

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

GLIBAALIEN JA LOKAALIEN REUNAEHTOJEN VAIKUTUS PIENAHITSIN  
JUUREN VÄSYMISLUJUUTEEN

EFFECTS OF GLOBAL AND LOCAL BOUNDARY CONDITIONS ON WELD ROOT  
FATIGUE STRENGTH OF FILLET WELDS

Lappeenrannassa 22.8.2021

Joonas Pyörret

Tarkastaja TkT Antti Ahola

Ohjaaja TkT Antti Ahola

## **TIIVISTELMÄ**

LUT-yliopisto  
LUT Energiajärjestelmät  
LUT Kone

Joonas Pyörret

### **GLOBAALIEN JA LOKAALIEN REUNAEHTOJEN VAIKUTUS PIENAHITSIN JUUREN VÄSYMISLUJUUTEEN**

Kandidaatintyö

2021

20 sivua, 13 kuvaa, 1 taulukko ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Ohjaaja: TkT Antti Ahola

Hakusanat: hitsiliitos, väsyminen, pienahitsi, tehollinen lovijännitys, liitosgeometria

T-pienahitsiliitoksen kestoikä määritetään nykyisten ohjeiden mukaisesti X-liitoksena. Kandidaatin tutkielman tavoitteena on vertailla symmetristen X- ja T-pienaliitoshitsien juuren väsymiskestävyyttä ja eri liitosgeometrioiden vaikutuksia kestoikään. Tarkastelu tehdään käyttäen tehollisen lovijännityksen menetelmää ja FE-analyysiä.

T-liitosten kestoikään havaittiin olevan X-liitoksia huomattavasti pienempi. Levyn paksuuden kasvaessa kestoikään erot liitosten välillä kuitenkin pienenevät. Lisäksi T-liitoksen reunaehdon etäisyydellä ei havaittu olevan vaikutusta liitoksen kestoikään.

Tulosten valossa T-liitosten mitoittaminen X-liitoksina johtaa liitoksen kestoikään selkeään yliarviointiin. Aihetta olisi kuitenkin tarpeen tutkia lisää laajemmalla muuttujien vaihtelulla, sillä tutkimuksessa käytetyt muuttujien variaatiot olivat suppeita.

## **ABSTRACT**

LUT University  
LUT School of Energy Systems  
LUT Mechanical Engineering

Joonas Pyörret

### **EFFECTS OF GLOBAL AND LOCAL BOUNDARY CONDITIONS ON WELD ROOT FATIGUE STRENGTH OF FILLET WELDS**

Bachelor's thesis

2021

20 pages, 13 figures, 1 table and 2 appendices

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

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

Keywords: welded joint, fatigue, fillet weld, effective notch stress, joint geometry

Currently fatigue life of a T-joint weld root is calculated as X-joint. The goal of this thesis is to compare fatigue life and effects of different joint geometries between symmetrical T- and X-joints. The research is done using effective notch stress method and finite element method.

According to analysis, fatigue life of T-joint was noticeably less than X-joint. However difference in fatigue life between two different types of joints seemed to close with higher plate thicknesses. In addition boundary conditions distance from T-joint did not affect fatigue life.

According to result, current methods of fatigue life calculation leads to overconservative estimation of T-joint fatigue life. However analysis were done using quite limited set of variables and further analysis should be done using wider scope of variables.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLILUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO.....</b>	<b>6</b>
	1.1 Tutkimuksen tausta .....	6
	1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset .....	6
	1.3 Tutkimuksen rajaukset .....	6
<b>2</b>	<b>TEORIA.....</b>	<b>8</b>
	2.1 Hitsien väsyminen.....	8
	2.2 Hitsien väsymismitoitusmenetelmät .....	8
	2.2.1 Nimellisen jännityksen menetelmä .....	8
	2.2.2 Tehollisen lovijännityksen menetelmä .....	8
	2.3 FE-analyysi .....	9
<b>3</b>	<b>TUTKIMUSMENETELMÄT .....</b>	<b>10</b>
	3.1 Geometria.....	10
	3.2 FE-analyysi .....	11
<b>4</b>	<b>TULOKSET .....</b>	<b>15</b>
	4.1 X-liitokset .....	15
	4.2 T-liitokset.....	15
	4.3 X- ja T-liitosten vertailu .....	17
<b>5</b>	<b>TULOSTEN ANALYSOINTI .....</b>	<b>19</b>
<b>6</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET.....</b>	<b>20</b>
	<b>LÄHTEET .....</b>	<b>21</b>
	<b>LIITTEET</b>	

LIITE I: X-liitoksen FE-analyysien tulokset

LIITE II: T-liitoksien FE-analyysien tulokset.

**SYMBOLILUETTELO**

$a$	Hitsin a-mitta [mm]
$FAT$	Väsymislukka [MPa]
$L$	Reunaehdon etäisyys [mm]
$t_0$	Levynpaksuus [mm]
$t_1$	Kuormakantavan levynpaksuus [mm]
$w$	Hitsin juuripinnan leveys [mm]
$\Delta\sigma$	Jännityskuormavaihtelu [MPa]

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Tutkimuksen tausta

T-pienahitsiliitosten väsymiskestävyys voidaan arvioida käyttäen X-liitoksen väsymismitoituksen ohjeita, kuten Eurokoodi 3:n mukaista FAT-väsymisluokkaa. X- ja T-liitoksien reunaehto- j johdosta kuormitus hitseissä jakautuu eri tavalla. Tätä kuormituksen erilaista jakautumista T-liitoksissa ei ole otettu huomioon, kun X-liitoksen FAT-luokassa. Tämän työn tavoite on selvittää miten eri geometriamittasuhteet ja reunaehdot vaikuttavat T-pienahitsiliitoksen jännityskonsentraation suuruuteen ja paikkaan verrattuna X-liitokseen tilanteissa, joissa murtuminen tapahtuu hitsin juuresta alkavan särön johdosta.

## 1.2 Tutkimusongelma ja kysymykset

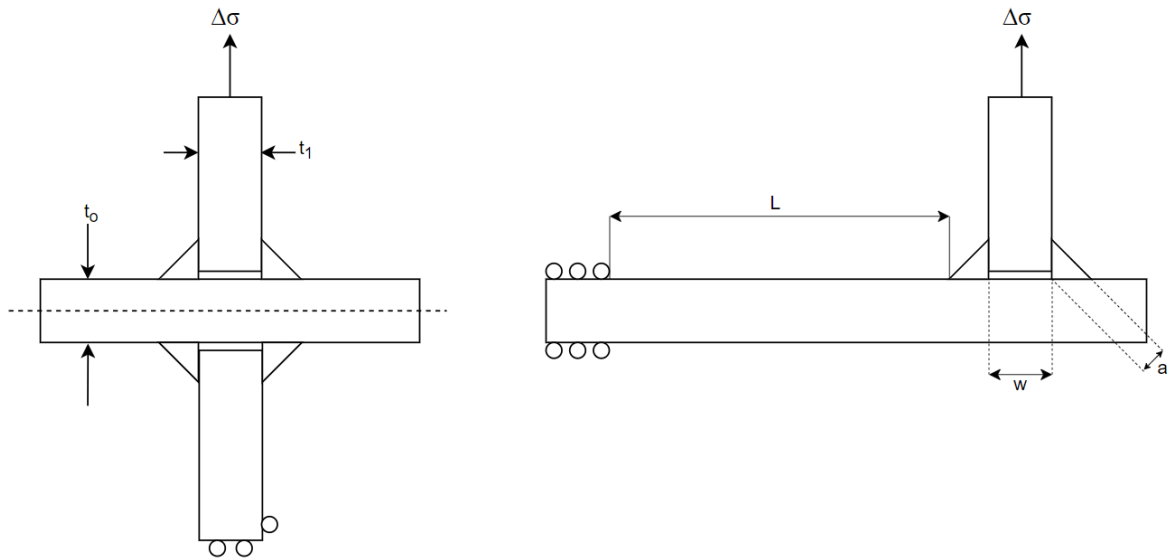
T-pienaliitoshitsien väsymiskestävyys laskentaan ei ole olemassa standardin mukaista FAT-luokkaa. T-pienahitsiliitosten väsymiskestävyys voidaan määrittää käyttäen X-liitoksen Eurocode 3:n mukaista FAT-luokkaa. Toisin kuin X-liitoksissa, T-liitoksissa hitsiin kohdistuu myös reunaehdoista syntyvä taivutusmomentti, jonka vaikutusta väsymiskestävyyteen ei ole otettu huomioon X-liitoksen FAT-luokassa.

- Miten reunaehdot ja globaalit muuttujat vaikuttavat T- ja X-pienahitsiliitosten juuren väsymislujuuteen?
- Miten geometriamittasuhteet vaikuttavat T- ja X-pienahitsiliitosten juuren väsymislujuuteen?
- Miten tehollisen lovijännitysmenetelmän ja analyttisen laskennan tulokset poikkeavat toisistaan?

## 1.3 Tutkimuksen rajaukset

Tutkimuksessa tarkastellaan laskennallisesti kahta symmetristä pienahitsiliitosta. Tarkasteltavat hitsit ovat X- ja T-liitos, jotka on esitetty kuvassa 1. Levyn paksuus on rajattu 5mm:n ja 20mm:n välille. Reunaehdon etäisyyttä (L) ei ole rajoitettu. Työssä käsitellään vain yksipalkohitsejä ja tarkasteltavat a-mitat valitaan sen mukaisesti. Hitsejä käsitellään kahdella eri juuripinnan leveydellä, ideaalisena hitsinä (tunkeumaa ei tapahdu ja juuripinnan leveys on sama kuin levynpaksuus) sekä tunkeutuneella hitsillä, jonka juuripinnan paksuus

on 5mm. Väsymislujuuutta tutkitaan tehollisen lovijännityksen menetelmällä käyttäen apuna FE-analyysiiä.



**Kuva 1.** Tutkittavat hitsigeometriat.

## 2 TEORIA

### 2.1 Hitsien väsyminen

Hitsin väsyminen on materiaalin murtumista toistuvan myötörajaa pienemmän nimellisen jännityksen toistuvasta vaihtelusta. Hitsatessa rakenteeseen muodostuu särömäisiä virheitä, jotka ovat teoriassa äärettömän teräviä. Särön kärkeen muodostuu paikallisesti nimellistä jännitystä suurempi jännityskonsentraatio, joka on myötölujuutta suurempi ja aiheuttaa särön kasvua. Hitsin kestoikä määritetään S-N käyrien avulla. S-N käyrät ovat logaritmisella asteikolla, jossa x-akselilla on kuormitus syklien määrä ja y-akselilla jännitys. Väsymistä kuvaavat FAT-luokka kertoo kuinka suurella jännityksellä hitsin kestoiksi voidaan antaa  $2 \cdot 10^6$  kuormitus sykliä. Yleisesti hitsin kestoikä voidaan määrittää:

$$N_f = \left[ \frac{FAT}{\Delta\sigma} \right]^3 * 2 * 10^6 \quad (1)$$

kun kesto ikä  $N_f \leq 5 * 10^6$  sykliä (SFS-EN 1993-1-9, 2005. s.15).

### 2.2 Hitsien väsymismitoitusmenetelmät

#### 2.2.1 Nimellisen jännityksen menetelmä

Hitsin väsymisen keston laskemisessa nimellisen jännityksen menetelmällä otetaan huomioon vain liitokseen kohdistuvat primääriset jännitykset. Nimellisen jännityksen menetelmä ei ota huomioon rakenteellisia jännityskeskittymiä, lovijännitystä, eikä alkuperäistä säröä. Kestoiän laskenta tapahtuu kaavojen 1 ja 2 mukaan käyttäen rakenteen kuormituksen nimellistä arvoa ja standardissa kyseiselle kuormitustilanteelle määriteltyä FAT-luokkaa.

#### 2.2.2 Tehollisen lovijännityksen menetelmä

Tehollinen lovijännitysmenetelmä (ENS) on yleisesti käytetty lineaarielastiseen lovijännitykseen perustuva väsymislaskentamenetelmä. Kestoikä lasketaan samoilla kaavoilla kuin nimellisen laskennan menetelmässä (kaava 1), mutta kuorma  $\Delta\sigma$  määritellään eri tavalla. Fricken (2010. s. 18) mukaan ENS-menetelmää käyttäessä tulee FAT luokkana käyttää 225. ENS ottaa huomioon nimellisen jännityksen lisäksi rakenteellisen ja hitsin lovijännityksen. Kuormituksen matemaattiseen määrittämiseen on kehitetty



korjauskertoimiin perustuva malli, jonka lisäksi jännitys voidaan selvittää FE-analyysin avulla.

### 2.3 FE-analyysi

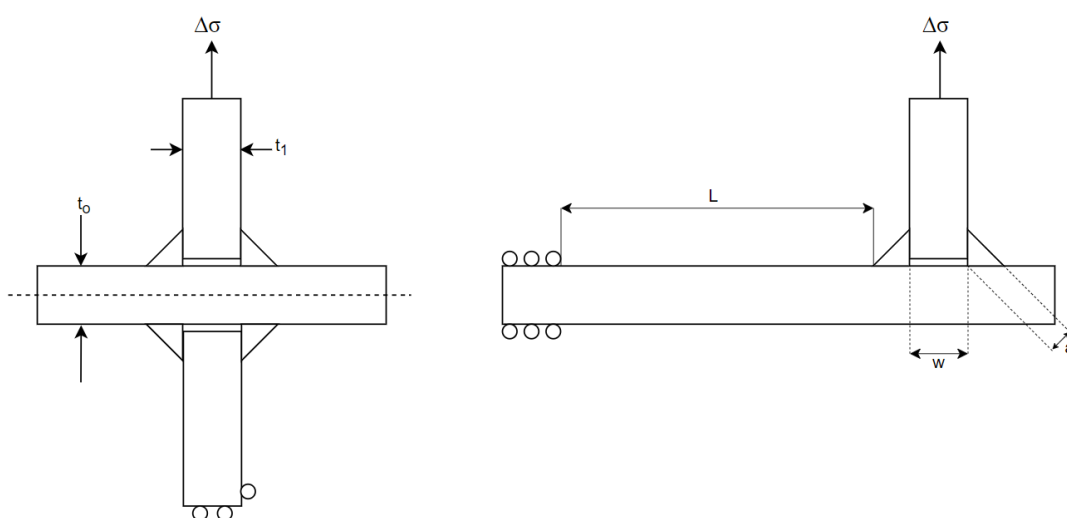
FE-analyysi on numeerinen laskentamalli, jolla pystytään laskemaan jännityskonsentraatio rakenteessa. FE-menetelmässä rakenne jaetaan useisiin pieniin elementteihin, ja elementit on kytketty toisiinsa solmuilla. Koko rakennetta kuvaava yhtälöryhmä kootaan hyödyntäen jokaista elementtiä kuvaavaa muotofunktioita. Ratkaisemalla yhtälöryhmä voidaan laskea solmujen siirtymät. Siirtymistä taas voidaan laskea solmuissa esiintyvät venymät ja jännitykset. (Sonsino et al. 2012) Lovijännitysanalyysin onnistumisen kannalta on kriittisen tärkeää, että elementtien koko on riittävän pieni tarkasteltavalla alueella. Riittävän laskentatarkkuuden saavuttamiseksi suorakaide lineaarivenymäelementtiä käyttäen elementtejä tulisi olla 360 asteen pyöreän reiän ympärillä vähintään 24. (Baumgartner et al. 2013)

FE-analyysiä hyödynnettäessä osana hitsin juuren väsymisen tutkintaa tehdään FE-malliin avaimenreikälovi, jossa alkuperäinen särö korvataan fiktiivisellä pyörityksellä. Avaimenreikälovessa hitsin juureen sijoitetaan referenssiympyrä, jonka halkaisija yli 5mm:n ainepaksuuksilla on 1mm ja eri rakenne-elementtien väliin jätetään 0.1mm:n rako. (Sonsino et al. 2009)

### 3 TUTKIMUSMENETELMÄT

#### 3.1 Geometria

Hitsin a-mitan arvot on valittu alueelta, jotka voidaan hitsata yhdellä palolla. Juuripintaan on valittu kaksi arvoa tunkeuman mukaan. Hitsiä halutaan käsitellä ideaalisena hitsinä sekä realistisempaan tapaukseen, jossa tunkeumaa on tapahtunut. Juuripinnan leveydet on valittu huomioonottaen tämä rajaus. Eri hitsigeometriat ja muuttujat on esitetty kuvassa 2 ja taulukossa 1.



**Kuva 2.** Tutkittavat hitsigeometriat.

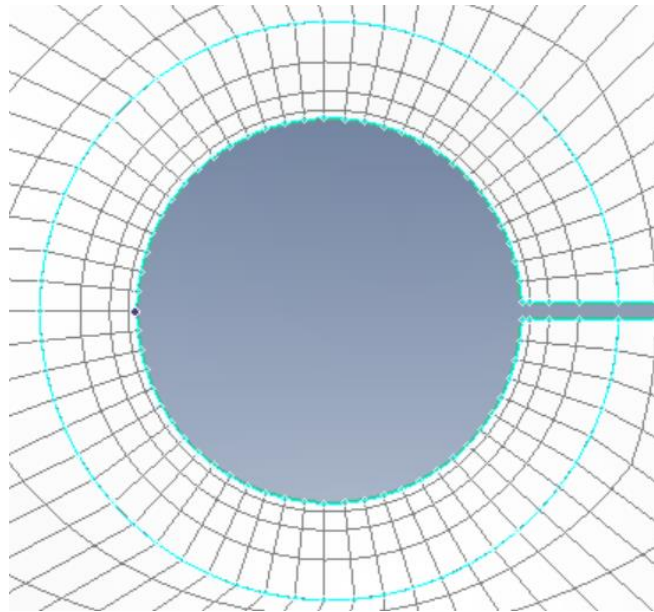
*Taulukko 1. Hitsin liitosgeometrian muuttujat.*

a-mitta	Juuripinnan leveys (w)	Kuormakantavan levynpaksuus (t <sub>1</sub> )	Levynpaksuus (t <sub>0</sub> )	Reunaehdon etäisyys (L)
3mm	5mm	10mm	5mm	0mm
6mm	10mm		10mm	5mm
			15mm	10mm
			20mm	15mm
				20mm
				40mm

### 3.2 FE-analyysi

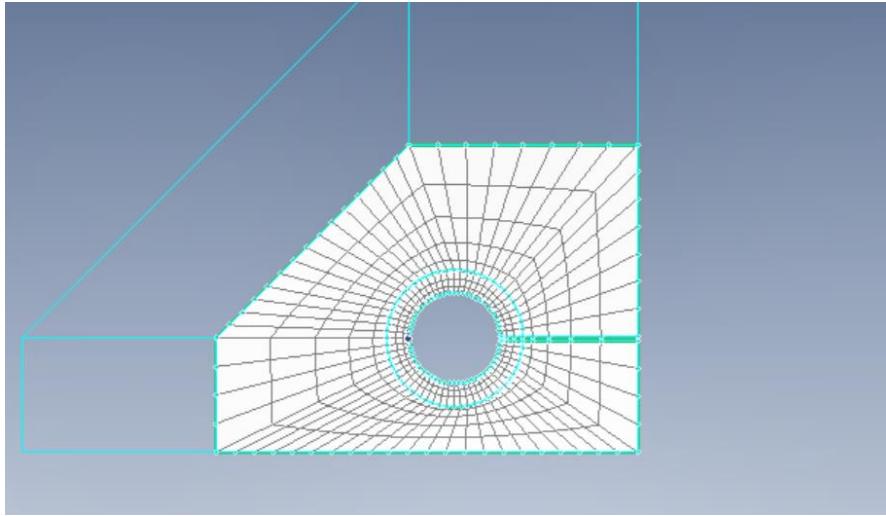
Virheiden välttämiseksi kaikki samalla tunkeuman arvolla tehtyjen FE-analyysien mallit on muodostettu samasta ¼-mallista. Molemmissa tapauksissa elementtien määrä ja koko reiän ympärillä pyritään pitämään yhtenäisinä, jotta tulokset ovat vertailukelpoisia.

Ideaalisen hitsin ¼-mallissa juuressa olevan alkusäröä kuvaavan avaimenreikäloven reuna on jaettu 60 osaan ja elementtien muoto pidetään yhtäläisenä käyttämällä apuympyrää, jonka säde on 1.5 mm lovea suurempi. Symmetrinen verkko on painoitettu siten, että särön reunalla elementit ovat pienimmillään ja kasvavat tasaisesti. Säteen ensimmäisen 0.5 mm:n matkalla on 4 elementtiä ja fiktiivisen pyörityksen sisäkaarella olevien elementtien korkeus on 0.04 mm. (Kuva 3)



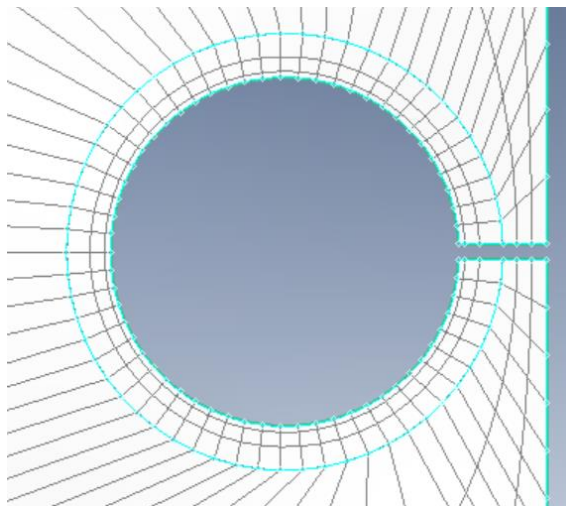
**Kuva 3.** Verkotus ensimmäisen tapauksen hitsin juuressa.

Hitsin rajaviivalle on asetettu 15 elementtiä ja 45 elementtiä on hitsialueen rajaviivojen kesken, kuvan 4 mukaan siten, että elementtiverkosta saadaan mahdollisimman symmetrinen.



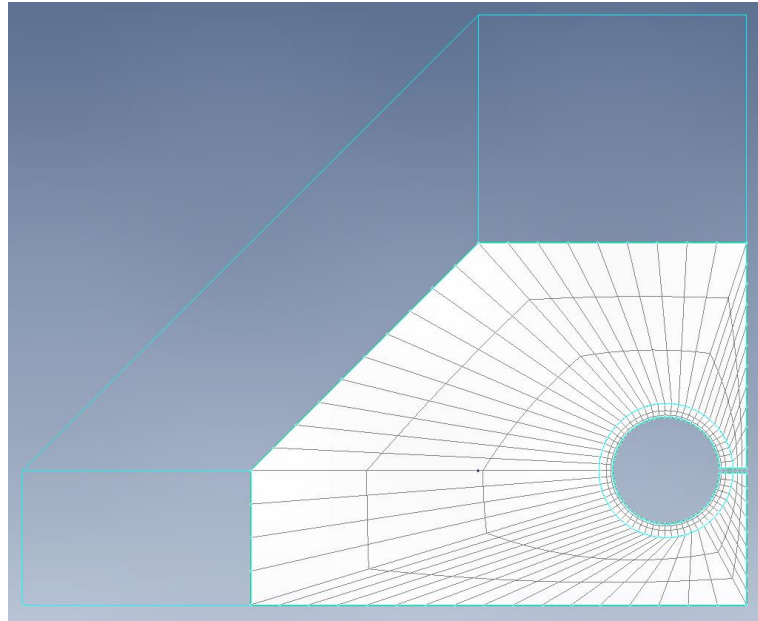
**Kuva 4.** 1. tapauksen verkotus hitsin alueella. Kuvassa 3mm :n a-mitan hitsi verkoitettuna.

Toisella juuripinnan leveyden ( $w=5mm$ ) malleissa apuympyränä ei voitu käyttää lovea 1.5mm isompaa sädettä geometrian rajoitteiden takia. Sen sijaan käytettiin 1.25 mm lovea suurempaa sädettä. Jotta elementit särön reunalla pysyvät samassa kokoluokassa ensimmäisen tapauksen kanssa, ympyrän sisäpuolelle säteen suunnassa jaetaan kolmeen painotettuun elementtiin. Näin särön reunana elementtien korkeudeksi muodostui 0.33 mm. (Kuva 5)



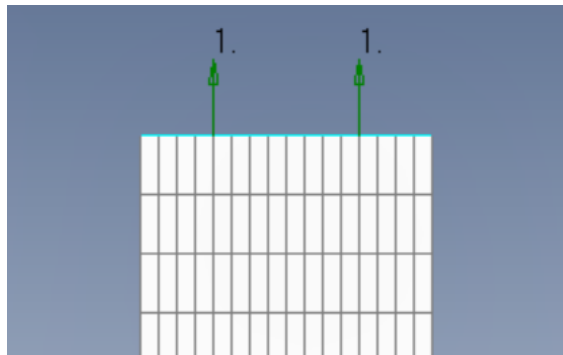
**Kuva 5.** Verkous toisen tapauksen hitsin juuressa, kuva otettu 1/4-mallista.

Elementtien jakoa hitsin geometriaviivojen kesken on jouduttu muokkaamaan ensimmäisestä tapauksesta, jotta elementti verkko on saatu pysymään symmetrisenä. Uusi hitsinalueen verkotus näkyy kuvassa 6.



**Kuva 6.** Verkotus liitosalueella 2.5mm:n tunkeuman tapauksessa.

Kaikissa analyyseissä käytetään 1 N/mm kokoista yksikkövoimaa, joka kohdistetaan rakenteeseen käyttämällä solmuihin kytkettyä viivaa kuvan 7 mukaisesti. Kuorma on sijoitettu noin 10 elementtiä hitsin rajaviivasta ylöspäin, jolla varmistetaan, ettei kuorman vaikutuskohta vääristä jännityksiä hitsin alueella.



**Kuva 7.** Kuroman asetus malliin.

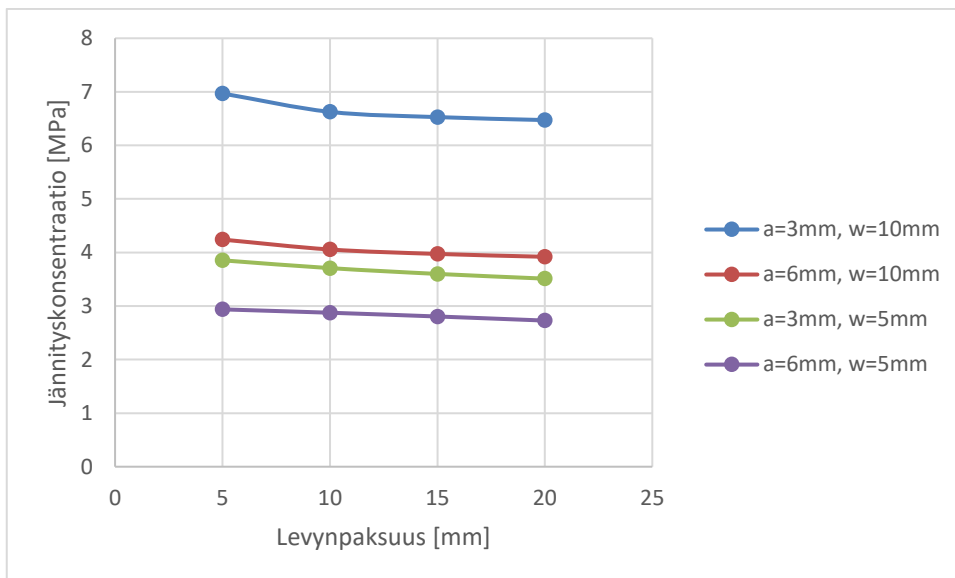
X-liitoksissa alareunan Y-suuntainen siirtymä on lukittu, lisäksi vasemman alakulman X-suuntainen siirtymä on lukittu. Jotta mallista saadaan staattisesti määrätty, rajoitetaan myös muutaman solmun Z-suuntainen siirtymä. T-liitoksissa L-reunaehdon arvo määrittää jäykän tuennan sijainnin.

Materiaalina käytetään terästä, joten analyyseissä kimmomodulliksi on annettu 210 Gpa ja poissonin vakiona arvoa 0.3. Elementtityyppinä käytetään Femap-ohjelmiston sisältämää kaksidimensionaalista tasovenymä-elementtimallia (eng. Plane strain), jonka paksuudeksi annetaan 1 mm. Elementtinä käytetään parabolisia elementtejä, joiden avulla saavutetaan parempi laskennallinen tarkkuus (Baumgartner et al. 2013). Lovijännitykset määritetään käyttämällä pääjännityskriteeriä.

## 4 TULOKSET

### 4.1 X-liitokset

Kaikissa X-liitoksien analyyseissä jännitykset jakoutuivat symmetrisesti molempien hitsien läpi. Lisäksi jännityskonsentraatiot muodostuivat samaan kohtaan levyn paksuudesta riippumatta. Levyn paksuuden kasvaessa jännityskonsentraation suuruus laskee hieman (kuva 8). A-mitan kasvattamisella, sekä juuripinnan leveyden kaventamisella saavutettiin pienempiä jännityskonsentraation arvoja.

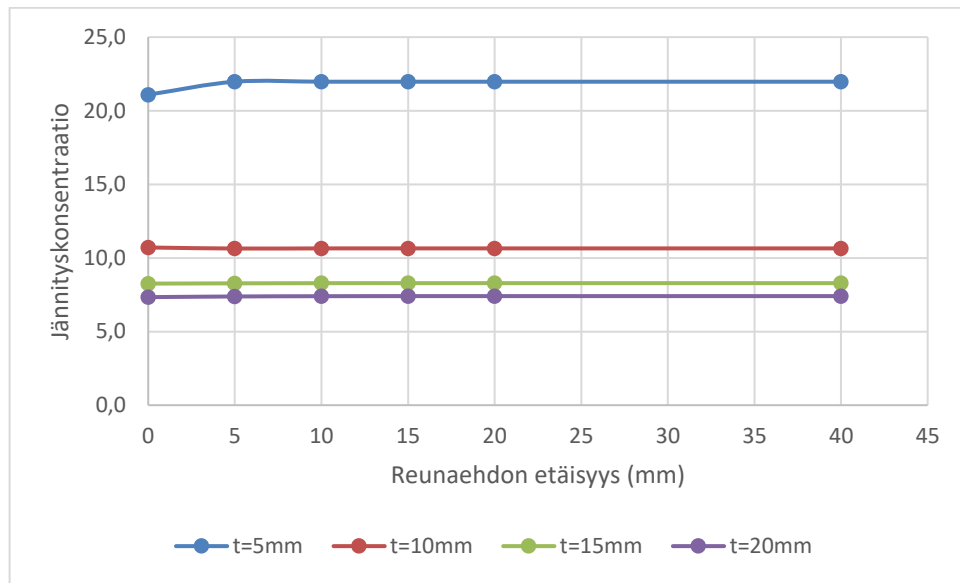


**Kuva 8.** X-liitoksen analyyseiden jännityskonsentraatiot.

X-liitoksen FE-analyysien numeraaliset arvot ovat liitteessä I.

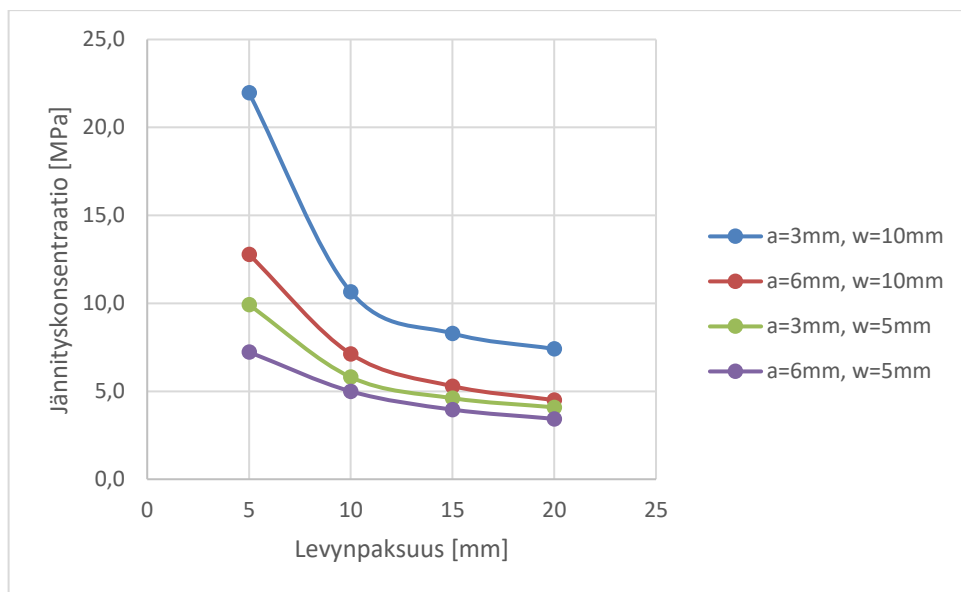
### 4.2 T-liitokset

Analyysien perusteella T-liitoksissa reunaehdon etäisyydellä ei ollut merkittävää vaikutusta jännityskonsentraation suuruuteen, riippumatta muiden muuttujien arvoista (kuva 9). Reunaehdon siirtyessä pois hitsin rajaviivalta jännityskonsentraation suuruudessa on pieniä muutoksia. Muutokset rajaviivalta siirryttäessä eivät kuitenkaan ole yhdensuuntaisia kaikilla muuttujien kombinaatioilla, vaan muutoksen suunnat ovat satunnaisia. Reunaehdon etäisyyden kasvaessa 5 mm:stä ylöspäin muutokset jännityskonsentraatiossa ovat hyvin pieniä ja näkyvät vain jännityskonsentraation toisessa ja kolmannessa desimaalissa.



**Kuva 9.** Reunaehdon etäisyyden vaikutus jännityskonsentraation suuruuteen. Kuvaajan arvot muuttujien arvoilla:  $a=3$  ja  $w=t$ .

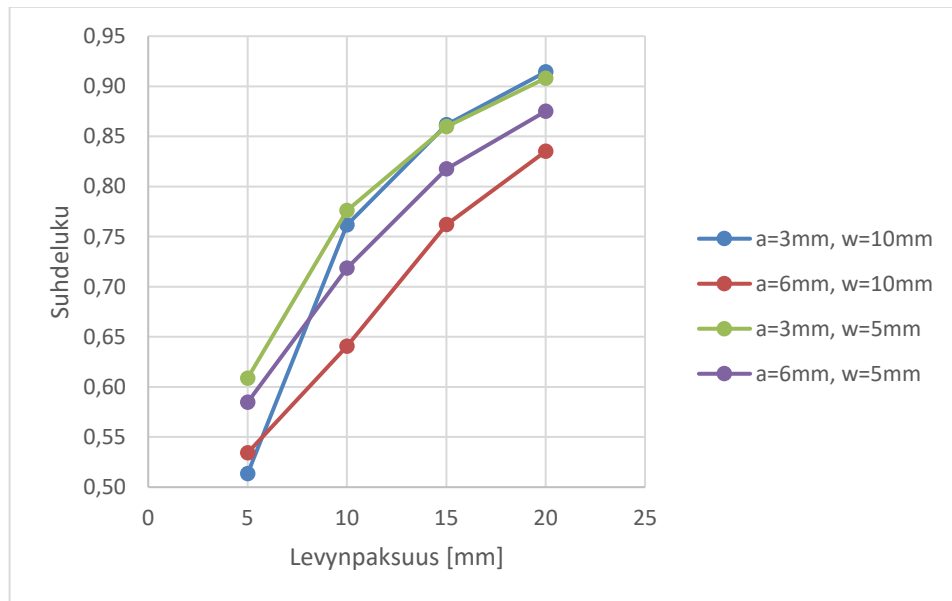
Levynpaksuuden ja juuripinnan leveyden vaikutukset jännityskonsentraatioon ovat suuria (kuvaaja 10). Levynpaksuuden muutoksen vaikutus jännityskonsentraation suuruuteen vaikuttaisi olevan paraboloidinen. Juuripinnan puolittumisen vaikutus jännityskonsentraatioon on niin ikään samanlainen levynpaksuuden kasvaessa.



**Kuva 10.** Levynpaksuuden vaikutus jännityskonsentraation suuruuteen. Arvot on otettu reunaehdon etäisyydellä  $L=20\text{mm}$ .



Suurin jännityskonsentraatio syntyy kaikilla muuttujien variaatioilla reunaehdon puoleisen hitsin juureen. Kuvaajassa 11 on esitetty levyn vapaanpään puoleisen hitsinjuuren jännityskonsentraation arvo suhteessa reunaehdon puoleisen hitsin jännityskonsentraation arvoon.

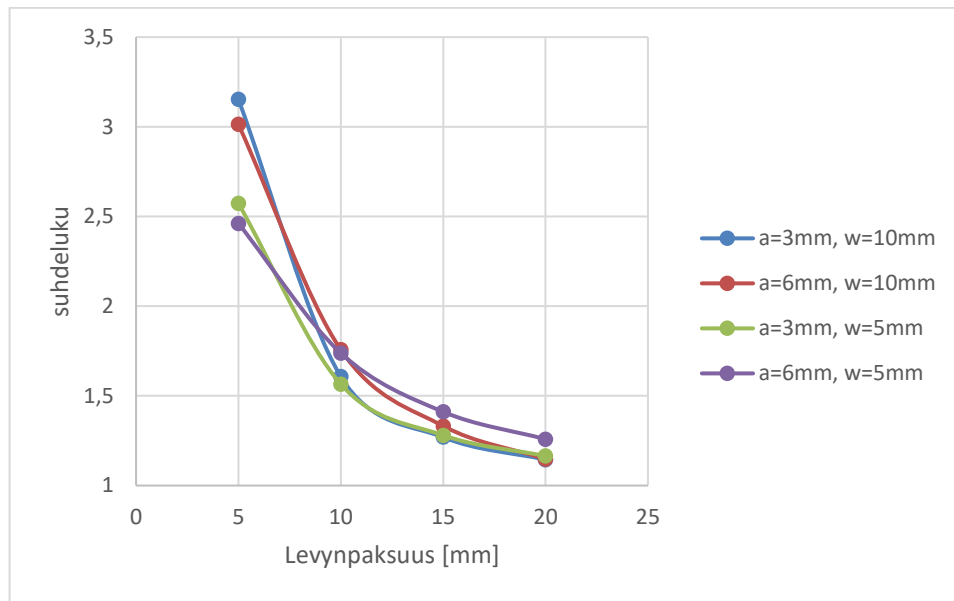


**Kuva 11.** Levyn vapaanpään puoleisen hitsin suhde reunaehdonpuoleiseen hitsiin. Arvot on otettu reunaehdon etäisyydellä  $L=15\text{mm}$ .

T-liitosten FE-analyysien tarkat arvot löytyvät taulukoituina liitteestä II.

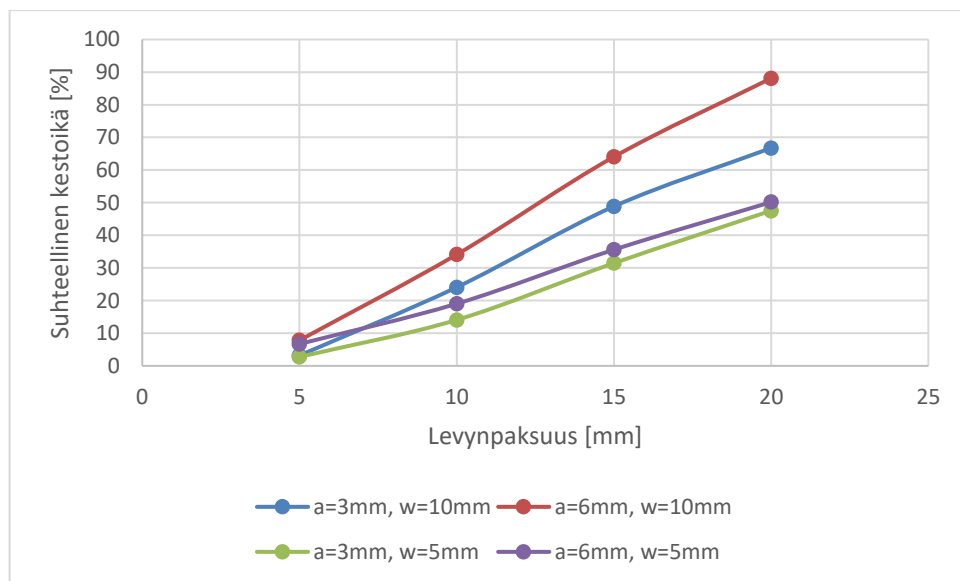
#### 4.3 X- ja T-liitosten vertailu

T-liitoksen jännityskonsentraatio on suurempi kaikilla muuttujien kombinaatioilla. Jännitysten ero kuitenkin pienenee levynpaksuuden kasvaessa. Kuvaajassa 12 on esitetty T-liitoksen jännityksen suhde X-liitoksen jännitykseen. A-mitta ja juuripinnan leveys vaikuttavat jännityskonsentraatioiden suhteeseen, mutta niiden vaikutusten luonnetta ei pystytä määrittelemään tehdyillä analyyseillä. T-liitoksen arvot on saatu käyttäen globaalin reunaehdon etäisyytenä  $L=20\text{mm}$ .



**Kuva 12.** T-liitoksen jännityskonsentraation suhde X-liitokseen. T-liitoksen arvot reunaehdon etäisyydellä  $L=20mm$ .

Laskennallinen T-liitoksen kestoikä jää X-liitoksen kestoikästä kaikilla muuttujien variaatioilla (kuva 13). Pienemmillä levynpaksuuksilla T-liitoksen kestoikä jää alle 50%:iin X-liitoksen kestoikästä. T-liitoksen suhteellinen kestoikä näyttäisi kasvavan lineaarisesti levynpaksuuden kasvaessa.



**Kuva 13.** T-liitoksen prosentuaalinen kestoikä X-liitokseen verrattuna.

## 5 TULOSTEN ANALYSOINTI

T-liitoksien jännityskonsentraatiot ovat tarkastelluilla geometrian muuttujilla suurempia kuin X-liitoksen jännityskonsentraatiot. Laskennallisen kestoiän vielä suurempi suhteellinen ero johtuu jännityskonsentraation eksponentiaalisesta vaikutuksesta laskennalliseen kestoikään. Esimerkiksi kaksinkertainen jännityskonsentraatio johtaa 12,5% laskennalliseen kestoikään.

Levynpaksuuden vaikutus X- ja T-liitosten jännityskonsentraatioiden eroon näyttäisi olevan eksponentiaalinen. A-mitalla ja juuripinnan leveydellä on myös vaikutusta jännityskonsentraatioiden suhteeseen, mutta niiden vaikutusten tutkimiseksi tarvitaan enemmän analyysejä eri muuttujilla. Tehdyillä analyyseillä niiden vaikutusten arviointi ei ole mahdollista. Kuormaakantavan levyn paksuuden vaikutusta kannattaa tutkia tarkemmin, sillä juuripinnan leveyden puolittumisen vaikutus jännityskonsentraation suuruuteen pieneni levynpaksuuden kasvaessa.

T-liitoksessa reunaehdon etäisyydellä ei näyttäisi olevan vaikutusta jännityskonsentraation suuruuteen. Jännityskonsentraatioissa olevat muutokset hitsinrajaviivalta siirryttäessä eivät ole merkityksellisiä, sillä reunaehdon etäisyyden kasvatuksella ei havaittu muutoksia. Lisäksi T-liitoksen toteuttaminen hitsin rajaviivalla ei osana suurempaa rakennekokonaisuutta ole mahdollista.

Reunaehdon ja vapaan pään puoleisien hitien välillä oli kuitenkin jännityseroja. Eron aiheuttava tekijä näyttäisi olevan levyn paksuus, jonka kasvattaminen pienentää hitsien välistä eroa. Ilmiö johtuu levyn taipumisesta, joka on suurempaa pienemmällä levyn paksuudella.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

T-liitoksien jännityskonsentraatiot ovat tarkastelluilla geometrian muuttujilla suurempia kuin X-liitoksen jännityskonsentraatiot. Jännityseron vaikutus kestoikään on myös merkittävä, jännityksen eksponentiaalisen vaikutuksen takia. Levynpaksuuden vaikutus X- ja T-liitosten jännityskonsentraatioiden eroon näyttäisi olevan eksponentiaalinen. A-mitan suuruudella ja juuripinnan leveydellä on myös vaikutusta jännityskonsentraatioiden suhteeseen, mutta niiden vaikutusten tutkimiseksi tarvitaan enemmän analyysejä eri muuttujien kombinaatioilla. Kuormaakantavan levyn paksuuden vaikutusta kannattaa tutkia tarkemmin, sillä juuripinnan leveyden puolittumisen vaikutus jännityskonsentraation suuruuteen pieneni levynpaksuuden kasvaessa.

**LÄHTEET**

Baumgartner J, Bruder T. An efficient meshing approach for the calculation of notch stresses. *Welding in the World*, 2013 Vol.57: 1, s.137-145. ISSN: 0043-2288.

Fricke, W. *Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures*. Hamburg University of Technology, Ship Structural Design and Analysis, 2010.

SFS-EN 1993-1-9. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen.

Sonsino C.M. A Consideration of Allowable Equivalent Stresses for Fatigue Design of Welded Joints According to the Notch Stress Concept with the Reference Radii  $r_{ref} = 1.00$  and 0.05 mm. *Welding in the World*, 2009 Vol.53: 3. s.R64-R75. ISSN: 0043-2288.

Sonsino C.M, Fricke W, De Bruyne F, Hoppe A, Ahmadi A, Zhang G. Notch stress concepts for the fatigue assessment of welded joints – Background and applications. *International journal of fatigue*, 2012 Vol 34: 1. s.2-16. ISSN: 0142-1123.

X-liitoksen FE-analyysien tulokset.

w=10mm	a=3mm	a=6mm
t <sub>0</sub> =5mm	6.969	4.241
t <sub>0</sub> =10mm	6.629	4.056
t <sub>0</sub> =15mm	6.528	3.973
t <sub>0</sub> =20mm	6.473	3.920

w=5mm	a=3mm	a=6mm
t <sub>0</sub> =5mm	3.853	2.938
t <sub>0</sub> =10mm	3.707	2.874
t <sub>0</sub> =15mm	3.6	2.805
t <sub>0</sub> =20mm	3.512	2.729

T-liitoksien FE-analyysien tulokset.

Juuripinnanleveydellä  $w=10\text{mm}$  vasemman puoleisen hitsin maksimiarvot.

a=3mm	L=0mm	L=5mm	L=10mm	L=15mm	L=20mm	L=40mm
t <sub>0</sub> =5mm	21,09	21,97	21,97	21,97	21,97	21,97
t <sub>0</sub> =10mm	10,71	10,64	10,65	10,65	10,65	10,65
t <sub>0</sub> =15mm	8,258	8,275	8,287	8,288	8,288	8,288
t <sub>0</sub> =20mm	7,338	7,384	7,403	7,407	7,407	7,407
a=6mm						
t <sub>0</sub> =5mm	12,77	12,78	12,78	12,78	12,78	12,78
t <sub>0</sub> =10mm	7,16	7,127	7,127	7,127	7,127	7,127
t <sub>0</sub> =15mm	5,321	5,291	5,292	5,292	5,292	5,292
t <sub>0</sub> =20mm	4,513	4,499	4,5	4,5	4,5	4,5

Juuripinnanleveydellä  $w=10\text{mm}$  oikean puoleisen hitsin maksimiarvot.

a=3mm	L=0mm	L=5mm	L=10mm	L=15mm	L=20mm	L=40mm
t <sub>0</sub> =5mm	11,29	11,28	11,28	11,28	11,28	11,28
t <sub>0</sub> =10mm	8,108	8,111	8,112	8,112	8,112	8,112
t <sub>0</sub> =15mm	7,105	7,139	7,142	7,142	7,142	7,142
t <sub>0</sub> =20mm	6,705	6,764	6,772	6,772	6,772	6,772
a=6mm						
t <sub>0</sub> =5mm	6,825	6,827	6,827	6,827	6,827	6,827
t <sub>0</sub> =10mm	4,558	4,565	4,565	4,565	4,565	4,565
t <sub>0</sub> =15mm	4,027	4,032	4,032	4,032	4,032	4,032
t <sub>0</sub> =20mm	3,747	3,757	3,758	3,758	3,758	3,758

Juuripinnanleveydellä  $w=5\text{mm}$  vasemman puoleisen hitsin maksimiarvot.

a=3mm	L=0mm	L=5mm	L=10mm	L=15mm	L=20mm	L=40mm
t <sub>0</sub> =5mm	9,91	9,916	9,916	9,916	9,916	9,916
t <sub>0</sub> =10mm	5,82	5,805	5,805	5,805	5,805	5,805
t <sub>0</sub> =15mm	4,609	4,606	4,609	4,609	4,609	4,609
t <sub>0</sub> =20mm	4,078	4,082	4,088	4,089	4,089	4,089
a=6mm						
t <sub>0</sub> =5mm	7,227	7,232	7,232	7,232	7,232	7,232
t <sub>0</sub> =10mm	5,001	4,998	4,998	4,998	4,998	4,998
t <sub>0</sub> =15mm	3,971	3,958	3,958	3,958	3,958	3,958
t <sub>0</sub> =20mm	3,438	3,433	3,434	3,434	3,434	3,434

Juuripinnanleveydellä  $w=5\text{mm}$  oikean puoleisen hitsin maksimiarvot.

a=3mm	L=0mm	L=5mm	L=10mm	L=15mm	L=20mm	L=40mm
t <sub>0</sub> =5mm	6,027	6,036	6,036	6,036	6,036	6,036
t <sub>0</sub> =10mm	4,499	4,505	4,505	4,505	4,505	4,505
t <sub>0</sub> =15mm	3,947	3,961	3,962	3,962	3,962	3,962
t <sub>0</sub> =20mm	3,677	3,709	3,713	3,713	3,713	3,713
a=6mm						
t <sub>0</sub> =5mm	4,228	4,228	4,228	4,228	4,228	4,228
t <sub>0</sub> =10mm	3,58	3,591	3,591	3,591	3,591	3,591
t <sub>0</sub> =15mm	3,228	3,235	3,235	3,235	3,235	3,235
t <sub>0</sub> =20mm	2,995	3,005	3,005	3,005	3,005	3,005