



RAKENNEPUTKEN NURKKAPYÖRISTYKSEN VAIKUTUS X-LIITOKSEN JÄNNITYSKONSENTRAATIOIHIN

EFFECT OF THE CORNER RADIUS OF SQUARE HOLLOW SECTION ON THE STRESS CONCENTRATIONS OF X-JOINT

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

Oskari Oittinen

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Oskari Oittinen

Rakenneputken nurkkapyöristyksen vaikutus X-liitoksen jännityskonsentraatioihin

Konetekniikan kandidaatintyö

2023

30 sivua, 19 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: Nurkkapyöristys, FE-menetelmä, X-liitos, kalvojännitys, taivutusjännitys, rakenteellinen jännitys, konsentraatiokerroin

Tässä työssä tarkastellaan rakenneputkista hitsattua X-liitosta, joka on eri kuormitustilanteissa ja eri nurkkapyöristyksillä. Työssä ollaan kiinnostuneita uumapalkin nurkkiin syntyvien jännityskonsentraatioiden määrittämisestä.

Työ toteutetaan luomalla yhdeksän eri mallia ja niistä määritetään hot spot-jännitykset FE-analyysin avulla. Mallinnus toteutetaan Simcenter Femap/NX-Nastran ohjelmistolla, jossa luodaan $\frac{1}{4}$ -geometriat keskipintamalleilla. Kuormitustapauksia on kolmenlaisia: Uumaputken vetokuorma, uumaputken taivutusmomentti, sekä paarreputken vetokuorma. Voimien suuruudet on laskettu niin, että ne vastaavat 1 MPa:n jännitystä.

Saadut jännitykset kootaan taulukkolaskentaohjelmaan, jossa lasketaan hot spot -jännitykset ja luodaan kuvaajat, joista nähdään rakenteelliset jännitykset uumaputken kehämittaa pitkin.

Jännitykset saatiin luettua ja eri mallien jännitysarvoista tehtyä vertailukelpoisia kuvaajia. Tuloksista nähtiin, että jännityskonsentraatiot olivat sitä suurempia, mitä pienempi nurkkapyöritys oli. Lisäksi huomattiin jännityskonsentraation paikan muutosta eri geometrioilla ja geometrioiden vaikutus taivutus- ja kalvojännitysten osuuksiin rakenteellisesta jännityksestä. Saatiin hyvä ymmärrys nurkkapyörityksen vaikutuksesta liitoksessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Oskari Oittinen

The effect of the corner rounding of square hollow section on the stress concentrations of the X-joint

Bachelor's thesis

2023

30 pages, 19 figures and 1 table.

Examiner: D.Sc. Antti Ahola

Keywords: Corner radius, FE-method, X-joint, membrane stress, bending stress, structural stress, stress concentration factor

In this thesis X-joint welded from structural hollow section tubes, which is under different load conditions and different corner radii is studied. The interest is in determining the stress concentration that occur in the corners of the web bar.

The study is carried out by creating nine different models and determining the hot spot stresses using FE-analysis. Modeling is done using Simcenter Femap/NX-Nastran software, in which $\frac{1}{4}$ geometries are created on midsurface meshes. There are three types of loading cases: tensile load on the web beam, in plane -moment on the web beam, and tensile load on the flange beam. The magnitudes of the forces are calculated to correspond to a stress of 1 MPa.

The obtained stresses are collected in a spreadsheet program, where the hot spot stresses are calculated, and graphs are created to show the structural stresses along the circumference of the web beam.

The stresses were read, and comparable graphs were created from the stress values of the different models. The results showed that the stress concentrations were greater the smaller the corner radius was. In addition, the change in stress concentration location with different geometries and the effect of geometries on the bending and membrane stress components of the structural stress were observed. A good understanding of the effect of corner radius on the joint was obtained.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

r_i	Rakenneputken sisäsäde	[mm]
t	Seinämän paksuus	[mm]
σ_{hs}	Hot spot-jännitys	[MPa]
σ	Jännitys	[MPa]
σ_x	Jännitys pinnan pisteessä x	[MPa]
σ_m	Kalvojännitys	[MPa]
K_t	Konsentraatiokerroin	[-]
β	Paarre- ja uunaputken ulkomittojen suhde	[-]
ν	Poissonin vakio	[-]
σ_s	Rakenteellinen jännitys	[MPa]
σ_b	Taivutusjännitys	[MPa]

Lyhenteet

FEM	finite element method, elementtimenetelmä
RHS	Rectangular hollow section, suorakulmiorakenneputki
SHS	Square hollow section, neliörakenneputki
TTWT	through thickness at weld toe, paksuuden yli linearisointi

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

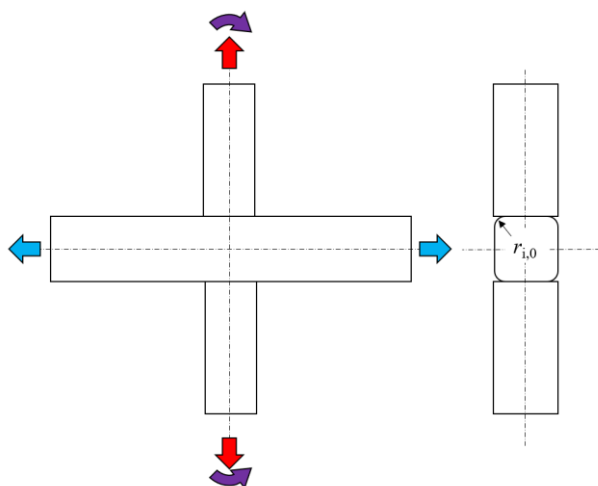
Abstract

(Symboli- ja lyhenneluettelo)

1	Johdanto.....	8
1.1	Tehdyt aiemmat tutkimukset.....	8
1.2	Tutkimustavoitteet, -ongelmat ja -kysymykset	11
1.3	Rajaukset ja työn rakenne	11
2	Teoria.....	13
2.1	FE-menetelmä ja FE-analyysi.....	13
2.2	Jännityskonsentraatiot	13
3	Tutkimusmenetelmät	16
3.1	Tutkittavat rakenneputket.....	16
3.2	Materiaalimalli ja geometrian mallinnus	17
3.3	Verkotus	18
3.4	Kuormitustilanteet ja reunaehdot	20
3.5	Määritettävät tulokset.....	21
4	Tulokset	23
4.1	Jännitykset.....	23
4.2	Jännitys jakaumat	24
5	Tulosten analysointi.....	27
5.1	Analysointi	27
5.2	Jatkotutkimus ja yhteenveto.....	28
	Lähteet	29

1 Johdanto

Tässä työssä tarkastellaan rakenneputkista hitsattua X-liitosta, eli paarreputken molemmille puolille on hitsattu uumaputket. Liitoksesta tarkastellaan liitoskohdan nurkkapyöristyksiin syntyviä jännityskonsentraatioita eri kuormitustilanteissa FE-menetelmällä (eng. finite element), eli elementtimenetelmällä. Tarkasteltava rakenne ja eri kuormitustapaukset on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. X-liitoksen geometria ja eri kuormitustapaukset.

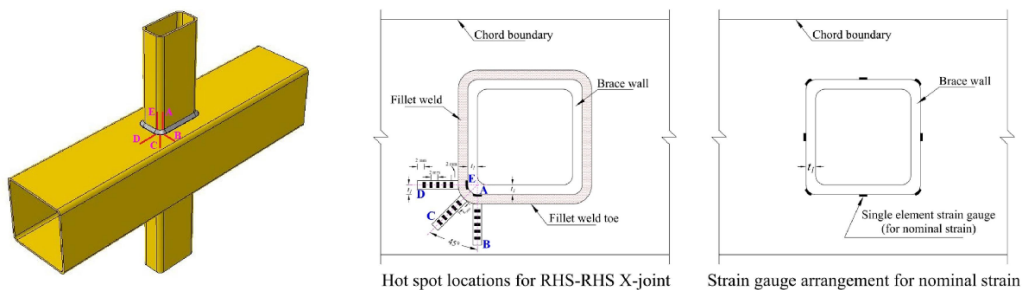
1.1 Tehdyt aiemmat tutkimukset

Tiedonhakuna työssä toimii FE-menetelmä ja kirjallisuus. Kirjallisuustutkimuksessa käytetään LUT Primo tietokantaa. Luotettavuustarkasteluna toimii vertaisarviointi ja pyrkimyksenä käyttää viimeisen kymmenen vuoden aikana julkaistuja teoksia.

Rakenneputkiliitoksista ja niiden jännityskonsentraatioista löytyy paljon tietoa ja niiden tarkastelua kyetään tekemään niin analyttisesti käsin, kuin myös FE-laskennalla. Kyseinen

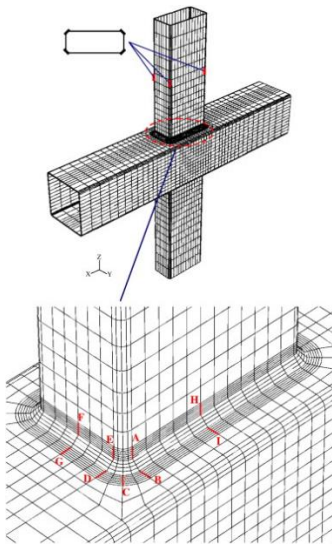
geometria sisältää kolmiulotteisia epäjatkuvuuskohtia, jotka tekevät laskennasta huomattavasti vaikeampaa, jolloin FE-laskenta on hyvä vaihtoehto.

Tutkimuksia samantapaisista X-liitoksista ja niihin muodostuvista jännityksistä on tehty ennenkin, kuten Pandey ja Young (2021 1–31), jossa mitattiin putkien venymää erilaisilla putkien X-liitoksilla. Tuloksissa vertailtiin putkien valmistaja CIDECT:in suosituksiin ja huomattiin niiden eroavan toisistaan. Tutkimustuloksista nähdään kuitenkin venymän olevan suurimmillaan nurkkapyörityksissä. Hooken lain mukaan täten myös jännitys on suurimmillaan nurkassa. Kuvassa 2 on esitetty heidän tutkimuksessansa mitatut kohdat



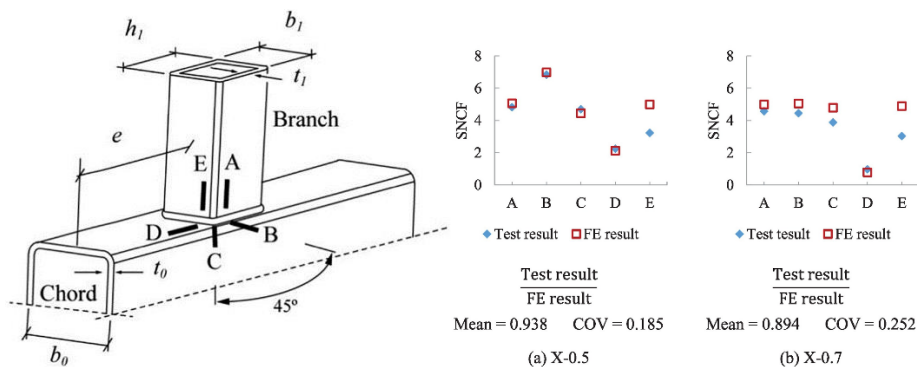
Kuva 2. Samantapainen rakenne tutkimuksessa, rasittuneimmat kohdat olivat B ja C. (Pandey & Young 2021, 3.)

Feng ja Young (2013, 26–41) tutkivat kylmämuovattujen ruostumattomasta teräksestä tehtyjen rakenneputkien jännityskonsentraatioita numeerisesti ja kokeellisesti. Tuloksia mitattiin venymäliuskojen avulla ja niitä vertailtiin CIDECT:in suosituksiin ja suunniteluehdoiksiin ja huomattiin niiden olevan varovaisia mitoittamisen suhteen. Geometria on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. FE-malli tutkimuksessa käytetystä geometriasta. Suurimmat jännitykset pisteissä B ja C. Feng ja Young (2013,34)

Kolmannessa tutkimuksessa (Daneshvar et al., 2020) tutkittiin rakenteellista jännitystä myös venymäliuskojen avulla useilla eri geometrioilla. Yksi tarkastelluista geometrioista on melko samanlainen kuin tässä tutkimuksessa käytettävät geometriat. Eroina puristava voima ja putkien eri seinämäpaksuudet. Tulokset kuitenkin osoittavat saman, eli suurin jännitys kohdistuu nurkkapyöritykseen. Samanlainen geometria on esitetty kuvassa 4.



Kuva 4. Samanlainen geometria, tuloksissa huomattiin isoin jännityskonsentraatio nurkan kohdalla. (Daneshvar et al. 2020, 4–6.)

Aiemmissä tutkimuksissa ei ole huomioitu nurkkapyörityksen vaikutusta, vaikka tuloksista voidaan nähdä, että jokaisessa tutkimuksessa suurin jännitys oli siinä kohdassa. Tutkimuksissa on kiinnitetty huomiota enemmän erilaisten geometrioiden eroihin, eikä niinkään eri nurkkapyörityksiin. Sen takia tässä työssä pyritään avaamaan käsitystä nurkkapyörityksen kriittisyydestä.

1.2 Tutkimustavoitteet, -ongelmat ja -kysymykset

Tutkimuksen tavoitteena on FE-laskentaa käyttäen määrittää jännityskomponentit liitoksessa ja jännitys jakauman perusteella määrittää nurkkapyörityksen vaikutus muodostuviin jännityskonsentraatioihin. Ongelmana on tietämyksen puute nurkkapyörityksen vaikutuksen merkityksestä putkiliitoksen äärikestävyyteen.

Tässä työssä pyritään vastaamaan seuraaviin tutkimuskysymyksiin:

- Miten ja miksi nurkkapyöritys vaikuttaa jännityskeskittymien suuruuksiin?
- Miten liitoksen geometria vaikuttaa jännityksiin?
- Kuinka suuret jännityskonsentraatiot liitokseen syntyy?

1.3 Rajaukset ja työn rakenne

Tutkimuksen yksinkertaistamiseksi työhön on tehty rajoituksia. Paarreputken mitat ovat jokaisessa tilanteessa 150 mm x 150 mm x 6 mm ja uumaputken mitat mallinnetaan β -suhteilla eli ulkomittojen suhteilla 1, 0.8 ja 0.6. Nurkkapyörityksiin käytetään kolmea eri r_1/t -suhdetta, eli sisäsäteiden suhdetta putken paksuuteen. Nämä suhteet ovat 0, 1.0 ja 3.0. Mallintamisessa ei oteta huomioon valmistuksessa mahdollisesti syntyviä muotovirheitä tai epäjätkävyyksiä. Työssä mallinnetaan ¼-osa malli hyödyntäen symmetriaa. Rakenteelliset jännitykset lasketaan jännityksistä referenssipisteissä. Hitsinä toimii V-hitsi, jota ei kuitenkaan mallinneta tutkimuksiin.

Tutkimuksen rakenne on seuraava: Toisessa luvussa käydään läpi tutkimuksessa käytettävien metodien teoriaa. Kolmannessa luvussa käydään läpi tutkimusmenetelmät, mallintaminen ja analyysien toteutus. Neljännessä ja viidennessä luvussa esitetään tulokset ja analysoidaan niitä.

2 Teoria

Työssä käytetään FE-menetelmää vaikuttavien jännityskonsentraatioiden laskemiseen ja tutkimiseen. Seuraavissa luvuissa käydään läpi, mikä on FE-menetelmä, millaisia jännityskonsentraatioita tutkitaan ja miten ne määritetään.

2.1 FE-menetelmä ja FE-analyysi

FE-menetelmä on nykyaikana laajasti käytetty numeerinen laskentatapa mallinnuksessa ja simuloinnissa. Sen avulla voidaan laskea jännityskonsentraatioita monimutkaisilla kappaleilla jakamalla tutkittava kappale useisiin pienempiin elementteihin, jotka liittyvät toisiinsa solmuilla. Elementit ovat pienen kokonsa takia yksinkertaisen muotoisia ja näin helppo laskea. Yksittäisten elementtien laskennan jälkeen menetelmä laskee solmujen avulla elementtien suhteet toisiinsa. Kokonaisuudessaan elementit muodostavat havainnollistavan analyysin vallitsevista jännityksistä koko kappaleessa.

Toisaalta yksinkertaistaminen tarkoittaa sitä, että menetelmä on ainoastaan numeerisesti approksimoiva. Tarkkuutta voidaan kuitenkin parantaa tekemällä elementtiverkosta tiheämpi, jolloin elementtejä on enemmän. Tämä taas tekee malleista raskaampia laskea ja isompi kokoisia. Suuri määrä elementtejä vaatii myös suuren määrän matriisilaskuja, jotka eivät kuitenkaan ole ongelma nykyajan tietokoneilla. (Lyu, 2022)

2.2 Jännityskonsentraatiot

Jännityskonsentraatio on paikka liitoksessa, jossa jännitykset ovat suurempia kuin ympäröivillä alueilla. Liitoksesta tutkitaan rakenteellisia jännityskonsentraatioita, joita esiintyy kahdenlaisina; Joko kalvojännityskeskittyminä tai paksuuden yli lineaarisesti jakaantuneena

taivutusjännityksenä. Rakenteelliset jännitykset muodostuvat rakenteellisten epäjatkuvuuk-
sien lisäksi muotovirheistä. Rakenteellinen jännitys ja sen komponentit esitetty kuvassa 5.

Kalvojännityksen määrittämisessä käytetään kaavaa, joka integroi jännitykset levynpaksuu-
den yli. Tätä metodia kutsutaan myös 'through thickness at weld toe', lyhenne TTWT. Las-
keminen tehdään alla esitetyllä yhtälöllä 1.

$$\sigma_m = \frac{1}{t} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \cdot dx, \quad (1)$$

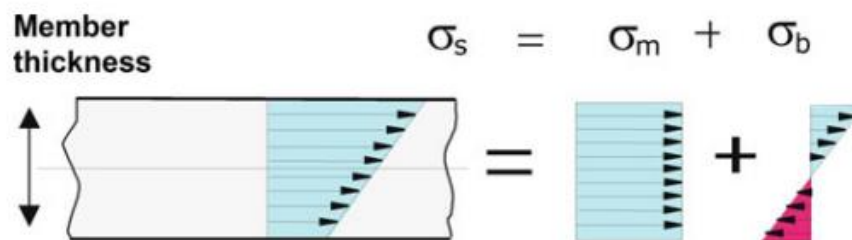
yhtälössä 1 σ_m on kalvojännitys ja $\sigma(x)$ on jännitys paksuuden yli eri pisteissä x. (Hob-
bacher, 2013, 14)

Taivutusjännityksen jännitys lasketaan alla olevalla yhtälöllä 2

$$\sigma_b = \frac{6}{t^2} \int_{x=0}^{x=t} \sigma(x) \left(\frac{t}{2} - x\right) \cdot dx, \quad (2)$$

Yhtälössä 2 σ_b on taivutusjännitys. (Hobbacher, 2013, 14)

Monimutkaisten rakenteiden laskennassa jännitykset määritetään FE-analyysillä. On kuiten-
kin olemassa ohjeistuksia, joissa yksinkertaisiin liitoksiin on annettu jännityskertoimet val-
miiksi, joiden avulla kyetään laskemaan jännitykset. (Hobbacher, 2013)



Kuva 5. Rakenteellisen jännitys muodostuu kalvojännityksestä, sekä sekundäärisestä taivutusjännityksestä. Kyseistä jännitystä kutsutaan myös ”hot spot” -jännitykseksi (σ_{hs}). (Niemi, 2018)

3 Tutkimusmenetelmät

Tässä työssä käytettävät rakenneputkiliitokset mallinnetaan ja analysoidaan numeerisesti FE-analyysillä. Ensin luodaan tutkittavasta rakenteesta 3D-malli, jolle luodaan elementti-verkko. Tämän jälkeen määritetään kappaleen materiaalit, reunaehdot ja vaikuttavat kuormat. Lopuksi suoritetaan analyysi halutuista kuormitustapauksista ja tutkitaan niitä. Tässä työssä luodaan yhdeksän mallia, joista luetaan rakenteelliset jännitykset pintaa pitkin ekstrapoloimalla

3.1 Tutkittavat rakenneputket

Tutkimuksessa tarkastellaan SHS-palkkeja, eli neliöpoikkileikkauksellisia onttoja rakenneputkia (eng. Square Hollow Section). Rakenneputket voidaan jakaa kahteen eri ryhmään niiden valmistustavan mukaan. Valmistustavat ovat joko kylmä- tai kuumamuovaus, joko levytuotetta muovaamalla ja hitsaamalla tai saumattomasti lävistämällä kiinteä aihio. Rakenneputkien materiaalina käytetään usein rakenneterästä, joka takaa hyvät lujuusominaisuudet suhteessa painoon, edullisen hinnan, sekä hyvän työstettävyyden.

Kuumamuovatuille rakenneputkille ominaista ovat pienemmät nurkkapyöristykset, joita tutkimuksessa kuvataan r_1/t suhteella 0. Kylmämuovattujen rakenneputkien nurkkapyöristykset ovat taas isompia, jotta plastista muodonmuutosta ei synny liikaa. Kylmämuovattuja rakenneputkia kuvataan β -suhteella 3. Molemmille rakenneputkityypeille on standardeja, joissa on valmiiksi laskettuja arvoja mittasuhteista. (SFS-EN 10219-2:2019, 1–10) ja (SFS-EN 10210-2:2019, 1–10)

Tutkimuksessa tehdään yhdeksän mallia, joista jokaisessa on kolme eri kuormitustapausta. Käytetyn teräksen kimmokerroin on 210 000 MPa ja Poissonin vakiona käytetään lukua 0,3. Paarreputken mitat ovat jokaisessa tapauksessa 150 mm x 150 mm. Uuman leveydet vaihtuvat suhteilla 0,6, 0,8 ja 1,0. Nurkkapyöristyksen suhteet vaihtuvat sisäsäteen r_s suhtein 0, 1,0

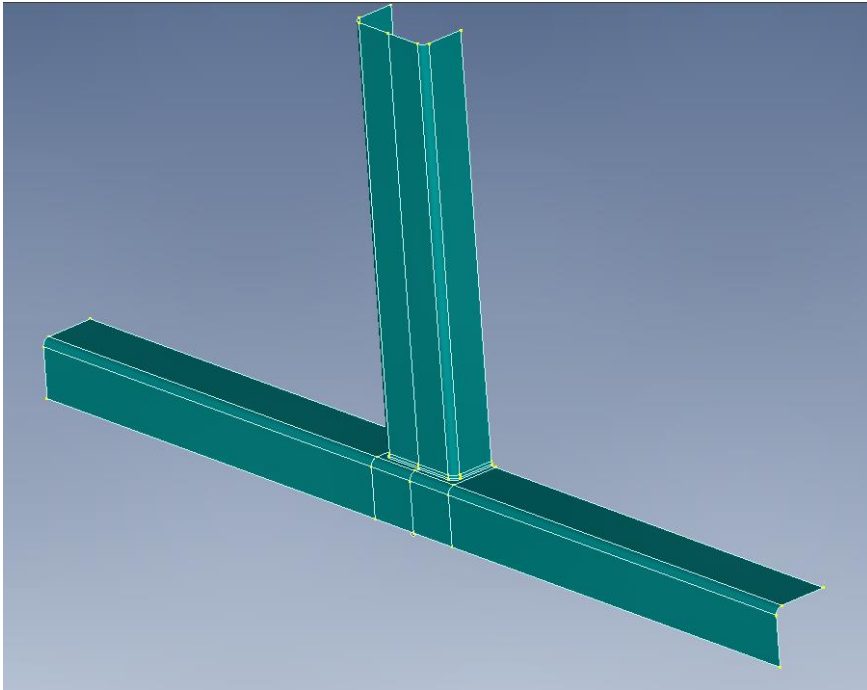
ja 3.0. Malleissa pyöristykset määritetään keskilinja-mitoilla, jolloin pyöristykset ovat sisäsäteen ja puolikkaan levynpaksuuden summa. Eri geometriatapaukset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Tutkimusmatriisi eri geometriatapauksista, jossa E on kimmokerroin ja ν on Poissonin vakio.

	β	r_i/t	E	ν	r	t	parreputken mitat	uomaputken mitat
geometria 1	0,6	0	210 000	0,3	3 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	90 mm * 90 mm * 6 mm
geometria 2	0,6	1	210 000	0,3	9 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	90 mm * 90 mm * 6 mm
geometria 3	0,6	3	210 000	0,3	21 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	90 mm * 90 mm * 6 mm
geometria 4	0,8	0	210 000	0,3	3 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	120 mm * 120 mm * 6 mm
geometria 5	0,8	1	210 000	0,3	9 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	120 mm * 120 mm * 6 mm
geometria 6	0,8	3	210 000	0,3	21 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	120 mm * 120 mm * 6 mm
geometria 7	1	0	210 000	0,3	3 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	150 mm * 150 mm * 6 mm
geometria 8	1	1	210 000	0,3	9 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	150 mm * 150 mm * 6 mm
geometria 9	1	3	210 000	0,3	21 mm	6mm	150 mm * 150 mm * 6 mm	150 mm * 150 mm * 6 mm

3.2 Materiaalimalli ja geometrian mallinnus

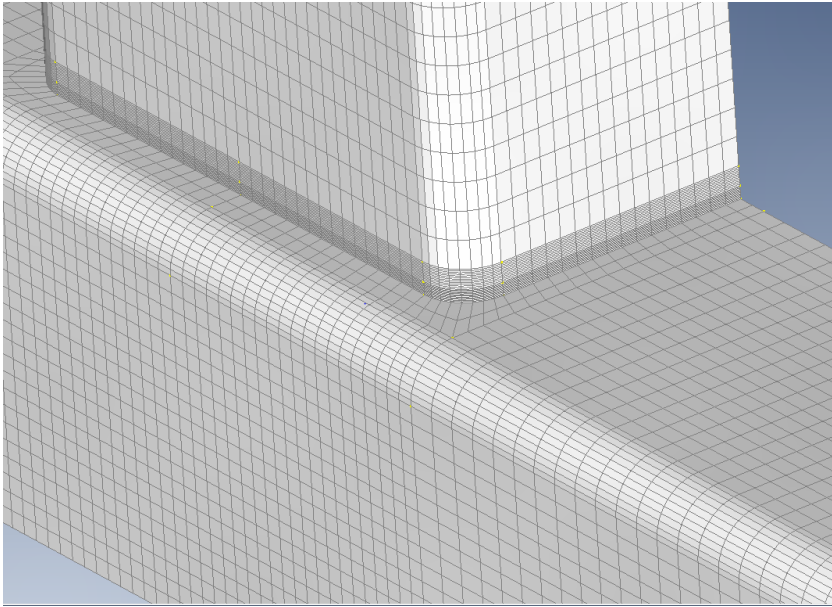
Mallinnus tehdään Simcenter Femap/NX-Nastran ohjelmistolla. Mallinnus aloitetaan luomalla parreputken sivut ja luomalla haluttu nurkkapyöristys geometriaan. Tämän jälkeen pursottamalla saadaan luotua parreputken tasoelementti (eng. solid). Tämän jälkeen pursottamalla uomaputki haluttuun kohtaan saadaan luotua 1/8- malli. Tämä kyetään muuttamaan halutuksi 1/4-malliksi hyödyntämällä ohjelmistosta löytyvää peilauskomentoa. Mallien geometria on havainnollistettu kuvassa 6.



Kuva 6. Kuva 3D-keskipintamallista, jossa β -suhde 0,8 ja $r_i/t=0$

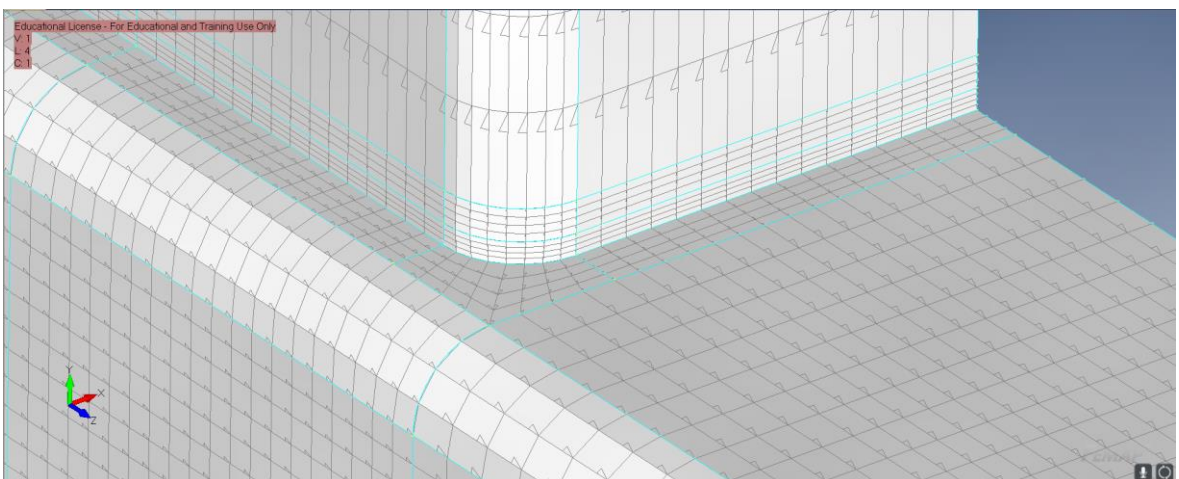
3.3 Verkotus

Geometria-mallinnuksen jälkeen malli verkotetaan tasoelementeillä. Kaikissa malleissa käytetään elementtityyppinä laattoja (eng. plate). Jotta tulokset olisivat mahdollisimman tarkkoja, pyritään verkoista tekemään mahdollisimman säännönmukaisia ja elementeistä suorakulmaisia. Koska työssä tutkitaan nurkkapyöristystä ja erityisesti liitoskohdan kohdalla, niin tälle alueella tehdään tiheämpi verkko. Verkon tiheys määritellään leikkaamalla luotuja tasogeometrioita pienempiin osiin ja asettamalla näiden alueiden reunaviivoille solmumäärät. Ohjelma luo verkot automaattisesti säännöllisiksi neliömäisillä alueilla, mutta esimerkiksi uumaputken ympärille täytyy kartoittaa (eng. 'mapped') verkko mukailemaan nurkan muotoja kuten kuvassa 7 on esitetty.



Kuva 7. Verkotuksessa tihein verkko nurkkapyörityksen ympärille.

Jotta tulosten lukeminen on helppoa, järjestettiin elementtien X-suunnat uumaputkessa Y-akselin suuntaiseksi ja parreputkessa Z-akselin suuntaiseksi ja elementtien ulkopinnat samoilte puolille. Näin tuloksia lukiessa saadaan suoraan oikeat jännitykset. X-suunnat on esitetty nuolilla kuvassa 8.

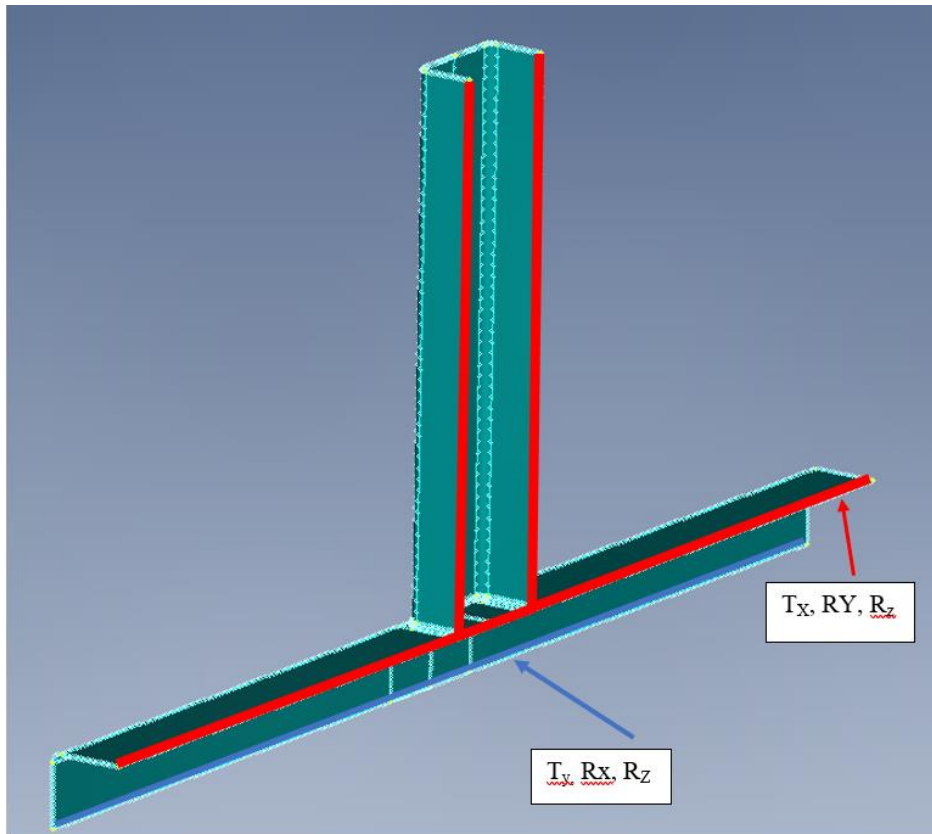


Kuva 8. Elementtien X-suunnat uuma ja parreputkissa.

3.4 Kuormitustilanteet ja reunaehdot

Analyysit suoritetaan $\frac{1}{4}$ -mallille, jolloin symmetriareunaehdoja asetetaan kahteen eri tasoon. Reunaehdot esitetty kuvassa 9. Jotta tulosten saaminen onnistuisi täytyy XY-tasosta yhteen solmuun asettaa rajoitus, joka estää kappaleen Z-akselin suuntaisen jäykän kappaleen liikkeen.

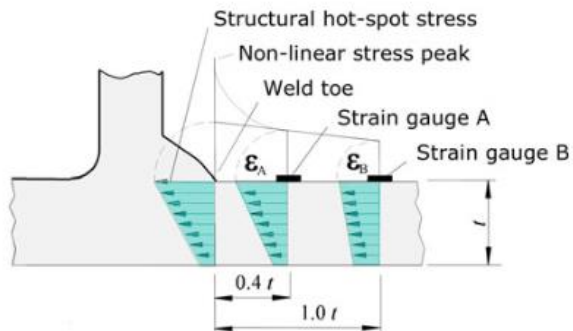
Kuormitustilanteissa voimat on laskettu niin, että jännitys on nimellisesti 1 MPa:n suuruisen. Kuormana se ei ole suuri, mutta sen avulla tulokset saadaan suoraan jännityskonsentraatiokertoimina yksikkövoimalla. Koska käytetään 1 MPa:ta vastaavaa yksikkökuormaa, edustavat FE-laskennassa saadut tulokset konsentraatiokertoimien arvoja. Konsentraatiokerroin yksikkö Kt , kuvastaa jännityskonsentraatioita tietyssä pisteessä kappaleessa. Konsentraatiokerroin lasketaan jakamalla pisteessä oleva maksimijännitys nimellisellä jännityksellä. (Niemi 2018, 9.)



Kuva 9. Parreputken alareunassa (sininen viiva) symmetria Y-tason kanssa. Uumaputken sivut ja parreputken keskiosassa (punainen viiva) reunaehto X-tasossa.

3.5 Määritettävät tulokset

Uumaputken kehämittaa pitkin määritetään hot spot -jännitykset, joka toteutetaan IIW:n (International Institute of Welding) ohjeistuksen mukaan tekemällä malleilla lineaaristaattinen analyysi ja sen jälkeen lukemalla jännitykset kahdelta etäisyydeltä pintaa pitkin ekstrapoloidulla. Uumaputkeen leikataan viivat 0,4 ja 1,0 kertaa levynpaksuuden etäisyydelle liitoksesta. Hotspot-jännityksen määrittäminen on esitetty kuvassa 10. Analyysi laskee normaalisti elementtien välisien arvojen keskiarvot ja asettaa ne solmujen arvoiksi, tämä voidaan kuitenkin ohjelmalla muuttaa, että solmujen arvoiksi saadaan elementtien maksimiarvot. (Niemi 2018, 7.)



Kuva 10. Hotspot-jännityksen määrittäminen kappaleelle. (Niemi 2018, 7.)

Tulokset kootaan taulukkolaskentaohjelma Exceliin, jossa pisteet järjestetään niin, että ne ovat uumaputken kehämittaa pitkin järjestyksessä, jonka jälkeen lasketaan hotspot – jännitys alla esitetyllä kaavalla.

$$\sigma_{hs} = 1,67 * \sigma_{0,4t} - 0,67 * \sigma_{1,0t}, \quad (3)$$

Yhtälössä 3 σ_{hs} on hot spot-jännitys, $\sigma_{0,4t}$ on jännitys 0,4 levynpaksuuden päässä ja $\sigma_{1,0t}$ jännitys 1,0 levynpaksuuden päässä

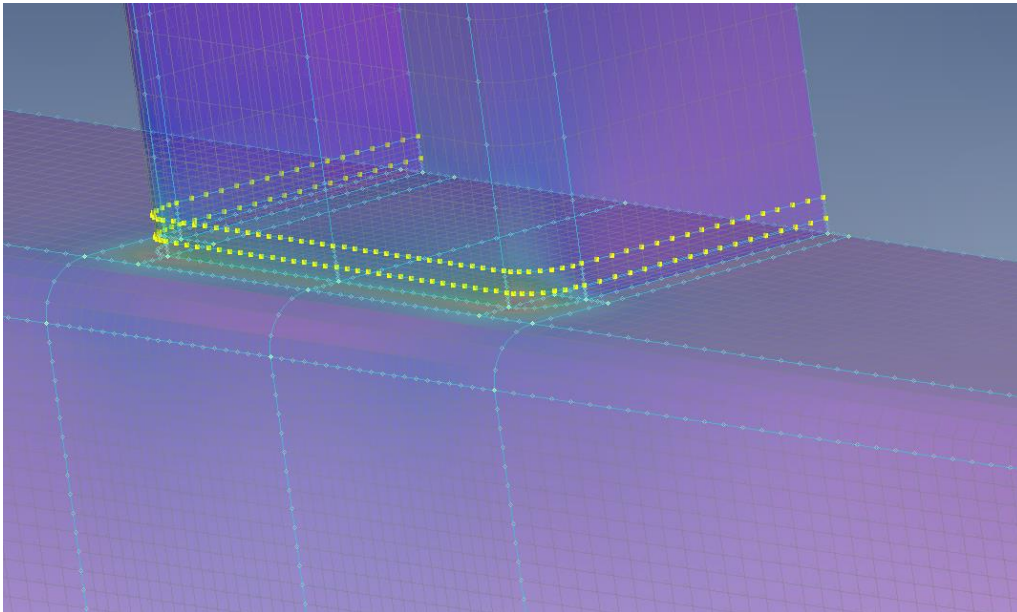
Kun jännitykset on saatu laskettua, voidaan eri mallien kuvaajat yhdistää, jolloin saadaan hyvä näkemys nurkkapyörityksen vaikutuksesta jännityksiin eri kuormitustilanteissa. Nurkan kohdat näkyvät kuvaajissa piikkeinä. Seuraavassa luvussa esitellään saadut tulokset. (Niemi, 2018)

4 Tulokset

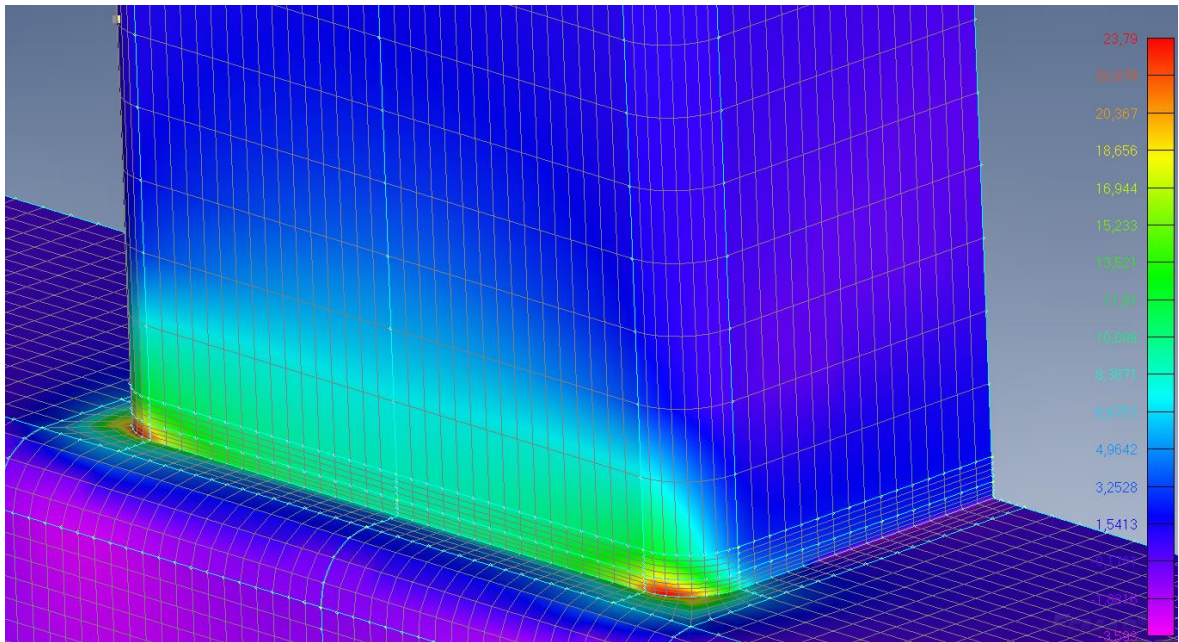
Seuraavissa alaluvuissa on käyty läpi mistä tulokset on kerätty, niiden esitystapa ja esitetään jännitysten avulla tehdyt kuvaajat.

4.1 Jännitykset

Exceliin koottiin 81 datapisteestä koostuvat taulukot normaalijännityksistä uumaputken ympäriltä, jotka esitetään kuvassa 11. Suurimmat jännitykset kohdistuvat nurkkapyöristyksiin ja suurin jännitys mallissa, jonka b_1 , b_2 -suhde on 0.6 ja säteen suhde levyn paksuuteen 0. Jännitysten jakautumista uumaputken ympärillä on esitetty kuvassa 11



Kuva 11. Solmupisteet, joista normaalijännityksiä kerättiin.



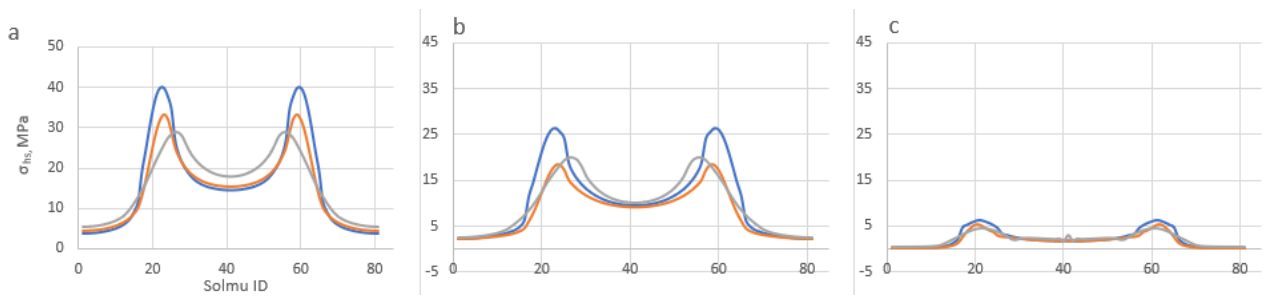
Kuva 12. Normaalijännitysten jakautuminen uumaputken vetokuormasta.

4.2 Jännitys jakaumat

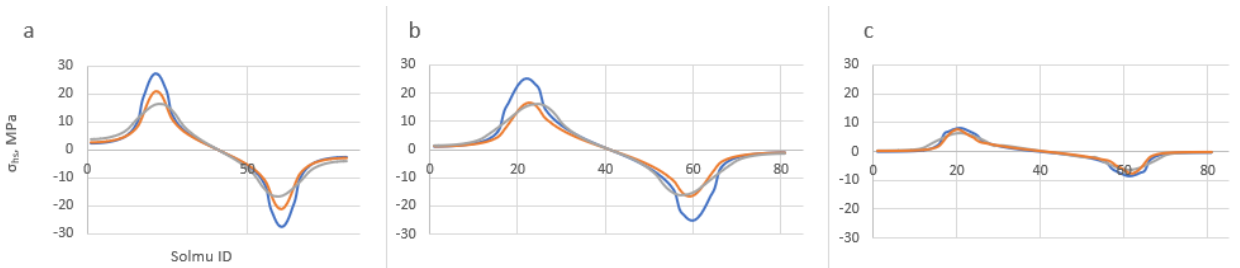
Seuraavissa kuvissa on esitetty jännitys jakaumat, jotka tutkimuksessa kerättiin. Kuvaajassa X-akseli on datapisteet ja Y-akselilla kussakin datapisteessä vaikuttava jännitys (MPa). Kuvaajat ovat järjestyksessä a, b ja c, joissa käytetään eri β -suhteita. r_i/t - suhteet ovat värikoodatut niin, että sinisellä on suhde 0, oranssilla 1,0 ja harmaalla 3,0. β -suhteet ja r_i/t -värikoodit on esitetty kuvassa 13.

— $r/t=0$ — $r/t=1$ — $r/t=3$

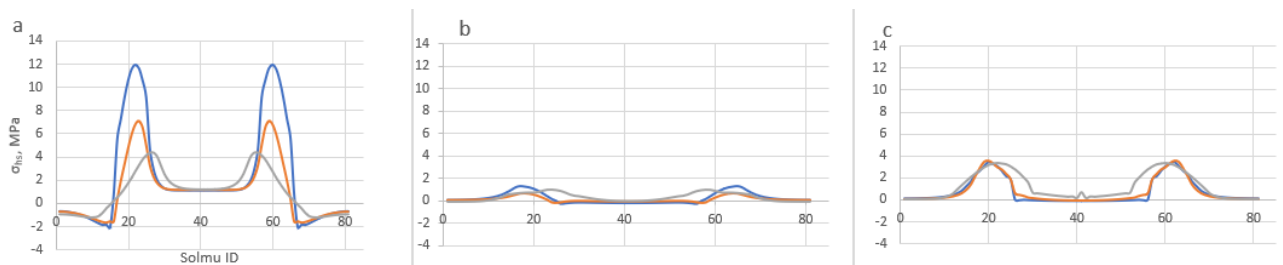
Kuva 13. Kuvaajien nimeäminen värikoodit



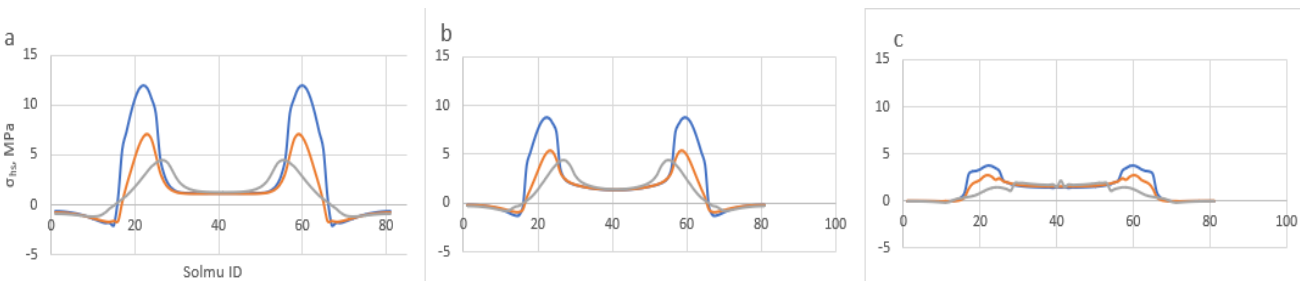
Kuva 14. Jännitysjaakaumat uumaputken vetokuormituksessa. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$



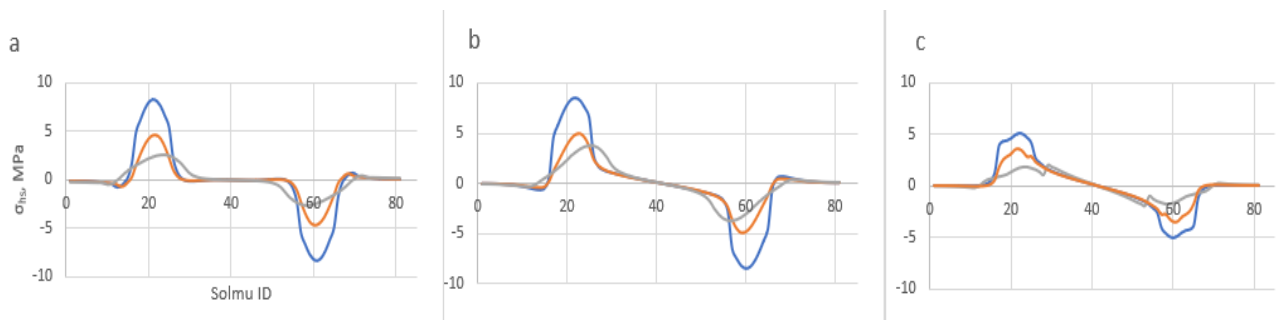
Kuva 15. Jännitysjaakaumat uumaputken taivutusmomentin alaisena. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$



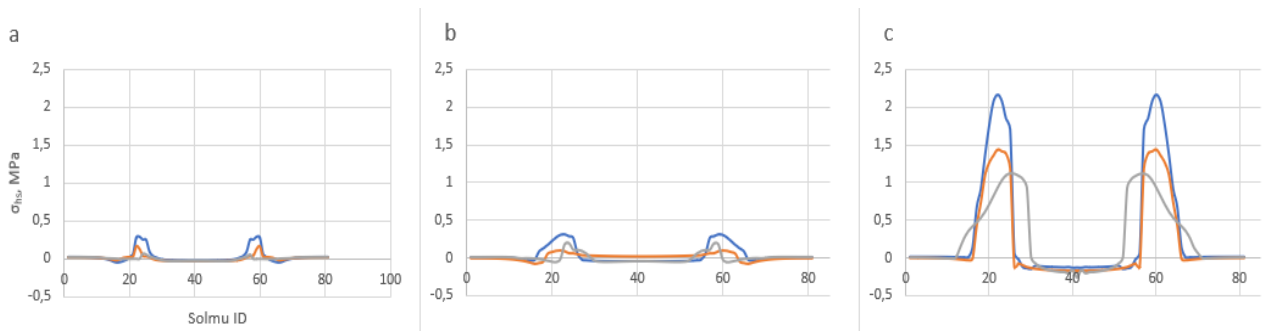
Kuva 16. Jännitysjaakaumat paarreputken vetokuormituksessa. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$



Kuva 17. Kalvojännitys uumaputken vetokuormituksessa. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$



Kuva 18. Kalvojännitys uumaputken taivutusmomentin alaisena. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$



Kuva 19. Kalvojännitys paarreputken vetokuormituksessa. a: $\beta=0,6$; b: $\beta=0,8$ ja c: $\beta=1,0$

5 Tulosten analysointi

Tässä luvussa analysoidaan saatuja tuloksia ja käytettyjä tutkimusmetodeja. Tuloksista on kerrottu tärkeimpiä havaintoja, sekä niiden mahdollisia aiheuttajia. Tutkimusmetodeista käydään läpi mahdolliset muutokset jatkotutkimuksiin.

5.1 Analysointi

Nurkkapyörityksen vaikutus jännityksiin ja täten myös konsentraatiokertoimiin on todella suuri, jopa 8-kertainen uuman vähiten rasittuneeseen kohtaan verrattuna. Lisäksi nurkkapyörityksen terävyydet vaikuttivat jännitysten suuruuksiin yllättävän paljon. Pienisäteisimmän putken jännitys on jopa 6,67 kertainen isosäteisimpään. Tämä perustuu pinta-alaan, sillä nurkan pinta-ala pienentyy pienillä nurkkapyörityksillä. Eli mitä pienempi r_i/t – suhde, sitä isommat jännityskonsentraatiot liitokseen syntyy.

Lisäksi nurkkapyörityksen muutoksella nähdään, että suurimman jännityksen paikka vaihtuu. Havainto on mielenkiintoinen esimerkiksi suunnitellessa hitsauksessa hitsin aloitus- ja lopetuskohtia. Nurkkapyörityksellä voi siis olla vaikutusta hitsausohjeisiin.

Tuloksista nähdään myös, että suurin osa jännityksestä syntyy lineaarisesti jakautuneesta taivutusjännityksestä. Tässä geometrialla oli suuri asema. Mitä isompi uumaputki, sitä isompi osa jännityksestä oli kalvojännitystä. Mikä johtuu pääasiassa uumaputken jäykkyydestä. Pienellä uumaputkella parteen pinnan jäykkyys on pienempi, jolloin syntyy enemmän taivutusjännitystä.

Geometrioita vaihtamalla tulokset voisivat olla myös hyvin erilaiset. Kalvojännityksen ollessa lineaarisesti verrannollinen levynpaksuuteen ja taivutus toiseen potenssiin, olisivat jännitykset näin pienempiä. Levynpaksuuden muuttaminen vaikuttaisi kuitenkin geometriaan

ja täten myös 1 MPa:n jännityksen saamiseksi voimaan, jolloin kuvaajat olisivat luultavasti erinäköisiä, joten johtopäätöstä ei voida tästä vaikutuksesta suoraan tehdä.

5.2 Jatkotutkimus ja yhteenveto

Työn uusimisessa huomioon voisi ottaa hitsin mallintamisen, jolloin nähtäisiin sen vaikutukset jännityksiin. Lisäksi verkotuksesta voisi tehdä vielä paremman, sillä uumaputken sisälle jäi kolmiosivuisia elementtejä. Tämä on kuitenkin ulkonäöllinen asia, joka ei vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Lisäksi tuloksissa olisi voitu vertailla myös eri levynpaksuuksilla olevia uumaputkia, joissa olisi nähty levynpaksuuksien vaikutus kalvo- ja taivutusjännityksiin. Yleinen käsitys on, että levynpaksuuden nostaminen vähentää taivutusjännitystä ja lisää kalvojännitystä.

Seuraavana tutkimusaiheena voisi olla vertailu kokeellisiin tuloksiin, jolloin saataisiin käsitystä, kuinka tulokset eroaisivat FE-analyysistä. Toinen mielenkiintoinen tutkinnan aihe voisi olla nurkkapyörityksen vaikutus äärikestävyydessä. Vaikuttaako siis nurkkapyörityksen suuruus lopulta siihen, miten paljon kuormaa rakenneputki kestää.

Tutkimuksessa luotiin neliöputkien X-liitoksesta 3D-mallit eri nurkkapyörityksillä ja geometrioiden suhteilla. Malleja oli yhdeksän, kolme eri geometria suhdetta kolmella eri säteen ja levynpaksuuden suhteella. FE-analyysillä saatiin normaalijännitykset määriteltäviä ¼-osa malleista käyttämällä symmetriaehtoja kahdelta eri korkeudelta uumaputken pintaa pitkin. Tuloksista saatiin määriteltäviä hotspot -jännitykset Excelissä. Analyysistä saatiin hyvät tulokset, sekä kuvaajat, joista tehtiin johtopäätöksiä nurkkapyörityksen vaikutuksesta jännityskonsentraatioihin.

Lähteet

Pandey M, Young B (2021) Experimental investigation on stress concentration factors of cold-formed high strength steel tubular X-joints. *Engineering Structures* 243: 112408. s. 1–31

Feng R, Young B (2013) Stress concentration factors of cold-formed stainless steel tubular X-joints. *Journal of Constructional Steel Research* 91: 26–41.

Daneshvar S, Sun M, Tousignant K (2020) Stress concentration factors for RHS-to-RHS X-connections near an open chord end. *Journal of Constructional Steel Research* 175: 106352. s. 4–6

Lyu Y (2022) *Finite Element Method*. Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd. s. 1-19

Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. s. 12–27

Niemi E, Fricke W, Maddox SJ, (2018) *Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components: Designer's Guide*. Singapore: Springer Singapore Pte. Limited. s. 7–15

SFS-EN 10219-2:2019. Kylmämuovattut hitsatut teräksiset rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet. Vahvistettu 17.5.2019. s. 1–10

SFS-EN 10210-2:2019. Kuumamuovatut teräksiset rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet. Vahvistettu 17.05.2019. s. 1–10