



**HFMI-JÄLKIKÄSITELLYN HITSILIITOKSEN VÄSYMISTARKASTELU EURO-
KOODI 3 -STANDARDIN MUKAISESTI JA 4R-MENETELMÄLLÄ**

**FATIGUE ASSESSMENT OF HFMI-TREATED WELDED JOINT USING EURO-
CODE 3 STANDARD AND 4R METHOD**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Olli Kosonen

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Olli Kosonen

HFMI-jälkikäsitellyn hitsiliitoksen väsymistarkastelu Eurokoodi 3 -standardin mukaisesti ja 4R-menetelmällä

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

42 sivua, 37 kuvaa, 6 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: hitsin jälkikäsitteleminen, HFMI, 4R-menetelmä, väsyminen, väsymismitoitus

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on vertailla teräsrakenteiden suunnittelustandardi Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän mukaisesti laskettuja HFMI-jälkikäsitellyn hitsiliitoksen väsymiskestoikäennusteita. Vertailu suoritetaan Eurokoodi 3:ssa esitettävillä tyyppi-liitoksilla, jotka ovat päittäisliitos ja poikittainen jäykistelevy. Tämän lisäksi työssä tutkitaan materiaalin lujuusluokan, liitostyyppin, jännityssuhteen sekä 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutusta vertailun tuloksiin. Työssä käytettäviä tutkimusmenetelmiä ovat FE-analyysi ja analyttinen laskenta.

Työn tulosten perusteella Eurokoodi 3:n mukainen väsymismitoitus on konservatiivisempaa 4R-menetelmän mukaiseen väsymismitoitukseen verrattuna. Merkittävimmät erot muodostuvat jännityssuhteella $R = -1$ ja lujuudella S700. Lisäksi 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutus on merkittävä tulosten kannalta. Rajaviivapyöritys $r = 1$ mm antaa monissa tapauksissa Eurokoodi 3:n kaltaisia tuloksia ja väsymiskestoikäennusteet rajaviivapyörityksellä $r = 3$ mm ovat niitä merkittävästi suurempia. Liitostyyppin vaikutus on merkittävin jännityssuhteen ollessa $R = -1$, jolloin suurin ero Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän tulosten välille muodostuu päittäisliitoksella.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Olli Kosonen

Fatigue assessment of HFMI-treated welded joint using Eurocode 3 standard and 4R method

Bachelor's thesis

2022

42 pages, 37 figures, 6 tables and 1 appendix

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

Keywords: post-weld treatment, HFMI, 4R method, fatigue, fatigue assessment

The objective of this bachelor's thesis was to compare the fatigue life of HFMI-treated welded joints using Eurocode 3 standard and 4R method. The comparison was carried out with the type joints presented in Eurocode 3, which are the transverse butt weld and the transverse stiffener. In addition, the impact of material strength class, joint type, stress ratio and weld toe radius used in the 4R method on the result of the comparison was studied. FE analysis and analytical calculations were used as research methods.

Based on the results of the thesis, the fatigue assessment according to Eurocode 3 was more conservative in comparison with the 4R method. The most significant differences were formed by the stress ratio $R = -1$ and strength S700. In addition, the effect of the weld toe radius used in the 4R method was significant for the results. In many cases the results of the 4R method were similar to Eurocode 3 using weld toe radii $r = 1$ mm. Fatigue life using weld toe radii $r = 3$ mm was significantly higher. The effect of the joint type was the most significant with the stress ratio $R = -1$, in which case the difference between the results of the Eurocode 3 and 4R method was the greatest with the transverse butt weld.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	poikkipinta-ala	[mm ²]
a	a-mitta	[mm]
C_{4R}	väsymiskapasiteetti	[MPa ^m]
E	kimmokerroin	[MPa]
F	normaalivoima	[N]
H	syklinen muokkauslujittumiskerroin	[MPa]
I	taivutusjäyhyysmomentti	[mm ⁴]
K_t	lovenmuotoluku	[-]
M	taivutusmomentti	[Nmm]
m	SN-käyrän kaltevuus	[-]
m_{4R}	4R-menetelmän SN-käyrän kaltevuus	[-]
N_f	kuormituskertojen lukumäärä	[-]
$N_{f,4R}$	4R-menetelmän mukainen väsymiskestoikä	[-]
$N_{\min, HFMI}$	HFMI-jälkikäsittelyn hyödyllisen vaikutuksen minimisyklimäärä	[-]
n	syklinen muokkauslujittumiseksponentti	[-]
R	jännityssuhde	[-]
R_{local}	paikallinen jännityssuhde	[-]
R_m	materiaalin murtolujuus	[MPa]
r	loven pyöristyssäde	[mm]
r_{true}	lovenpohjan todellinen pyöristyssäde	[mm]
t	levynpaksuus	[mm]

y etäisyys neutraaliakselista [mm]

Kreikkalaiset

$\Delta\varepsilon$ kokonaisvenymän muutos [-]

$\Delta\varepsilon_e$ elastisen venymän muutos [-]

$\Delta\varepsilon_p$ plastisen venymän muutos [-]

$\Delta\sigma$ paikallisen jännityksen muutos [MPa]

$\Delta\sigma_{ekv}$ ekvivalentti jännitysvaihtelu [MPa]

$\Delta\sigma_k$ tehollisen lovijännityksen vaihteluväli [MPa]

$\Delta\sigma_{k,ref}$ keski-jännityskorjattu referenssilovijännitysvaihtelu [MPa]

$\Delta\sigma_R$ jännityksen vaihteluväli [MPa]

ε kokonaisvenymä [-]

ε_e elastinen venymä [-]

ε_p plastinen venymä [-]

ν Poissonin vakio [-]

σ paikallinen jännitys [MPa]

σ_b taivutusjännitys [MPa]

σ_{hs} rakenteellinen jännitys [MPa]

σ_{In} lovijännitys [MPa]

σ_m kalvojännitys [MPa]

σ_{max} paikallinen maksimijännitys [MPa]

σ_{min} paikallinen minimijännitys [MPa]

σ_{nim} nimellinen jännitys [MPa]

σ_{nlp}	epälineaarinen huippujännitys	[MPa]
σ_{res}	paikallinen jäännös­jännitys	[MPa]

Lyhenteet

ENS	tehollinen lovijännitys (Effective Notch Stress)
FAT	väsymisluk­ka (Fatigue Class)
FE	äärellinen elementti (Finite Element)
HFMI	suur­taajuusvasarointi (High Frequency Mechanical Impact)
SN-käyrä	jännitys­vaihtelu-kestoikä-käyrä
SWT	Smith-Watson-Topper
TIG	Tungsten Inert Gas

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tausta ja tavoite	8
1.2	Tutkimusongelma ja rajaukset	8
1.3	Työn merkitys	9
2	Kirjallisuuskatsaus.....	10
2.1	Väsymisen vaiheet	10
2.2	Hitsin jälkikäsittelymenetelmät.....	11
2.3	HFMI-jälkikäsittely.....	13
2.4	Väsymismitoitusmenetelmät	14
2.4.1	Eurokoodi 3:n mukainen mitoitus.....	18
2.4.2	4R-menetelmä	19
3	Tutkimusmenetelmät.....	21
3.1	Laskentamenetelmien kuvaus	22
3.2	Elementtimallien kuvaus	25
4	Tulokset	29
5	Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset	37
	Lähteet	41

Liitteet

Liite 1. Mathcad laskenta

1 Johdanto

Lujien terästen saatavuuden parantuessa niiden käyttö monissa teräsrakenteiden sovelluksissa yleistyy. Korkeamman myötölujuutensa ansiosta lujat teräkset mahdollistavat entistä hoikempien ja kevyempien rakenneratkaisujen käytön perinteisiin teräslaatuihin verrattuna. Tämä koskee kuitenkin vain staattisesti kuormitettuja rakenteita. Vaihtelevasti kuormiteuissa hitsatuissa teräsrakenteissa myötölujuuden kasvu ei pidennä rakenteen käyttöikää, sillä ne sisältävät tyypillisesti väsymiskriittisiä hitsejä. Tähän ongelmaan ratkaisuna voi olla hitsiliitosten jälkikäsittely. Aiemmin on tutkittu monien hitsin jälkikäsittelymenetelmien vaikutuksia väsymiskestoikään, ja HFMI-jälkikäsittelyn (High Frequency Mechanical Impact) on todettu parantavan lujien terästen väsymiskestoikää merkittävästi (Ahola, Skriko & Björk 2020, 1).

1.1 Työn tausta ja tavoite

Tämä kandidaatintyö tehdään Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston LUT:n teräsrakenteiden laboratoriolle. Työssä tarkasteltavalle HFMI-jälkikäsittelylle ei ole aiemmin ollut olemassa laskennallisia työkaluja hitsin jälkikäsittelyn hyötyjen huomioonottamiseksi eurooppalaisten teräsrakennestandardien mukaisessa väsymislaskennassa. Teräsrakenteiden suunnittelustandardi Eurokoodi 3:een on kuitenkin tulossa lisäys, joka sisältää HFMI-jälkikäsittelyn laskennallisen huomioonottamisen. Työn tavoitteena on vertailla Eurokoodi 3:lla sekä LUT yliopistossa kehitetyllä 4R-menetelmällä laskettuja väsymiskestoikäennusteita.

1.2 Tutkimusongelma ja rajaukset

Työn lähtökohtana on hypoteesi, jonka mukaan Eurokoodi 3:n mukainen väsymismitoitus on konservatiivisempaa 4R-menetelmään verrattuna. Aihe on ajankohtainen kandidaatintyöksi, sillä HFMI-jälkikäsitteltyt hitsiliitokset eivät ole aiemmin kuuluneet Eurokoodi 3 -standardiin. Näin ollen työssä suoritettavaa laskentamenetelmien standardin mukaista vertailua ei ole voinut suorittaa. Työssä tarkastellaan materiaalin lujuusluokan, liitostyyppin,

jännityssuhteen sekä hitsin rajaviivapyörityksen vaikutusta tuloksiin. Tutkimuskysymykset voidaan esittää muodossa:

- Miten Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän laskennalliset tulokset eroavat?
- Miten materiaalin lujuusluokka ja liitostyyppi vaikuttavat tuloksiin?
- Miten jännityssuhde vaikuttaa tuloksiin?
- Miten 4R-menetelmässä käytettävä hitsin rajaviivapyöritys vaikuttaa tuloksiin?

Työssä tarkastellaan Eurokoodi 3:ssa esitettäviä tyyppiliitoksia ja tarkastelu suoritetaan Eurokoodi 3:n mukaisilla lujuuksilla ja jännityssuhteilla.

1.3 Työn merkitys

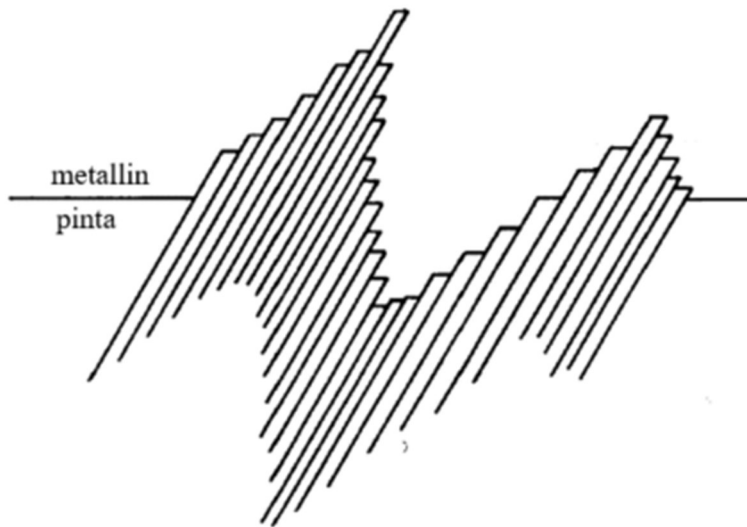
Työn tuloksia tarvitaan hitsattujen rakenteiden väsymislaskennan tutkimuksessa ja kehittämisessä. Työn avulla voidaan arvioida, saavutetaanko 4R-menetelmällä luotettavia ja tarkempia väsymiskestoikälaskelmia Eurokoodi 3:een verrattuna. Työn tulokset voivat johtaa tehokkaampiin mitoituksellisiin ratkaisuihin teräsrakenteiden suunnittelussa. Mikäli oletus Eurokoodi 3 -standardin konservatiivisuudesta osoittautuu oikeaksi, voidaan 4R-menetelmää käyttäen välttää turhaa ylimitoitusta. Tämä mahdollistaa kevyempien rakenteiden käytön ja voi aikaansaada myös taloudellisia hyötyjä.

2 Kirjallisuuskatsaus

Väsyminen on yksi yleisimmistä metallikappaleiden vaurioitumisen syistä. Jatkuvasti vaihteleva kuormitus altistaa kappaleen väsymiselle, jolloin se voi vaurioitua huomattavasti myötörajaa alemmilla jännityksillä. Väsyminen on hyvin paikallinen ilmiö, jolloin se voi saada alkunsa yksittäisestä säröstä tai materiaalivirheestä. Hitsatuissa rakenteissa väsyminen tapahtuu tyypillisesti hitsien kohdalta, sillä hitsin aloitus- ja lopetuskohdat sekä mahdolliset hitsausvirheet toimivat alkusäröinä. Lisäksi rakenteen geometrian äkilliset muutokset liitosalueella aiheuttavat jännityskonsentraatioita, jolloin väsymistä tapahtuu herkemmin. (Nussbaumer, Borges & Davaine 2018, 1–6.) Tässä luvussa käsitellään väsymisen vaiheita ja keinoja hitsiliitosten väsymislujuuden parantamiseksi sekä rakenteiden suunnittelussa käytettäviä väsymismitoitusmenetelmiä.

2.1 Väsymisen vaiheet

Väsymisvaurion muodostuminen jaetaan tyypillisesti kolmeen vaiheeseen. Nämä vaiheet ovat ydintyminen, särön kasvu ja loppumurtuma. Ydintymisessä alkuvaiheeseen kappaleeseen muodostuu särö väsyttävän kuormituksen seurauksena. Särö voi muodostua kappaleen sisäisten sulkeumien tai erkaumien ympärille. Sulkeumat ja erkaumat ovat materiaalin seosaineiden kasautumia, joista aiheutuu materiaaliin epäjatkuvuuskohtia. Ydintyminen voi myös tapahtua kappaleen pinnalla niin sanotulla dislokaatiomekanismilla. Tällöin vaihteleva kuormitus saa metallirakenteen kerrokset liikkumaan toistensa suhteen liukunauhoina plastisen muodonmuutoksen seurauksena. Toistuvat vierekkäisten metallikerrosten liukumien aikaansaavat mikroskooppisen särön muodostumisen kappaleen pinnalle kuvan 1 mukaisesti. (Radaj, Sonsino & Fricke 2006, 3–4.)

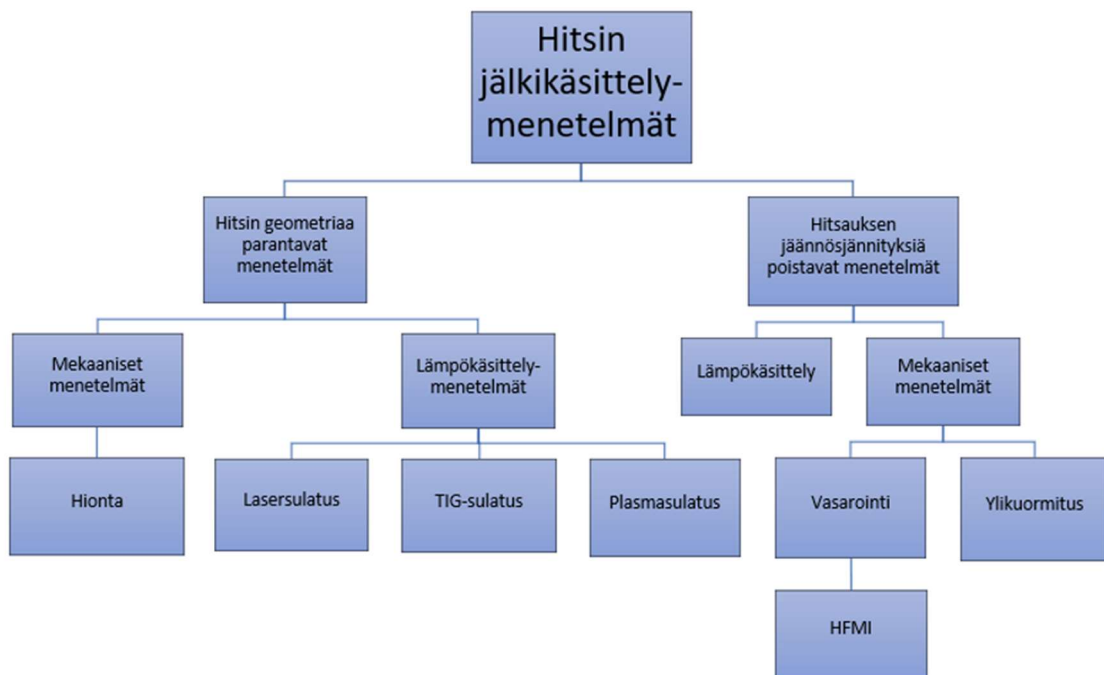


Kuva 1. Särön muodostuminen kappaleen pinnalle dislokaatiomekanismilla (Mukaiillen Stephens, Fatemi, Stephens & Fuchs 2000, 46).

Särönkasvuvaiheessa rakenteessa oleva alkusärö alkaa kasvaa vaihtelevan kuormituksen seurauksena. Kasvun alkuvaiheessa särö kasvaa 45 asteen kulmassa kuormitukseen nähden, sillä tässä suunnassa vaikuttaa suurin leikkausjännitys. (Richards 2018, 503.) Myöhemmässä kasvun vaiheessa särö kasvaa elliptisesti leveyttä ja syvyyttä (Niemi & Kemppi 1993, 238). Särön edelleen kasvaessa saavutetaan lopulta kriittinen piste, jolloin heikentynyt rakenne ei enää kestä hetkellistä rasitusta. Seurauksena on loppumurtuma, joka voi materiaalista ja ympäröivistä olosuhteista riippuen olla hauras tai sitkeä. (Nussbaumer, Borges & Davaine 2018, 3.)

2.2 Hitsin jälkikäsittelymenetelmät

Hitsattujen rakenteiden väsymiskestoaikaa oletetaan koostuvan särönkasvusta, sillä hitsauksesta aiheutuva alkusärö on jo olemassa (Richards 2018, 503). Hitsauksen seurauksena syntyy väsymislujuutta heikentäviä vetojäännösjännityksiä ja hitsin rajaviivalle muodostuu lovi, joka aiheuttaa jännityskonsentraation. Hitsien väsymislujuutta voidaan kuitenkin parantaa niitä jälkikäsittämällä. Jälkikäsittelymenetelmiä on monia ja ne voidaan jakaa kuvan 2 mukaisesti hitsin geometriaa parantaviin menetelmiin sekä hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä poistaviin menetelmiin. (Marquis & Barsoum 2016, 3.)



Kuva 2. Hitsin jälkikäsittelymenetelmiä.

Hitsin rajaviivan geometriaa voidaan parantaa mekaanisella hionnalla tai lämpökäsittelyllä. Hionnassa rajaviivalta poistetaan materiaalia, jolloin liitoksen geometrian muutos muuttuu jouhevammaksi ja samalla poistetaan mahdolliset hitsauksessa syntyneet säröt. (MacDonald 2011, 311.) Lämpökäsittelyssä hitsin rajaviivaa sulatetaan plasmalla, laserilla tai TIG-sulatuksella (Tungsten Inert Gas). Tällöinkin tavoitteena on jännityskonsentraation pienentäminen liitoksessa muokkaamalla rajaviivageometriaa ja poistamalla hitsausvirheitä. (Marquis & Barsoum 2016, 3–4.) Lämpökäsittely vaikuttaa myös hitsauksesta aiheutuviin jäännösjännityksiin, mutta ei poista niitä kokonaan. Tämän lisäksi rajaviivan sulatus kasvattaa liitosalueen pinnan kovuutta, mikä parantaa väsymiskestävyyttä. (MacDonald 2011, 311–313.)

Hitsauksesta aiheutuvia jäännösjännityksiä voidaan poistaa mekaanisilla menetelmillä ja lämpökäsittelyllä. Lämpökäsittelyssä liitosaluetta lämmitetään, jolloin korkeat jäännösjännitykset purkautuvat. Mekaanisia menetelmiä ovat liitoksen ylikuormittaminen ja vasarointi. Ylikuormituksessa liitosalueen materiaali saadaan myötäämään, jonka seurauksena tapahtuu plastisia muodonmuutoksia. Ylikuorman poistuessa liitosalueelle syntyy alkuperäisen vetojännösjännityksen sijaan väsymislujuudelle edullinen puristusjäännösjännitys. Rajaviivan vasarointi muokkaa liitosgeometriaa sujuvammaksi ja näin pienentää

jännityskonsentraatiota. Sen seurauksena liitosalueelle saadaan myös puristusjäännösjännitys. HFMI-jälkikäsittelyssä hitsin rajaviivaa vasaroidaan korkealla taajuudella, jolloin tuloksena on puristusjäännösjännityksen ja liitosgeometrian muokkauksen lisäksi parempi pinnan laatu. (Marquis & Barsoum 2016, 3–5.)

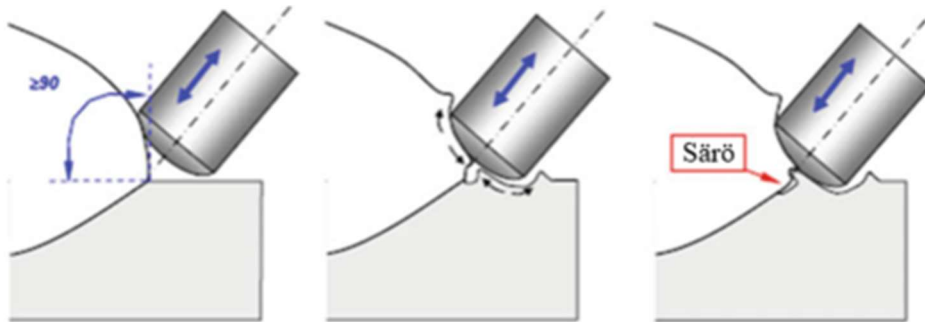
2.3 HFMI-jälkikäsittely

HFMI on luotettava, tehokas ja käyttäjäystävällinen jälkikäsittelymenetelmä hitsiliitosten väsymislujuuden parantamiseksi. HFMI on yleisnimi monille samankaltaisille tekniikoille, jotka tyypillisesti ovat ultraääni- tai paineilmatoimisia. Kaikilla tekniikoilla on sama periaate, jossa työkalun neulamainen pää vasaroi työstettävää materiaalia korkealla, noin 90 Hz:n taajuudella. Muihin vasarointimenetelmiin verrattuna HFMI on käyttäjäystävällisempi ja sillä saavutetaan parempi pinnanlaatu peräkkäisten iskujen ollessa hyvin lähellä toisiaan. (Marquis & Barsoum 2016, 1–5.)

HFMI tekniikat parantavat hitsin rajaviivan paikallista geometriaa ja pinnanlaatua. Käsitellylle alueelle muodostuu plastisia muodonmuutoksia, jotka aiheuttavat muutoksia materiaalin mikrorakenteessa ja aikaansaavat väsymislujuudelle edullisia puristusjäännösjännityksiä. Käsitelyn myötä hitsin rajaviivan jännityskonsentraatiot ja mahdolliset väsymisen alkusäröt pienenevät. Näin ollen HFMI parantaa hitsiliitoksen väsymislujuutta särön ydintymisaikaa kasvattamalla. (Marquis & Barsoum 2016, 4–5.)

HFMI-jälkikäsittely parantaa vain hitsin rajaviivan väsymislujuutta. Mikäli liitos on väsymiskriittinen juuren puolelta, väsymislujuus pysyy samana käsittelystä huolimatta. HFMI-jälkikäsittely täytyy myös toteuttaa oikeaoppisesti, jotta haluttu parannus saavutetaan. Käsiteltävä alue tulee puhdistaa kuonasta, roiskeista ja muusta ylimääräisestä materiaalista laadukkaan lopputuloksen saamiseksi. HFMI-käsittelyn jälkeen liitosalueen lämpökäsittelyä tulee välttää, sillä se poistaisi edullisia puristusjäännösjännityksiä. Hitsin liittymäkulma ei myöskään saa olla liian suuri, sillä tällöin plastisoitunut materiaali voi taipua alkuperäisen rajaviivan päälle ja rakenteen sisään jää kuvan 3 mukainen särö. Tämä voidaan välttää

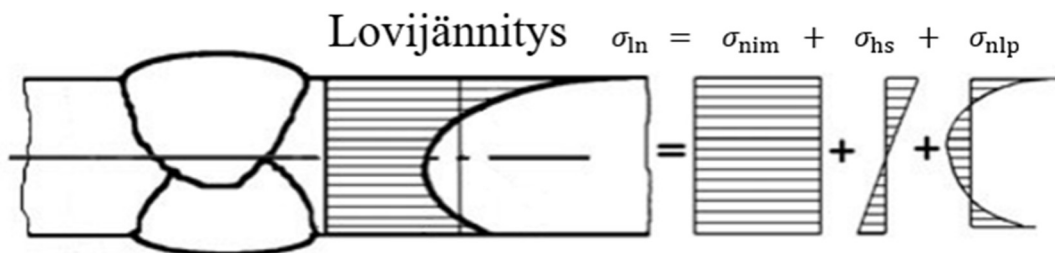
asettamalla hitsille laatuvaatimuksia. Mikäli hitsin liittymäkulma on liian suuri, sitä voidaan hioa ennen käsittelyä. HFMI-jälkikäsittely on kuitenkin tehokkaimmillaan hitsin rajaviivalla ja hionnan jälkeen rajaviivaa voi olla vaikea havaita. Mikäli rajaviivan käsittely ei ole onnistunut oikein, väsymislujuuden kasvua ei saavuteta. (Marquis & Barsoum 2016, 8–11.)



Kuva 3. HFMI-jälkikäsittelyssä rakenteen sisään voi jäädä särö, mikäli hitsin rajaviivan liittymäkulma on liian suuri (Mukaiillen Marquis & Barsoum 2016, 9).

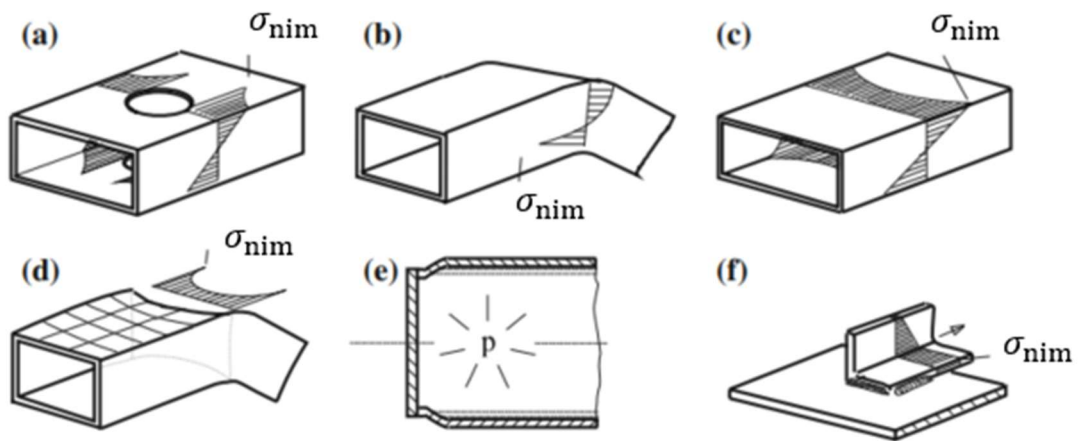
2.4 Väsymismitoitusmenetelmät

Teräsrakenteiden suunnittelussa rakenteessa vaikuttavat jännitykset jaetaan nimellisiin jännityksiin (σ_{nim}), rakenteellisiin jännityksiin (σ_{hs}) ja lovijännityksiin (σ_{ln}). Staattinen mitoitus perustuu tyypillisesti nimellisiin jännityksiin, kun taas väsymismitoituksen kannalta kaikki jännitystyytit ovat yhtä merkittäviä. Kuvassa 4 esitetään hitsatussa levyssä vaikuttava lovijännitys ja sen jännityskomponentit. (Niemi 1996, 7–8.)



Kuva 4. Päittäisliitoksen lovijännitys koostuu nimellisestä jännityksestä, rakenteellisesta taivutusjännityksestä sekä epälinearisesta huippujännityksestä (σ_{nlp}) (Mukaiillen Hobbacher 2016, 14).

Nimellinen jännitys on tarkasteltavalle poikkipinta-alalle laskettu keskimääräinen jännitys, joka ei ota huomioon hitseistä tai muista rakenteen epäjatkuvuuskohdista aiheutuvia jännityskonsentraatioita. Nimellisiin jännityksiin kuitenkin luetaan makrogeometriset jännitykset, jotka ovat rakenteessa laaja-alaisesti vaikuttavia jännityskeskittymiä. Ne voivat aikaansaada huomattavia kalvojännityksen uudelleenjakautumisia rakenteen poikkileikkauksessa ja ne aiheutuvat muun muassa rakenteessa olevista rei'istä, palkin kaareutumisesta, laipan käyristymisestä, epäkeskeisistä liitoksista tai leikkausviiveestä. Näitä makrogeometrisia tekijöitä esitetään kuvassa 5. Yksinkertaisissa rakenteissa nimellinen jännitys voidaan laskea materiaalin lineaarielastisen käyttäytymisen perusteella käyttäen palkkiteoriaa. (Hobbacher 2016, 11–16.)

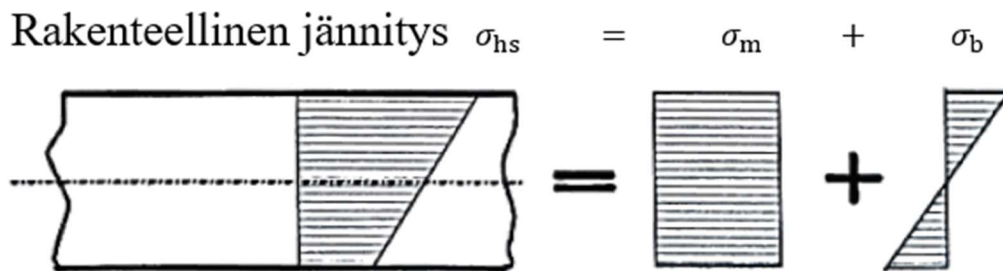


Kuva 5. Nimellisen jännityksen laaja-alaisia uudelleenjakautumisia aiheuttavia makrogeometrisiä tekijöitä (Mukaiillen Hobbacher 2016, 15).

$$\sigma_{\text{nim}} = \frac{F}{A} + \frac{My}{I} \quad (1)$$

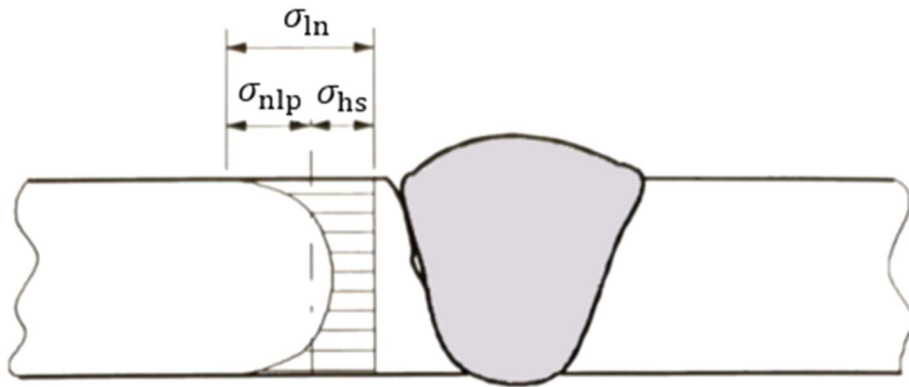
Nimellinen jännitys lasketaan yhtälön 1 mukaisesti, jossa F on normaalivoima, A poikkipinta-ala, M taivutusmomentti, y etäisyys neutraaliakselilta ja I taivutusjäyhyysmomentti (Niemi 1996, 7).

Rakenteellinen eli hot spot -jännitys aiheutuu rakenteessa olevista epäjatkuvuuskohdista, jotka tyypillisesti ovat geometrian muutoksia, hitsejä tai hitsiliitosten sovitus- ja kulmavirheitä. Rakenteelliset jännitykset esiintyvät joko kalvojännityskeskittyminä (σ_m), paksuuden yli lineaarisesti jakautuneina taivutuksina (σ_b) tai niiden yhdistelminä kuvan 6 mukaisesti. Ne ovat paikallisempia kuin makrogeometriset jännitykset ja vaikuttavat muutaman levynpaksuuden alueella. Rakenteelliset jännitykset ovat tärkeitä väsymismitoituksessa ja ne sisältävät kaikki jännitystä nostavat tekijät epälineaarista lovijännityspiikkiä lukuun ottamatta. Rakenteelliset jännitykset voidaan määrittää analyttisellä laskennalla, FE-analyysillä (Finite Element) tai kirjallisuudesta saatavilla jännityskonsentraatiokertoimilla. Rakenteellisia jännityksiä tyypillisesti käytetään, mikäli nimellisten jännitysten määrittäminen on vaikeaa esimerkiksi rakenteen monimutkaisen geometrian takia. (Hobbacher 2016, 18–21.)



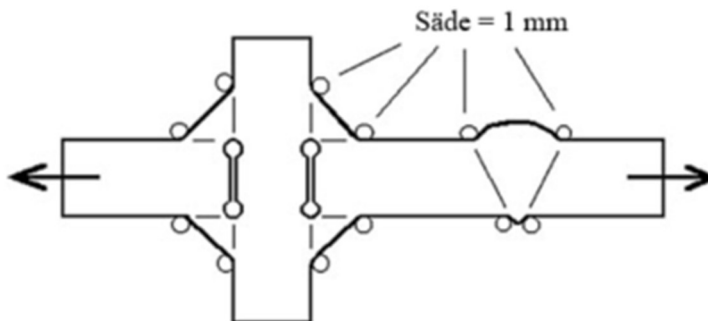
Kuva 6. Rakenteellinen jännitys koostuu kalvojännityksestä ja levynpaksuuden yli lineaarisesti jakautuneesta taivutusjännityksestä (Mukaillen Niemi 1996, 7).

Lovijännitys on loven pohjalla vaikuttava kokonaisjännitys, joka sisältää kaikki jännitystä nostavat tekijät. Hitsatuissa rakenteissa lovijännityksiä esiintyy etenkin hitsin rajaviivoilla. Lovi aiheuttaa jännityksen epälineaarisen jakautumisen paksuuden yli, mutta se ei vaikuta rakenteellisiin kalvo- ja taivutusjännityksiin. Kuvassa 7 esitettävää lovijännityksen osuutta, joka ylittää rakenteellisen jännityksen arvon kutsutaan epälineaariseksi huippujännitykseksi. Se vaikuttaa hyvin paikallisesti, vain noin 0,4 levynpaksuuden etäisyydellä lovesta. Lovijännityksiä ei tyypillisesti huomioida staattisessa mitoituksessa, jos materiaali käyttäytyy sitkeästi. Väsymismitoituksessa lovijännitysten huomioiminen on kuitenkin tärkeää. (Niemi 1996, 8; 13–14.)



Kuva 7. Lovijännityksen epälineaarisen huippujännityksen osuus (Mukaiillen Niemi 1996, 14).

Lovijännitys voidaan laskea analyttisesti kertomalla rakenteellisen jännityksen arvo kirjallisuudesta saatavalla lovenmuotoluvulla K_t . Toinen vaihtoehto lovijännityksen määrittämiselle on FE-analyysi. (Niemi 1996, 14.) Sitä varten on kehitetty ENS-menetelmä eli tehollisen lovijännityksen menetelmä (Effective Notch Stress). ENS-menetelmässä hitsin muodon vaihtelu ja loven pohjalla tapahtuva materiaalin epälineaarinen käyttäytyminen otetaan huomioon korvaamalla loven todellinen muoto tehollisella pyörityksellä kuvan 8 mukaisesti. Rakenneteräksille yhden millimetrin pyörityksen on todettu antavan johdonmukaisia tuloksia. (Hobbacher 2016, 27.)



Kuva 8. ENS-menetelmän mukaiset teholliset pyöritykset hitsin rajaviivalla ja juuressa (Mukaiillen Hobbacher 2016, 27).

2.4.1 Eurokoodi 3:n mukainen mitoitus

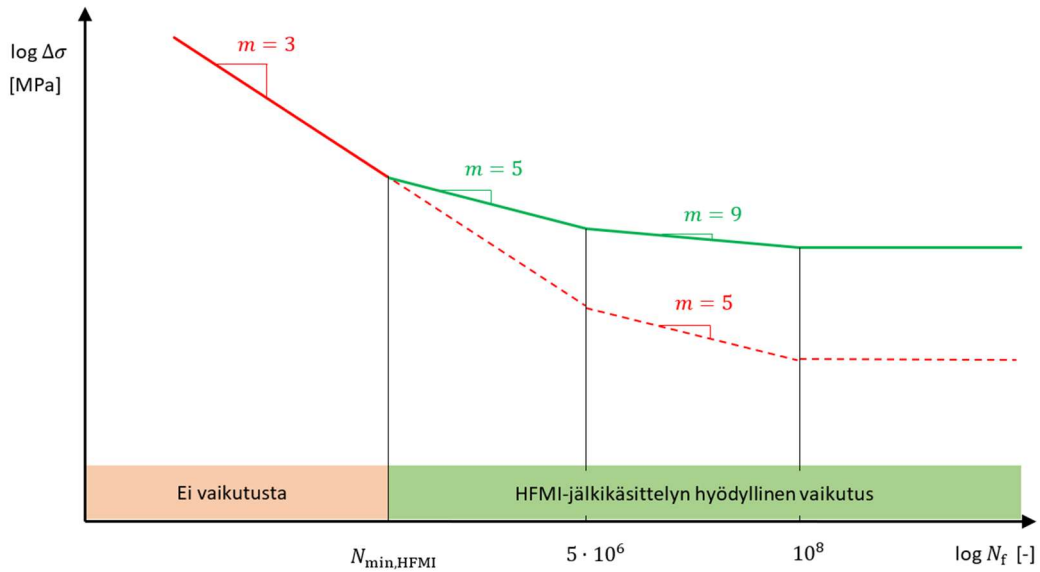
Eurokoodi 3 perustuu nimellisten jännitysten mukaiseen mitoitukseen, jossa kestoikä laskeaan yhtälöllä 2 (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, 14–15).

$$N_f = \left(\frac{FAT}{\Delta\sigma_R} \right)^m \cdot 2 \cdot 10^6 \quad (2)$$

Yhtälössä 2 N_f on kuormituskertojen lukumäärä, FAT väsymisluokka, $\Delta\sigma_R$ jännityksen vaihteluväli ja m SN-käyrän (jännitysvaihtelu–kestoikä-käyrä) kaltevuus. Vakioamplitudisessa kuormituksessa jännityksen vaihteluväli $\Delta\sigma_R$ on maksimi- ja minimijännityksen erotus. Vaihtuva-amplitudisessa kuormituksessa jännitysvaihtelu korvataan ekvivalentilla jännitysvaihtelulla $\Delta\sigma_{ekv}$, joka voidaan laskea esimerkiksi Rainflow-menetelmällä. Saatu ekvivalentti jännitysvaihtelu sijoitetaan yhtälöön 2 jännityksen vaihteluvälin $\Delta\sigma_R$ paikalle. (SFS EN-ISO 1993-1-9 2005, 9–10; 14–15; 36.)

FAT-luokat ovat kullekin liitostyypille kokeellisesti määritettyjä arvoja, jotka kuvaavat liitoksen väsymislujuutta. Konkreettisesti FAT-arvo tarkoittaa jännityksen vaihteluväliä, jolla rakenne saavuttaa kahden miljoonan kuormitus syklin kestoian. Eurokoodi 3 mitoituksen periaatteena on asettaa FAT-luokka sekä SN-käyrän kaltevuus m tapauskohtaisesti sopiviksi. Jälkikäsittelemättömille liitoksille $m = 3$ kestoian N_f ollessa alle $5 \cdot 10^6$ sykliä, minkä jälkeen $m = 5$ aina 10^8 syklin kestoikään asti. HFMI-jälkikäsitellyille hitsiliitoksille $m = 5$, kun kestoikä on alle $5 \cdot 10^6$ sykliä, minkä jälkeen $m = 9$ aina 10^8 syklin kestoikään asti. (prEN 1993-1-9 2020, 100–101.)

HFMI-jälkikäsitely parantaa hitsiliitoksen väsymislujuutta vasta tietyn kuormitus syklimäärän jälkeen. Kuvassa 9 HFMI-jälkikäsitellyn hitsiliitoksen SN-käyrä esitetään vihreällä ja jälkikäsittelemättömän liitoksen SN-käyrä esitetään punaisella. Käyrien liittymäkohdasta nähdään tämä syklien minimimäärä $N_{min, HFMI}$. Se on tapauskohtainen arvo, jota pienemmillä syklimäärillä väsymislujuuden paranemista ei tapahdu. (prEN 1993-1-9 2020, 100–101.)



Kuva 9. HFMI-jälkikäsitellyn hitsiliitoksen SN-käyrä (Mukaiillen prEN 1993-1-9 2020, 101).

2.4.2 4R-menetelmä

4R-menetelmä on yhdistelmä ENS-, SWT- (Smith-Watson-Topper) ja paikallisen venymän menetelmistä. Se perustuu loven pohjalla tapahtuvan materiaalin syklisen käyttäytymisen määrittämiseen huomioimalla jännityssuhde R , materiaalin murtolujuus R_m , paikallinen jäännösjännitys σ_{res} ja loven pyörityssäde r . Näiden neljän parametrin perusteella määritetään loven pohjassa vaikuttava paikallinen jännityssuhde R_{local} , jonka vaikutus väsymiskesävytyteen huomioidaan käyttämällä SWT-menetelmän keskijännityskorjausta yhtälön 3 mukaisesti. (Ahola, Skriko & Björk 2020, 1–6; Nykänen, Mettänen, Ahola, Skriko, Hämäläinen & Björk 2016, 178–179.)

$$\Delta\sigma_{k,ref} = \frac{\Delta\sigma_k}{\sqrt{1-R_{local}}} \quad (3)$$

Yhtälössä 3 $\Delta\sigma_{k,ref}$ on keskijännityskorjattu referenssilovijännitysvaihtelu ja $\Delta\sigma_k$ tehollisen lovijännityksen vaihteluväli. Tehollisen lovijännityksen vaihteluväli määritetään ENS-menetelmällä käyttämällä lovenpohjassa pyörityssädettä $r = r_{true} + 1$ mm, jossa r_{true} on lovenpohjan todellinen pyörityssäde. HFMI-käsitellyille liitoksille voidaan käyttää pyöritystä $r = 1$ mm, joka kuvaa väsymisen kannalta huonointa tilannetta. Materiaalin syklinen

käyttäytyminen lovenpohjassa kuvataan Ramberg-Osgoodin materiaalimallilla yhtälöiden 4 ja 5 mukaisesti käyttäen kinemaattisen lujittumisen oletusta. (Ahola, Skriko & Björk 2020, 3–4; Nykänen et al. 2016, 178–179.)

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_p = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (4)$$

Yhtälössä 4 ε on kokonaisvenymä, ε_e elastinen venymä, ε_p plastinen venymä, σ paikallinen jännitys, E kimmokerroin, H syklinen muokkauslujittumiskerroin ja n syklinen muokkauslujittumiseksponentti (Ahola, Skriko & Björk 2020, 3–4).

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon_e + \Delta\varepsilon_p = \frac{\Delta\sigma}{E} + 2\left(\frac{\Delta\sigma}{2H}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (5)$$

Yhtälössä 5 $\Delta\varepsilon$ on kokonaisvenymän muutos, $\Delta\varepsilon_e$ elastisen venymän muutos, $\Delta\varepsilon_p$ plastisen venymän muutos ja $\Delta\sigma$ paikallisen jännityksen muutos. Paikalliset minimi- ja maksimijännitykset lasketaan Neuberin säännön mukaan yhtälöiden 6 ja 7 avulla. (Ahola, Skriko & Björk 2020, 4–5.)

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\Delta\sigma_k}{1-R} + \sigma_{\text{res}}\right)^2}{\sigma E} \quad (6)$$

$$\Delta\varepsilon = \frac{\Delta\sigma_k^2}{\Delta\sigma E} \quad (7)$$

Yhtälöistä 4 ja 6 ratkaistava σ on paikallinen maksimijännitys σ_{max} . Paikallinen minimijännitys σ_{min} lasketaan yhtälöistä 5 ja 7 ratkaistavan $\Delta\sigma$:n avulla yhtälön 8 mukaisesti (Ahola, Skriko & Björk 2020, 4–5).

$$\sigma_{\text{min}} = \sigma_{\text{max}} - \Delta\sigma \quad (8)$$

Paikallinen jännityssuhde lasketaan yhtälöllä 9, ja 4R menetelmän mukainen väsymiskestoikä lasketaan yhtälöllä 10 (Ahola, Skriko & Björk 2020, 6; 9).

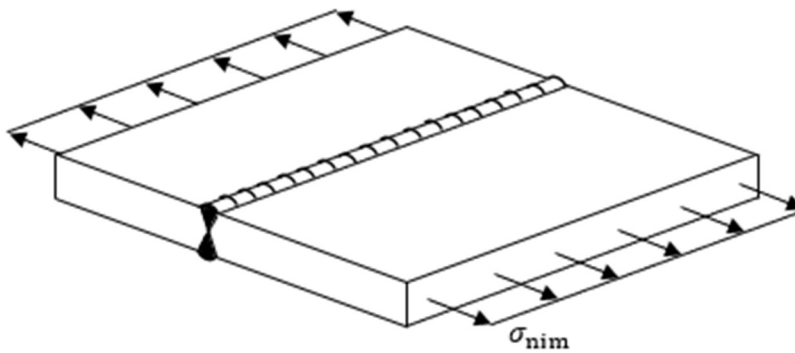
$$R_{\text{local}} = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}} \quad (9)$$

$$N_{f,4R} = \left(\frac{\sqrt{1-R_{\text{local}}}}{\Delta\sigma_k}\right)^{m_{4R}} \cdot C_{4R} \quad (10)$$

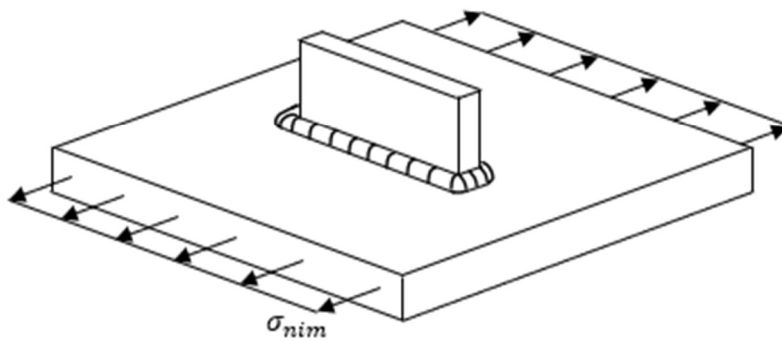
Yhtälössä 10 $N_{f,4R}$ on 4R-menetelmän mukainen väsymiskestoikä, m_{4R} SN-käyrän kaltevuus log-log-asteikolla ja C_{4R} väsymiskapasiteetti (Ahola, Skriko & Björk 2020, 9).

3 Tutkimusmenetelmät

Tässä luvussa kuvataan työssä käytettävät laskentamenetelmät ja elementtimallit. Tarkastelu suoritetaan Eurokoodi 3:ssa esitettäville tyyppiliitoksille, joista päittäisliitos esitetään kuvassa 10 ja poikittainen jäykistelevy kuvassa 11.



Kuva 10. Päittäisliitoksen geometria ja kuormitus (Mukaillen prEN 1993-1-9 2020, 103).

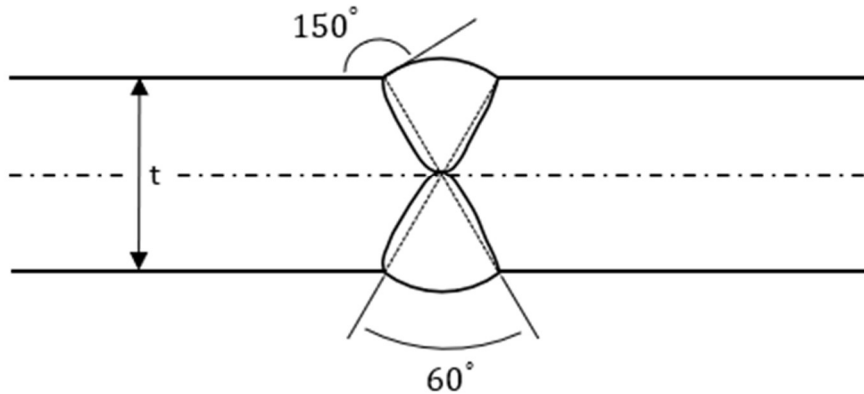


Kuva 11. Poikittaisen jäykistelevyn geometria ja kuormitus (Mukaillen prEN 1993-1-9 2020, 102).

Kuvissa 10 ja 11 rakennetta kuormittaa poikkileikkauksen yli tasan jakautunut nimellinen kalvojäännitys σ_{nim} .

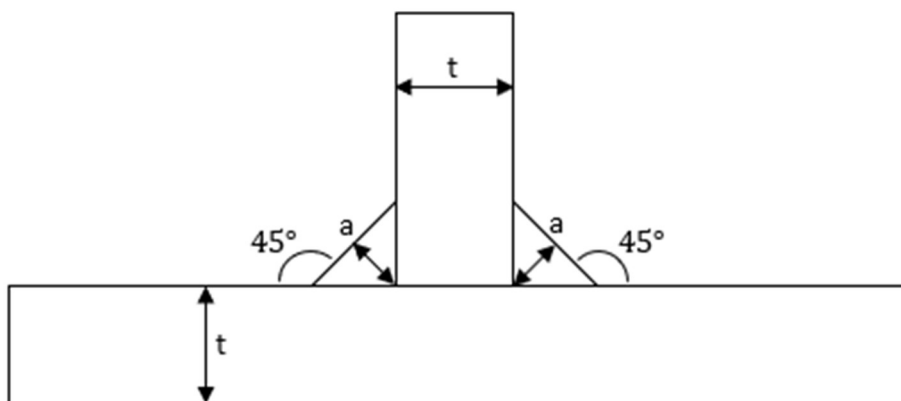
3.1 Laskentamenetelmien kuvaus

Päittäisliitoksen poikkileikkauksen geometria esitetään kuvassa 12, jossa levynpaksuus $t = 10$ mm, hitsin liittymäkulma on 150° ja railokulma on 60° .



Kuva 12. Päittäisliitoksen poikkileikkauksen geometria.

Kuvassa 13 esitetään poikittaisen jäykistelevyn geometria, jossa levynpaksuus $t = 10$ mm, hitsin a-mitta $a = 5$ mm ja liittymäkulmat ovat 45° .



Kuva 13. Poikittaisen jäykistelevyn poikkileikkauksen geometria.

4R-menetelmän mukaisen väsymiskestojen laskenta suoritetaan Mathcad 15 -ohjelmalla yhtälöiden 3–10 mukaisesti. Laskenta tehdään lujuusluokilla S355 ja S700 sekä Eurokoodi 3:ssa taulukoiduilla jännityssuhteilla $R = -1,0$, $R = 0,1$ ja $R = 0,5$ (prEN 1993-1-9 2020, 102). Materiaalin kimmokerroin $E = 210\,000$ MPa. Nykänen et al. (2016, 180) mukaan SN-käyrän kaltevuutta kuvaava tekijä $m_{4R} = 5,85$ ja väsymiskapasiteetti $C_{4R} = 10^{20,83}$. 4R laskennassa käytettävät materiaalitiedot esitetään taulukossa 1 ja Mathcad laskenta esitetään liitteessä 1.

Taulukko 1. 4R laskennan materiaalitiedot.

	Myötölujuus [MPa]	Murtolujuus R_m [MPa]	Syklinen muokkaus- lujittumiskerroin H [MPa]	Syklinen muokkaus- lujittumiseksponentti n [-]
S355	355	510	840	0,15
S700	700	750	1000	0,06

Eurokoodi 3:n mukainen väsymiskestoikä lasketaan yhtälöllä 2 ja laskenta suoritetaan samoille lujuusluokille ja jännityssuhteille kuin 4R-menetelmällä. Päittäisliitoksen FAT-luokat kullekin lujuusluokalle sekä jännityssuhteelle esitetään taulukossa 2. Poikittaisen jäykistevän vastaavat FAT-luokat esitetään taulukossa 3.

Taulukko 2. FAT-luokat päittäisliitokselle myötölujuuden ja jännityssuhteen mukaan (prEN 1993-1-9 2020, 102).

Materiaalin myötölujuus [MPa]	FAT-luokka [MPa]		
	Jännityssuhde R [-]		
	-1,0	0,1	0,5
355	160	160	100
700	160	160	140

Taulukko 3. FAT-luokat poikittaiselle jäykistelevylle myötölujuuden ja jännityssuhteen mukaan (prEN 1993-1-9 2020, 102).

Materiaalin myötölujuus [MPa]	FAT-luokka [MPa]		
	Jännityssuhde R [-]		
	-1,0	0,1	0,5
355	160	140	90
700	160	160	125

Taulukossa 4 esitetään Eurokoodi 3:n mukaiset HFMI-jälkikäsitellyn hyödyllisen vaikutuksen minimisyklinäärät päittäisliitokselle FAT-luokan mukaan. Vastaavat minimisyklinäärät poikittaiselle jäykistelevylle esitetään taulukossa 5.

Taulukko 4. HFMI-jälkikäsitellyn hyödyllisen vaikutuksen minimisyklinäärät päittäisliitokselle FAT-luokan mukaan (prEN 1993-1-9 2020, 102).

FAT-luokka	$N_{\min, HFMI}$ [-]
100	907 200
140	72 750
160	26 750

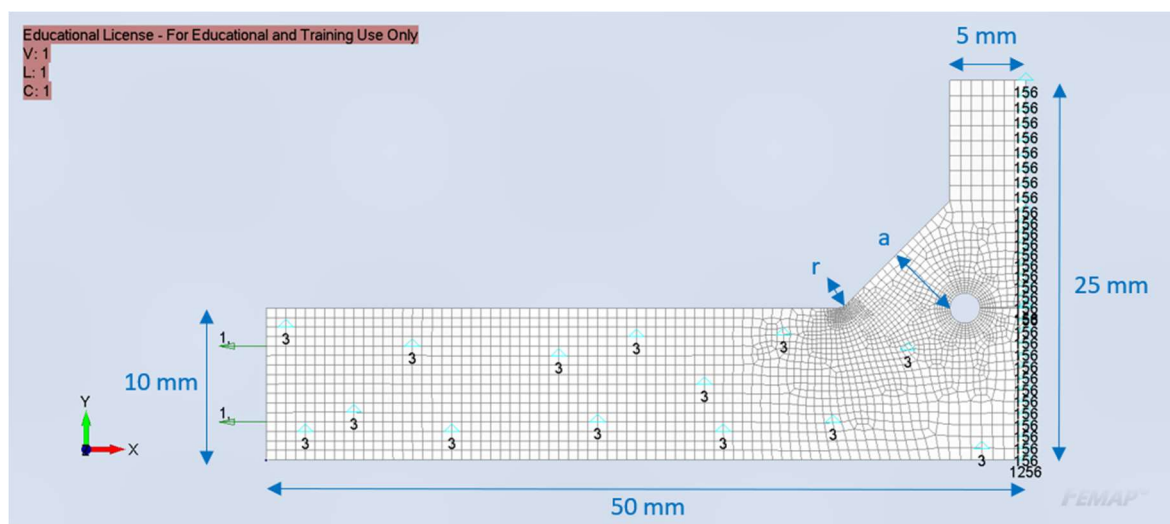
Taulukko 5. HFMI-jälkikäsitellyn hyödyllisen vaikutuksen minimisyklinäärät poikittaiselle jäykistelevylle FAT-luokan mukaan (prEN 1993-1-9 2020, 102).

FAT-luokka	$N_{\min, HFMI}$ [-]
90	826 600
125	70 350
140	30 100
160	11 050

Mathcad laskennalla saatavat 4R kestoikätulokset viedään Microsoft Exceliin, jossa niiden avulla piirretään 4R-menetelmän mukainen jatkuva SN-käyrä. SN-käyrä piirretään suhteessa nimellisen jännityksen arvoihin huomioimalla FE-analyysillä saatavat jännityskonsentraatiokertoimet. Eurokoodi 3:n mukainen SN-käyrä piirretään samaan kaavioon.

3.2 Elementtimallien kuvaus

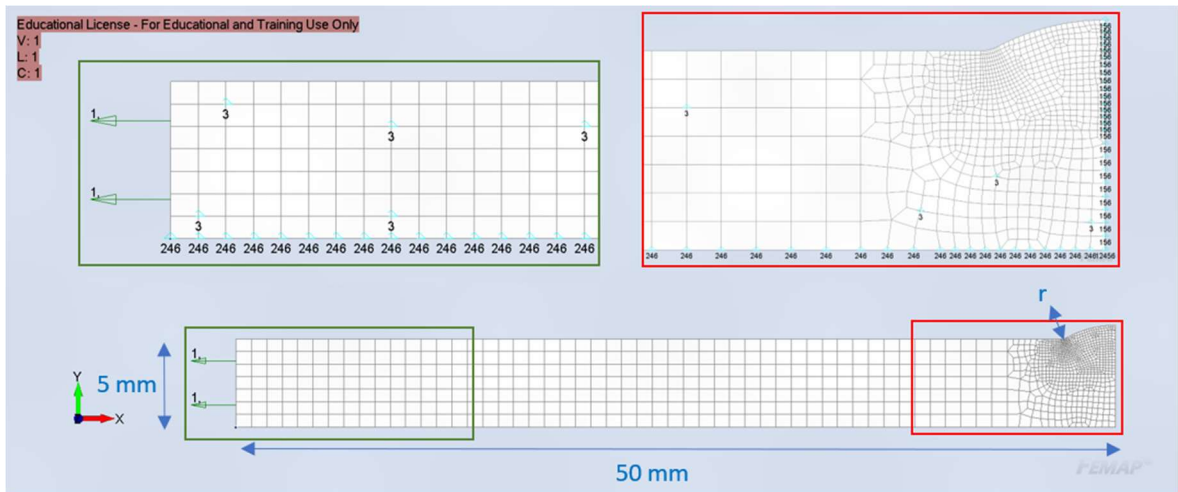
FE-analyysissä käytetään Simcenter Femap 2021.2 MP1 -ohjelmaa. Päittäisliitokselle ja poikittaiselle jäykistelevylle tehdään FE-mallit 1 mm ja 3 mm rajaviivapyörityksillä. Pyöritys mallinnetaan fillet-toiminnolla. Kaikissa malleissa elementtityyppinä on kahdeksansolmuiset plane strain -neliöelementit ja materiaalina on teräs, jonka kimmokerroin $E = 210\,000$ MPa ja Poissonin vakio $\nu = 0,3$. Poikittaiselle jäykistelevylle hyödynnetään liitoksen symmetriaa ja mallinnetaan puolimalli, jonka mitat, kuormat ja reunaehdot esitetään kuvassa 14. Reunaehdot kuvataan numeroin, joista 1, 2 ja 3 kuvaavat x-, y- ja z-translaatioita ja 4, 5 ja 6 kuvaavat x-, y- ja z-rotaatioita.



Kuva 14. Elementtimallin mitat poikittaiselle jäykistelevylle sekä kuormat ja reunaehdot.

Kuvassa 14 r on hitsin rajaviivan pyörityssäde ja a -mitta a on 5 mm. Juurenpuolen pyörityssäde on 1 mm. Kuormana on mallin vasempaan reunaan asetettu 1 MPa suuruinen force per length -kuorma. Mallin oikea reuna toimii symmetriatasona, jossa estetään x-suuntainen translaatio sekä y- ja z-rotaatiot. Y-suuntainen translaatio estetään mallin oikean alakulman solmussa. Z-suuntainen translaatio estetään satunnaisissa solmuissa kuvan 14 mukaisesti.

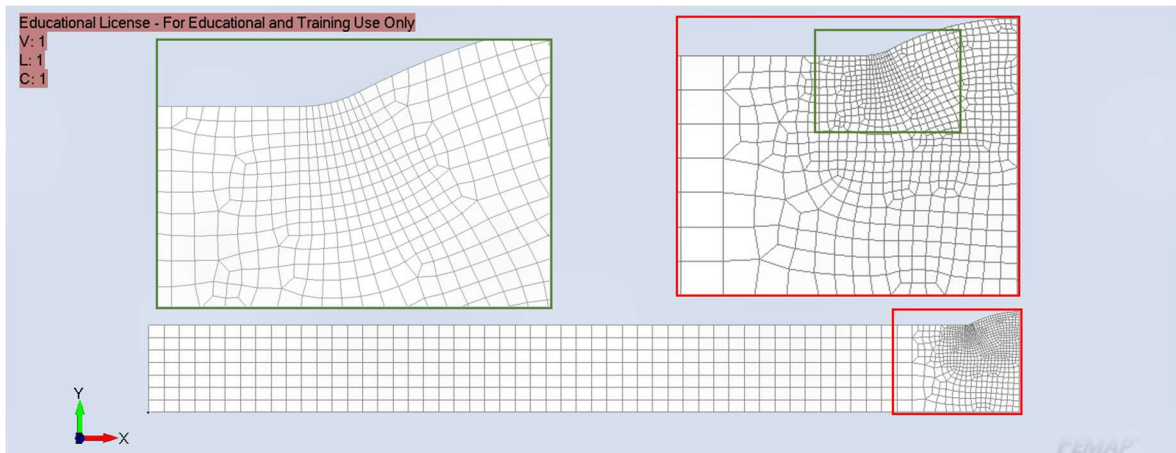
Päittäisliitokselle hyödynnetään kaksinkertaista symmetriaa ja mallinnetaan neljäsosamalli, jonka mitat, kuormat ja reunaehdot esitetään kuvassa 15.



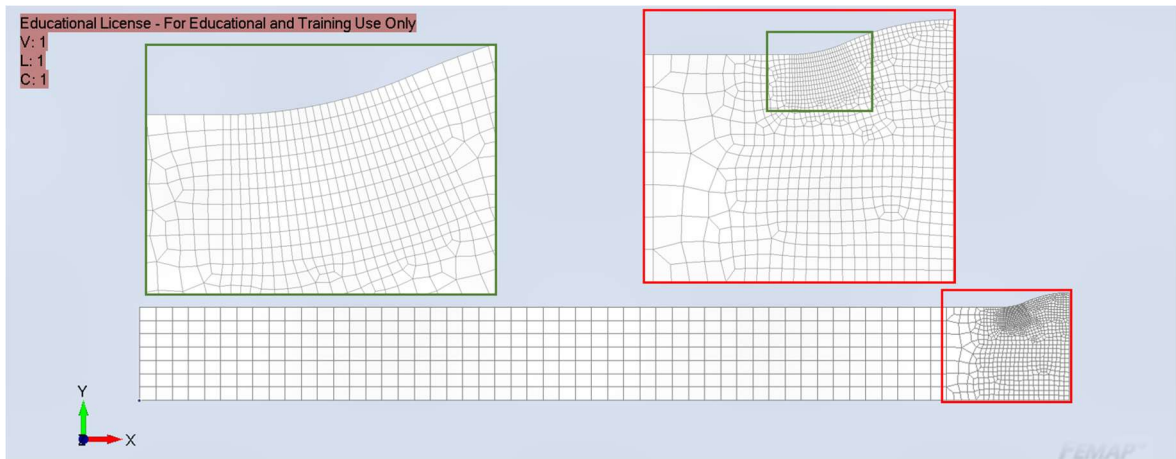
Kuva 15. Elementtimallin mitat päittäisliitokselle sekä kuormat ja reunaehdot.

Kuvassa 15 r on hitsin rajaviivan pyöristyssäde. Kuormana on mallin vasempaan reunaan asetettu 1 MPa suuruinen force per length -kuorma. Mallin oikea sekä alareuna toimivat symmetriatasoina. Oikeassa reunassa estetään x-suuntainen translaatio sekä y- ja z-rotatiot. Alareunassa estetään y-suuntainen translaatio sekä x- ja z-rotatiot. Z-suuntainen translaatio estetään satunnaisissa solmuissa kuvan 15 mukaisesti.

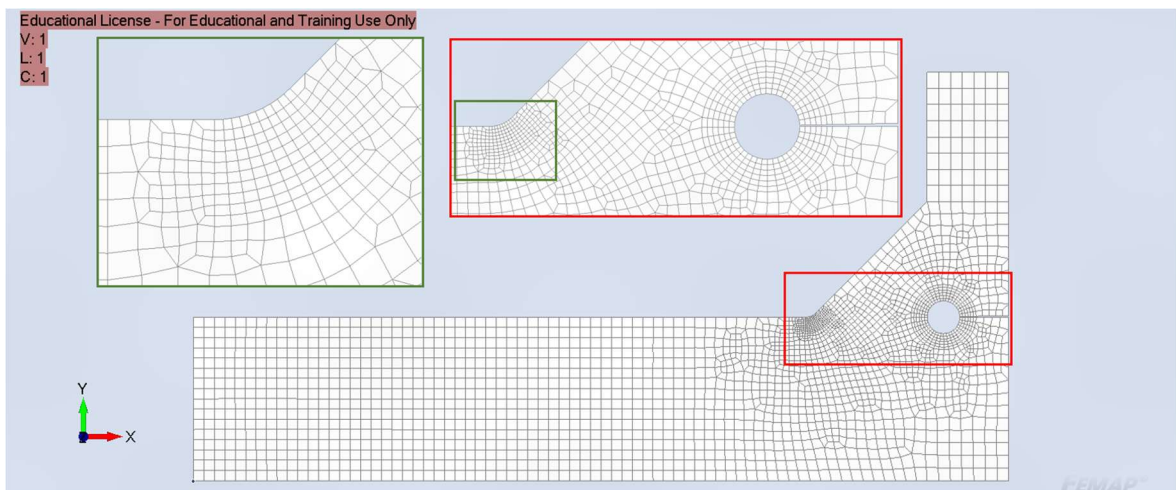
Fricken (2010, 12) mukaan 45° :n rajaviivalla tulisi olla vähintään kolme elementtiä ja juuren puolella 360° :n kaarella tulisi olla vähintään 24 elementtiä. Baumgartner ja Bruder (2013, 141–145) suosittelivat nelikulmaisia tai heksaedrisiä elementtejä. Heidän mukaansa 360° :n kaarella tulisi olla vähintään 24 elementtiä tarkkojen tulosten saamiseksi. Tässä työssä rajaviivoilla käytetään suosituksia tiheämpiä elementtiverkkoja, sillä FE-mallin koko ei ole rajoittava tekijä. FE-mallien verkotus esitetään kuvissa 16–19.



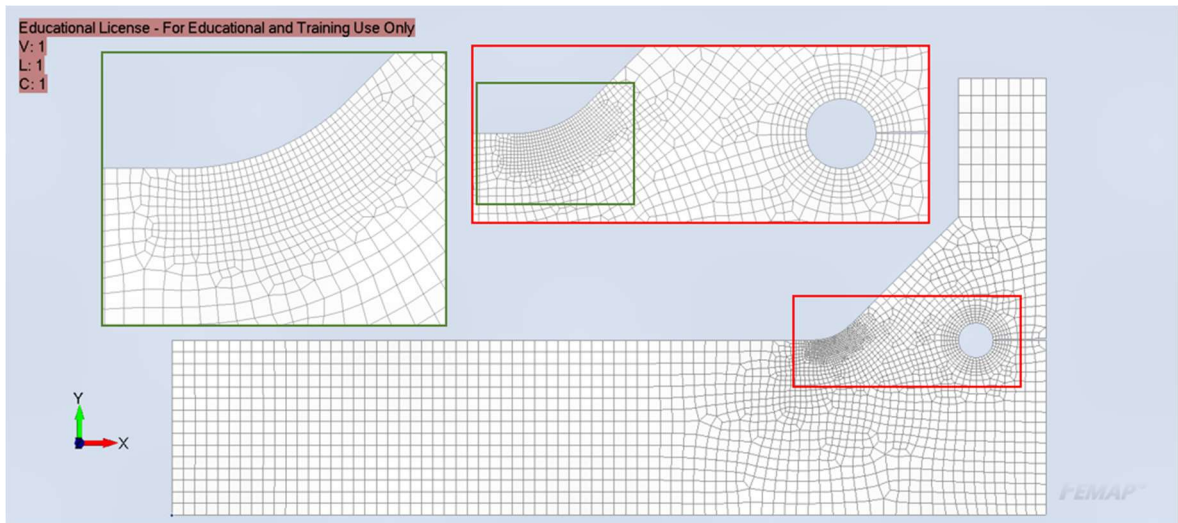
Kuva 16. Päätisliitoksen elementtiverkko 1 mm rajaviivapyörityksellä.



Kuva 17. Päätisliitoksen elementtiverkko 3 mm rajaviivapyörityksellä.



Kuva 18. Poikittaisen jäykistelevyn elementtiverkko 1 mm rajaviivapyörityksellä.

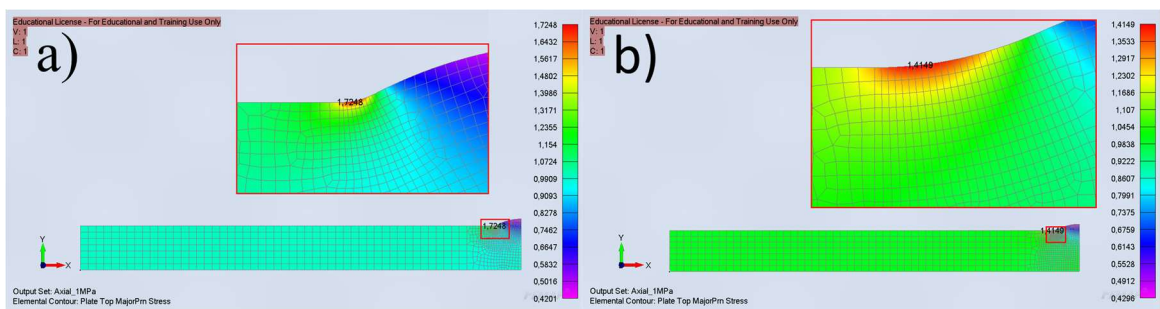


Kuva 19. Poikittaisen jäykistelevyn elementtiverkko 3 mm rajaviivapyörityksellä.

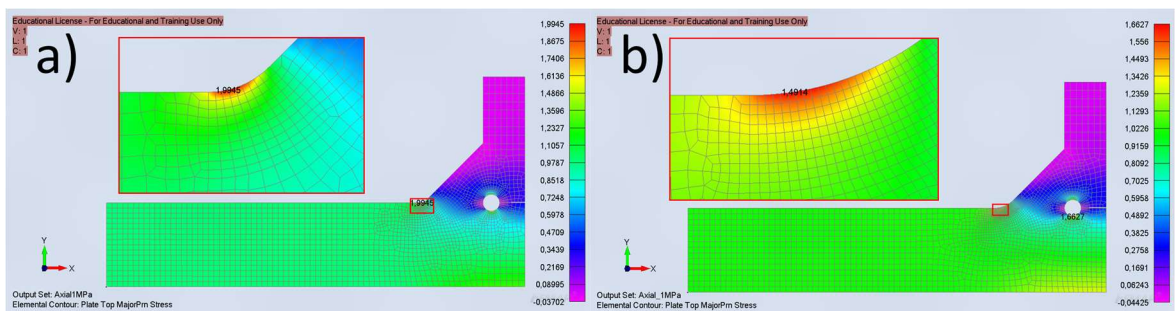
Hitsin rajaviivoille sekä poikittaisen jäykistelevyn juurenpuolelle tehdään 1 mm syvyinen sektori, jonka avulla tiheä verkotus suoritetaan. Säteen suunnassa rajaviivoille asetetaan kymmenen elementtiä ja juuren puolelle asetetaan kuusi elementtiä. Päittäisliitoksen rajaviivalle asetetaan kymmenen elementtiä 1 mm rajaviivapyörityksellä ja 26 elementtiä 3 mm rajaviivapyörityksellä. Poikittaisessa jäykistelevyissä rajaviivalle asetetaan kymmenen elementtiä 1 mm rajaviivapyörityksellä ja kolmekymmentä elementtiä 3 mm rajaviivapyörityksellä. Kaikille elementtimalleille suoritetaan lineaarisstaattinen analyysi. Tuloksena saadaan hitsin rajaviivan maksimipääjännitys, joka on suuruudeltaan rajaviivan jännityskonsentraatiokertoimen suuruinen kuormituksen ollessa 1 MPa suuruinen force per length -kuorma.

4 Tulokset

FE-analyysin tulokset esitetään kuvissa 20 ja 21. Tuloksena on hitsin rajaviivan maksimipääjännitys, joka on suuruudeltaan yhtä suuri kyseisen tapauksen jännityskonsentraatiokerroimen kanssa. Jännityskonsentraatiokerroimet esitetään taulukossa 6.



Kuva 20. Päittäisliitoksen maksimipääjännitys hitsin rajaviivalla, kun $r = 1$ mm (a) ja $r = 3$ mm (b).

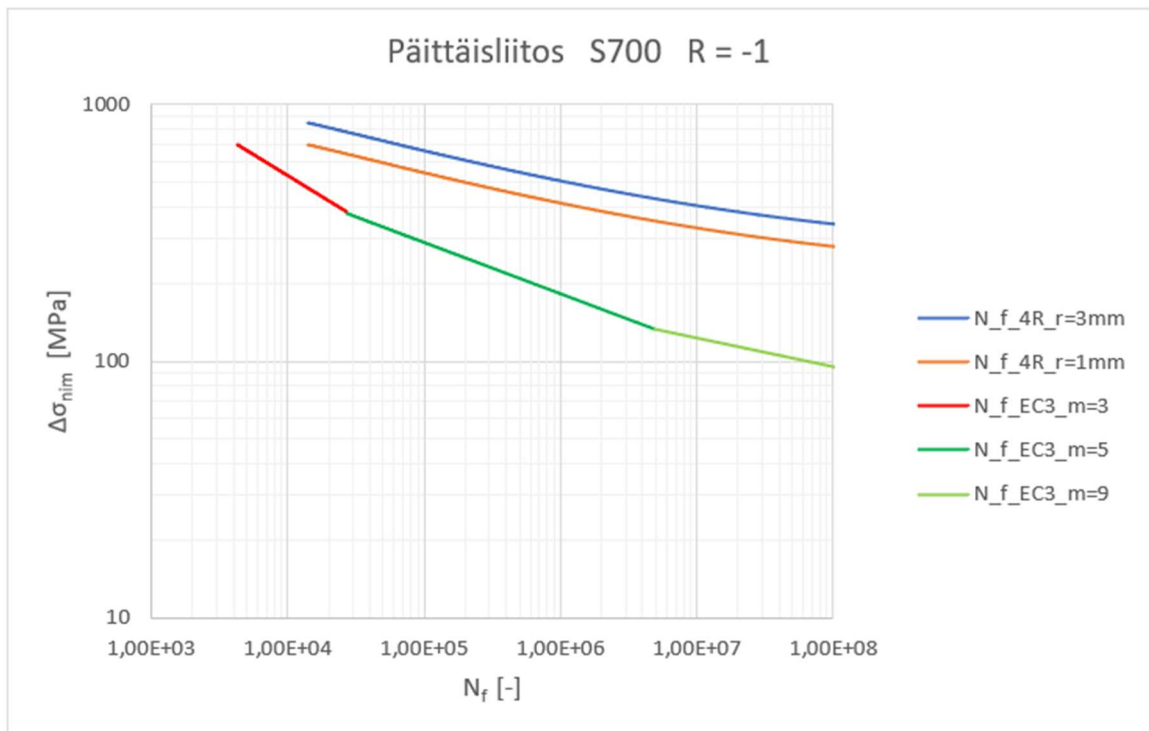


Kuva 21. Poikittaisen jäykistelevyn maksimipääjännitys hitsin rajaviivalla, kun $r = 1$ mm (a) ja $r = 3$ mm (b).

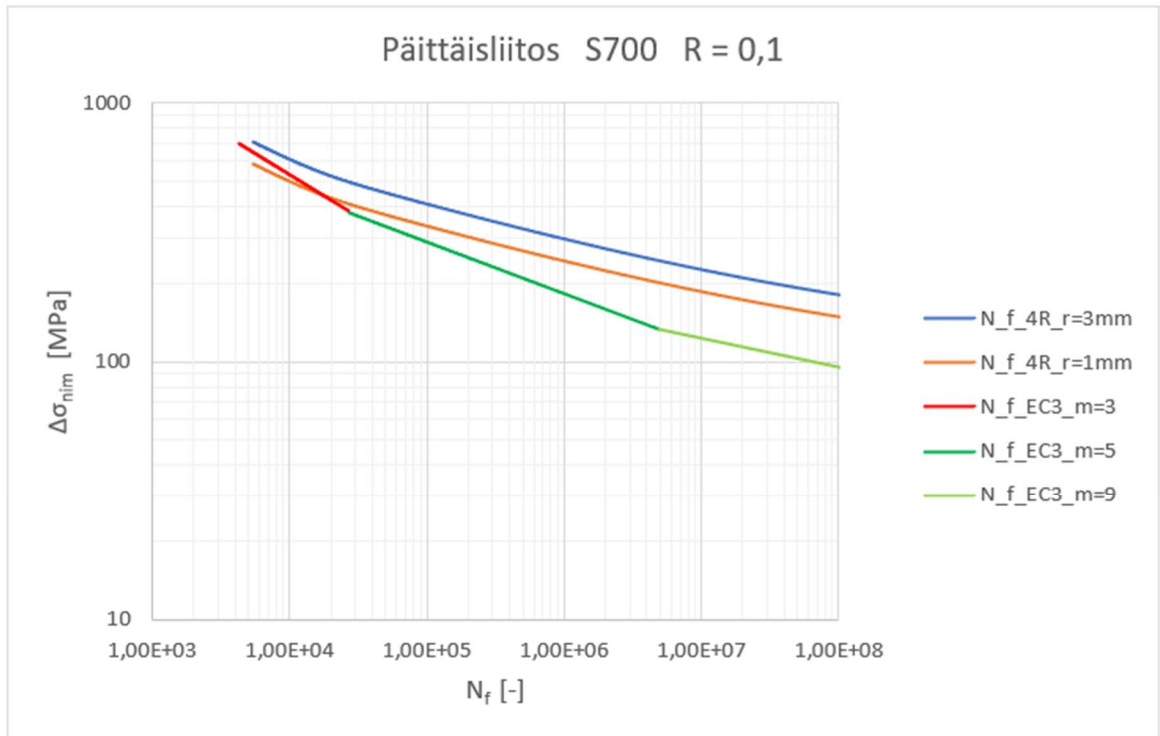
Taulukko 6. Hitsin rajaviivan jännityskonsentraatiokertoimet liitostyyppin ja rajaviivan pyöristyssäteen mukaan.

	$r = 1 \text{ mm}$	$r = 3 \text{ mm}$
Päittäisliitos	1,72	1,41
Poikittainen jäykistelevy	1,99	1,49

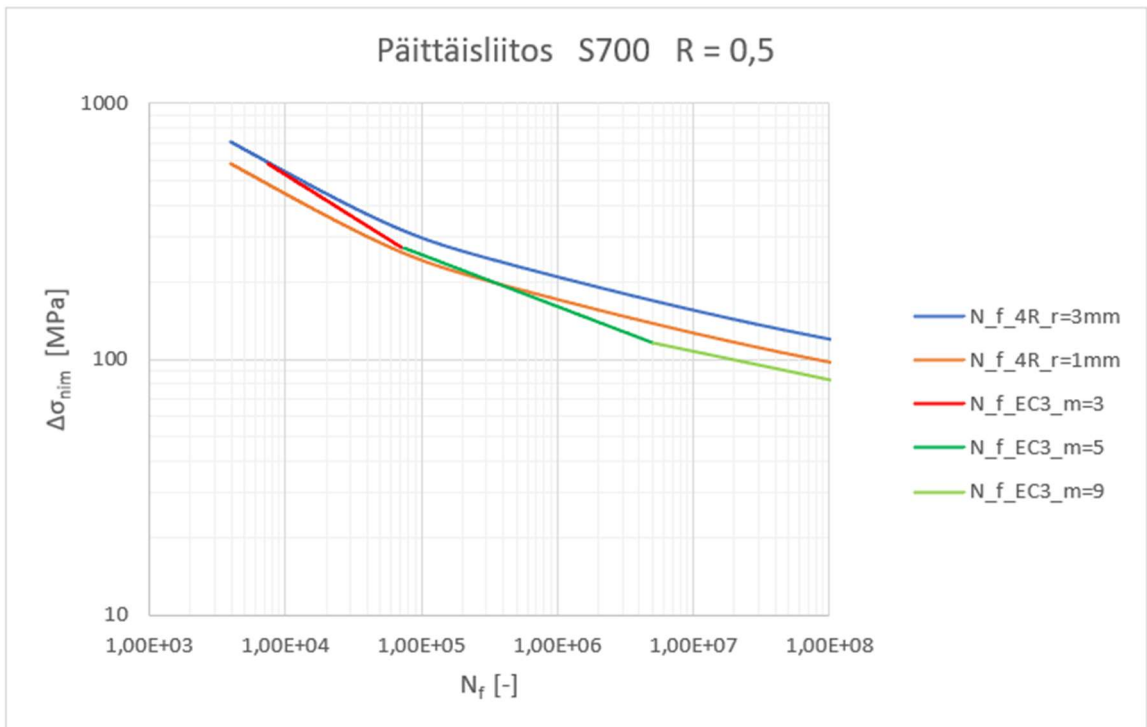
Kuvissa 22–33 esitetään Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän mukaiset SN-käyrät luvun 3.1 kuvauksen mukaisesti. SN-käyrät esitetään liitostyyppin, lujuusluokan ja jännityssuhteen mukaan. Kuvissa 22–33 kuvaajan vaaka-akselilla on väsymiskestoikä syklimäärinä ja pystyakselilla nimellisen jännityksen vaihteluväli. 4R-menetelmän mukaiset SN-käyrät esitetään sinisellä ja oranssilla, joista sininen kuvaa rajaviivan pyöristystä $r = 3 \text{ mm}$ ja oranssi kuvaa rajaviivan pyöristystä $r = 1 \text{ mm}$. Eurokoodi 3:n mukaiset SN-käyrät esitetään punaisella ja vihreällä. Punainen käyrä kuvaa tilannetta, jossa väsymiskestoikä on alle minimisyklimäärän $N_{\min, \text{HFMI}}$ ja $m = 3$. Vihreä käyrä kuvaa HFMI-jälkikäsittelyn seurauksena parantunutta väsymislujuutta, jolloin tumman vihreällä käyrällä $m = 5$ ja vaalean vihreällä käyrällä $m = 9$.



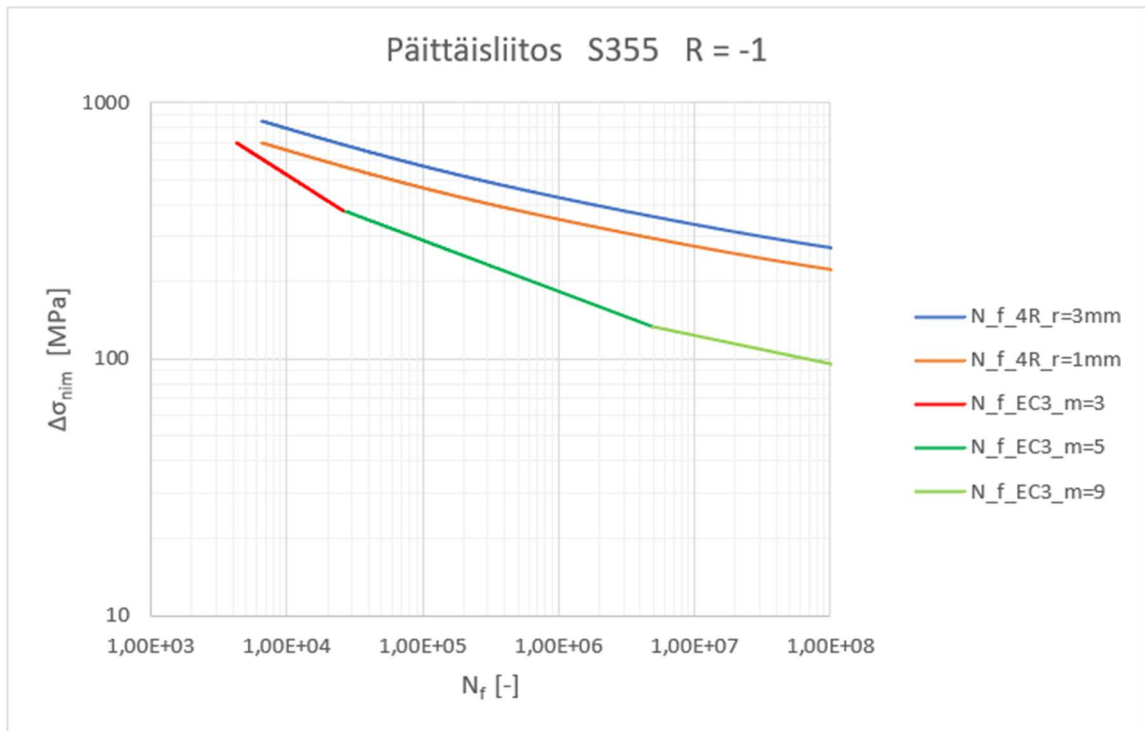
Kuva 22. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = -1$.



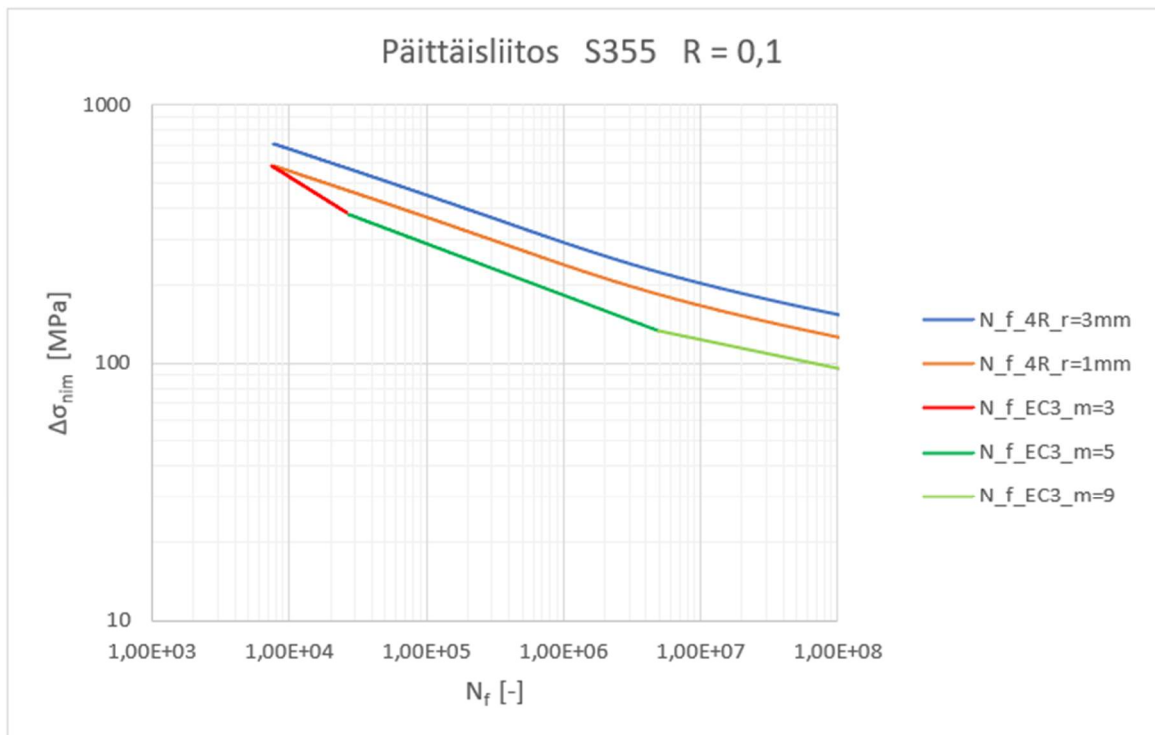
Kuva 23. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,1$.



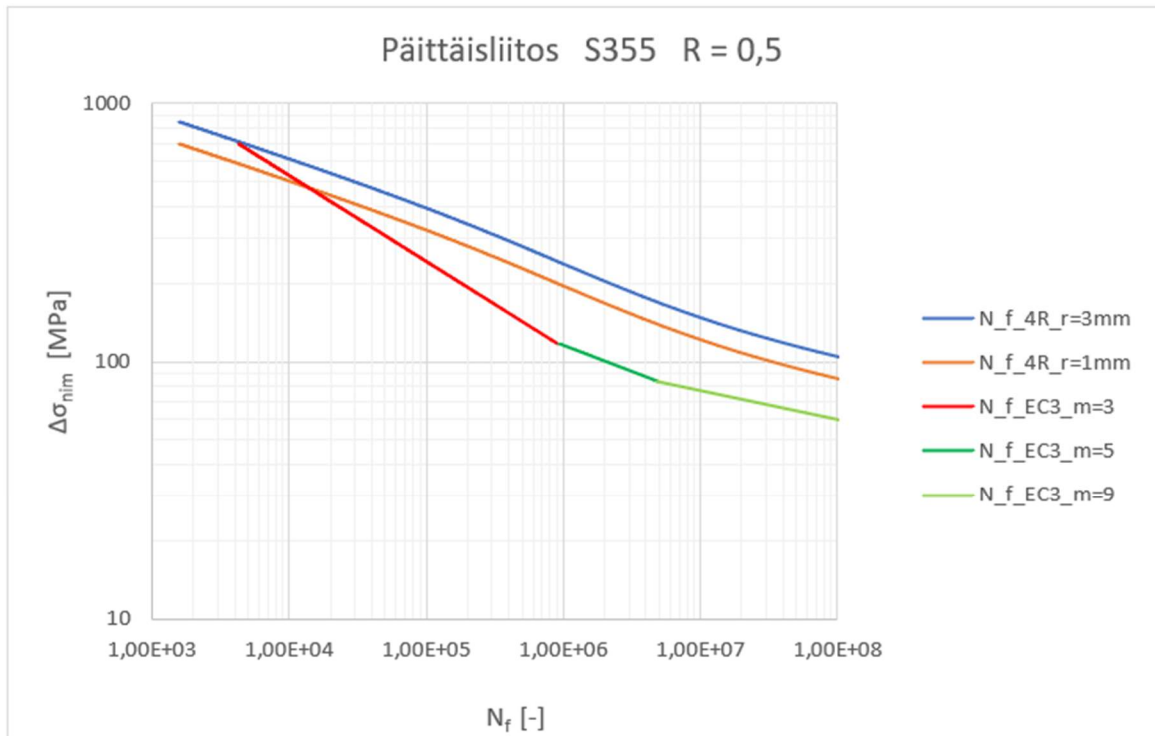
Kuva 24. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,5$.



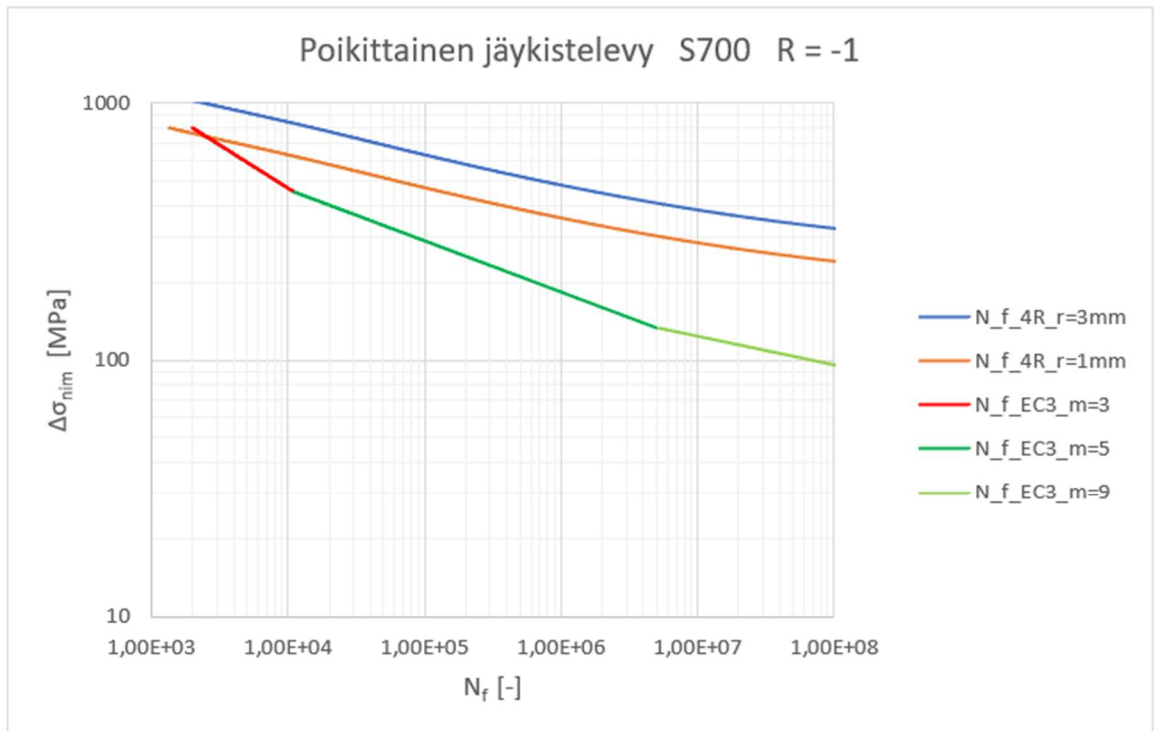
Kuva 25. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = -1$.



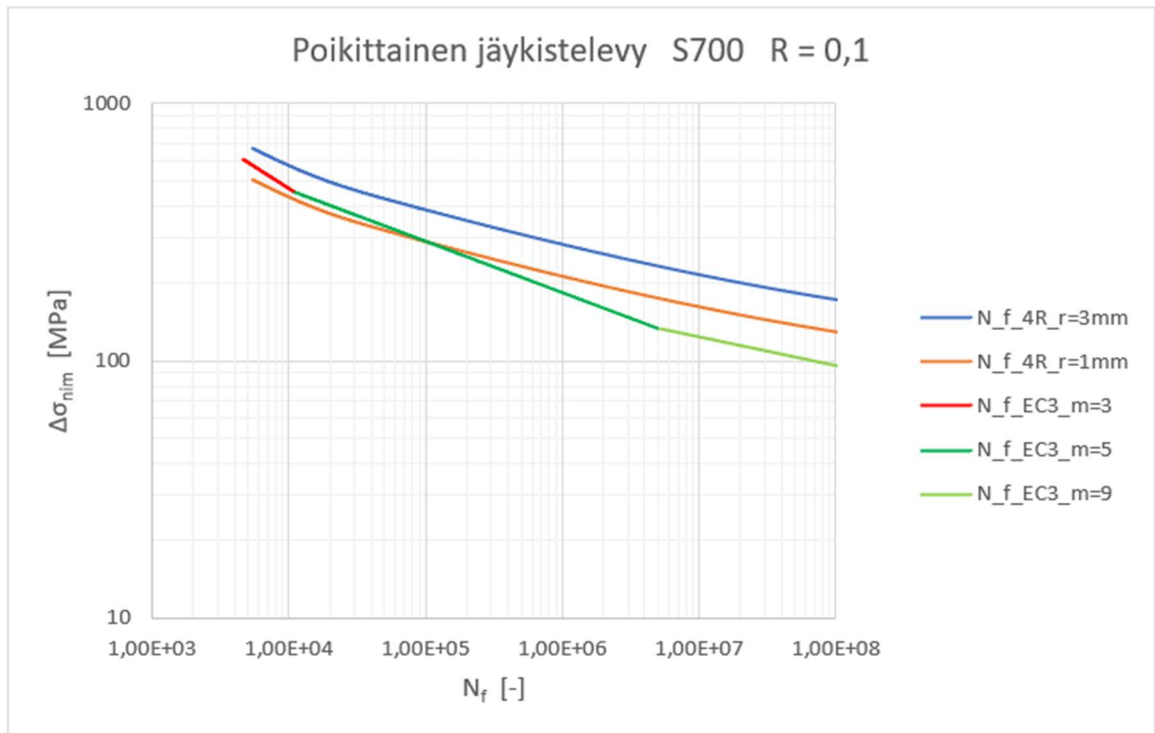
Kuva 26. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,1$.



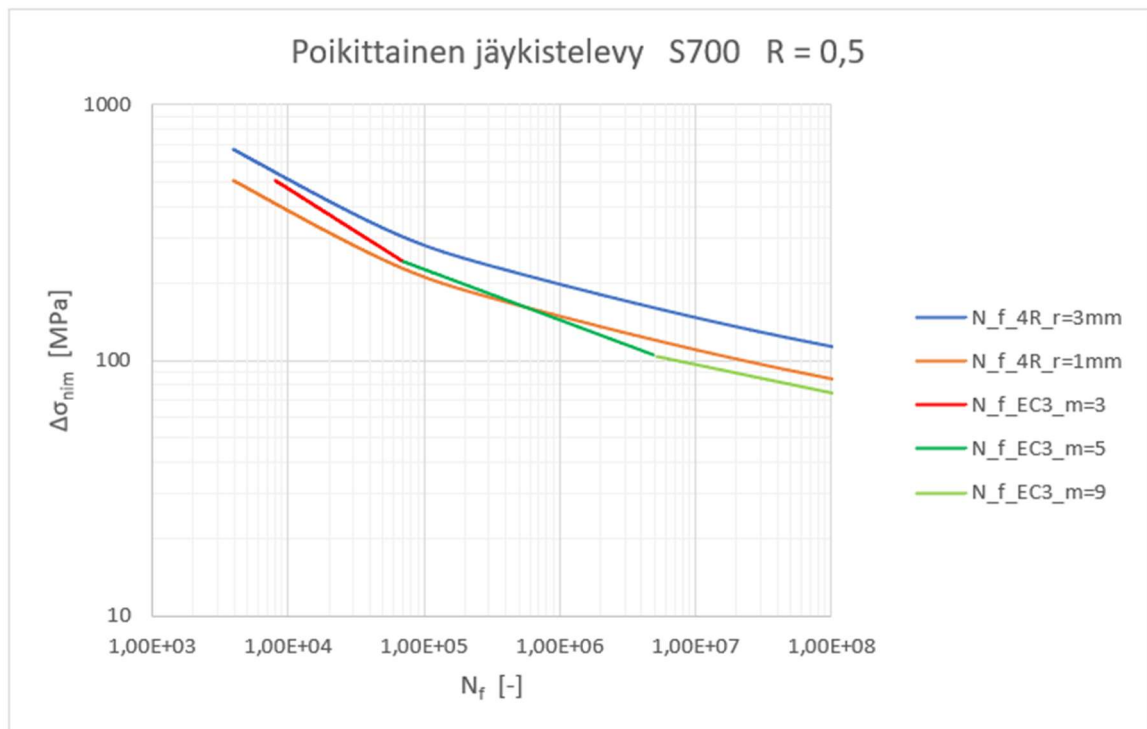
Kuva 27. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset päittäisliitoksen SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,5$.



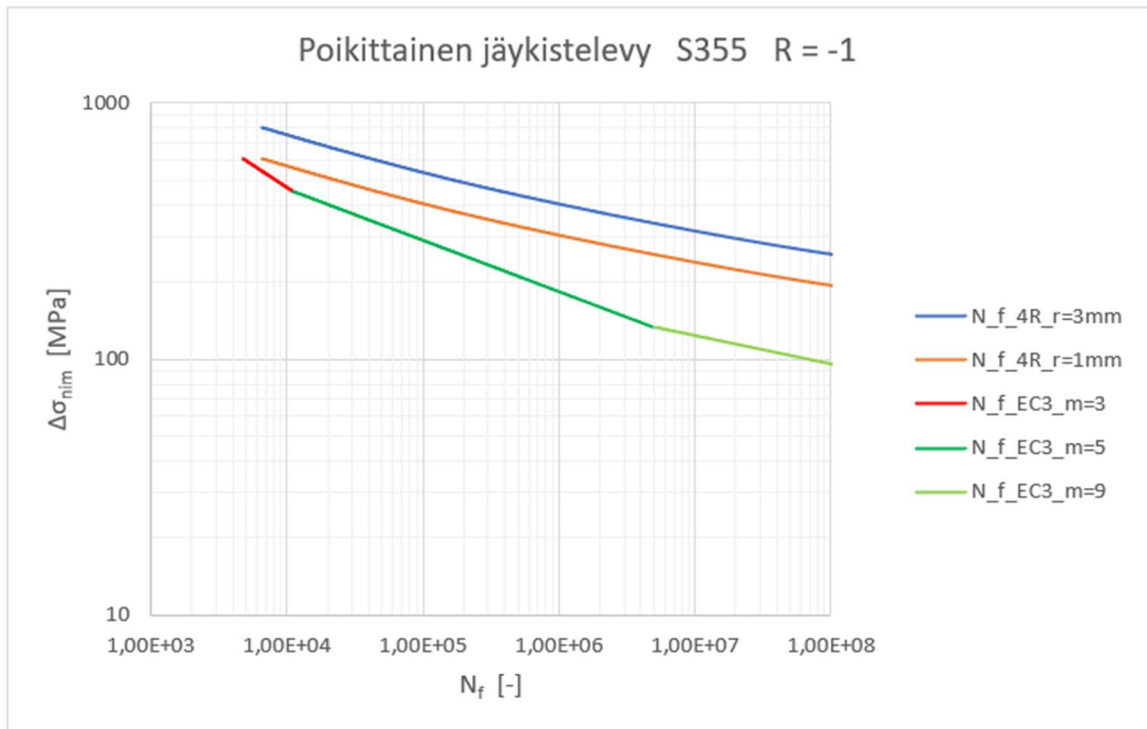
Kuva 28. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = -1$.



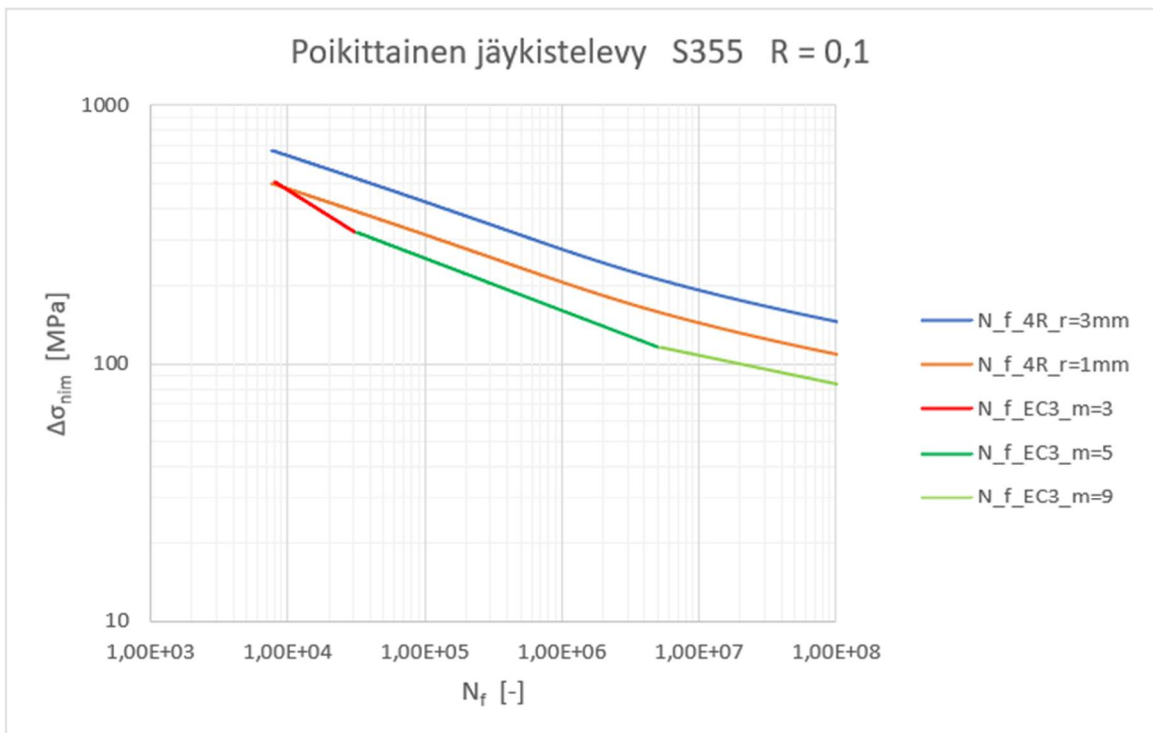
Kuva 29. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,1$.



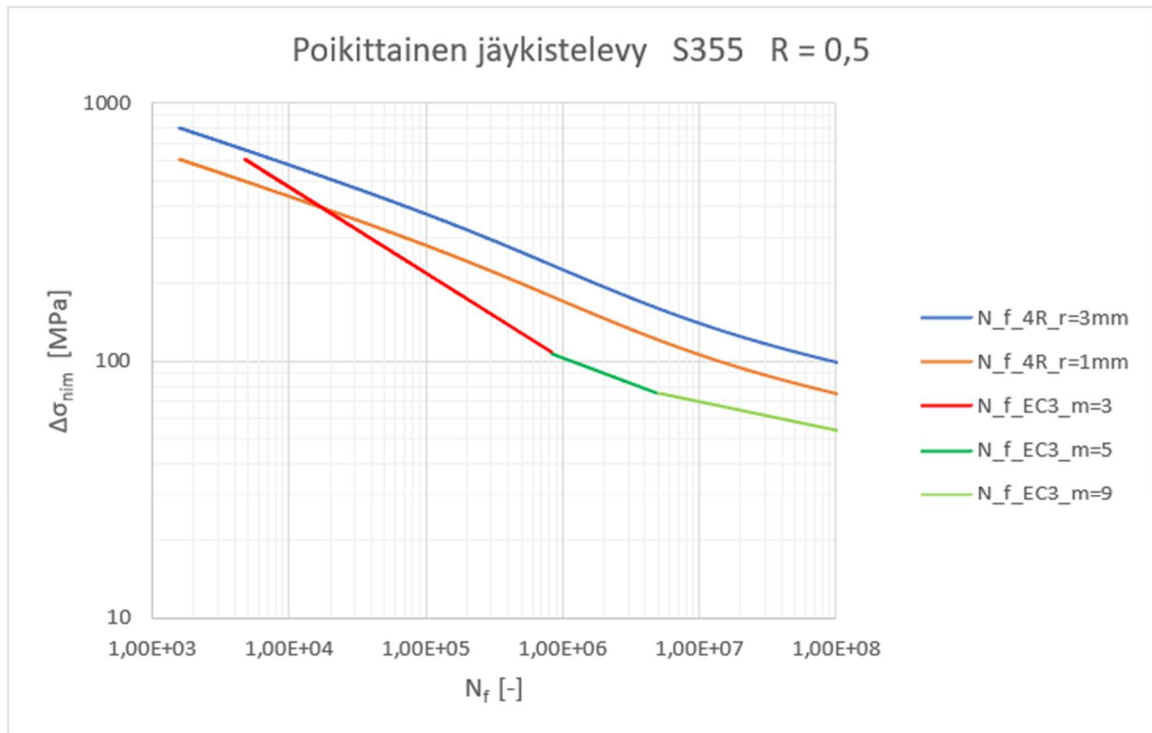
Kuva 30. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S700 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,5$.



Kuva 31. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = -1$.



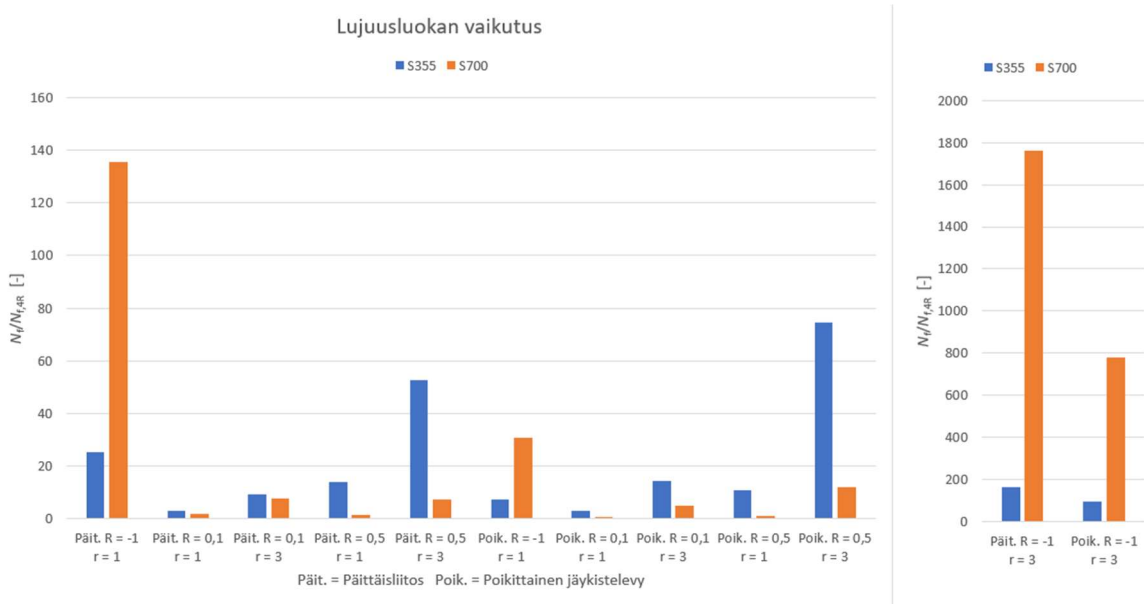
Kuva 32. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,1$.



Kuva 33. Eurokoodi 3:n ja 4R menetelmän mukaiset poikittaisen jäykistelevyn SN-käyrät S355 teräkselle jännityssuhteella $R = 0,5$.

5 Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset

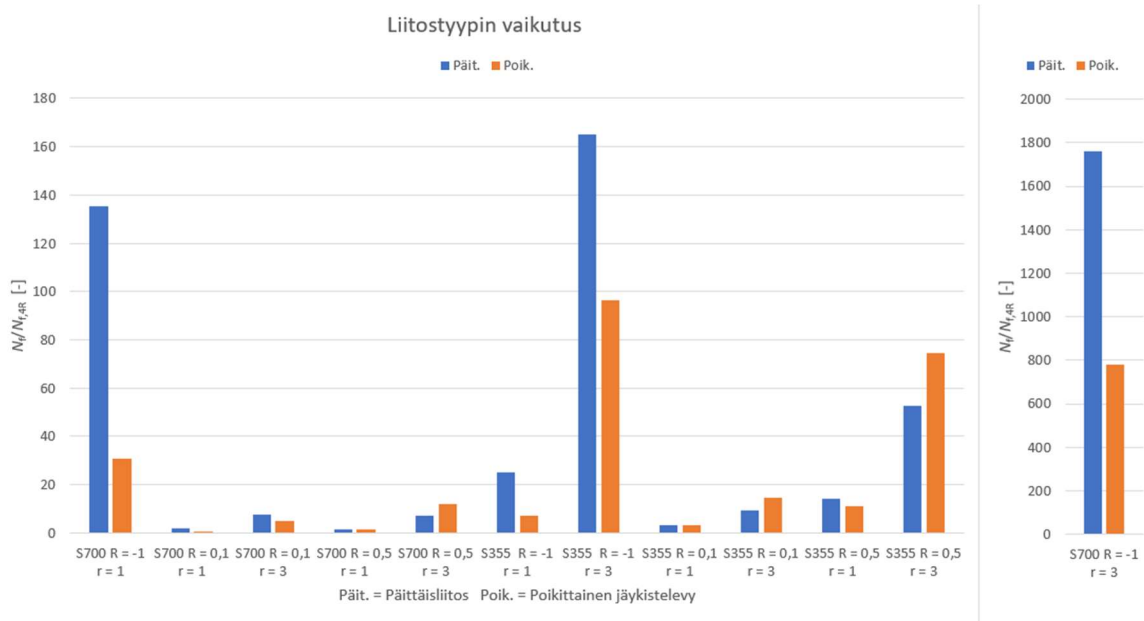
Tässä luvussa tarkastellaan Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän väsymiskestoikäennusteiden eroja ja syitä niiden taustalla. Väsymiskestoikäntulosten tarkastelu suoritetaan vertailemalla Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän kestoikien suhdelukuja ja liitostyyppin, lujuusluokan, jännityssuhteen sekä 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutusta niihin. Suhdeluvut lasketaan jakamalla 4R-menetelmän mukainen väsymiskestoikä vastaavan jännitystason Eurokoodi 3:n mukaisella väsymiskestoikäällä. Vertailuun valitaan arvot Eurokoodi 3:n $m = 5$ käyrältä siten että jännityssuhteilla $R = -1$ ja $R = 0,1$ 4R-menetelmän kestoikää verrataan Eurokoodi 3:n kestoikään 40 000 ja jännityssuhteella $R = 0,5$ 4R-menetelmän kestoikää verrataan Eurokoodi 3:n kestoikään 1 000 000. Tulosten tarkastelu esitetään kuvissa 34–37, joissa pystyakselilla on 4R-menetelmän ja Eurokoodi 3:n väsymiskestoikien suhdeluku.



Kuva 34. Lujuusluokan vaikutus Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän laskennallisten tulosten eroihin.

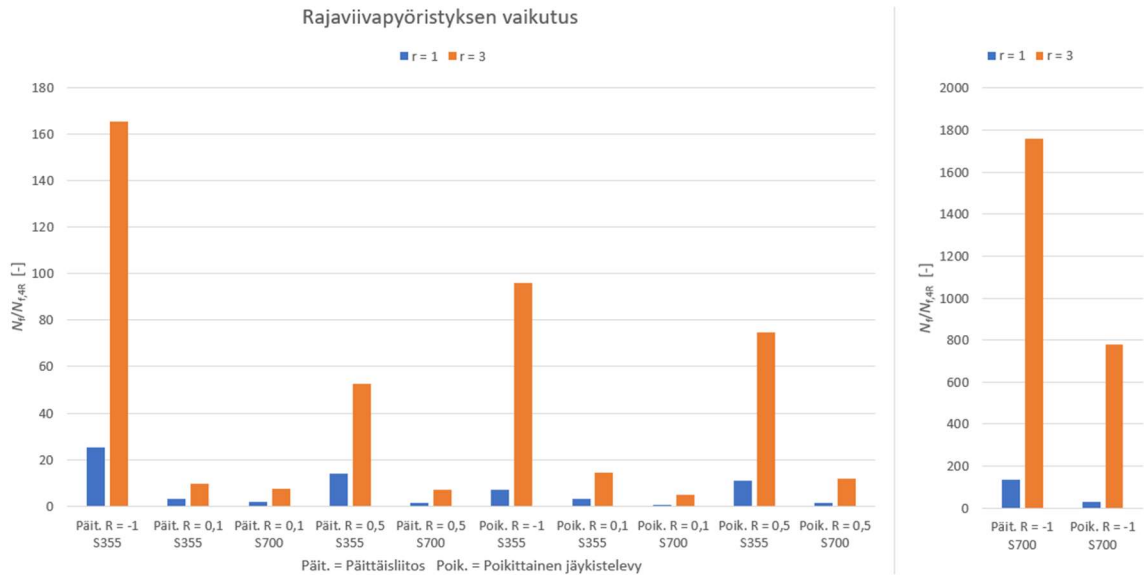
Kuvassa 34 esitetään lujuusluokan vaikutus 4R-menetelmän ja Eurokoodi 3:n väsymiskestoikien suhdelukuihin. Suurimmat suhdeluvut ovat jännityssuhteella $R = -1$, jolloin S700

teräksen suhdelukujen ero S355 teräksen suhdelukuihin on suurin. Vastaavasti S355 teräksen suhdeluvut ovat suurimpia verrattuna S700 teräksen suhdelukuihin, kun $R = 0,5$. Pienimmät suhdeluvut ovat jännityssuhteella $R = 0,1$, jolloin myös lujuusluokan vaikutus on pienin.



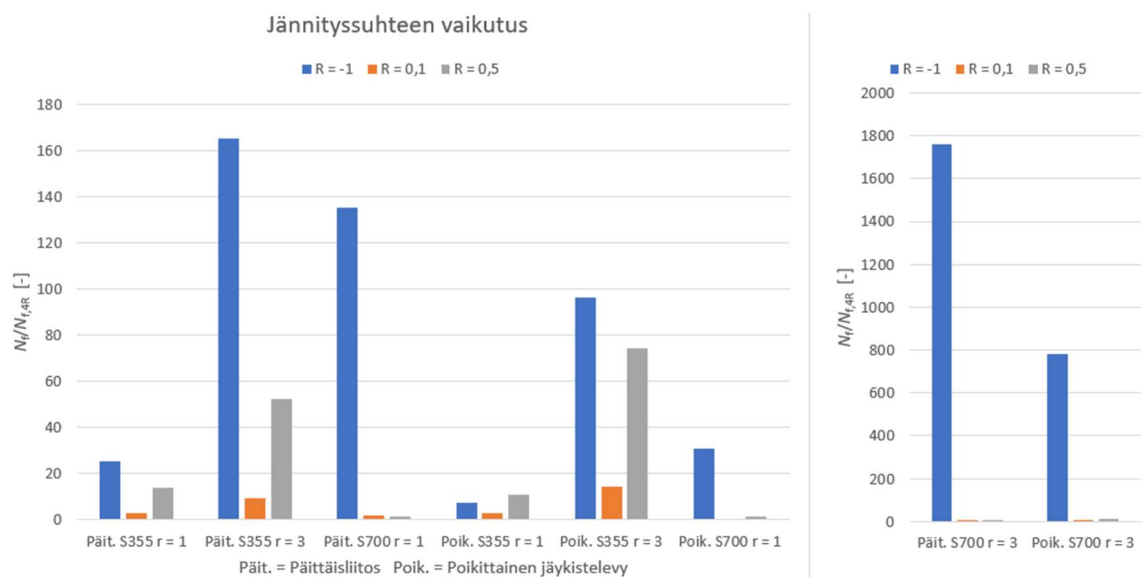
Kuva 35. Liitostyyppin vaikutus Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän laskennallisten tulosten eroihin.

Liitostyyppin vaikutus 4R-menetelmän ja Eurokoodi 3:n väsymiskestoikien suhdelukuihin esitetään kuvassa 35. Päittäisliitoksen suhdeluvut ovat huomattavasti poikittaisen jäykistelevyn suhdelukuja suurempia jännityssuhteella $R = -1$. Poikittaisen jäykistelevyn suhdeluvut puolestaan ovat hieman päittäisliitoksen suhdelukuja suurempia, kun $R = 0,5$ ja $r = 3$ mm. Muissa tapauksissa liitostyyppin vaikutus on pienempi.



Kuva 36. 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutus Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän laskennallisten tulosten eroihin.

Kuvassa 36 esitetään 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutus 4R-menetelmän ja Eurokoodi 3:n väsymiskestoikien suhdelukuihin. Suurimmat suhdeluvut ovat rajaviivapyörityksellä $r = 3$ mm ja pienimmät, kun $r = 1$ mm. Kaikissa tilanteissa $r = 3$ mm suhdeluvut ovat merkittävästi suurempia $r = 1$ mm suhdelukuihin verrattuna.



Kuva 37. Jännityssuhteen vaikutus Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän laskennallisten tulosten eroihin.

Kuvassa 37 esitetään jännityssuhteen vaikutus 4R-menetelmän ja Eurokoodi 3:n väsymiskestoikien suhdelukuihin. Jännityssuhteen $R = -1$ suhdeluvut S700 teräksellä ovat merkittävästi suurempia muiden jännityssuhteiden suhdelukuihin verrattuna. S355 teräksellä jännityssuhteen $R = 0,1$ suhdeluvut ovat selvästi muita suhdelukuja pienempiä.

Tämän työn tavoitteena on vertailla Eurokoodi 3:lla ja 4R-menetelmällä laskettuja HFMI-jälkikäsitellyn hitsiliitoksen väsymiskestoikäennusteita. Lisäksi tarkastellaan lujuusluokan, liitostyyppin, jännityssuhteen ja 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutusta niiden eroihin. Tarkastelu suoritetaan kahdella Eurokoodi 3:ssa esitettävällä tyyppi-liitoksella. Työn lähtökohtana on oletus Eurokoodi 3 mukaisen mitoituksen konservatiivisuudesta. Työssä käytettävät tutkimusmenetelmät ovat FE-analyysi sekä analyttinen laskenta.

Tulosten tarkastelun perusteella Eurokoodi 3:n mukainen mitoitus on konservatiivista 4R-menetelmän mukaiseen mitoitukseen verrattuna. Merkittävimmät erot muodostuvat jännityssuhteella $R = -1$ ja lujuudella S700. Myös 4R-menetelmässä käytettävän hitsin rajaviivapyörityksen vaikutus on merkittävä tulosten kannalta. Monissa tapauksissa rajaviivapyöritys $r = 1$ mm antaa Eurokoodi 3:n kaltaisia tuloksia ja kestoikäennusteet rajaviivapyörityksellä $r = 3$ mm ovat niitä merkittävästi suurempia. Liitostyyppin vaikutus on merkittävin jännityssuhteen ollessa $R = -1$, jolloin suurin ero Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän tuloksissa on päittäisliitoksella. Muissa tapauksissa liitostyyppin vaikutus on huomattavasti pienempi.

Näin ollen suurin ero Eurokoodi 3:n ja 4R-menetelmän väsymiskestoikäennusteissa muodostuu S700 lujuuden päittäisliitoksella, jonka jännityssuhde $R = -1$ ja hitsin rajaviivapyöritys $r = 3$ mm. Pienimmät erot menetelmien välillä ovat lujuudella S700 ja rajaviivapyörityksellä $r = 1$ mm, kun poikittaisen jäykistelevyn jännityssuhde $R = 0,1$ tai $R = 0,5$ ja päittäisliitoksen jännityssuhde $R = 0,5$. Näissä tapauksissa merkille pantavaa on se, että suurilla jännityksenvaihteluväleillä 4R-menetelmän mukainen väsymiskestoikäennuste on Eurokoodi 3:n mukaista väsymiskestoikäennustetta pienempi.

Lähteet

- Ahola, A., Skriko, T. & Björk, T. 2020. Fatigue strength assessment of ultra-high-strength steel fillet weld joints using 4R method. *Journal of Constructional Steel Research* 167: 105861.
- Baumgartner, J. & Bruder, T. 2012. An efficient meshing approach for the calculation of notch stresses. *Weld World*, 57: 1. S.137–145.
- Fricke, W. 2010. Guideline for the Fatigue Assessment by Notch Stress Analysis for Welded Structures IIW-document XIII-2240r2-08. 38 s.
- Hobbacher, A. 2016. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document IIW-2259-15 ex XIII-2460-13/XV-1440-13. 143 s.
- MacDonald, K. A. 2011. *Fracture and Fatigue of Welded Joints and Structures*. 1. painos. Cambridge: Woodhead Publishing Limited.
- Marquis, G. B. & Barsoum, Z. 2016. *IIW Recommendations for the HFMI Treatment for Improving the Fatigue Strength of Welded Joints*. Singapore: Springer Singapore.
- Niemi, E. 1996. Hitsattujen rakenteiden väsymistarkastelussa käytettävät jännitykset. *Tekninen tiedotus* 3/96. Tampere: Tammer-Paino. 45 s.
- Niemi, E. & Kemppi, J. 1993. *Hitsatun rakenteen suunnittelun perusteet*. 1. painos. Helsinki: Painatuskeskus. 337 s.
- Nussbaumer, A., Borges, L. & Davaine, L. 2018. *Fatigue Design of Steel and Composite Structures*. 2. painos. Berliini: ECCS – European Convention for Constructional Steelwork. 297 s.

Nykänen, T., Mettänen, H., Ahola, A., Skriko, T., Hämäläinen, O-P & Björk, T. 2016. 3R-menetelmän käyttö vaihtuva-amplitudisesti kuormitettujen hitsausliitosten väsymisanalysoinnissa. *Rakenteiden Mekaniikka*, 49: 4. S. 176–201.

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

Radaj, D., Sonsino, C. M. & Fricke, W. 2006. *Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches*. 2. painos. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. 639 s.

Richards, K. L. 2018. *Design Engineer's Sourcebook*. Boca Raton: CRC Press. 1182 s.

SFS EN-ISO-1993-1-9. 2005. Eurocode 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-9: Väsyminen. 2008. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto SFS. 41 s. Vahvistettu ja julkaistu englanninkielisenä. Korjattu 2008.

Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R. & Fuchs, H. O. 2000. *Metal Fatigue in Engineering*. 2. painos. Wiley. 455 s.

Liite 1. Mathcad laskenta

Unitless system [N, mm, MPa]

MATERIAL

$$E := 210000 \quad f_y := 700 \quad R_m := 750 \quad \sigma_{res} := -0.255R_m = -191.25$$

FATIGUE CAPACITY

$$C_{char} := 10^{20.83} \quad m := 5.85 \quad R_{ratio} := -1.0$$

STEP 1. Parameters

$$H := 1000$$

$$n := 0.06$$

$$\Delta\sigma_{kmin} := -0.5\sigma_{res} + 1 = 96.625$$

$$\Delta\sigma_k := \Delta\sigma_{kmin}, \Delta\sigma_{kmin} + 1..1600$$

$$f_1(\Delta\sigma_k) := \left\{ \begin{array}{l} R \leftarrow R_{ratio} \\ \sigma_k \leftarrow \frac{\Delta\sigma_k}{1-R} \\ \sigma \leftarrow 500 \\ \varepsilon_{root}(\sigma) \leftarrow \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{n}} - \frac{(\sigma_k + \sigma_{res})^2}{\sigma \cdot E} \\ \sigma_{max} \leftarrow \text{root}(\varepsilon_{root}(\sigma), \sigma) \\ \Delta\varepsilon(\Delta\sigma) \leftarrow \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2H}\right)^{\frac{1}{n}} - \frac{(\Delta\sigma_k)^2}{\Delta\sigma \cdot E} \\ \Delta\sigma \leftarrow 500 \\ \Delta\sigma_{max} \leftarrow \text{root}(\Delta\varepsilon(\Delta\sigma), \Delta\sigma) \\ \sigma_{min} \leftarrow \sigma_{max} - \Delta\sigma_{max} \\ \Delta\varepsilon_{max} \leftarrow \frac{\Delta\sigma_{max}}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma_{max}}{2H}\right)^{\frac{1}{n}} \\ R_{local} \leftarrow \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \end{array} \right.$$

$$f_2(\Delta\sigma_k) := \left\{ \begin{array}{l} R \leftarrow R_{ratio} \\ \sigma_k \leftarrow \frac{\Delta\sigma_k}{1-R} \\ \sigma \leftarrow 100 \\ \varepsilon_{root}(\sigma) \leftarrow \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{H}\right)^{\frac{1}{n}} - \frac{(\sigma_k + \sigma_{res})^2}{\sigma \cdot E} \\ \sigma_{max} \leftarrow \text{root}(\varepsilon_{root}(\sigma), \sigma) \\ \Delta\varepsilon(\Delta\sigma) \leftarrow \frac{\Delta\sigma}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma}{2H}\right)^{\frac{1}{n}} - \frac{(\Delta\sigma_k)^2}{\Delta\sigma \cdot E} \\ \Delta\sigma \leftarrow 500 \\ \Delta\sigma_{max} \leftarrow \text{root}(\Delta\varepsilon(\Delta\sigma), \Delta\sigma) \\ \sigma_{min} \leftarrow \sigma_{max} - \Delta\sigma_{max} \\ \Delta\varepsilon_{max} \leftarrow \frac{\Delta\sigma_{max}}{E} + 2 \left(\frac{\Delta\sigma_{max}}{2H}\right)^{\frac{1}{n}} \\ R_{local} \leftarrow \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \\ N_{4R} \leftarrow \frac{(1 - R_{local})^{\frac{m}{2}} \cdot C_{char}}{\Delta\sigma_k^m} \end{array} \right.$$

Rlocal values:

$f_1(\Delta\sigma_k) =$

0.324
0.315
0.305
0.296
0.286
0.276
0.267
0.257
0.247
0.237
0.227
0.217
0.207
0.197
0.186
...

Fatigue life 4R

$f_2(\Delta\sigma_k) =$

$5.246 \cdot 10^8$
$5.143 \cdot 10^8$
$5.043 \cdot 10^8$
$4.947 \cdot 10^8$
$4.855 \cdot 10^8$
$4.766 \cdot 10^8$
$4.68 \cdot 10^8$
$4.597 \cdot 10^8$
$4.517 \cdot 10^8$
$4.439 \cdot 10^8$
$4.365 \cdot 10^8$
$4.292 \cdot 10^8$
$4.223 \cdot 10^8$
$4.155 \cdot 10^8$
$4.09 \cdot 10^8$
...