VÄSYMISSÄRÖN HUOMIOON OTTAMINEN TEHOLLISEN LOVIJÄNNITYKSEN MENETELMÄSSÄ

CONSIDERATION OF FATIGUE CRACK IN THE EFFECTIVE NOTCH STRESS CONCEPT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Tuomo Saksa

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Tuomo Saksa

Väsymissärön huomioon ottaminen tehollisen lovijännityksen menetelmässä

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

33 sivua, 15 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: Tehollinen lovijännitys, ENS, väsymissärö, hitsattu T-liitos

Tämä kandidaatintyö toteutetaan LUT-yliopiston teräsrakenteiden laboratoriolle. Työssä selvitetään ENS-menetelmän mahdollisuutta ottaa huomioon väsymissärö. Selvitys tehdään tarkastelemalla kuormaa kantamatonta T-liitosta kahdella kuormitustyypillä. Väsymissärö mallinnetaan hitsin rajaviivalle ja sen vaikutusta tarkastellaan eri säröko'oilla. Rakenteen väsymisluokat määritetään hyödyntämällä FE-menetelmää. Elementtimallit noudattavat IIW:n antamaa ohjeistusta ENS-menetelmästä.

Määritettyjen väsymisluokkien oikeellisuutta arvioidaan vertaamalla niitä särönkasvuanalyysillä määritettyihin väsymisluokkiin. Särönkasvuanalyysi toteutetaan olemassa olevalla LEFM-mallilla. Sen väsymisluokat eri säröko'oille määritetään valmiilla laskentapohjalla.

Korjauskertoimen mahdollisuutta selvitetään eri analyyseillä määritettyjen väsymisluokkien välisellä suhteella. Tuloksista havaitaan väsymisluokkien suhdeluvun eroavan kuormitustyyppien välillä. Kuitenkin analyysitulosten välinen suhde lähestyy vakioarvoa kuormitustyypeittäin. Työn lopussa määritetään tämän perusteella jatkotutkimustarpeet.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Tuomo Saksa

Consideration of fatigue crack in the effective notch stress concept

Bachelor's thesis

2022

33 pages, 15 figures, 3 tables and 2 appendices

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

Keywords: Effective Notch Stress, ENS, fatigue crack, welded T-joint

This bachelor's thesis is made for the Laboratory of Steel Structures of LUT University. The work explores ENS concepts possibility to take a fatigue crack into consideration. The survey will be done by studying non-load carrying T-joint with two loading types. The fatigue crack is being modelled on the weld toe. Effects of the fatigue crack are studied by changing its size. Fatigue classes of the structure are being defined by utilizing the FE method. FE models follow the instructions given by IIW.

The correctness of the defined fatigue classes is assessed by comparing them with the fatigue classes determined by the crack propagation analysis. Crack propagation analysis is implemented by using the existing LEFM model. Its fatigue classes are determined by using a ready-made calculation file.

The possibility of the correction factor is studied by evaluating the ratio of fatigue classes determined by various analyses. In terms of ratio between fatigue classes, it is observed to differ by different types of loads. The relationship between the analysis results approaches constant value by the load type. The need for further research will be determined on this basis at the end of the thesis.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

a	särökoko	[mm]
C	materiaalivakio	[-]
E	kimmomoduuli	[GPa]
K_t	jännityskonsentraatiokerroin	[-]
m	S-N-käyrän kulmakerroin	[-]
N	kestoikä, jännitysvaihteluiden lukumäärä	[-]
n	Parisin särönkasvulain eksponentti	[-]
t	paksuus	[mm]
x	korjauskerroin	[-]

Kreikkalaiset

ΔK	jännitysintensiteettikertoimen muutos	[MPa/mm]
v	Poissonin vakio	[-]
σ	jännitys	[MPa]

Alaindeksit

b	taivutus (bending)
m	kalvo (membrane)

Lyhenteet

ENS	tehollinen lovijännitys (Effective Notch Stress)

FEM	äärellisten elementtien menetelmä (Finite Element Method)
IIW	kansainvälinen hitsausinstituutti (International Institute of Welding)
LEFM	lineaarielastinen murtumismekaniikka (Linear Elastic Fracture Mechanics)
SIF	jännitysintensiteettikerroin (Stress Intensity Factor)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1 Johdanto 8
1.1 Työn tausta 8
1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset 9
1.3 Tutkimuskysymykset 10
2 Teoria 11
2.1 Väsymissärön ydintyminen hitsiliitokseen 11
2.2 Särönkasvumekanismit 13
2.3 FE-menetelmä 14
2.4 ENS-menetelmä 15
2.5 Väsymistarkastelu 16
3 Tutkimusmenetelmät 18
3.1 Elementtien ominaisuudet 18
3.2 Elementtiverkko 19
3.3 Reunaehdot ja kuormitukset 22
3.4 LEFM-analyysin tulosten jälkikäsittely 23
4 Tulokset 25
4.1 FE-analyysit 25
4.2 LEFM-analyysit 28
4.3 Väsymisluokkien vertailu 29
5 Analyysi 31
6 Yhteenveto 32
Lähteet 33

Liitteet

Liite 1. ENS-mallien analyysien kuvat

Liite 2. Käyttöön saatu laskentapohja

1 Johdanto

1.1 Työn tausta

Hitsattuja teräsrakenteita voi havaita tavallisessa arjessa päivittäin. Niitä käytetään esimerkiksi autoissa, työkoneissa ja silloissa. Yhteistä edellä mainituille esimerkeille on niiden kuormituksen luonne. Autolla kuoppaan ajettaessa auton runko joutuu rasitukselle, työkoneella taakkaa siirrettäessä koneen rakenteet rasittuvat ja sillat kantavat vaihtelevan suuruisia taakkoja. Pitkällä ajanjaksolla kaikkien esimerkkitapausten kuormituksille olisi mahdollista määrittää jonkinlainen sykli, joka kertoisi kuormitusten toistuvuudesta.

Fuštar, Lukačević ja Dujmović (2018, s.1) toteavat artikkelissaan syklisesti vaihtelevan kuormituksen alaisten hitsattujen teräsrakenteiden olevan alttiita väsymiselle. Väsyminen voi heidän mukaansa johtaa väsymissärön syntymiseen hitsin alueella. Väsymissärö voi syntyä hitsin rajaviivalle tai juureen (Hobbacher 2016, s.19).

Väsymissärön vaikutus väsymislujuuteen voidaan määrittää suorittamalla lineaarielastinen murtumismekaaninen (Linear Elastic Fracture Mechanics, LEFM) analyysi (Dong & Guedes Soares 2018, s.79). Kyseessä on numeerinen analyysi, joka on yleisesti monivaiheinen ja työläs. Jännitysperusteisia menetelmiä puolestaan käytetään säröttömien rakenteiden väsymislujuuden määritykseen. Yksinkertaisten, mutta tarkkojen laskentamenetelmien kehittämiseksi on tärkeää tunnistaa, löytyisikö niistä vaihtoehtoinen menetelmä murtumismekaaniselle analyysille.

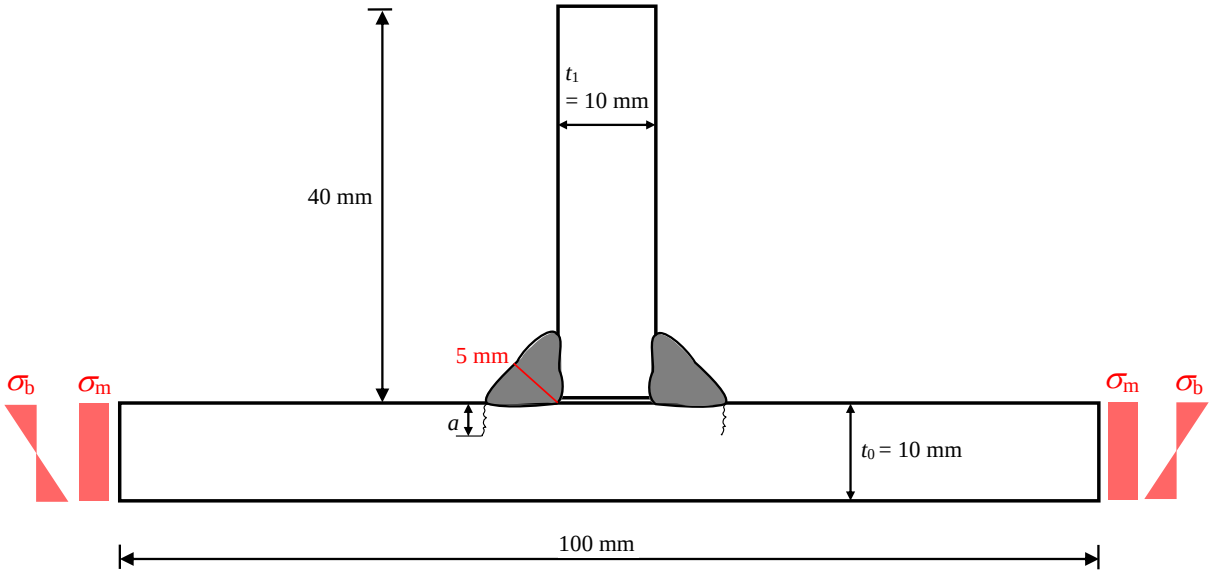
Teräsrakenteiden suunnittelua ohjaa yleisesti Eurocode 3 eli standardi EN 1993. Sen osa 1-9 käsittelee väsymistä ja siinä esitetään väsymiskestoiän laskentamenetelmäksi nimellisen jännityksen menetelmä. Tulevaisuudessa standardin osa 1-9 on saamassa päivityksen, joka sisältää tehollisen lovijännityksen (Effective Notch Stress, ENS) menetelmän (prEN 1993-

1-9 2020, s. 87). Kyseinen päivitys kasvattaa ENS-menetelmän käyttöä merkittävästi, joten on kiinnostavaa selvittää sen mahdollisuuksia ennakkoon.

1.2 Työn tavoitteet ja rajaukset

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on selvittää ENS-menetelmän mahdollisuutta ottaa huomioon väsymissärö. Menetelmän mahdollisuuksia tutkitaan vertaamalla sillä määritettyjä väsymisluokkia LEFM-analyysillä määritettyihin väsymisluokkiin eri säröko'oilla. On mahdollista, että ENS-menetelmä toimii vain joillakin säröko'oilla. Näin ollessa, tarkastellaan särökoon muuttamisen vaikutuksia ja mahdollisuuksien mukaan määritetään ENS-menetelmän toimivuuden voimassaoloehdot. Voimassaoloehtojen avulla on mahdollista luoda ohjeet laskennalle, jolla saadaan murtumismekaniikalla ratkaistua väsymiskestoikä-ennustetta vastaavat tulokset yksinkertaisemmin. Laskennan yksinkertaistuessa myös suunnittelun yhteydessä tapahtuvien inhimillisten virheiden todennäköisyys pienenee.

Menetelmän mahdollisuuksia tutkitaan tarkastelemalla kuormaa kantamatonta T-liitosta, jossa on molemminpuolinen pienahitsi. Hitsin a-mitta on 5 mm ja sen oletetaan olevan ilman tunkeumaa. Liitoksen molempien levyjen paksuus on 10 mm. Särökoon vaikutusta tarkastellaan yhdeksällä eri särökoolla ja vertailtavalla säröttömällä rakenteella. Rakennetta kuormittaa 1 MPa:n suuruinen kalvojännitys σ_m ja samansuuruinen taivutusjännitys σ_b, joiden vaikutuksia tarkastellaan erikseen. Kalvojännitys on rakenneosan normaalin suuntainen jännitys, joka on vakio levyn paksuuden yli. Taivutusjännitys puolestaan on lineaarisesti levyn paksuuden yli muuttuva jännitys, joka tässä tapauksessa saa levyn yläpinnalla arvon 1 MPa ja levyn alapinnalla -1 MPa. Tarkasteltava rakenne, sen mitat, kuormitukset ja särön sijainti ovat havainnollistettuna kuvassa 1. Tässä työssä a on särökoko.



Kuva 1. Tarkasteltava rakenne mittoineen ja kuormituksineen. Kuormitusten suuruus on 1 MPa.

1.3 Tutkimuskysymykset

ENS-menetelmän mahdollisuutta selvitetään etsimällä vastauksia seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten ENS-menetelmällä määritetyt väsymisluokat eroavat LEFM-analyysillä määritetyistä väsymisluokista?
- Mitkä ovat ENS-menetelmän toimivuuden voimassaoloehdot?

Vastaukset tutkimuskysymyksiin muodostetaan ENS-menetelmän mukaisten äärellisten elementtien (Finite Element, FE) analyysien ja LEFM-analyysin avulla. Tarvittava laskenta noudattaa kansainvälisen hitsausinstituutin (International Institute of Welding, IIW) antamaa ohjetta.

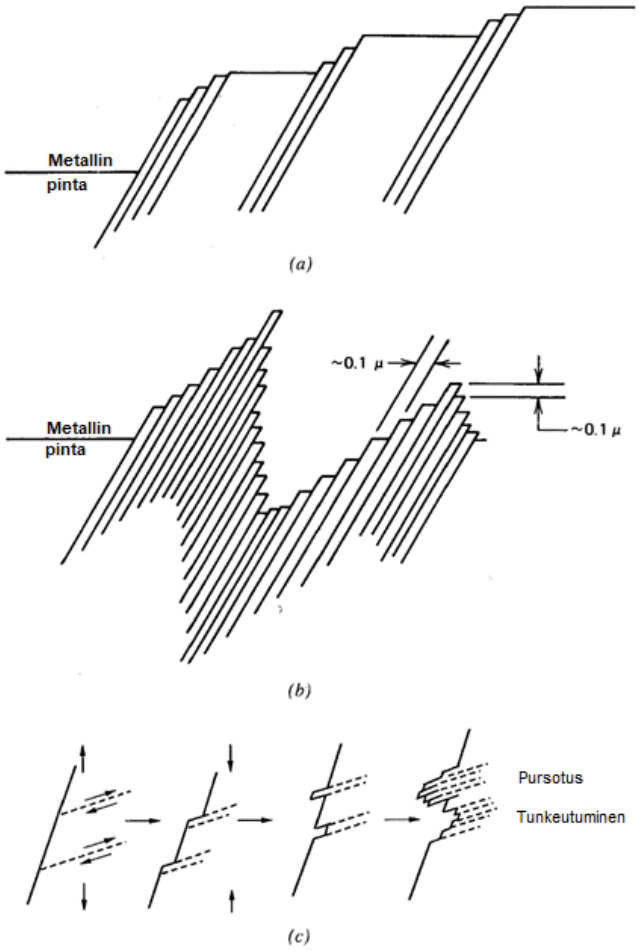
2 Teoria

Vaihtelevan kuormituksen alainen hitsattu teräsrakenne on alttiina väsymiselle, kuten johdannossa jo todettiin. Vaihteleva kuormitus voi synnyttää rakenneosaan särön, joka kasvaa kumulatiivisesti kuormituksen mukana. Väsymisvaurio voi syntyä, vaikka jännitysvaihtelun ääriarvot pysyisivät myötörajan alapuolella. (Fuštar et al. 2018, s.1.) Myötörajaksi kutsutaan suurinta staattista jännitysarvoa, jolla rakenteeseen ei aiheudu pysyviä muodonmuutoksia.

Tässä luvussa tarkastellaan väsymissärön syntymistä hitsiliitokseen käsittelemällä särön syntymekanismi ja sen kasvun eteneminen. Tämän jälkeen käsitellään ENS-menetelmän ja särönkasvuanalyysin vertailuun tarvittava teoriatieto sekä johdetaan analyysitulosten jälkikäsittelyssä tarvittava yhtälö.

2.1 Väsymissärön ydintyminen hitsiliitokseen

Väsymissärö saa rakenteessa alkunsa ydintymällä, joka voi tapahtua dislokaatiomekanismilla. Stephens, Fatemi, Stephens ja Fuchs (2001, s.45–49.) esittelevät kirjassaan dislokaatiomekanismin mikroskooppisella tasolla. Heidän mallissaan vierekkäiset tasot liukuvat toistensa suhteen plastisesti. Staattisella kuormituksella tasot liukuvat samansuuntaisesti (kuva 2a) ja vaihtelevan kuormituksen seurauksena osa tasoista liukuu materiaalin sisään ja osa siitä ulospäin (kuva 2b). Syklisen kuormituksen seurauksena tasot muodostavat joukkoja, joista osa tunkeutuu materiaalin sisään ja osa liukuu materiaalin pinnan ulkopuolelle (kuva 2c). Joukkojen yhdistyessä rakenteeseen syntyy mikroskooppinen särö, johon muodostuu jännityskonsentraatiopiste. Tämän vuoksi kyseiseen kohtaan voi syntyä särö, joka jatkaa kasvuaan särönkasvumekanismeilla.



Kuva 2. Ulkoisen kuormituksen aiheuttama tasojen liukuminen. (a) Staattinen kuormitus ja (b) vaihteleva kuormitus. (c) Ydintymisen eteneminen tasojoukkojen pursotuksella ja tunkeutumisella. (mukaillen: Stephens et al. 2001, s.46.)

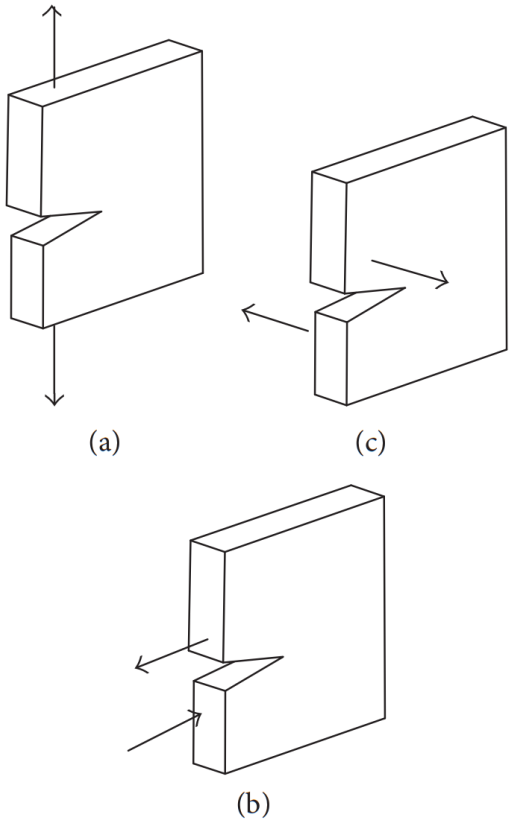
Ydintyminen voi tapahtua myös materiaalisten epäjatkuvuuksien seurauksena. Tällaisia ovat esimerkiksi hitsauksen aiheuttama sulkeuma, huokoinen ja korroosiovaurio. Usein kuitenkin näissäkin tapauksissa mikrosärö syntyy tasojen liukumien seurauksena. (Stephens et al. 2001, s.49.)

Jännityksen suuruus vaikuttaa merkittävästi väsymissärön ydintymiseen. Kohtiin, joissa rakenteen poikkileikkaus muuttuu merkittävästi, syntyy jännityskonsentraatiota. Tämän takia sellaisessa pisteessä ilmenee usein myös ydintymistä. (Stephens et al. 2001, s.43.)

Hitsin rajaviiva on esimerkki tällaisesta pisteestä, joka tekee siitä väsymisen kannalta kriittisen pisteen.

2.2 Särönkasvumekanismit

Särönkasvumekanismit puolestaan jaetaan kolmeen eri perustyyppiin. Mekanismi I (kuva 3a) on tyypiltään avaava, jolloin väsymissärö etenee kuormitusta vastaan kohtisuorassa suunnassa. Mekanismi II (kuva 3b) ja III (kuva 3c) ovat tyypeiltään leikkaavia, jolloin särön etenemistä määrää leikkausjännitys. (Fuštar et al. 2018, s.10.) On olemassa muitakin särönkasvumekanismeja, mutta tässä työssä molemmat tarkasteltavat kuormitustyypit aiheuttavat tyypin I särönkasvumekanismin aktivoitumisen.



Kuva 3. Särönkasvumekanismit. (a) Mekanismi I (avaava), (b) mekanismi II (leikkaava) ja (c) mekanismi III (leikkaava). (Fuštar et al. 2018, s.12.)

Väsyminen jakautuu siis kahteen vaiheeseen: ydintymiseen ja särönkasvuvaiheseen. Alkuviallisilla, hitsatuilla teräsrakenteilla ydintymiseen kuluva jännitysvaihteluiden syklimäärä on merkittävästi pienempi, kuin särönkasvuvaiheeseen kuluva syklimäärä. Niinpä väsymisen voidaan yksinkertaistaa koostuvan hitsatuilla teräsrakenteilla vain särönkasvuvaiheesta. (Dong & Guedes Soares 2019, s. 70.) Tämän vuoksi särönkasvuanalyysillä voidaan määrittää säröllisen rakenteen kestoikä tarkasti.

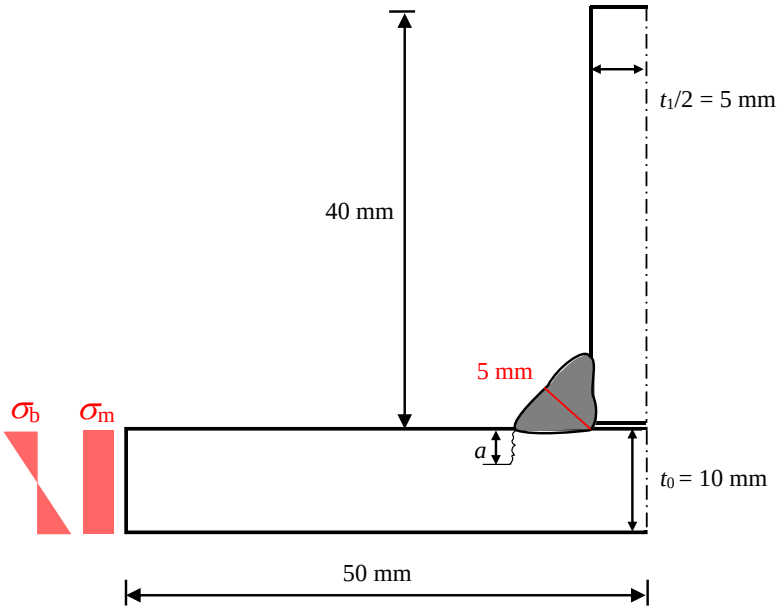
2.3 FE-menetelmä

FE-menetelmä eli äärellisten elementtien menetelmä on numeerinen menetelmä, jolla voidaan ratkaista diskreettejä ongelmia tietokoneavusteisesti (Zienkiewicz, Taylor & Zhu 2013, s. 1). Ongelma on diskreetti, mikäli sillä on äärellinen määrä ratkaisuja. FE-menetelmässä tarkasteltava rakenne jaetaan rakenneosiin, joita kutsutaan elementeiksi. Elementit yhdistyvät toisiinsa pisteistä, joita kutsutaan solmuiksi. Elementit ja solmut muodostavat yhdessä kokonaisuuden, joka approksimoi tarkasteltavaa rakennetta. Koko rakenteen käyttäytymistä voidaan approksimoida, kun jokaisen elementin ominaisuudet tunnetaan.

FE-menetelmällä ratkaistaan aina ensisijaisesti solmusiirtymiä. Kuitenkin, kun tiedetään jokaisen elementin ominaisuudet, voidaan siirtymien avulla ratkaista elementeissä vaikuttavat jännitykset. Jännitystulosten toissijaisuuden takia ne eivät ole yhtä tarkkoja kuin siirtymätulokset. Riittävällä elementtimäärällä ja tapauskohtaisilla yksinkertaistuksilla voidaan saavuttaa kuitenkin riittävän tarkkoja jännitystuloksia. Tässä työssä käytettyjen elementtimallien yksityiskohdat käsitellään luvussa 3.

Elementtimalleille on ominaista, että tason suhteen symmetrisellä mallilla on tason molemmin puolin yhtä suuret siirtymät. Symmetriaa hyödyntämällä laskennassa käytetyn jäykkyysmatriisin koko pienenee merkittävästi ja siten ratkaisuun vaadittava laskenta-aika vähenee. Symmetriaa hyödynnettäessä symmetriatasolle täytyy muistaa määrittää symmetriareunaehdot, jotka pakottavat symmetriatason käyttäytymään kuten kyseessä olisi koko

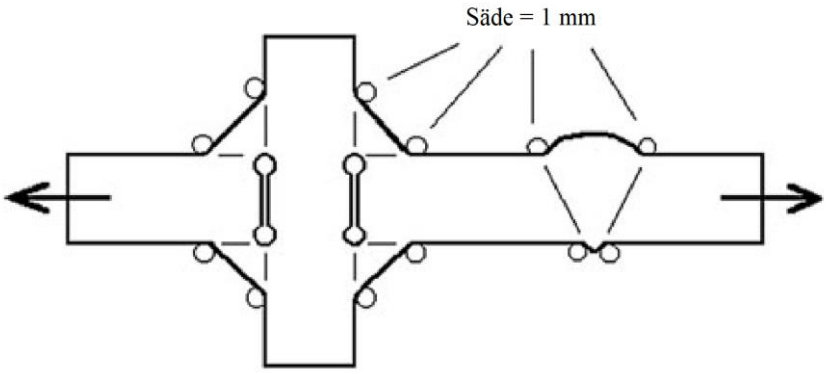
rakenteen malli. Niinpä tässä työssä symmetriatason vasemmalle puolelle jäävän osan tarkastelu riittää koko rakennetta koskevien tulosten saamiseksi (kuva 4).



Kuva 4. Symmetriatason vasemmanpuoleinen osa, josta luodaan elementtimallit.

2.4 ENS-menetelmä

ENS-menetelmä tarkoittaa menettelyä, jossa hitsin rajaviivoille ja juurelle tehdään fiktiivinen pyöristys 1 mm säteellä. Pyöristysten sijainnit on esitetty kuvassa 5. Menetelmässä määritetään loven pohjalla vaikuttava jännitys, joka ottaa pyöristyksen ansiosta huomioon materiaalin epälineaarisen käyttäytymisen sekä hitsin muotokertoimet. (Hobbacher 2019, s. 27.) Kyseistä menetelmää kutsutaan tehollisen lovijännityksen menetelmäksi, koska 1 mm säteen pyöristyksellä määritetty jännitys vastaa rakenteen väsymisen kannalta tehollista jännitystä (Fricke 2010, s.3).



Kuva 5. ENS-menetelmän fiktiivisten pyöristysten sijainnit ja suuruudet (mukaillen: Hobbacher 2016, s. 27).

Tässä työssä tutkitaan ENS-menetelmän hyödyntämistä hitsin rajaviivalla vaikuttavan väsymissärön huomioon ottamiseen. Kuormaa kantamattomassa hitsiliitoksessa väsymisen kannalta kriittinen piste sijaitsee hitsin kuormitetun levyn puoleisella rajaviivalla. Näin ollen ENS-menetelmän mukainen fiktiivinen pyöristys tehdään ainoastaan kyseiseen pisteeseen. Pyöristysten tekeminen hitsin toiselle rajaviivalle ja juureen lisäisi mallinnuksen ja elementtiverkotuksen työmäärää tarkentamatta tuloksia.

2.5 Väsymistarkastelu

Väsymismitoituksessa käytetään niin kutsuttuja S-N-käyriä, joissa pystyakselilla on nimellisjännityksen vaihtelun suuruus $\Delta\sigma$ ja vaaka-akselilla kuormitusvaihteluiden määrä N eli rakenteen kestoikä. S-N-käyrät ovat määritelty kokeellisesti eri kuormitustyypeille ja väsymisluokille. IIW käyttää väsymisluokista lyhennettä *FAT*. Väsymisluokka tarkoittaa rakenteen nimellisjännityksen vaihtelun suuruutta, jolla rakenteen väsymiskestoikä on kaksi miljoonaa kuormitusvaihtelua. *FAT*-arvot ovat määritelty eri liitostyypeille ja materiaaleille erikseen. Kun tunnetaan rakenteen väsymisluokka *FAT* ja ulkoisten kuormien aiheuttamien jännitysvaihteluiden suuruus $\Delta\sigma$, voidaan S-N-käyrän avulla määrittää rakenteen kestoikä N. (Hobbacher 2016, s.38–40.)

Liitostyypille määritetty *FAT*-arvo ei ota huomioon väsymissäröä. Ainut keino, jolla IIW ohjeistaa huomioimaan sen, on särönkasvuanalyysi (Hobbacher 2016, s.80). Kuitenkin eri särökokojen ENS-malleille voidaan määrittää *FAT*-arvo niiden analyysituloksista määritettävien jännityskonsentraatiokertoimien K_t avulla.

$$FAT = \Delta\sigma_{\text{applied}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N}{2 \cdot 10^6}} \tag{1}$$

jossa $\Delta\sigma_{\text{applied}}$ on ulkoisen kuormituksen aiheuttama jännitysvaihtelu, m on S-N-käyrän kulmakerroin ja N on kuormitusvaihteluiden määrä (Hobbacher 2016, s.34).

$$FAT_{\text{ENS}} = \Delta\sigma_{\text{ENS}} \cdot \sqrt[m]{\frac{N}{2 \cdot 10^6}} \tag{2}$$

jossa FAT_{ENS} on tehollisen loven väsymisluokka, $\Delta\sigma_{\text{ENS}}$ tehollisessa lovessa vaikuttava jännitysvaihtelu.

$$\Delta\sigma_{\text{ENS}} = K_t \cdot \Delta\sigma_{\text{applied}} \tag{3}$$

jossa K_t on lovessa vaikuttava jännityskonsentraatiokerroin.

$$FAT_a = \frac{FAT_{\text{ENS}}}{K_{t,a}} \tag{4}$$

jossa a on särökoko.

IIW määrittelee tehollisen loven *FAT*-arvoksi 225 MPa S-N-käyrän kulmakertoimella $m = 3$ (Hobbacher 2016, s.62). Yhtälön 2 nojalla voidaan määrittää ENS-mallin kestoikä tehollisen loven *FAT*-arvon ja lovijännityksen suhteena. Kun näin määritetty kestoikä sekä yhtälöstä 3 ratkaistu $\Delta\sigma_{\text{applied}}$ sijoitetaan yhtälöön 1, voidaan ENS-mallin *FAT*-arvo esittää säröko'oittain tehollisen loven väsymisluokan ja lovessa vaikuttavan jännityskonsentraatiokertoimen suhteena (yhtälö 4). Näin ENS-mallien analyyseistä saadaan LEFM-analyysien kanssa vertailukelpoiset väsymisluokat.

3 Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa käsitellään ENS-menetelmän mukaisten elementtimallien yksityiskohdat. Lisäksi viimeisessä alaluvussa käsitellään LEFM-analyysin tuloksille tarvittavat toimenpiteet. Elementtimallit ja niiden analyysit tehdään Simcenter Femap -ohjelman opiskelijaversiolla. Elementtimalleissa noudatetaan IIW:n antamaa suositusta ENS-menetelmästä. Ohjeen mukaan kolmiulotteinen malli voidaan yksinkertaistaa kaksiulotteiseksi, kun rakenteen kuormitus on kohtisuorassa hitsiin nähden. Lisäksi kuormitus ja geometria tulee pysyä vakiona hitsin pituuden yli. (Hobbacher 2016, s. 29.) Molemmat ehdot täyttyvät tarkasteltavassa rakenteessa, joten rakenteesta tehdään kaksiulotteinen tasomalli.

Ensimmäinen malli tehdään säröttömästä rakenteesta, jonka hitsin rajaviiva on pyöristetty IIW:n ohjeen mukaan. Kyseistä mallia muokkaamalla luodaan kaikkien tarkasteltavien särökokojen elementtimallit. Tällöin riittää, kun mallinnetaan lovigeometria uudestaan ja luodaan muokatulle alueelle uusi elementtiverkko. Tähän palataan elementtiverkkoa käsittelevässä alaluvussa. Seuraavissa alaluvuissa käydään läpi tarkemmin jokaista elementtimallia koskevat yksityiskohdat.

3.1 Elementtien ominaisuudet

Tarkasteltavan liitosrakenteen materiaali on teräs. Teräksen materiaaliparametrit ovat seuraavat: kimmomoduuli E = 210 GPa ja Poissonin vakio ν = 0,3. Kyseiset parametrit asetettiin jokaiseen elementtimalliin.

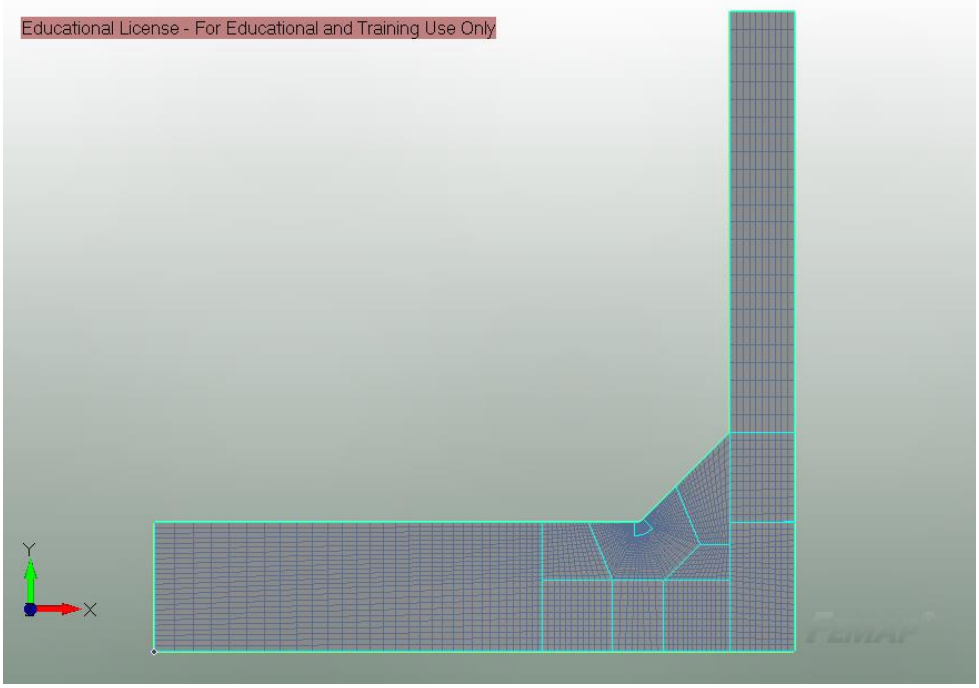
Suurien jännityskeskittymien alueilla venymät tapahtuvat tarkasteltavan tason suuntaisesti. Niinpä hitsien lovialueiden tarkastelussa sovelletaan tasovenymätilaa. (Fricke 2010, s. 12.) Elementtimalleihin valitaan Plane Strain -elementit, jotka noudattavat edellä mainittua käyttäytymistä, eli ne voivat venyä vain tarkasteltavassa tasossa. Elementtien paksuudeksi asetetaan 1 mm.

Hitsin juuri mallinnetaan terävänä maltillisella elementtikoolla. Terävään hitsin juureen muodostuu singulaarinen piste, jonka jännitys lähestyisi ääretöntä elementtikokoa pienennettäessä. Maltillisella elementtikoolla juuren singulaarisen pisteen jännitys saadaan pidettyä riittävän pienenä. Näin vältytään tulosten tarkastelussa käytettävän väriskaalauksen häiriintymiseltä.

3.2 Elementtiverkko

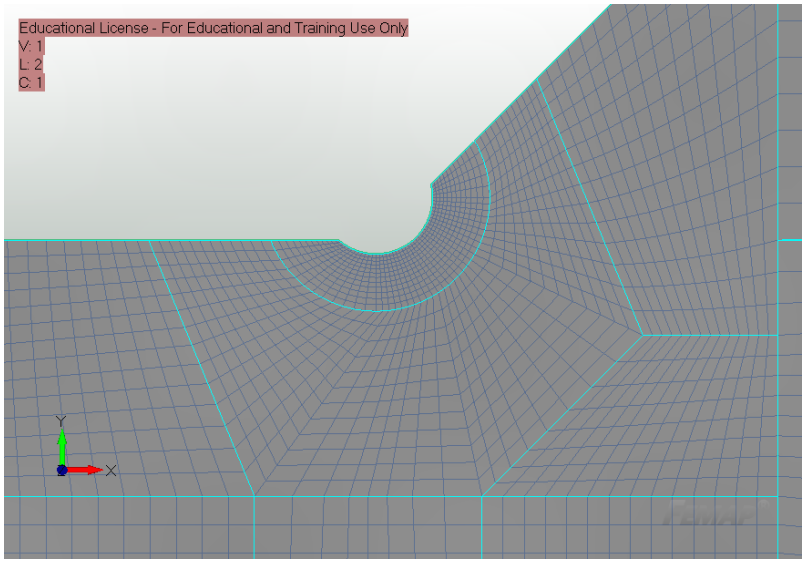
IIW ohjeistaa ENS-menetelmän elementtiverkosta seuraavasti: rajaviivalle tehtävän fiktiivisen pyöristyksen säde on oltava 1 mm ja 45 asteen pyöristyksen matkalla on parabolisia elementtejä oltava vähintään kolme. Täyden 360 asteen pyöristyksen matkalla parabolisia elementtejä tulee olla vähintään 24. (Hobbacher 2016, s. 29.) Elementtien lukumääräksi asetetaan kyseisissä kohdissa minimimäärää suurempi määrä siten, että elementin sivun pituus on alle 0,20 mm. Näin tulokset tarkentuvat, koska elementtimenetelmälle on ominaista tulosten konvergointi kohti todellisia arvoja elementtimäärää kasvatettaessa.

Elementtiverkko tehdään jakamalla tarkasteltava rakenne osapintoihin (kuva 6). Tällöin eri särökokoja tarkasteltaessa voidaan kaikki osapinnat elementtiverkkoineen särön ympärillä olevaa osapintaa lukuun ottamatta pitää vakioina. Näin toimimalla voidaan vähentää eri särökokojen elementtimallien verkotukseen kuluvaa aikaa. Samalla varmistutaan tulosten vertailukelpoisuudesta elementtiverkon ollessa mahdollisimman yhdenmukainen eri elementtimallien välillä.



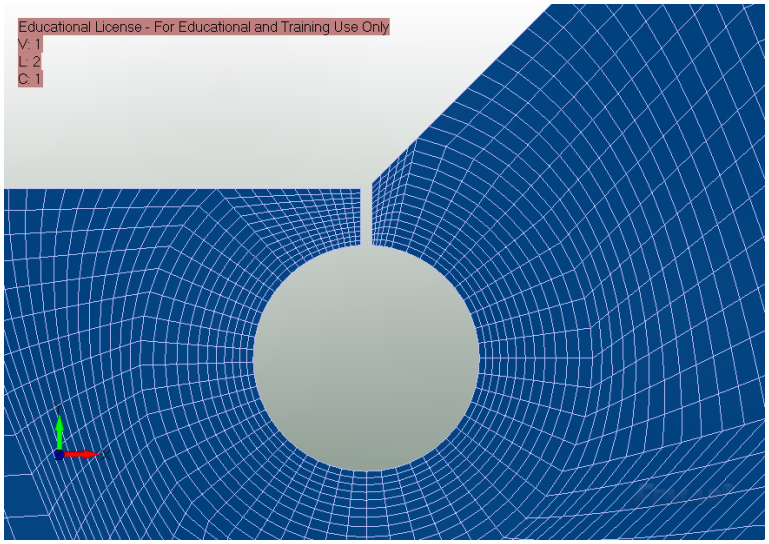
Kuva 6. Osapintoihin jaettu elementtimalli verkon hallinnan mahdollistamiseksi.

Lovialueen osapinnan ollessa riittävän suuri, voidaan särökokojen elementtimallit luoda yksinkertaisesti särötöntä elementtimallia hyödyntäen. Lovi mallinnetaan hitsin rajaviivalle siten, että pyöristyksen alin kohta on loven pohja. Loven pyöristyksen ympärille luodaan pyöreän muotoinen osapinta, jolla hallitaan elementtiverkon kasvua lovialueelta poispäin. Näin varmistutaan elementtikoon noudattavan IIW:n ohjetta ja saadaan elementtikoko muuttumaan sulavasti suuremmaksi. Kuvassa 7 on särökoon a = 0,25 mm elementtimalli, jossa näkyy edellä mainittu pyöreä osapinta.



Kuva 7. *a* = 0,25 mm särökoon elementtimalli, jossa lovialueen verkkoa hallitaan pyöreällä osapinnalla.

Kaikki tarvittavat elementtimallit luodaan muuttamalla säröttömään elementtimalliin tarkasteltava särökoko. Lisäksi elementtiverkon hallintaan käytetty pyöreä osapinta mukautetaan särön ympärille. Tarkasteltavista säröko'oista suurimman (*a* = 2,5 mm) elementtimallissa käytetään avaimenreikägeometriaa, jossa pyöristyksen yläpinnalta reikä nousee pystysuorassa levyn yläpinnalle (kuva 8). Pystysuorien seinämien välinen etäisyys on 0,1 mm.



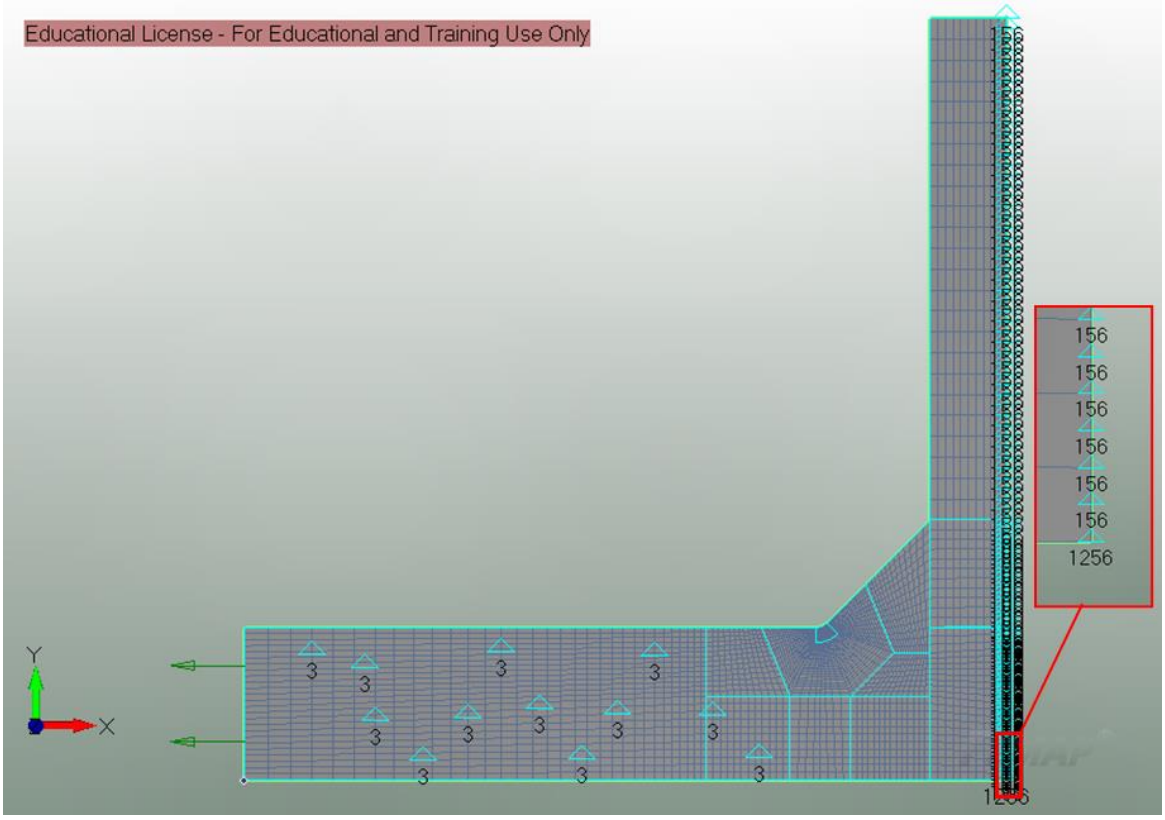
Kuva 8. *a* = 2,5 mm särökoon elementtimallissa käytetty avaimenreikägeometria.

3.3 Reunaehdot ja kuormitukset

Seuraavaksi käsitellään elementtimalleihin asetettavat reunaehdot, jotka ovat yhtenäiset jokaisessa elementtimallissa. Siirtymä- ja kiertymäreunaehdot esitetään Femapissa numeroin. Numerot 1–3 tarkoittavat järjestyksessä x-, y- ja z-akselin suuntaisen siirtymän estoa. Numerot 4–6 merkitsevät järjestyksessä kiertymän estoa x-, y- ja z-akselin ympäri. Seuraavassa kappaleessa on merkitty vielä erikseen sulkuihin numero, jolla käsiteltävää reunaehtoa kuvataan.

Elementtimallissa hyödynnetään symmetriaa kuten FE-menetelmää käsittelevässä kappaleessa todettiin. Symmetriareunaehto asetetaan symmetriatason kohdalle. Symmetriatasoa vastaan kohtisuora liike estetään (1) ja kaikki kiertymät pois lukien symmetriatason kohtisuoran ympäri tapahtuva kiertymä estetään (5, 6). Kaikki muut siirtymät ovat vapaita kaikissa solmuissa seuraavia poikkeuksia lukuun ottamatta. Symmetriatason kohdalle alakulmaan asetetaan reunaehto, jolla estetään pystysuuntainen siirtymä (2). Kyseisen reunaehdon tarkoitus on estää mallia liukumasta y-akselin suunnassa. Lisäksi joissakin yksittäisissä solmuissa estetään rakenteen poikkileikkauksen normaalin suuntainen liike (3). Tällä varmistetaan muodonmuutosten tapahtuvat tasossa, koska kyseessä on kaksiulotteinen tasomalli. Reunaehdot ovat näkyvillä kuvassa 9.

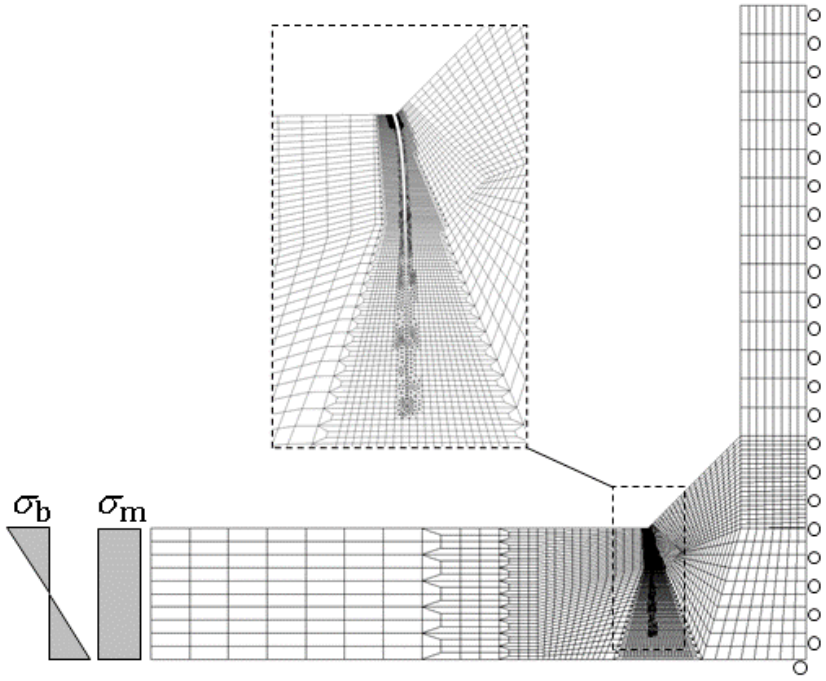
Kuten johdannossa mainittiin, tutkittavaa rakennetta kuormitetaan kalvo- ja taivutuskuormituksella erikseen. Paksuuden yli tasainen kalvojännitys sekä paksuuden yli lineaarisesti muuttuva taivutusjännitys asetetaan poikkileikkauksen vapaaseen päähän. Molempien kuormitusten suuruus on 1 MPa. Taivutusjännityksellä se tarkoittaa 1 MPa poikkileikkauksen normaalin suuntaista jännitystä palkin yläpinnalla ja -1 MPa jännitystä palkin alapinnalla. Jokaiselle elementtimallille suoritetaan erilliset analyysit molemmilla kuormitustapauksilla. Kuormitusten sijainti on esitetty kuvassa 9 vihreillä nuolilla.



Kuva 9. Säröttömän rakenteen elementtimallin reunaehdot ja kuormitukset.

3.4 LEFM-analyysin tulosten jälkikäsittely

Särönkasvuanalyysi toteutetaan olemassa olevan LEFM-mallin avulla (kuva 10). Mallista saadaan analyysituloksina jännitysintensiteettikertoimet (*SIF*, Stress Intensity Factor) eri säröko'oilla *a*. Jotta LEFM-analyysitulosten vertailu on mahdollista ENS-menetelmän tulosten kanssa, on tulokset muunnettava väsymisluokiksi (*FAT*). Olemassa olevalla laskentapohjalla LEFM-analyysin tulosdata interpoloidaan funktioksi ΔK, joka ilmoittaa jännitysintensiteettikertoimen muutoksen (Ahola 2022).



Kuva 10. Särönkasvuanalyysissä käytetty elementtimalli.

$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \Delta K^n \tag{5}$$

jossa *a* on särökoko [mm], *N* on jännitysvaihteluiden määrä, C_0 ja *n* ovat materiaalivakioita (Hobbacher 2016, s.73).

Parisin särönkasvulaista (yhtälö 5) laskentapohja määrittää jännitysvaihteluiden määrän *N* määrällisellä integraalilla alkusäröstä tarkasteltavaan särökokoon. Materiaalivakioiden arvoina käytetään $C_0 = 5{,}21 \times 10^{(-13)}$ ja $n = 3$. Tämän jälkeen ratkaistaan yhtälöllä (1) *FAT*-arvot LEFM-tuloksille, jotka ovat vertailukelpoiset ENS-mallien *FAT*-arvoihin. (Ahola 2022.)

4 Tulokset

Tässä luvussa käsitellään ENS-menetelmän mukaisten elementtimallien analyysien tulokset. Lisäksi tarkastellaan analyysituloksista johdetut ENS-mallien väsymisluokat sekä vertailtavat LEFM-särönkasvuanalyysillä määritetyt väsymisluokat. Lopuksi vertaillaan tuloksia lukua 5 silmällä pitäen.

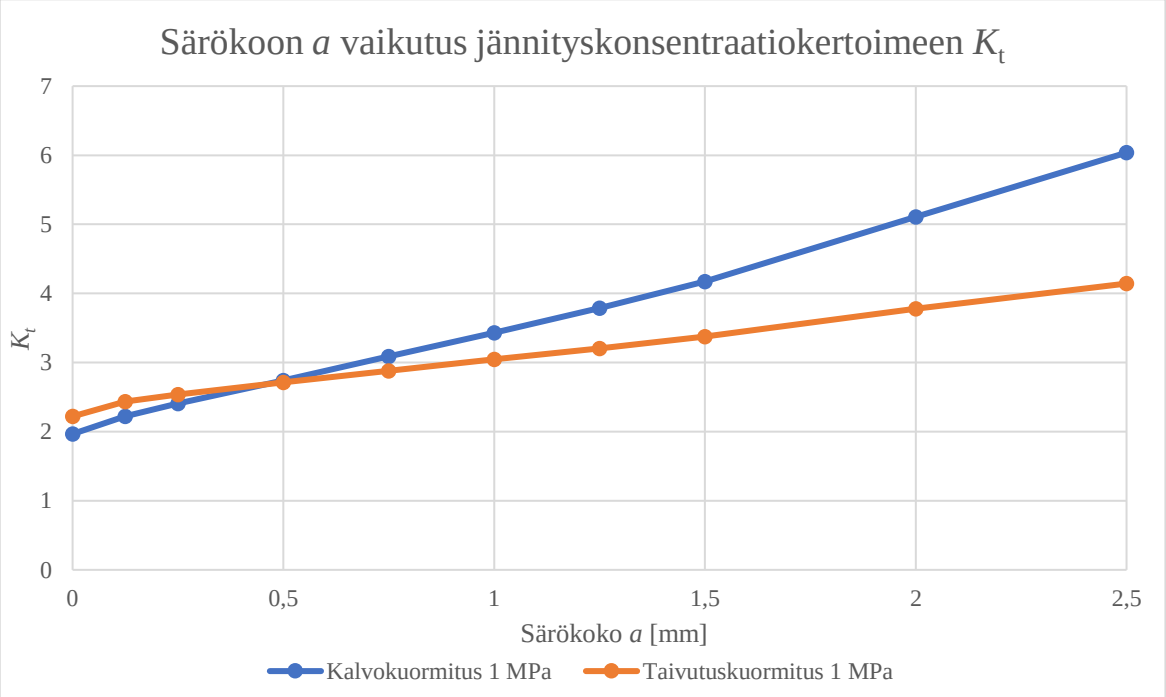
4.1 FE-analyysit

Analyysituloksista tarkastellaan rakenteessa vaikuttavia pääjännityksiä. Pääjännityksen suuruus hitsin rajaviivalla on yhtä suuri kuin jännityskonsentraatiokerroin K_t, koska ulkoisten kuormitusten arvoiksi valittiin 1 MPa. Näin ollen analyysituloksista voidaan taulukoida suoraan jännityskonsentraatiokertoimet, jotka sijaitsivat jokaisessa analyysissä tarkasteltavan loven pohjalla (taulukko 1). Liitteessä 1 on kuvat jokaisen särökoon analyysituloksista molemmilla kuormitustyypeillä.

Taulukko 1. FE-analyyseillä ratkaistut jännityskonsentraatiokertoimet K_t kuormituksittain.

Jännityskonsentraatiokerroin K_t		
Särökoko a [mm]	Kalvokuormitus 1 MPa	Taivutuskuormitus 1 MPa
0 (referenssi)	1,97	2,22
0,125	2,22	2,44
0,25	2,41	2,54
0,5	2,74	2,71
0,75	3,09	2,88
1	3,43	3,05
1,25	3,79	3,20
1,5	4,17	3,38
2	5,11	3,78
2,5	6,04	4,14

Taulukon 1 arvot ovat havainnollistettuna kuvassa 11, jossa särökoko on vaaka-akselilla ja jännityskonsentraatiokerroin pystyakselilla. Kuvasta nähdään kuinka pienien särökokojen jälkeen jännityskonsentraatio kasvaa melko lineaarisesti molemmilla kuormitustyypeillä. Kalvokuormituksen aiheuttama jännityskonsentraatiokerroin kasvaa särökoon mukana huomattavasti jyrkemmin.

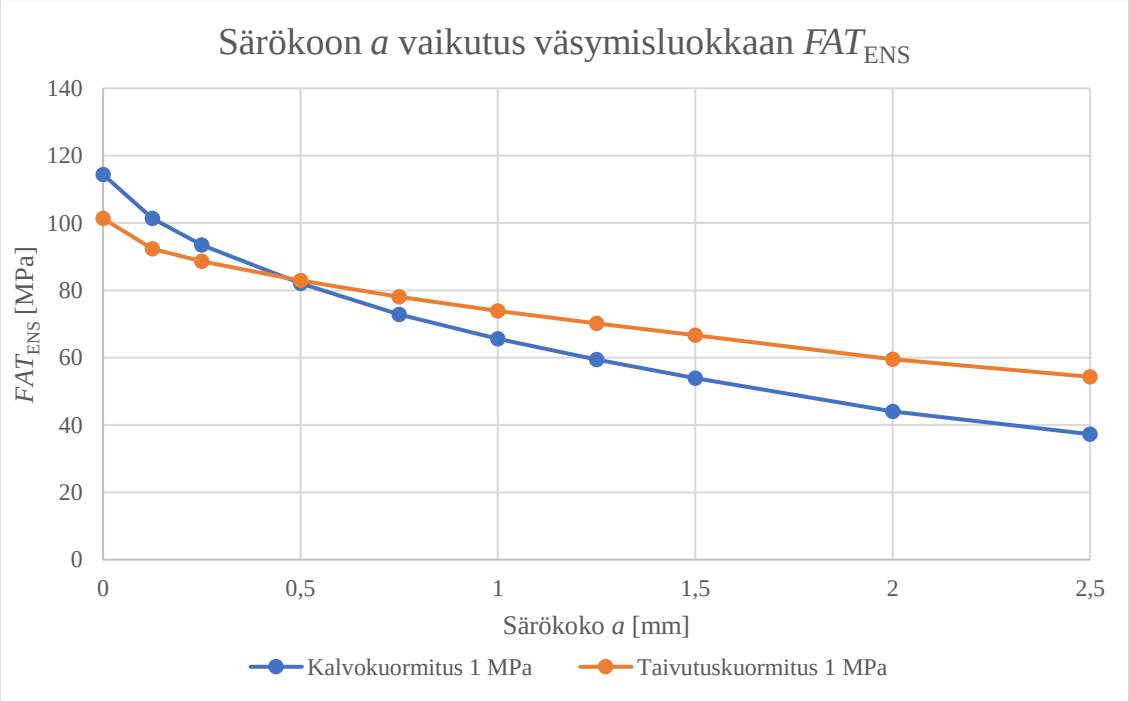


Kuva 11. Särökoon vaikutus jännityskonsentraatiokertoimeen eri kuormituksilla.

Taulukon 1 K_t arvoista voidaan yhtälön 4 nojalla määrittää ENS-mallien väsymisluokat säröko'oittain (taulukko 2). Kuvassa 12 on havainnollistettu särökoon vaikutus ENS-mallin väsymisluokkaan eri kuormitustyypeillä. Vaaka-akselilla on särökoko ja pystyakselilla väsymisluokka.

Taulukko 2. ENS-mallien analyysituloksilla määritetyt väsymisluokat säröko'oittain.

ENS-mallien väsymisluokat *FAT* [MPa]		
Särökoko *a* [mm]	Kalvokuormitus 1 MPa	Taivutuskuormitus 1 MPa
0 (referenssi)	114,41	101,33
0,125	101,31	92,35
0,25	93,51	88,59
0,5	82,05	82,91
0,75	72,85	78,07
1	65,56	73,85
1,25	59,42	70,22
1,5	53,89	66,61
2	44,03	59,55
2,5	37,27	54,31



Kuva 12. Särökoon vaikutus ENS-mallin väsymisluokkaan kuormitustyypeittäin.

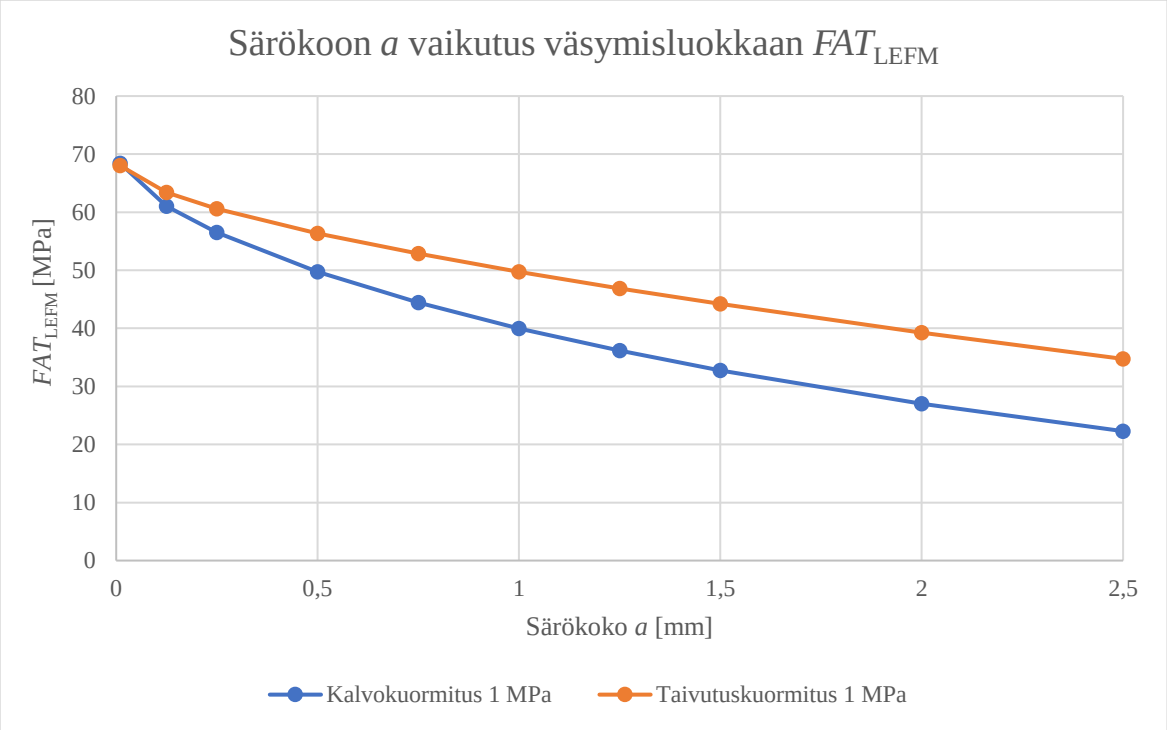
4.2 LEFM-analyysit

LEFM-analyysillä voidaan ratkaista alkuviattoman rakenteen väsymiskestoikä. LEFM-analyysi huomioi kuitenkin ainoastaan särönkasvuun kuluvan jännitysvaihteluiden määrän. Niinpä säröttömän rakenteen LEFM-malliin on mallinnettava pieni ydintynyt alkusärö. (Hobbacher 2016, s. 34.) Tässä työssä hyödynnetyssä LEFM-mallissa särönkasvuanalyysi on aloitettu 0,01 mm syvällä alkusäröllä ja päätetty samaan syvyyteen kuin suurin ENS-mallin särö (2,5 mm). Alkusärön (0,01 mm) voidaan ajatella vaikuttavan niin vähän kuormitusta vastaanottavaan nettokannakseen, että sen väsymisluokka on vertailukelpoinen säröttömän ENS-mallin väsymisluokkaan.

Taulukossa 3 on esitetty LEFM-analyysin tuloksilla määritetyt väsymisluokat. Kuvassa 13 kyseiset *FAT*-arvot ovat havainnollistettuna siten, että särökoko on vaaka-akselilla ja väsymisluokka pystyakselilla.

Taulukko 3. Särönkasvuanalyysin tuloksista määritetyt väsymisluokat kuormitustyypeittäin.

LEFM-analyysin tuloksilla määritetyt väsymisluokat *FAT* [MPa]		
Särökoko *a* [mm]	Kalvokuormitus 1 MPa	Taivutuskuormitus 1 MPa
0,01 (referenssi)	68,39	68,01
0,125	61,02	63,38
0,25	56,5	60,58
0,5	49,74	56,34
0,75	44,44	52,85
1	39,99	49,74
1,25	36,14	46,88
1,5	32,74	44,21
2	26,99	39,26
2,5	22,29	34,73

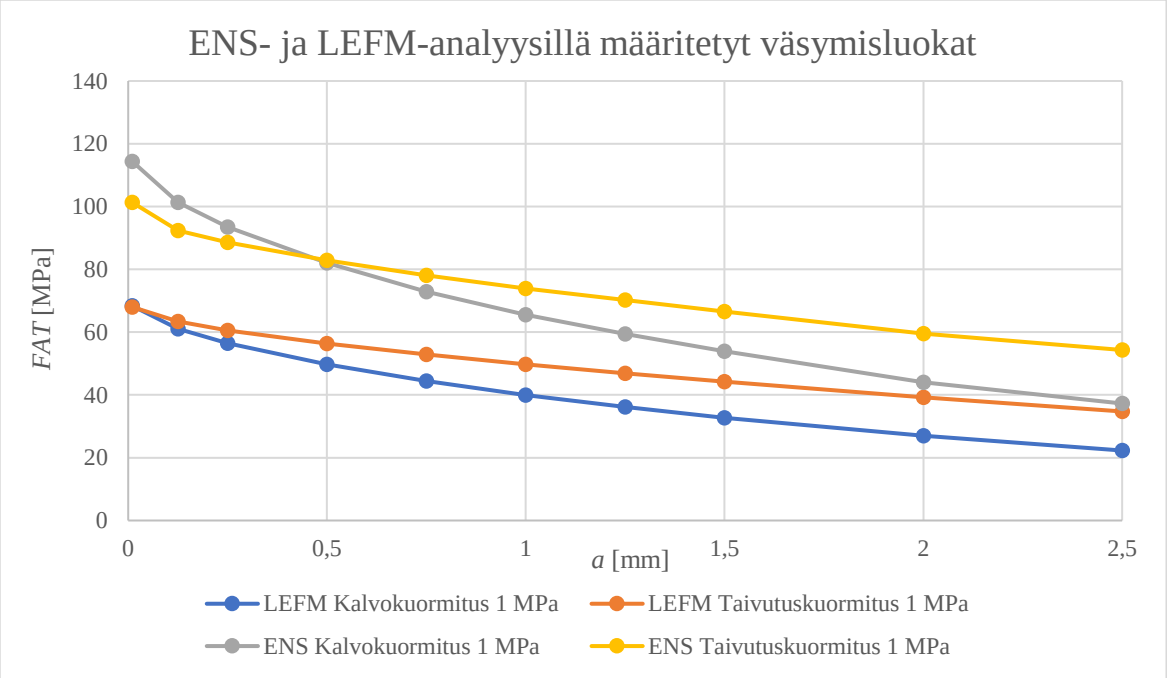


Kuva 13. LEFM-särönkasvuanalyysin tuloksista määritetyt väsymisluokat kuormitustyypeittäin.

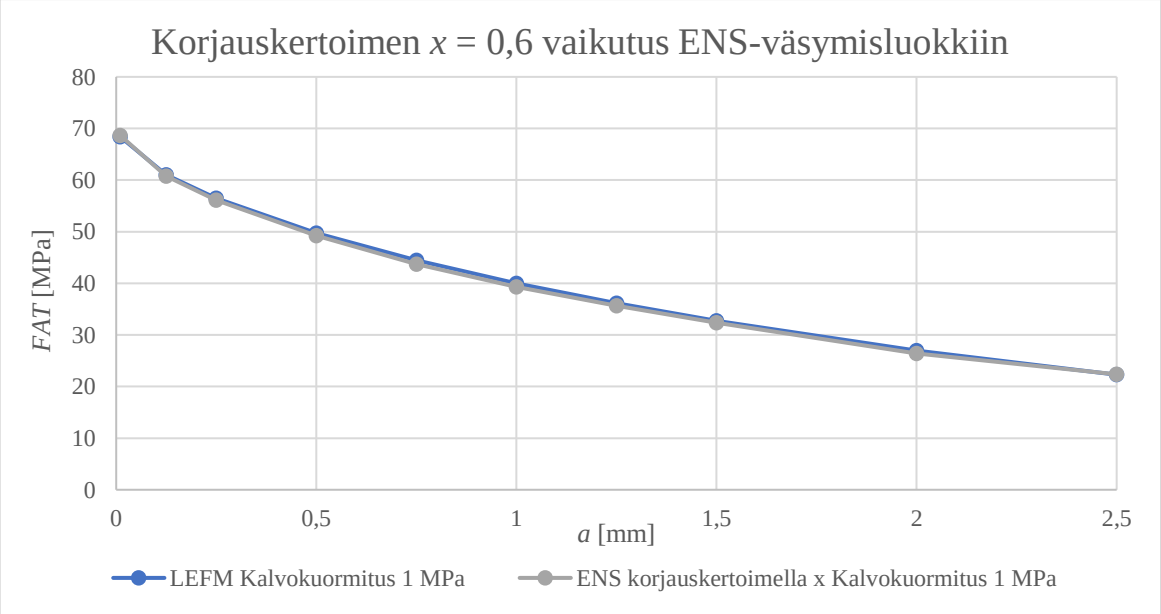
4.3 Väsymisluokkien vertailu

FE- ja LEFM-analyysillä ratkaistuja väsymisluokkia voidaan tarkastella kuvassa 14 olevien kuvaajien avulla. Kuvaajat ovat alaluvuissa 4.1 ja 4.2 esitetyt, nyt yhdistettynä samaan kuvaan. Kuvasta nähdään, että vaikka väsymisluokat eroavatkin eri analyysien välillä, noudattavat ne saman tyyppistä muotoa kuormitustyypeittäin.

Kun LEFM-analyysituloksilla ratkaistut väsymisluokat jaetaan ENS-analyysien väsymisluokilla, lähestyy suhde melko tarkasti kalvokuormituksella jokaisella särökoolla arvoa 0,6. Kun ENS-väsymisluokat kerrotaan kyseisellä korjauskertoimella x = 0,6; voidaan kuvasta 15 nähdä kalvokuormitusta kuvaavien väsymisluokkien olevan hyvin lähellä LEFM-väsymisluokkia. ENS-väsymisluokat pysyvät konservatiivisella puolella särökokoon a = 2 mm asti.



Kuva 14. ENS- ja LEFM-analyysillä määritetyt väsymisluokat.



Kuva 15. Korjauskertoimen vaikutus ENS-väsymisluokkiin kalvokuormituksella.

Taivutuskuormituksen tapauksessa eri analyyseillä määritettyjen väsymisluokkien suhde vaihtelee hieman kalvokuormituksen suhdetta enemmän. Suhde lähestyy arvoa 0,67 molemmin puolin särökokoon a = 1,5 mm asti, mutta laskee suuremmilla säröko'oilla.

5 Analyysi

Tulosten perusteella voidaan muodostaa vastaukset tälle työlle asetettuihin tutkimuskysymyksiin. ENS-menetelmällä määritetyt väsymisluokat ovat merkittävästi suurempia kuin LEFM-analyysillä määritetyt väsymisluokat. ENS-menetelmän väsymisluokille on tämän työn tulosten perusteella mahdollista määrittää karkea korjauskerroin kuormitustyypeittäin. Kuitenkin kyseinen lopputulema pätee ainoastaan tutkittavalle rakenteelle. Tarkkojen korjauskertoimien määrittäminen vaatii jatkotutkimuksia eri säröko'oilla ja materiaalien paksuuksilla. Lisäksi tulosten oikeellisuus tulee varmistaa kokeellisesti. ENS-menetelmän laajemman käytön mahdollistaminen vaatii menetelmän tutkimista muilla rakenteilla sekä kuormitustyypeillä.

Tämän työn laajuus ei riitä määrittämään ENS-menetelmän toimivuuden voimassaoloehtoja. Kuitenkin saatujen tulosten perusteella voidaan todeta ENS-menetelmän toimivan tarkastellulla rakenteella, kuormitustyypeillä sekä säröko'oilla. Mahdollisuudet ENS-menetelmän soveltamiseen väsymissärön huomioon ottamisessa ovat siis olemassa.

Tämän työn tulosten johdosta tehtävien jatkotutkimusten avulla ENS-menetelmän käyttöä voitaisiin mahdollisesti laajentaa Eurocode 3 standardin osan 1-9 päivityksen voimaan tultua. ENS-menetelmän käytön laajentuessa väsymisperusteista suunnittelua voitaisiin helpottaa ja nopeuttaa merkittävästi. Näin väsymiselle alttiiden rakenteiden turvallisuutta voitaisiin parantaa.

6 Yhteenveto

Tässä kandidaatintyössä tutkittiin ENS-menetelmän mahdollisuutta ottaa huomioon väsymissärö. Työssä käsiteltiin tarvittava teoria aiheen ymmärtämiseksi ja menetelmävalintojen perusteluksi. Mahdollisuutta selvitettiin luomalla IIW:n ohjeiden mukaiset elementtimallit yhdeksälle eri särökoolle. Elementtimalleilla ratkaistiin hitsin rajaviivalla sijaitsevan särön pohjalla vaikuttava jännityskonsentraatiokerroin K_t. Kyseiset kertoimet muutettiin vastaamaan väsymisluokkia. Elementtimallit sekä tarvittavat laskentatoimet kuvattiin yksityiskohtaisesti työn toistettavuuden varmistamiseksi.

Määritettyjen väsymisluokkien oikeellisuutta selvitettiin vertaamalla tuloksia lineaarielastisella murtumismekaanisella särönkasvuanalyysillä määritettyihin väsymisluokkiin. Eri analyyseilla määritettyjen väsymisluokkien käyttäytymisessä havaittiin yhtenevä muoto. Tämän perusteella selvitettiin alustavasti korjauskertoimen mahdollisuutta jatkotutkimusten johtamiseksi.

ENS-menetelmän soveltaminen väsymissärön huomioon ottamisessa todettiin mahdolliseksi. Jatkotutkimukset eri rakenteilla, kuormitustyypeillä ja materiaalien paksuuksilla todettiin välttämättömäksi. Vain siten tarkkojen korjauskertoimien ja laskentaohjeiden määrittäminen on mahdollista.

Lähteet

Ahola, A. 2022. LEFM-analyysitulosten laskentamateriaalit [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottaja: Tuomo Saksa. Lähetetty 17.3.2022 klo 14.43 (GMT +0200). Liite 2.

Dong, Y. & Guedes Soares, C. 2019. Stress distribution and fatigue crack propagation analyses in welded joints. Fatigue & fracture of engineering materials & structures, 2019. 1. S. 69–83. Revisio 1.

Fricke, W. 2010. IIW Recommendations for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures. IIW-document XIII-2240r2-08/XV-1289r2-08. 32 s.

Fuštar, B., Lukačević, I. & Dujmović, D. 2018. Review of Fatigue Assessment Methods for Welded Steel Structures. Vipulanandan, C. Advances in civil engineering, 2018. S. 1–16.

Hobbacher, A. 2016. Recommendations for Fatigue Design of Welded Joints and Components. Second edition. IIW-document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13. 143 s.

prEN 1993-1-9. 2020. Eurocode 3 – Design of steel structures – Part 1-9: Fatigue.

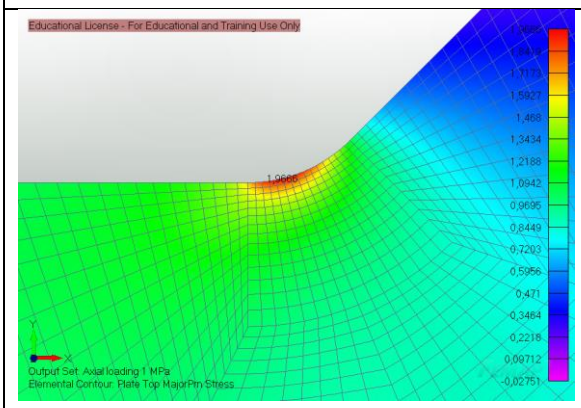
Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. & Fuchs, H. 2000. Metal Fatigue in Engineering. Second Edition. Wiley Interscience Imprint. 443 s.

Zienkiewicz, O., Taylor, R. & Zhu, J. et al. 2013. The finite element method : its basis and fundamentals. Seventh edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. 537 s.

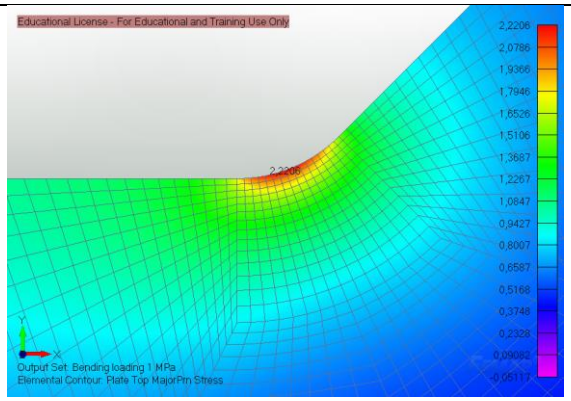
Liite 1. ENS-mallien analyysien kuvat.

Kuvat Femap-ohjelmalla luoduista ja analysoiduista ENS-elementtimalleista. Kuvien väri-kriteerinä on pääjännitys ja ne ovat ilman muodonmuutosta. Kuvaparit ovat säröko'oittain.

***a* = 0 mm**

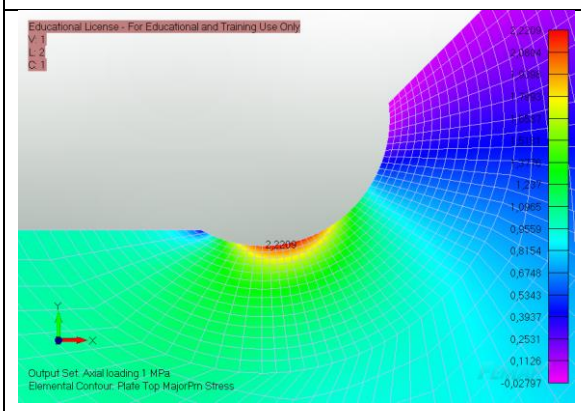


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

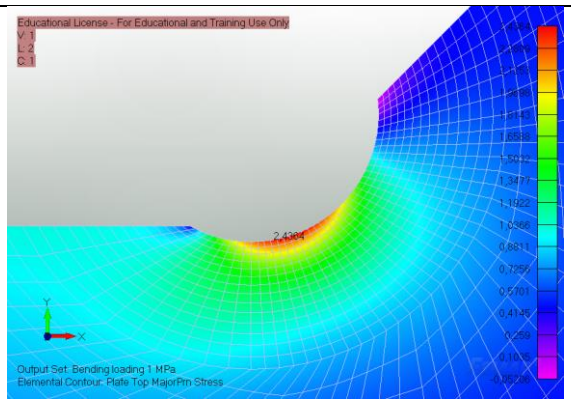


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 0,125 mm**

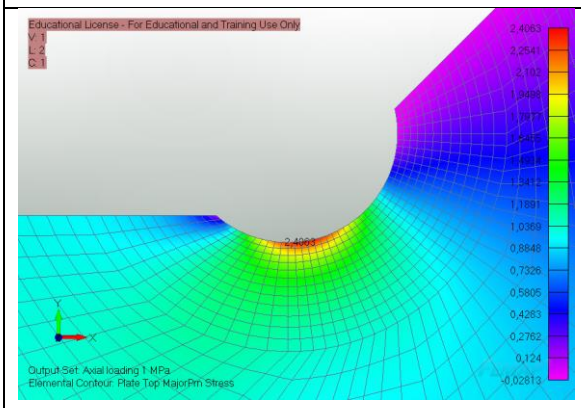


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

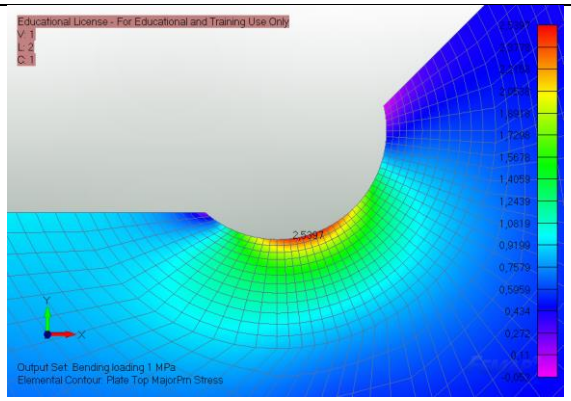


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 0,25 mm**

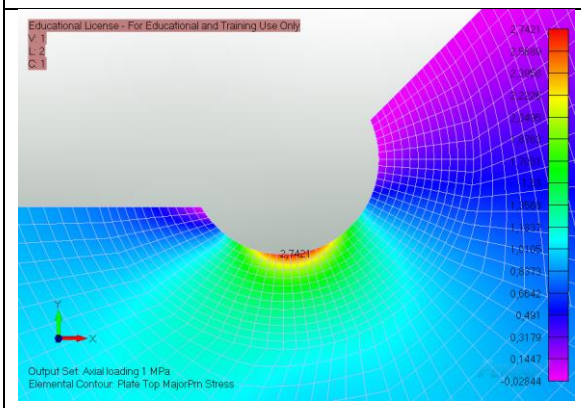


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

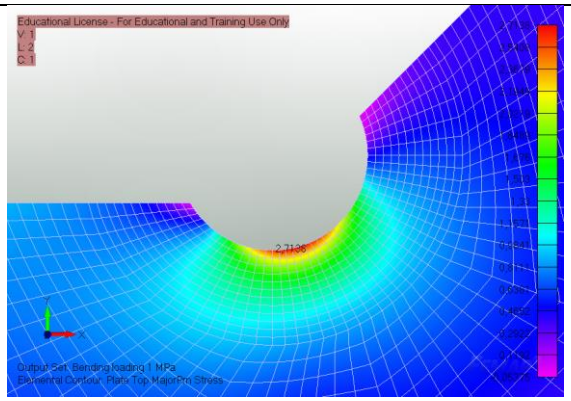


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 0,50 mm**

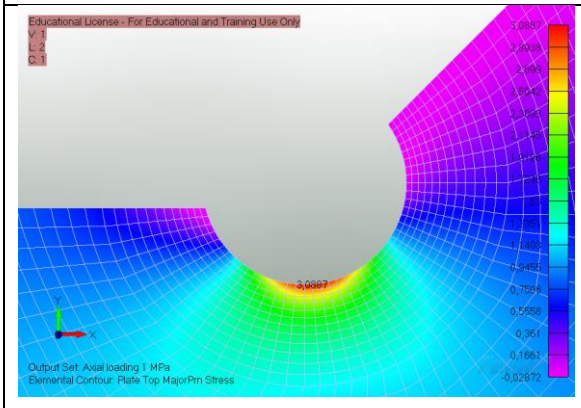


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

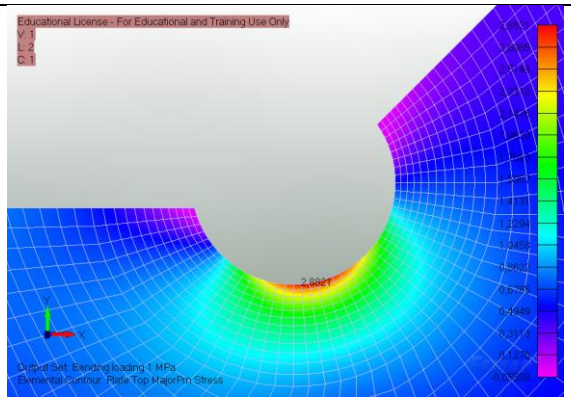


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 0,75 mm**

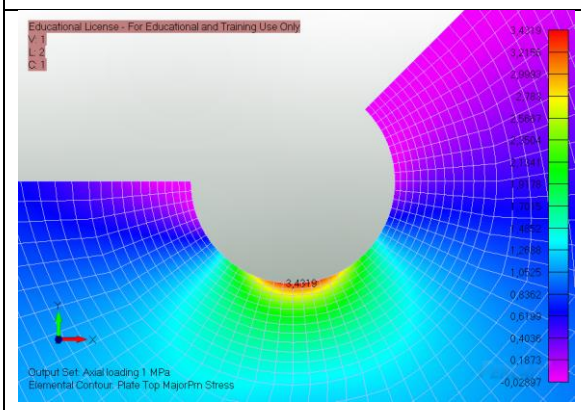


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

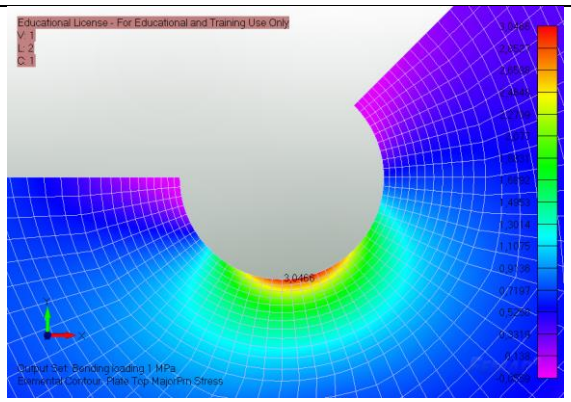


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 1,00 mm**

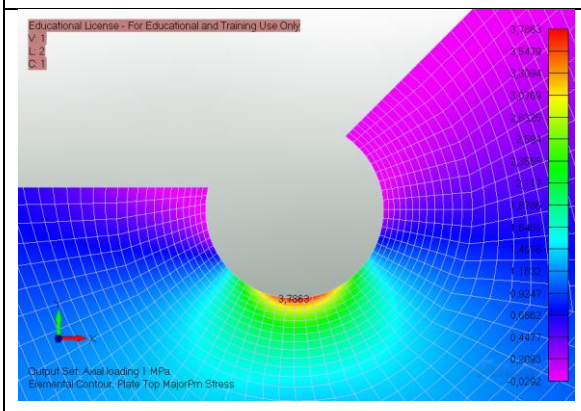


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

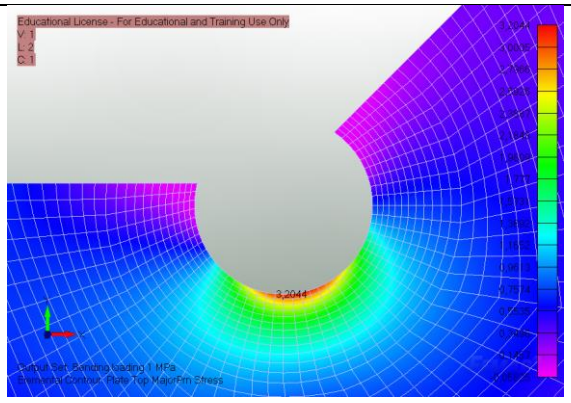


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 1,25 mm**

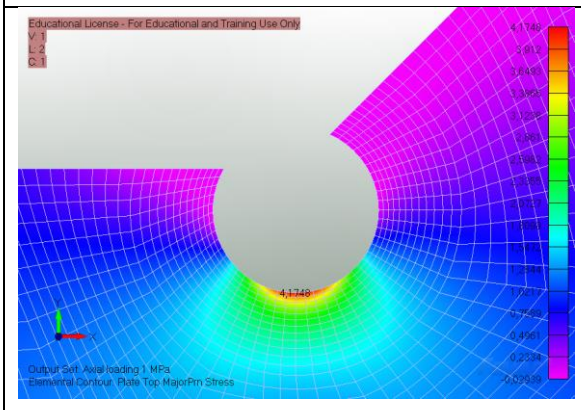


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

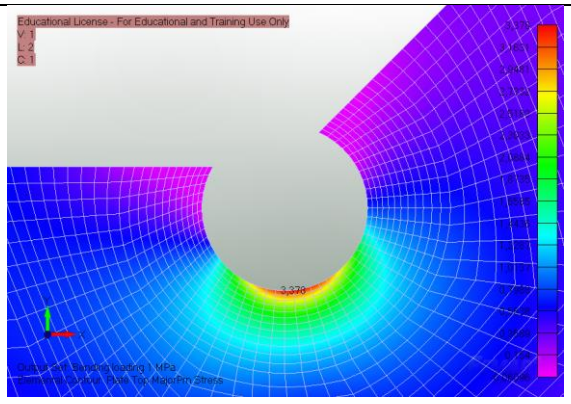


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 1,50 mm**

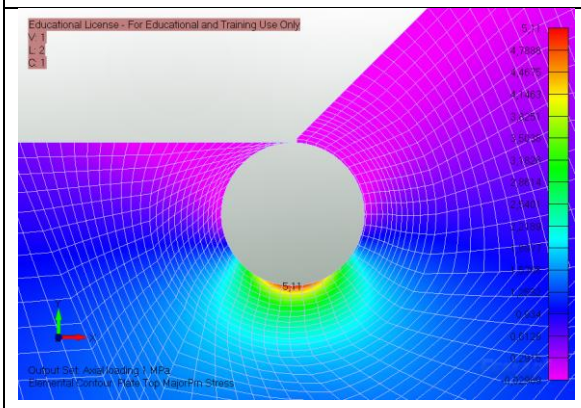


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

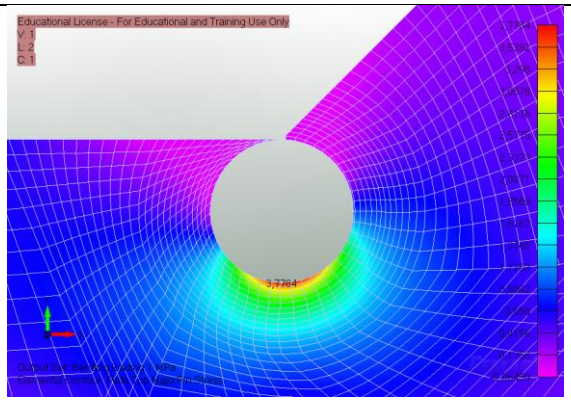


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 2,00 mm**

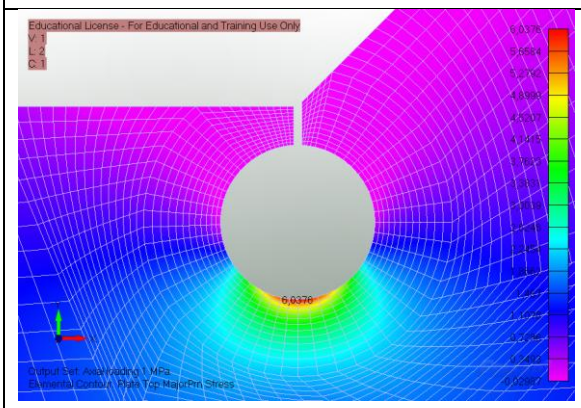


Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa

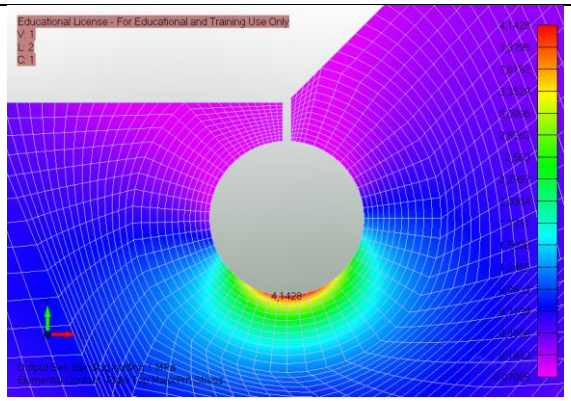


Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

***a* = 2,50 mm**



Kalvokuormitus σ_m = 1 MPa



Taivutuskuormitus σ_b = 1 MPa

Liite 2.

Käyttöön saatu laskentapohja.

Reading data from ".txt" file [two columns: 1 - crack size, 2 - Stress intensity factor (SIF) values]

data := READPRN("aK_m.txt")

x := data$^{\langle 0 \rangle}$ =

	0
0	0.01
1	0.02
2	0.03
3	0.04
4	0.05
5	0.075
6	0.1
7	0.125
8	0.15
9	0.175
10	0.2
11	0.25
12	0.3
13	0.35
14	0.4
15	...

y := data$^{\langle 1 \rangle}$ =

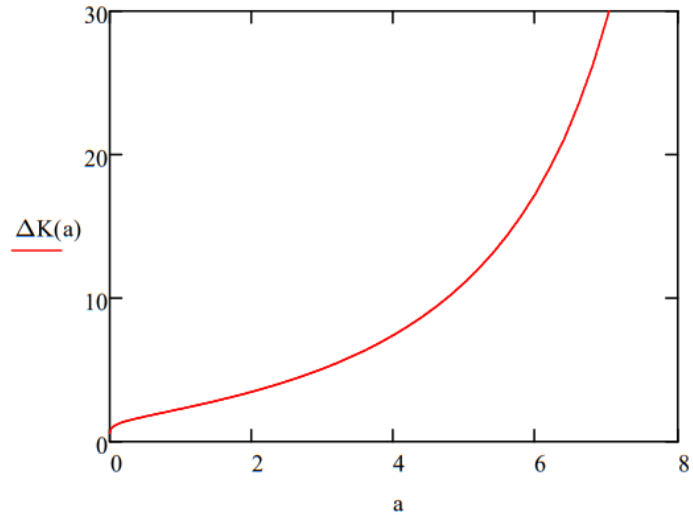
	0
0	0.748
1	0.9
2	0.97
3	1.018
4	1.064
5	1.145
6	1.211
7	1.266
8	1.315
9	1.356
10	1.397
11	1.469
12	1.535
13	1.595
14	1.65
15	...

a-K Data point conversion to function (linear interpolation)

$a := 0, 0.01 .. 8$

$\Delta K(a) := \text{linterp}(x, y, a)$

$t := 10$



a_i = Initial crack size

a_f = final crack size

m = slope parameter of Paris' curve

C = crack propagation coefficient

$a_i := 0.01 \quad a_f := 8 \qquad m := 3 \qquad C := 5.21 \times 10^{-13}$

Analysis of fatigue life, Paris' law (one-stage crack propagation): da/dN = CxΔK^m

$$N_f := \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C \cdot (\Delta K(a))^m} da = 6.397 \times 10^{11}$$

Corresponding fatigue life at two million cycles (K(a)-data for unit load of 1 MPa):

$$FAT_{LEFM} := \left(\frac{N_f}{2 \cdot 10^6} \right)^{\frac{1}{m}} \cdot 1MPa = 68.389 \cdot MPa$$

$$FAT_{tiedostoon} := FAT_{LEFM} \cdot \frac{1}{1MPa}$$

$$k := APPENDPRN\left["kirjoita_tahan.txt", \left(a_i \quad FAT_{tiedostoon}\right)\right]$$