikkaustapa. Väsymislaskennassa reiän valmistustavasta riippuen käytetään kyseistä valmistustapaa vastaava väsymisluokkaa. Työssä laskettiin reiän väsyminen koneistetun reiän väsymisluokkaa 160 MPa käyttäen. Tulos olisi erilainen, jos laskuissa käytettäisiin esimerkiksi kaasulla leikatun reunan väsymisluokkaa 140 MPa. (Hobbacher 2016, s. 43.) ENS-menetelmän mukainen nimellinen väsymisluokka olisi tällöin vielä huomattavasti korkeampi, kuin reiän nimellinen väsymisluokka. Vastaavasti taas joidenkin tutkimusten (Lipiäinen et al. 2020, s 10) mukaan standardien väsymisluokat ovat liian alhaisia hyvälaatuisissa koneistetuissa ja leikatuissa reunoissa, jolloin reiän väsymislaskennassa voitaisiin käyttää korkeampaa väsymisluokkaa kuin 160 MPa. Jos laskennassa käytettäisiin korkeampaa väsymisluokkaa, hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan ja reiän nimellisten väsymisluokkien voisivat joillain mitoilla olla jo erittäin lähellä toisiaan. Optimaaliset mittasuhteet jäykisterenkaalle riippuvat siis myös erittäin paljon levykentän reiän valmistustavasta ja reiän reunojen laadusta.

5.3 Jatkokehitysehdotukset

Optimaalisia mittasuhteita jäykisterenkaalle ei saatu vielä näillä tutkituilla mittasuhdematriiseilla selville. Nimellisten väsymisluokkien kuvaajista voidaan kuitenkin arvioida, miten kuvaajat muuttuisivat, jos jäykisterenkaiden mittasuhdematriisia laajennettaisiin vielä lisää. $FAT_{nom,ens}$ ja $FAT_{nom,hole}$ kuvaajat ovat keskenään erisuuntaiset paraabelit, joissa paksuuden t_1 ja leveyden b kummankin ollessa suuremmat kuin 40 mm käyrät jatkavat kehitystä eri suuntiin. Jos suurennettaisiin jäykisterenkaiden mittasuhdematriisia vielä lisää ja tutkittaisiin tarkemmin jäykisterenkaita, joiden t_1 ja b

vaihtelisivat 40 mm ja 80 mm välillä, saataisiin tarkemmin selville paraabelien todelliset nollakohdat. Tällaisen lisätutkimuksen tuloksien mukaan paraabelien nollakohdat saattaisivat siirtyä lähemmäs toisiaan ja näin saataisiin varmistettua leikkaavatko paraabelit jossain kohtaa toisensa. Jos ne eivät siltikään leikkaa toisiaan, niin saataisiin ainakin selville, millä mittasuhteilla nämä nimelliset väsymisloukat ovat kaikista lähimpänä toisiaan.

Jos näillä lisäselvityksillä saataisiin selville jäykisterenkaan optimaaliset mittasuhteet, täytyisi sen jälkeen vielä selvittää skaalautuvatko nämä mittasuhteet, kun rakenteen pohjageometriaa muutetaan. Eli jos esimerkiksi levykentän pohjageometriaa tai reikää kasvatetaan, niin toimivatko oletetut jäykisterenkaan optimaaliset mittasuhteet myös samassa suhteessa kasvatettuina. Tällöin voitaisiin varmemmin sanoa voiko tätä tietoa soveltaa todellisiin ratkaisuihin ja miten siihen tulee suhtautua mitoittaessa levykentän reiän jäykisteitä. Tämän lisäksi täytyisi selvittää vielä tarkemmin, miten hitsin a-mitan muuttaminen vaikuttaa tuloksiin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin levykentässä olevan reiän ympärille hitsatun jäykisterenkaan koon vaikutusta rakenteen väsymiskriittisten yksityiskohtien kestävyteen. Tavoitteena oli määrittää tutkittavalle rakenteelle optimaaliset jäykisterenkaan mittasuhteet, joilla rakenteen väsymiskriittiset yksityiskohdat olisivat yhtä kestävä. Rakenteessa olevia kriittisiä yksityiskohtia ovat, hitsin kuormitusta vastaan kohtisuora rajaviiva, levykentän reiän reuna ja pitkittäinen hitsi. Näitä yksityiskohtia tutkittiin niihin soveltuvien väsymismitoitusten avulla ja tulosten määrittämiseksi käytettiin FE-analyysiä.

Tutkittavan rakenteen jäykisterenkaille luotiin mittasuhdematriisi, jonka mukaan mallinnettiin tutkittavien jäykisterenkaiden geometriat FEMAP-ohjelmistoa hyödyntäen. Lineaaristaattisen FE-analyysin avulla määritettiin rakenteen väsymiskriittisille yksityiskohdille jännityskonsentraatio kertoimet kyseisten yksityiskohtien väsymismitoitusten mukaisesti. Jännityskonsentraatioista pystyttiin laskemaan kunkin eri jäykisterenkaan koolle sen väsymiskriittisten yksityiskohtien nimelliset väsymisluokat, joita voitiin vertailla keskenään ja selvittää teoreettisesti optimaaliset mittasuhteet jäykisterenkaalle.

Tutkimismenetelmä todettiin toimivaksi ja ensimmäisten tulosten perusteella kasvatettiin jäykisterenkaan mittasuhdematriisia, jotta voitiin varmentaa ensimmäisten tulosten perusteella tehdyt oletukset. Tutkimuksen tulosten perusteella jäykisterenkaalle ei löydetty optimaalisia mittasuhteita, mutta saatiin selville jäykisterenkaan mittasuhteiden vaikutukset väsymiskestävyteen. Pitkittäisen hitsin kohdalla rakenne ei millään jäykisterenkaan mitoilla tule olemaan rakenteen kriittinen kohta. Huomattiin myös, että jäykisterenkaan koko vaikuttaa erittäin marginaalisesti levykentän reiän reunan väsymiskestävyteen ja sen sijaan reiän valmistustavalla on sen erittäin suuri vaikutus. Tämän lisäksi saatiin myös selville, että hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan väsymiskestävyys muuttuu jäykisterenkaan kasvaessa, kuvaajana paraabelin tavoin. Pienillä jäykisterenkailla väsymiskestävyys siis pienenee tiettyyn pisteeseen asti ja alkaa sen jälkeen kasvamaan jäykisterenkaan koon suurentuessa.

Kasvattamalla jäykisterenkaan mittasuhdematriisia vielä tarkennetulle alueelle, jossa t_1 ja b olisivat 40 mm ja 80 mm väliltä, saataisiin tarkemmin selville missä kohtaa hitsin kuormitusta vastaan kohtisuoran rajaviivan väsymiskestävyyden kehitys muuttaa suuntaa. Tältä välillä on todennäköisesti olemassa jäykisterenkaalle mittasuhteet, jossa hitsin rajaviivan ja reiän reunan väsymiskestävyydet ovat lähimpänä toisiaan. Kuitenkin jotta tätä tietoa voitaisiin hyödyntää jäykisterenkaiden mitoituksessa, tulisi tutkia tarkemmin myös skaalautuuko mittasuhteet samalla tavalla pohjageometriaa, eli levyn kokoa tai reiän kokoa muutettaessa.

LÄHTEET

Dowling, N. E. 2013. *Mechanical Behavior of Materials*. Fourth edition. Harlow: Pearson Education Limited. 954 s.

Fricke, W. 2010. *Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures*. Hamburg University of Technology. 38 s.

Hobbacher, A.F. 2016. *Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components*. Second edition. Springer International Publishing Switzerland. 143 s.

Lipiäinen K., Ahola, A., Skriko, T., Björk, T. 2020. Fatigue strength characterization of high and ultra-high-strength steel cut edges. *Engineering Structures*. Artikkelin 111544. 11 s.

Ongelin, P., Valkonen, I. 2010. *Hitsatut profiilit EN 1993 -käsikirja*. Hämeenlinna: Rautaruukki Oyj. 608 s.

Pilkey, W. D., Pilkey D.F., Bi, Z. 2020. *Peterson's Stress Concentration Factors*. Fourth edition. Newark: John Wiley & Sons, Incorporated. 601 s.