



**ELEMENTTITIHEYDEN JA -MUODON VAIKUTUS RAKENTEELLISEN JÄN-  
NITYKSEN LASKENTATARKKUUTEEN PAKSUUDEN YLI LINEARISOIN-  
NISSA**

**EFFECT OF MESH DENSITY AND ELEMENT SHAPE ON THE STRUCTURAL  
STRESS CALCULATION ACCURACY WHEN USING THROUGH THICKNESS  
LINEARIZATION -METHOD**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

Janne Hyvärinen

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT  
LUT Energiajärjestelmät  
Konetekniikka

Janne Hyvärinen

### **Elementtitiheyden ja -muodon vaikutus rakenteellisen jännityksen laskentatarkkuuteen paksuuden yli linearisoinnissa**

Konetekniikan kandidaatintyö  
2023

22 sivua, 12 kuvaa, 7 taulukkoa ja 2 liitettä  
Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: rakenteellinen jännitys, hot spot, paksuuden yli linearisointi

Rakenteellisen jännityksen laskentaan käytetään muun muassa paksuuden yli linearisointi -menetelmää. Ohjeistuksessa ei anneta lukuarvoa riittävälle elementtiverkon tiheydelle, mikä jää suunnittelijan valittavaksi. Ohjeen tarkentamiseksi, tällä työllä selvitetään elementtien lukumäärän ja sivusuhteen vaikutus rakenteellisen jännityksen laskentatarkkuuteen paksuuden yli linearisoinnissa ja esitetään lukuarvo riittävälle elementtien lukumäärälle.

Työssä esitellään kaksi tapaa laskea rakenteellinen jännitys FE-mallista luetuista jännityksistä: pintaa pitkin ekstrapolointi ja paksuuden yli linearisointi -menetelmät. Lisäksi työssä mallinnetaan kulmavirheinen, päistään vetokuormitettu, hitsattu T-liitos, minkä geometrialle tehdään 15 verkotusvariaatiota. Malleista luetaan kokonaisjännitykset hitsin rajaviivalta paksuuden yli, mistä analyttisesti laskettuja rakenteellisen jännityksen arvoja vertaillaan keskenään. Laskentatarkkuuden ei oleteta paranevan, kun rakenteellisen jännityksen arvot jäivät yhden prosentin päähän tiheimmästä neliömäisestä elementtiverkkovariaatiosta.

Paksuuden yli linearisointi antoi korkealla elementtien sivusuhteella suurempia rakenteellisia jännityksiä ja matalilla elementeillä pienempiä rakenteellisia jännityksiä kuin neliömäisillä elementeillä verkotetut geometriat. Tarkastellulle T-liitokselle riittävä elementtiverkko koostuu hitsin rajaviivalla paksuuden yli neljästä elementistä, joiden sivusuhte on 1:1.

## ABSTRACT

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

Janne Hyvärinen

### **Effect of mesh density and element shape on the structural stress calculation accuracy when using through thickness linearization -method**

Bachelor's thesis  
2023

22 pages, 12 figures, 7 tables and 2 appendices

Examiner: D.Sc. (Tech) Antti Ahola

Keywords: structural stress, hot spot, through thickness linearization

One method of calculating structural stress is by using through thickness linearization -method. Designer guides do not present numerical value for 'good enough' element density which is left for designer to choose. To specify the guide, this paper focuses on finding how much the element density and the element side relationship affects the accuracy of the structural stress calculation and presents a numerical value for the 'good enough' element density.

This paper presents two methods for calculating structural stress from FE-models: surface extrapolation and through thickness linearization. For numerical data, a welded T-joint with a misalignment is modeled and the geometry is meshed with 15 mesh variations from which the stress values are read through thickness at the weld toe. Analytic calculations methods given in the designer's guide are utilized and the obtained values are compared with each other. The calculation accuracy is considered to not improve when the structural stress values are within one percent of the densest square shape mesh variation's values.

Through thickness linearization -method with tall-element mesh gave higher stress values than square-element mesh. Also, wide-element mesh gave lower stress values than square-element mesh. The paper argues that four elements with side ratio of 1:1 fulfils the requirement of the 'good enough' element density for the studied T-joint.

## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

### Roomalaiset

$E$	kimmokerroin	[GPa]
$t$	levyn paksuus	[mm]
$\nu$	Poissonin luku	

### Kreikkalaiset

$\alpha$	kulmavirhe	[°]
$\sigma_{0,4t}$	kokonaisjännitys 0,4t etäisyydeltä hitsin rajalta	[MPa]
$\sigma_{1,0t}$	kokonaisjännitys 1,0t etäisyydeltä hitsin rajalta	[MPa]
$\sigma_b$	taivutusjännitys	[MPa]
$\sigma_{hs}$	hot spot jännitys	[MPa]
$\sigma_{ln}$	kokonaisjännitys	[MPa]
$\sigma_m$	kalvojännitys	[MPa]
$\sigma_{nlp}$	loven aiheuttama jännitys	[MPa]
$\sigma_s$	rakenteellinen jännitys	[MPa]

### Lyhenteet

FE	äärellinen elementti (finite element)
HS	kriittinen piste (hot spot)
IIW	International Institute of Welding

## Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
1.1	Tutkimusongelma.....	6
1.2	Tavoitteet ja tutkimuskysymykset.....	6
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	7
1.4	Rajaukset.....	7
1.5	Tieteellinen anti.....	7
2	Teoria.....	8
2.1	Hot spot -jännitys.....	8
2.2	FE-mallit.....	11
2.2.1	Mallintaminen.....	11
2.2.2	Verkottaminen.....	12
2.2.3	Jännitysten lukeminen ja rakenteellisen jännityksen laskeminen.....	13
3	Tulokset.....	14
3.1	Elementtiverkon tiheyden vaikutus.....	15
3.2	Elementtiverkon sivusuhteen vaikutus.....	17
4	Tulosten analysointi.....	18
4.1	Reliabiliteetti- ja validiteettitarkastelut.....	18
4.2	Tärkeimmät tulokset.....	18
4.3	Jatkotutkimusaiheet.....	18
5	Yhteenveto.....	19
	Lähteet.....	20

Liitteet

Liite 1. Kokonaisjännitys jakaumat paksuuden yli jokaiselle verkotusvariaatiolle

Liite 2. Kokonaisjännitys jakauman arvot paksuuden yli jokaiselle verkotusvariaatiolle

# 1 Johdanto

Vähintään puolet mekaanisista vaurioista johtuvat väsymisestä. Tarkkaa osuutta ei tunneta, mutta useat kirjat ja artikkelit arvioivat luvun olevan 50–90 %, joista suurin osa on odottamattomia. (Stephens 2001, s.3) Hitsattujen teräsrakenteiden mitoituksessa käytetään muun muassa Eurokoodi 3:ssa (SFS-EN 1993-1-9, 2005) kuvattuja väsymismitoitusmenetelmiä, missä tutkitaan rakenteellisen jännityksen menetelmällä hitsattujen rakenteiden väsymislujutta sekä kestoikää. Yksi laskentatapa on paksuuden yli linearisointi, missä voidaan erottaa kalvo- ja taivutusjännitysten osuudet toisistaan. Näiden avulla voidaan arvioida tutkittavan kohdan väsymislujutta.

## 1.1 Tutkimusongelma

Paksuuden yli linearisointi -menetelmään ei ole ohjeistettu riittävää verkotustiheyttä teräsrakenteiden suunnittelu -standardissa. Inhimilliselle virheelle on näin tilaa, koska suunnittelija valitsee itse mielestään riittävän verkotustiheyden, jolloin menetelmällä saatu jännitys-jakauma voi poiketa todellisesta jännitys-jakaumasta. Vaatimaton verkotus voi johtaa virheelliseen laskennalliseen jännitys-jakaumaan ja pahimmillaan johtaa rakenteen alimitoittamiseen ja ennen aikaiseen väsymisvaurioon. Toisaalta riittävän tiheää verkkoa tiheämpi verkko lisää työtä ja laskenta-aikaa tuomatta laskennalle lisäarvoa.

## 1.2 Tavoitteet ja tutkimuskysymykset

Tämän tutkimuksen tavoite on tunnistaa elementtien tiheyden ja sivusuhteiden vaikutus rakenteellisen jännityksen laskentatarkkuuteen paksuuden yli linearisoinnissa ja määrittää riittävä elementti määrä paksuuden yli linearisointiin. Tässä kandidaatintyössä on kaksi tutkimuskysymystä:

- Miten ja kuinka paljon elementtiverkon tiheys ja elementtien sivusuhteet vaikuttaa rakenteellisen jännityksen kalvo- ja taivutusjännitysosuuksien laskentatarkkuuteen paksuuden yli linearisoitaessa?
- Kuinka monta elementtiä paksuuden yli on riittävästi?

### 1.3 Tutkimusmenetelmät

Tässä työssä mallinnetaan kulmavirheinen hitsattu T-liitos Siemens Femap 2021.2 Student -ohjelmalla. Liitoksen mitat valitaan vastaamaan hitsausstandardin (SFS-EN ISO 13920 1996, s.6) kulmavirhetoleranssiluokkaa D ja geometriasta tehdään 15 verkotusvariaatiota, joista luetaan jännitykset hitsin rajaviivalta paksuuden yli käyttäen Femapin Nastran ratkaisijaa. Saaduista jännityksistä lasketaan kalvo- ja taivutus- ja hotspotjännitysten osuudet, joita vertaillaan eri verkotusvariaatioiden kesken.

### 1.4 Rajaukset

Työssä käsitellään elementtiverkon tiheyden ja elementtien sivusuhteiden vaikutusta rakenteelliseen jännityksen laskentatarkkuuteen. Vaikka tutkittava malli on rakenneterästä, seuraavissa luvuissa ei oteta kantaa materiaalin myötö- tai murtorajaan, voimien suuruuteen tai niiden vaikutukseen materiaalissa.

### 1.5 Tieteellinen anti

Tuloksilla pyritään selventämään IIW:n (International Institute of Welding) julkaisemaa suunnittelijan ohjeen ja standardien ilmaisua riittävästä elementtimäärästä paksuuden yli linearisointia käytettäessä.

## 2 Teoria

Tässä luvussa käydään läpi kaksi tapaa määrittää rakenteellinen jännitys: pintaa pitkin ekstrapolointi ja paksuuden yli linearisointi -menetelmät. Lisäksi esitetään menetöt tutkitun T-liitoksen mallintamiseen, elementtiverkon tekoon ja kokonaisjännitysten tulkitsemiseen.

### 2.1 Hot spot -jännitys

Rakenteellisen jännityksen huippukohta, hot spot (HS) -jännitys,  $\sigma_{hs}$ , on suurin pääjännitys perusaineessa hitsin reunan vieressä. Se huomioi kokonaisgeometriasta johtuvan jännityskeskittymän vaikutukset, mutta ei paikallisia lovi-jännityskeskittymän vaikutuksia. Paikalliset jännityskeskittymät voivat johtua hitsin geometriasta, epäjatkuvuudesta ja viereisestä perusaineesta. (Niemi et al. 2004) Rakenteellinen jännitys koostuu kahdesta jännityskomponentista: Kalvojännitys jakautuu tasaisesti paksuuden yli ja taivutusjännitys jakautuu lineaarisesti paksuuden yli.

$$\sigma_{hs} = \sigma_m + \sigma_b \quad (1)$$

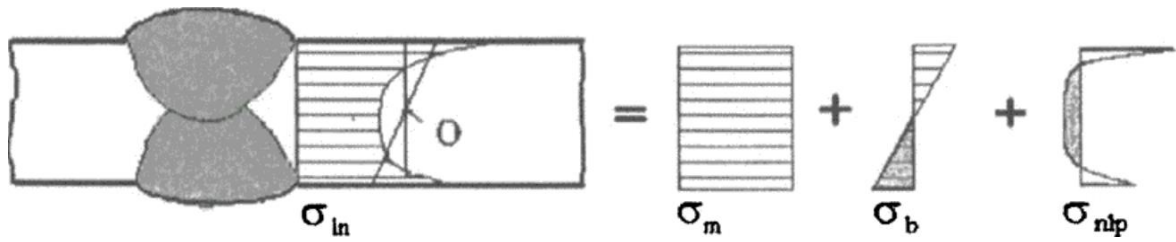
Yhtälössä 1  $\sigma_{hs}$  on rakenteellinen jännitys,  $\sigma_m$  kalvojännitys ja  $\sigma_b$  taivutusjännitys.

Kokonaisjännitys huomioi, rakenteellisen jännityksen lisäksi, hitsin rajaviivalla loven aiheuttaman jännityspiikin, mikä on jakautunut paksuuden yli epälineaarisesti. Kokonaisjännitys on kuvattu seuraavassa yhtälössä.

$$\sigma_{ln} = \sigma_m + \sigma_b + \sigma_{nlp} \quad (2)$$

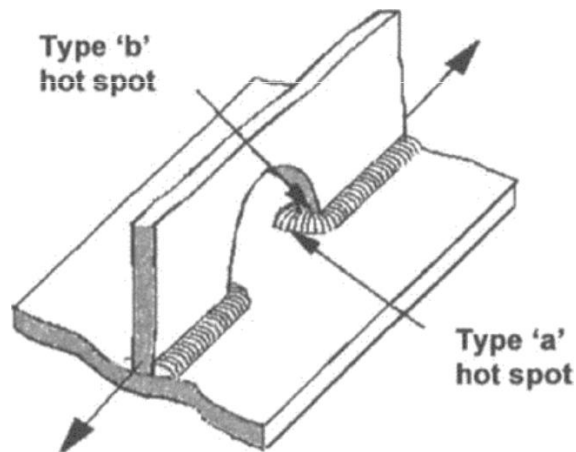
Yhtälössä 2  $\sigma_{ln}$  on kokonaisjännitys,  $\sigma_m$  kalvojännitys,  $\sigma_b$  taivutusjännitys ja  $\sigma_{nlp}$  loven aiheuttama epälineaarinen jännityspiikki loven kohdalla. Kokonaisjännityksen komponentit ovat havainnollistettu kuvassa 1. (Niemi et al. 2006, 4–7).





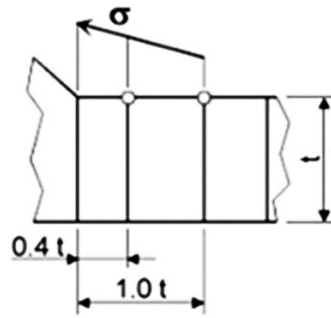
**Kuva 1.** Kokonaisjännitysjaakauma ja jakauman komponentit eroteltuna a-tyypin hot spot -jännityksessä (Mukaillen: Niemi et al. 2006, s.7).

HS-jännitys jaetaan a- ja b-tyypin jännitykseen riippuen tarkasteltavasta kohdasta. a-tyypin jännitys esiintyy, kun hitsi on levyn pinnalla ja b-tyyppi kun hitsi on levyn reunassa kuvan 2 mukaisesti. Tässä työssä tarkasteltavassa T-liitoksesta tarkastellaan a-tyypin HS-jännityksiä.



**Kuva 2.** a- ja b-tyypin hot spot -jännitysten sijainti kannatinpalkissa (Niemi et al. 2006, 5).

Jännityskomponentit voidaan johtaa FE-malleista saaduista kokonaisjännitysarvoista laskeallisesti. Seuraavaksi esitellään kaksi tapaa selvittää rakenteellinen jännitys. Ensimmäinen tapa on lukea jännitysarvot levyn pinnalta 0,4:n ja 1,0:n levypaksuuden etäisyyden päästä hitsin reunasta ja ekstrapoloimalla lineaarisesti pintaa pitkin hitsin rajaviivalle kuvan 3 mukaisesti.



**Kuva 3.** Lineaarisen ekstrapoloinnin jännitysarvojen luentakohdat (Hobbacher 2017, s. 805).

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

Rakenteellinen jännitys saadaan käyttämällä yhtälöä 3, missä  $\sigma_{hs}$  on ekstrapoloitu hot spot -jännitys,  $\sigma_{0,4t}$  on FE-mallin pinnalta luettu jännitysarvo 0,4 levypaksuuden etäisyydeltä hitsin rajalta ja  $\sigma_{1,0t}$  on jännitysarvo yhden levypaksuuden etäisyydeltä hitsin rajalta. (Hobbacher 2017, s. 805) Menetelmää voidaan käyttää myös venymäliuskojen avulla, jolloin yllä mainituilta etäisyyksiltä mitataan venymät, joista johdetaan jännitykset materiaalin kimmokerrotoimella.

Toinen tapa on käyttää IIW:n ohjeessa (Hobbacher 2017, s.807) esiteltyjä integroimisyhtälöitä. Tässä menetelmässä FE-mallista luetaan kokonaisjännitysarvot hitsin rajaviivalta paksuuden yli, joista yhtälöillä 4, 5 ja 6 lasketaan kalvo-, taivutus- ja huippujännitykset.

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx \quad (4)$$

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \cdot \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx \quad (5)$$

$$\sigma_{nlp}(x) = \sigma(x) - \sigma_m - \left(1 - \frac{2x}{t}\right) \cdot \sigma_b \quad (6)$$

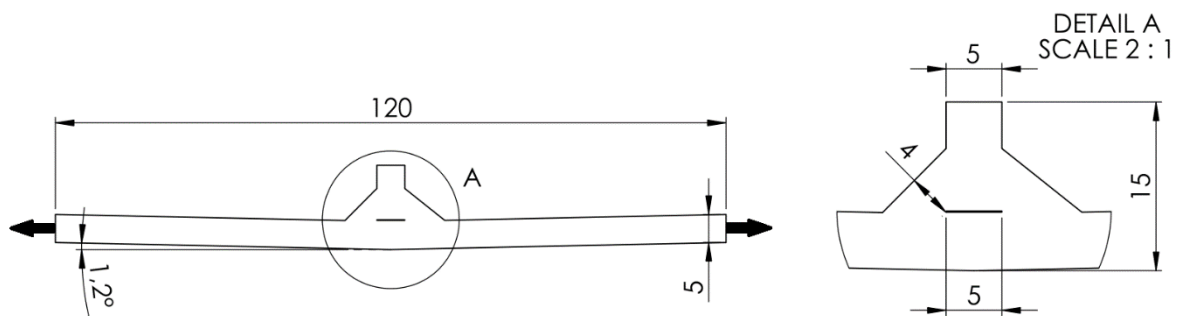
Yhtälöissä  $t$  on levyn paksuus,  $x$  on syvyyskoordinaatti ja  $\sigma(x)$  on FE-mallista luettu kokonaisjännitys jakauma syvyyden funktiona. Menetelmän etuna on mahdollisuus erotella kalvo- ja taivutusjännitykset toisistaan. Tässä työssä rakenteellinen jännitys on laskettu integroimiskaavoilla.

## 2.2 FE-mallit

Kulmavirheinen hitsattu T-liitos mallinnetaan Siemens Simcenter Femap 2021.2 MP1 -ohjelmalla, opiskelijalisenssillä. Malliin lisätään reunaehdot ja voimat, minkä jälkeen Femap-ohjelman NX Nastran -ratkaisija laskee kokonaisjännitykset solmuille. Kokonaisjännityksistä johdetaan rakenteelliset jännitykset luvun 2.1 mukaisesti, minkä jälkeen lukuarvoja verrataan keskenään.

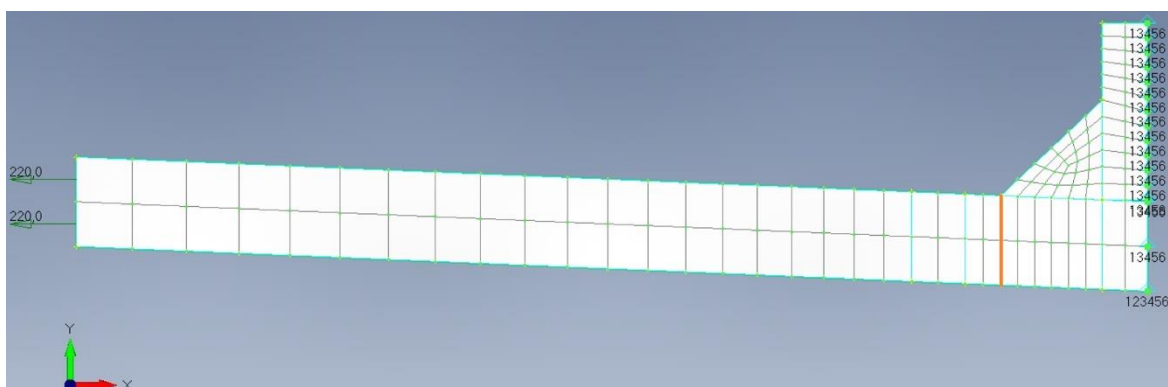
### 2.2.1 Mallintaminen

Tutkitussa T-liitoksessa kaksi viiden millimetrin paksuista teräslevyä ovat yhdistetty kahdella, a-mitaltaan neljän millimetrin pienahitsillä. Malliin mitoitetaan hitsausprosessista johtuva kulmavirhe  $\alpha = 1,2$  astetta, mikä vastaa hitsausstandardin (SFS-EN ISO 13920 1996, s.6) D-toleranssiluokkaa. Mallin mitat on esitetty kuvassa 4.



**Kuva 4.** Tutkitun hitsatun T-liitoksen mitat.

Liitoksen symmetria mahdollistaa, että liitoksesta mallinnetaan vain puolet. Kuvassa 5 on esitetty vasemmassa reunassa vetojännitys 220 MPa ja oikeassa reunassa symmetriareunaehdot. Oikeassa alareunassa on reunaehto 123456, mikä ei mahdollista liikettä tai kiertymistä xyz-avaruudessa. Muiden symmetriatason solmujen reunaehdonumerot 13456 mahdollistavat solmujen liikkeen kuormituksessa vain y-akselia pitkin, mikä mahdollistaa Poissonin teorian mukaisen muodon muutoksen mallissa.



**Kuva 5.** Mallin reunaehdot ja verkotus kahdella korkealla elementillä paksuuden yli. Kokonaisjännitykset luetaan oranssilla merkityn luentaviivan solmuilta hitsin rajaviivalta paksuuden yli.

### 2.2.2 Verkottaminen

Malli verkotetaan korkeilla, neliömäisillä ja matalilla elementeillä, joiden sivusuhteet ovat 1:3, 1:1 ja 3:1. Elementtityyppinä käytetään tasovenymäelementtiä, jonka materiaaliominaisuuksiksi asetetaan teräkselle tyypilliset kimmomoduuli ja Poissonin luku,  $E = 210\,000\text{ MPa}$  ja  $\nu = 0,3$ . Verkotusvariaatioita mallinnetaan yhteensä 15 kappaletta, joiden luentaviivan (kuva 5) viereisten elementtien mitat ovat esitetty taulukossa 1.

*Taulukko 1. Elementtien koko eri verkotusvariaatioissa millimetreinä hitsin rajalla paksuuden yli.*

Elementin sivujen suhde →		1:3	1:1	3:1
↓ Elementtimäärä paksuuden yli		korkea	neliö	matala
2	korkeus	2,50	2,50	2,50
	leveys	0,83	2,50	7,50
4	korkeus	1,25	1,25	1,25
	leveys	0,42	1,25	3,75
6	korkeus	0,83	0,83	0,83
	leveys	0,28	0,83	2,50
8	korkeus	0,63	0,63	0,63
	leveys	0,21	0,63	1,88
10	korkeus	0,50	0,50	0,50
	leveys	0,17	0,50	1,50

Hitsin kohdalla, levyn paksuuden yli, elementtien mitat vastaavat taulukon arvoja. Kauempana hitsin rajaviivalta, elementtien koko ja muoto muuttuvat annetuista arvoista, jotta

elementit mahtuisivat mallinnettuun kappaleeseen ja jotta elementtiverkko jatkuisi levystä hitsiin ja toiseen levyyn.

### 2.2.3 Jännitysten lukeminen ja rakenteellisen jännityksen laskeminen

FE-mallissa jännitykset lasketaan elementtien integroimispisteille, mistä ne siirretään elementtien solmuille. Tässä työssä siirtotavaksi on valittu maksimijännitysten siirto keskiarvojännitysten siirron sijaan. Saaduista kokonaisjännitysten arvoista lasketaan kalvo-, taivutus- ja HS-jännitysosuudet jokaiselle 15 verkotusmallille kaavoilla 1, 4 ja 5. Saatuja arvoja verrataan tiheimpään neliömäisellä verkolla saatuihin arvoihin. Tässä työssä laskentatarkkuuden ei katsota paranevan, kun lasketut jännitysarvot jäävät alle yhden prosentin etäisyydelle tarkasta arvosta.

### 3 Tulokset

Tässä luvussa esitetään FE-mallista luetut kokonaisjännitysarvot, joista johdetaan kalvo-, taivutus- ja HS-jännitykset jokaiselle elementtiverkkovariaatiolle. Saatuja arvoja verrataan keskenään elementtien tiheyden suhteen ja elementtien muodon suhteen.

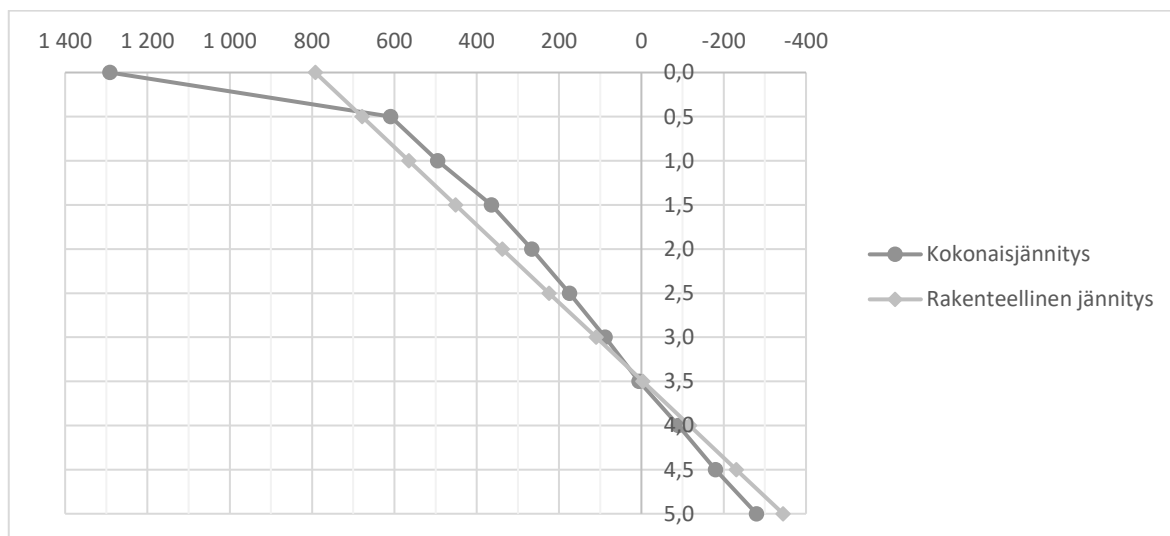
Femap-ohjelmalla luoduista verkotusmalleista luetaan kokonaisjännitykset solmuilta hitsin rajaviivan kohdalta paksuuden yli luvussa 2 esitettyjen metodien mukaisesti. Nämä jännitysjaumat ovat esitetty liitteen I kuvassa ja liitteen II taulukoissa. Kokonaisjännitysjaumat siirretään MathCAD-ohjelmaan, missä jokaiselle 15 verkotusvariaatiolle lasketaan kalvo-, taivutus- ja hot spot -jännitysten arvot. Lasketut jännitykset on esitetty taulukossa 2.

*Taulukko 2. Lasketut jännitysosuuksien arvot tutkituille verkkovariaatioille [MPa].*

Elementin sivujen suhde →		1:3	1:1	3:1
↓ Elementtimäärä paksuuden yli		korkea	neliö	matala
2	kalvo	238,59	234,04	224,95
	taivutus	557,33	554,02	532,86
	hotspot	795,92	788,06	757,81
4	kalvo	226,25	223,45	222,87
	taivutus	570,39	565,16	559,57
	hotspot	796,64	788,61	782,44
6	kalvo	227,96	224,79	223,98
	taivutus	574,34	566,35	555,86
	hotspot	802,30	791,14	779,84
8	kalvo	227,33	223,54	222,84
	taivutus	578,85	568,74	563,92
	hotspot	806,18	792,28	786,76
10	kalvo	226,37	223,97	223,75
	taivutus	579,18	568,43	561,44
	hotspot	805,55	792,40	785,19

Tiheimmästä neliöllisestä mallista lasketaan kalvojännitykseksi 223,97 MPa, taivutusjännitykseksi 568,43 MPa, ja rakenteellisen jännityksen osuudeksi 792,40 MPa. Muilla verkotusvariaatiolla saatuja arvoja verrataan näihin arvoihin seuraavissa kappaleissa. FE-mallista

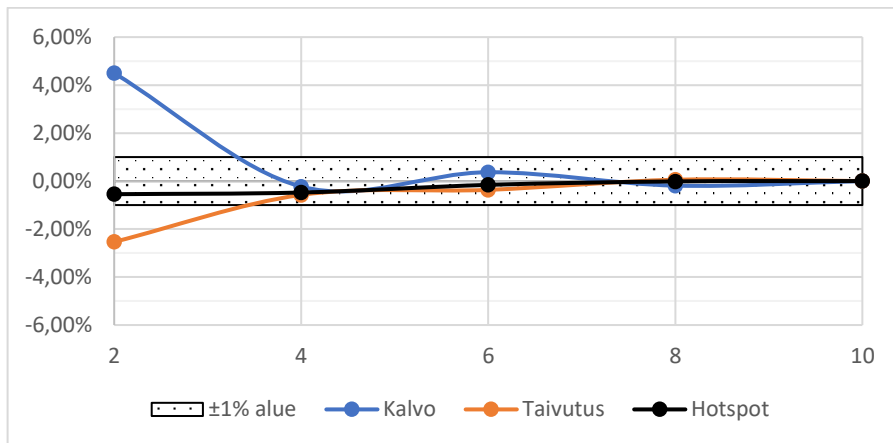
laskettu kokonaisjännitysjaakauma ja rakenteellisen jännityksen jakauma on esitetty kuvassa 6. Kuvan jännitys- ja syvyyspinnalta-akselien suunnat valittiin vastaamaan kuvan 5 asentoa.



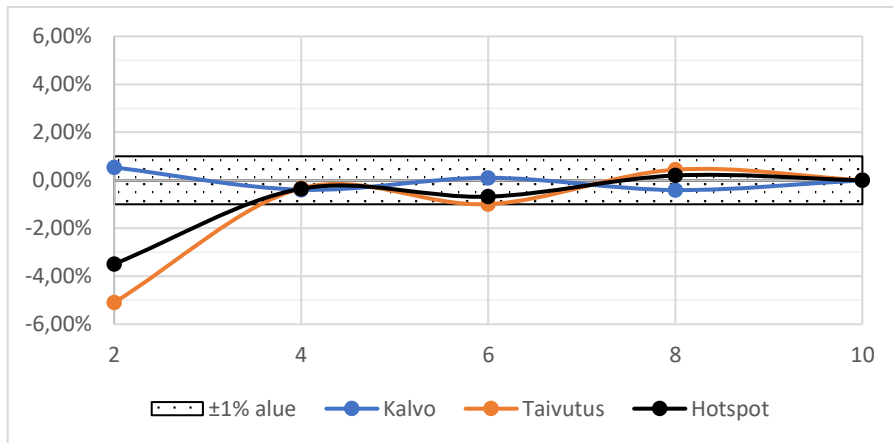
**Kuva 6.** Kokonaisjännitys ja rakenteellinen jännitys 10 neliöllisen elementin mallista laskettuna.

### 3.1 Elementtiverkon tiheyden vaikutus

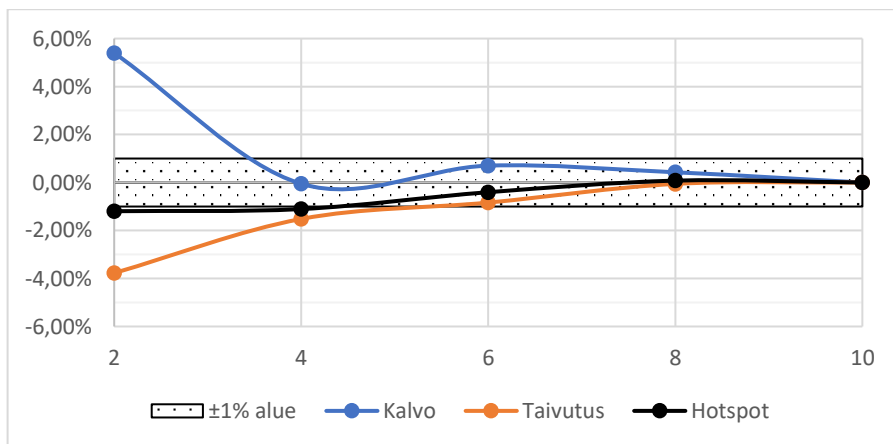
Seuraavassa verrataan saatuja jännitysarvoja kunkin elementtimuodon sisällä. Kuvassa 7 on esitetty sivusuhteeltaan 1:1 elementtimallien jännitysarvojen vertailu. Elementtimäärillä 2, 4, 6 ja 8 saatuja jännitysarvoja verrataan 10 elementin malliin. Prosentuaalinen ero on pystyakselilla ja elementtimäärä vaaka-akselilla. Havaitaan, että neljällä elementillä paksuuden yli saavutetaan aiemmin kuvattu merkittävä tarkkuus. Kuvissa 8 ja 9 on esitetty sivusuhteeltaan matalilla (3:1) ja korkeilla (1:3) elementeillä lasketut arvot. Matalilla elementeillä lasketut tulokset noudattelevat neliömäisten elementtien tuloksia ja neljä elementtiä paksuuden yli riittää sovittuun tarkkuuteen. Korkeilla elementeillä tarvitaan kuusi elementtiä.



**Kuva 7.** Elementtiäitiheyden vaikutus laskentatarkkuuteen. Jännitysarvot verrattuna kymmenen 1:1 elementin malliin.



**Kuva 8.** Elementtiäitiheyden vaikutus laskentatarkkuuteen. Jännitysarvot verrattuna kymmenen 3:1 elementin malliin.

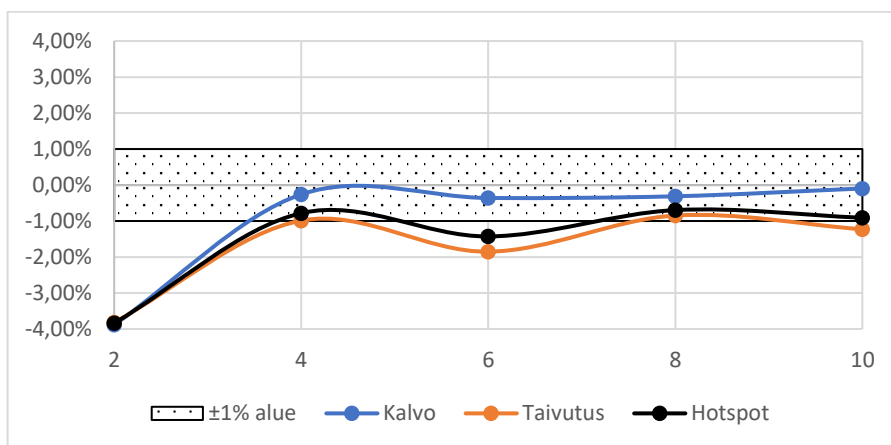


**Kuva 9.** Elementtiäitiheyden vaikutus laskentatarkkuuteen. Jännitysarvot verrattuna kymmenen 1:3 elementin malliin.

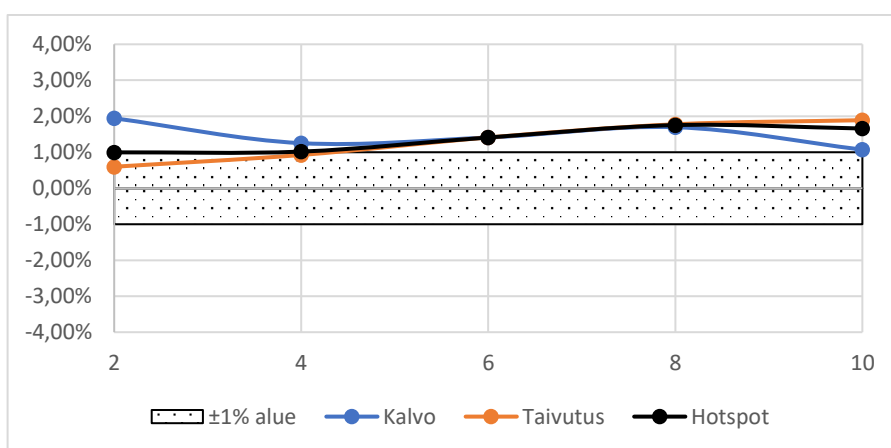


### 3.2 Elementtiverkon sivusuhteen vaikutus

Elementtien sivusuhteen vaikutusta arvioidaan vertailemalla jokaisella elementtitiheydellä laskettuja arvoja matalien, neliömäisten ja korkeiden elementtien kesken. Kuvassa 10 on esitetty, paljonko matalilla elementeillä lasketut kalvo-, taivutus- ja HS-jännitykset eroavat neliönmallisilla elementeillä lasketuista jännitysarvoista. Jokainen matalilla elementeillä laskettu jännitysarvo on pienempi kuin neliömäisillä elementeillä laskettu jännitysarvo. Korkeilla elementeillä lasketut arvot ovat puolestaan suurempia kuin neliönmuotoisilla elementeillä lasketut arvot, mikä havaitaan kuvasta 11.



**Kuva 10.** Matalien elementtien vaikutus laskettuihin jännitysarvoihin verrattuna neliöllisten elementtien malliin.



**Kuva 11.** Korkeiden elementtien vaikutus laskettuihin jännitysarvoihin verrattuna neliöllisten elementtien malliin.

## 4 Tulosten analysointi

Luvussa käsitellään työn toteutusta ja toistettavuutta sekä esitetään tärkeimmät tulokset. Viimeisenä otetaan kantaa työnyleistettävyyteen ja ehdotetaan jatkotutkimusaiheita.

### 4.1 Reliabiliteetti- ja validiteettitarkastelut

Valittu FE-malli on kuvitteellinen, mutta mahdollinen esimerkkitapaus, sillä työssä tarkasteltu hitsattu kulmavirheinen T-liitos mallinnettiin soveltaen hitsausstandardissa (SFS-EN ISO 13920 1996, s.6) toleranssiluokan D määäämiä kulmavirheen toleranssialueita käyttäen. Lisäksi rakenteellisen jännityksen jakauma laskettiin paksuuden yli linearisoimalla hitsin juuresta IIW:n julkaiseman suunnittelijan ohjeen mukaan (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 20–21).

### 4.2 Tärkeimmät tulokset

Elementtien määrän lisäämisellä paksuuden yli parannettiin laskentatarkkuutta. Tarkastellulle liitostyypille, riittäväksi elementtitiheydeksi laskettiin neljä neliönmuotoista elementtiä paksuuden yli. Kahden elementin mallit tuottivat laskennassa suurimmat erot tiheimpään verkotukseen nähden: 6,3 % pienempi taivutusjännitys ja 6,5 % suurempi kalvojännitys. Lisäksi todettiin, että elementtien muodolla on vaikutus laskettuun rakenteelliseen jännitykseen: Matalien elementtien malli johti pienempiin jännitysarvoihin ja korkeiden elementtien malli suurempiin jännitysarvoihin kuin neliöllisten elementtien malli.

### 4.3 Jatkotutkimusaiheet

Tulosten yleistettävyyttä muihin liitostyyppeihin, tarvitaan lisätutkimusta erilaisista liitoksista, kuten X- ja päittäisliitoksista. Lisäksi tutkitun t-liitoksen mitta-arvoja voitaisiin muuttaa. Muutettavia mittoja voisivat olla levyjen paksuudet, kulmavirhe ja hitsin a-mitta. Kokonaisjännityksiä FE-mallista luettaessa esille nousi myös kysymys, vaikuttaako elementtien jännitysten siirtotapa, maksimi- vai keskiarvojännitykset, laskentatarkkuuteen.

## 5 Yhteenveto

Työn tarkoitus oli selvittää lukuarvo riittävälle elementtimäärälle rakenteellisen jännityksen laskentaan paksuuden yli linearisointi -menetelmää käytettäessä. Lisäksi tutkittiin, miten elementtien sivusuhteet vaikuttavat laskennan lopputuloksiin.

Elementtitiheyden kasvattaminen lisäsi laskentatarkkuutta matalilla, neliömäisillä ja korkeilla elementeillä laskettaessa. Todettiin, että neljä, sivusuhteeltaan 1:1, elementtiä paksuuden yli mahdollisti riittävän tarkan rakenteellisen jännityksen laskentatarkkuuden tarkastelussa liitostapauksessa. Lisäksi elementtien sivujen suhde osoittautui tärkeäksi: Pienimmät jännitysarvojen vaihtelut laskettiin neliömäisillä elementeillä. Matalilla elementeillä laskenta johti pienempiin rakenteellisen jännityksen arvoihin ja korkeilla elementeillä laskenta suurempiin rakenteellisen jännityksen arvoihin kuin neliönmuotoisilla elementeillä laskenta. Ero havaittiin jokaisella elementtitiheydellä. Tärkeää onkin käyttää sivusuhteeltaan mahdollisimman neliömäisiä elementtejä.

## Lähteet

Hobbacher, A. F. 2017. Comparison of fatigue verification procedures at a thick-walled welded component. IIW dokumentti. DOI 10.1007/s40194-017-0457-6. Weld World 61: S.801-818

Stephens, R. I., Fatemi A., Stephens R. R. & Fuchs H. O. 2001. Metal Fatigue in Engineering. 2nd Edition. New York: John Wiley & Sons. 455 s.

Niemi, E., Fricke, W. & Maddox, S. 2006. Fatigue Analysis of Welded Components - Designer's Guide to the Structural Hot-Spot Stress Approach. IIW-1430-00. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 49 s.

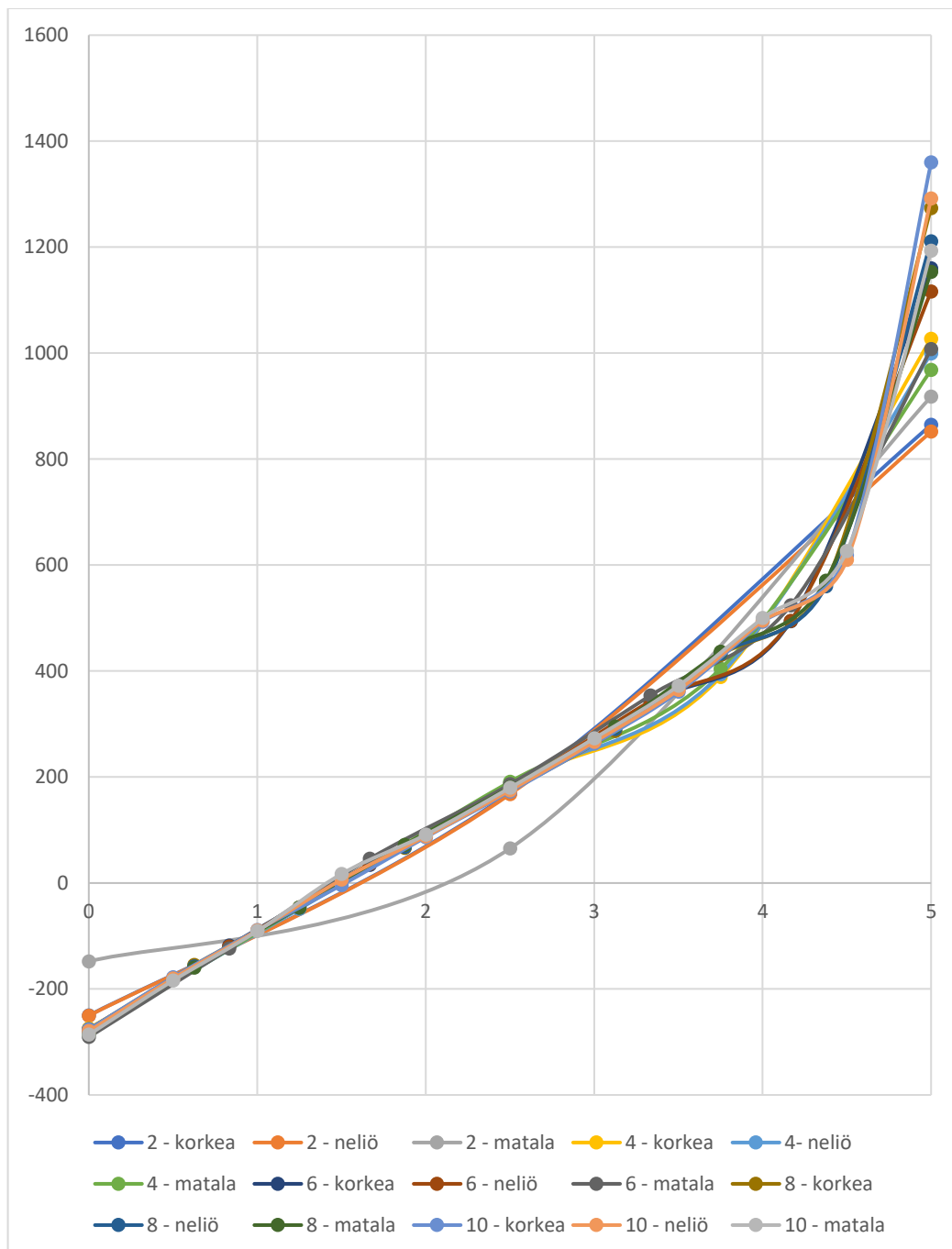
Niemi, E., Kilkki, J., Poutiainen, I. & Lihavainen, V-M. 2004. Väsymättömän hitsausliitoksen suunnittelu. LTY Digipaino 2004. 121 s.

Niemi, E., Maddox S. J. & Fricke W. 2018. Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components. Designer's Guide. 2nd edition. 2018. Singapore: Springer Singapore. 76 s.

SFS-EN 1993-1-9. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 43 s.

SFS-EN ISO 13920. 1996. Hitsaus. Hitsattuja rakenteita koskevat yleistoleranssit. Pituus- ja kulmamitat. Muoto ja sijainti. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 11 s.

Kokonaisjännitysjaakauma paksuuden yli jokaiselle verkotusvariaatiolle



Kokonaisjännitys jakauman arvot paksuuden yli jokaiselle verkotusvariaatiolle

2 elementtiä paksuuden yli			
Y-koordinaatti	korkea	neliö	matala
5,00	864,61	851,50	917,50
2,50	169,88	167,60	65,236
0,00	-250,04	-250,55	-148,21

8 elementtiä paksuuden yli			
Y-koordinaatti	korkea	neliö	matala
5,00	1273,4	1210,7	1153,3
4,38	564,84	559,92	570,27
3,75	430,11	432,42	436,47
3,13	286,54	290,29	295,04
2,50	173,93	176,96	180,72
1,88	66,159	67,570	71,905
1,25	-46,500	-46,677	-46,261
0,63	-155,11	-157,47	-159,69
0,00	-276,11	-280,20	-284,85

4 elementtiä paksuuden yli			
Y-koordinaatti	korkea	neliö	matala
5,00	1026,7	999,02	967,87
3,75	388,82	393,56	404,21
2,50	187,94	188,89	190,92
1,25	-47,904	-48,920	-46,868
0,00	-274,45	-278,49	-281,44

10 elementtiä paksuuden yli			
Y-koordinaatti	korkea	neliö	matala
5,00	1359,5	1291,4	1192,9
4,50	618,31	609,57	626,04
4,00	492,73	494,78	500,04
3,50	360,64	364,31	372,17
3,00	262,69	266,32	273,02
2,50	172,43	174,74	179,73
2,00	86,358	87,983	91,196
1,50	-3,9955	6,1922	17,060
1,00	-89,000	-89,749	-90,797
0,50	-178,03	-180,28	-184,21
0,00	-276,34	-279,82	-286,39

6 elementtiä paksuuden yli			
Y-koordinaatti	korkea	neliö	matala
5,00	1159,7	1116,0	1007,6
4,17	493,85	494,36	523,86
3,33	341,23	343,23	353,81
2,50	175,05	177,59	186,26
1,67	34,230	35,943	45,606
0,83	-118,33	-120,22	-124,06
0,00	-276,26	-280,26	-290,74