

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT Energijärjestelmät

LUT Kone

BK10A0401 Kandidaatintyö ja seminaari

ELEMENTTIKOON VAIKUTUS VÄSYMISMENETELMIEN TARKKUUTEEN

THE EFFECT OF MESH SIZING TO THE CONVERGENCE OF FATIGUE STRENGTH
METHODS

Lappeenrannassa 24.06.2015

Seppo Uimonen

Tarkastaja: Prof. Timo Björk

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energijärjestelmät
LUT Kone

Seppo Uimonen

Elementtikoon vaikutus väsymismenetelmien tarkkuuteen

Kandidaatintyö

2015

18 sivua, 13 kuvaa ja 5 taulukkoa

Hakusanat: väsymiskestävyys, tehollinen lovijännitys, tarkkuus

Kandidaatintyössä tutkittiin kolmen hitsatun palstalevyliitoksen väsymiskestävyyttä äärellisten elementtien menetelmällä. Tutkimuksen pääpaino oli 2D-mallin antamien tulosten suppenevuudessa kolmella eri elementtikoolla ja kolmessa eri mittasuhtetapauksessa.

Tutkimustuloksissa havaittiin noin 5 % muutos harvimman ja tiheimmän elementtiverkon tulosten välillä. Tutkimuksessa havaittiin myös että muutos harvimman ja tiheimmän elementtiverkon tuloksissa pieneni hiukan mitä suurempia kappaleet ja niiden hitsausliitokset olivat.

ABSTRACT

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

Seppo Uimonen

The Effect of Mesh Sizing to the Convergence of Fatigue Strength Methods

Bachelor's thesis

2015

18 pages, 13 figures and 5 tables

Keywords: fatigue strength, effective notch stress, convergence

In bachelor's thesis there was studied fatigue strength results of three welded column joints by finite element method. Main emphasis of the study regarded converge of 2D-model results with three different mesh sizing options and three geometry cases.

In the results there was observed circa 5 % difference between most sparse and most dense mesh. There was also discovered that the difference was slightly less at bigger geometry and weld size cases.

SISÄLLYSLUETTELO**TIIVISTELMÄ****ABSTRACT****SISÄLLYSLUETTELO****SYMBOLILUETTELO**

1	JOHDANTO	6
2	MENETELMÄT	7
3	TULOKSET	11
4	POHDINTA	16
	LÄHTEET	18

SYMBOLILUETTELO

σ_{max}	maksimijännitys FEM-mallissa hitsin rajaviivalla
σ_{nim}	nimellinen jännitys kappaleessa FEM-mallissa
ν	kuroumavakio
a	hitsin a-mitta
a, b, c	mittasuhtetapaukset
A, B, C, D, E, F	verkotusalueiden elementtien viivatiheydet
E	kimmomoduuli
Kt_{ENS}	jännityskonsentraatiokertoimet hitsin rajaviivalla
$Kt_{ENS.tihein}$	tiheimmän elementtiverkon antama jännityskonsentraatiokerroin
$Kt_{ENS.harvin}$	harvimman elementtiverkon antama jännityskonsentraatiokerroin
L	ylälevyn pituus
$ProS_{ero}$	Prosentuaalinen ero harvimman ja tiheimmän elementtiverkon tulosten välillä
t	ylälevyn paksuus
T	alälevyn paksuus

1 JOHDANTO

Kandidaatintyössä tutkittiin ulokkeellisen palstalevyliitoksen väsymiskestävyyttä äärellisten elementtien menetelmällä (FEM, finite element method). Tutkimuksen tarkoitus oli selvittää millä elementtitiheydellä simulaatiotulokset ovat tarpeeksi tarkkoja, jotta niitä voidaan käyttää hyväksi väsyttävästi kuormitetun hitsausliitoksen kestoajan arvioinnissa. Kandidaatintyö on osa Lappeenrannan teknillisen yliopiston teräsrakenteiden laboratoriossa tehtävää tutkimusta.

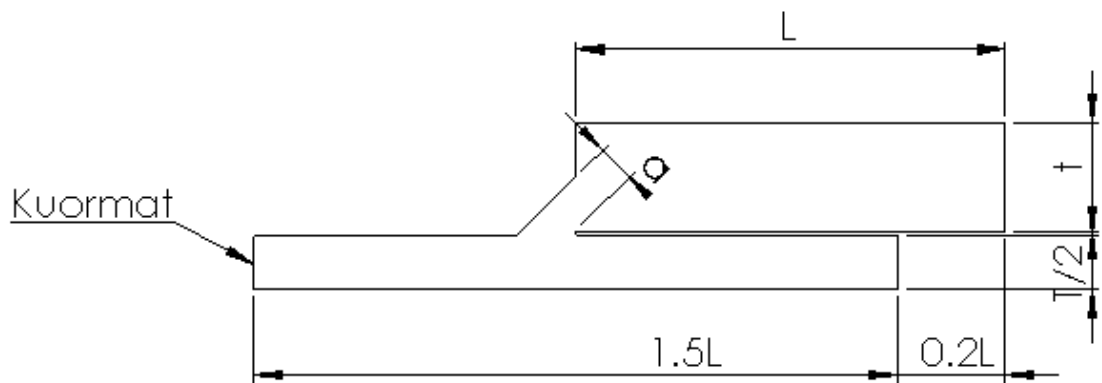
FEM on tietokoneella tehtävää laskentaa, jossa tutkittava kappale jaetaan äärellisiin palasiin, solmuihin ja elementteihin, joiden siirtymien ja muodonmuutosten perusteella arvioidaan kappaleessa vaikuttavia jännityksiä. Tämä edellyttää tietoa tietyistä materiaaliominaisuuksista, kuten kimmokertoimesta E ja kuroumavakiosta ν . Vastaavasti tarvitaan tieto myös kuormista ja kiinnityksistä.

Vaihtelu hitsattujen rakenteiden väsymiskestävyydessä johtuu osittain valmistuksessa syntyvistä geometrisista epäjatkuvuuksista. Koska suunnittelija ei voi olla tietoinen näistä, on pienet epäjatkuvuudet sisällytetty väsymiskestävyyssäyrästäisiin. Isot epäjatkuvuudet kuten liitosvirheet otetaan huomioon jännityksen tehostekertoimilla. (Hobbacher, 2008, s. 22.)

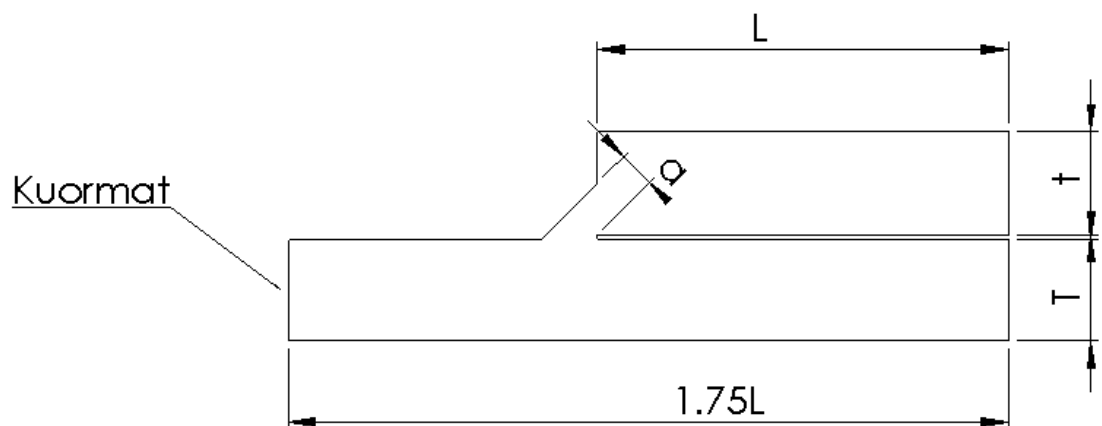
Väsymiskestävyyden arviointimenetelmistä tutkimuksessa käytettiin tehollisen lovijännityksen menetelmää (ENS, effective notch stress). Tehollisen lovijännityksen menetelmä perustuu Neuberin mikrotukihypoteesiin. Siinä lovijännitys määritetään tekemällä FEM-malliin yhden millimetrin pyörityssäde, jonka elementeistä maksimijännitys katsotaan hitsausliitoksen väsymiskestoajan määrittämiseksi. Tehollisen lovijännityksen menetelmän etu nimellisen ja rakenteellisen jännityksen menetelmiin on, että sitä voidaan soveltaa myös hitsin juureen. (Kranz & Sonsino, 2010, s. 3.)

2 MENETELMÄT

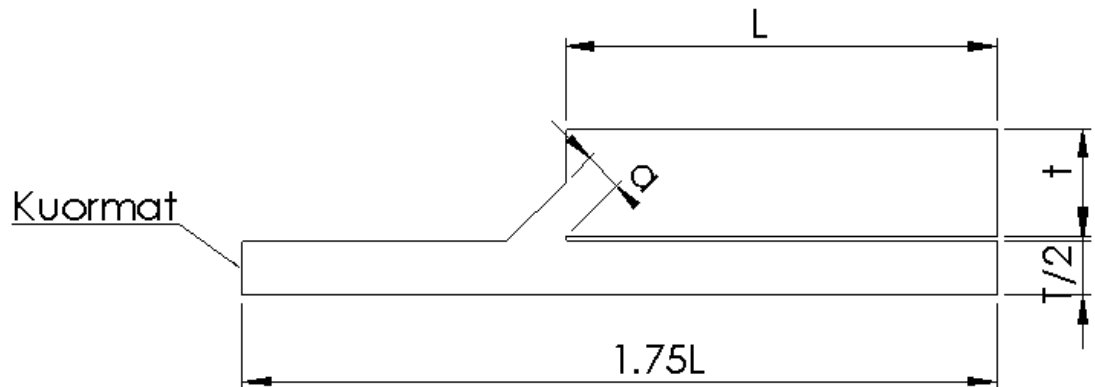
Tutkimuksen kohteena oli kolme erilaista palstalevyliitosta (kuvat 1.1, 1.2 ja 1.3), joista kustakin laskettiin kolme eri mittasuhdetapausta kolmella eri elementtikooalla. Kuvissa L on ylälevyn pituus, a on hitsin a-mitta, T on alalevyn paksuus ja t on ylälevyn paksuus.



Kuva 1.1 Liitoksen 1 periaatekuva. Neljäsosamalli.

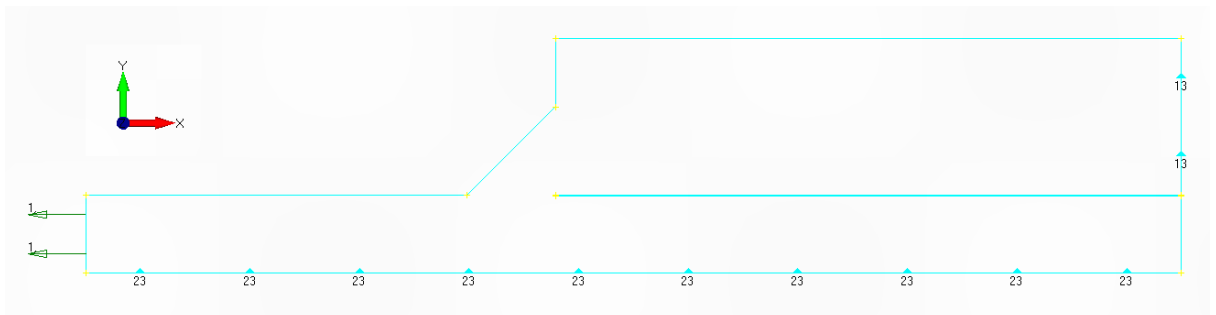


Kuva 1.2 Liitoksen 2 periaatekuva. Kahdesosamalli.

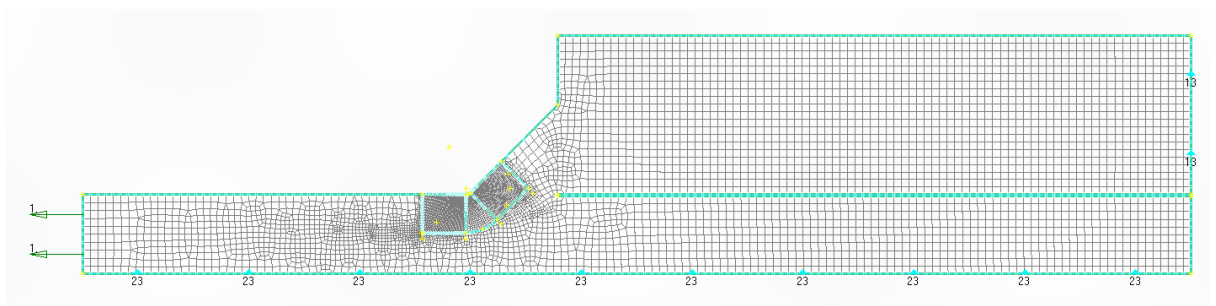


Kuva 1.3 Liitoksen 3 periaatekuva. Neljäsosamalli.

Analyseissä esi- ja jälkikäsittelijänä käytettiin FEMAP-ohjelmaa. Ratkaisijana käytettiin ohjelmaa NX Nastran. Liitosten geometriat mallinnettiin millimetreissä. Tutkittavalle hitsin rajaviivalle luotiin 1 mm pyöritys fillet-työkalulla. Alalevyn liike sidottiin sekä y- ja z-suuntiin. Ylälevyn liike sidottiin x- ja z-suuntiin. Kuormat asetettiin viivakuormana 1 N/mm x-akselin negatiiviseen suuntaan (force per length). Kuvassa 2.1 määriteltiin kuormat ja kuvassa 2.2 verkotus.



Kuva 2.1. Reunaehtojen ja kuormien määrittely.

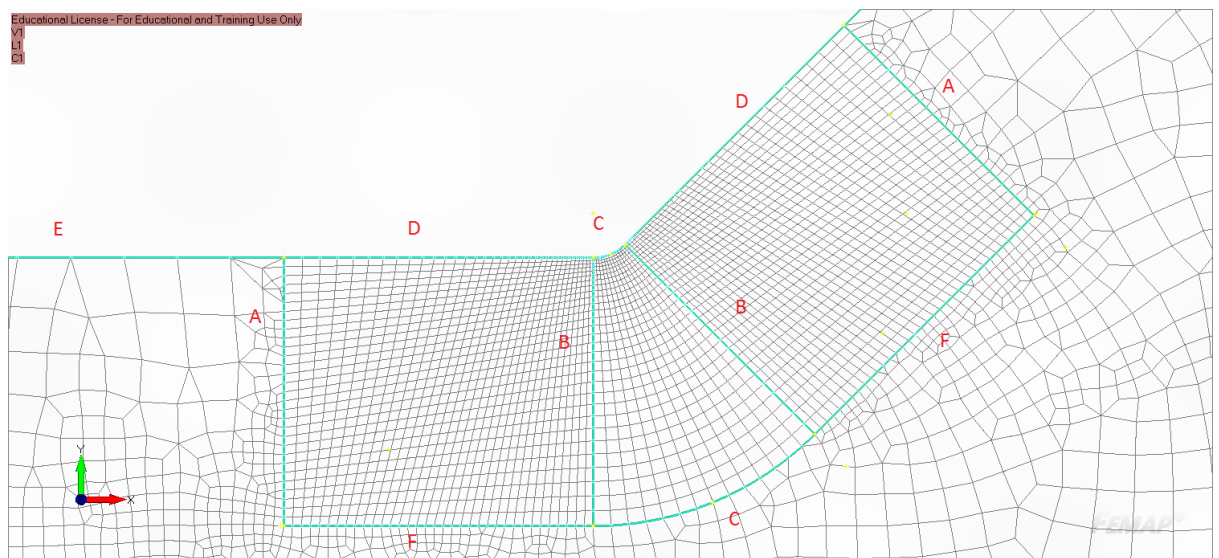


Kuva 2.2. Liitoksen verkotus.

Verkotus tehtiin määrittelemällä elementtimäärät viivageometriaan niin että janoille B ja D elementtikooksi asetettiin 0.2 mm harvennussuhteella 1:6 (bias factor). Janoille A elementtimäärä asetettiin samaksi kuin janoilla B, mutta ilman harvennusta. Janoille F elementtimäärä asetettiin samaksi kuin janoilla D, mutta ilman harvennusta. Käyrälle C elementtimääräksi asetettiin 14, jotta se vastaa janojen D ja B pienintä elementtijakoa. Kaikkialla muualla mallissa elementtikoko oli vakio 1.2 mm. (taulukko 2.1., kuva 2.3.)

Taulukko 2.1. Verkotuksen määrittely viivageometriaan.

Janat	Elementit	Harvennussuhde (bias factor)
B, D	0.2 mm	1:6
A	Lukumäärä sama kuin B:ssä	-
F	Lukumäärä sama kuin D:ssä	-
C	14 kpl jotta vastaa janojen D,B pienintä elementtijakoa	-
E	1.2 mm	-

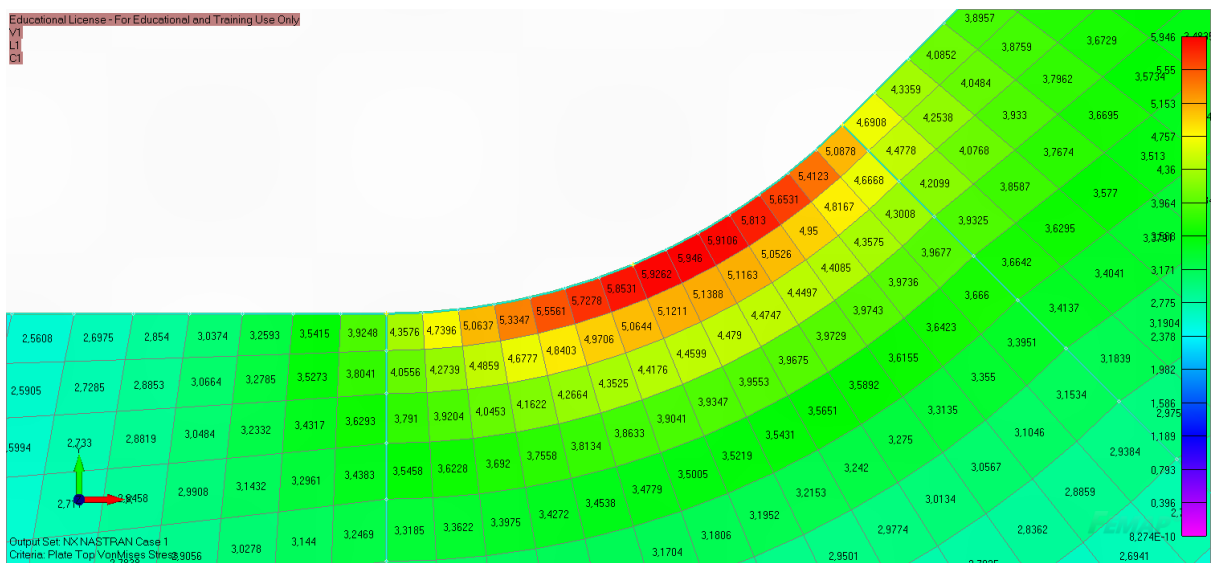


Kuva 2.3. Verkotusalueiden elementtien viivatiheydet.

Analyseissä elementtimäärää tihennettiin kaksinkertaistamalla sitä tutkittavalla alueella. Muualla kappaleessa elementtimäärää pidettiin vakiona. Materiaalina mallinnuksessa käytettiin terästä ominaisuuksilla kimmomoduuli 210 000 MPa ja kuroumavakio 0.3. Elementtityyppinä oli parabolinen levy (plate) tasomuodonmuutostilassa paksuudella 1 mm.

Analyysityyppi oli staattinen ja lineaarielastinen. Tuloksista otettiin tarkasteluun Von Mises –jännitykset ja niiden maksimiarvot luettiin hitsin rajaviivan elementeistä (kuva 2.4) ja kirjattiin taulukoihin. Koska kuormana oli 1 MPa nimellisjännitys, vastaavat maksimiarvot suoraan jännityskonsentraatiokertoimia Kt_{ENS} kaavan mukaisesti jakamalla maksimijännitys σ_{max} nimellisjännityksellä σ_{nim} :

$$Kt_{ENS} = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nim}} \quad (1)$$



Kuva 2.4. Elementtijännitykset hitsin rajaviivalla.

Taulukosta tulokset siirrettiin Matlab-ohjelmaan, jossa ne visualisoitiin. Elementtikoot ilmaistiin käänteislukuina, jotta tulokset saatiin esitettyä vasemmalta oikealle. Koska tutkimusaineisto ei ollut luonteeltaan eikä määrältään tilastollista, ei ollut mielekäästä laskea käyräsovituksen jäännösarvoja. Prosentuaaliset erot Pro_{Sero} harvimman $Kt_{ENS.harvin}$ ja tiheimmän $Kt_{ENS.tihein}$ elementtiverkon antamien tulosten välillä laskettiin kaavalla:

$$Pro_{Sero} = \frac{(Kt_{ENS.tihein} - Kt_{ENS.harvin})}{Kt_{ENS.tihein}} * 100\% \quad (2)$$

Prosentuaaliset erot harvimpien ja tiheimpien tapausten välillä listattiin taulukkoon ja visualisoitiin geometriatapausten funktiona kuvaajaan.

3 TULOKSET

FEM-analyyseissä tarkasteltiin Von Mises -jännitysten maksimiarvoja. Jännitysten maksimiarvot luettiin hitsin rajaviivan elementeistä ja kirjattiin taulukoihin 3.1, 3.2 ja 3.3. Edelläolevista taulukoista tulokset siirrettiin Matlab-ohjelmaan, jossa ne visualisoitiin. Elementtikoot ilmaistiin käänteislukuina, jotta tulokset saatiin esitettyä vasemmalta oikealle (kuvat 3.1, 3.2 ja 3.3). Prosentuaaliset erot harvimpien ja tiheimpien tapausten välillä listattiin taulukkoon 3.4 ja visualisoitiin geometriatapausten funktiona kuvaan 3.4.

Taulukko 3.1. Laskentaskenaariot liitokselle 1.

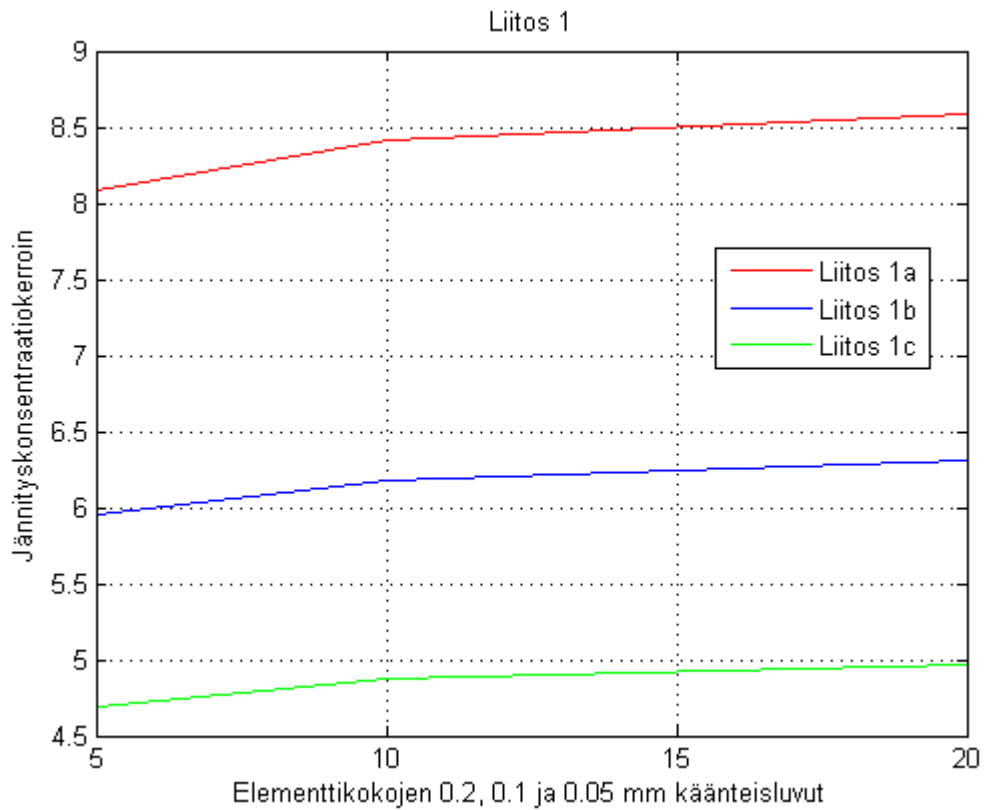
Mittasuhte- tapaus	Pituus L	Ylälevyn t paksuus	Alalevyn T paksuus	Hitsin a-mitta	Elementtikoko harvennus- työkalussa	Jännitys- konsentraatio- kerroin hitsin rajaviivalla Kt_{ENS}
<i>a</i>	50 mm	12.5 mm	25 mm	6 mm	0.2	8.08
					0.1	8.41
					0.05	8.58
<i>b</i>	100 mm	25 mm	25 mm	10 mm	0.2	5.95
					0.1	6.17
					0.05	6.30
<i>c</i>	200 mm	50 mm	25 mm	15 mm	0.2	4.69
					0.1	4.86
					0.05	4.96

Taulukko 3.2. Laskentaskenaariot liitokselle 2.

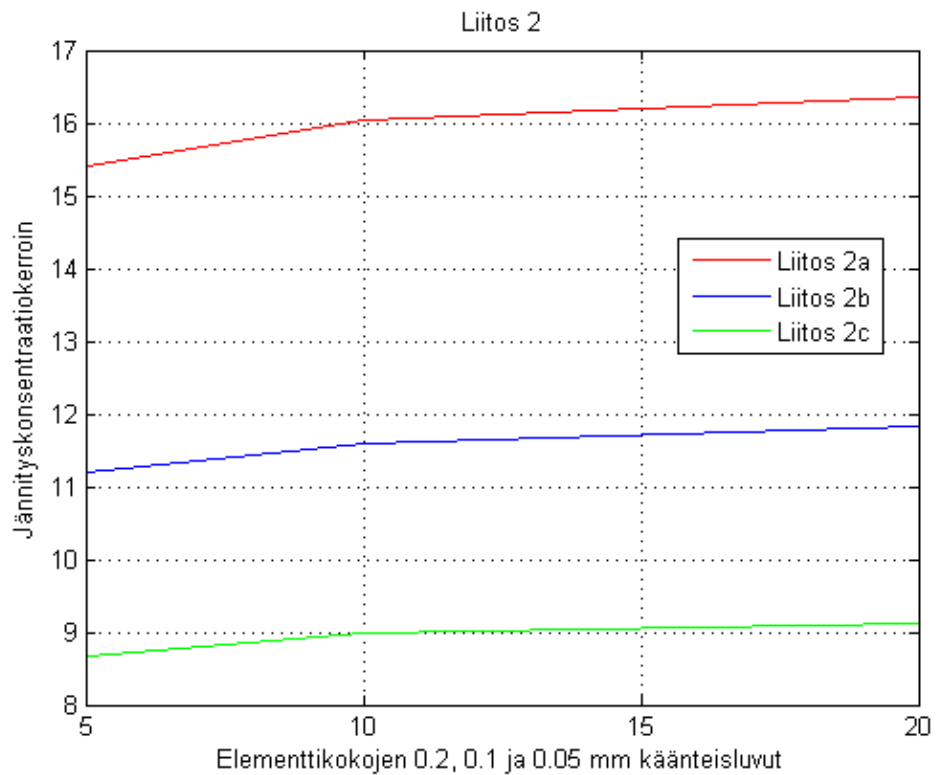
Mittasuhte- tapaus	Pituus L	Ylälevyn t paksuus	Alalevyn T paksuus	Hitsin a- mitta	Elementtikoko harvennus- työkalussa	Jännitys- konsentraatio- kerroin hitsin rajaviivalla Kt_{ENS}
<i>a</i>	50 mm	12.5 mm	25 mm	6 mm	0.2	15.41
					0.1	16.03
					0.05	16.34
<i>b</i>	100 mm	25 mm	25 mm	10 mm	0.2	11.18
					0.1	11.59
					0.05	11.84
<i>c</i>	200 mm	50 mm	25 mm	15 mm	0.2	8.66
					0.1	8.99
					0.05	9.12

Taulukko 3.3. Laskentaskenaariot liitokselle 3.

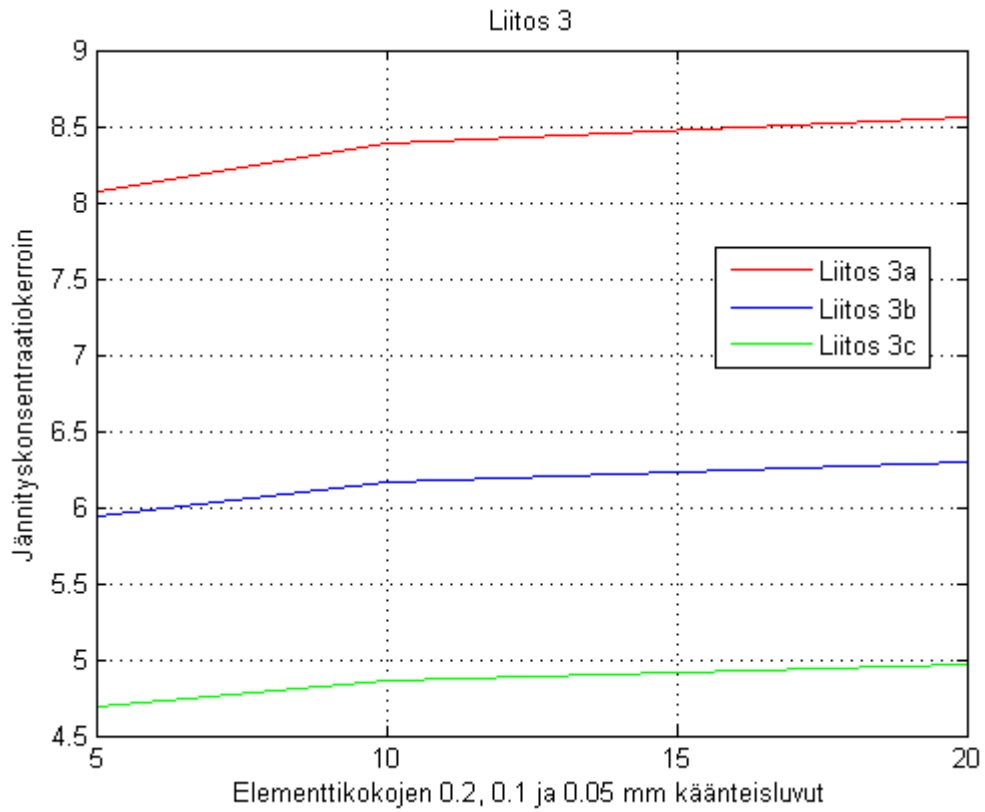
Mittasuhte- tapaus	Pituus L	Ylälevyn t paksuus	Alalevyn T paksuus	Hitsin a- mitta	Elementtikoko harvennus- työkalussa	Jännitys- konsentraatio- kerroin hitsin rajaviivalla Kt_{ENS}
<i>a</i>	50 mm	12.5 mm	25 mm	6 mm	0.2	8.06
					0.1	8.38
					0.05	8.55
<i>b</i>	100 mm	25 mm	25 mm	10 mm	0.2	5.94
					0.1	6.16
					0.05	6.29
<i>c</i>	200 mm	50 mm	25 mm	15 mm	0.2	4.68
					0.1	4.86
					0.05	4.96



Kuva 3.1. Liitoksen 1 jännityskonsentraatiokerroimen arvo eri geometriatapauksissa.



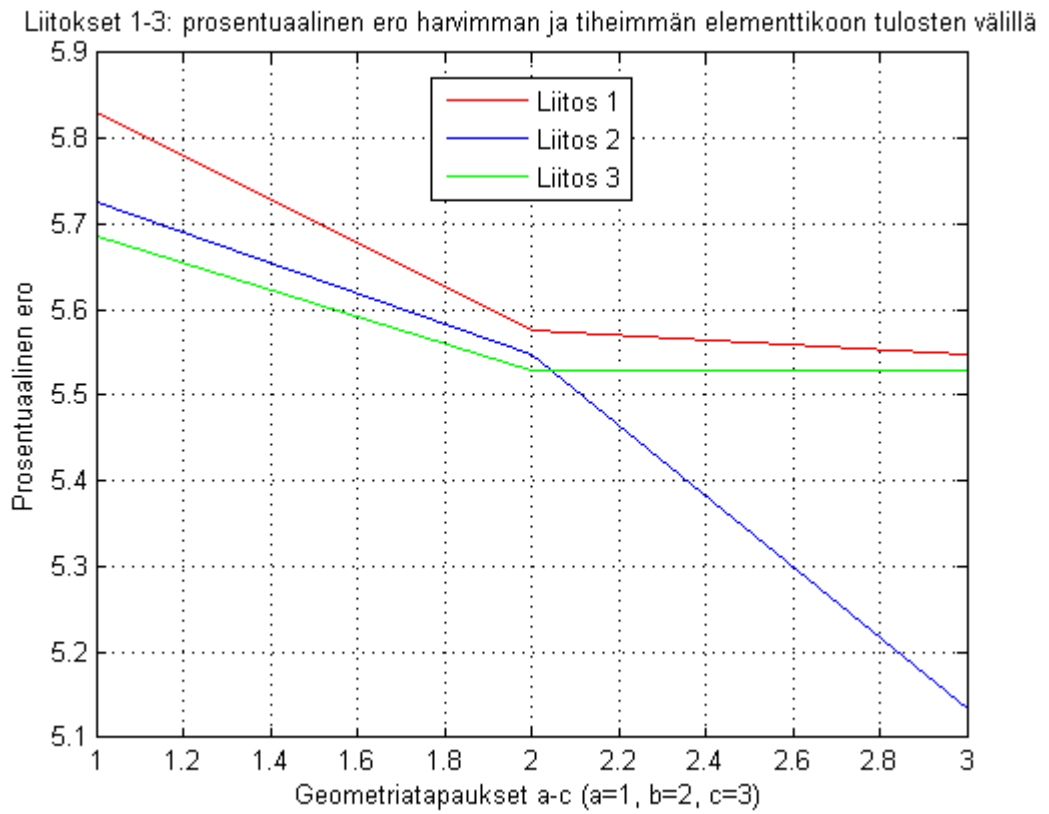
Kuva 3.2. Liitoksen 2 jännityskonsentraatiokerroimen arvo eri geometriatapauksissa.



Kuva 3.3. Liitoksen 3 jännityskonsentraatiokerroimen arvo eri geometriatapauksissa.

Taulukko 3.4. Prosentuaalinen ero harvimman ja tiheimmän elementtiverkon tuloksissa.

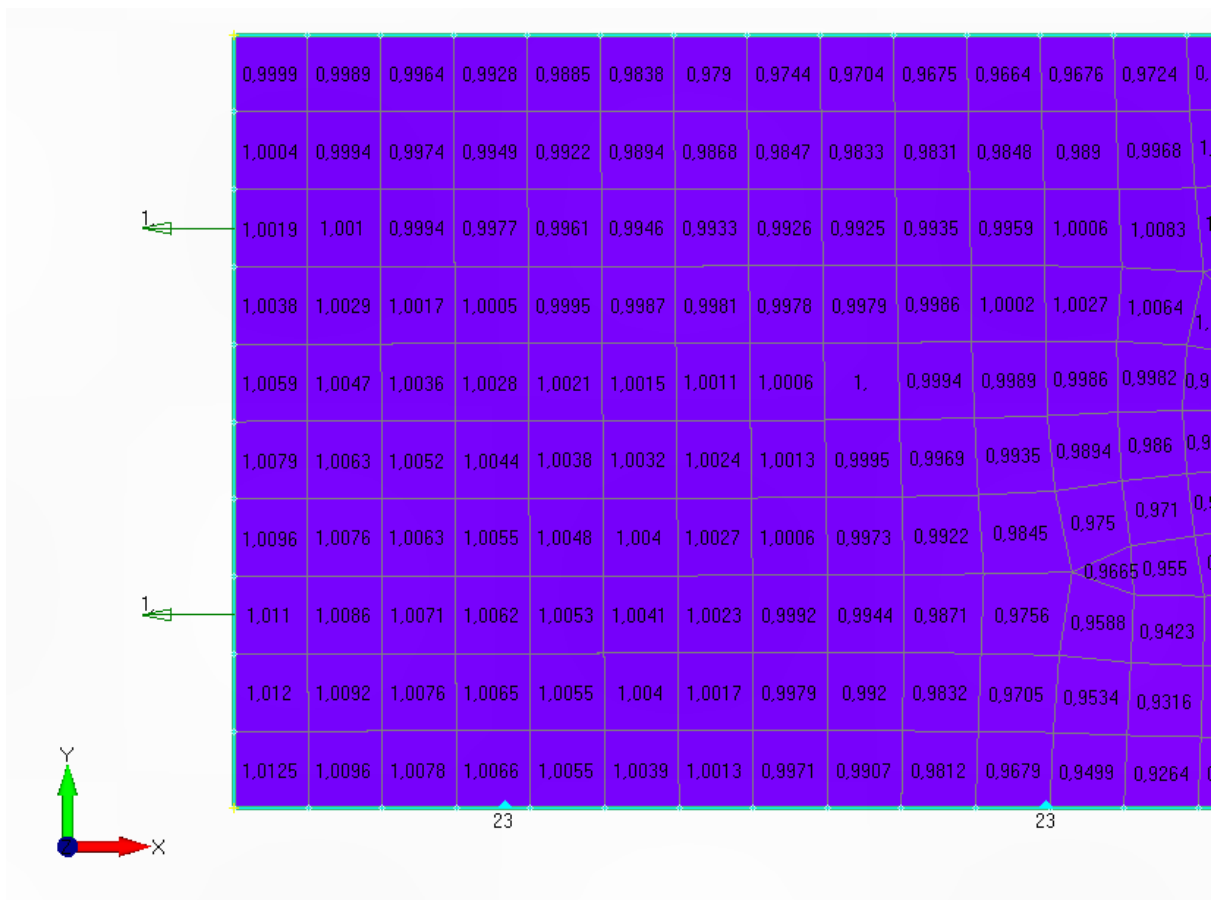
Mittasuhtetapaus	Liitos 1	Liitos 2	Liitos 3
<i>a</i>	5.83	5.72	5.68
<i>b</i>	5.57	5.54	5.52
<i>c</i>	5.54	5.13	5.52



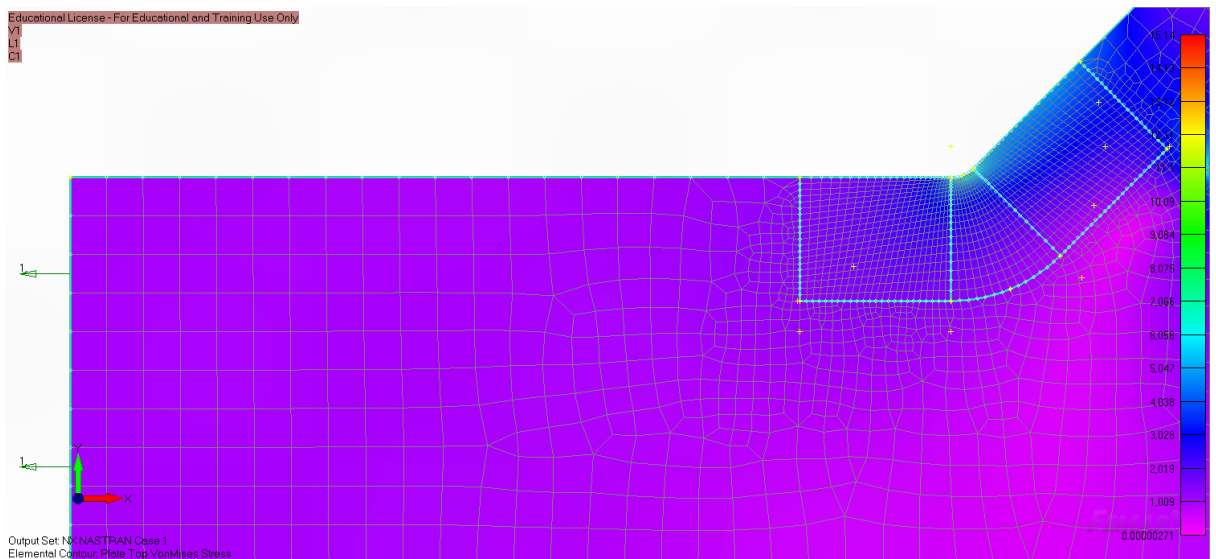
Kuva 3.4. Prosentuaalinen ero harvimman ja tiheimmän elementtikoon tulosten välillä.

4 POHDINTA

Jännityskonsentraatiokertoimet hitsin rajaviivalla osoittautuivat suuriksi. Ne voitiin kuitenkin varmentaa tarkistamalla jännitykset kappaleessa kuormituksen kohdalla, jossa ne olivat luokkaa 1 MPa. Näin ollen jännityskonsentraatiokertoimen arvoja voidaan pitää luotettavina. (kuvat 4.1 ja 4.2)



Kuva 4.1. Jännitykset FEM-mallissa kuormitusten kohdalla.



Kuva 4.2. Jännitykset FEM-mallissa kuormitusten kohdalla, laajempi kuva.

Liitoksen 3 ilmarako liitoskohdassa ei vaikuttanut juurikaan tuloksiin, vaan tulokset täsmäsivät liitoksen 1 kanssa (taulukko 3.1. ja 3.3). Liitoksen 2 epäsymmetria x-akselin suhteen aiheutti suurimmat jännityskonsentraatiokertoimen arvot (taulukko 3.2).

Elementtimäärät eivät sinänsä olleet mallissa suuria (pienimmässä mallissa harvalla verkotuksella noin 4500), mutta elementit olivat pieniä tutkittavalla alueella. Aihetta jatkotutkimuksiin voisi olla onko mahdollista saada tarpeeksi tarkkoja tuloksia pienemmillä elementtimäärillä.

Prosentuaaliset erot harvimman ja tiheimmän elementtiverkon antamissa tuloksissa olivat 5.5-5.8 % luokkaa (taulukko 3.4). Prosentuaaliset erot pienenevät hiukan mitä suurempia mitoiltaan tutkittavat kappaleet olivat (taulukko 3.4 ja kuva 3.4). Mikäli tiheimmän elementtiverkon antamat tulokset ovat lähellä raja-arvoa, voidaan sanoa että harvimman elementtiverkon antamat tulokset ovat 10 % virhemarginaalin sisällä. Tämän varmentaminen vaatisi kuitenkin enemmän analyysyjä tiheimmillä elementtiverkoilla jotta raja-arvo saataisiin ylipäätään määriteltyä.

Toisaalta Fricken (2014, s. 7) mukaan FEM-analyysien tulokset ovat noin 2 % virhearvion sisällä, jos elementtikoot ovat pienempiä kuin 0.25 mm heksagonaalisilla elementeillä lovitetulla palkilla. Tämä ehto alittuu kaikissa laskentatapauksissani. Ristiriita tulosten välillä voi johtua eri elementtityypeistä, erilaisista liitostyypeistä tai muista eroista menetelmien soveltamisessa.

LÄHTEET

Hobbacher, A. 2008. Recommendations for fatigue design of welded joints and components [verkkodokumentti]. XII-1539-96/XV-845-96. International Institute of Welding. [Viitattu 18.06.2015]. 149 s. Saatavissa PDF-tiedostona: <http://www.weldonsweden.se/usersfiles/file/IWSD2010-M3/XIII-1823-07+Fatigue+Recommendations.pdf>

Kranz, B, Sonsino C.M. 2010. Verification of the Notch Stress Concept for the Reference Radii of $R_{ref} = 1.00$ and 0.05 mm. *Welding in the world*, 54:7-8. Ss. R218-R224.

Fricke, W. 2014. Professori, TKT, Hampurin teknillinen yliopisto (TUHH). Fatigue Seminar in Lappeenranta 21.8.2014. Session 1: Fatigue assessment by notch stress analysis for welded structures.