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

EPÄSYMMETRISEN PIENAHITSIN VAIKUTUS JÄNNITYSKONSENTRAATIOIHIN HITSIN RAJAVIIVALLA

EFFECT OF ASYMMETRIC FILLET WELD ON STRESS CONCENTRATIONS AT WELD TOE

Lappeenrannassa 23.10.2019
Mikael Ekholm
Tarkastaja DI Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

LUT-Yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Mikael Ekholm

Epäsymmetrisen pienahitsin vaikutus jännityskonsentraatioihin hitsin rajaviivalla

Kandidaatintyö

2019

28 sivua, 23 kuvaa, 5 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: DI Antti Ahola

Ohjaaja: DI Antti Ahola

Hakusanat: FE-analyysi, ENS-menetelmä, Hot Spot -menetelmä, jännityskonsentraatio

Työssä tutkitaan X-liitoksen pienahitsien ja liitoslevyjen epäsymmetrisyyden vaikutusta hitsin rajaviivalla vallitseviin jännityskonsentraatioihin. Työssä hyödynnetään tehollisen lovijännityksen ja rakenteellisen jännityksen menetelmiä. Tavoitteena on tutkia epäsymmetrisyyden vaikutusta rakenteen jännityskonsentraatioihin ja pohtia sen vaikutusta rakenteen väsymiskestävyyteen.

Tutkimus kohdistetaan hitsin rajaviivalle ja hitsin juurenpuoli jätetään huomioimatta. Työssä saatujen tulosten perusteella voidaan pohtia epäsymmetrisyyden järkevyyttä ja mahdollista hyötyä tai haittaa väsyttävästi kuormitetuissa liitoksissa.

Työn tulosten perusteella voidaan todeta epäsymmetristen pienahitsien ja liitoslevyjen alentavan hitsin rajaviivalla vallitsevia jännityskonsentraatioita, mikäli rakenteeseen vaikuttaa puhdas taivutuskuormitus. Vetokuormituksen tapauksessa epäsymmetrisyys kasvattaa jännityskonsentraatioita, jolla on negatiivinen vaikutus rakenteen väsymiskestävyyteen.

ABSTRACT

LUT University
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Mikael Ekholm

Effect of asymmetric fillet weld on stress concentrations at weld toe

Bachelor's thesis

2019

28 pages, 23 figures, 5 tables and 2 appendices

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

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

Keywords: FE-analysis, ENS-method, Hot Spot -method, stress concentration

In this thesis, the effect of asymmetric fillet weld and welded plates is examined using FE-analysis. Effective notch stress method and Hot Spot method are applied in the study. Examination is focused to non-load carrying X-joint and its weld toe. The aim of this thesis is to solve the stress concentration factors in various geometry cases.

The study only focuses on the stress concentrations that affect at weld toe and the weld root is ignored. That is because the stress concentrations at weld toe are more critical for the fatigue life of whole structure than the stress concentrations at the root side. After obtaining the results, the convenience of the asymmetric fillet weld is considered.

Main result of the work is that use of asymmetric fillet weld is justifiable when the structure is subjected to bending stress. Based on the finite element analysis results it can be concluded that the asymmetric fillet weld reduces stress concentrations at weld toe. In the case of membrane loading, the asymmetry of fillet weld increases the stress concentrations at weld toe which has a negative impact on the fatigue strength of the structure.

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ **1**
ABSTRACT **2**
SISÄLLYSLUETTELO **4**
SYMBOLILUETTELO **5**
1 JOHDANTO **6**
2 TUTKIMUSMENETELMÄT **8**
2.1 FE-analyysi 8
2.1.1 Rakenteiden mallinnus 8
2.1.2 Kuormitukset ja reunaehdot 11
2.1.3 Analysointi 12
2.2 Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS) 14
2.3 Rakenteellisen jännityksen menetelmä (Hot Spot) 16
3 TULOKSET **20**
3.1 ENS-menetelmä 20
3.2 Hot Spot -menetelmä 21
4 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET **23**
4.1 Tulosten analysointi 23
4.2 Johtopäätökset 25
4.3 Virhetarkastelu 26
5 YHTEENVETO **27**
LÄHTEET **28**
LIITTEET
LIITE I: ENS-menetelmän tulokset taulukoituna
LIITE II: Hot Spot -menetelmän tulokset taulukoituna

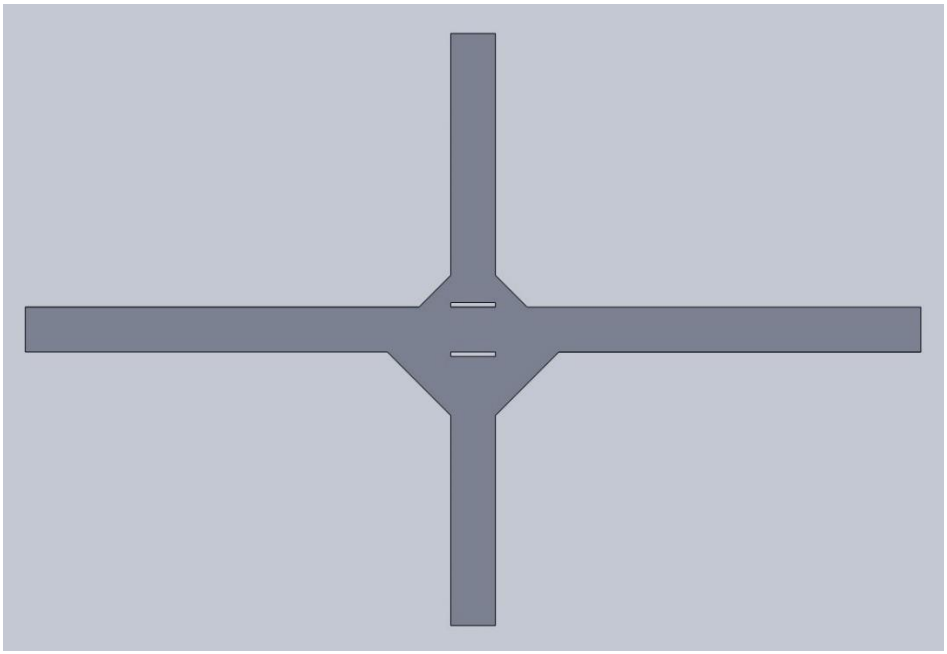
SYMBOLILUETTELO

a_1	X-liitoksen yläpuolinen a-mitta [mm]
a_2	X-liitoksen alapuolinen a-mitta [mm]
E	Kimmomoduuli [GPa]
K_{total}	Kokonaisjännityskonsentraatiokerroin
r	ENS-menetelmässä käytetty fiktiivinen pyöristyssäde [mm]
t_0	Perusmateriaalin paksuus [mm]
$t_{1.1}$	Yläpuolisen liitoslevyn paksuus [mm]
$t_{1.2}$	Alapuolisen liitoslevyn paksuus [mm]
v	Poissonin vakio
w	Liitoksen leveys [mm]
σ_b	Taivutusjännitys [MPa]
σ_{ENS}	Tehollinen lovijännitys [MPa]
σ_{hs}	Rakenteellinen jännitys eli Hot Spot -jännitys [MPa]
σ_m	Kalvojännitys [MPa]
σ_{nl}	Paikallinen epälineaarinen jännityspiikki [MPa]
$\sigma_{0.4t}$	Jännitysarvo 0,4t etäisyydellä rajaviivasta [MPa]
$\sigma_{1.0t}$	Jännitysarvo 1,0t etäisyydellä rajaviivasta [MPa]

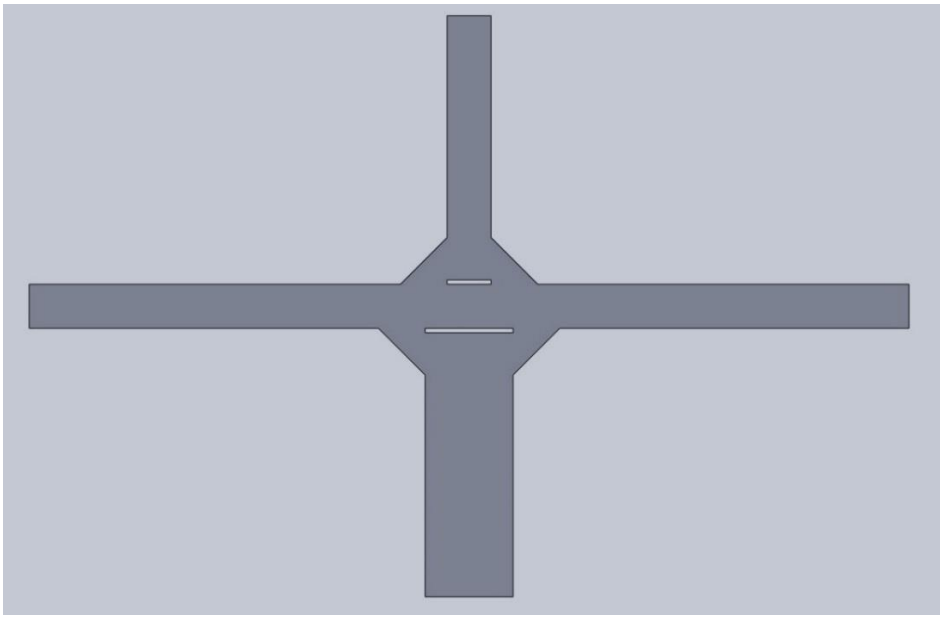
DOB	Degree of bending, taivutuksen osuus
ENS	Effective Notch Stress, tehollisen lovijännityksen menetelmä
FE	Finite element, äärellinen elementti
IIW	International Institute of Welding
LSE	Linear Surface Extrapolation, pintaa pitkin ekstrapolointi
TTWT	Through Thickness at Weld Toe, paksuuden yli linearisointi

1 JOHDANTO

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan kuormaa kantamattomien X-liitosten jännityskonsentraatioita. Työssä keskitytään epäsymmetristen pienahitsien ja liitoslevyjen vaikutukseen rakenteen väsymiskestävyyttä arvioitaessa. Pienahitsin epäsymmetrisyydellä tarkoitetaan tässä työssä sitä, että hitsien a-mitat ovat erisuuret peruslevyn eri puolilla. Epäsymmetristen liitoslevyjen tapauksessa taas epäsymmetrisyys tarkoittaa erisuuruista materiaalipaksuutta peruslevyyn liitettävien liitoslevyjen välillä. Työn tavoitteena on tutkia epäsymmetristen pienahitsien ja liitoslevyjen mahdollista hyötyä tai haittaa väsyttävästi kuormitetuissa rakenteissa. Rakennetta analysoidaan sekä veto- että taivutuskuormitustapauksissa. Työ tehdään LUT-Yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolle. Tutkittavat rakenteet on esitetty kuvissa 1 ja 2.



Kuva 1. Tutkittava rakenne epäsymmetrisillä pienahitseillä ja symmetrisillä liitoslevyillä.



Kuva 2. Tutkittava rakenne epäsymmetrisillä liitoslevyillä ja symmetrisillä pienahitseillä.

Rakennetta tutkitaan numeerisesti hyödyntämällä FE-analyysiä, tehollisen lovijännityksen menetelmää ja Hot Spot -menetelmää. Työ koostuu teoriaosuudesta, tuloksista sekä pohdinnasta ja johtopäätöksistä.

Hitsattua rakennetta kuormitettaessa syntyy lovijännityksiä rakenteen epäjatkuvuuskohdille. Nämä lovijännityskohdat eli jännityskonsentraatiopisteet esiintyvät yleensä hitsin rajaviivalla tai juuressa ja ne ovat otollisia väsymissärön ydintymiskohtia. Kuormituksen aikana rakenteeseen voi syntyä useita alkusäröjä, jotka pahimmassa tapauksessa yhdistyvät ja aiheuttavat merkittävää särönkasvua, joka vaikuttaa negatiivisesti rakenteen kestoikään. Tämän takia rakenteen geometriaan tulee kiinnittää erityistä huomiota suunnitteluvaiheessa, jotta jännityskonsentraatio lovikohdassa pysyy mahdollisimman alhaisena. Jännityskonsentraatioita voidaan pienentämällä rakenteen jännityksiä tai parantamalla lovikohdan geometriaa suuremmalla tai pienemmällä liityntäkulmalla. (Lassen & Récho 2006, s. 19-20).

Analysointi suoritetaan numeerisesti FE-analyysin avulla hyödyntäen FEMAP-ohjelmistoa ja siihen integroitua NX Nastran -laskentaohjelmaa. Rakenteiden kestävyyttä ei tutkita käytännön kokeilla eikä analyysejä suoriteta eri numeerisilla menetelmillä. Työssä ei myöskään oteta huomioon hitsin eikä perusmateriaalin geometriavirheitä.

2 TUTKIMUSMENETELMÄT

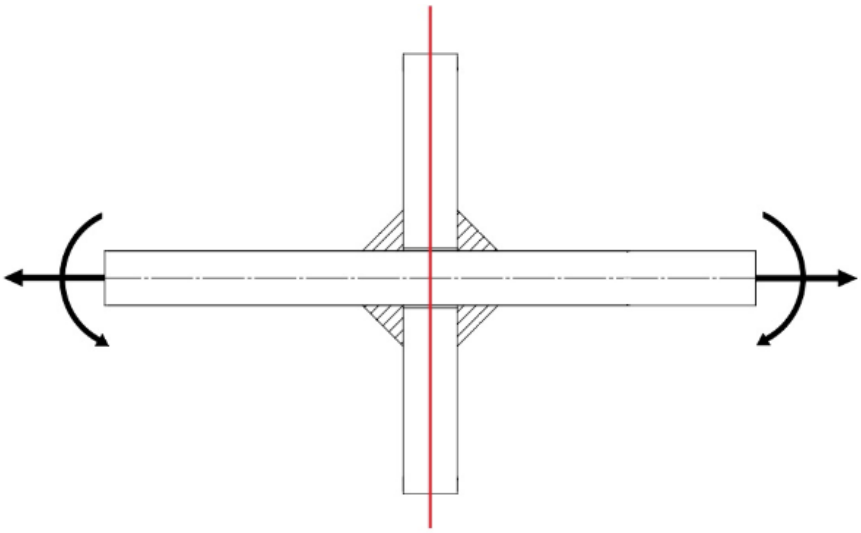
Tässä kandidaatintyössä tutkitaan rakenteen jännityskonsentraatioita numeerisella analyysillä ja tutkinta kohdistetaan hitsin rajaviivaan. Konsentraatiokertoimien selvittämisessä hyödynnetään FE-analyysiä ja lineaarielastista materiaalimallia. Kaikki rakenteet on valmistettu teräksestä, joten Poissonin vakiona ν käytetään arvoa 0,3 ja kimmomoduulina E arvoa 210 GPa.

2.1 FE-analyysi

FE-analyysissä rakenne mallinnetaan käyttämällä suurta määrää pienempiä elementtejä, jotka on yhdistetty toisiinsa solmuilla. Solmujen välisten siirtymien ja lineaarielastisen materiaalimallin avulla saadaan tällöin numeerisesti laskettua elementissä vallitsevat jännitykset. (Fricke 2011, s.6). FE-analyysissä jokaiselle elementille luodaan oma yhtälönsä ja elementit yhdistävien solmujen avulla yhtälö voidaan yhdistää kuvaamaan rakenteen koko geometriaa. Tällöin syntyy lineaarialgebraa hyödyntävä yhtälöjoukko, joka voidaan ratkaista laskentaohjelman avulla. (Liu & Quek 2014, s. 3-4).

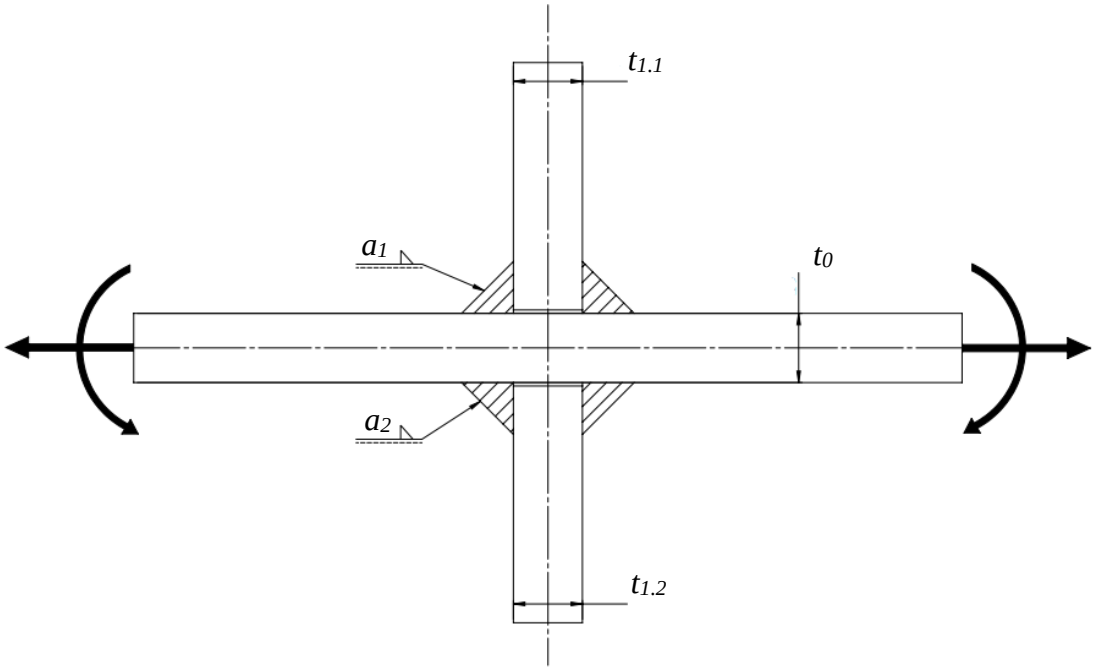
2.1.1 Rakenteiden mallinnus

Rakenteiden FE-mallit voidaan analyysin tehostamiseksi mallintaa 2D-tapauksina, sillä kuormitus kohdistuu kohtisuorasti hitsiin nähden (Hobbacher 2014, s.31). Tällöin mallintamiseen käytetään 1 mm paksuisia tasovenymäelementtejä. Liitoslevyjen ja peruslevyn väliin mallinnetaan 0,1 mm ilmarako kuvaamaan vajaatunkeumasta johtuvaa sulamatonta juuripintaa. Liitos analysoidaan veto- ja taivutuskuormitustapauksissa. Malleihin luodaan suositusten mukaiset elementtiverkot ja liitetään tarvittavat materiaalitiedot, kuormitukset ja reunaehdot. Rakenteet analysoidaan puolimallina, jolloin symmetrialinjalle liitetään tarvittavat symmetriareunaehdot. Symmetrialinjan sijainti on esitetty punaisella kuvassa 3**.** Mallinnus suoritetaan FEMAP-ohjelmistolla ja analysointi ohjelmaan liitetyllä NX Nastran -laskentaohjelmalla. Mallit nimetään muuttuvan parametrin mukaisesti esimerkiksi ”a1=4_a2=6”.



Kuva 3. Mallinnuksessa käytettävä symmetrialinja merkitty punaisella

Ensimmäinen tutkittava rakenne on normaali kuormaa kantamaton X-liitos symmetrisillä pienahitseillä. Liitoksesta saatavia tuloksia käytetään vertailuarvoina muiden liitosten tuloksia analysoitaessa. Analysoitava rakenne on esitetty kuvassa 4, jossa a_1 on ylemmän hitsin a-mitta, a_2 alemman hitsin a-mitta, $t_{1.1}$ ylemmän liitoslevyn paksuus, $t_{1.2}$ alemman liitoslevyn paksuus ja t_0 peruslevyn paksuus. Mallinnus ja analysointi suoritetaan kolmella eri a-mitalla siten, että liitoslevyjen paksuus on kaikissa tapauksissa 8 mm. Käytetyt parametrit on esitetty taulukossa 1**.**

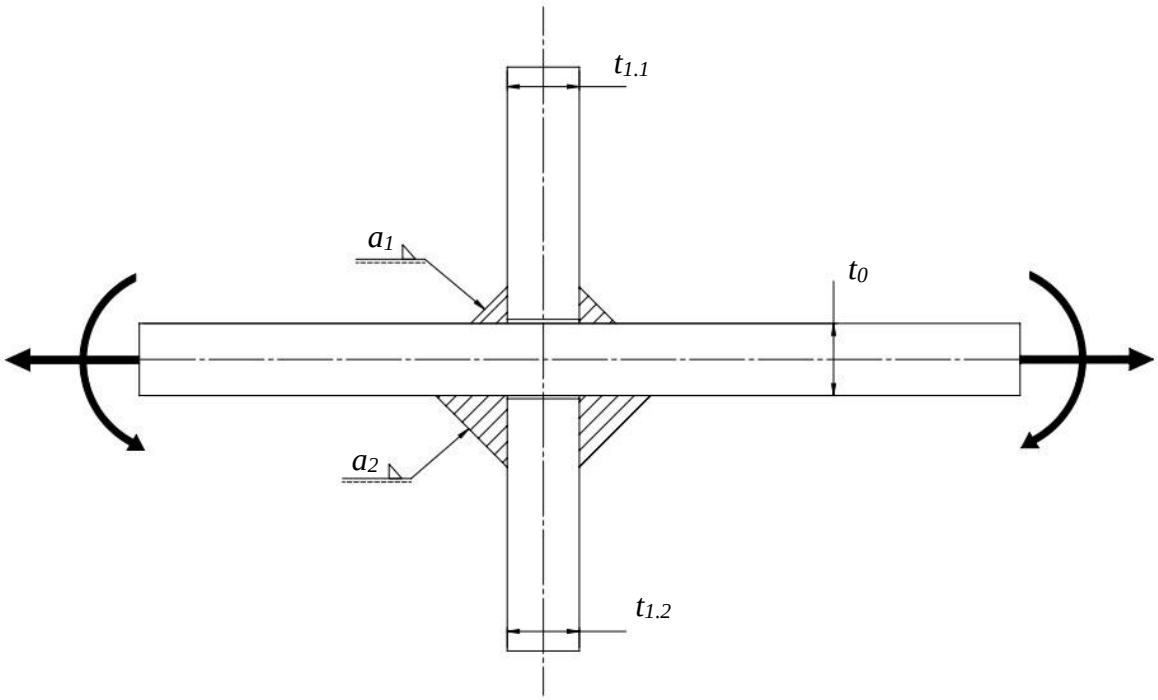


Kuva 4. Tapaus 1, symmetrinen rakenne

Taulukko 1. Symmetrisen rakenteen analysoinnissa käytetyt parametrit (Tapaus 1)

Malli	$t_{1.1}$ [mm]	$t_{1.2}$ [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	t_0 [mm]
a1=2_a2=2	8	8	2	2	8
a1=4_a2=4	8	8	4	4	8
a1=6_a2=6	8	8	6	6	8

Toisessa tapauksessa tutkitaan epäsymmetrisen hitsin vaikutusta jännityskonsentraatioihin. Liitoksessa peruslevyn eri puolilla olevien pienahitsien a_1 *ja* a_2 a-mitat ovat eri suuruiset. Analysoinnista saatuja tuloksia verrataan ensimmäisen tapauksen tuloksiin ja tutkitaan epäsymmetrisyyden vaikutusta hitsin rajaviivan jännityskonsentraatioihin. Analysoitava rakenne on esitetty kuvassa 5 ja käytetyt parametrit taulukossa 2.

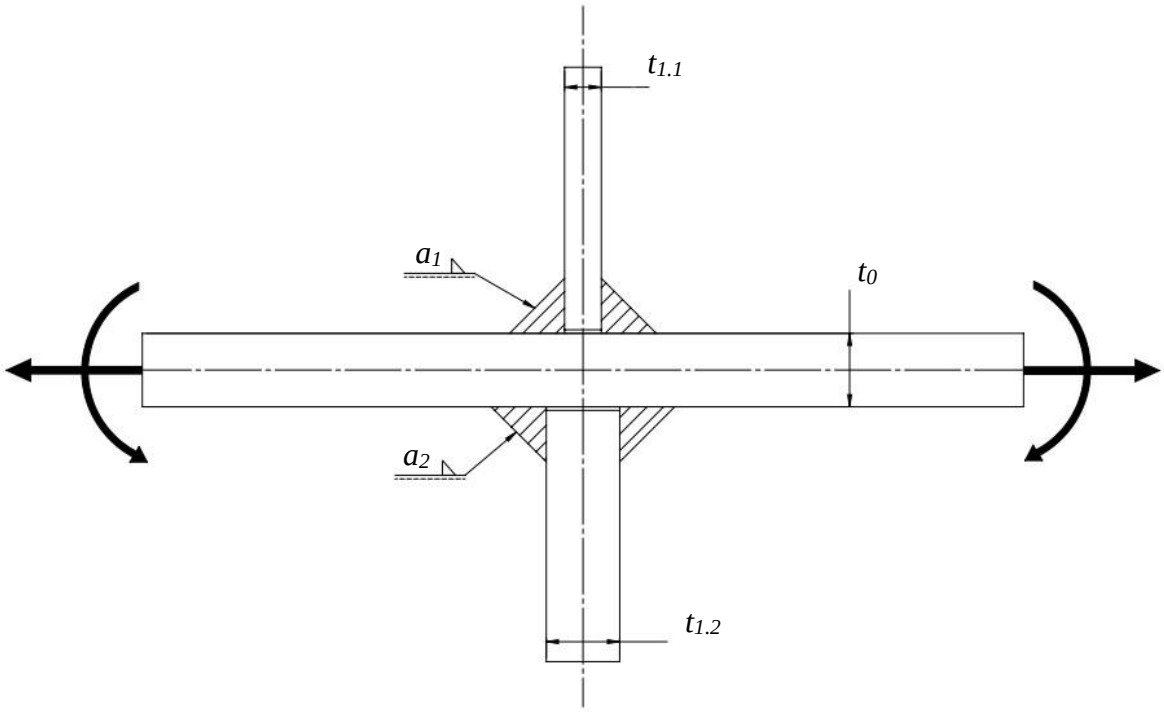


Kuva 5. Tapaus 2, epäsymmetriset pienahitsit

Taulukko 2. Epäsymmetristen hitsien analysoinnissa käytetyt parametrit (Tapaus 2)

Malli	$t_{1.1}$ [mm]	$t_{1.2}$ [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	t_0 [mm]
a1=2_a2=6	8	8	2	6	8
a1=3_a2=6	8	8	3	6	8
a1=4_a2=6	8	8	4	6	8
a1=4_a2=8	8	8	4	8	8

Kolmannessa ja viimeisessä tapauksessa tutkitaan liitoslevyjen paksuuseron vaikutusta jännityskonsentraatioihin. Hitsattavat liitoslevyt mallinnetaan eri paksuisina, jolloin hitsien rajaviivat ovat eri kohdissa toisiinsa nähden. Muuttuvat parametrit ovat siis liitoslevyjen paksuudet $t_{1.1}$ ja $t_{1.2}$. Analysoitava rakenne on esitetty kuvassa 6 ja käytetyt parametrit taulukossa 3.



Kuva 6. Tapaus 3, epäsymmetriset liitoslevyt

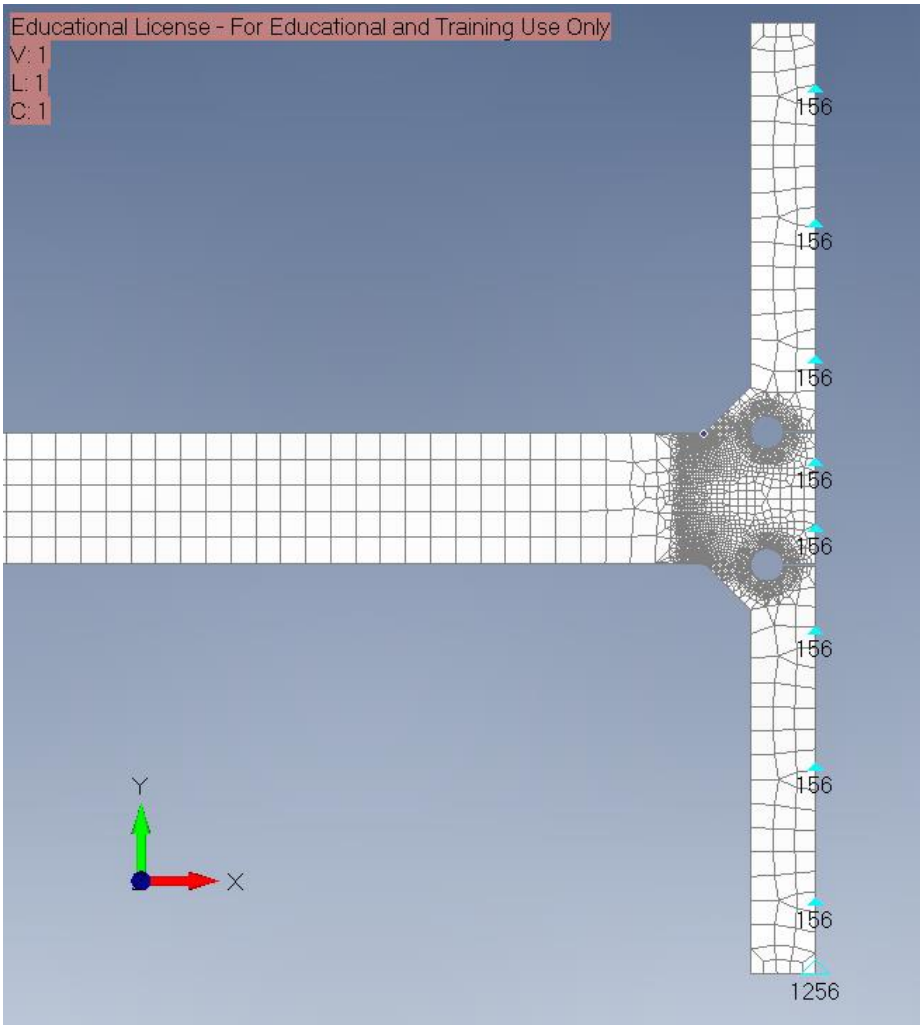
Taulukko 3. Epäsymmetristen liitoslevyjen analysoinnissa käytetyt parametrit (Tapaus 3)

Malli	$t_{1.1}$ [mm]	$t_{1.2}$ [mm]	a_1 [mm]	a_2 [mm]	t_0 [mm]
t1.1=4_t1.2=8	4	8	4	4	8
t1.1=6_t1.2=8	6	8	4	4	8
t1.1=4_t1.2=12	4	12	4	4	8

2.1.2 Kuormitukset ja reunaehdot

Rakennetta kuormitetaan 1 MPa suuruisella veto- ja taivutuskuormituksella, jolloin jännityskonsentraatiokertoimen arvo on suoraan luettavissa mallista. Kuormitus kohdistetaan peruslevyn päähän siten, että sen suuntavektori on kohtisuorassa hitsiin nähden.

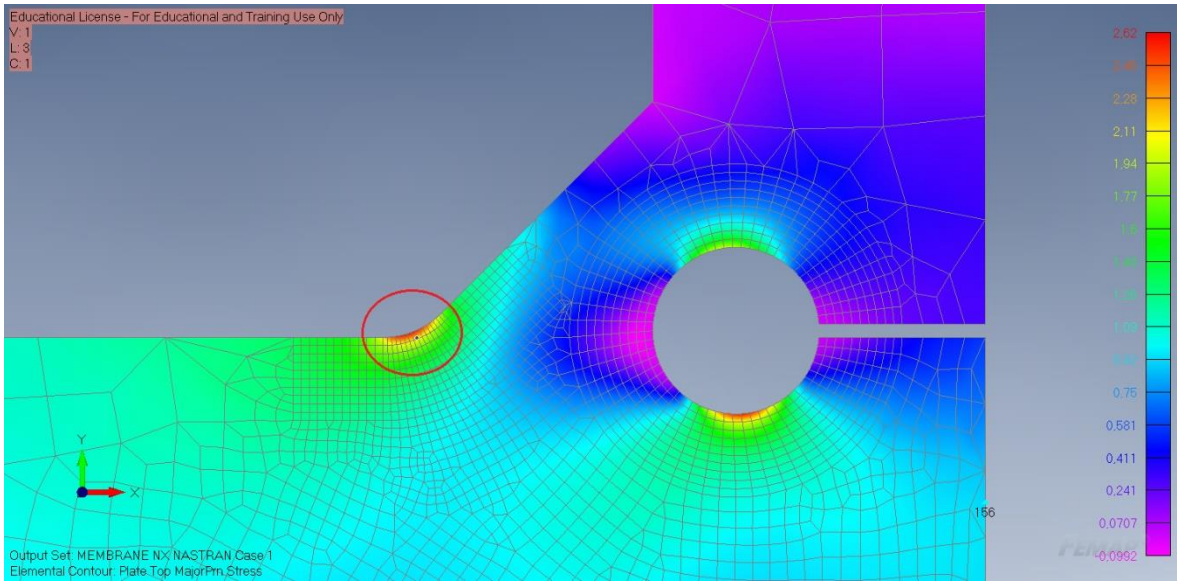
Reunaehdoiksi asetetaan symmetrialinjan symmetriareunaehto (translaatio x-suunnassa estetty) kuvan 7 mukaisesti ja rakenteen globaali y-akselin suuntainen liike estetään rakenteen kulmaan asetettavalla reunaehdolla. Rakenteen kaikkiin solmuihin asetetaan myös reunaehto, joka estää z-akselin suuntaisen liikkeen, jolloin analysointi tapahtuu ainoastaan x-y -tasossa.



Kuva 7. Symmetrialinjalle asetettavat reunaehdot

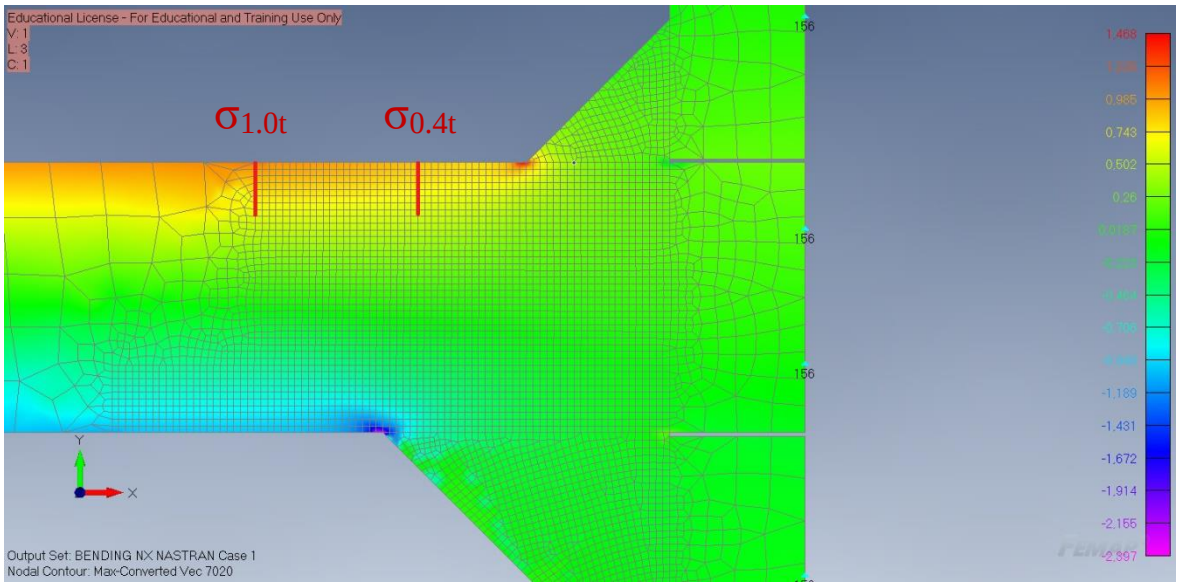
2.1.3 Analysointi

Analysointi suoritetaan NX Nastran -laskentaohjelmalla lineaarisena analyysinä. ENS-menetelmässä luetaan maksimipääjännitykset elementin yläreunasta (Plate Top MajorPrn Stress). Tutkittava rajaviiva on esitetty kuvassa 8**.**



Kuva 8. ENS-menetelmässä tutkittava rajaviiva

Hot Spot -menetelmässä pääjännitykset konvertoidaan ensin solmujännityksiksi, jotta jännitys voidaan lukea solmun kohdalta. Kohdat, joista jännitykset luetaan LSE:tä (Linear Surface Extrapolation, lyhennettä käytetään myöhemmin) varten on esitetty kuvassa 9.



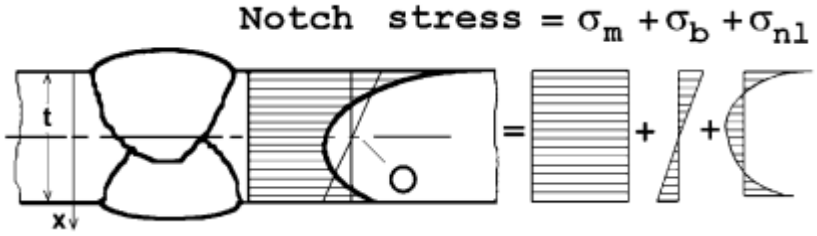
Kuva 9. Hot Spot -menetelmässä tarkasteltavat solmut

2.2 Tehollisen lovijännityksen menetelmä (ENS)

Tehollisen lovijännityksen menetelmällä eli ENS-menetelmällä tutkitaan lovikohdan kokonaisjännitystä lineaarielastisen materiaalimallin mukaisesti. Tällöin oletetaan, että jännitysten suuruus on lineaarisesti selvitettävissä rakenteen venymäarvoista. ENS-menetelmässä ei myöskään oteta huomioon perusmateriaalin pinnankarheuden vaihtelua tai epälineaarista käyttäytymistä lovikohdassa. (Hobbacher 2014, s.29).

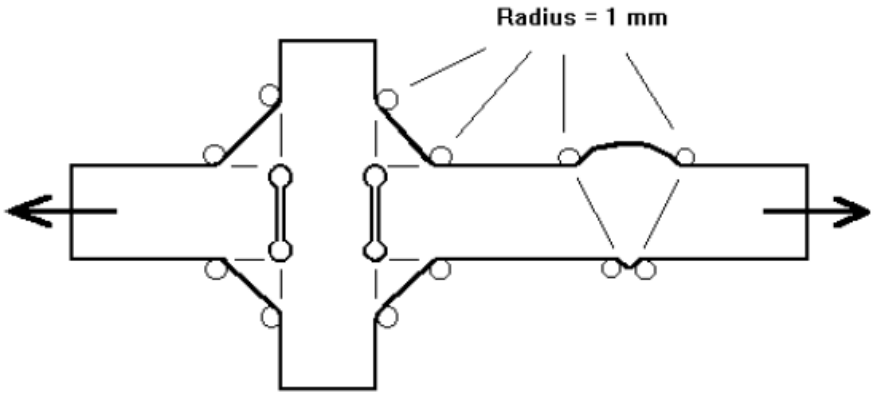
ENS-menetelmän käyttö on rajattu niihin hitsattuihin liitoksiin, joissa mahdollinen väsyminen voi tapahtua joko hitsin rajaviivalla tai hitsijuuren puolella. Menetelmä soveltuu hitsin kohtisuorien jännitysten analysointiin, joten menetelmää ei tule käyttää, mikäli rakenteeseen vaikuttaa merkittäviä hitsin suuntaisia jännityksiä. Parhaiten menetelmä soveltuu eri hitsigeometrioiden vertailuun, mikäli perusmateriaalin paksuus on vähintään 5 mm. (Hobbacher 2014, s.29).

Lovijännitys σ_{ENS} muodostuu kolmesta eri komponentista, jotka yhdessä muodostavat epälineaarisen kokonaisjännitysjakauman. Jännityskomponentit ovat kalvojännitys σ_m, taivutusjännitys σ_b ja epälineaarinen jännityspiikki σ_{nl}. (Hobbacher 2014, s.14). Jännityskomponentit on esitetty myös kuvassa 10.



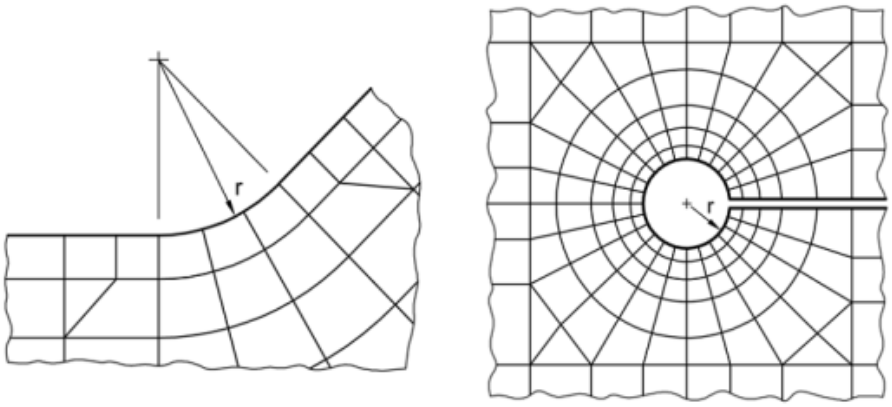
Kuva 10. Lovikohdassa vallitsevat jännityskomponentit. (Hobbacher 2014, s.14)

ENS-menetelmää käytettäessä hitsi mallinnetaan 45º kulmassa pienahitsin tapauksessa ja 30º kulmassa päittäisliitoksen tapauksessa, mikäli hitsin todellista geometriaa ei tiedetä. Hitsin rajaviivoille ja juuripinnalle mallinnetaan fiktiivinen 1 mm suuruinen pyöristys, jonka on vahvistettu antavan johdonmukaisia tuloksia. (Hobbacher 2014, s.29). Fiktiivisten pyöristysten sijainnit on esitetty kuvassa 11.



Kuva 11. Fiktiivisten pyöristysten sijoitus FE-malliin. (Hobbacher 2014, s.30).

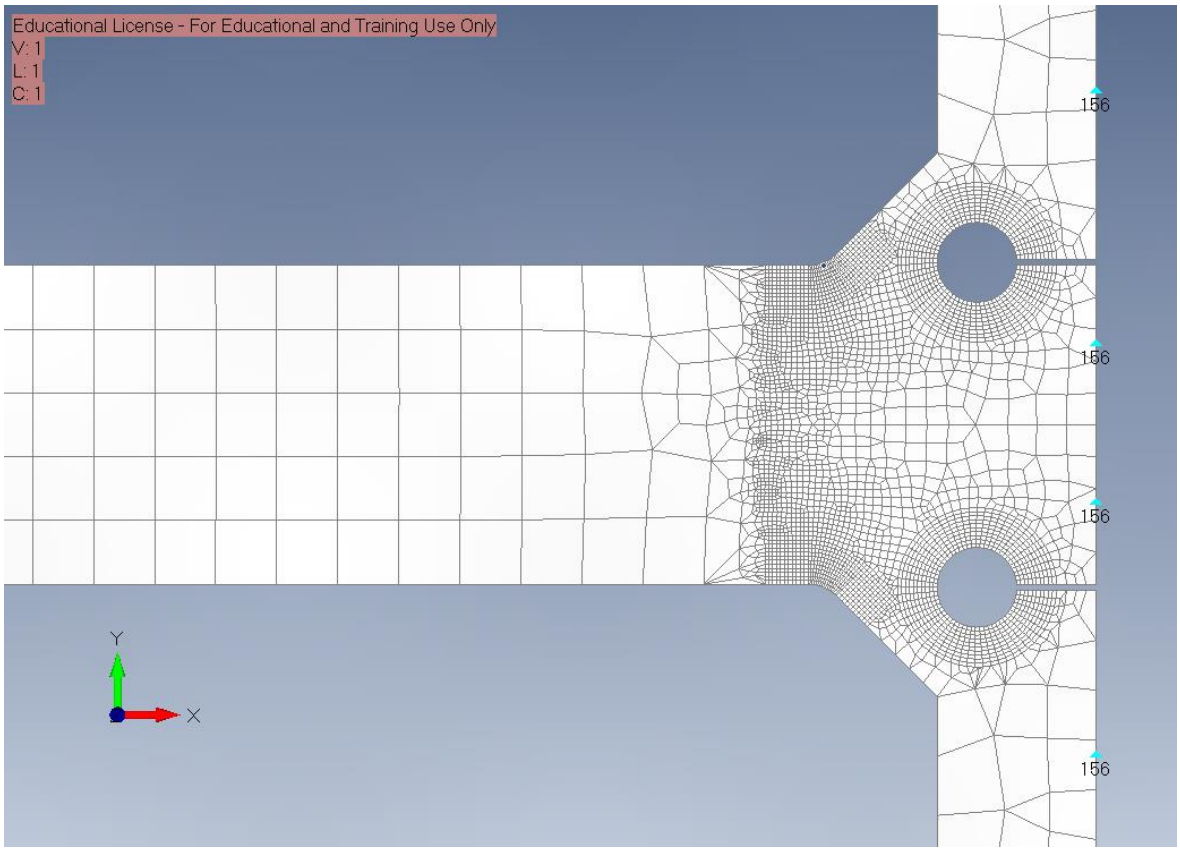
IIW (International Institute of Welding, lyhennettä käytetään myöhemmin) on antanut suosituksensa ENS-mallissa käytettävistä elementtikokoista ja -muodoista. Koska analyysissä tarkastellaan hitsin rajaviivaa ja juurta, tulee niiden elementteihin muotoon ja kokoon kiinnittää erityistä huomiota. Elementit tulee pitää mahdollisimman suorakaiteen muotoisina ja suositeltu elementtikoko rajaviivalla ja juuripinnalla lineaarisia elementtejä käytettäessä on maksimissaan neljäsosa pyöristyssäteen *r* arvosta eli 0,25 mm (Hobbacher 2014, s.31). Suositellut elementtimuodot on esitetty kuvassa 12, suositellut elementtikoot taulukossa 4 ja suositusten mukainen ENS-malli kuvassa 13.



Kuva 12. Tavoiteltava elementtimuoto rajaviivalla ja juuripinnalla (Hobbacher 2014, s.31).

Taulukko 4. IIW:n mukaiset elementtikoot hitsin rajaviivalla ja juuripinnalla (Hobbacher 2014, s.31).

Elementtityyppi	Suhteellinen koko	Absoluuttinen koko [mm]	Elementtien lukumäärä 45° kaarella	Elementtien lukumäärä kehällä
8-solmuinen heksaelementti	≤ *r*/4	≤ 0,25	≥ 3	≥ 24
20-solmuinen heksaelementti	≤ *r*/6	≤ 0,15	≥ 5	≥ 40

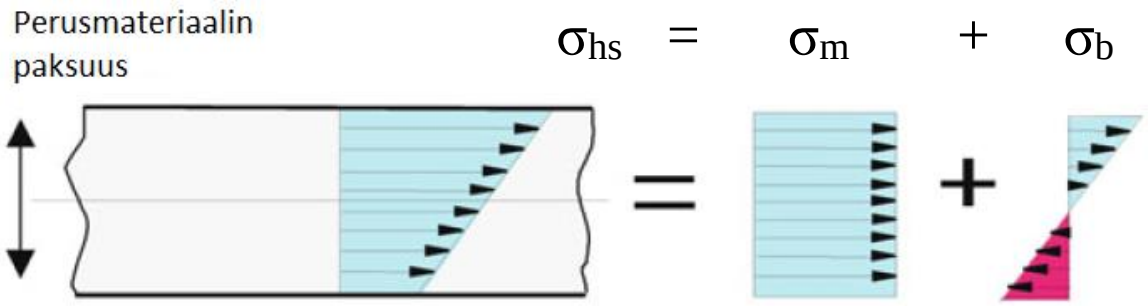


Kuva 13. Suositusten mukainen ENS-malli, symmetrinen rakenne $a_1 = a_2 = 2$ mm

2.3 Rakenteellisen jännityksen menetelmä (Hot Spot)

Perinteisessä nimellisen jännityksen menetelmässä ei oteta huomioon rakenteellisten epäjatkuvuuksien vaikutusta rakenteen jännityskonsentraatioihin, vaan ne on sisällytetty liitosdetaljin väsymisluokkaan. Mikäli rakenteellisten epäjatkuvuuksien vaikutusta halutaan tutkia, voidaan käyttää rakenteellisen jännityksen menetelmää eli Hot Spot -menetelmää.

Hot Spot -menetelmässä otetaan huomioon rakenteellisen epäjatkuvuuden vaikutukset jännityskonsentraatioihin, mutta menetelmä ei ota huomioon paikallista hitsin rajaviivan geometriasta johtuvaa epälineaarista jännityspiikkiä. Hot Spot -jännitys σ_{hs} koostuu siis kalvojännityskomponentista σ_m ja taivutusjännityskomponentista σ_b. Jännityskomponentit on esitetty kuvassa 14. Hot Spot -menetelmällä voidaan selvittää joko perusmateriaalin pinnan jännitysjakauma LSE-menetelmällä, jota käytetään tässä työssä, tai perusmateriaalin sisällä kulkeva jännitysjakauma TTWT (Through Thickness at Weld Toe, lyhennettä käytetään myöhemmin) -menetelmällä. (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 1-2).



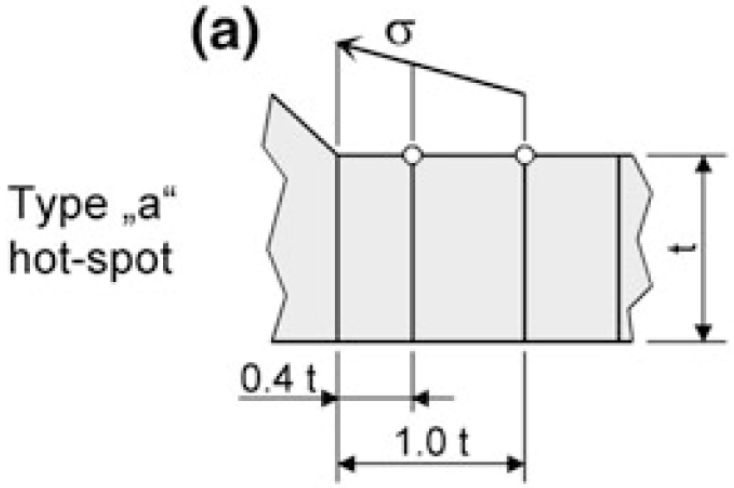
Kuva 14. Hot Spot -jännityksen jännityskomponentit (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 7). Muokattu.

Hot Spot -pisteellä tarkoitetaan hitsin rajaviivalla sijaitsevaa jännityskonsentraatiopistettä, josta mahdollinen väsymissärö voi saada alkunsa. Kuten kuvasta 14 nähdään, Hot Spot-jännitys lasketaan kalvo- ja taivutusjännityskomponentin summana. (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 7).

Hot Spot -jännitykset voidaan jakaa kahteen eri tyyppiin. Ensimmäinen on tyyppi A, jossa hitsin rajaviiva sijaitsee levyn pinnalla ja toinen on tyyppi B, jossa rajaviiva sijaitsee levyn reunalla. Tyypin B hitsi mitoitetaan aina kuormaa kantavana paitsi, jos hitsin pituus on alle 100 mm. Tyypin A hitsi voi olla myös kuormaa kantamaton. (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 6-7). Tässä työssä tutkitaan tyypin A kuormaa kantamatonta hitsiä.

Tässä työssä käytetään Hot Spot -jännityksen selvittämiseksi LSE-menetelmää, jossa jännitysjakauma lasketaan levyn pinnalta saatuja arvoja ekstrapoloimalla (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 21). TTWT-menetelmän käyttö ei tässä työssä ole mahdollista, sillä rakenteen poikkipinta-ala ja sitä kautta paksuus vaihtelee alapuolisen hitsin a-mitan ja

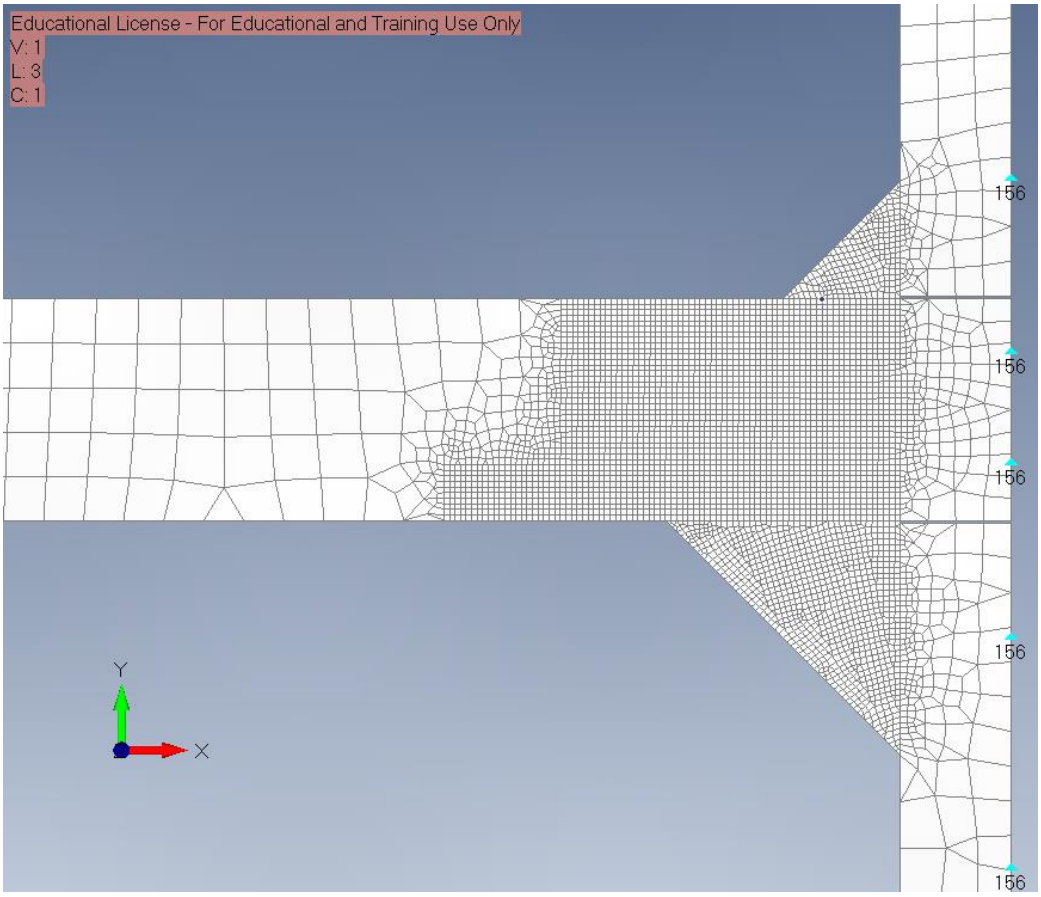
sijainnin perusteella. Jännitysarvot luetaan levyn pinnalla olevista solmupisteistä, jotka ovat tietyn välimatkan päässä hitsin rajaviivalta kuvan 15 mukaisesti. Elementtiverkko tuleekin luoda siten, että solmupisteet osuvat halutulle etäisyydelle ja siksi onkin tärkeää seurata IIW:n antamia suosituksia elementtiverkon tiheydestä ja rakenteesta. (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 21-22). Elementtiverkon tiheyteen liittyvät suositukset on esitetty taulukossa 5 ja suositusten mukainen Hot Spot -malli on esitetty kuvassa 16.



Kuva 15. Tutkittavien solmupisteiden etäisyys hitsin rajaviivasta (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 23).

Taulukko 5. IIW:n antamat suositukset suhteellisesti pienen mallin elementtiverkolle LSE-menetelmää käytettäessä (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 22).

Hitsin tyyppi	Tyyppi *A*	Tyyppi *B*
Elementin pituus × leveys	≤ 0,4*t* × *t* ja 0,4*t* × *w*/2	≤ 4 mm × 4 mm
Ekstrapolointi pisteet	0,4*t* / 1,0*t* (solmupisteet)	4 mm / 8 mm / 12 mm (solmupisteet)



Kuva 16. Suositusten mukainen Hot Spot -malli, epäsymmetriset hitsit a_1 = 3 mm ja a_2 = 6 mm

LSE-menetelmän ekstrapolointi ja Hot Spot -jännityksen σ_{hs} laskenta voidaan suorittaa seuraavalla yhtälöllä (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 29):

$$\sigma_{hs} = 1{,}67\sigma_{0.4t} - 0{,}67\sigma_{1.0t} \quad (1)$$

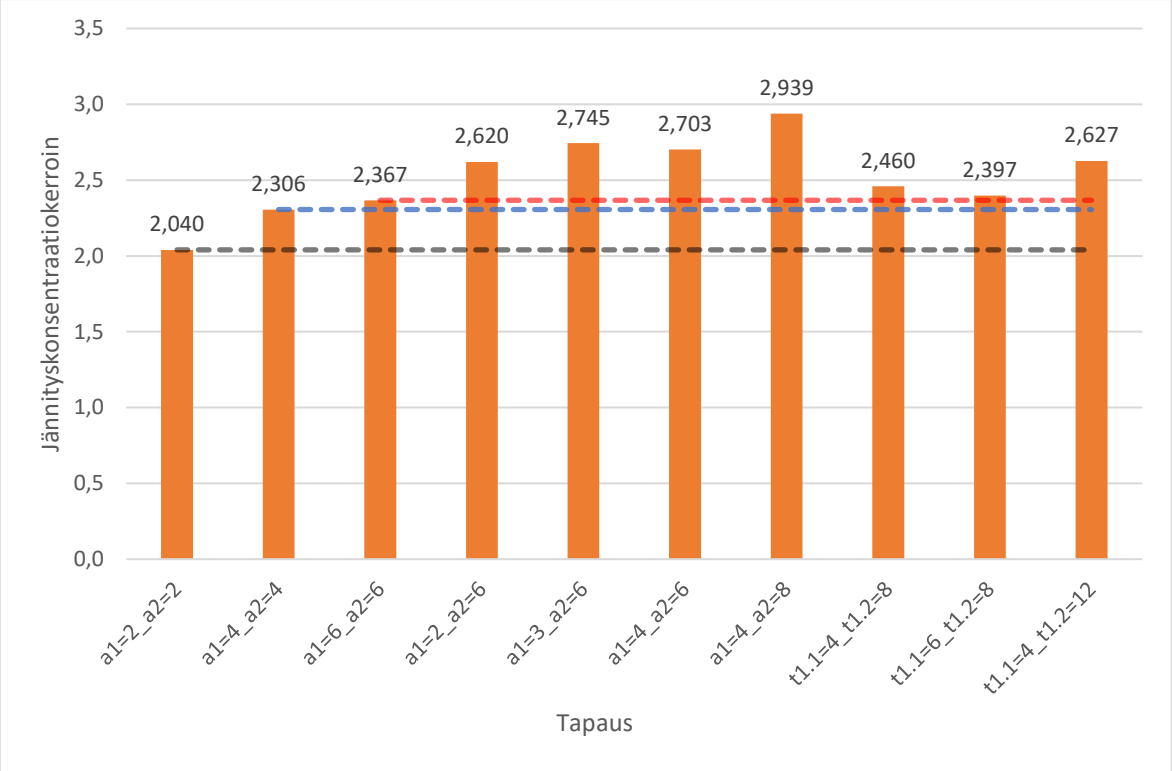
Yhtälössä 1 σ_{hs} on Hot Spot -jännitys, $\sigma_{0.4t}$ on jännitysarvo $0.4t$ etäisyydellä rajaviivasta ja $\sigma_{1.0t}$ on jännitysarvo $1.0t$ etäisyydellä hitsin rajaviivasta (Niemi, Fricke & Maddox 2018, s. 29).

3 TULOKSET

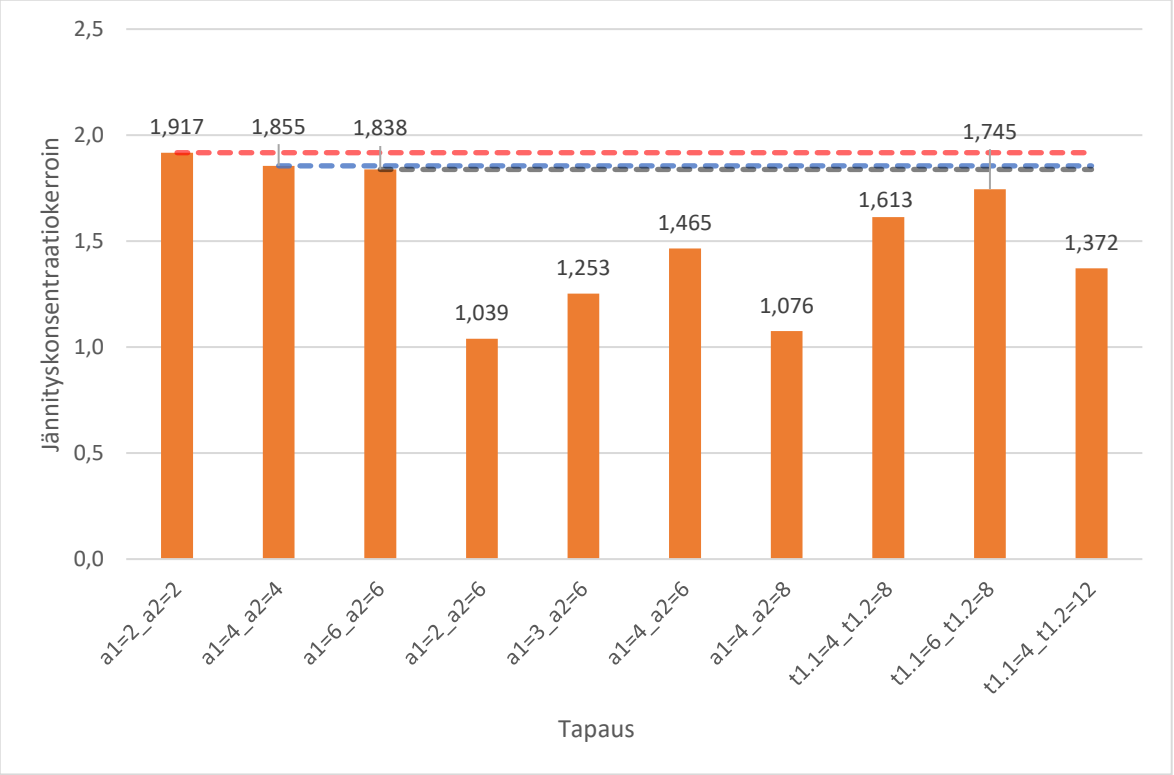
Työssä tutkittiin yhteensä kymmentä erilaista geometriatapausta ja FE-analyysillä saatujen tulosten avulla muodostettiin kuvaajat kullekin eri tapaukselle. Kuvaajiin on piirretty viiva symmetristen rakenteiden arvojen kohdalle vertailun helpottamiseksi.

3.1 ENS-menetelmä

ENS-menetelmällä saatiin vetokuormitustapauksessa kuvan 17 ja taivutuskuormitustapauksessa kuvan 18 mukaiset tulokset. Tulokset on esitetty myös taulukoituna liitteessä 1.



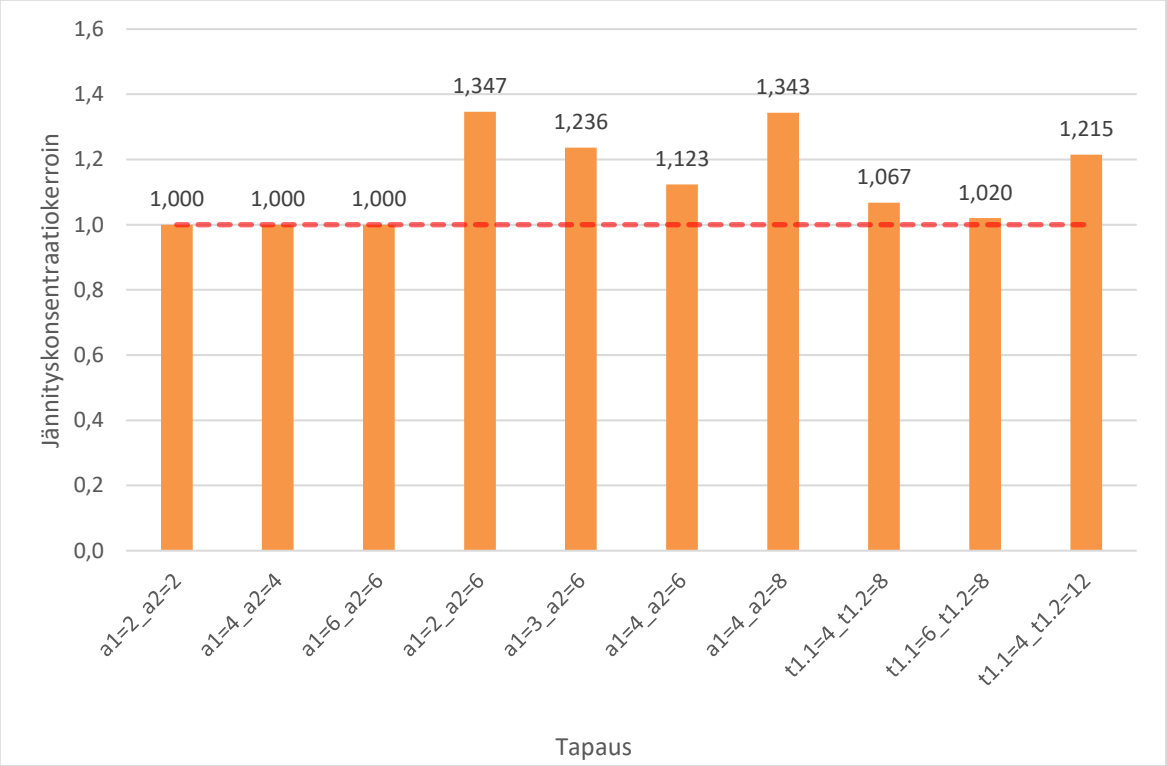
Kuva 17. ENS-menetelmällä saadut jännityskonsentraatiokertoimet vetokuormitustapauksessa.



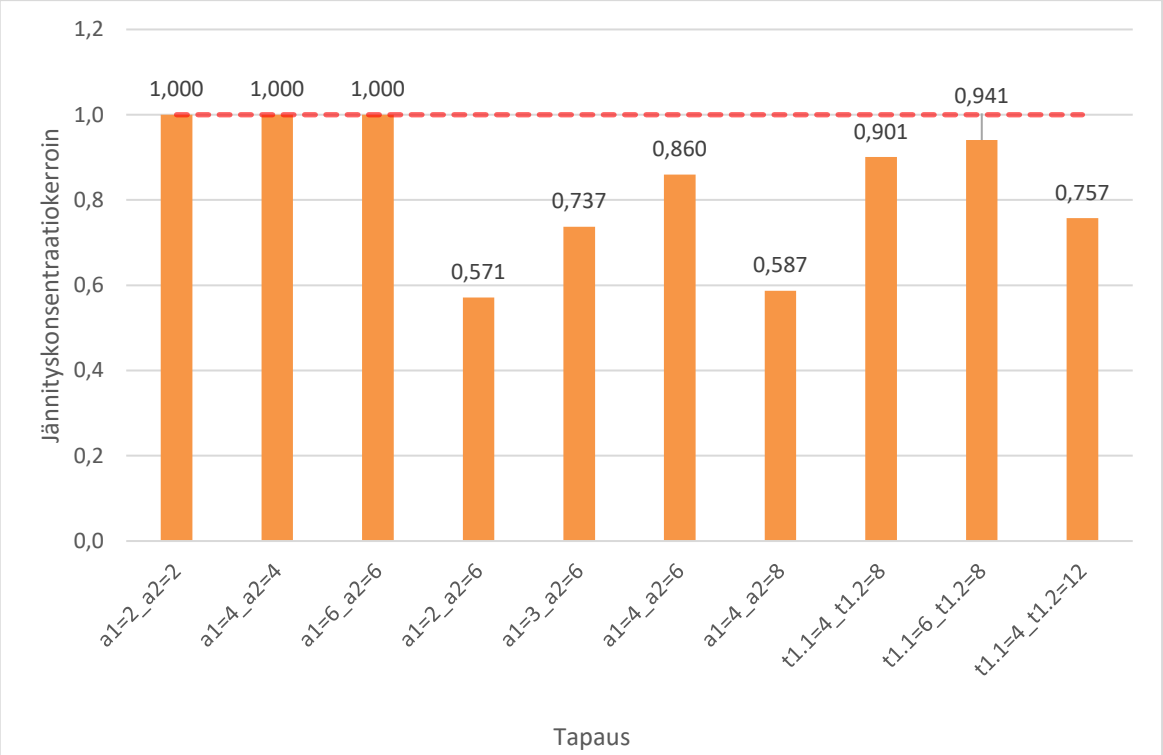
Kuva 18. ENS-menetelmällä saadut jännityskonsentraatiokertoimet taivutuskuormitustapauksessa.

3.2 Hot Spot -menetelmä

Hot Spot -menetelmällä saatiin vetokuormitustapauksessa kuvan 19 ja taivutuskuormitustapauksessa kuvan 20 mukaiset tulokset. Tulokset on esitetty myös taulukoituna liitteessä 2. Symmetrisessä rakenteessa Hot Spot -jännitystä ei synny, joten niiden kohdalla jännityskonsentraatiokerroin on yksi.



Kuva 19. Hot Spot -menetelmällä saadut jännityskonsentraatiokertoimet vetokuormitustapauksessa.



Kuva 20. Hot Spot -menetelmällä saadut jännityskonsentraatiokertoimet taivutuskuormitustapauksessa.

4 POHDINTA JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työssä analysoitiin kuormaa kantamattomien X-liitosten pienahitsien ja liitoslevyjen epäsymmetrisyyden vaikutusta hitsin rajaviivalla vallitseviin jännityskonsentraatioihin kasvattamalla vaiheittain hitsien a-mitan eroa ja liitoslevyjen paksuuden eroa. Vertailuarvoina toimivat symmetrisen liitoksen jännityskonsentraatioarvot. Tutkimus kohdistettiin kahteen eri kuormitustapaukseen, jotka olivat veto- ja taivutuskuormitus.

4.1 Tulosten analysointi

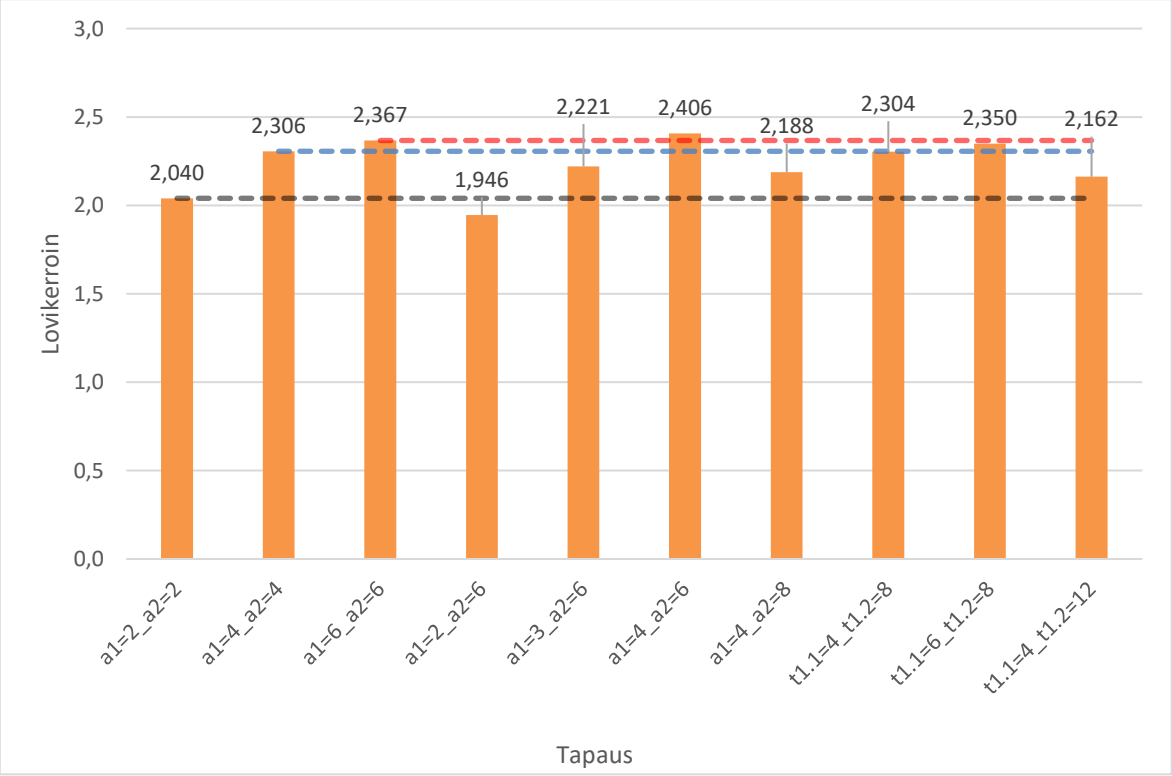
Kuvasta 17 voidaan huomata, että ENS-menetelmällä vetokuormitustapauksessa epäsymmetriset hitsit aiheuttavat suuremmat jännityskonsentraatioarvot vertailuarvoihin nähden. Suurin jännityskonsentraatiokerroin saatiin, kun a_1 = 4 mm ja a_2 = 8 mm, jolloin jännityskonsentraatiokerroin oli noin 22 % vertailuarvoa suurempi. Kun a_1-mitta laskettiin arvoon 3 mm ja a_2-mitta arvoon 6 mm saatiin noin 6,6 % pienempi tulos. Vertailuarvoihin nähden tulokset olivat keskimäärin noin 16 % suurempia.

Epäsymmetristen hitsien taivutuskuormitustapauksessa ENS-menetelmällä saadut tulokset olivat päinvastaiset. Kuvasta 18 nähdään, että kaikissa tapauksissa epäsymmetrisillä hitseillä saadut tulokset ovat suuruudeltaan pienempiä vertailuarvoihin nähden. Suurin ero saavutettiin, kun a-mitoiltaan 6 mm symmetristä liitosta muokattiin siten, että a_1 = 2 mm ja a_2 = 6 mm. Tällöin jännityskonsentraatiokerrointa saatiin pienennettyä noin 43 %. Vertailuarvoihin nähden jännityskonsentraatiokertoimet olivat keskimäärin 35 % pienempiä.

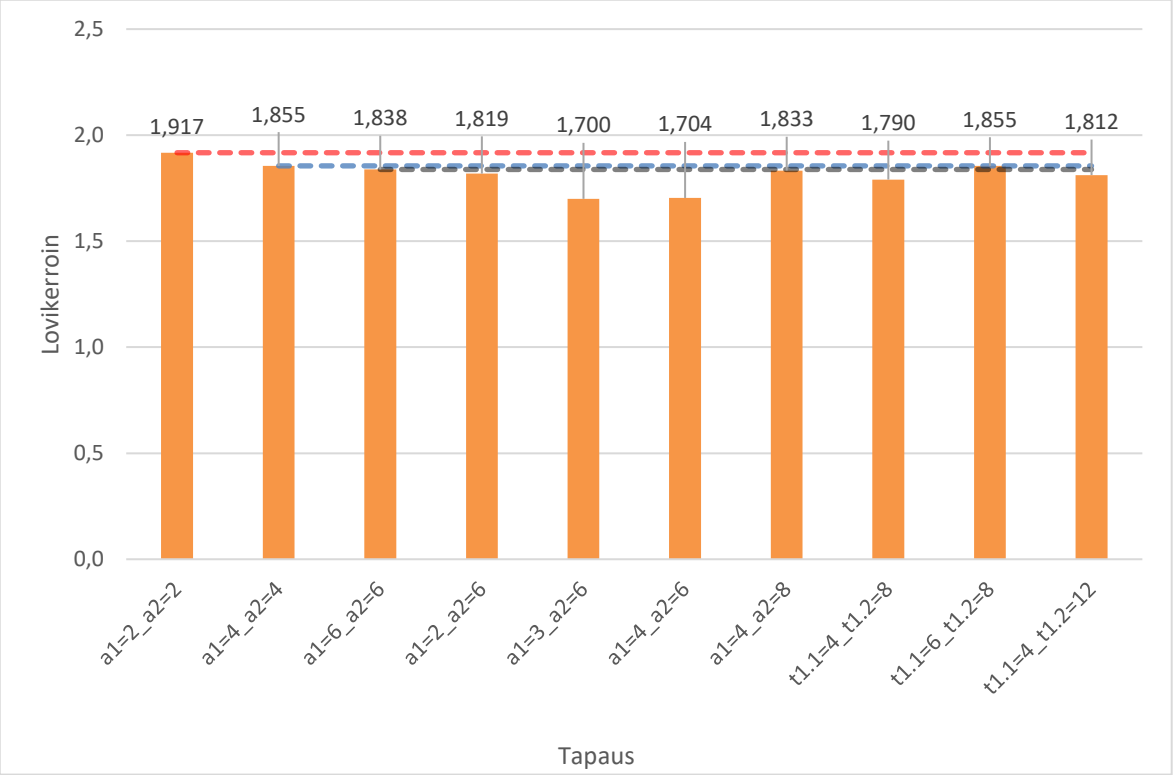
Epäsymmetrisille hitseille Hot Spot -menetelmällä saadut tulokset olivat hyvin samansuuntaisia kuin ENS-menetelmällä saadut tulokset. Vetokuormitustapauksessa (kuva 19) suurin konsentraatiokerroin saatiin, kun a_1 = 2 mm ja a_2 = 6 mm, jolloin jännityskonsentraatio oli noin 35 % suurempi kuin nimellisjännitys. Keskimäärin jännityskonsentraatiot olivat noin 26 % suurempia kuin nimellisjännitys. Taivutuskuormitustapauksessa (kuva 20) pienin tulos saatiin, kun a_1 = 2 mm ja a_2 = 6 mm, jolloin jännityskonsentraatio oli noin 43 % nimellisjännitystä pienempi. Keskimäärin jännityskonsentraatiot olivat noin 31 % nimellisjännitystä pienemmät.

Epäsymmetristen liitoslevyjen tapauksessa tulokset olivat hyvin samansuuntaisia kuin epäsymmetristen hitsien tapauksessa. Kuten kuvista 17-20 nähdään, vetokuormitustapauksessa jännityskonsentraatiokertoimet olivat suurempia vertailuarvoihin verrattuna, kun taas taivutuskuormituksessa kertoimet olivat pienempiä. ENS-menetelmällä saadut vetokuormitusarvot olivat keskimäärin 6,5 % suurempia kuin vertailuarvot. Taivutuskuormitustapauksessa arvot olivat keskimäärin noin 15 % pienempiä. Hot Spot -menetelmällä vetokuormituksessa jännityskonsentraatio oli suurimmillaan 22 % ja pienemmillään vain 2 % suurempi kuin nimellisjännitys. Taivutuskuormituksessa jännitysarvot olivat noin 5 - 24 % nimellisjännitystä pienempiä.

Tulosten perusteella voidaan selvittää myös pelkästään epäjatkuvuuskohdan aiheuttama lovikerroin ilman rakenteellista vaikutusta. Tällöin ENS-menetelmällä saadut tulokset jaetaan HS-menetelmällä saaduilla tuloksilla. Lovikertoimien avulla voidaan analysoida itse lovikohdan vaikutusta jännityskonsentraatiokertoimiin. Lovikertoimet on esitetty kuvissa 21 ja 22.



Kuva 21. Hitsin rajaviivan lovikerroin vetokuormitustapauksessa.



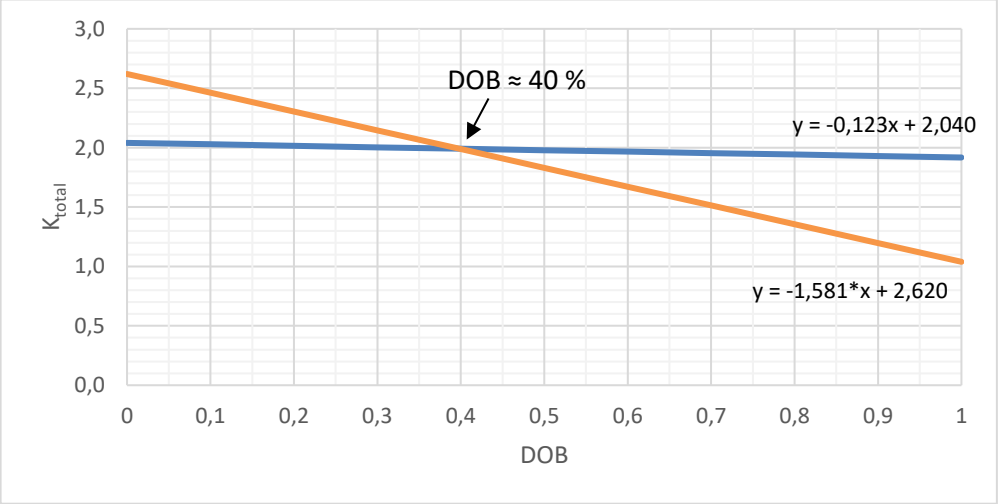
Kuva 22. Hitsin rajaviivan lovikerroin taivutuskuormitustapauksessa.

Kuvista 21 ja 22 huomataan, että lovikertoimen arvossa ei tapahdu suuria muutoksia eri tapausten välillä, joten jännityskonsentraatioiden pienentyminen aiheutuu miltei pelkästään rakenteellisen jännityksen laskusta. Tämä siis tarkoittaa sitä, että epäsymmetrisillä hitseillä tai liitoslevyillä voidaan vähentää hitsin rajaviivan rakenteellista jännitystä, jolloin rajaviivan väsymiskestävyys kasvaa.

4.2 Johtopäätökset

Työssä saatuja tuloksia tulkittaessa voidaan todeta, että puhtaan taivutuksen tapauksessa eri suuruiset pienahitsit peruslevyn eri puolilla voivat olla perusteltuja. Tällöin peruslevyn puristuksella olevalle puolelle tulee mitoittaa suurempi hitsin a-mitta vedolla olevaan puoleen verrattuna. Työssä saatujen tulosten perusteella optimaalisimmat hitsimitat ovat a_1 = 2 mm ja a_2 = 6 mm tai a_1 = 4 mm ja a_2 = 8 mm, jolloin jännityskonsentraatio hitsin rajaviivalla saadaan hyvin lähelle nimellisjännitystä. Epäsymmetrisillä liitoslevyillä voidaan myös pienentää hitsin rajaviivalla vallitsevaa jännityskonsentraatiota, mutta tämä tapa ei ole yhtä tehokas kuin epäsymmetristen hitsien käyttö.

Vetokuormitustapauksessa liitoksen epäsymmetrisyys kasvattaa hitsin rajaviivan jännityskonsentraatiota, joten sitä ei voida pitää järkevänä, mikäli rakenteeseen kohdistuu taivutuksen lisäksi vetoa. Veto- ja taivutuskuormituksen suhteelle on mahdollista laskea DOB-kuvaajan (degree of bending, taivutuksen osuus) avulla raja-arvo, jolloin epäsymmetrisen rakenteen käyttö on vielä perusteltua. DOB-kuvaaja on esitetty kuvassa 23. Kuvaajassa x-akselilla on DOB-arvo, joka on taivutuksen osuus kuormituksesta, ja y-akselilla kokonaisjännityskonsentraatiokerroin K_{total}.



Kuva 23. DOB-kuvaaja taivutuskuormituksen raja-arvon määrittämiseksi. Kuvassa sininen kuvaaja edustaa referenssitapausta a_1=a_2=2mm ja oranssi kuvaaja epäsymmetristä tapausta a_1=2mm_a_2=6mm.

Kuvaajasta huomataan, että epäsymmetrisen rakenteen käyttö on perusteltua, kun taivutuskuormituksen osuus kokonaiskuormituksesta on enemmän kuin 39,8 %. Tällöin kokonaisjännityskonsentraatio on pienempi kuin symmetrisellä rakenteella.

4.3 Virhetarkastelu

Rakenteita analysoitiin ainoastaan numeerisella elementtimenetelmällä, joka ei ota huomioon hitsigeometrian vaihteluja tai hitsauksen aiheuttamaa lämmöntuontia. Analyyseissä käytetyt mallit ovat myös mitoiltaan absoluuttisia, joten tuloksissa ei ole otettu huomioon liitoslevyjen paksuusvaihteluja tai X-liitoksessa helposti syntyviä liitoskulmavirheitä. Hitsin tai lämpövaikutusalueen kovuutta perusmateriaaliin nähden ei ole myöskään otettu analyyseissä huomioon. Edellä mainitut seikat tulisi selvittää käytännön kokeiden avulla luotettavien tulosten saamiseksi.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä analysoitiin epäsymmetristen pienahitsien ja liitoslevyjen vaikutusta hitsin rajaviivalla vallitseviin jännityskonsentraatioihin kuormaa kantamattomassa X-liitoksessa. Rakennetta analysoitiin kymmenellä erilaisella a-mitan ja liitoslevyn paksuuden arvoilla. Analyysi suoritettiin FEMAP-ohjelmistolla numeerista elementtimenetelmää hyväksikäyttäen. Yhteenveto tuloksista on:

- Vetokuormitustapauksessa epäsymmetrisyydellä on jännityskonsentraatiota kasvattava vaikutus;
- Puhtaan taivutuksen tapauksessa epäsymmetrisyyden käyttö on perusteltua, sillä se pienentää hitsin rajaviivan jännityskonsentraatiota, joka parantaa liitoksen väsymiskestävyyttä;
- Vetokuormituksen osuuden raja-arvo voidaan selvittää DOB-kuvaajan avulla ja epäsymmetrisessä tapauksessa a_1=2mm_a_2=6mm taivutusjännityksen osuuden tulee olla vähintään 40 % kokonaiskuormituksesta;
- Puristuspuolen hitsin tulee olla a-mitaltaan noin kaksinkertainen vastakkaiseen hitsiin verrattuna.

Työn tulosten perusteella voidaan siis suositella epäsymmetrisen pienahitsin tai liitoslevyjen käyttöä liitoksissa, joihin kohdistuu ainoastaan taivutusjännitystä tai DOB-kuvaajan avulla ennalta selvitetty osuus vetokuormitusta, jolloin liitoksen väsymiskestävyyttä saadaan parannettua.

LÄHTEET

Fricke, W. 2012. IIW Recommendations for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-Document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. 36 s.

Hobbacher, A. 2014. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. IIW-Document XIII-2460-13/XV-1440-13. 164 s.

Lassen, T. & Récho, N. 2006. Fatigue Life Analyses of Welded Structures. ISTE Ltd. ISBN 978-1-905209-54-5. 407 s.

Liu, G.R. & Quek, S.S. 2014. The Finite Element Method. Elsevier Ltd. ISBN 978-0-08-098356-1. 464 s.

Niemi, E., Fricke, W.,Maddox, S.J. 2018. Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components. Second Edition. Springer Nature Singapore Pte Ltd. ISBN 978-981-10-5567-6. 76 s.

Tulokset ENS-menetelmällä vetokuormitustapauksessa		
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 2 mm	2,040
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 4 mm	2,306
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 6 mm	2,367
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 2 mm ja a2 = 6 mm	2,620
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 3 mm ja a2 = 6 mm	2,745
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 6 mm	2,703
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 8 mm	2,939
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 8 mm	2,460
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 6 mm ja t1.2 = 8 mm	2,397
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 12 mm	2,627

Tulokset ENS-menetelmällä taivutuskuormitustapauksessa		
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 2 mm	1,917
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 4 mm	1,855
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 6 mm	1,838
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 2 mm ja a2 = 6 mm	1,039
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 3 mm ja a2 = 6 mm	1,253
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 6 mm	1,465
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 8 mm	1,076
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 8 mm	1,613
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 6 mm ja t1.2 = 8 mm	1,745
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 12 mm	1,372

Tulokset Hot Spot-menetelmällä vetokuormitustapauksessa		
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 2 mm	1,000
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 4 mm	1,000
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 6 mm	1,000
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 2 mm ja a2 = 6 mm	1,347
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 3 mm ja a2 = 6 mm	1,236
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 6 mm	1,123
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 8 mm	1,343
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 8 mm	1,067
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 6 mm ja t1.2 = 8 mm	1,020
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 12 mm	1,215

Tulokset Hot Spot-menetelmällä taivutuskuormitustapauksessa		
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 2 mm	1,000
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 4 mm	1,000
Symmetrinen rakenne	a1 = a2 = 6 mm	1,000
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 2 mm ja a2 = 6 mm	0,571
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 3 mm ja a2 = 6 mm	0,737
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 6 mm	0,860
Epäsymmetriset hitsit	a1 = 4 mm ja a2 = 8 mm	0,587
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 8 mm	0,901
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 6 mm ja t1.2 = 8 mm	0,941
Erilaiset ainevahvuudet (a = 4 mm)	t1.1 = 4 mm ja t1.2 = 12 mm	0,757