

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

PAKSUUSKORJAUSKERTOIMEN HUOMIOONOTTAMINEN TEHOLLISEN LOVI-
JÄNNITYKSEN MENETELMÄSSÄ
CONSIDERATION OF THE THICKNESS CORRECTION FACTOR IN THE EFFEC-
TIVE NOTCH STRESS METHOD

Lappeenrannassa 5.6.2020
Eero Poutiainen
Tarkastaja Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

LUT-yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Eero Poutiainen

Paksuuskorjauskertoimen huomioonottaminen tehollisen loviännityksen menetelmässä

Kandidaatintyö

2020

25 sivua, 12 kuvaa, 2 taulukkoa ja 4 liitettä

Tarkastaja: DI Antti Ahola

Ohjaaja: DI Antti Ahola

Hakusanat: ENS, FEM, paksuuskorjauskerroin

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan paksuuskorjauskertoimen huomioonottamista tehollisen loviännityksen menetelmässä. Yleisesti paksuuskorjauskerrointa ei käytetä tehollisen loviännityksen menetelmässä, sillä se on otettu siinä huomioon rajaviivavyöristyksen ja levy-paksuuden suhteen r/t avulla. Tutkimuksen tavoitteena on väsymislaskennan helpottaminen ja ENS menetelmän tarkkuuden parantaminen.

Työssä tutkittavat liitokset ovat kuormaa kantamaton T-liitos sekä kuormaa kantava X-liitos. Tutkittavat kappaleet mallinnettiin ja niille tehtiin FE-analyysi eri a-mitoilla sekä levynpaksuuksilla. FE-malleista luettiin kunkin mallin maksimipääjännitykset, joiden avulla laskettiin laskennallinen väsymislujuus. Laskennalliset väsymislajuudet muutettiin paksuuskorjauskertoimiksi suhteuttamalla arvo referenssipaksuuden väsymislajuusarvoon. Suhteuttamalla saatuja tuloksia vertailtiin analyttisesti laskettuihin paksuuskorjauskertoimiin.

Tutkimuksen suurimmat jännitykset ilmenivät kuormaa kantavan liitoksen hitsin juuressa. X-liitoksissa a-mitan kasvattaminen paransi väsymislajuutta, kun taas T-liitoksissa väsymislajuus heikkeni. Työn tulosten avulla voitiin päätellä, että analyttisesti laskettu paksuuskorjauskerroin vastaa kuormaa kantamattomasta liitoksesta suhteutettuja paksuuskorjauskertoimia referenssipaksuuksilla $t_{ref} = 25$ mm ja 37,5 mm. Kuormaa kantavalla X-liitoksella suhteutetut paksuuskorjauskertoimet ja analyttisesti lasketut kertoimet eivät vastanneet toisiinsa.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Eero Poutiainen

Consideration of the thickness correction factor using the effective notch stress method

Bachelor's thesis

2020

25 pages, 12 figures, 2 tables and 4 appendices

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

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

Keywords: ENS, FEM, thickness correction factor

In this bachelor's thesis, the consideration of the thickness correction factor in the effective notch stress method is investigated. In general, the thickness correction factor is not used in the effective notch stress method, as it is taken into account by the weld toe radius to thickness ratio r/t . The aim of the study is to facilitate the calculation of fatigue and to improve the accuracy of the ENS method.

The weld joints examined in this thesis are a non-load-bearing T-joint and a load-bearing X-joint. The examined joints are modelled and subjected to FE analysis with different weld throat dimensions and plate thicknesses. The maximum principal stresses of each model were obtained from the FE models, which were used to calculate the fatigue strength. The calculated fatigue strengths were converted to thickness correction factors by relating the value to the fatigue strength value of the reference thickness. The obtained results were then compared with the analytically calculated thickness correction factors.

The highest stresses in the study occurred at the weld root of the load-bearing joint. In the X-joints, increasing the weld throat dimension improved the fatigue strength, while in the T-joints the fatigue strength decreased. Based on the results of the work, it could be concluded that the analytically calculated thickness correction factor corresponds to the thickness correction factors proportional to the load-bearing joint with reference thicknesses $t_{ref} = 25$ mm and 37.5 mm. In load-bearing X-joints, the proportional thickness correction factors did not correspond to the factors determined analytically.

SISÄLLYSLUETTELO**TIIVISTELMÄ****ABSTRACT****SISÄLLYSLUETTELO****SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO**

1	JOHDANTO	6
1.1	Tutkimuksen tausta ja tavoite	6
1.2	Tutkimusongelma ja -kysymykset	7
1.3	Tutkimusmenetelmät	7
2	TUTKIMUSMENETELMÄT	8
2.1	Tiedonhaku	8
2.2	Tehollisen loviännityksen menetelmä	8
2.3	FE-analyysi	11
3	FE-ANALYYSI.....	12
3.1	Malli.....	12
3.2	Verkotus.....	12
3.3	Reunaehdot ja kuormitukset	14
3.4	Analysointi.....	15
4	TULOKSET	16
5	TULOSTEN TARKASTELU	21
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	24
	LÄHTEET	25

LIITTEET

LIITE I: Tutkimuskappaleiden solmupisteistä saadut maksimipääjännitykset.

LIITE II: FE-analyysin tuloksista lasketut FAT-luokitukset.

LIITE III: Suhteuttamalla lasketut paksuuskorjauskertoimet

LIITE IV: Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

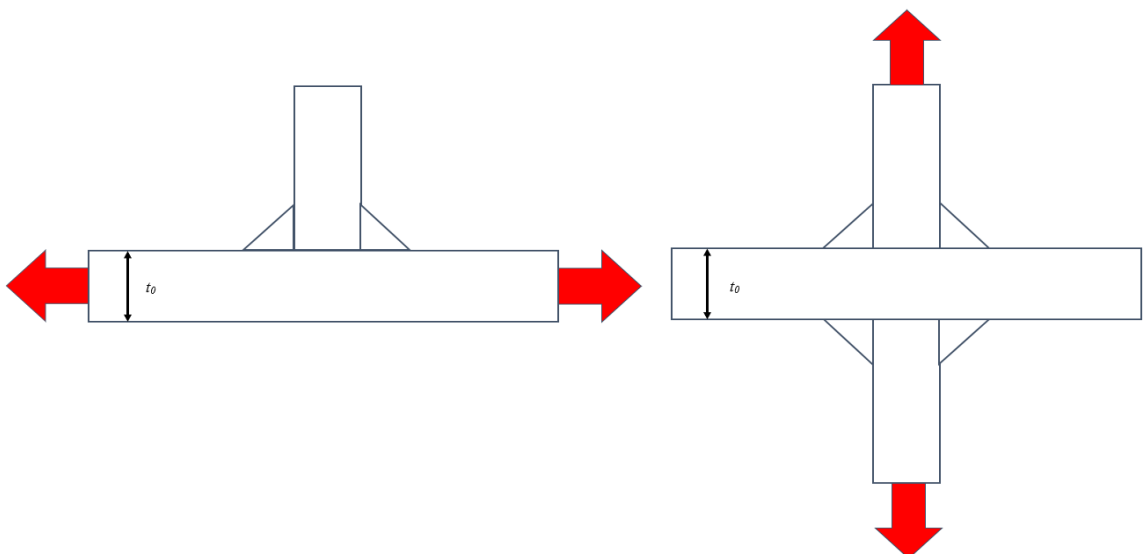
a	Hitsin a-mitta [mm]
c	Taivutusjännitysytälön kulmakerroin
d	Taivutusjännitysytälön vakiotermin
E	Kimmomoduuli [GPa]
ENS	Effective Notch Stress, tehollinen lovijännitys [MPa]
FAT	Väsymisluokka [MPa]
FAT _{nom}	Nimellisen jännityksen väsymisluokka [MPa]
k_s	Paksuuskorjauskerroin [-]
n	Kappaleen muodosta riippuva kerroin [-]
N _f	Kappaleen kestoikä [-]
s	Lovijännityksen moniaksaalisuuden kerroin [-]
t	Levynpaksuus [mm]
t_0	Peruslevyn levynpaksuus [mm]
t_1	Liitetyn levyn levynpaksuus [mm]
t_{ref}	Referenssipaksuus [mm]
ν	Poissonin vakio [-]
$\Delta\sigma_{nom}$	Nimellinen jännityskuormavaihtelu [MPa]
γ	Varmuuskerroin [-]
ρ, r	Todellinen pyöristyssäde [mm]
ρ^*	Materiaalin mikrorakenteesta määräytyvä kerroin [mm]
ρ_f	Fiktiivinen pyöristyssäde [mm]
σ_b	Taivutusjännitys [MPa]
σ_m	Kalvojännitys [MPa]
σ_{nl}	Epälineaarinen jännityspiikki [MPa]

1 JOHDANTO

Kandidaatintyössä keskitytään tutkimaan numeerisesti määritetyn paksuuskertoimen vaikutusta väsymislaskentaan tehollisen lovijännityksen (ENS) menetelmässä. Tässä työssä tutkitaan kahta eri liitostyypillä toteutettua kappaletta: kuormaa kantamatonta T-liitosta ja kuormaa kantavaa X-liitosta. Työssä tutkittavat kappaleet on esitetty kuvassa 1. Kuormaa kantavassa liitoksessa hitsi ottaa vastaan kappaleeseen vaikuttavat kuormitukset. Kuormaa kantamattomassa liitoksessa kappale ottaa vastaan sen läpi vaikuttavan kuormituksen hitsin sijasta. ENS menetelmässä ei tarvitse ottaa huomioon rakenteen paksuutta, sillä se oletettu otettavan huomioon väsymislaskennassa lovijännityskertoimen ja rajaviivapyöristys/levynpaksuus (r/t) -suhteen avulla.

1.1 Tutkimuksen tausta ja tavoite

Kandityö tehdään LUT-yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolle. Työn tavoitteena on määrittellä paksuuskorjauskerroin tehollisen lovijännityksen menetelmällä ja vertailla saatuja tuloksia analyttisellä lausekkeella määritettyyn paksuuskorjauskertoimeen. Tavoitteena on tutkia ENS menetelmällä lasketuille paksuuskorjauskertoimelle raja-arvot, joilla lovijännityspaksuuskorjauskerroin toimii oikein. Lisäksi tulokset voivat herättää keskustelua nykyisen laskentatavan oikeellisuudesta. Työ tähtää väsymislaskennan helpottamiseen ja laskentatarkkuuden parantamiseen ENS menetelmällä. Työn tuloksena vältetään kappaleiden alitai ylimitoitusta ja parannetaan väsymisoptimointia.



Kuva 1. Kuormaa kantamaton T-liitos (vas.) sekä kuormaa kantava X-liitos (oik.).

Työn taustalla on ENS menetelmän paksuuskorjauksen huomioonottaminen eri geometrioilla. Murtumismekaanisesti tarkasteltuna sama särökoko eri paksuisissa levyissä on haitallisempi paksummalle levyille. Lovijännitystasolla suhteen r/t pienentyessä alkusäröön vaikuttava lovijännitys kasvaa. Rakenteellisen ja nimellisen jännityksen menetelmissä alkusärökoko ja lovijännitystä ei voida ottaa huomioon, joten paksuuden vaikutus otetaan mitoituksessa huomioon paksuuskorjauskertoimella. Taustalla on siis eri laskentatapojen kriittinen tarkastelu, sekä liitostyyppin ja laskentatavan vaikutus lopputulokseen.

1.2 Tutkimusongelma ja -kysymykset

Paksuuskorjauskerrointa käytetään hitsien väsymislaskennassa nimellisen ja rakenteellisen jännityksen menetelmissä. Kerroin ottaa huomioon kappaleen paksuuden vaikutuksen väsymislujuteen. ENS menetelmässä paksuuskorjauskerroin otetaan huomioon suhteen r/t avulla, mutta tulokset eivät ole yhtenäisiä eri geometrioilla. Paksummissa kappaleissa pyöristyssäde 1 mm on suhteessa pienempi, joten lovijännitys on suurempi ohuempaan levyyn verrattuna. Paksuuskorjauskertoimen avulla voidaan määrittää korjattu FAT-arvo eli väsymislukokka, jota voidaan vertailla ENS menetelmän vastaavaan arvoon. (Radaj et al, 2006. s.112)

Tutkimuksesta muodostetut tutkimuskysymykset ovat:

- Miten paksuuskorjauskerrointa voidaan hyödyntää ENS menetelmässä?
- Miten referenssipaksuus $t_{ref} = 25\text{mm}$ voidaan yhdistää paremmin kappaleen geometriaan vai tulisiko käyttää jotakin toista geometriaan liittyvää muuttujaa?

1.3 Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksen data tuotetaan FE-analyysiä hyödyntäen, jonka tuloksia käsitellään kirjallisuudessa esitetyillä kaavoilla niiden muuntamiseksi vertailukelpoiseksi. Tutkimuksessa ei käytetä datan lähteenä laboratoriokeiteita. Työssä käytetään hyödyksi eri datan tuotto ja käsitelyohjelmia, kuten Simcenter Femap ja Microsoft Excel. Tutkimus keskittyy pelkkään rakenteelliseen analyysiin, joten kappaleita tutkiessa on tehty oletuksia. Todellisessa kappaleessa on hitsauksen jälkeen jäännösjännityksiä, jotka vaikuttavat laskettavaan lopputulokseen. Työssä ei myöskään oteta huomioon mahdollisia hitsausvirheitä, sillä kokeellista osuutta ei suoriteta. Lisäksi tutkittavien kappaleiden materiaali oletetaan käytökseltään ideaaliselastiseksi sekä homogeeniseksi.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

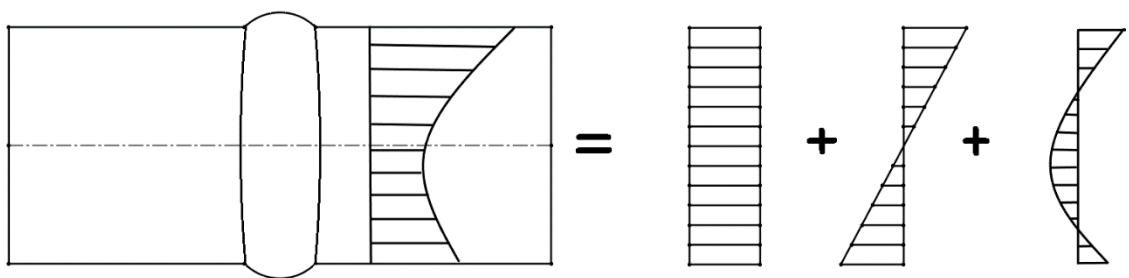
Tässä luvussa esitellään tarkemmin tutkimuksessa käytettyjä metodeja. Luvussa on esitelty tarkemmin tutkimuksessa käytetyt analyttiset kaavat sekä teoriat. Väsymislaskennassa käytetään useita eri menetelmiä, mutta tässä työssä keskitytään ENS menetelmään.

2.1 Tiedonhaku

Tutkimuksessa käytetään tiedonhakumenetelmänä kirjallisuutta sekä FE-menetelmää. Kirjallisessa tutkimuksessa käytetään tietokantana LUT Finna -palvelua ja Scopus-verkkotietokantaa. Kaikissa tapauksissa on lähteet vertaisarvioituja sekä pyritty valitsemaan viimeisen viiden vuoden ajalta. Vanhempiakin lähteitä käytetään saatavuuden mukaan.

2.2 Tehollisen lovijännityksen menetelmä

Tehollisen lovijännityksen menetelmää käytetään yleisesti väsymislaskennassa. Menetelmästä käytetään kirjallisuudessa usein lyhennettä ENS. Toisin kuin rakenteellisen ja nimellisen jännityksen menetelmissä, lovijännityksen menetelmä ottaa huomioon myös loven aiheuttaman jännityspiikin. Lovijännitys koostuu kalvojännityksestä σ_m , taivutusjännityksestä σ_b sekä epälineaarista jännityspiikistä σ_{nl} . Eri jännitystyyppit on esitetty kuvassa 2.

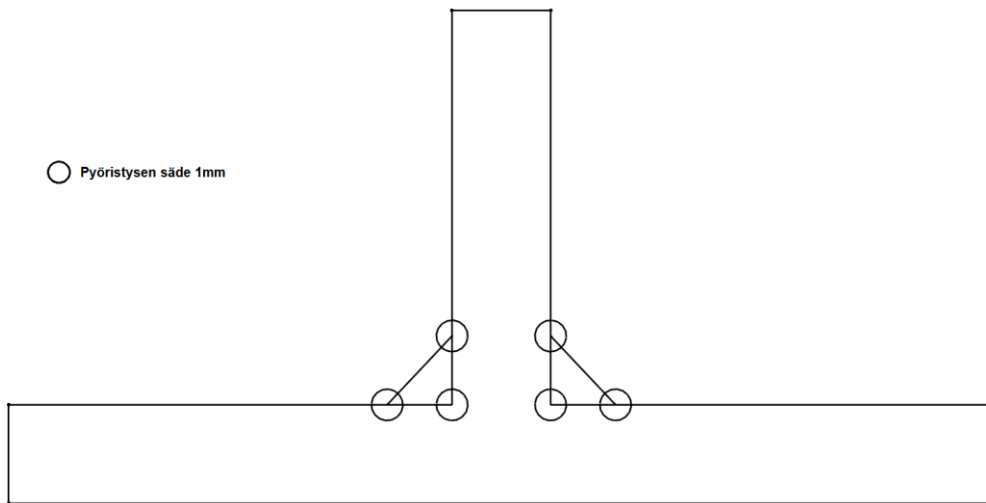


Kuva 2. Lovijännityksen komponentit. (Mukaiillen Hobbacher 2016, s. 14)

Tehollisen lovijännityksen menetelmässä todellinen rajaviivan pyöristys ρ hitsin rajaviivalla ja juurella korvataan fiktiivisellä pyöristyksellä ρ_f :

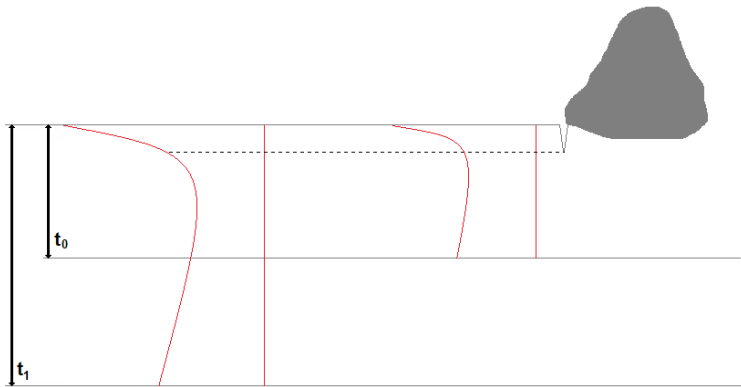
$$\rho_f = \rho + s\rho^*, \quad (1)$$

missä ρ on todellinen pyöristyssäde, ρ_f on fiktiivinen pyöristyssäde, ρ^* on materiaalin mikrorakenteesta riippuva kerroin ja s on loviännityksen moniaksaalisuuden kerroin. Kriittisimmässä tapauksessa, kun todellinen pyöristyssäde $\rho = 0$, saadaan yhtälön 1 mukaan fiktiiviseksi pyöristys $\rho_f = 1$ mm. Näin Neuberin yhtälön mukainen fiktiivinen pyöristys vastaa pahinta mahdollista tilannetta. (Fricke 2006, s. 2) Menetelmällä korvattavat rajaviivan ja juuren pyöristyssäteet on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. ENS-menetelmän pyöristettävät kohteet.

Paksuuskorjauskerroin ottaa huomioon levypaksuuden vaikutuksen hitsausliitoksen väsymiskestävyyteen. Hitsattujen kappaleiden oletetun alkusärön koko on oletusarvoisesti yhtä suuri ohuilla ja paksuilla levyillä. Paksummilla levyillä särö kasvaa kuitenkin loviännityksen vaikutusalueella kauemmin, mikä kasvattaa särönkasvunopeutta. Ohuemmissa levyissä samankokoinen alkusärö voi vaikuttaa loviännitykseen paljon vähemmän tai mahdollisesti olla kokonaan vaikutusalueen ulkopuolella. Ilmiötä on kuvattu tarkemmin kuvassa 5. Levyrakenteissa referenssipaksuutena käytetään yleisesti paksuutta $t_{ref} = 25$ mm. Paksummilla levyillä väsymisluku heikkenee, sillä paksumpi levyrakenne mahdollistaa pidemmän särökasvun loviännityksen alueella.



Kuva 5. Alkusärön vaikutus lovijännitykseen eri materiaalileveyksillä.

Laskennallinen kestoikä N_f nimellisen ja rakenteellisen jännityksen menetelmällä voidaan laskea kaavalla

$$N_f = \left(\frac{FAT \cdot k_s}{\gamma \Delta \sigma} \right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6, \quad (2)$$

jossa k_s on paksuuskorjauskerroin, FAT on liitoksen väsymisluokitus, γ on varmuuskerroin ja $\Delta \sigma$ jännitysvaihtelu. Levynpaksuus voidaan ottaa väsymistä alentavana kertoimena huomioon paksuuskorjauskertoimen avulla. Nimellisen ja rakenteellisen jännityksen menetelmällä paksuuskorjauskerroin voidaan laskea kaavalla

$$k_s = \left(\frac{t_{ref}}{t} \right)^{\frac{1}{n}} \leq 1, \quad (3)$$

missä t_{ref} on levyn referenssipaksuus, t levyn paksuus ja n kappaleen muodosta riippuva kerroin. Kun tarkastellaan levyjä ja laattoja, käytetään $n = 5$. (Niemi, 2003, s. 98) Tehollisen lovijännityksen menetelmässä levynpaksuus on otettu huomioon laskennassa. ENS menetelmää käyttäessä ei siis tarvitse erikseen määrittää paksuuskorjauskerrointa kaavasta 2. Rakenteen kestoikä saadaan kaavasta

$$N_f = \left(\frac{FAT_{ENS}}{\gamma \Delta \sigma_{ENS}} \right)^3 \cdot 2 \cdot 10^6, \quad (4)$$

missä FAT_{ENS} on ENS menetelmän mukainen väsymisluokka ja $\Delta \sigma_{ENS}$ on FE-analyysillä ratkaistu jännitysvaihtelu. Väsymislujuuden vertailuarvona käytetään FAT-luokkaa 225MPa. (Sonsino 2009, s.10)

ENS-kestoikäennusteen perusteella voidaan kirjoittaa:

$$\Delta\sigma_{nom}^3 \cdot N_{f,ENS} = FAT_{nom}^3 \cdot 2 \cdot 10^6, \quad (5)$$

missä $\Delta\sigma_{nom}$ on kappaletta kuormittava nimellinen jännityskuorma, $N_{f,ENS}$ ENS-menetelmällä saatu kestoikä ja FAT_{nom} eli nimellinen väsymisluokka. (SFS-EN 1993-1-9, 2005, s.15) Ratkaistaan nimellinen FAT-luokka FAT_{nom} sijoittamalla yhtälö 3 yhtälöön 4 muuttujan $N_{f,ENS}$ paikalle.

$$FAT_{nom} = \frac{FAT_{ENS}}{\Delta\sigma_{ENS}} \cdot \Delta\sigma_{nom} \quad (6)$$

Tulokset muutetaan vertailukelpoiksi analyttisen laskennan kanssa suhteuttamalla ENS-menetelmällä saatu FAT-luokitus paksuuskorjauskertoimeksi. Koska ENS menetelmässä levynpaksuus on valmiiksi huomioitu, voidaan tulokset suhteuttaa vertaamalla muita tuloksia referenssipaksuudella saatuihin tuloksiin. Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet saadaan kaavasta

$$k_s = \frac{FAT_{nom,i}}{FAT_{nom,ref}}, \quad (7)$$

missä alaindeksillä i tarkoitetaan tutkittavan kappaleen levypaksuutta ja alaindeksillä ref valittua referenssipaksuutta. Tällöin kaavoista 7 ja 3 saatavat tulokset ovat keskenään vertailukelpoisia.

2.3 FE-analyysi

Tutkimuksessa käytetään Siemensin Simcenter FEMAP -ohjelmistoa sekä sen sisäistä ratkaisijaa Nastrania. Ohjelmistolla voi tehdä numeerista FE-analyysiä 2D- ja 3D-tasoissa. FE-menetelmällä malli jaetaan pienempiin osiin eli verkotetaan. Ohjelmisto muodostaa tarvittavat yhtälöt jokaiselle verkon osalle erikseen, jotka yhdistämällä saadaan tulokset koko mallille. FE-mallinnusta käytetään laajasti teollisuudessa ja tutkimuksissa korvaamaan analyttinen laskenta, sillä FE-mallinnuksella pystytään ratkaisemaan monimutkaisienkin rakenteiden fysikaalisia ilmiöitä suhteellisen vaivattomasti. (Neto et al. 2015, s. 46)

3 FE-ANALYYSI

Tutkittavia liitoksia tutkimuksessa on kaksi, joista kummastakin on useita eri geometriamittasuhteita. Kokomallien sijasta työssä mallinnetaan X-liitoksesta neljäsosamallit ja T-liitoksesta puolimallit mallinnus- ja laskenta-ajan säästämiseksi. Kappaleiden ollessa symmetrisiä keskilinjansa suhteen, ei puolimallin tai neljäsosamallin käyttö vaikuta lopputulokseen. Kappaleiden geometriamuuttujat on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Geometriamuuttujat

a [mm]	3	6	9	12
t_0 [mm]	12,5	25	37,5	50

Kullakin a -mitalla tehdään mallit eri levypaksuuksilla ja liitostyypeillä. T-liitoksen malleissa tutkitaan kahta eri kuormitustyyppiä. Yhteensä tutkittavia kappaleita oli siis kahdella eri liitostyyppillä 48 kappaletta. Tässä luvussa esitellään tarkemmin kappaleiden mallintamisen vaiheet.

3.1 Malli

Tutkimuksen kaikki kappaleet oletetaan ideaalielastisiksi, joten kappaleille käytettiin lineaarista materiaalmallia. Kappaleiden materiaalina toimi teräs, joten kimmomoduulina käytettiin $E = 210$ GPa ja Poissonin vakiona $\nu = 0,3$. Tutkimuksessa ei oteta huomioon kappaleiden omaa painoa, sillä painon vaikutus lopputulokseen on pieni.

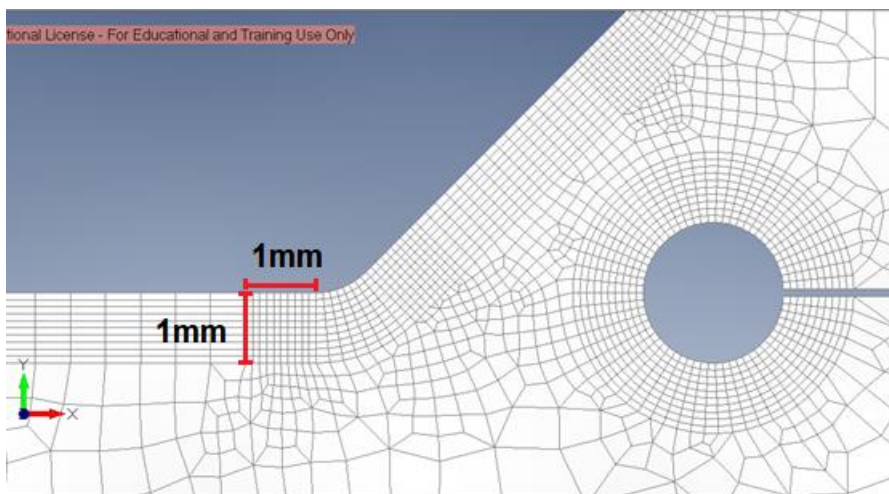
3.2 Verkotus

Geometria

Tutkittavat kappaleet mallinnetaan xy -tasossa, käyttäen eri geometriaa kullekin a -mitalle. Kappaleeseen lisätään hitsin rajaviivalle ENS-menetelmän mukainen rajaviivapyöritys $\rho_f = 1$ mm. Koska tutkittavat hitsit ovat pienahitsejä, rajaviivapyöritys pitää ottaa huomioon myös hitsin juuren puolella. Juuren puolelle liitospintojen välille idealisoidaan rako, jonka hitsin juuri pyöristetään myös ENS-menetelmän mukaisesti säteellä 1mm. Liitospintojen raon koko ei ole tutkimuksen kannalta merkittävää vaikutusta, kunhan rako on pienempi kuin käytetty ENS-menetelmän mukainen pyöritys. (Fricke et al., 2009) Pyöritys lisättiin

kummallekin rajaviivalle sekä hitsin juurelle geometrian uudelleenhyödyntämistä ajatellen. Koska X-liitoksesta tehdään neljäosamalli ja T-liitoksesta puolimalli, voidaan niiden verkottamisen pohjana käyttää samaa geometriaa. Käyttämällä samaa geometriapohjaa kummallekin eri liitokselle vähennetään mallinnuksen työmäärää.

Tutkimustulosten tarkkuuden parantamiseksi, tärkeimmille tutkittaville alueille luotiin apugeometria. Apugeometrian avulla verkotusta ohjataan tiheämmäksi halutulla alueella. IIW:n suositusten mukaan pyöristyssäteen reunalle on luotava elementtejä, joiden sivunpituus on $< r/4$, eli 0,25mm. (Fricke, 2010 s.10) Tulosten paikkansapitävyyden varmistamiseksi malleissa käytetään elementin sivunpituutena 0,1 mm. Apugeometrian avulla luotu verkotus hitsin rajaviivalla sekä juuressa on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Verkotus hitsin rajaviivalla sekä juuressa.

Malleissa hyödynnetään tutkittavien kappaleiden yksinkertaista geometriaa kopioimalla verkotus pienimmän levypaksuuden mallista kolmeen muuhun malliin muiden reunaehtojen säilyessä samana. Näin ollen yhteen mallitiedostoon on voitu tehdä neljä eri mallia, joilla on kaikilla eri seinämäpaksuus. Elementtien kopioimisen jälkeen seinämäpaksuutta on kasvatettu pursottamalla. Kaikissa malleissa käytetään materiaalina terästä, joten kaikilla malleilla käytetään samaa elementtityyppiä. Elementtityypiksi valittiin tasovenymäelementti (plane strain). Elementin paksuudeksi valitaan 1 mm, vaikka todellisuudessa tutkittavien kappaleiden paksuus z-suunnassa olisi suurempi. Tutkittavissa kappaleissa vaikuttaa kalvojännitystilä, eli kappaleessa esiintyvät jännitykset eivät muutu syvyysuunnassa (z-akseli).

3.3 Reunaehdot ja kuormitukset

Tutkimuksessa käytetään liitostyypeittäin eri kuormitustyyppisiä. Kuormaa kantamattomalla T-liitoksella kuormitustyyppinä ovat nimellinen taivutus- ja kalvojännitys. Kuormaa kantavalla X-liitoksella kuormitustyyppinä käytetään pelkkää nimellistä kalvojännitystä. Kaikkien jännitystyyppien arvona käytetään nimellistä jännitystä 1 MPa, joka on lineaaristen mallien tapauksessa skaalattavissa haluttuun arvoon. Kuormitustyyppinä malleille käytetään voiman ja pituusyksikön suhdetta (Force per length). Koska elementtipaksuus on 1 mm ja nimellisenä kuormana on 1 MPa, saadaan kuormituksen arvoksi 1 N/mm. Kalvojännityksen tapauksessa kuormituksen suunnan asettamisen jälkeen kuormitusehto on valmis. Taivutusjännityksen toteuttamiseksi kuormituksen arvo on muutettava lineaarisesti muuttuvaksi (variable). Taivutusjännityksen arvon muodostumiselle asetetaan yhtälö levynpaksuuden t_0 eli y-koordinaatinmuuttujana. Koska kaikilla kappaleilla kuormitussuoran ylemmän pisteen y-koordinaatti on 0, oli lausekkeen muodostaminen suoran yhtälön avulla yksinkertaista. Suoran yhtälön kaava on

$$F(y) = cy + d, \quad (8)$$

missä c on levyn paksuuden määrittämä kulmakerroin, y on kuormituspisteen y -arvo ja d on vakio. Taivutusjännityksen nimelliset arvot ovat 1 MPa kappaleen yläpinnassa, kun $y = 0$ ja -1 MPa levyn alapinnassa, kun $y = -t_0$. Taivutusjännityksen arvoa kuvastavat yhtälöt on esitetty taulukossa 2.

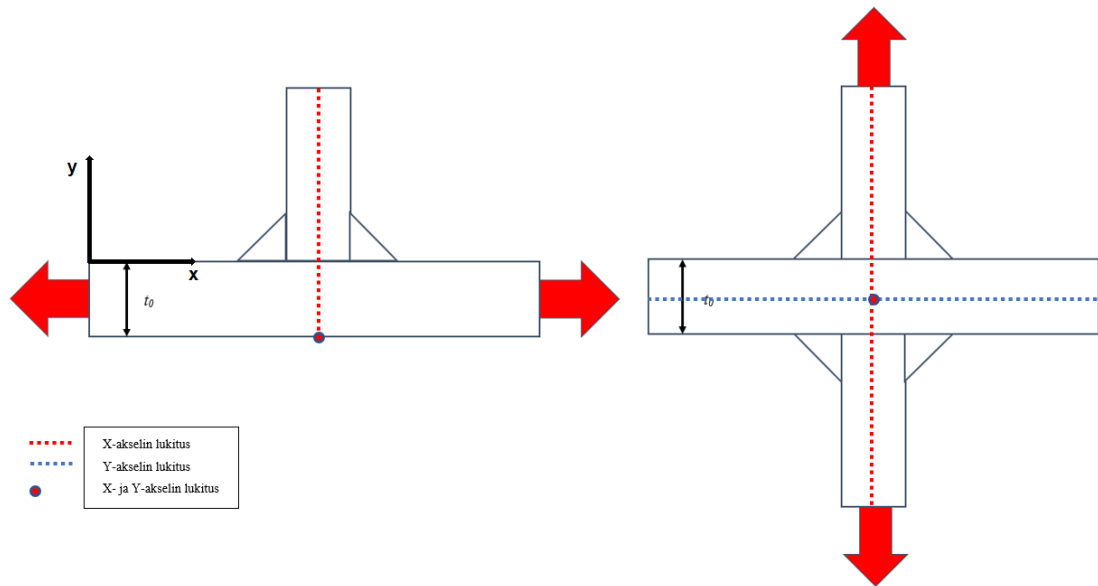
Taulukko 2. Taivutusjännityksen arvon muodostavat yhtälöt eri levynpaksuuksilla.

Levypaksuus t_0	Yhtälö
12,5 mm	$F(y) = (2/12,5) * y + 1$
25 mm	$F(y) = (2/25) * y + 1$
37,5 mm	$F(y) = (2/37,5) * y + 1$
50 mm	$F(y) = (2/50) * y + 1$

Yhtälöissä esiintyvä y -arvo on kyseisissä malleissa negatiivinen, johtuen kappaleiden asettelusta koordinaatistoon. Koordinaatiston asettelu on esitetty kuvassa 5.

Kappaleiden reunaehtojen asettaminen määräytyy kyseisen mallin liitostyyppistä. Reunaehdoissa otetaan huomioon puoli- ja neljäsosamallin aiheuttamat symmetriaehdot eri tavalla.

Puolimallissa levypaksuuden suhteen kiinteän sivun solmupisteiden translaatiot lukittiin x-suunnassa ja mallin kulmassa oleva solmupiste translaatio y-suunnassa. Neljäsosamallissa kappaleen molempiin sivuihin syntyy symmetriareunaehto, joista toisen solmupisteiden translaatiot lukitaan y-suunnassa ja toisen x-suunnassa. Kappaleiden reunaehdot on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kappaleiden reunaehdot eri liitostyypeillä.

Tutkimuksen kappaleissa vallitsi tasojäännitystila, joten kappaleisiin vaikuttavat jännitykset eivät muutu syvyysuunnassa. Kappaleet on mallinnettu pelkästään xy-tasossa, joten kaikille kappaleille muodostui reunaehdoksi z-suunnan translaatioiden lukitseminen.

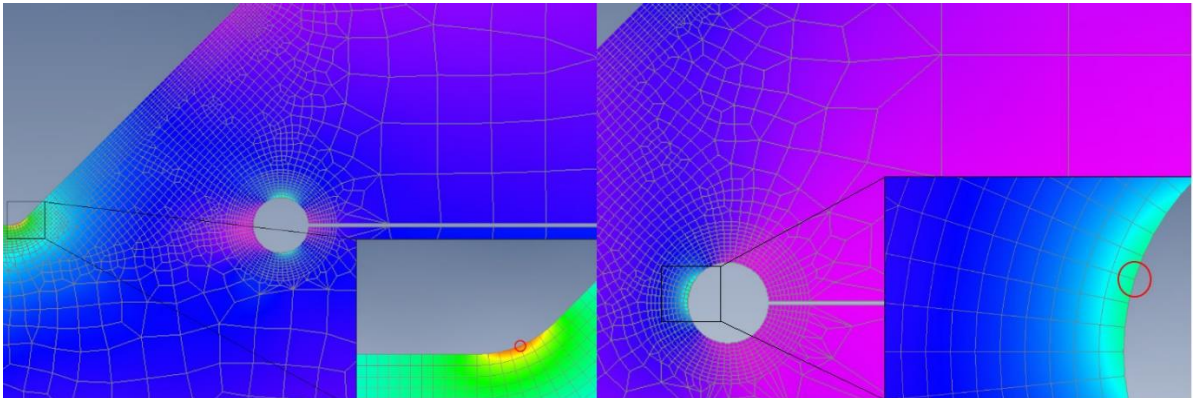
3.4 Analysointi

Mallit analysoidaan käyttäen Femap:n sisäistä ratkaisijaa NX Nastrania. Mallit ratkaistaan lineaarisella analyysillä. Mallitiedoston sisältämät useat eri levyepaksuuksilla kuvatut mallit pystytään ratkaisemaan samanaikaisesti, joka nopeuttaa mallien analysointia sekä tulosten jälkikäsittelyä.

4 TULOKSET

Eri geometriavariaatioilla mallinnettuja kappaleita oli 48. Tulokset voidaan jakaa ryhmittäin liitos- sekä kuormitustyyppin mukaan. FE-analyysistä saaduista tuloksista on laskettu FAT_{nom} . Tulokset muutettiin vertailukeloisiksi kaavan 7 avulla, joka suhteuttaa tulokset paksuuskorjauskertoimiksi. Eri geometriavariaatioiden tarkat FE-analyysin tulokset on esitetty liitteessä I ja tuloksista lasketut FAT_{nom} arvot liitteessä II.

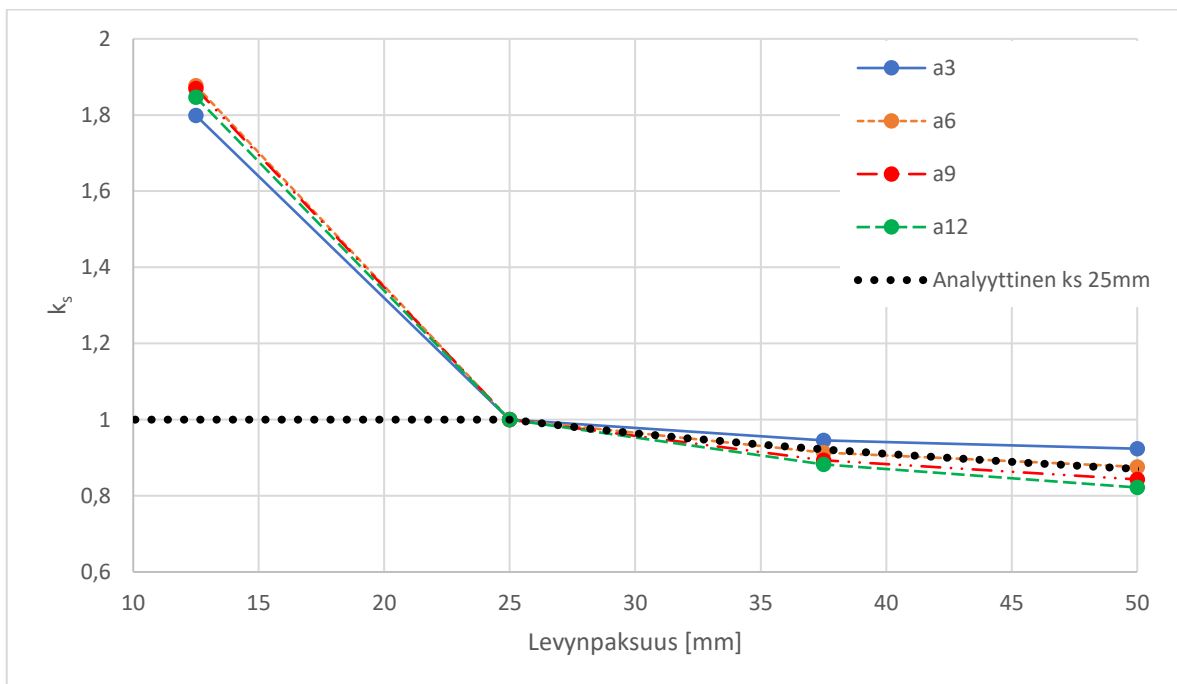
Väsymislajuuden vertailuarvona käytettiin FAT-luokkaa 225MPa. Jännityskriteerinä työssä on käytetty maksimipääjännitystä, sillä Sonsinon (2009, s.10) mukaan Von Misesin jännityskriteeri ei sovellu kuormaa kantavalle X-liitokselle. Tulokset luettiin kunkin mallin maksimipääjännityksenä. T-liitoksien kappaleiden maksimijännitykset esiintyivät hitsin rajaviivalla. X-liitoksien maksimijännitykset esiintyivät hitsin juuressa. Jännitysten lukeminen mallista on esitelty tarkemmin kuvassa 6. Malleista saadun elementtijännitykset muutettiin solmupistejännityksiksi paremman tarkkuuden takia. Tulokset taulukoitiin datan visualisointia varten Exceliin.



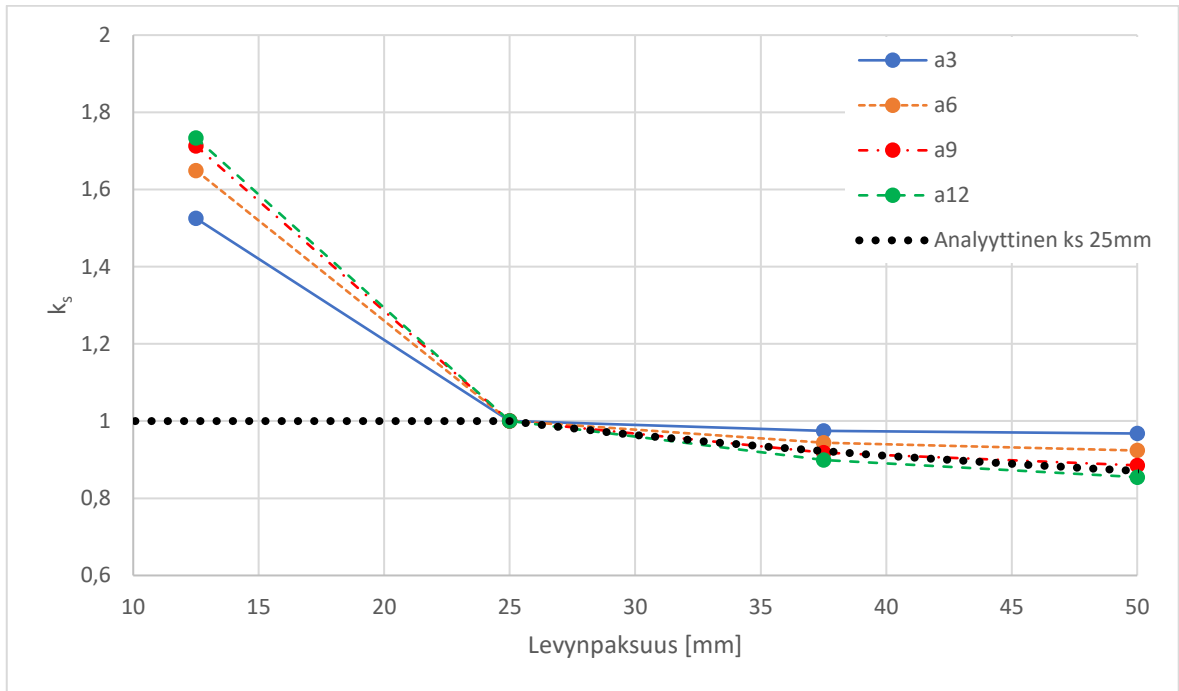
Kuva 6. T-liitoksen malli (vas.) ja X-liitoksen malli (oik.) analysoituna. Analysoiduista malleista poimittavien solmupistejännitysten sijainti merkattu kuviin punaisella ympyrällä.

Analyttisen paksuuskorjauskertoimen laskennassa käytettiin referenssipaksuutena $t_{ref} = 25$ mm. Kaavan 3 mukaisesti saatiin paksuuskorjauskertoimeksi 1, kun $t_0 \leq t_{ref}$. Analyttisesti laskettua paksuuskorjauskerrointa verrattiin FAT_{nom} arvoista suhteutettuihin paksuuskorjauskertoimiin. Kuvissa 7-9 esitetään tulokset referenssipaksuuden 25 mm suhteen.

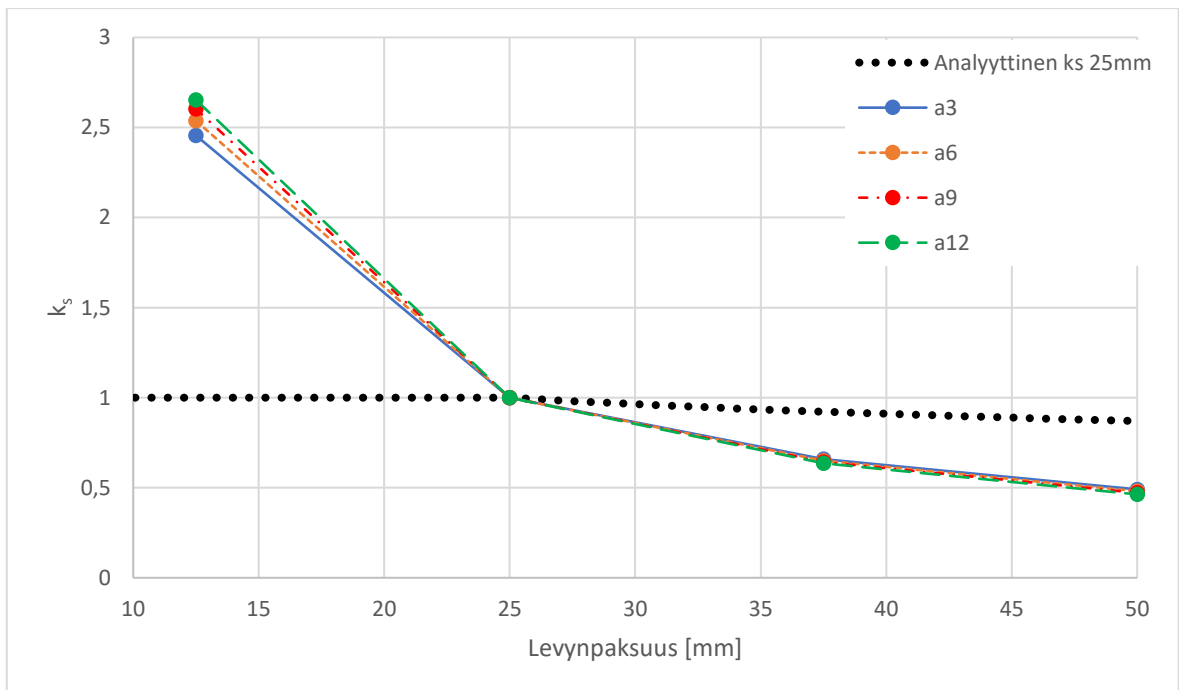
Tulokset on jaoteltu kuormituksen ja liitostyyppin mukaan. Kaikkia levypaksuuksia t_0 käytettiin vuorollaan paksuuskorjauskertoimen suhteuttamiseen, eli tuloksia tarkastellaan neljän eri referenssipaksuuden suhteen. Kuviin on myös piirretty analyttisesti kaavan 3 avulla määritetty paksuuskorjauskertoimen käyrä samalla referenssipaksuudella. Kuvissa 10-11 on esitetty suhteutettu paksuuskorjauskerroin referenssipaksuuden 37,5 mm suhteen. Kuviin on myös merkattu analyttisesti samalla referenssipaksuudella laskettu paksuuskorjauskerroin. Referenssipaksuuksien 12,5 mm ja 50 mm suhteen tulokset on esitetty liitteessä IV.



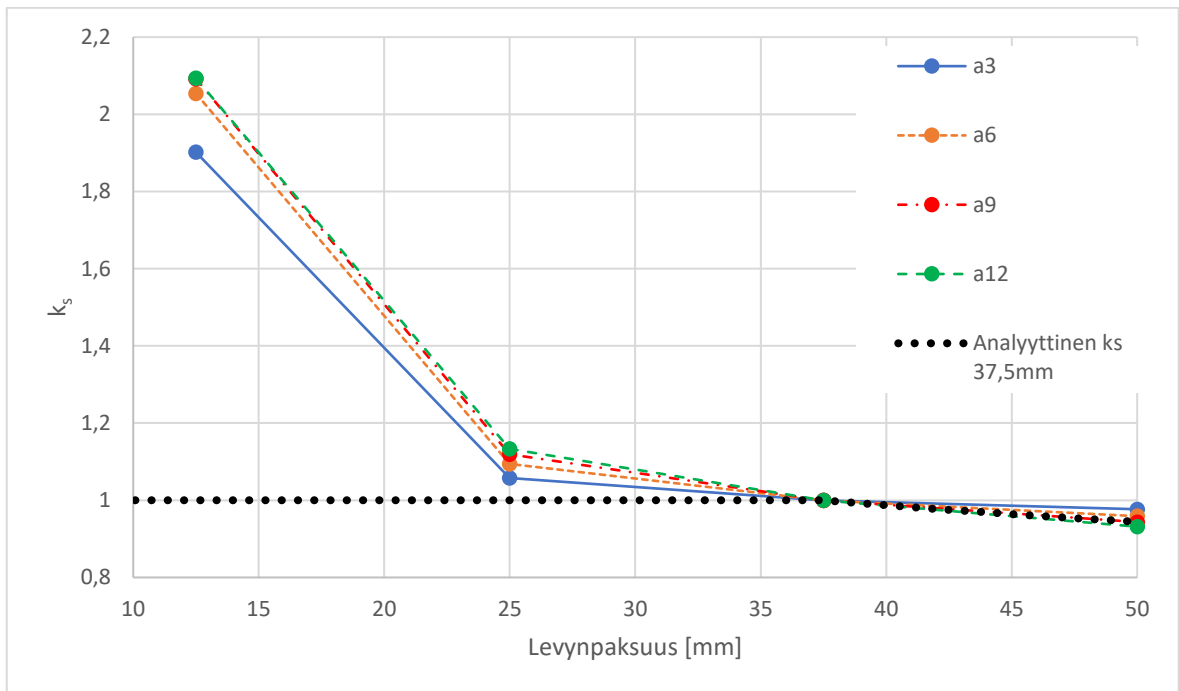
Kuva 7. T-liitoksen kalvokuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levypaksuudella 25 mm.



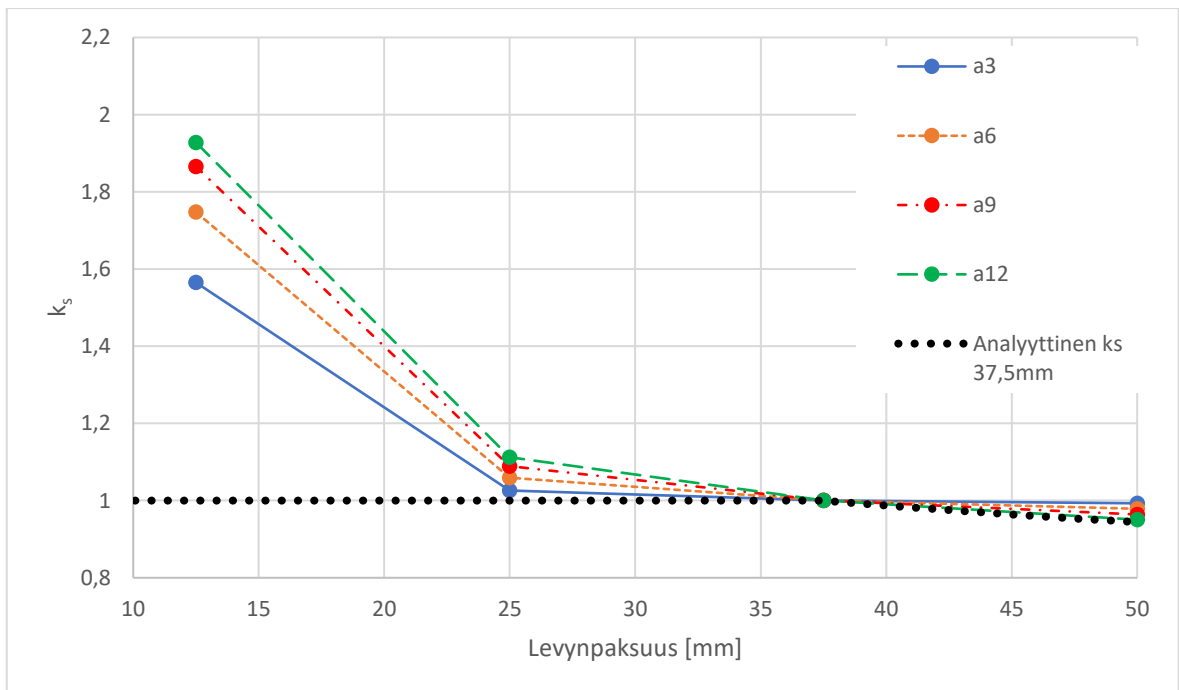
Kuva 8. T-liitoksen taivutuskuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levynpaksuudella 25 mm.



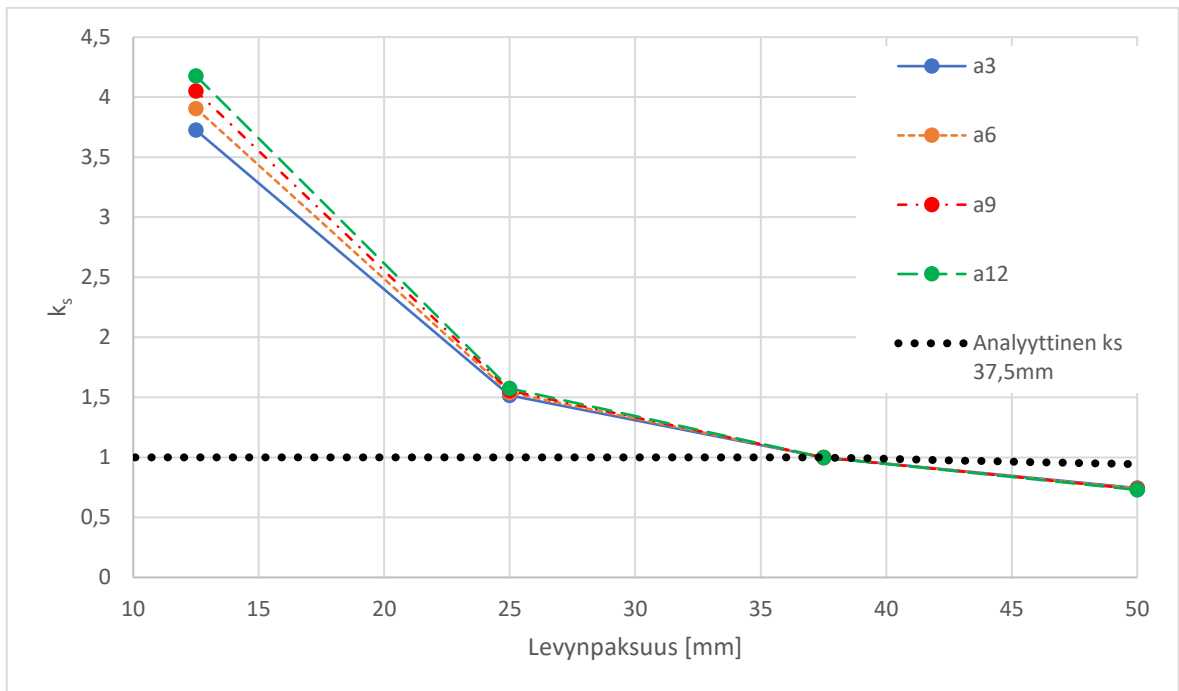
Kuva 9. X-liitoksen kalvokuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levynpaksuudella 25 mm



Kuva 10. T-liitoksen taivutuskuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levypaksuudella 37,5 mm.



Kuva 11. T-liitoksen taivutuskuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levypaksuudella 37,5 mm.



Kuva 12. X-liitoksen kalvokuorman suhteutetut paksuuskorjauskertoimet levypaksuudella 37,5 mm.

5 TULOSTEN TARKASTELU

FE-malleista saadut tulokset olivat keskenään vastaavia eri geometriavariaatioiden välillä. Tulokset vaihtelivat kuitenkin liitostyypeittäin. Kuormaa kantamattomien liitosten tapauksissa laskennallinen väsymislujuus oli huonompi suuremmilla a-mitoilla, kun levynpaksuus oli yli referenssipaksuuden. Levynpaksuuden ollessa alle referenssipaksuuden suuremmilla a-mitoilla saavutettiin yhtä hyvä tai parempi väsymisluokitus kuin pienemmillä a-mitoilla. Näin ollen levynpaksuutta, joka on lähellä referenssipaksuutta t_{ref} voidaan pitää käännekohdana. A-mitan vaikutus paksuuskorjauskertoimeen pienillä levypaksuuksilla on kuitenkin pieni. Kuormaa kantavan X-liitoksen väsymisluokka ei muuttunut a-mitan suhteen levypaksuuden kasvaessa. Ohuilla levypaksuuksilla ENS menetelmällä laskettu k_s arvo on suuri, sillä lovijännitys pieneni merkittävästi ohuemmillä levyillä.

Tutkimuksen suurimmat jännitysarvot esiintyivät kuormaa kantavassa X-liitoksessa. Liitoksen hitsi kantaa kaiken ulkoisen kuormituksen aiheuttaman jännityksen, joka selittää jännityksen suuruuden. Suurimmillaan lovijännitys hitsin juuressa oli noin viisinkertainen paksummassa levyssä, verrattuna nimelliseen jännitykseen. Paksummilla levyillä a/t suhde on pienempi eli hitsin a-mitalla on suhteellisesti enemmän kuormaa. Vastaavasti a-mitan kasvattaminen laskee jännityshuippua ja paransi väsymiskestävyyttä. Kuten kuvan 9 kuvaajista voidaan tulkita, kuormaa kantavan liitoksen käyrämuoto on erilainen kuin kuormaa kantamattomalla. Suhteutettujen paksuuskorjauskerrointen kuvaajat eivät leikkaa toisiaan. Myös tapauskohtaisesti tarkasteltuna kertoimien hajonta on pientä T-liitoksiin verrattuna. A-mittaa kasvattamalla suhteutettu paksuuskorjauskertoimen arvo kasvaa, eli kappaleen laskennallinen väsymislujuus on parempi. FE-analyysin tuloksista johdetut paksuuskorjauskertoimet eivät vastanneet analyttisesti määritettyä paksuuskorjauskerrointa. Kuormaa kantavassa hitsiliitoksessa muodostuu hitsiin suuri epäjatkuvuuskohta, jota on vaikea ottaa huomioon yhdellä kertoimella. Kuvaajasta 9 voidaan tulkita, että analyttisesti lasketut paksuuskorjauskertoimet noudattavat liian optimistista käyrää. Analyttisesti määritetyn kertoimen kuvaaja leikkaa suhteutetun kertoimen kuvaajan, mutta ei laske tarpeeksi nopeasti levypaksuuden kasvaessa.

T-liitoksen tulokset olivat kokoluokiltaan samansuuruisia huolimatta eri kuormitustyypeistä. Taivutuskuormalla mallinnetuissa kappaleissa vaikuttaa kokonaisuudessaan suurempi jännitys, joka johtaa pienempään laskennalliseen väsymislujuuteen kuin kalvokuormitetuilla malleilla. Kuvasta 7 nähdään, kuinka kalvojännityksellä kuormitettujen mallien k_s -kerroin on melko yhtenäinen levynpaksuuden suhteen. Hajontaa alkaa kuitenkin esiintymään suuremmilla levypaksuuksilla eri a-mittojen takia. Suuremmalla a-mitalla ei ole positiivista vaikutusta kuormaa kantamattoman liitoksen väsymislujuuteen levypaksuuden kasvaessa. Analyttisesti lasketut paksuuskorjauskertoimet referenssiarvoilla 25 mm ja 37,5 mm vastasivat hyvin samoista levypaksuuksista suhteutettuihin kuvaajiin. Erityisesti kalvokuormalla analyttisesti lasketut kertoimet noudattavat hyvin tutkimuskappaleiden mediaania, kun taas taivutuskuormalla analyttinen kerroin on jopa liian pieni suhteutettuun kertoimeen verrattuna. Kummassakin tapauksessa referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm suhteutetun ja analyttisen kertoimen arvot eivät vastanneet hyvin toisiaan. Referenssipaksuudella 12,5 mm analyttisestä kertoimesta saadaan liian suuri ja referenssipaksuudella 50 mm liian pieni.

Nimellisen ja rakenteellisen jännityksen menetelmässä käytettävä paksuuskorjauskerroin ei ota huomioon hitsin leveyttä. Referenssipaksuudeksi on ehdotettu myös liitoksen kokonaisleveyttä, jossa otetaan huomioon sekä levynpaksuus että hitsin leveys. (Hobbacher, 2016, s. 65) Näin laskettuna referenssipaksuudeksi tulee pienilläkin levypaksuuksilla varsin iso. T-liitoksen suurimmalla a-mitalla $a = 12$ mm ja kuormitussuunnan vastaisella paksuudella $t_1 = 25$ mm tämä tarkoittaisi referenssipaksuuden kasvamista yli kaksinkertaiseksi. Suurempi referenssipaksuus kasvattaa paksuuskorjauskerrointa, mikä johtaa optimistisempaan väsymislukitukseen. Tutkimuksessa käytetyillä geometriavariaatioilla liitoksen kokonaisleveys vaihtelee välillä 21-84 mm ja kokonaisleveyksien keskiarvo on 51 mm. Referenssipaksuudella 50 mm laskettu paksuuskorjauskerroin tuottaa tulokseksi liian pienen kertoimen suhteutettuihin arvoihin verrattuna. Tuloksista voidaan tulkita, kuinka 12,5 mm on selvästi liian pieni referenssipaksuus kuormaa kantamattomille T-liitoksille, sillä se johtaa liian suureen paksuuskorjauskertoimeen FE-malleista suhteutettuihin kertoimiin verrattuna. Kuormaa kantavalla X-liitoksella referenssipaksuus 12,5 mm johtaa liian pieneen paksuuskorjauskertoimeen muiden referenssipaksuuksien ohella. Suuremmilla referenssipaksuuksilla analyttisesti laskettu paksuuskorjauskerroin vastaa paremmin FE-analyysistä johdettuja tuloksia. Yhtä oikeaa universaalia lukuarvoa referenssipaksuudelle on kuitenkin hankala määrittää.

On kuitenkin selvää, että eri liitostyypeillä on käytettävä erilaista keinoa referenssipaksuuden määrittämiseksi.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä tutkittiin paksuuskorjauskertoimen huomioonottamista ENS väsymislaskennassa. Tutkimuksessa käytettiin tutkimuskappaleena kahta eri hitsiliitosta. Geometriavariaatioiden avulla analysoitavia geometrioita muodostettiin yhteensä 48 kappaletta. Tutkimuskappaleet mallinnettiin ja analysoitiin FEMAP-ohjelmistolla. T-liitoksella kuormana käytettiin kalvo- sekä taivutuskuormitusta. X-liitosta tutkittiin vain kalvokuormituksella.

Yhteenveto tutkimuksen keskeisistä tuloksista:

- Kuormaa kantamattomien liitoksien suhteutetut paksuuskorjauskertoimet vastasivat hyvin analyttisesti referenssipaksuuksilla $t_{ref} = 25$ mm ja 37,5 mm laskettuja kertoimia. Kuormaa kantamattomien liitosten laskennallinen väsymislujuus oli huonompi suuremmilla a-mitoilla, kun levynpaksuus oli yli referenssipaksuuden. Levynpaksuuden ollessa alle referenssipaksuuden suuremmilla a-mitoilla saavutettiin yhtä hyvä tai parempi laskennallinen väsymislujuus kuin pienemmillä a-mitoilla
- Kuormaa kantavalla liitoksella suhteutetut paksuuskorjauskertoimet eivät vastanneet analyttisesti laskettuja kertoimia. Paksummilla levyillä hitsien etäisyys toisistaan on suurempi, joka kasvattaa niissä esiintyviä jännityksiä. Vastaavasti a-mitan kasvattaminen laskee jännityshuippua ja paransi väsymiskestävyyttä.

Referenssipaksuudet välillä 25-37,5 mm havaittiin toimivaksi ja tällöin ENS-menetelmä antaa analyttisen lausekkeen mukaisia tuloksia yli 25 mm levynpaksuuksilla. Referenssipaksuuden määrittämiseen ei sovellu liitoksen kokonaisleveys, sillä se tuottaa liian optimistisia kertoimia suhteuttamalla laskettuihin kertoimiin verrattuna. Eri liitostyypeille on mahdollisesti määritettävä eri referenssipaksuus tulostarkkuuden parantamiseksi. Tarkemman referenssipaksuuden määrittäminen ja mahdollinen geometriaan yhdistäminen vaatii jatkotutkimusta. Jatkossa pitäisi tutkia myös tarkemmin levyn paksuuden vaikutusta teholliseen lovi-jännitykseen ja väsymislujuuteen alle 25 mm levynpaksuuksilla

LÄHTEET

Fricke W, Paetzold H and Zipfel B (2009): Fatigue tests and numerical analyses of a connection of steel sandwich plates. *Welding in the World* 53 (2009), No. 7/8

Fricke, W. 2010. IIW Recommendations for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08.

Hobbacher A.F. 2016. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13.

Neto, M.A., Amaro, A., Cirne, J., Leal, R. & Roseiro, L. 2015, *Engineering Computation of Structures: The Finite Element Method*, 1. painos. Springer International Publishing, s. 46

Niemi, E. 2003. *Levyrakenteiden suunnittelu*. Tekninen tiedotus 2, 2003. Teknologiatekniikka Oy. 136 s. ISBN 951-817-813-5

SFS EN 1993-1-9. 2006. Eurocode 3: teräsrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Suomen standardoimisliitto SFS.

Sonsino C.M. 2009. 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* 53, No. 3/4

LIITTEET

LIITE I

Tutkimuskappaleiden solmupisteistä saadut maksimipääjännitykset.

T-liitos kalvokuorma, pääjännitykset [MPa]				
σ_m	t_0			
	12,50	25,00	37,50	50,00
a3	1,4620*	2,6296	2,7803	2,8466
a6	1,3980	2,6236	2,8714	2,9949
a9	1,3945	2,6065	2,9174	3,0918
a12	1,4017**	2,5885	2,9341	3,1497

* Todellinen suurin jännitysarvo hitsin juuressa, joka ei pitäisi olla kriittisempi kuormaa kantamattomalla liitoksella.

** Suurin jännitysarvo ei rajaviivalla, vaan kuormitusasteessa.

T-liitos taivutuskuorma, pääjännitykset [MPa]				
σ_b	t_0			
	12,50	25,00	37,50	50,00
a3	1,9065	2,9078	2,9836	3,0047
a6	1,7976	2,9647	3,1412	3,2096
a9	1,7403	2,9809	3,2463	3,3674
a12	1,7166	2,9757	3,3092	3,4816

X-liitos kalvokuorma, pääjännitykset [MPa]				
σ_m	t_0			
	12,50	25,00	37,50	50,00
a3	6,7909	16,6750	25,2970	33,9870
a6	4,1720	10,5870	16,2960	22,0410
a9	3,1449	8,1844	12,7420	17,3577
a12	2,5577	6,7859	10,6840	14,6595

LIITE II

FE-analyysin tuloksista lasketut FAT-luokitukset sekä paksuuskorjauskertoimet.

TK = T-liitos kalvokuormalla, TT = T-liitos taivutuskuormalla, XK = X-liitos kalvokuormalla

Kappale	FAT _{nom}	k _s
TK12.5a3	153,899	1,000
TK25a3	85,564	1,000
TK37.5a3	80,927	0,922
TK50a3	79,042	0,871
TK12.5a6	160,944	1,000
TK25a6	85,760	1,000
TK37.5a6	78,359	0,922
TK50a6	75,128	0,871
TK12.5a9	161,348	1,000
TK25a9	86,323	1,000
TK37.5a9	77,123	0,922
TK50a9	72,773	0,871
TK12.5a12	160,519	1,000
TK25a12	86,923	1,000
TK37.5a12	76,685	0,922
TK50a12	71,435	0,871

Kappale	FAT _{nom}	k _s
TT12.5a3	118,017	1,000
TT25a3	77,378	1,000
TT37.5a3	75,412	0,922
TT50a3	74,883	0,871
TT12.5a6	125,167	1,000
TT25a6	75,893	1,000
TT37.5a6	71,629	0,922
TT50a6	70,102	0,871
TT12.5a9	129,288	1,000
TT25a9	75,481	1,000
TT37.5a9	69,310	0,922
TT50a9	66,817	0,871
TT12.5a12	131,073	1,000
TT25a12	75,612	1,000
TT37.5a12	67,992	0,922
TT50a12	64,625	0,871

Kappale	FAT _{nom}	k _s
XK12.5a3	33,133	1,000
XK25a3	13,493	1,000
XK37.5a3	8,894	0,922
XK50a3	6,620	0,871
XK12.5a6	53,931	1,000
XK25a6	21,252	1,000
XK37.5a6	13,807	0,922
XK50a6	10,208	0,871
XK12.5a9	71,544	1,000
XK25a9	27,491	1,000
XK37.5a9	17,658	0,922
XK50a9	12,963	0,871
XK12.5a12	87,970	1,000
XK25a12	33,157	1,000
XK37.5a12	21,060	0,922
XK50a12	15,348	0,871

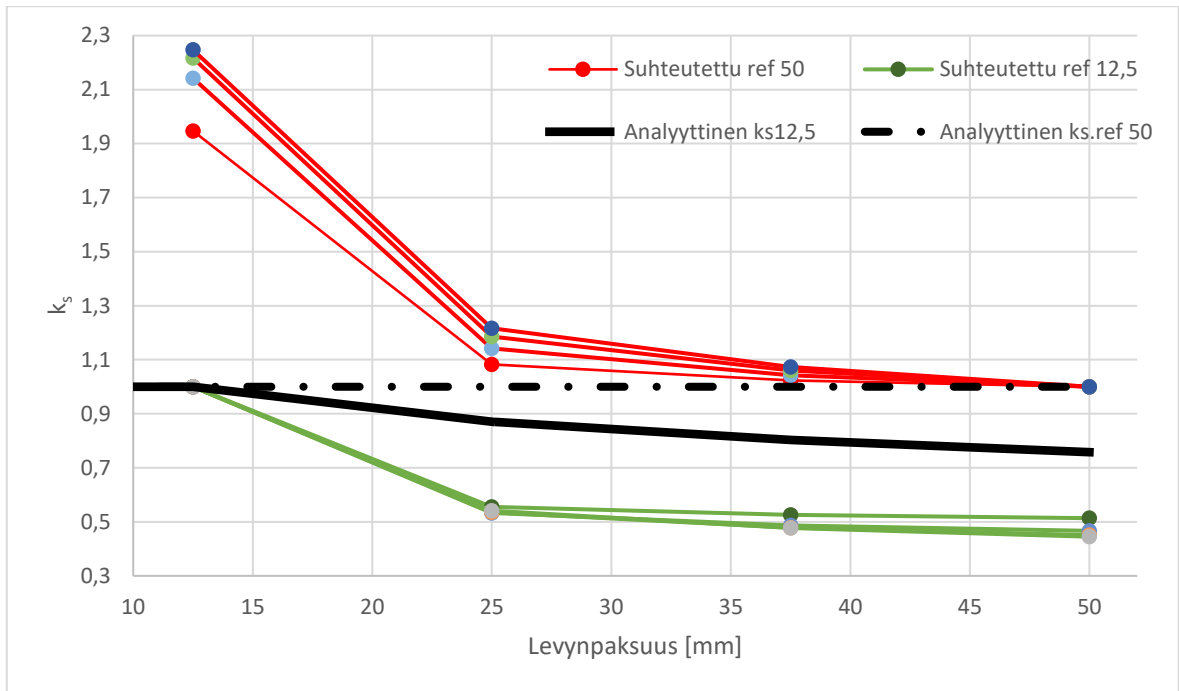
Suhteuttamalla lasketut paksuuskorjauskertoimet

T-liitos, kalvokuorma						
	a-mitta					
	a3	a6	a9	a12		
Levynpaksuus	12,5	1,000	1,000	1,000	1,000	Ref 12,5
	25	0,556	0,533	0,535	0,542	
	37,5	0,526	0,487	0,478	0,478	
	50	0,514	0,467	0,451	0,445	
		a3	a6	a9	a12	Ref 25
	12,5	1,799	1,877	1,869	1,847	
	25	1,000	1,000	1,000	1,000	
	37,5	0,946	0,914	0,893	0,882	
	50	0,924	0,876	0,843	0,822	
		a3	a6	a9	a12	Ref 37,5
	12,5	1,902	2,054	2,092	2,093	
	25	1,057	1,094	1,119	1,134	
	37,5	1,000	1,000	1,000	1,000	
	50	0,977	0,959	0,944	0,932	
		a3	a6	a9	a12	Ref 50
	12,5	1,947	2,142	2,217	2,247	
25	1,083	1,142	1,186	1,217		
37,5	1,024	1,043	1,060	1,073		
50	1,000	1,000	1,000	1,000		

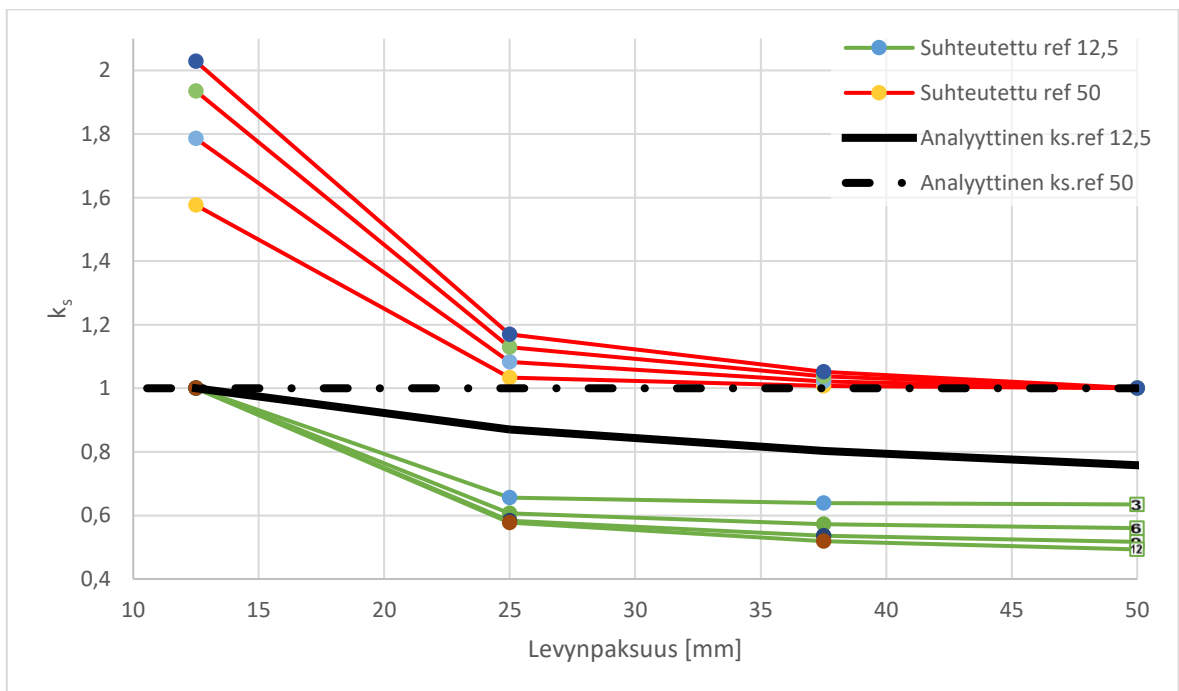
T-liitos, taivutuskuorma						
	a-mitta					
	a3	a6	a9	a12		
Levynpaksuus	12,5	1,000	1,000	1,000	1,000	Ref 12,5
	25	0,656	0,606	0,584	0,577	
	37,5	0,639	0,572	0,536	0,519	
	50	0,635	0,560	0,517	0,493	
		a3	a6	a9	a12	Ref 25
	12,5	1,525	1,649	1,713	1,733	
	25	1,000	1,000	1,000	1,000	
	37,5	0,975	0,944	0,918	0,899	
	50	0,968	0,924	0,885	0,855	
		a3	a6	a9	a12	Ref 37,5
	12,5	1,565	1,747	1,865	1,928	
	25	1,026	1,060	1,089	1,112	
	37,5	1,000	1,000	1,000	1,000	
	50	0,993	0,979	0,964	0,950	
		a3	a6	a9	a12	Ref 50
	12,5	1,576	1,785	1,935	2,028	
25	1,033	1,083	1,130	1,170		
37,5	1,007	1,022	1,037	1,052		
50	1,000	1,000	1,000	1,000		

X-liitos, kalvokuorma						
	a-mitta					
	a3	a6	a9	a12		
Levynpaksuus	12,5	1,000	1,000	1,000	1,000	Ref 12,5
	25	0,407	0,394	0,384	0,377	
	37,5	0,268	0,256	0,247	0,239	
	50	0,200	0,189	0,181	0,174	
		a3	a6	a9	a12	Ref 25
	12,5	2,455	2,538	2,602	2,653	
	25	1,000	1,000	1,000	1,000	
	37,5	0,659	0,650	0,642	0,635	
	50	0,491	0,480	0,472	0,463	
		a3	a6	a9	a12	Ref 37,5
	12,5	3,725	3,906	4,052	4,177	
	25	1,517	1,539	1,557	1,574	
	37,5	1,000	1,000	1,000	1,000	
	50	0,744	0,739	0,734	0,729	
		a3	a6	a9	a12	Ref 50
	12,5	5,005	5,283	5,519	5,732	
25	2,038	2,082	2,121	2,160		
37,5	1,344	1,353	1,362	1,372		
50	1,000	1,000	1,000	1,000		

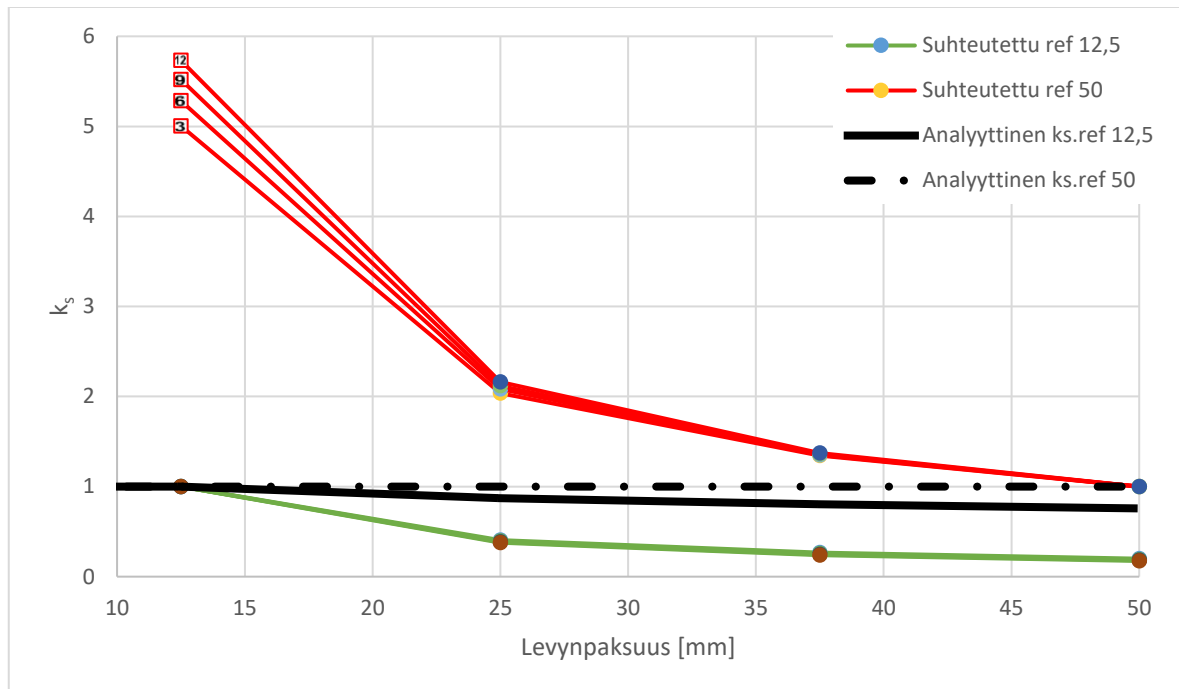
Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm



Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet T-liitoksen kalvokuormitustapauksessa, referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm.



Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet T-liitoksen taivutuskuormitustapauksessa, referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm.



Suhteutetut paksuuskorjauskertoimet X-liitoksen kalvokuormitustapauksessa, referenssipaksuuksilla 12,5 mm ja 50 mm.