

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

LUT School of Energy Systems

LUT Kone

BK10A0402 Kandidaatintyö

YHDELTÄ PUOLELTA HITSATUN T-LIITOKSEN JUUREN PUOLEN  
VÄSYMISKESTÄVYYDEN PARANTAMINEN

IMPROVEMENT OF FATIGUE STRENGTH AT THE ROOT OF A SINGLE-SIDE  
WELDED T-JOINT

Lappeenrannassa 20.4.2018

Jaakko Simonen

Tarkastaja TKT Timo Björk

Ohjaajat DI Antti Ahola

DI Tuomas Skriko

## TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
LUT School of Energy Systems  
LUT Kone

Jaakko Simonen

### **Yhdeltä puolelta hitsatun T-liitoksen juuren puolen väsymiskestävyyden parantaminen**

Kandidaatintyö

2018

35 sivua, 17 kuvaa, 5 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: TkT Timo Björk

Ohjaajat: DI Antti Ahola  
DI Tuomas Skriko

Hakusanat: aallotus, FE-analyysi, hitsaus, loviännitys, vaaputus

Useissa teräsrakenteissa kuormaa kantamattomat varusteluhitsit heikentävät rakenteen väsymiskestävyyttä oleellisesti, etenkin, kun kuormitus on kohtisuorassa hitsiä vastaan. Eräs menetelmä tällaisen liitoksen väsymiskestävyyden parantamiseksi on hitsin geometrian saattaminen aaltomaiseksi, jolloin väsymissärön suoraviivainen ydintyminen ja kasvu häiriintyvät. Toisaalta aallotuksen haittavaikutuksena on, että se nostaa hitsin loviännitystä paikallisesti aaltojen harjoilla. Useat aiemmin tehdyt tutkimukset kuitenkin osoittavat, että hitsin rajaviivan aallotus parantaa liitoksen kokonaisväsymiskestävyyttä huolimatta paikallisesta jännityksen noususta.

Aiempi tutkimus on suurelta osin keskittynyt hitsin rajaviivan tarkasteluun, eikä juuren puolen aallotuksen vaikutuksesta ole olemassa samassa määrin tutkimustietoa. Tässä kandidaatintyössä tutkitaan loviännitysten jakautumista poikittaiskuormitetun varusteluhitsin aallotetussa juuressa. Työssä selvitetään FE (Finite Element) -mallien avulla, voiko aallotus nostaa paikallisia loviännityshuippuja niin suuriksi, että väsymissärön ydintymisaika hitsissä lyhenisi merkittävästi, ja liitoksen kokonaiskestoikään ei tämän takia saataisi toivottua parannusta.

Tulokset osoittavat, että jännityshuiput jäävät verrattain pieniksi: aallotettujen hitsien loviännityshuiput ovat vain 1–7 % suurempia kuin vastaavien suorien hitsien, määräytyen hitsin geometriasta ja kuormitustapauksesta. Täten voidaan olettaa, ettei juuren aallotus merkittävästi edistä väsymissärön ydintymistä. Voidaan siis pitää hyvin todennäköisenä, että myös juuren puolella aallotus pidentää varusteluliitoksen kokonaiskestoikää väsyttävässä kuormituksessa.

## **ABSTRACT**

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

Jaakko Simonen

### **Improvement of fatigue strength at the root of a single-side welded T-joint**

Bachelor's thesis

2018

35 pages, 17 figures, 5 tables and 1 appendix

Examiner: D. sc. (Tech.) Timo Björk

Supervisors: M. sc. (Tech.) Antti Ahola  
M. sc. (Tech.) Tuomas Skriko

Keywords: FE-analysis, notch stress, waviness, weaving, welding

In many steel structures, non-load-carrying attachment welds essentially weaken the fatigue strength of the structure, particularly when transversely loaded. One method to improve the fatigue strength of such joints is to produce waviness to the weld geometry. Hence, the straightforward initiation and propagation of the fatigue crack are disturbed. As a drawback, the waviness of the weld toe rises the notch stress locally at the wave tips. However, several formerly conducted studies show that, despite the local stress increase, the waviness at the weld toe improves the total fatigue strength of the joint.

The former research has mainly focused on studying the weld toe. Thus, scientific knowledge on the effects of root side waviness does not exist to the same amount. In this bachelor's thesis, the distribution of notch stresses in the waved root of a transversely loaded attachment weld is studied. Utilizing FE (Finite Element) models, it is examined whether the waviness raises the local notch stress peaks to such an intense level that it would significantly shorten the initiation time of the fatigue crack – and thereby deteriorate the desired improvement of the total fatigue life of the joint.

The results show that the stress peaks remain relatively low: the notch stress peaks of waved welds are merely 1–7 % greater than the notch stresses of corresponding straight welds, depending on weld geometry and loading case. Therefore, it can be surmised that the root waviness does not significantly contribute to fatigue crack initiation. As a conclusion, it can be considered probable that that also root side weld waviness will improve the total fatigue life of an attachment joint.

## SISÄLLYSLUETTELO

### TIIVISTELMÄ

### ABSTRACT

### SISÄLLYSLUETTELO

### SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b> .....	6
	1.1 Tutkimusongelma.....	7
	1.2 Tutkimuksen tavoitteet.....	7
	1.3 Tutkimuskysymykset.....	7
	1.4 Menetelmät.....	8
	1.5 Rajaukset.....	8
<b>2</b>	<b>TERÄSRAKENTEEN VÄSYMINEN</b> .....	9
	2.1 Väsymisprosessi.....	9
	2.1.1 Särön ydintyminen.....	9
	2.1.2 Särönkasvu.....	10
	2.2 Hitsauksen vaikutus väsymiskestävyyteen.....	11
<b>3</b>	<b>ENS-MENETELMÄ</b> .....	12
	3.1 FE-mallille asetettavat vaatimukset.....	13
<b>4</b>	<b>HITSIN AALLOTUS</b> .....	15
	4.1 Suora varusteluhitsi.....	15
	4.2 Aallotuksen teoreettinen perusta.....	16
	4.3 Aallotus rajaviivalla.....	20
	4.4 Aallotus juuren puolella.....	21
<b>5</b>	<b>FE-ANALYYSIT</b> .....	23
	5.1 Materiaali ja geometria.....	23
	5.2 Kuorma ja reunaehdot.....	24
	5.3 FE-mallit.....	26
<b>6</b>	<b>TULOKSET</b> .....	27
<b>7</b>	<b>TULOSTEN ANALYSOINTI</b> .....	31
<b>8</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	33
	<b>LÄHTEET</b> .....	34
	<b>LIITTEET</b>	

LIITE I: Esimerkkejä ja yksityiskohtia FE-malleista.

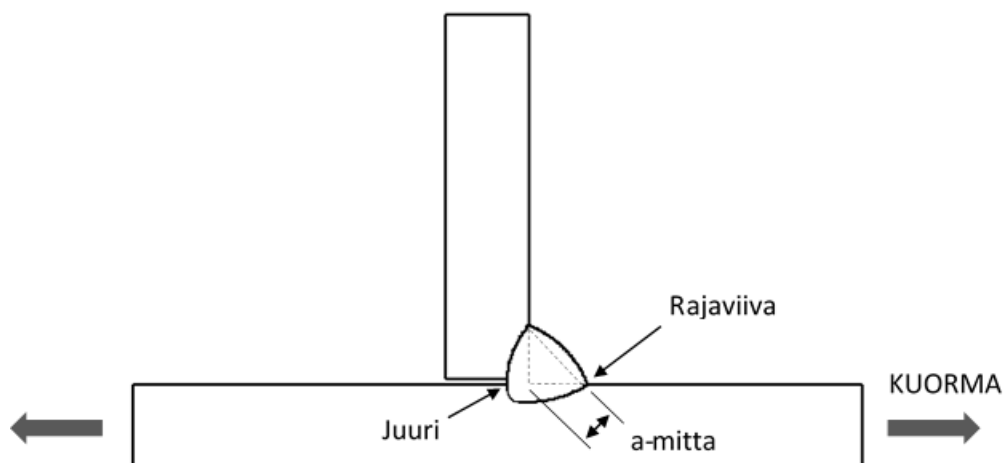
## SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

$a$	Särön koko [mm]
$d$	Amplitudi [mm]
$E$	Kimmoduuli [GPa]
$K$	Jännitysintensiteettikerroin [ $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$ ]
$M_k$	Hitsin lovijännityskerroin [-]
$S$	Rakenteen nimellinen jännitys [MPa]
$V$	Elementin mittasuhteparametri 1 [-]
$Y$	Särön muotokerroin [-]
$Z$	Elementin mittasuhteparametri 2 [-]
$\theta$	Särön etenemiskulma [ $^\circ$ ]
$\lambda$	Aallonpituus [mm]
$\nu$	Poissonin vakio [-]
$\Delta K$	Jännitysintensiteettikertoimen vaihteluväli [ $\text{MPa}\cdot\text{mm}^{0.5}$ ]
$\Delta\sigma_0$	Väsymisluku, kun särön etenemiskulma on 0 [MPa]
$\Delta\sigma_\theta$	Väsymisluku, kun särön etenemiskulma on $\theta$ [MPa]
$\chi$	Aaltokulma [ $^\circ$ ]
ENS	Effective Notch Stress, nimellinen lovijännitys
FE	Finite Element, äärellinen elementti
LEFM	Linear Elastic Fracture Mechanics, lineaaris-elastinen murtumismekaniikka
S-N	Jännitys-kestoikä

## 1 JOHDANTO

Väsyminen on teräsrakenteissa usein kriittisin vauriomuoto: on arvioitu, että 80–90 % kaikista metallisten rakenteiden murtumisista johtuu väsymisilmiöstä. Väsymisen merkitys korostuu, kun ultralujat teräkset valtaavat alaa konstruktio materiaaleina; ainepaksuudet pienenevät, minkä seurauksena rakenteiden käyttöjännitykset kasvavat. Silti ultralujat teräkset eivät monissakaan sovelluksissa ole väsymiskestävyydeltään mainittavasti parempia kuin perinteiset rakenneteräkset. Erityisen alttiita väsymisvaurioille ovat hitsatut rakenteet niiden sisältämien materiaalivirheiden, jäännösjännitysten ja hitsien lovivaikutusten vuoksi. Näin ollen hitsiliitosten väsymiskestävyyden parantaminen on alati kiinnostava tutkimusalue.

Yhdeltä puolelta hitsatun, kuormaa kantamattoman pienaliitoksen tapauksessa hitsin juuren puoli on väsymisen kannalta kriittinen alue: juuren puolella vaikuttavat yhdessä sekä hitsauksen aiheuttamat mikrosäröt että huomattava jännityskeskittymä (kuva 1). Koska juuren geometria on suoraviivainen levyn leveyssuunnassa, pääsee väsymissärö kasvamaan esteettä poikki levyn kohtisuorassa kuormaa vastaan. Useat tehdyt tutkimukset osoittavatkin, että särönkasvua voidaan hillitä muuttamalla hitsin geometriaa epäsäännöllisemmäksi eli aallottamalla.



**Kuva 1.** Kuormaa kantamaton pienaliitos.

Lähes kaikki tehdyt tutkimukset käsittelevät kuitenkin väsymistä hitsin rajaviivalla. Juuren aallotuksen vaikutuksesta ei ole tehty tutkimusta samassa laajuudessa, vaikka yhdeltä puolelta hitsattuun pienaliitokseen väsymismurtuma tyypillisesti syntyy juuren puolelle, ja tällöin rajaviivan väsymiskestävyuden parantamisesta on vain vähän tai ei lainkaan hyötyä. Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan, voidaanko hitsin juuren aallotuksella parantaa yhdeltä puolelta hitsatun, poikittaiskuormitetun varusteluliitoksen väsymiskestoikää.

### 1.1 Tutkimusongelma

Rajaviivan puolta koskevien tutkimusten perusteella voidaan olettaa, että geometrian aallotus pidentää väsymissärön särönkasvuvaihetta myös juuren puolella. Yhtä hyvin voidaan kuitenkin olettaa, että aallotus kasvattaa hitsin lovivaikutusta: aallotetun juuren lovijännitysmaksimit ovat oletettavasti korkeampia kuin suoran hitsin. Tällöin juuren aallotus voisi lyhentää särön ydintymisaikaa, ja näin ollen on kyseenalaista, voidaanko aallottamalla parantaa liitoksen kokonaiskestoikää.

### 1.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän tutkimuksen tavoite on selvittää lovijännitys jakaumat kohtisuoralla kuormituksella sekä suoran että aallotetun pienahitsin juuren puolella. Näitä jakaumia keskenään vertailemalla arvioidaan aallotetun hitsin väsymissärön ydintymisvaiheen kestoa suhteessa suoraan hitsiin. Edelleen arvioidaan aallotuksen vaikutusta liitoksen laskennalliseen kokonaiskestoikään.

### 1.3 Tutkimuskysymykset

Oleellisimmat kysymykset, joihin tämä tutkimus pyrkii vastaamaan, ovat

- 1) Voidaanko juuren aallotuksella parantaa kuormaa kantamattoman pienaliitoksen väsymiskestävyyttä?
- 2) Lyhentääkö aallotus liitoksen ydintymisikää?
- 3) Kuinka suuria jännityskeskittymät ovat aallotetussa juuressa verrattuna suoraan juureen?

Tutkimuksen mallinnustulokset antavat suoraan vastauksen kysymykseen 3. Mallinnustulosten analysoinnin sekä kirjallisuuskatsauksen avulla pyritään löytämään vastaukset kysymyksiin 2 ja 1.

#### 1.4 Menetelmät

Pienaliitoksesta luodaan FE-mallit (Finite Element) usealla eri geometrialla, joissa hitsien juuret on mallinnettu aaltomaiseksi. Malleista tehdään ENS-menetelmän eli tehollisen lovijännitysmenetelmän mukaiset, ja niiden avulla määritetään lovijännitys jakaumat kunkin hitsin juuren puolella. Liitoksesta luodaan vastaavanlaiset FE-mallit suorilla hitsien juurilla, joista vastaavasti määritetään lovijännitys jakaumat juuren puolella, minkä jälkeen suorilla ja aallotettuja jakaumia verrataan keskenään jännityshuippujen suhteellisten erojen arvioimiseksi. Lisäksi tehdään lyhyt kirjallisuuskatsaus liittyen tutkimuksiin pienahitsin aallotuksesta rajaviivan puolella.

#### 1.5 Rajaukset

Tutkimuksessa käsitellään ainoastaan veto- tai taivutuskuormitettua, yhdeltä puolelta hitsattua levypienaliitosta, jonka kuormitus on hitsiin nähden kohtisuorassa. Hitsi ei kanna kuormaa, ja liitettävien levyjen ainevahvuus on 8 mm. Särönkasvua ei mallinneta, vaan määritetään ainoastaan jännityshuiput ydintymisvaiheen pituuden arvioimiseksi. Tässä tutkimuksessa analysoidaan rakennetta ainoastaan FE-mallien avulla, eikä laboratorionkokeita sisällytetä tähän tutkimukseen.

## 2 TERÄSRAKENTEEN VÄSYMINEN

Materiaalin väsymisellä tarkoitetaan särön syntymistä ja asteittaista kasvamista materiaalissa sekä viimein materiaalin murtumista särön saavutettua kriittisen koon. Väsymistä tapahtuu vaihtelevan kuormituksen alla, myös silloin, kun kuormituksen korkeimmatkin jännityspiikit jäävät alle materiaalin murtolujuuden. (Niemi & Kemppi 1993, s. 229.) On arvioitu, että 80–90 % tapahtuneista teräsrakenteiden murtumisvaurioista on johtunut materiaalin väsymisestä, joten teräsrakenteiden rakenneosien mitoittaminen väsymistä vastaan on oleellisen tärkeää (Niemi 2003, s. 92).

### 2.1 Väsymisprosessi

Väsymisilmiö koostuu kolmesta päävaiheesta, jotka ovat väsymissärön ydintyminen, särönkasvu ja lopullinen murtuma. Ydintymisvaiheessa kuormanvaihtelu synnyttää pienen alkusärön alun perin säröttömään materiaaliin. Ydintymisen jälkeen seuraa särönkasvuvaihe, jolloin särö tyypillisesti kasvaa suurinta pääjännitystä vastaan kohtisuorassa tasossa. (Berge 1985, s. 160–161.) Loppumurtuma tapahtuu, kun särö on edennyt niin pitkälle, ettei jäännöspoikkileikkaus enää kestä suurinta hetkellistä räsitusta (Niemi & Kemppi 1993, s. 238).

#### 2.1.1 Särön ydintyminen

Väsymissärön ydintymisellä tarkoitetaan pienen särön syntymistä materiaalin pinnalle, kun materiaali altistuu toistuvalla, vaihtelevan suuntaisella plastiselle muodonmuutokselle. Makroskooppisella tasolla tarkasteltuna vaihtelevat venymät kumoavat toisensa joka kuormanvaihtosyklillä, mutta mikroskooppisella tasolla venymän vaihtelu kerryttää materiaaliin mikrovaurioita, jotka kuormanvaihtojen jatkuessa johtavat yhtenäiseen makrotason vaurioon. Tätä makrotason vauriota kutsutaan ydintyneeksi väsymissäröksi. (Berge 1985, s. 160–161.) Väsymissärö pyrkii ydintymään kohtaan, jossa jo valmiiksi on materiaalivirhe, kuten epäpuhtaus, vierasainesulkeuma, liukutaso, pintanaarmu tai hitsausvirhe (Dowling 2013, s. 436).

Särön ydintymisvaiheen pituus on riippuvainen paikallisesti vaikuttavasta jännitysvaihtelun amplitudista: amplitudin kasvaessa ydintymisaika lyhenee (Dowling 2013, s. 435–439).

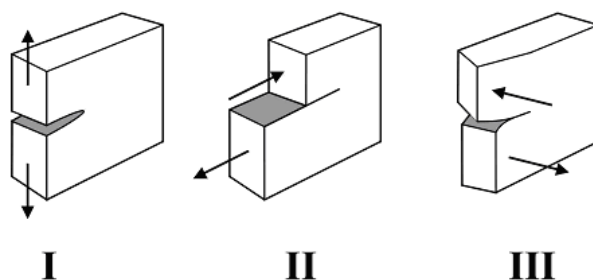
Mahdollisten materiaalivirheiden kokoluokka vaikuttaa myös ydintymisikään (luku 2.2). Särön ydintymisvaiheen katsotaan päättyvän, kun särö on sen kokoinen, että lineaaris-elastista murtumismekaniikkaa voidaan alkaa soveltaa särönkasvun mallintamiseen. Tyypillinen särön ydintymisraja on noin 0,1 mm. (Niemi & Kemppi 1993, s. 256.)

### 2.1.2 Särönkasvu

Ydintymisen jälkeen särö pyrkii kasvamaan tasossa, joka on kohtisuorassa suurimpaan pääjännitykseen nähden (Berge 1985, s. 161). Väsymisprosessin tässä vaiheessa särön kasvunopeutta voidaan ennustaa lineaaris-elastisen murtumismekaniikan (LEFM) avulla. LEFM:n mukaan särön kasvunopeus  $da/dN$  voidaan määrittää yhtälöstä (Dowling 2003, 564–567):

$$\frac{da}{dN} = C \cdot (\Delta K)^m \quad (1)$$

jossa  $C$  ja  $m$  ovat materiaalivakioita, ja  $\Delta K$  on jännitysintensiiteettikertoimen  $K$  tehollinen vaihteluväli. Jännitysintensiiteettikerroin on riippuvainen paikallisen jännityksen suuruudesta, särön koosta ja geometriasta sekä särön avautumismuodosta (kuva 2). Avautumismuoto taas määräytyy särön kärjen asennosta kuormitukseen nähden kuvan 2 mukaisesti. (Dowling 2013, s. 339–344.)



**Kuva 2.** Särön avautumismuodot. (Sanford 2003, s. 57)

Kullekin avautumismuodolle voidaan määrittää oma jännitysintensiiteettikertoimensa ( $K_I$ ,  $K_{II}$  tai  $K_{III}$ ). Useampi kuin yksi avautumismuoto voi vaikuttaa samanaikaisesti yhdessä särössä. (Dowling 2013, s. 344.) Avautumismuoto I dominoi useimmiten särönkasvua: jos särössä vaikuttaa avautumismuoto II, III tai useamman avautumismuodon yhdistelmä, särö pyrkii muuttamaan kulkuaan siten, että se pääsee kasvamaan avautumismuodolla I. Tämän

takia rakenteiden LEFM-analyyseissa yleensä riittää jännitysintensiiteettikertoimen  $K_I$  määrittäminen. (Sanford 2003, s. 57.)

Jännitysintensiiteettikerroin  $K_I$  kalvokuormitetun hitsin lovivaikutuksen alueella määritetään yhtälöstä (Hobbacher 1993, s. 173):

$$K_I = M_k(a) \cdot S \cdot Y(a) \cdot \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

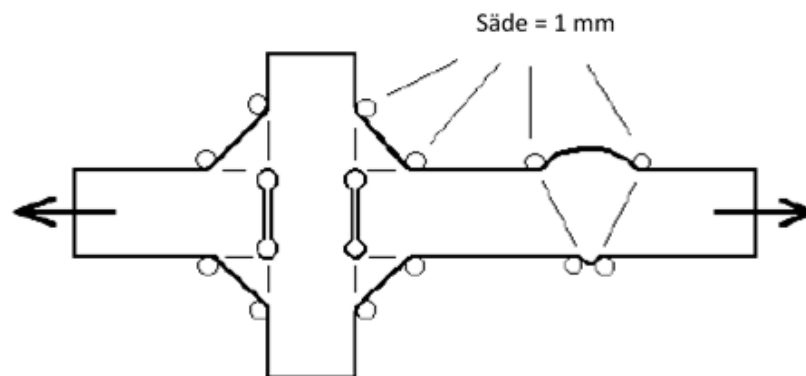
Yhtälössä 2  $M_k(a)$  on hitsin lovijännityskerroin,  $S$  on etäällä hitsistä vaikuttava nimellinen jännitys,  $Y(a)$  on särön muotokerroin ja  $a$  on särön syvyys. Pienillä  $a$ :n arvoilla tulo  $M_k(a) \cdot S$  edustaa hitsin lovijännitystä särön välittömässä läheisyydessä. Kerroin  $M_k(a)$  pienenee särön kasvaessa syvemmälle perusaineeseen, joten hitsin lovivaikutus jännitysintensiiteettikertoimen suuruuteen on melko vähäinen syvän särön tapauksessa (Hobbacher 1993, s. 173–175). Yhtälön 2 nojalla voidaan kuitenkin todeta, että hitsin juurella olevan särön jännitysintensiiteettikerroin on lähes suoraan verrannollinen hitsin lovijännitykseen ja särön pituuden neliöjuureen, kun tarkastellaan tilannetta lähellä perusaineen pintaa.

## 2.2 Hitsauksen vaikutus väsymiskestävyyteen

Hitsaaminen aiheuttaa käytännössä aina rakenteeseen materiaali- ja muotovirheitä: jälkikäsittelemättömän hitsin rajaviivalla ja juurella on tavallisesti jopa 0,2–0,3 mm syvyisiä vikoja, jollaisen pohjalle tyypillisesti ydintyy kasvukelpoinen alkusärö. (Niemi, Kilkki, Poutiainen & Lihavainen 2004, s. 11). Jos hitsattu rakenne altistuu vaihtelevalle kuormitukselle, väsymissärö lähtee tyypillisesti kasvamaan tällaisesta hitsauksen aiheuttamasta alkuvaiheesta, jolloin ydintymisvaihe voi jäädä huomattavan lyhyeksi. Tällöin rakenteen kokonaiskestoikä koostuu lähes yksinomaan särönkasvuvaiheesta. (Niemi & Kemppi 1993, s. 229.) Hitsaus tuottaa tavallisesti materiaaliin myös korkeita vetojännityksiä, jotka vaikuttavat väsymiskestävyyteen heikentävästi (Kirkhope et al. 1999, s. 456).

### 3 ENS-MENETELMÄ

ENS-menetelmä eli tehollisen lovijännityksen menetelmä on tarkoitettu hitsin rajaviivalta tai juuresta alkavan väsymisen tarkasteluun. Menetelmässä määritetään hitsin lovijännitys joko analyttisin laskukaavoin tai FE-mallinnusta hyödyntäen. Jos hyödynnetään FE-mallinnusta, hitsin rajaviivan tai juuren kohdalle mallinnetaan fiktiivinen pyöritys. Hitsin juuressa on usein tarkoituksenmukaista olettaa todellisen loven pyörityssäteen olevan 0 mm, jolloin fiktiivinen pyöritys tehdään 1 mm säteellä (kuva 3). Lovijännitys saadaan lukemalla FE-mallista pyörityksen alueelta suurin pääjännitys tai von Misesin jännitys, määräytyen siitä, kumpaa jännitys-kestoikä -käyrää eli S-N -käyrää halutaan käyttää. (Hobbacher 2008, s. 34; Baumgartner 2017, s. 461.)

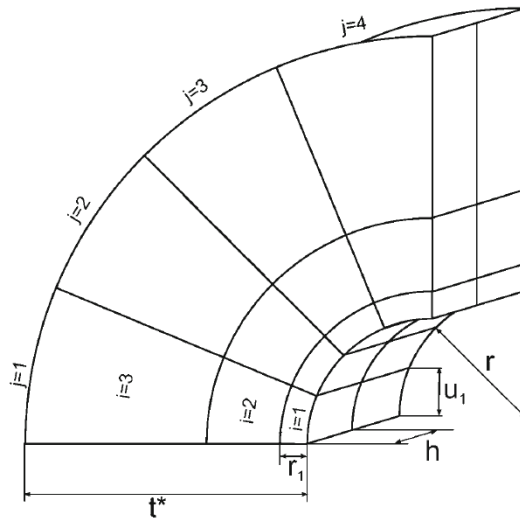


**Kuva 3.** ENS-menetelmän fiktiiviset pyöritykset (Hobbacher 2008, s. 35).

Kun rakennetta analysoidaan vaihtuvalla kuormituksella, pystytään lovijännityksen minimi- ja maksimiarvojen perusteella määrittämään lovijännityksen tehollinen vaihteluväli. Tämän jälkeen jännitysvaihtelun perusteella luetaan S-N -käyrältä liitoksen kestoikä. Tässä opinnäytetyössä rakenteen kestoikää ei määritetä, koska ei voida olettaa, että ENS-menetelmän S-N -käyrät sellaisenaan soveltuisivat aaltomaisen hitsin kestoian arviointiin. ENS-menetelmää käytetään tässä työssä ainoastaan maksimipääjännitys jakauman määrittämiseksi juuren puolella.

### 3.1 FE-mallille asetettavat vaatimukset

Kun lovi­jännitystä määritetään ENS-menetelmällä, sekä riittävä elementtitiheys että riittävä elementtien laatu on varmistettava. Erityisesti paikoissa, joissa jännitysgradientti on suuri – kuten tehollisen pyörityksen sisäkehällä ja aivan sen läheisyydessä – on tärkeää, että verkotus noudattaa oikeita mittasuhteita (Baumgartner & Bruder 2013, s. 137). Kuvassa 4 on esitetty ENS-menetelmän tarkkuuden kannalta tärkeät elementtien mitat ja mittasuhteet.



**Kuva 4.** Elementtien mittasuhteet. (Baumgartner & Bruder 2013, s. 138)

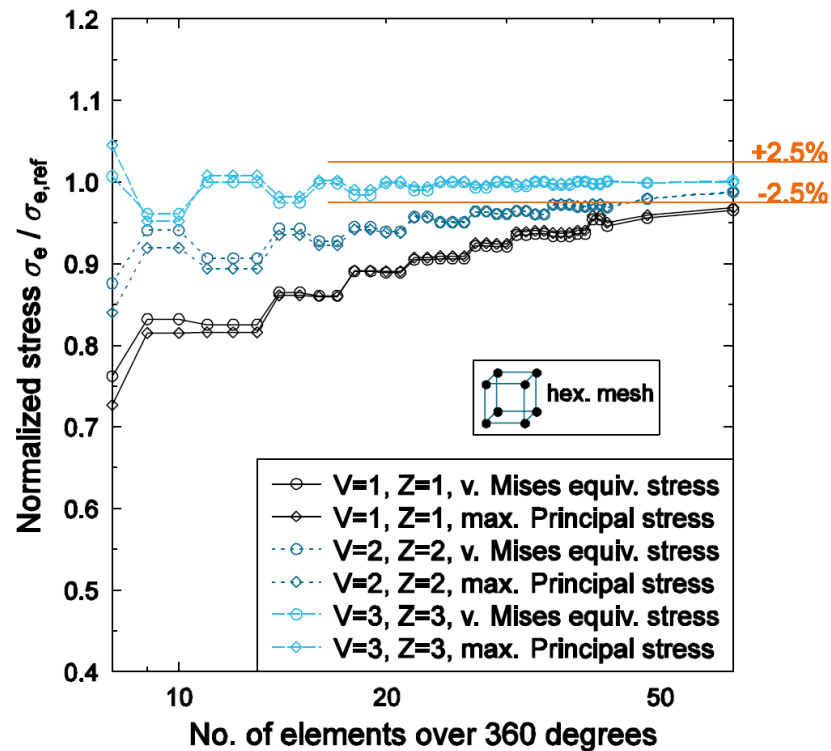
Elementtien mittasuhteista voidaan määrittää parametrit  $V$  ja  $Z$  seuraavista yhtälöistä (Baumgartner & Bruder 2013, s. 138):

$$V = \frac{u_1}{r_1} \quad (3)$$

$$Z = \frac{r_{i+1} \cdot u_i}{r_i \cdot u_{i+1}} \quad (4)$$

joissa  $u_i$  on mielivaltaisen elementin tangenciaalinen pituus,  
 $u_1$  on sisäkehän elementin tangenciaalinen pituus,  
 $r_i$  on mielivaltaisen elementin säteen suuntainen pituus ja  
 $r_1$  on sisäkehän elementin säteen suuntainen pituus.

Mallin tarkkuus, eli sen kyky mallintaa todellista jännitys-venymätilaa tarkasti, riippuu ensisijaisesti mittasuhteiparametreista  $V$  ja  $Z$  sekä sisäkehän elementtien määrästä kuvan 5 havainnollistamalla tavalla.



**Kuva 5.** FE-mallin tarkkuuden riippuvuus elementtien mittasuhteista ja määrästä. (Baumgartner & Bruder 2013, s. 143)

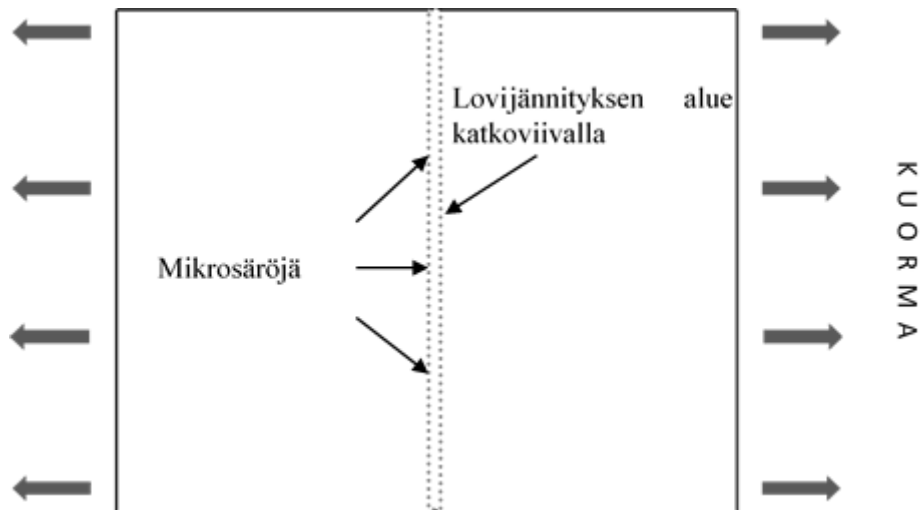
Kuten nähdään kuvasta 5, parametrien  $V$  ja  $Z$  tulisi olla suurempia kuin 1, ja tarvittava sisäkehän elementtien määrä riippuu selkeästi mainituista parametreista. Arvoilla  $V = 1$  ja  $Z = 1$  vaaditaan jo yli 50 sisäkehän elementtiä, jotta tarkkuus  $\pm 2,5\%$  voitaisiin saavuttaa.

## 4 HITSIN AALLOTUS

Tässä luvussa tarkastellaan suoran varusteluhitsin väsymisominaisuuksia, minkä jälkeen luodaan lyhyt katsaus hitsin aallotukseen ja aiheesta tehtyyn tutkimukseen.

### 4.1 Suora varusteluhitsi

Varusteluhitsin tapauksessa hitsi itse ei kannata kuormaa, vaan se liittyy kuormituksen kannalta toissijaisen rakenneosan kuormitettavaan rakenteeseen (Niemi & Kemppi 1993, s. 20). Hitsi muodostaa peruslevyn geometriaan jyrkän epäjatkuvuuskohdan, josta aiheutuu huomattava jännityskeskittymä eli lovijännitys. Hitsauksen aiheuttamat mikrosäröt taas sijaitsevat juuri tällä lovijännityksen alueella. Kuva 6 esittää hitsiä ylhäältä päin kuvattuna.



**Kuva 6.** Hitsin juuren puolen olosuhteet.

Kohtisuoralla kuormituksella lovijännitys esiintyy samalla suoralla poikki koko levyn (kuva 6). Tällöin väsymissärö pääsee esteettä kasvamaan suoraviivaisesti suurinta pääjännitystä vastaan kohtisuorassa tasossa. Kasvu on häiriötöntä levyn reunalle saakka, joten rakenne tarjoaa ihanteelliset olosuhteet särönkasvulle. Lisäksi hitsin juuren puoli on useimpien väsymiskestävyyttä parantavien jälkikäsittelyjen tavoittamattomissa. Voidaan todeta, että liitos on väsymiskestävyydeltään hyvin heikko, ja juuren puoli on ongelmallinen.

Kaiken kaikkiaan hitsin juuren puolella vaikuttavat useimmiten ainakin seuraavat väsymiskestävyyttä heikentävät tekijät:

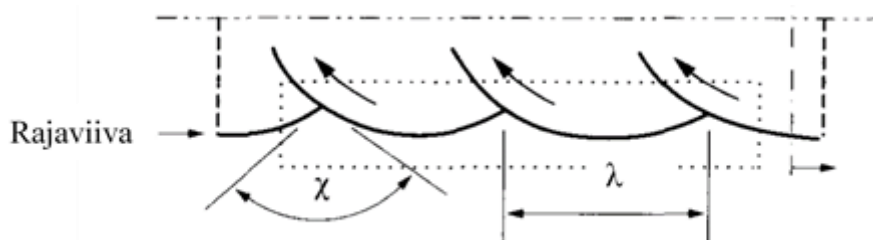
- 1) suuri lovijännityskeskittymä
- 2) huomattava vetojäännösjännitys
- 3) hitsauksen aiheuttamat mikrosäröt
- 4) mahdolliset makrotason hitsausvirheet
- 5) perusaineen heikkeneminen hitsauslämmön muuttaman mikrorakenteen johdosta
- 6) korroosio
- 7) lovijännitys jakauman suoraviivaisuus.

(Haagensen 1985, s. 261–262; Otegui, Mohaupt & Burns 1991, s. 57.)

Näistä tekijöistä useimpia ei pystytä juuren puolella lainkaan eliminoimaan. Tämän työn lähestymistapa on pyrkiä minimoimaan tekijä 7, eli lovijännitys jakauman suoraviivaisuus. Tämä voidaan toteuttaa muuttamalla hitsin geometriaa aaltomaiseksi eli aallottamalla.

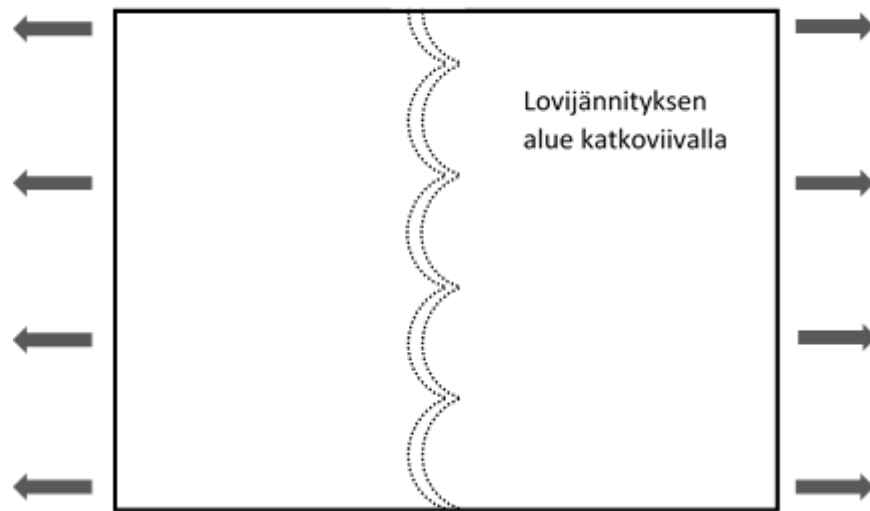
#### 4.2 Aallotuksen teoreettinen perusta

Hitsaustekniikka mahdollistaa aaltomaisen hitsin hitsaamisen: esimerkiksi MIG-hitsauksessa polttimen kuljetusliikkeen suunnan tai nopeuden varioinnilla voidaan tuottaa aaltomainen hitsi. Näin aallotettu hitsi noudattaa pääpiirteittäin kuvan 7 mukaista muotoa. Hitsin rajaviivan aaltomaisuutta voidaan kuvata aaltokulman  $\chi$  sekä aallonpituuden  $\lambda$  avulla (Chapetti & Otegui 1997, s. 668).



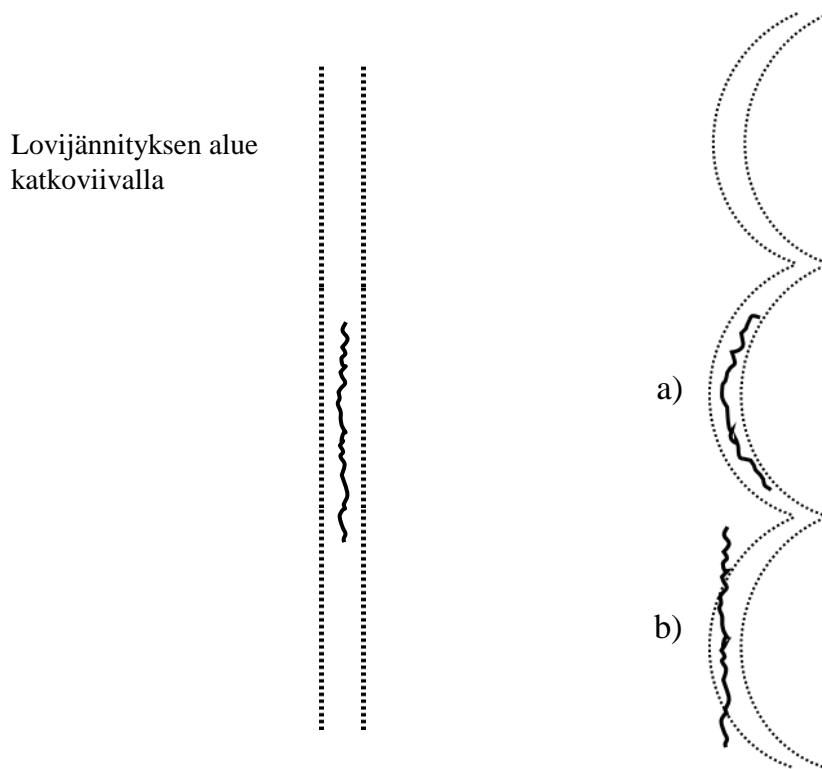
**Kuva 7.** Vaaputetun hitsin rajaviivan geometria. (Chapetti & Otegui 1997, s. 668)

Kuten luvussa 4.1 todettiin, eräs liitoksen väsymislujutta heikentävä tekijä on lovijännitys jakauman suoraviivaisuus, jolloin väsymissärö kasvaa esteettä poikki levyn avautumismuodolla I. Aallottamalla hitsiä saadaan lovijännitys jakauma pääpiirteiltään kuvan 8 mukaiseksi (liite 1).



**Kuva 8.** Aallotetun hitsin lovijännitys jakauma.

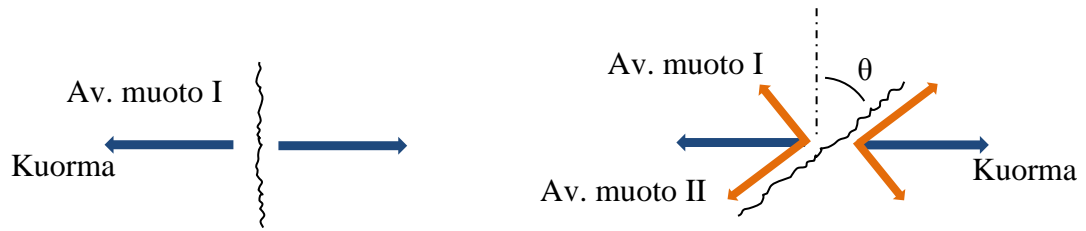
Suoran hitsin tapauksessa särön kasvusuunta on yksikäsitteinen, kun taas aallotetussa hitsissä särö voi edetä kahdella eri tavalla (kuva 9). Aallotetussa hitsissä lovijännityksen maksimi syntyy aallon harjalle, joten harja on särön todennäköisin ydintymiskohta. Harjalta särö voi lähteä kasvamaan joko tavalla a tai b. Tapauksessa b särö kasvaa kohtisuorassa suunnassa kuormaa vastaan, ja avautumismuoto I dominoi. Tapauksessa a särö lähtee kasvamaan noudattaen hitsin aaltomuotoa, jolloin särö pysyy lovijännityksen alueella. (Chapetti & Otegui 1997, s. 670.) Lovijännitys jakauman aaltomaisuuden on todettu hillitsevän särön kasvua huolimatta siitä, onko etenemismuoto a vai b (Matsumoto, Hashimoto, Honda & Morita 1979, s. 14–15).



**Kuva 9.** Särönkasvu suorassa hitsissä (vas.) ja aallotetussa hitsissä (oik.)

Syy särönkasvun hidastuvuuteen tapauksessa b on ilmeinen: särön kärki kulkeutuu pois lovijännityksen alueelta, jolloin jännitys särön kärjen välittömässä läheisyydessä pienenee. Tällöin myös särön jännitysintensiiviteettikerroin perusaineen pinnan tuntumassa pienenee yhtälön 2 mukaisen riippuvuuden vallitessa, jolloin särönkasvukin hidastuu lähellä pintaa yhtälön 1 mukaisesti. Koska kasvunopeus pinnan tuntumassa hidastuu, särö pyrkii kasvamaan perusaineeseen päin paksuussuunnassa, missä taas hitsin lovivaikutus on vähemmän intensiivinen (Skriko, Björk & Nykänen 2004, s. 384).

Tapauksessa a särö etenee lovijännityksen alueella, mutta se ei pysy kohtisuorassa kuormitusta vastaan, jolloin avautumismuoto ei enää ole puhtaasti I (kuva 10). Kuvan oikeanpuoleisessa tapauksessa säröön kohdistuva kuorma koostuu särön suuntaisesta komponentista ja säröä vastaan kohtisuorasta komponentista. Tällöin levyn pinnalla särön kärjessä vaikuttavat yhdessä avautumismuodot I ja II (Dowling 2013, s. 367–369).



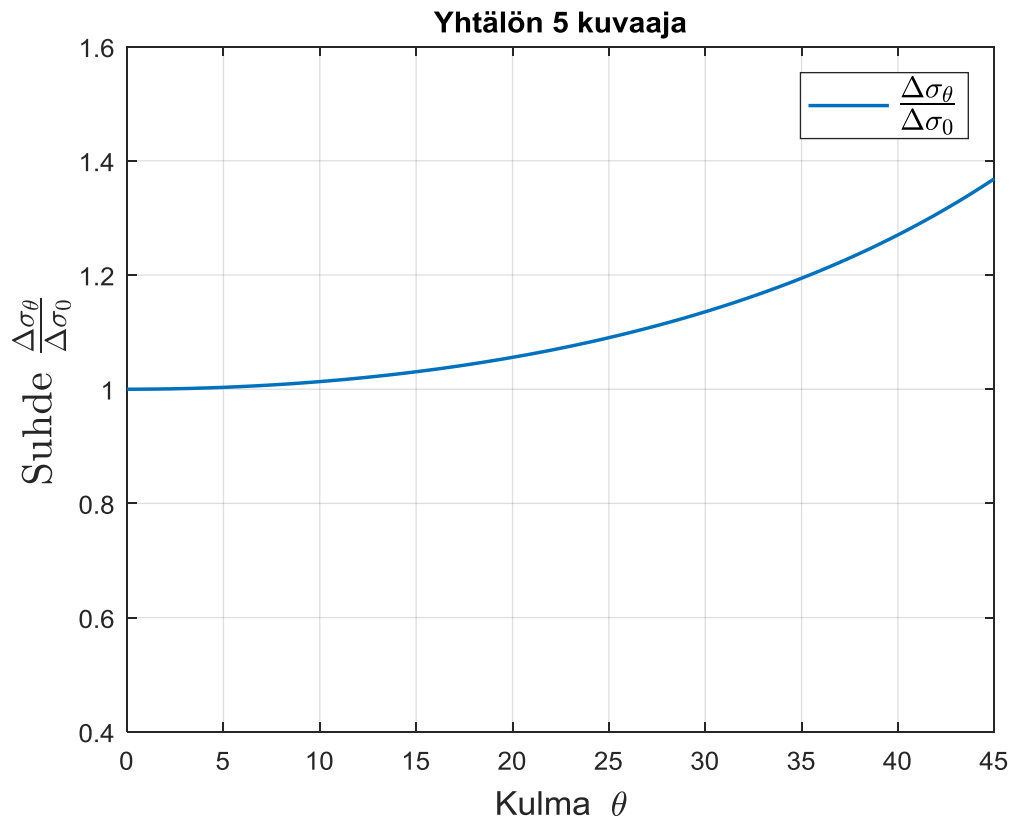
**Kuva 10.** Särön avautumismuodon riippuvuus asemasta.

Kun  $\theta > 0$ , avautumismuodon I aiheuttava komponentti on pienempi kuin kohtisuoran särön tapauksessa. Matsumoton et al. (1979, s. 14) mukaan tällaisen avautumismuotojen yhteisvaikutuksen tapauksessa detaljin väsymiskestävyyttä voidaan arvioida yhtälöllä

$$\frac{\Delta\sigma_{\theta}}{\Delta\sigma_0} = \frac{1}{\cos\theta} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1356 \sin^2\theta}} \quad (5)$$

Yhtälössä  $\Delta\sigma_0$  on väsymislujuus tietyllä syklimäärällä, kun kulma on 0 eli särö kasvaa kohtisuorassa kuormaa vastaan.  $\Delta\sigma_{\theta}$  on väsymislujuus samalla syklimäärällä, kun särön ja kuorman välinen kulma on  $\theta$ .

Matsumoton et al. (1979, s. 14–15) saavuttamat kokeelliset tulokset noudattavat yhtälöä 5 kohtalaisella tarkkuudella. Kuvassa 11 on havainnollistettu yhtälön 5 mukaista jännityssuhdetta kulman  $\theta$  arvoilla 0–45°, kun särö etenee kuormituksen nähdessä vakiokulmassa  $\theta$  koko kuormanvaihtohistorian ajan. Kuvan perusteella esimerkiksi särön kasvaessa 40° vakiokulmalla voitaisiin sallia yli 25 % suurempi jännitysvaihtelu, kun kestoikävaatimus on sama kuin kohtisuoralla kuormituksella. Särön kasvaessa hitsin aaltomaista geometriaa pitkin kulma  $\theta$  muuttuu koko ajan, joten yhtälöä 5 ei voida suoraan soveltaa aaltomaisen hitsin väsymiskestävyyden arviointiin. Yhtälö havainnollistaa kuitenkin sen, että särön kasvaminen hidastuu, kun särön kärki kääntyy pois kuormaa vastaan kohtisuorasta asemasta.



**Kuva 11.** Väsymiskestävyys kulman  $\theta$  funktiona.

Yhtälö 5 ei myöskään ota huomioon eri aallonharjoilta kasvavien väsymissäröjen yhtymistä ja siitä johtuvaa kestoiän laskua. Tosin säröjen yhtyminenkin vaikeutuu, jos särö lähtee kasvamaan kuvan 9 kohdan a osoittamalla tavalla: yhtyminen tapahtuu aallonpohjan alueella, missä säröt ovat toisiinsa nähden vinossa asemassa, joten yhtyminen on hitaampaa kuin yhdensuuntaisilla säröillä (Chapetti & Otegui 1997, s. 671). Yhtälö 5 ei myöskään ota huomioon lovijännityksen laskua harjalta pohjalle päin edetessä. Tämä lovijännityksen lasku tuo näin ollen lisäkestävyyttä kuvan 11 ennakoimaan väsymislujuuden lisäykseen.

#### 4.3 Aallotus rajaviivalla

Jo 1970-luvun lopulla Matsumoto et al. (1979) tutkivat hitsin rajaviivan aallotuksen vaikutusta hitsiliitoksen väsymiskestävyteen. Aallotus toteutettiin vaaputtamalla valokaarta MAG-hitsauksessa. Tutkimus osoitti aallotuksen parantavan väsymiskestävyyttä aaltokulman  $\chi$  funktiona (kuva 7): pienillä  $\chi$ :n arvoilla eli jyrkällä aallotuksella tulokset olivat parempia kuin loivilla kulmilla.

Chapetti & Otegui (1995) vertailivat aallotustekniikoita aallotuksen tuottamiseksi päällehitsatun hitsin rajaviivalle MAG-hitsausprosessilla. Vertailtavat tekniikat olivat valokaaren pyöritys sekä hitsausnopeuden ja -jännitteen vaihtelu. Tulokset osoittavat, että valokaarta pyörittämällä luotu rajaviivan aaltomaisuus paransi eniten hitsin väsymiskestävyyttä. Laaja aaltokuvio tuotti parhaan tuloksen, pidentäen lähinnä särönkasvuikää. Parhaassa tapauksessa kokonaiskestoiän lisäys oli 50 %. Särö eteni aallotettua rajaviivaa pitkin.

Chapetti & Otegui (1997) Tekivät jatkotutkimusta valokaaren pyöritysmenetelmästä ja löysivät optimaalisen aallotuskulman hitsin rajaviivalla (kuva 7). Pienillä aallotuskulmilla säröjen yhtyminen aaltojen pohjalla vaikeutui huomattavasti, kaikkein pienimmillä kulmilla särö kasvoi poikki aallon, ja suurilla ( $\chi \geq 100^\circ$ ) kulmilla särö taas kasvoi aallotettua rajaviivaa pitkin (kuva 9). Paras särönkasvun hidastuvuus ja kestoiän lisäys todettiin  $100^\circ$  kulmalla, jolloin särö vielä seurasi aaltomuotoa pohjalle saakka. Kestoiän lisäys oli parhaimmillaan noin 100 %. Tutkimus tehtiin päällehitsatuille kappaleille.

Skriko et al. (2014) laajensivat tutkimusta ultralujiin teräksiin. Kuormaa kantamattoman pienahitsin rajaviivalle luotiin aaltomaisuus valokaarta vaaputtamalla. Tutkimus osoittaa, että aaltomaisuus paransi väsymiskestävyyttä varusteluliitoksen rajaviivalla myös teräksellä, jonka myötölujuus ylittää 900 MPa. Särö eteni kohtisuorassa kuormitusta vastaan. Aaltomaisuus hillitsi särönkasvua perusaineen pinnalla, ohjaten säröä kasvamaan lähinnä perusaineen paksuussuunnassa. Ydintymisaika muodosti suhteellisen suuren osuuden väsymiskestävyydestä, ja rajaviivan pyöristyssäteen merkitys osoittautui suureksi.

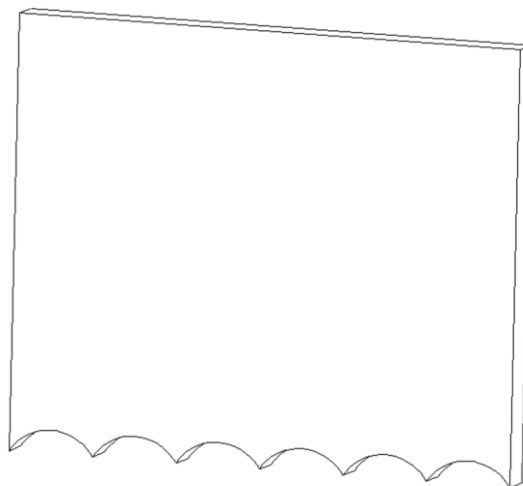
#### 4.4 Aallotus juuren puolella

Juuren puolella hitsin muodon hallinta on vaikeaa. Rajaviivalla voidaan liittymän jouhevuuteen vaikuttaa hitsausparametrien valinnalla tai jälkityöstöllä, tai poistaa vetojäännösjännityksiä vasartamalla (Kirkhope et al., s. 448–449). Pienahitsin juuri puolestaan on luoksepääsemättömissä, ja näin ollen keinot väsymiskestävyyden parantamiseksi juuren puolella ovat hyvin rajalliset.

Aallotuksen vaikutuksesta väsymiskestävyyteen rajaviivan puolella on saatu hyviä tuloksia. Tutkimus on osoittanut aallotuksen parantavan liitoksen väsymiskestävyyttä aallotus-

geometriasta riippuen (luku 4.3). Juuren puolen aallotusta ei ole tutkittu samassa laajuudessa, mahdollisesti siksi, että juuren geometriaa on vaikeampi manipuloida kuin rajaviivan. Rajaviivan puolelle tehtyjen tutkimusten perusteella voidaan kuitenkin olettaa, että menetelmällä voidaan parantaa väsymiskestävyyttä myös juuren puolella, jos syntyvät jännityshuiput eivät ole liian suuret. Juuren parantelun hyöty on ilmeinen, koska jos väsymisvaurio syntyy juuren puolelle, on kyseisen hitsin rajaviivan parantelusta ollut vain vähän hyötyä.

Pienahitsin juuren aallotus on periaatteessa yksinkertaista: vaihtelemalla hitsin tunkeumaa jaksottaisesti saadaan aikaiseksi aaltomainen juuri. Tekniikoita tämän toteuttamiseksi ei kuitenkaan tiedetä paljonkaan sovelletun. Yksi mahdollinen tekniikka on valokaaren vaaputus: kun valokaaren kohdistusta muutellaan, vaihtelee tunkeuman suunta. Tällöin myös hitsautumissyvyys vaihtelee, ja juuresta tulee aaltomainen. Toinen mahdollinen tekniikka on hitsausvirran vaihtelu, jolloin tunkeuma luonnollisesti vaihtelee hitsausvirran funktiona. Kolmas vaihtoehto on levyn reunan leikkaaminen aaltomaiseksi (kuva 12); kun pohjalevyyn hitsataan aaltomaisen reunan omaava levy, hitsauksen ilmarako vaihtelee, jolloin vaihtelee myös tunkeuma, ja saadaan aikaan aaltomainen hitsin juuri.



**Kuva 12.** Aaltolaitaiseksi leikattu levy.

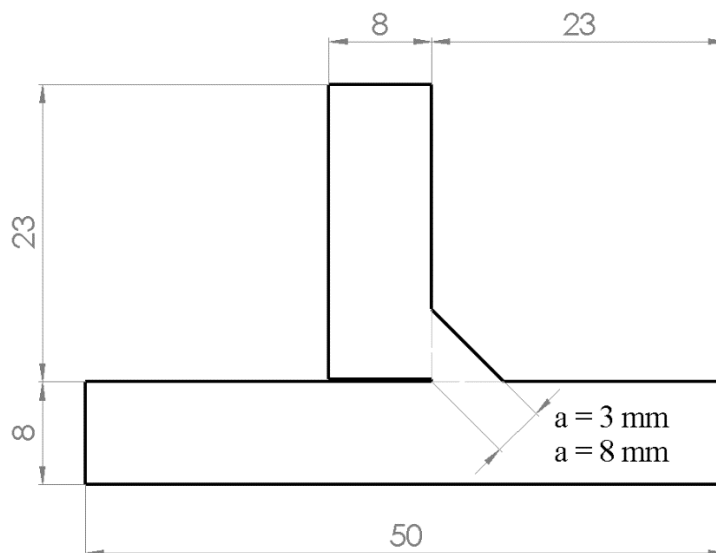
Aaltomainen muoto on helppo leikata levyyn mekanisoidulla laser- tai plasmaleikkauksella. Tässä opinnäytetyössä juuren aallotusta ei toteuteta käytännössä, vaan aallotettu juuri ainoastaan mallinnetaan FE-elementeillä.

## 5 FE-ANALYYSIT

Kuten luvussa 1.2 todettiin, tämän tutkimuksen tavoite on selvittää lovijännitysjaakaumat sekä suoran että aallotetun pienahitsin juuren puolella ja verrata näitä toisiinsa, jotta voitaisiin arvioida aallotuksen vaikutusta liitoksen väsymiskestoikään. Tätä tarkoitusta varten luotiin ENS-menetelmän mukaiset FE-mallit varusteluhitsistä aallotetulla juurella usealla geometrialla, ja vastaavasti vertailumallit samoista liitoksista sillä erotuksella, että vertailumalleissa hitsin juuri oli suora. Liitoksen geometria ja elementtiverkotus olivat aallotusta lukuun ottamatta täysin identtiset aallotettujen mallien ja vastaavien vertailumallien kesken (liite 1). Mallit analysoitiin sekä veto- että taivutuskuormalla. Tämän jälkeen tarkasteltiin, kuinka paljon aallotettujen hitsien lovijännitysjaakaumat poikkesivat vertailumalliensa jakaumista.

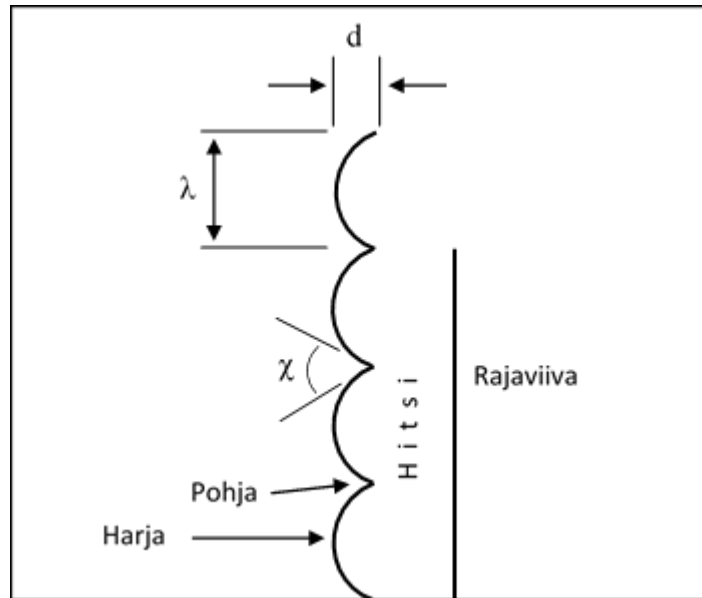
### 5.1 Materiaali ja geometria

FE-malleissa käytettiin teräksen materiaalivakioita (kimmomoduuli  $E = 210$  GPa, Poissonin vakio  $\nu = 0,30$ ). Analysoitava geometria oli pääpiirteiltään kuvan 13 mukainen.



**Kuva 13.** Analysoitavan geometrian pääpiirteet.

Juuren aaltomaisuus määriteltiin tässä työssä kolmella parametrilla: aallonpituudella  $\lambda$ , aallotuskulmalla  $\chi$  ja amplitudilla  $d$  (kuva 14). Aaltokuvion kaarevan osan keskikohtaa kutsutaan tässä dokumentissa *harjaksi* ja kahden aallon yhtymäkohtaa *pohjaksi*.



**Kuva 14.** Aallotusparametrit.

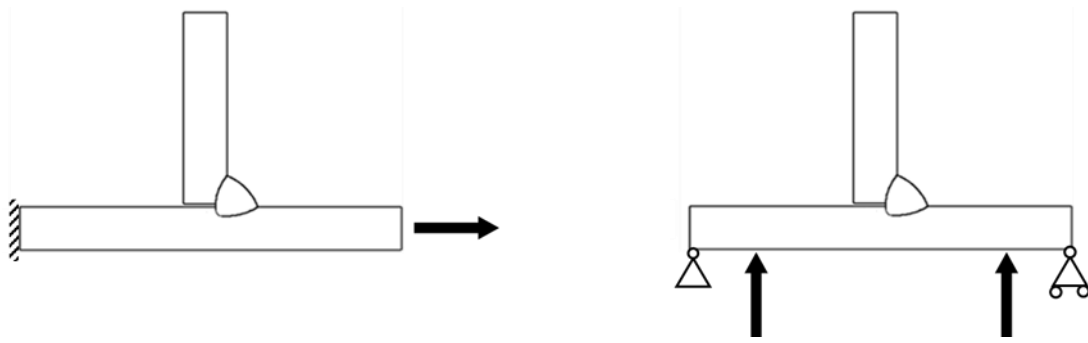
Rakennetta varioitiin käyttämällä kahta eri a-mittaa (3 mm ja 8 mm) sekä kahta eri aallotusgeometriaa: laajaa aallotusta sekä tiheää aallotusta (taulukko 1). Lisäksi analysoitiin suorat hitsit molemmilla a-mitoilla.

*Taulukko 1. Aallotusgeometriat.*

	$\lambda$	$\chi$	$d$
Laaja aallotus	13,33 mm	85°	3 mm
Tiheä aallotus	4 mm	128°	0,5 mm
Suora hitsi	-	-	-

## 5.2 Kuorma ja reunaehdot

Ensin liitokset analysoitiin vetokuormituksella siten, että nimellinen kalvojäännitys levyssä etäällä hitsistä oli 1 MPa (kuva 15).



**Kuva 15.** Kuormitustapaukset: veto (vas.) ja taivutus (oik.)

Seuraavaksi liitokset analysoitiin taivutuskuormituksella siten, että hitsin puoli oli vetojännityksellä, ja nimellinen jännitys levyn pinnalla etäällä hitsistä oli 1 MPa. Taivutuskuorma luotiin nelipistetaivutuksella, jolloin saavutettiin tasainen momenttijakauma hitsin läheisyydessä (kuva 15).

Yhteensä 12 FE-analyysia suoritettiin, ja analyysit jaettiin geometrian ja kuormituksen perusteella neljään koesarjaan (taulukko 2).

*Taulukko 2. Koesarjat.*

Koesarja	Kuorma	a-mitta	Aallotusgeometria
1	Veto	3 mm	laaja aallotus
			tiheä aallotus
			suora hitsi
2	Veto	8 mm	laaja aallotus
			tiheä aallotus
			suora hitsi
3	Taivutus	3 mm	laaja aallotus
			tiheä aallotus
			suora hitsi
4	Taivutus	8 mm	laaja aallotus
			tiheä aallotus
			suora hitsi

### 5.3 FE-mallit

FE-mallit luotiin IIW:n suosituksia mukaillen käyttäen 1 mm tehollista pyöristystä hitsin juuren puolella (liite 1). Geometria verkotettiin 8-solmuisilla heksa-tilavuuselementeillä, joilla on lineaarinen muotofunktio. Verkotukselle saadaan yhtälöiden 3 ja 4 (luku 3.1) perusteella mittasuhteiparametreiksi  $V = 0,65$  ja  $Z = 1$ . Käytetyssä verkotuksessa oli 48 elementtiä pyöristyksen sisäkehällä. Kuvan 4 (luku 3.1) perusteella malli tuottaa noin 5 % virheen Baumgartnerin & Bruderin (2013, s. 140–141) käyttämään vertailumalliin verrattuna. Virhe on tarpeettoman suuri. Toisaalta tämän tutkimuksen FE-mallien elementtiverkotukset ovat keskenään identtiset joka mallissa niin pitkälti kuin aallotus sallii. Näin ollen voidaan olettaa, että mallinnusvirhe on samansuuruinen ja -suuntainen joka mallissa, jolloin verkotuksen heikohko laatu ei juurikaan vääristä suhteellisia jännityshuippueroja mallien välillä.

FE-laskenta toteutettiin staattisena, lineaarisena analyysinä. Elementtien maksimijännitykset ekstrapoloitiin solmuille, ja suurimman jännityksen alueelta eristettiin solmurivi koko hitsin pituudelta juuren muotoa seuraten. Tältä solmuriviltä luettiin suurin pääjännitys jokaisesta solmusta.

## 6 TULOKSET

Hitsien juuren puolella vaikuttavat lovijännitysten maksimi-arvot eri geometria- ja kuormitustapauksille on taulukoitu taulukkoon 3. Nämä jännitysmaksimit on saatu 1 MPa:n nimellisellä kuormituksella, joten jännitysmaksimien luku-arvot ovat samalla hitsin juuren lovijännityskertoimet kyseisille hitseille.

*Taulukko 3. Lovijännitysten huippuarvot (MPa), kun kuorma on 1 MPa.*

Geometria	Veto	Taivutus
a-mitta 3 mm		
laaja aallotus	3,62	3,29
tiheä aallotus	3,57	3,22
suora hitsi	3,51	3,18
a-mitta 8 mm		
laaja aallotus	3,71	3,42
tiheä aallotus	3,60	3,27
suora hitsi	3,57	3,20

Suorien ja aallotettujen hitsien vertailu vetokuormituksella on listattu taulukkoon 4, jossa vasemmassa sarakkeessa on aallotetun hitsin geometria, keskimmaisessä sarakkeessa aallotetun hitsin jännitysmaksimin suhteellinen ero suoraan hitsiin sekä oikeassa sarakkeessa aallon kärjen lovijännityksen suhde aallonpohjan lovijännitykseen. Oikea sarake osoittaa siis, kuinka kyseisellä geometrialla lovijännitys laskee kuljettaessa aallon harjalta pohjalle. Taulukkoon 5 on vastaavasti listattu arvot taivutuskuormitukselle.

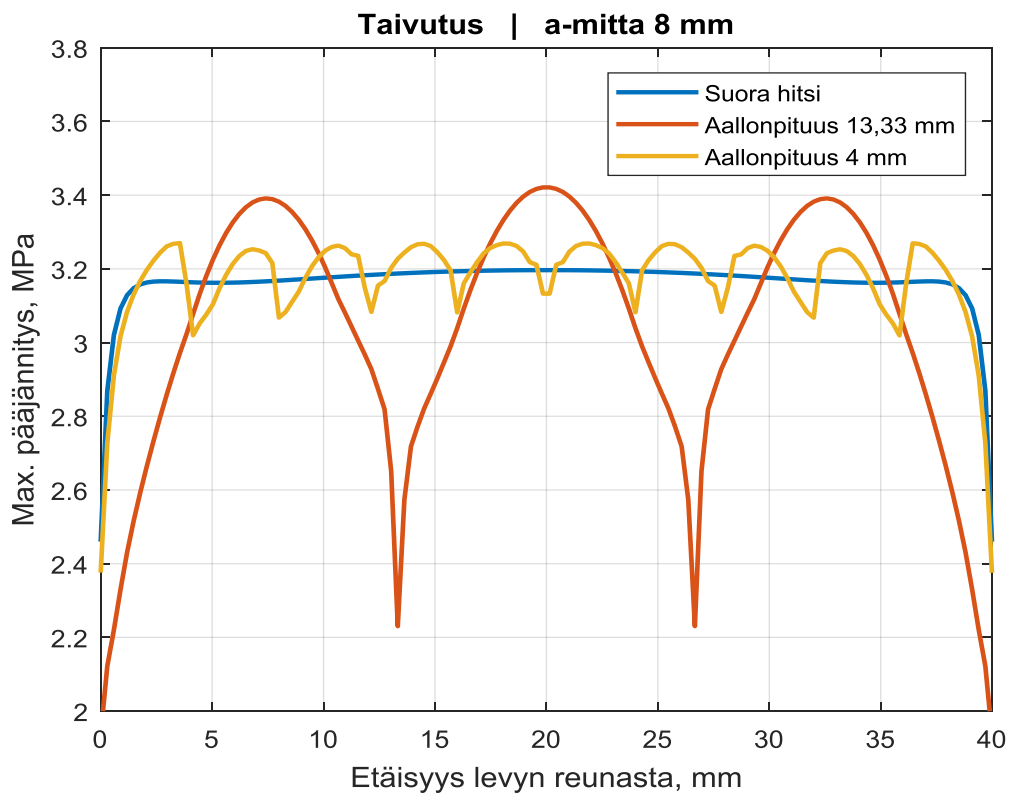
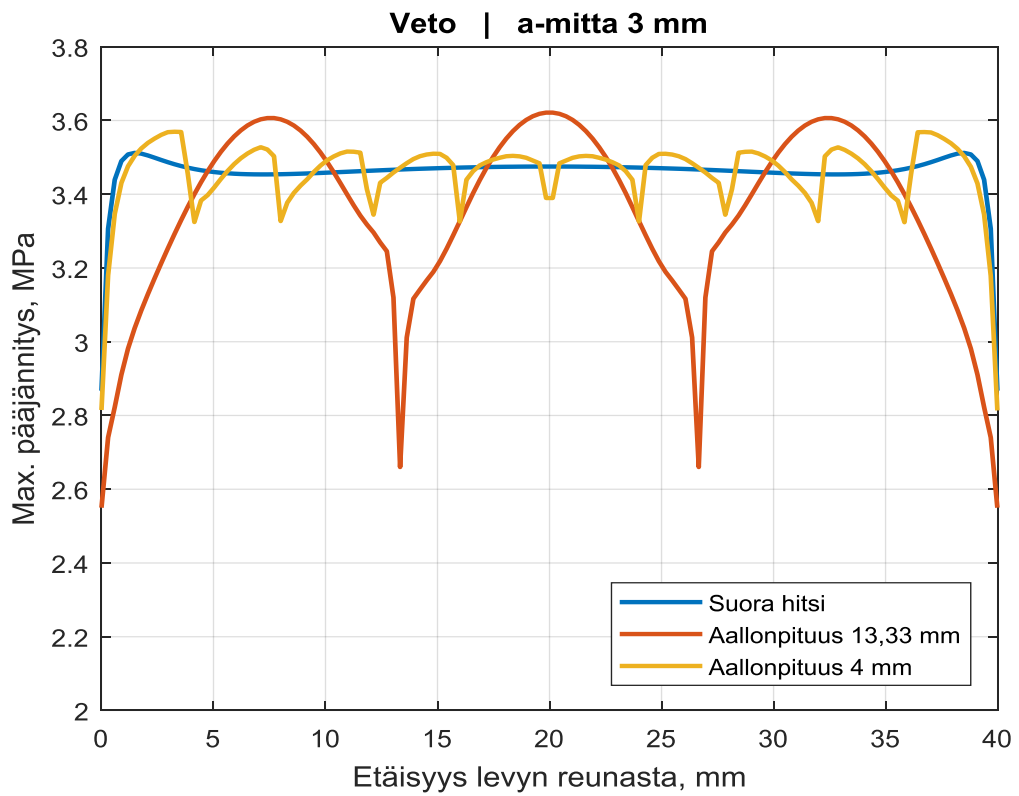
Taulukko 4. Jännitysmaksimien vertailu vetokuormituksella.

Veto		
Geometria	Ero suoraan hitsiin	Pohja / harja
a-mitta 3 mm		
laaja aallotus	+3,1 %	74 %
tiheä aallotus	+1,6 %	93 %
a-mitta 8 mm		
laaja aallotus	+3,9 %	73 %
tiheä aallotus	+0,8 %	94 %

Taulukko 5. Jännitysmaksimien vertailu taivutuskuormituksella.

Taivutus		
Geometria	Ero suoraan hitsiin	Pohja / harja
a-mitta 3 mm		
laaja aallotus	+3,5 %	69 %
tiheä aallotus	+1,1 %	94 %
a-mitta 8 mm		
laaja aallotus	+7,0 %	65 %
tiheä aallotus	+2,3 %	94 %

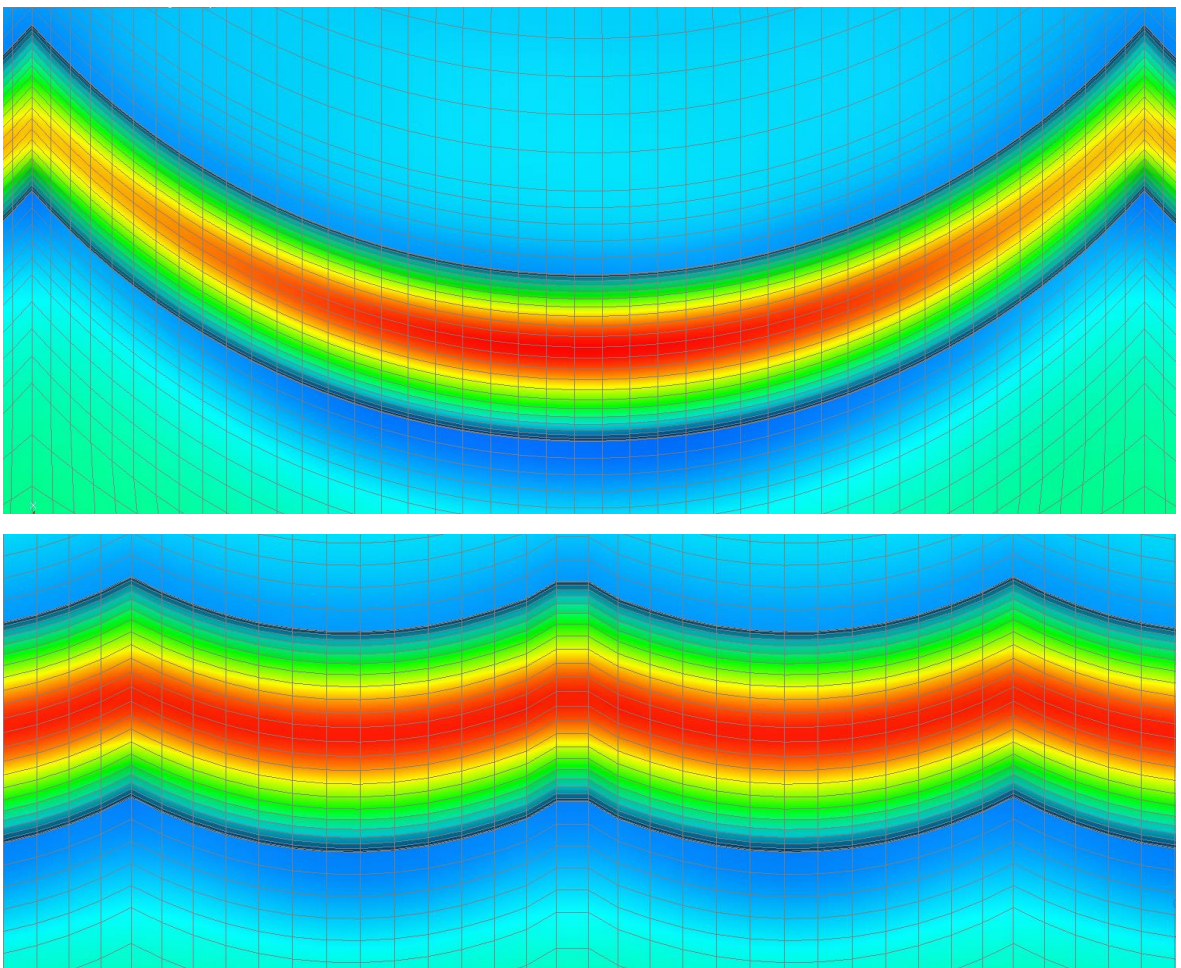
Kuvassa 16 on esitetty kahden koesarjan lovijännitys jakaumat etäisyyden funktiona levyn reunasta: Ylemmässä osassa esitetään koesarjan 1 jakaumat (vetokuormitus, a-mitta 3 mm) ja alemmassa vastaavasti koesarjan 4 jakaumat (taivutuskuormitus, a-mitta 8 mm). Punainen ja keltainen käyrä kuvaavat aallotettujen hitsien jakaumia, ja sininen käyrä suoran hitsin jakaumaa.



**Kuva 16.** Lovijännitysjaakaumat vedolla ja 3 mm a-mitalla (ylhällä) sekä taivutuksella ja 8 mm a-mitalla (alhaalla)

Muiden koesarjojen tulokset ovat hyvin samanmuotoiset, ja ne asettuvat ääri- ja keskiarvoiltaan koesarjojen 1 ja 4 välille.

Kuvassa 17 on FE-mallin jännitysjaakauma laajalla aallotuksella, 8 mm a-mitalla ja taivutuskuormalla (ylhäällä) sekä tiheällä aallotuksella, 3 mm a-mitalla ja vetokuormalla (alhaalla). Kuva 17 havainnollistaa saman kuin kuva 16: Lovijännitys on suurimmillaan aallon harjalla ja pienenee pohjaa kohti mentäessä.



**Kuva 17.** FE-mallin lovijännitysjaakauma laajalla aaltokuvilla (ylhäällä) ja tiheällä aaltokuvilla (alhaalla).

Suurin harjan ja pohjan suhteellinen ero, 35 %, saavutettiin taivutuskuormalla, 8 mm a-mitalla ja laajemmalla aaltokuvilla. Pienin ero eli tasaisin jännitysjaakauma taas saavutettiin vetokuormalla, 3 mm a-mitalla ja tiheämmällä aaltokuvilla.

## 7 TULOSTEN ANALYSOINTI

Hitsin lovijännitysmaksimi juuren puolella kasvaa hieman aallotuksen seurauksena. Merkittävin kasvu tapahtui taivutuskuormalla, suurella a-mitalla ja laajalla aallotuksella, jolloin suurin lovijännityshuippu oli 7,0 % suurempi kuin vastaavan suoran hitsin. Pienin ero suoraan hitsiin taas todettiin vetokuormituksella, pienellä a-mitalla ja tiheällä aallotuksella, jolloin jännityksen nousu jäi alle yhden prosentin. Kaikilla geometrioilla juuren aallotus kuitenkin nosti hitsin lovivaikutusta. Kaikkien analyysien keskiarvo jännityksen nousulle oli +2,9 %. A-mitan kasvattaminen 3 mm:stä 8 mm:iin nosti aallotettujen hitsien lovivaikutusta 0,8–4 %, joten pienellä a-mitalla aallotuksen haittavaikutukset ovat vähäisimmät.

Aallotetussa juuressa suurin lovijännitys sijaitsee aallon harjalla, ja jännitys pienenee aallon pohjaa kohti; laajalla aallotuksella aallonpohjan jännitys oli pienimmillään vain 65 % aallonharjan jännityksestä. Tiheällä aallotuksella ero harjan ja pohjan välillä on kuitenkin melko mitätön: pohjan jännitykset ovat 93–94 % harjan jännityshuipusta.

Laajalla aallotuksella ( $\chi = 85^\circ$ ) aaltokulma on selvästi pienempi kuin  $100^\circ$ , joten tällä geometrialla voidaan odottaa särön kääntyvän jossain vaiheessa pois lovijännitysalueelta aaltojen väliselle alueelle, kasvamaan poikki aallon (Chapetti & Otegui 1997, s. 673). FE-mallinnuksen tulokset osoittavat, että laajalla aaltokuviolla tapahtuu eniten lovijännityshuipun nousua etenkin taivutuskuormalla, mutta toisaalta lovijännitys pienenee noin kahteen kolmasosaan aallon pohjaa kohti edetessä, mikä on omiaan hillitsemään särönkasvua perusaineen pinnan tuntumassa silloin, kun särö vielä kasvaa aaltomuotoa pitkin. Kun särön kärki on edennyt aaltojen väliselle alueelle, hitsin lovivaikutus ei enää juurikaan yllä siihen, jolloin aallotuksen hyöty on ilmeinen. Näin ollen on todennäköistä, että laajalla aallotusgeometrialla liitoksen kestoikä paranee huolimatta 3–7 %:n lovijännityksen noususta. Rajaviivatutkimusten perusteella kestoian nousu voi olla jopa 100 %.

Tiheällä aallotuksella ( $\chi = 128^\circ$ ) aaltokulma on selvästi suurempi kuin  $100^\circ$ , jolloin voidaan odottaa särön kasvavan juuren aaltomuotoa noudattaen aallonpohjalle asti. Lovijännityshuipun kasvu tällä geometrialla on noin 1–2 % eli kohtalaisen pieni, mutta

jännitys jakaumakin on melko tasainen; kun särö kasvaa aaltomaista lovijännitysalueita seuraten, on lovijännitys koko ajan vähintään 93 % harjan maksimista, joten särö ei pääse pakenemaan korkeaa lovijännitystä. Tällä aallotuskulmalla särö olisi jyrkimmillään 26° kulmassa suurimpaan kuormitukseen nähden, jolloin yhtälön 5 mukaan vinolla asemalla on jo jonkin verran hillitsevää vaikutusta särönkasvun tehokkuuteen. Eri suunnista kasvavien säröjen yhtyminen tapahtuu aallonpohjassa, missä säröt ovat 128° kulmassa toisiinsa nähden. Säröjen yhtyminen on täten hitaampaa kuin yhdensuuntaisilla säröillä, mikä tutkitusti pidentää hitsin kestoikää. Säröjen yhtymissyvyys noin 130° kulmalla on kuitenkin vain 30–35 % optimaalisen 100° kulman yhtymissyvyydestä (Chapetti & Otegui 1997, s. 673). Näin ollen tiheällä aallotuksella kestoajan lisäys jäänee selvästi jälkeen Chapetti & Oteguin (1997, s. 670) saavuttamasta 100 % maksimilisäyksestä.

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Kuormaa kantamattoman, yhdeltä puolelta hitsatun varusteluhitsin juuren aallotus kasvattaa hitsin lovivaikutusta hieman, mutta ei merkittävästi. Suurimmillaankin lovijännitys-maksimin kasvu oli vain noin 7 %. Syitä suhteellisen alhaisiin jännityshuippuihin voivat olla aallotuksen aiheuttama hitsin tunkeuman kasvu sekä hitsin liittymiskulman paikallinen loiveneminen aallonharjalla.

Koska aallotus ei lisää hitsin lovivaikutusta kovinkaan suuresti, voidaan olettaa, ettei se myöskään merkittävästi lyhennä väsymissärön ydintymisaikaa. Lisäksi aallotus todennäköisesti hillitsee särönkasvua: useat rajaviivan puolta koskevat tutkimukset osoittavat, että aallotus ohjaa särön joko kasvamaan pois maksimijännitysalueelta tai kääntymään vähemmän epäedulliseen kulmaan kuormitukseen nähden. Lisäksi, jos särö etenee aaltomuodon mukaisesti, pienenee säröön vaikuttava lovijännitys aallonpohjaa lähestyttäessä, ja eri suunnista kasvavien säröjen yhtyminen aallonpohjalla on hidasta säröjen välisen kulman vuoksi. Täten odotettavissa on, että juuren aallotuksen seurauksena hitsin kokonaiskestoikä paranee.

Jatkossa juuren aallotuksen vaikutusta kannattaisi tutkia laboratoriokokein käytännön hitsaus- ja väsytystesteillä. Laboratoriokokeisiin olisi hyvä sisällyttää useampia aallotusgeometrioita ja -tekniikoita niiden keskinäisen paremmuuden vertailemiseksi.

## LÄHTEET

Baumgartner, J. 2017. Review and considerations on the fatigue assessment of welded joints using reference radii. *International Journal of Fatigue*, vol. 101, s. 459–468.

Baumgartner, J. & Bruder, T. 2013. An efficient meshing approach for the calculation of notch stresses. *Weld World*, vol. 57:1, s. 137–145.

Berge, S. 1985. Basic fatigue properties of welded joints. Teoksessa: Almar-Næss, A. (toim.) 1985. *Fatigue handbook: Offshore steel structures*. Trondheim: Tapir Forlag. 520 s.

Chapetti, M.D. & Otegui, J.L. 1995. Importance of toe irregularity for fatigue resistance of automatic welds. *International Journal of Fatigue*, vol. 17:8, s. 531–538.

Chapetti, M.D. & Otegui, J.L. 1997. Controlled toe waviness as a means to increase fatigue resistance of automatic welds in transverse loading. *International Journal of Fatigue*, vol. 19:10, s. 667–675.

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

Haagensen, P.J. 1985. Improving the Fatigue Strength of Welded Joints. Teoksessa: Almar-Næss, A. (toim.) 1985. *Fatigue handbook: Offshore steel structures*. Trondheim: Tapir Forlag. 520 s.

Hobbacher, A. 1993. Stress intensity factors of welded joints. *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 46:2, s. 173–182.

Hobbacher, A. 2008. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. International Institute of Welding, doc. XIII-2151r4-07/XV-1254r4-07.

Kirkhope, K.J., Bell, R., Caron, L., Basu, R.I. & Ma, K.T. 1999. Weld detail fatigue life improvement techniques. Part 1: review. *Marine Structures*, vol. 12:6, s. 447–474.

Matsumoto, J., Hashimoto, I., Honda, A. & Morita, T. 1979. Influence of the Weaving of Weld Line on the Fatigue Strength. *Journal of the Japan Welding Society*, vol. 48:5, s. 325–332.

Niemi, E. 2003. *Levyrakenteiden suunnittelu*. Helsinki: Teknologiateollisuus Ry. 136 s.

Niemi, E. & Kemppe, J. 1993. *Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet*. Helsinki: Painatuskeskus Oy. 337 s.

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

Otegui, J.L., Mohaupt, U.H. & Burns, D.J. 1991. Effect of weld process on early growth of fatigue cracks in steel T joints. *International Journal of Fatigue*, vol.13:1, s. 45–58.

Sanford, R.J. 2003. *Principles of Fracture Mechanics*. Upper Saddle River: Prentice Hall. 404 s.

Skriko, T., Björk, T. & Nykänen, T. 2014. Effects of weaving technique on the fatigue strength of transverse loaded fillet welds made of ultra-high-strength steel. *Weld World*, vol. 58:3, s. 377–387.

Esimerkkejä ja yksityiskohtia FE-malleista

