



**RAKENNEPUTKIEK X-LIITOKSEN KALVO- JA TAIVUTUSKOMPONENT-
TIEN MÄÄRITYS**

**DETERMINATION OF MEMBRANE AND BENDING STRESS COMPONENTS
IN HOLLOW SECTION X-JOINTS**

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Teemu Ärilä

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Teemu Ärilä

Rakenneputkien X-liitoksen kalvo- ja taivutuskomponenttien määrittäminen

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

32 sivua, 13 kuvaa, 2 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: FE-menetelmä, SHS, X-liitos, rakenteellinen jännitys, hitsaus, teräs

Tässä työssä tarkastellaan neliönmuotoisista rakenneputkista hitsattua X-liitosta, joka on vetokuorman alaisena. Liitoksen uumapalkista halutaan määrittää rakenteellisen jännityksen komponentit, eli kalvojännitys sekä sekundäärinen taivutusjännitys. Lisäksi halutaan selvittää miten liitoksen mittasuhteiden vaihtelu vaikuttaa jännityksiin.

Rakenteesta määritetään jännitykset FE-analyysin avulla. Luodaan yhteensä kuusi mallia, kahdella eri putkien ulkomittasuhteilla ja kolmella eripaksuisella levyllä. Saaduista jännitysjakaumista lasketaan kaavojen avulla jännityskomponentit levynpaksuuden yli.

Halutut jännitykset saatiin laskettua ja eri mallien arvoja voidaan vertailla kuvaajien avulla. Lisäksi saavutettiin ymmärrys siitä, miten kuormitukset jakautuvat yksittäisessä liitoksessa.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Teemu Ärilä

Determination of membrane and bending stress components in hollow section X-joints

Bachelor's thesis

2022

32 pages, 13 figures, 2 tables and 5 appendices

Examiner: D.Sc. Antti Ahola

Keywords: finite element, SHS, X-joint, structural stress, welding, steel

In this thesis a welded X-joint made of square hollow section tubes that is under tension is studied. The objective is to determine the structural stress components, membrane and bending stresses, in the brace member. Additionally, the changes in stresses due to different dimensions are studied.

The stresses in the structure are determined by FE-analysis. In total six different models are created with two ratios of tubes' widths and three plate thicknesses. From the stress distributions the stress components through the plate thickness are calculated using formulas.

The wanted stresses were calculated and the values of different models were able to be compared with the help of graphs. Furthermore, an understanding of how the stresses are distributed along the weld perimeter was reached.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Symbolit

a	hitsin paksuus	[mm]
β	paarre- ja uumaputken ulkomittojen suhde	
σ	jännitys	[MPa]
σ_b	taivutusjännitys (bending)	[MPa]
σ_{hs}	hot spot-jännitys, rakenteellinen jännitys	[MPa]
σ_m	kalvojännitys (membrane)	[MPa]
σ_{nim}	nimellinen jännitys	[MPa]
σ_{nl}	lovi-jännitys (nonlinear)	[MPa]

Lyhenteet

FE	finite element, äärellinen elementti
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.....	7
1.1	Työn aihe.....	7
1.2	Aiempi tutkimus.....	8
1.3	Tavoitteet, ongelma ja kysymykset.....	9
1.4	Rajaukset ja rakenne	9
2	Teoria.....	11
2.1	FE-menetelmä	11
2.2	Jännityskomponentit	12
2.3	Rakenneputket.....	14
3	FE-analyysi.....	15
3.1	Mallien luominen	15
3.1.1	3D-mallinnus ja verkotus.....	15
3.1.2	Reunaehdot	18
3.1.3	Toisto eri suureilla	19
3.2	Jälkikäsitteily.....	19
3.2.1	Määritetyt tulokset	20
3.2.2	Jännityskomponenttien laskenta	20
3.2.3	Yhden mallin tarkempi tarkastelu.....	21
4	Tulokset	22
4.1	Jännitykset FE-analyysistä	22
4.2	Jännityskomponentit	23
4.3	Tarkempi jakauma.....	25
5	Pohdinta.....	27
5.1	Tulosten vertailu.....	27
5.2	Reliabiliteetti ja validiteetti	28
5.3	Johtopäätökset	29

5.4	Jatkotutkimus	30
5.5	Yhteenveto	31
	Lähteet	32

Liitteet

Liite 1. Malli ja jännitys jakaumat hitsin takapuolelta.

Liite 2. Malli muodonmuutostilassa.

Liite 3. Mathcad-ohjelma, jolla lasketaan komponentit.

Liite 4. Tulostaulukko.

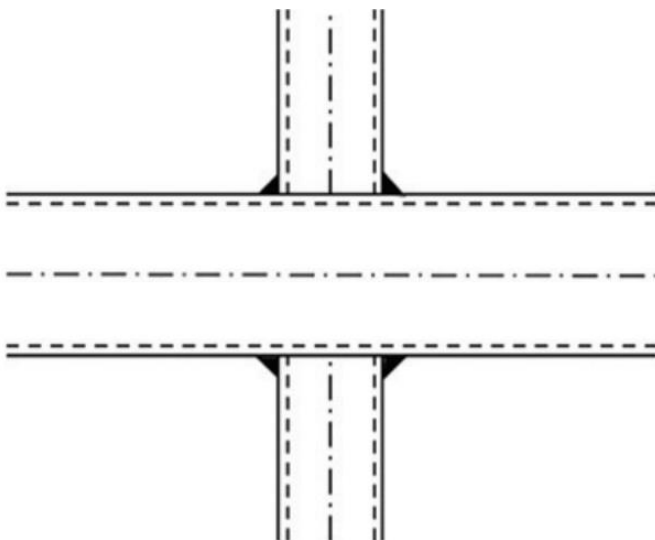
Liite 5. Kuva jokaisesta mallista.

1 Johdanto

Tässä työssä tarkastellaan teräksisten rakenneputkien hitsiliitosta, ja siinä esiintyviä jännityksiä FE-analyysillä (finite element), eli äärellisellä elementtimenetelmällä. Rakenneputkien hitsiliitoksen lujuuteen vaikuttaa kuormitusten jakautuminen hitsin alueella. Kuormitusten jakautuminen riippuu liitoksen jäykkyydestä, johon vaikuttavat oleellisesti rakenteiden mitat. On siis syytä tarkastella jännitysten käyttäytymistä liitoksessa, ja mittasuhteiden vaikutusta niihin. Liitoksen kriittisten kohtien tietäminen auttaa rakenteen mitoituksessa.

1.1 Työn aihe

Työssä tarkastellaan neliön muotoisista ontoista rakenneputkista valmistettua rakennetta. Putket on hitsattu yhteen niin sanottuna X-liitoksena, eli parreputken keskellä on molemmin puolin kaksi kohtisuoraa uumaputkea. Rakenne on esitetty kuvassa 1. Uumaputkien päissä vaikuttaa vetävä staattinen voima, joka aiheuttaa rasitusta liitokseen.



Kuva 1. X-liitoksen geometria. (Kuhn et al. 2019, 813.)

Tarkoituksena on selvittää jännityskomponenttien jakautuminen uumaputkessa liitoksen alueella ja selvittää miten geometriamuuttujat vaikuttavat jännityksiin. Tarkasteltavia jännityskomponentteja ovat kalvo- ja taivutusjännitys. Näiden määrittämiseen tarvitaan jännitys-jakauma levynpaksuuden yli. Varsinkin lujilla materiaaleilla, joiden sitkeys on pienempi, jännityskomponentit voivat vaikuttaa suuresti hitsin staattiseen kapasiteettiin. Kuormitusten jakautumiseen vaikuttaa liitoksen jäykkyys, joka riippuu paarre- ja uumasauvojen mittasuhteista. Eri mittasuhteiden vaikutuksesta jännitysten jakautumiseen, ei ole olemassa selkeää näkemystä. Tästä yhteydestä yritetään saada tietoa FE-laskennalla.

1.2 Aiempi tutkimus

Hitseistä, rakenneputkista ja niiden jännityskomponenteista on yleisesti hyvin tietoa saatavilla, ja jännityksiä voidaan tarkastella käsin laskemalla tai FE-laskennalla. Rakenteella, jossa on epäjatkuvuuskohtia sekä suuria muodonmuutoksia, kuormitusten jakautuminen on hankalaa määrittää analyyttisesti. Kaksiulotteisen epäjatkuvuuskohdan laskentaan voi hyödyntää taulukoituja konsentraatiokertoimia, mutta tällaisessa kolmiulotteisessa rakenteessa kuormitukset luultavasti jakautuvat epälineaarisesti. Käsin laskemalla laskutoimituksista tulisi kohtuuttoman vaikeita, eivätkä kaikki tulokseen vaikuttavat tekijät välttämättä tulisi mukaan. Esimerkiksi yksinkertaistetut taulukkokaavat eivät ota huomioon muodonmuutoksista aiheutuvia paikallisia jännityskonsentraatioita. On siis syytä tehdä FE-analyysi mallista.

Tämäntapaisista rakenteista olisi helpompi tehdä malli käyttäen tasoelementtejä keskipintamallinnuksessa, mutta kun halutaan määrittää jännityskomponentit levynpaksuuden yli, täytyy käyttää tilavuuselementtejä, jotta voidaan määrittää jännitys-jakauma levynpaksuuden yli. Lisäksi tilavuuselementeillä pienahitsin muodon vaikutus tuloksiin säilyy oikeana. Rakenteen FE-malli ei ole yksinkertainen, muttei myöskään turhan vaikea tehdä. Tekemällä monta eri geometriamuuttujan mallia ja vertailemalla tuloksia, voidaan saada käsitystä kuormitusten käyttäytymisestä rakenteessa.

1.3 Tavoitteet, ongelma ja kysymykset.

Työn tavoitteena on määrittää FE-laskennalla jännityskomponentit liitoksessa, ja sen perusteella saada tietoa siitä, miten jännitykset jakautuvat, etenkin uumapalkissa. Tutkielmassa ei yritetä löytää optimaalisia mittasuhteita rakenteelle, vaan pelkästään tarkastella jännitysten käyttäytymistä. Työn alustavana ongelmana on, että kuormitusten jakautumisesta ja muodostumisesta ei ole selvää näkemystä.

Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Kuinka suuret sekundaarijännityksen kalvo- ja taivutuskomponentit ovat?
- Miten jännityskomponentit jakautuvat uumaputkessa?
- Miten geometriasuhteet vaikuttavat jakautumiseen?

1.4 Rajaukset ja rakenne

Tutkimuksen helpottamiseksi sekä tarkoituksessa pysymisen vuoksi työlle on asetettu rajoituksia. Geometriamuuttujat on rajattu kahteen ulkomittojen suhteeseen, joista kummastakin tehdään kolme eri levynpaksuuden mallia. Paarreputken leveys on aina 120 mm ja uumaputket mallinnetaan β -suhteilla, eli putkien ulkomittojen suhteilla, 0,7 ja 0,5. Tarkasteltavat levynpaksuudet ovat 4, 6 ja 8 mm. Neliöputkien nurkkapyöritykset mallinnetaan 10 millimetrin ulkosäteellä. Tämä on luultavasti pienempi säde kuin oikeissa putkissa, mutta näin mallinnus helpottuu etenkin suuremman uumaputken tapauksessa. Nurkkapyörityksen koko ei vaikuta oleellisesti jännityksiin, ja mallinnuksesta tulisi huomattavasti vaativampaa, jos uuma hitsattaisiin pyöritykseen kiinni. Putkien valmistuksesta aiheutuvia epäjatkuvuuksia kuten pituussuuntaista hitsisaumaa, tai geometrisiä muotovirheitä, ei oteta huomioon mallinnuksessa. Pienahitsin a -mitta, eli yksinkertaisesti hitsin ohuin kohta, on jokaisessa mallissa 5 mm.

Mallinnus tehdään käyttämällä lineaarisia tilavuuselementtejä, hyödyntämällä symmetriaehtoja, joten riittää että mallinnetaan geometriasta vain 1/8-osa. Jännitykset luetaan neljästä kohtaa liitosta; uumasauvan molemmilta sivuilta symmetriatason kohdalta ja uumasauvan nurkkapyörityksen molemmilta puolilta. Yhdestä mallista tehdään tarkempi tutkinta jakautumisten suhteen. Näistä kohdista luetaan jännitysarvot solmujanalta, joka kulkee levynpaksuuden läpi. Määritettävät jännityskomponentit ovat kalvo- ja taivutusjännitys. Komponenttien laskemiseen käytetään levynpaksuuden yli integroivia kaavoja. Epälineaarista jännityspiikkiä ei oteta huomioon, eikä tehdä väsymistarkasteluja.

Tutkielman toisessa luvussa käydään läpi teoriaa, johon työ perustuu. Kolmannessa luvussa kuvaillaan FE-mallinnusta ja tulosten laskemista. Neljännessä luvussa esitellään tuloksia ja viimeiseksi pohditaan niiden arvoa.

2 Teoria

Työssä tarkastellaan square hollow section (suom. onttojen rakenneputkien), eli SHS-palkkien jännityskomponentteja FE-menetelmällä, joten käydään ensin läpi mitä nämä käsitteet tarkoittavat. Pehdytään jokaisen aiheen teoriaan lyhyesti, jotta voidaan lopuksi pohtia ilmiöiden yhteisvaikutuksia.

2.1 FE-menetelmä

FE-menetelmä on nykyaikaisin laajasti käytetty numeerinen laskentatapa, jota hyödynnetään lujuuslaskennassa sekä suunnittelussa. Menetelmällä voidaan testata ja optimoida kappaleita virtuaalisesti. Siinä voidaan jakaa monimutkaisetkin rakenteet pieniin osiin, elementteihin, jotka ovat liitettyinä toisiinsa solmupisteillä. Jokaisessa elementissä on matemaattisesti määritetty sen ominaisuudet, jotka riippuvat muun muassa materiaaliarvoista, geometriasta, kuormituksista ja tuennoista. Kun tarvittavat arvot on määritetty, voidaan laskea solmupisteiden käyttäytyminen toistensa suhteen. (Zienkiewicz et al. 2013, 1–14.)

Lukuiset elementit tarkoittavat yleensä suuria määriä matriisilaskuja. Siksi FE-laskentaa on edullista suorittaa tietokoneohjelmistolla, jolla on helppoa mallintaa kappale, verkottaa se, eli jakaa elementteihin, ja lopuksi tietokone suorittaa numeerisen laskennan. FEM laskennassa saadaan ensisijaiseksi tulokseksi rakenteen siirtymät, joiden avulla saadaan myös esimerkiksi jännitykset, tukireaktiot ja venymät. (Werkle, 2021, 1.)

Elementtimenetelmä on luonnostaan approksimoiva laskutapa, koska tapaukset simuloidaan yksinkertaistettuna. Tulokset ovat kuitenkin yleisesti tarpeeksi tarkkoja, ja tarkkuutta voidaan parantaa tihentämällä verkotusta. Tällöin laskenta-aika kasvaa, joka käytännössä toimii rajana mallien koolle. Mallia luodessa on tärkeää ymmärtää materiaalin ja FE-laskennan periaatteita, sillä väärällä tavalla tehty malli voi antaa virheellisiä tuloksia. (Werkle, 2021, 216–217.)

2.2 Jännityskomponentit

Nimellinen normaalijännitys on poikkileikkauksen kohtisuorassa suunnassa esiintyvä jännitys, jota usein käytetään staattisen kapasiteetin laskennassa. Sen laskemiseen voidaan käyttää suhteellisen yksinkertaisia taulukkokaavoja, kun tiedetään kuormat, materiaaliarvot ja geometria. Nimelliseen jännitykseen luetaan mukaan makrogeometriset eli laaja-alaisesti vaikuttavat jännityskeskittymät. Tällaisia ovat esimerkiksi suuret reiät, joiden kohdalla puuttuva materiaali ei luonnollisesti kannata kuormaa, jolloin se keskittyy ympäröivään materiaaliin. (Niemi 2018, 5–12.)

Rakenteellisessa jännityksessä otetaan mukaan kalvojäännitys sekä sekundäärinen taivutusjäännitys. Kun halutaan eritellä jännityskomponentit levynpaksuuden yli, voidaan käyttää kaavoja, jotka integroivat arvot jännitysdatasta levynpaksuuden yli. Tätä määrittelytapaa kutsutaan myös lyhenteellä TTWT, through thickness at weld toe.

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

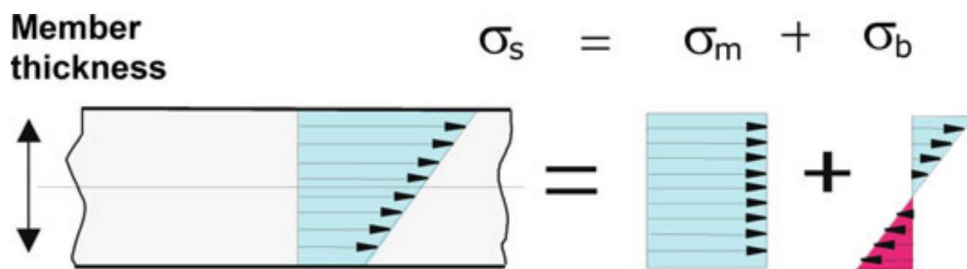
Kaava 1, jossa σ_m on kalvojäännitys, t on levynpaksuus, x on tarkastelukohta levynpaksuuden suunnassa lähtien hitsin juuresta ja $\sigma(x)$ on jännitys materiaalissa koordinaatissa x . (Hobbacher 2013, 14.)

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

Kaavalla 2 lasketaan rakenteellinen taivutusjäännitys σ_b (Hobbacher 2013, 14).

Rakenteellisia jännityskomponentteja on kahta laatua; kalvojännitys, joka on vakio levyn paksuussuunnassa ja voi jakautua epälineaarisesti levyn leveyssuunnassa. Toinen on sekundaarinen taivutusjännitys, joka jakautuu lineaarisesti levyn paksuussuunnassa ja on erimerkistä levyn pinnoilla. Komponentit esitetty visuaalisesti kuvassa 2. Molemmat jännitykset aiheutuvat nimellisen kuormituksen lisäksi jonkinlaisesta rakenteellisesta epäjatkuvuudesta tai muotovirheestä. Kun kuormitettu rakenne on vahvikkeen kohdalta jäykempi kuin muualta, se vastustaa venymistä enemmän, jolloin kohtaan kohdistuu enemmän kuormitusta. Kuormitukset täytyvät tietysti olla tasapainossa, joten jännityskeskittymän ulkopuolella esiintyy kuormitusta vastakkaiseen suuntaan. Rakenteellinen jännitys esiintyy lähellä sen aiheuttavaa geometriaa, muutaman levynpaksuuden alueella. (Hobbacher 2013, 12–27.)

Yksinkertaisiin ja hyvin tutkittuihin tapauksiin löytyy taulukoita, joista voi etsiä jännityskertoimen millä voidaan laskea arvioidun jännityskeskittymän arvo. Monimutkaisemmat rakenteet täytyy tutkia muilla tavoin, esimerkiksi FE-analyysillä. Ultralujat teräkset ovat herkempiä säröytymään jännityskeskittymien takia, koska ne ovat vähemmän sitkeitä, jolloin paikalliset jännityskeskittymät eivät pääse jakautumaan niin hyvin ympäröivään materiaaliin. (Niemi 2018, 5–11.)



Kuva 2. Rakenteellisen jännityksen muodostuminen nimellis- sekä sekundaarisesta taivutusjännityksestä. Rakenteellista jännitystä kutsutaan myös ”hot spot”-jännitykseksi ja merkitään σ_{hs} tai σ_s . (Niemi 2018, 7.)

2.3 Rakenneputket

SHS-rakenneputket ovat edullisia komponentteja, joista voidaan valmistaa monenlaisia rakenteita. Putket ovat onttoja, ja ne valmistetaan kuuma- tai kylmämuokkaamalla joko saumattomasti kiinteästä aihioista lävistämällä, tai levytuotteesta muovaamalla ja hitsaamalla. Poikkileikkaukseltaan rakenneputket voivat olla neliöitä, suorakulmioita, pyöreitä tai ellipsejä. Tällöin niitä myös kutsutaan omalla nimellään, esimerkiksi rectangular hollow section, eli RHS, suorakulmaisille profiileille. (SFS-EN 10210-2 2019, 4–5.)

Materiaalina käytetään rakenneteräksiä, joten rakenteilla on hyvä työstettävyys ja hitsattavuus. Rakenneputkilla on hyvät lujuusominaisuudet niiden omapainon suhteen, sekä niiden valmistus on suhteellisen edullista. Niiden valmistukseen sekä käyttöön on olemassa lukuisia oppaita ja standardeja. Lukuisille eri mittasuhteille on myös valmiiksi laskettuja ja taulukoituja poikkipinta-arvoja. (SFS-EN 10210-2 2019, 5–12.)

3 FE-analyysi

FE-analyysissä luodaan ensin 3D-malli tarkasteltavasta rakenteesta, jaetaan malli elementteihin ja määritetään reunaehdot sekä kuormat, jonka jälkeen suoritetaan analyysi. Analyysistä voidaan määrittää halutut jännitykset halutuissa pisteissä. Tässä tutkimuksessa tehdään kuusi mallia, joista otetaan arvot neljästä kohtaa. Lopuksi voidaan laskea jännityskomponentit saaduista arvoista.

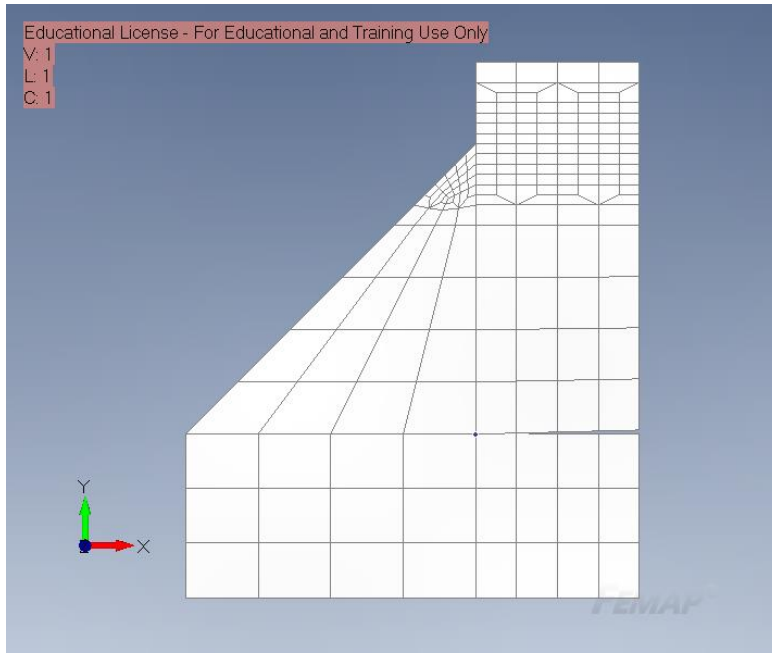
3.1 Mallien luominen

Analyysi tehdään Simcenter Femap/NX-Nastran ohjelmistolla. Vertailtavia malleja tehdään kuusi; 4, 6 ja 8 millimetrin seinämän paksuuksien mallit, kahdella eri putkien leveyksien suhteella, 0,5 ja 0,7. Materiaalina käytetään terästä, jolla kimmokerroin on 210 GPa ja Poissonin vakio 0,3. Malli luodaan käyttämällä lineaarisia tilavuuselementtejä, jotka yritetään pitää mahdollisimman säännöllisinä sekä suorakulmaisina.

3.1.1 3D-mallinnus ja verkotus

Ensin luodaan kaksiulotteinen kolmio, joka edustaa hitsiä a-mitalla 5 mm. Kolmion kylkiin liitetään suorakulmiot, jotka edustavat rakenneputkien sivuja. Hitsin juureen ei tule pyöristyksiä. Ensimmäinen malli tehdään β -suhteella 0,7 ja levynpaksuudella 4 mm. Tästä johtuen lisättävät suorakulmiot ovat kolmion kylkien mittaisia yhdeltä sivulta, ja toiselta 4 mm. Uumaputkeksi tulevan suorakulmion alemmaa ulkoreunaa on nostettu hieman, jotta putket eivät kiinnittyisi toisiinsa suoraan, vaan hitsin kautta. Seuraavaksi rakenne verkotetaan käyttämällä lineaarisia tasoelementtejä (plate). Verkosta yritetään tehdä mahdollisimman säännöllinen ja neliömäinen. Alue jaetaan pienempiin osiin koska esimerkiksi uumaputken ja hitsin rajapinnalta halutaan tarkkaa dataa, joten sinne luodaan tiheämpi verkko. Elementtiverkon haluttu koko määrättiin asettamalla alueiden rajoille haluttu määrä solmuja. Muille kuin neliömäisille alueille asetetaan verkon lähestymiskomento, jotta siitä tulisi mahdollisimman

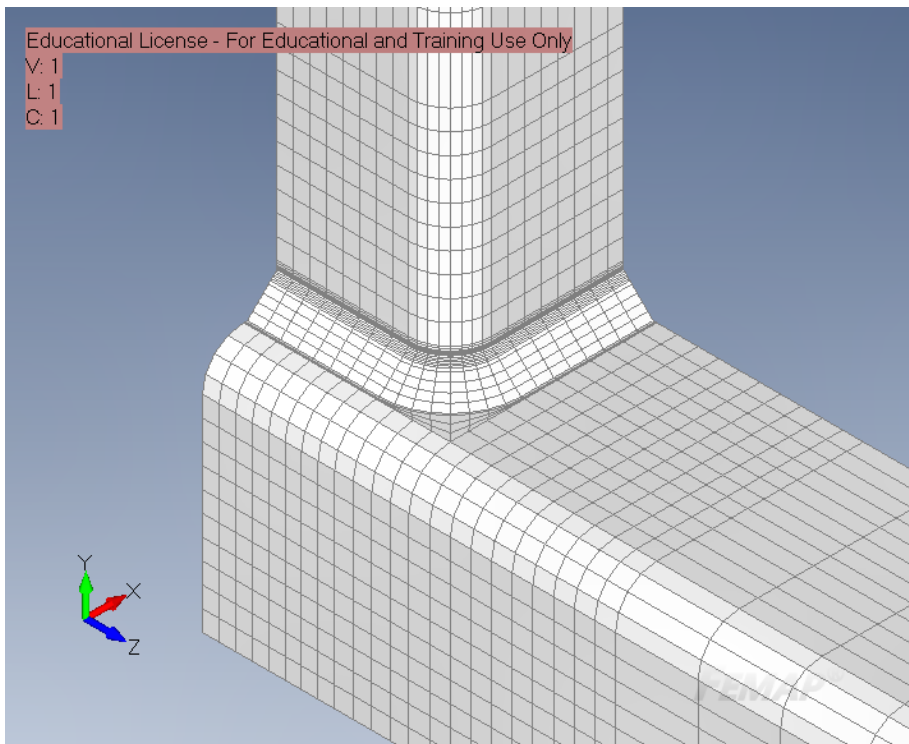
säännöllinen. Hitsinjuuren kohdalla uuman levynpaksuuden yli asetettiin 8 elementtiä, jolloin elementtikooksi tuli 0,5 mm. Geometria esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Tasoelementtien kaksiulotteinen geometria, josta pursotetaan kolmiulotteinen tilavuusmalli. Uumaputken hitsin rajaviivan kohdalle on tehty hienompi verkko ja putkien väliin on tehty rako, jotta ne kiinnittyvät pelkästään hitsin kautta.

Tasoelementtejä voidaan pursottaa kohtisuoraan, jolloin luodaan kolmiulotteisia tilavuuselementtejä (solid). Kuvitellaan olemassa olevan geometrian kulkevan XY-symmetriatasossa, jolloin parre kulkee Z-akselilla ja uuma Y-akselilla. Parreputken leveys on 120 mm, joten β -suhteella 0,7 uuman leveys on noin 84 mm. Tarkoituksena on tehdä 1/8-malli hyödyntäen symmetriaehtoja, jolloin mallinnettavan uuman kokonaisleveys tulee olla 42 mm leveä. Nurkkapyörityksen ulkosäde on 10 mm, joten elementtejä pursotetaan niiden normaalisuuntaan 32 mm. Tämä matka jaetaan kahdeksalle elementille. Tällöin elementeistä tulee karkeampia leveyssuunnassa, mutta sillä ei ole väliä koska tulokset luetaan levynpaksuuden yli. Elementtejä pyöräytetään 90 astetta 10 mm:n nurkkapyörityksen ulkosäteeseen ympäri. Tällekin matkalle tehtiin kahdeksan elementtiä pituussuunnassa. Tämän jälkeen pursotetaan samanlainen 32 mm suora kuin aiemmin, jolloin tulee vastaan seuraava symmetriareuna ZY-tasossa. Nyt hitsiliitos on mallinnettu.

Paarreputki luodaan samalla tavalla elementtejä pursottamalla, paitsi nurkan pyöreiden reunojen kohdilla. Niiden ympärille täytyy tehdä oma rajattu tasoelementtiverkko XZ-tasoon, jonka ulkoreunat ovat suoria. Nämä elementit voidaan sitten pursottaa levynpaksuuden verran tilavuuselementeiksi. Paarteen elementit pursotetaan uuman sisäpuolella symmetriatasoihin asti, eli uuman keskelle. Paarteen leveyssuunnassa pursotetaan nurkkapyöritykseen asti, jonka jälkeen taas pyöräytetään nurkkapyöritys, ja jatketaan toinen sivu alaspäin 60 mm XZ-symmetriatasoon. Kuva 4 auttaa havainnollistamaan mallia. Elementit paarteessa ovat 4 mm leveitä ja niitä on kolme levyn paksuuden suunnassa. Tämä on tarpeeksi pieni koko sillä jännityksiä ei lueta näistä elementeistä, jännitysten täytyy vain välittyä niiden läpi.



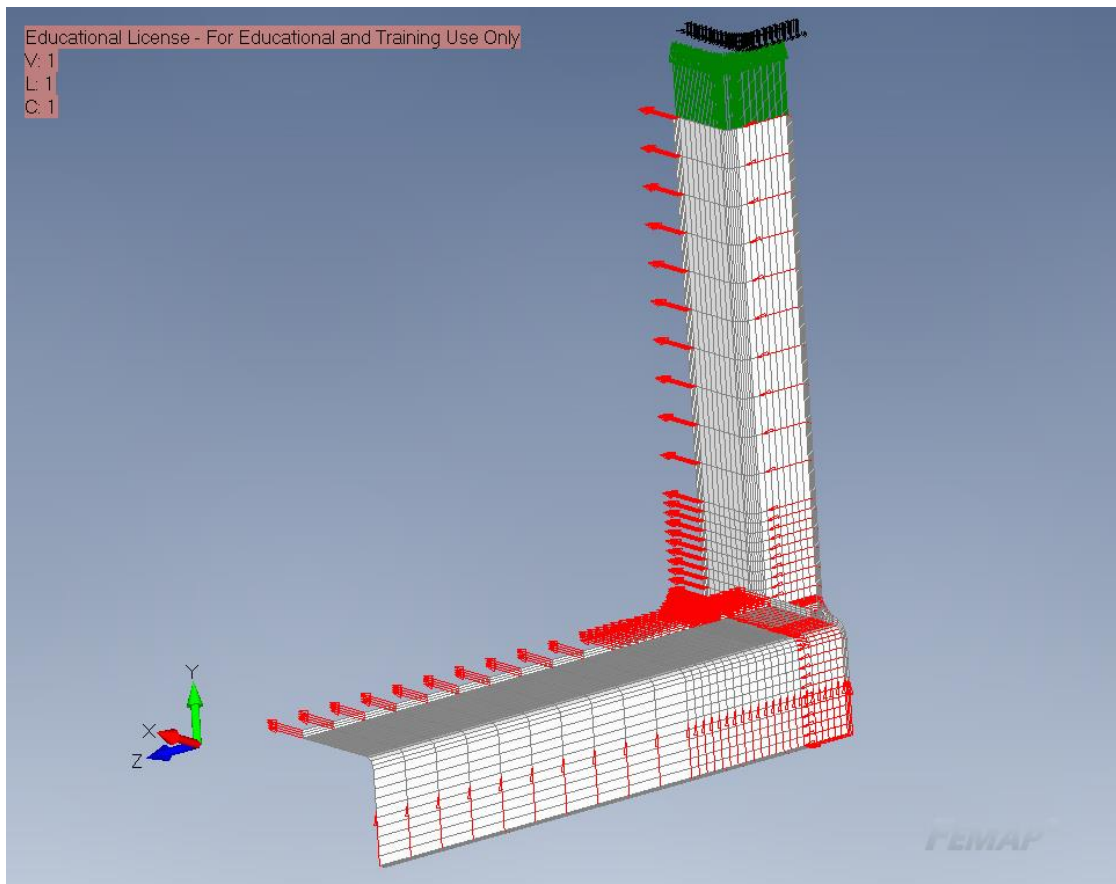
Kuva 4. FE-malli β -suhteella 0,7, levynpaksuudella 4 mm ja pienahitsin a-mitalla 5 mm. Tihein verkko hitsin yläjuuressa ja uumaputkessa hitsin läheisyydessä.

Molempien putkien profiili voidaan nyt pursottaa pituussuunnassa. Rakenneputkien pituuksilla ei ole tässä työssä väliä, kunhan ne ovat tarpeeksi pitkät, jotta jännityskeskittymät jakautuvat ennen niiden päättymistä. Molempia putkia jatketaan puolikarkealla

elementtikoolla 50 mm ja vielä karkeammalla 200 mm. Lopuksi 2D-tasoelementit voidaan poistaa koska niitä ei enää tarvita.

3.1.2 Reunaehdot

Rakenne mallinnetaan 1/8-osana, jolloin vapausasteita täytyy rajoittaa kolmessa symmetriatasossa. Symmetriaehtoja hyödyntämällä voidaan tehdä pienempi malli. Tilavuuselementtien solmuissa voi olla pelkästään translaatiota, ei rotaatiota. Tästä johtuen esimerkiksi XY-tason reunassa lukitaan Z-akselin suuntainen liikkuminen. Näin tehdään muillekin symmetriareunoille, jonka jälkeen rakenne käyttäytyy kuin todellinen rakenne. Kuormat ja reunaehdot näkyvillä kuvassa 5.



Kuva 5. Mallin symmetriaehdot esitetty punaisilla nuolilla. Nuolen juuressa oleva kohta ei voi siirtyä nuolen suuntaan. Lisäksi uuman päässä 1 MPa:n vetävä kuorma esitetty vihreillä nuolilla.

Kuormaksi asetetaan uumaputken päähän 1 MPa elementtikuorma. Se on suhteellisen pieni kuorma, mutta sen avulla voidaan helposti lukea jännityskeskittymiä liitoksessa, eikä kuorman suuruus vaikuta tuloksiin sillä malli käyttäytyy lineaarielastisesti. Nyt FE-malli on valmis näillä mitoilla.

3.1.3 Toisto eri suureilla

Samaa β -suhdetta käyttävät mallit on helppo muokata ohuemman levyn mallista. Mentäessä neljästä kuuden millin levynpaksuuteen, tallennetaan edellisestä mallista kopio ja pursotetaan putkien seiniä 2 mm sisäänpäin. Sisään on helpompi kasvattaa paksuutta muuttamatta hitsin muotoa ja se on myös standardien näkökulmasta oikein, sillä putkien koot mitataan ulkomitoista. Suorat pinnat ovat yksinkertaisia pursottaa, mutta nurkat täytyy pursottaa säteen suunnassa eri komennolla. Sen jälkeen uuden paksuuden malli on valmis, ja saman voi toistaa 8 mm paksuudella.

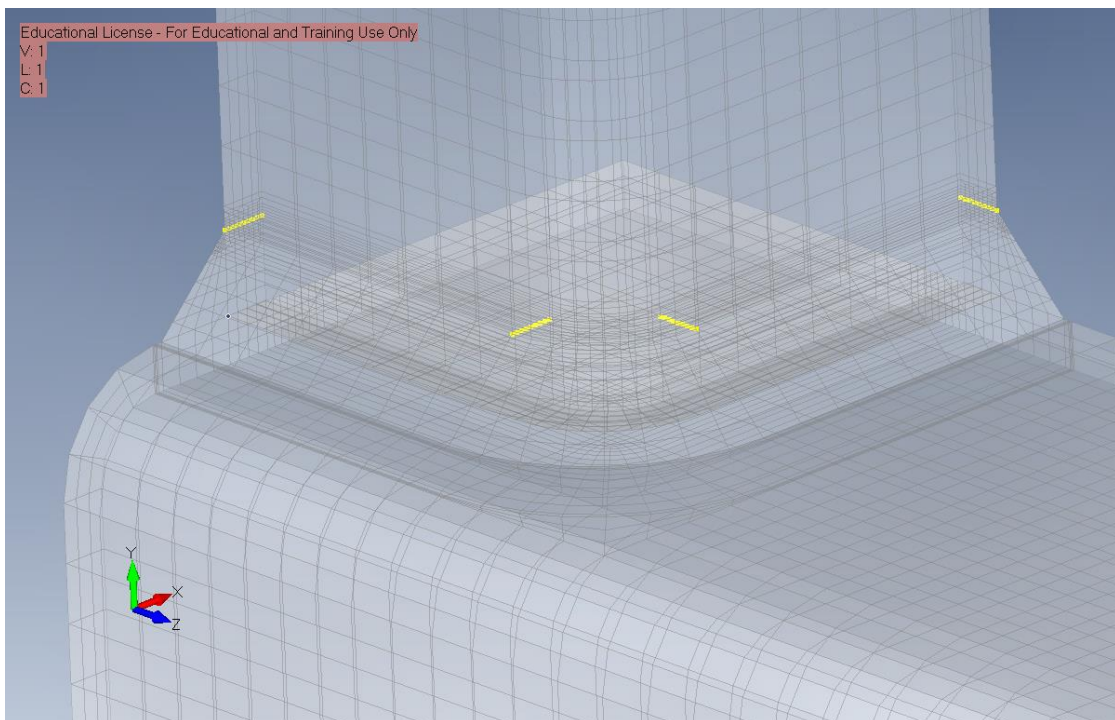
β -suhteen 0.5 tapauksessa mallinnus täytyy aloittaa hitsin 2D-tasoelementtien vaiheesta. Rakenteen mallinnus etenee muuten samalla tavalla, paitsi että uumaputken suoraa sivua pursotetaan tässä tapauksessa vain 20 mm. Nurkkapyöristys on sama 10 mm, jolloin todelliseksi uuman leveydeksi tulee haluttu 60 mm. Paarreputki pysyy myös samanlaisena, joten mallinnus ja reunaehdot tehdään samalla tavalla kuin aiemmin. Sitten mallista tehdään suurempien levynpaksuuksien versiot, kuten edellisessä kappaleessa. Tässä järjestyksessä mallintamalla voidaan hyödyntää edellisiä malleja ja välttää turhaa toistoa.

3.2 Jälkikäsitteily

Valmiista malleista tehdään lineaaristaattinen analyysi. Tarkasteltavaksi valitaan normaali-jännitykset. Ne kirjataan ylös, jotta niistä voidaan laskea komponentit.

3.2.1 Määritetyt tulokset

Rakenteesta halutaan tietää jännitysarvot hitsin juuren alueella, jotta voidaan laskea jännityskomponentit. Uuman suuntaiset normaalijännitykset täytyy siis muuttaa elementtijännityksistä suurimpiin solmujännityksiin. Sitten voidaan listata jännitykset halutulta solmujanalta taulukkoon. Kiinnostavat kohdat ovat siis neljä solmujanaa, jotka kulkevat uumaputken seinän läpi hitsin juuressa molemmilla symmetriapinnoilla sekä nurkkapyörityksen kummallakin puolen. Tarkastelukohdat korostettu kuvassa 6. Halutut solmut valitaan ja niiden jännitykset sekä koordinaatit tallennetaan Excel-tilukkuoon. Malleja on kuusi erilaista, joista jokaisesta saadaan neljän janan arvot.



Kuva 6. Tarkasteltavana olevat solmujanat korostettu keltaisella.

3.2.2 Jännityskomponenttien laskenta

Kalvo- ja rakenteellisten jännitysten laskentaan käytetään Mathcad-laskentaohjelmistoa. Laaditaan ohjelma, johon voidaan tuoda mallista määritetty jännitysjakumadata. Ohjelma tuottaa jännityskomponentit kaavojen 1 ja 2 mukaisesti. Lisäksi ohjelma luo kuvaajat

jännityksistä sekä komponenteista. Ohjelmasta on otettu kuva liitteeseen 3 ja sen luomat kuvaajat näkyvät kuvassa 9. Ohjelma luotiin mahdollisimman helppoa toistoa varten, jotta tarkasteltavan tapauksen arvot voidaan yksinkertaisesti kopioida ja liittää. Laskut suoritetaan jokaiselle tarkastelupisteelle, jokaisessa mallissa.

Tuloksista tehdään taulukot helpompaa vertailua ja havainnollistamista varten. Jokaisesta mallista saadaan myös kuvaajat kokonaisjännityksestä, molemmista rakenteellisista komponenteista ja niiden yhteenlasketusta hot spot-jännityksestä.

3.2.3 Yhden mallin tarkempi tarkastelu

Paremmän käsityksen saamiseksi jännityskomponenttien jakautumisesta, tutkitaan yhtä mallia tarkemmin. Neljän tarkastelukohdan sijasta määritetään jännitykset jokaiselta elementiltä uuman kehämittaa pitkin. Näin saadaan parempi ymmärrys siitä, miten jännitykset jakautuvat. Tarkempi tutkimus tehdään vain yhdelle mallille, sillä se on työlästä tehdä, ja tuloksia voidaan yleistää muille malleille.

4 Tulokset

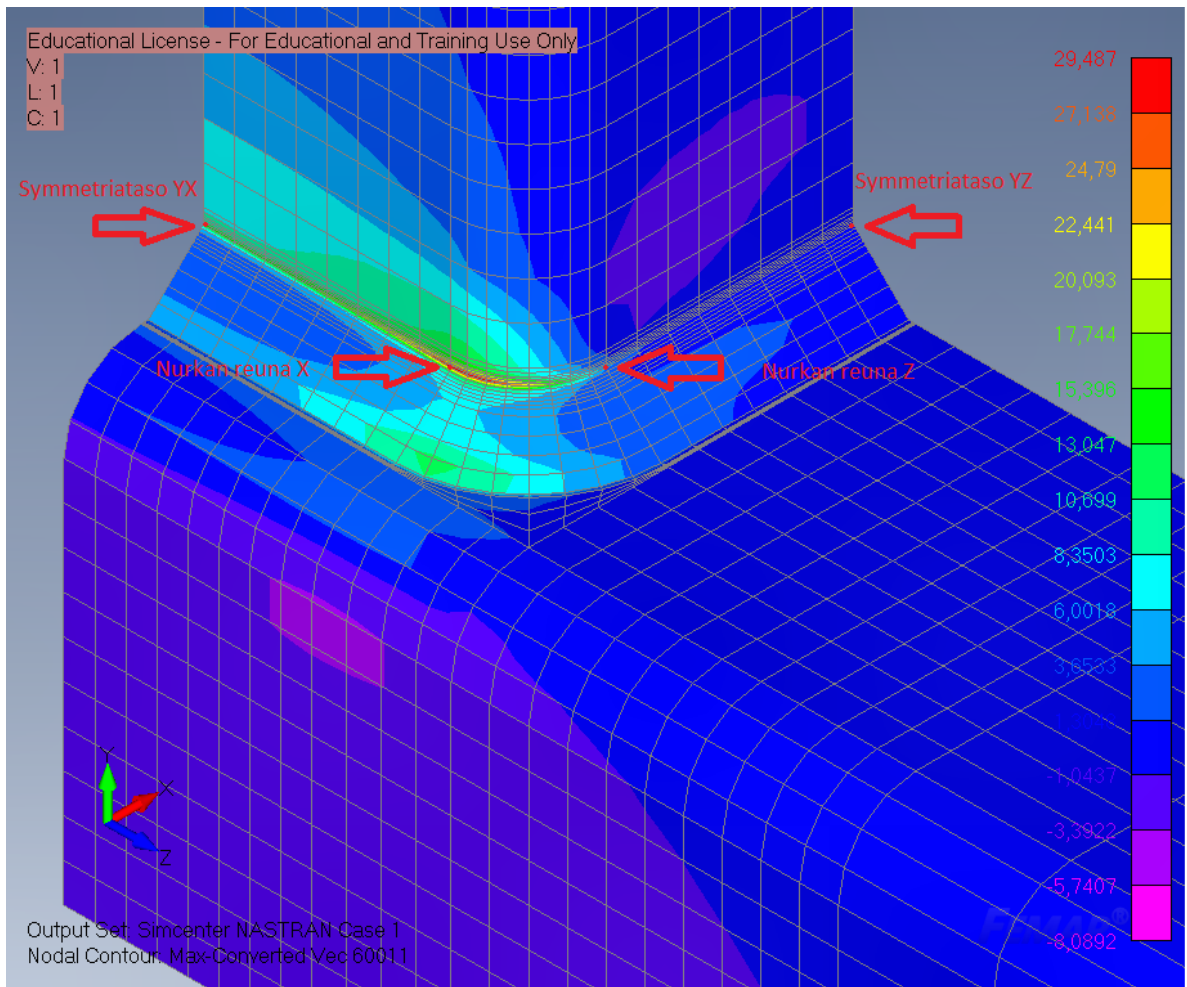
FE-analyysistä määritettiin jännitys jakaumat tarkastelupisteissä. Jakaumista eriteltiin jännityskomponentit laskentaohjelmistolla. Tulosten keräämiseen ja käsittelyyn käytettiin taulukko-ohjelmistoa. Tässä luvussa esitetään tulosten kannalta oleellisemmat arvot.

4.1 Jännitykset FE-analyysistä

Femapista saadaan normaalijännitysten arvot halutuista tarkastelukohdista. Suurimmat jännitykset esiintyvät uumaputken ulkopinnalla ja kaikkein suurin arvo sijoittuu näillä malleilla aina nurkkapyörityksen alueelle. Taulukkoon 1 on kirjattu suurin jännitys jokaisen mallin kaikista tarkastelupisteistä. Taulukossa ”symmetriataso YX” tarkoittaa sillä symmetriatasolla kulkevaa solmujanaa. ”Nurkan reuna X” merkitsee nurkkapyörityksen viereistä janaa, joka kulkee X-akselin suunnassa. Tarkastelukohdat voi nähdä selkeämmin kuvissa 6 ja 7 vasemmalta oikealle samassa järjestyksessä. Taulukon ”b07t4” taas tarkoittaa mallia, jossa β -suhde on 0.7 ja levynpaksuus 4 mm.

Taulukko 1. Jännitysten maksimi-arvot megapascalina. Ensimmäisen sarakkeen tarkastelu-kohta sijaitsee paarteeseen kohtisuorassa olevalla symmetriatasolla. Toisessa sarakkeessa uuman nurkkapyörityksen reuna samalta kyljeltä. Kolmannessa nurkan toinen puoli, ja lopuksi symmetriataso, joka kulkee paarteen keskilinjalla.

	Symmetriataso YX	Nurkan reuna X	Nurkan reuna Z	Symmetriataso YZ
	σ_{\max} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\max} [MPa]	σ_{\max} [MPa]
b07t4	13,51	27,70	4,36	-0,12
b07t6	12,58	22,55	5,24	-0,74
b07t8	11,98	19,64	5,91	-1,13
b05t4	16,62	27,44	4,15	-1,79
b05t6	13,84	22,01	4,56	-2,31
b05t8	12,13	18,63	4,73	-2,32



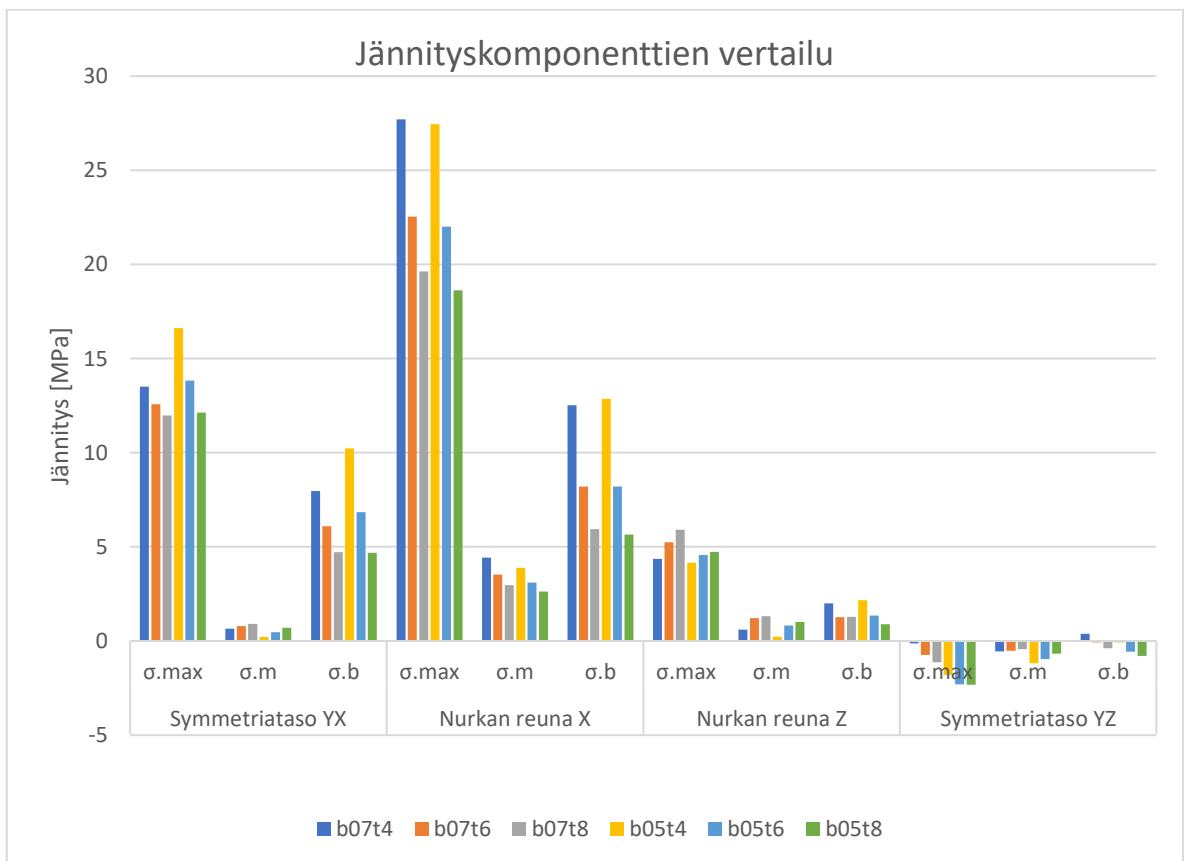
Kuva 7. Normaalijännitysten jakautuminen uuman vetokuormasta. Tarkastelupisteet merkattu punaisilla nuolilla.

4.2 Jännityskomponentit

Jännitysdatasta lasketaan kalvojännityksen ja sekundäärisen taivutusjännityksen osuudet. Tulokset on kirjattu taulukkoon 2, jossa σ_m on kalvojännitys ja σ_b on rakenteellinen taivutusjännitys. Tarkat tulokset ovat liitteessä 4. Kalvojännitys on tietyssä tarkastelukohdassa aina vakio levynpaksuuden yli, kun taas taivutusjännityksen arvo listataan putken ulkopinnalta ja kääntyy lineaarisesti erimerkkiseksi levyn vastakkaiselle pinnalle. Taulukkomuotoa helpommin kuvasta 8 voi havainnollistaa jännitysten jakautumisen.

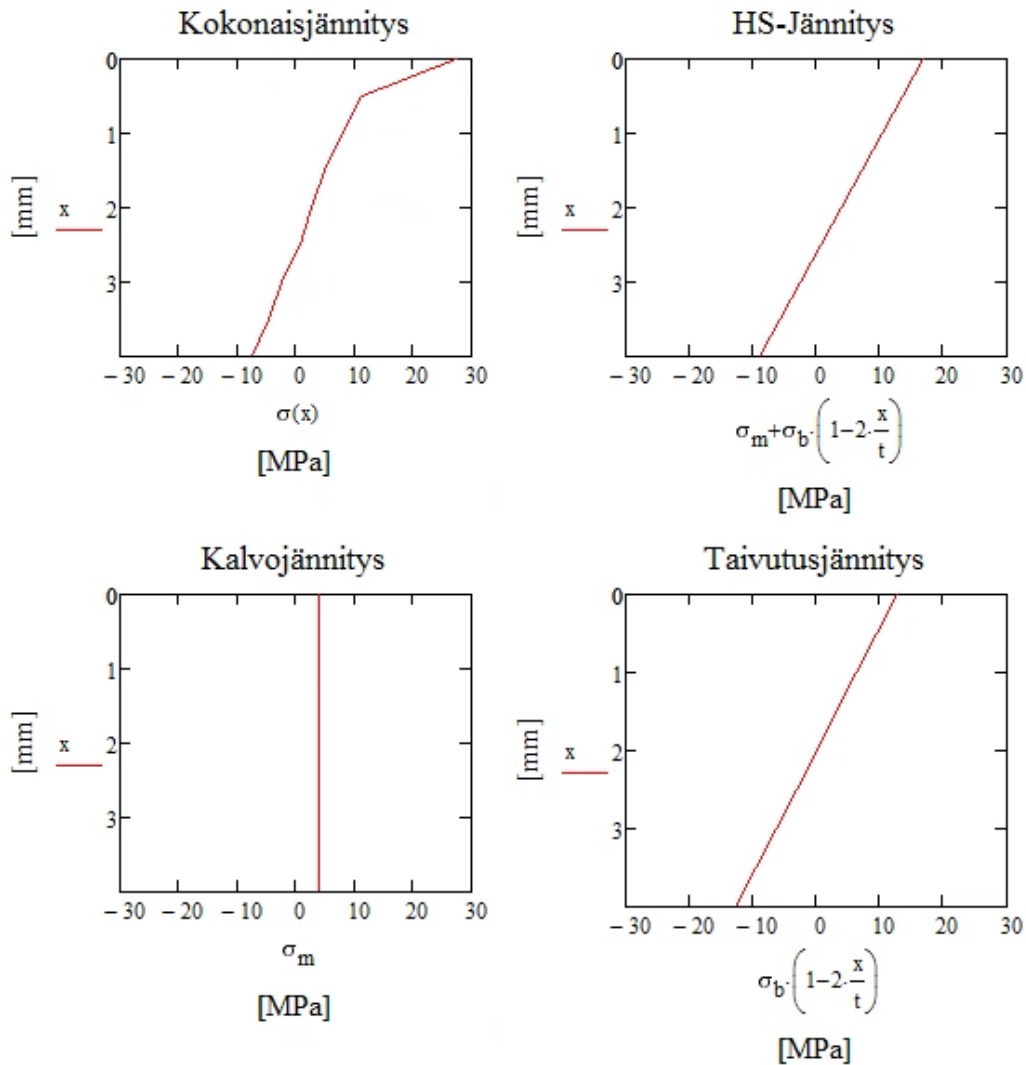
Taulukko 2. Jännityskomponentit.

	Symmetriataso YX		Nurkan reuna X		Nurkan reuna Z		Symmetriataso YZ	
	σ_m [MPa]	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	σ_b [MPa]	σ_m [MPa]	σ_b [MPa]
b07t4	0,66	7,97	4,43	12,52	0,61	2,00	-0,56	0,39
b07t6	0,79	6,09	3,52	8,20	1,21	1,27	-0,52	-0,08
b07t8	0,91	4,72	2,97	5,95	1,31	1,28	-0,43	-0,38
b05t4	0,22	10,23	3,89	12,86	0,22	2,16	-1,18	-0,08
b05t6	0,47	6,85	3,10	8,21	0,82	1,35	-0,96	-0,57
b05t8	0,70	4,68	2,62	5,66	1,02	0,89	-0,68	-0,78



Kuva 8. Jännityskomponenttien vertailu eri tarkastelupisteissä, sekä eri malleilla.

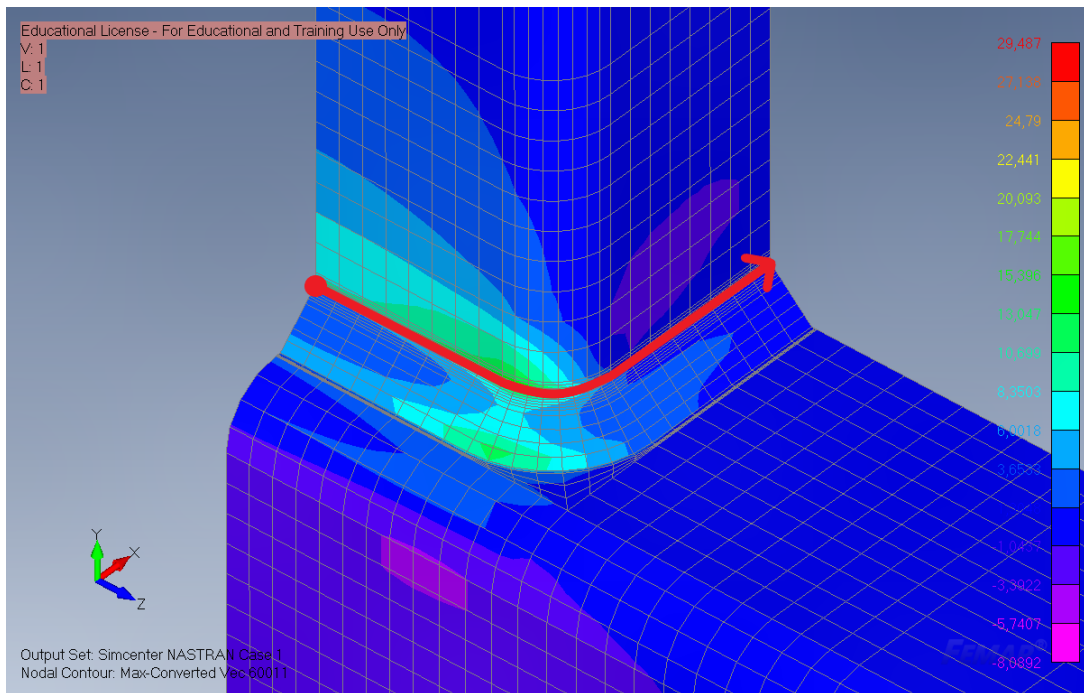
Jokaisesta tarkastelukohdasta saadaan myös kuvaajat eritellyistä jännityksistä. Kuvassa 9 näkyy esimerkiksi kuvaajat β -suhteen 0.5 ja 4 mm paksuuden mallista, nurkan vasemmalta puolelta (nurkan reuna X). Kuvassa näkyy myös hot spot-jännitys, joka tarkoittaa yhteenlas-kettuja komponentteja.



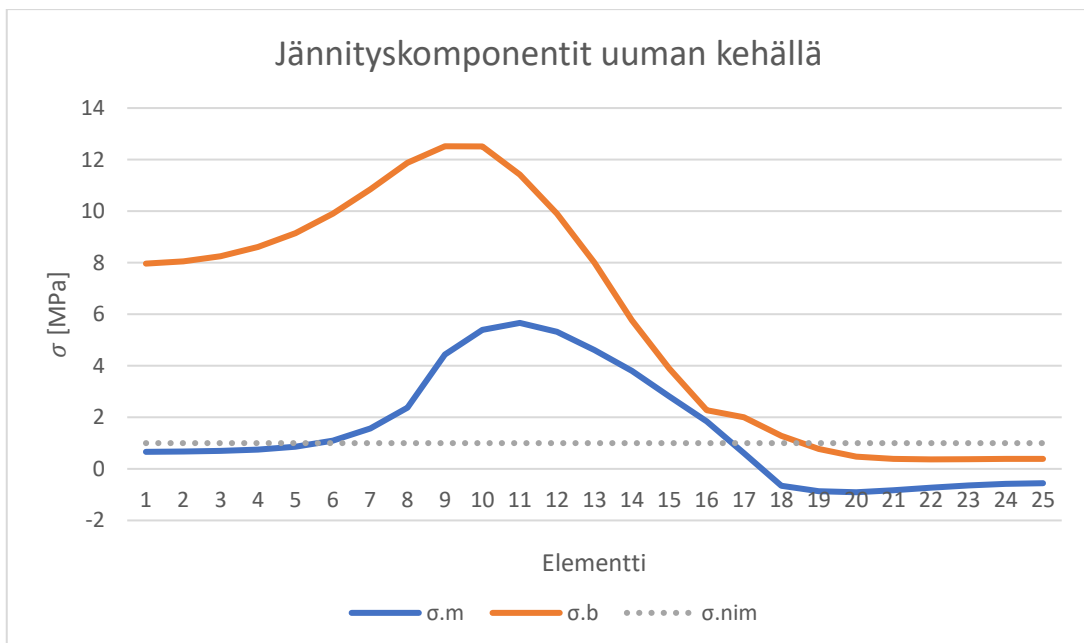
Kuva 9. Kuvaajat β -suhteen 0.5 ja 4 mm levynpaksuuden mallin jännityskomponenteista. Tarkastelukohta on nurkkapyöristykseen vieressä, kohtisuorassa paarteiden pituussuuntaan. Vaakasuoralla akselilla on jännitys [MPa] ja pystysuoralla koordinaatti levyn sisällä [mm].

4.3 Tarkempi jakauma

Samat jännitykset ja niiden komponentit laskettiin yhdellä mallilla jokaisesta elementistä uuman kehällä. Tähän valittiin neljän millin levyn ja 0,7 ulkomittasuhteen malli, koska siinä ilmeni suurin rakenteellinen jännitys, joten jakauman vaihtelut ovat korostuneempia. Kuvassa 10 esitetään mitattujen kohtien kulku ja kuvassa 11 on listattu saadut arvot. Arvokkain tulos tässä tarkemmassa tutkimuksessa on kuvaajien muodot, jotka kertovat mihin kohtiin kuormitukset keskittyvät.



Kuva 10. Tarkemmassa tarkastelussa käytetty malli. Jännitykset määritettiin jokaisesta elementistä punaisen nuolen osoittamassa järjestyksessä.



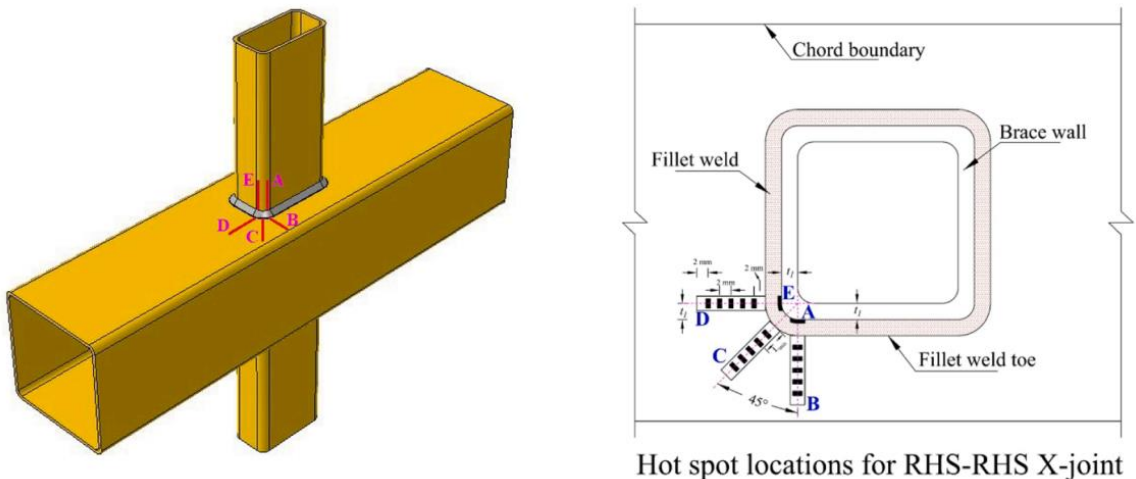
Kuva 11. Tarkat jakaumat kalvojännityksestä σ_m ja taivutusjännityksestä σ_b . Vertailun avuksi nimellinen jännitys σ_{nim} merkitty katkoviivalla. Vaakasuoralla akselilla on elementin numero uuman kehällä. Ääripäät ovat symmetriatasoilla, kun taas 9 ja 16 ovat nurkkapyöristyksen reunat.

5 Pohdinta

Tässä luvussa pohditaan ovatko tutkimusmenotit sekä saadut tulokset oikein. Tuloksista nostetaan esille mielenkiintoisia havaintoja ja pohditaan, minkä takia ilmiöt voisivat aiheutua. Lisäksi pohditaan mahdollisia jatkotutkimuksen alueita.

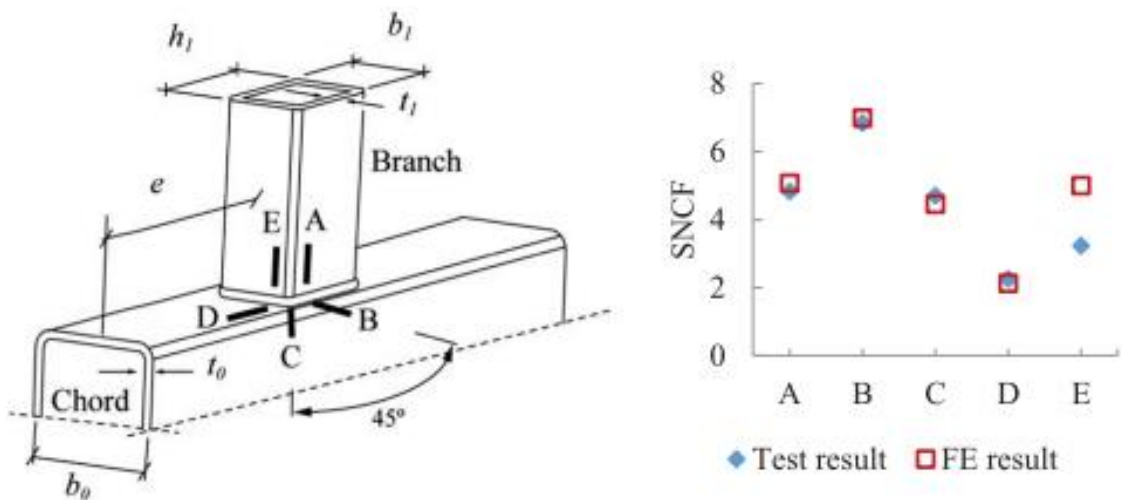
5.1 Tulosten vertailu

Pandey ja Young (2021, 1–31) ovat tehneet laboratorionkokeita, joissa kuormitettiin samantyyllisiä rakenteita. Putkien geometriat ovat hieman erilaisia, ja testissä mitattiin venymää eikä jännityksiä. Venymäliuskainstrumentointi näkyvissä kuvassa 12. Näin tehtiin koska kyseessä on käytännön testi, jossa jännitystä voidaan mitata vain välillisesti. Tulokset johtavat silti samaan johtopäätökseen, sillä Hooken lain mukaan jännitys ja venymä ovat suoraan verrannollisia kimmoisella alueella. Suurin rasitus sijoittuu samaan kohtaan kuin tässä työssä, eli nurkkapyöristyksen alueelle.



Kuva 12. Samantapaisen rakenteen laboratorionkokeessa havaittiin myös B- ja C-kohtat rasiittuneimmiksi. (Pandey & Young 2021, 3.)

Toisessa tutkimuksessa (Daneshvar et al., 2020) mitattiin myös rakenteellisia jännityksiä samantapaisissa rakenteissa venymäliuskoja käyttäen. Heidän testaama kuvan 13 malli on varsin samanlainen kuin tässä työssä, suurimpana erona että kuorma on puristusta, hitsinjuuri on jyrkempi paarteeseen päin ja uuman seinämän paksuus on ohuempi kuin paarteen. Tutkimuksessa todettiin suurin rakenteellinen jännitys jälleen samalle puolelle nurkkapyöristystä, joskin hitsin paarteen puolelle johtuen edellä mainituista eroista.



Kuva 13. Samankaltainen tutkimus, jossa havaitaan yhteneviä tuloksia. (Mukaillen Daneshvar et al. 2020, 4–6.)

5.2 Reliabiliteetti ja validiteetti

Tavoitteena on määrittää kyseisille liitoksille niiden kalvo- sekä rakenteelliset jännitykset. Komponenttien tunnistamisesta sekä laskemisesta on dokumentoitu monessa teoksessa (Fricke, 2013), (Hobbacher, 2013). Käytettyihin kaavoihin tarvitaan jännitysten suuruudet levyn läpi. Nämä arvot saadaan FE-analyysistä. Rajausten mukaan mallista saadaan tietoa neljästä eri kohtaa, joiden perusteella voidaan päätellä kuormitusten jakautumista. Tutkimuksessa mitataan siis oikeaa asiaa.

FE-mallin elementtiverkko on tarpeeksi hieno, että kuormitukset jakautuvat oikealla tavalla. Hobbacher (2013, 23) toteaa että käytettyjen kaavojen malleissa elementtokoko pitäisi olla

alle 0,4 kertaa levynpaksuus. Elementtijännitykset on muutettu solmujännityksiksi, jotta saataisiin suurin arvo aivan levyn pinnasta. Ainoat arvot jotka muuttuvat malleissa ovat tarkasteltavat suureet. Tutkittua asiaa mitataan oikein.

5.3 Johtopäätökset

Rakenteellinen jännitys kasvoi yllättävän suureksi nurkan alueella, jopa 17-kertaiseksi. Suurin esiintyvä jännitys on jonkin verran suurempi kuin hot spot-jännitys, johtuen epälineaarisesta jännityspiikistä. Paarreputken kyljen tasossa oleva puoli vaikuttaa kantavan enemmän kuormaa kuin toinen puoli. Tämä johtuu luultavasti siitä, että paarreputken sivut tietysti kantaa koko kuormaa, ja jos kyljet taipuvat yhtään sisäänpäin, siirtymästä aiheutuvat rasitukset vaikuttavat ensisijaisesti uumaputken samalle puolelle. Paarteen kylkien taipuminen sisäänpäin, kuten liitteessä 2 näkyy, selittää suuret sekundääriset taivutusjännitykset uuman samassa tasossa.

Mielenkiintoista on myös, että paarteeseen kohtisuora uuman kylki on suurilta osin puristuksen alaisena, mittasuhteista riippumatta. Paarteen keskellä kulkevan symmetriatason lähistöllä puristavaa kalvojännitystä on noin nimellisen kuorman verran. Koko toisella sivulla taivutuskomponentti on noin 7 kertainen nimelliseen kuormaan verrattuna, mutta kalvokomponentti nousee vain nurkan alueella noin kolminkertaiseksi. Jännityksiä on helpointa vertailla kuvassa 8.

Rakenteiden mitoituksessa kriittisin piste on siis uumapalkin nurkkapyörityksen kohdalla. Tulosten perusteella jännitysten suuruuteen vaikuttaa oleellisesti levynpaksuus, ei niinkään putkien ulkomittojen suhde. Yleisesti eri β -suhteilla ja samalla levyn paksuudella, kokonaisnormaalijännitykset ovat lähes samat. Pienemmällä leveysuhteella kalvokomponentit ovat hieman pienempiä ja taivutuskomponentit hiukkasen suurempia. Yleisesti paksummalla levyllä kalvokuormitus kasvaa, kun taas taivutuskuorma laskee. Vaihtelu on laajempaa taivutuskomponentissa, ja jännitys kasvaa huomattavasti enemmän mentäessä kuudesta neljän

millin paksuuteen kuin kahdeksasta kuuteen. Kokonaisjännitys siis oletetusti laskee, kun levynpaksuus kasvaa.

5.4 Jatkotutkimus

Jos työ aloitettaisiin alusta uudestaan, voisi elementteihin jakamisessa olla hieman huolellisempi. Hitsin a-mitan sisälle jäi pari kolmiosivusta elementtiä, vaikka tarkoituksena oli tehdä nelisivuisia. Ohuemman uuman mallissa paarteen ylätasolle muodostui leveämpiä elementtejä kuin sivuille. Tämä johtui siitä, että nurkkapyöröstys koitettiin saada mahdollisemman symmetriseksi ja paarre pursotettiin siitä jatkaen. Lisäksi levypaksuutta kasvattaessa pursotetuista elementeistä tuli kooltaan kaksinkertaisia paksuuden suunnassa. Kaikki nämä poikkeavuudet ideaalisesta rakenteesta ovat enemmänkin kosmeettisia, eikä niillä pitäisi olla merkittävää vaikutusta tuloksiin. Elementtiverkko on kaikissa kriittisissä kohdissa tarpeeksi hieno ja symmetrinen tämän tutkimuksen tarkoituksiin.

Lisäksi elementit olisi voinut jakaa uumaputken ulkopinnalle siten, että hs-jännityksen voisi laskea myös pintaa pitkin lineaarisen extrapolointimenetelmän avulla. Sitä varten pitäisi lukea jännitykset esimerkiksi etäisyydeltä 0,4 ja 1,0 kertaa levynpaksuus (Hobbacher, s.23). Saatuja tuloksia sekä menetelmiä voitaisiin siten vertailla keskenään.

Kalvojännityksen ja sekundäärisen taivutusjännityksen jälkeen luonnollisesti seuraava tutkimuksen aihe on tertiäärinen lovijännitys σ_{nl} , eli paksuuden yli epälineaarinen jakauma. On olemassa samantapainen kaava kuin tässä työssä käytetyt, kaavat (1) ja (2), jolla lovijännitys voitaisiin laskea. Jopa samaa dataa voitaisiin käyttää laskemisessa, mutta mallissa käytetty verkko on luultavasti liian karkea merkityksellisten tulosten saamiseen. Toinen aihealue voisi olla samantyylinen tutkimus, mutta taivutuskuormituksen kanssa.

5.5 Yhteenveto

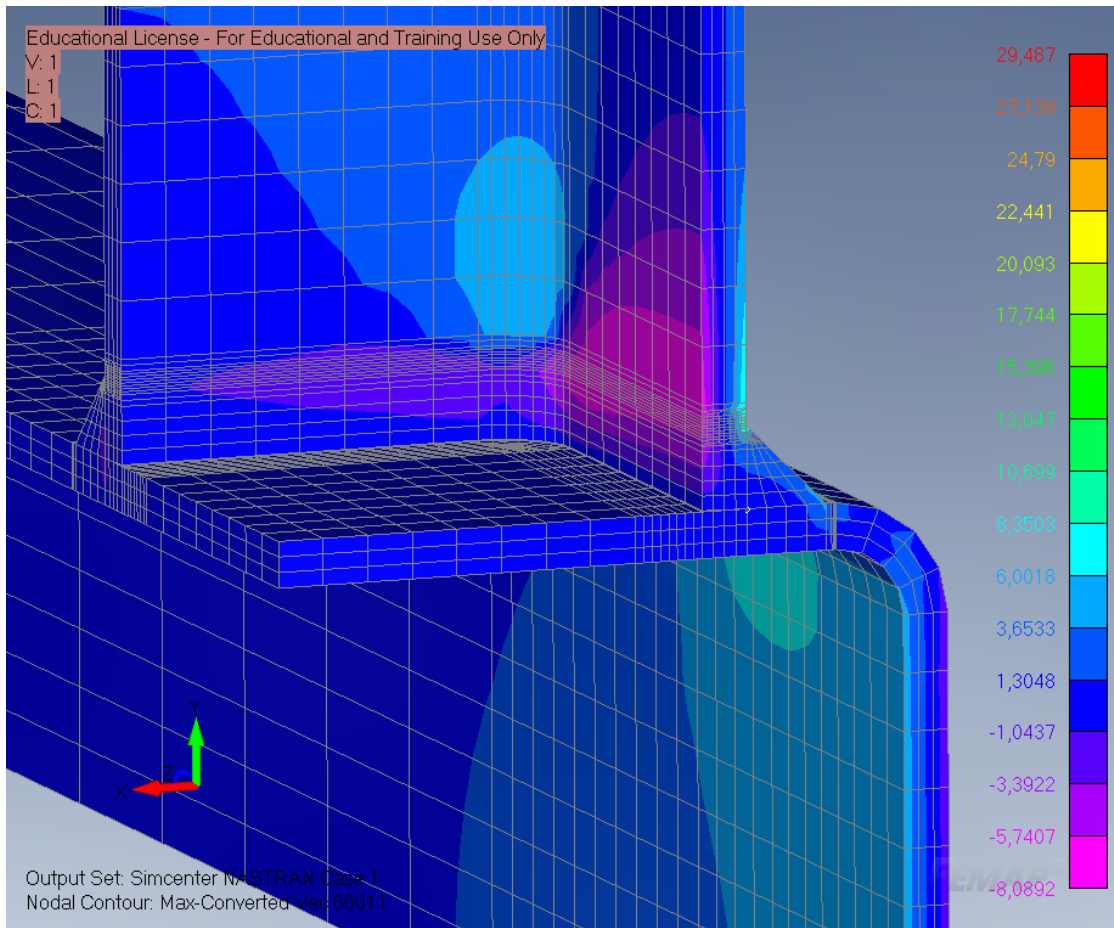
Tutkimuksessa luotiin neliöputkien hitsiliitoksesta kuusi 3D-mallia eri mittasuhteilla, kolmella eri levyypaksuudella ja kahdella ulkomittojen suhteella. Malleista määritettiin jännitykset FE-analyysillä, jossa symmetriaa hyödyntämällä voitiin tarkastella kahdeksasosamallia. Tarkoituksena oli selvittää liitoksen sekundääriset kalvo- ja taivutuskomponentit. Nämä laskettiin neljästä eri tarkastelukohdasta. Lisäksi yhdestä mallista tehtiin tarkempi analyysi, jotta saataisiin parempi ymmärrys kuormitusten jakautumisesta liitoksen alueella. Halutut tulokset saatiin laskettua ja kuvaajien avulla voidaan tehdä johtopäätöksiä siitä, miten geometriamuuttujat vaikuttavat jännityksiin.

Lähteet

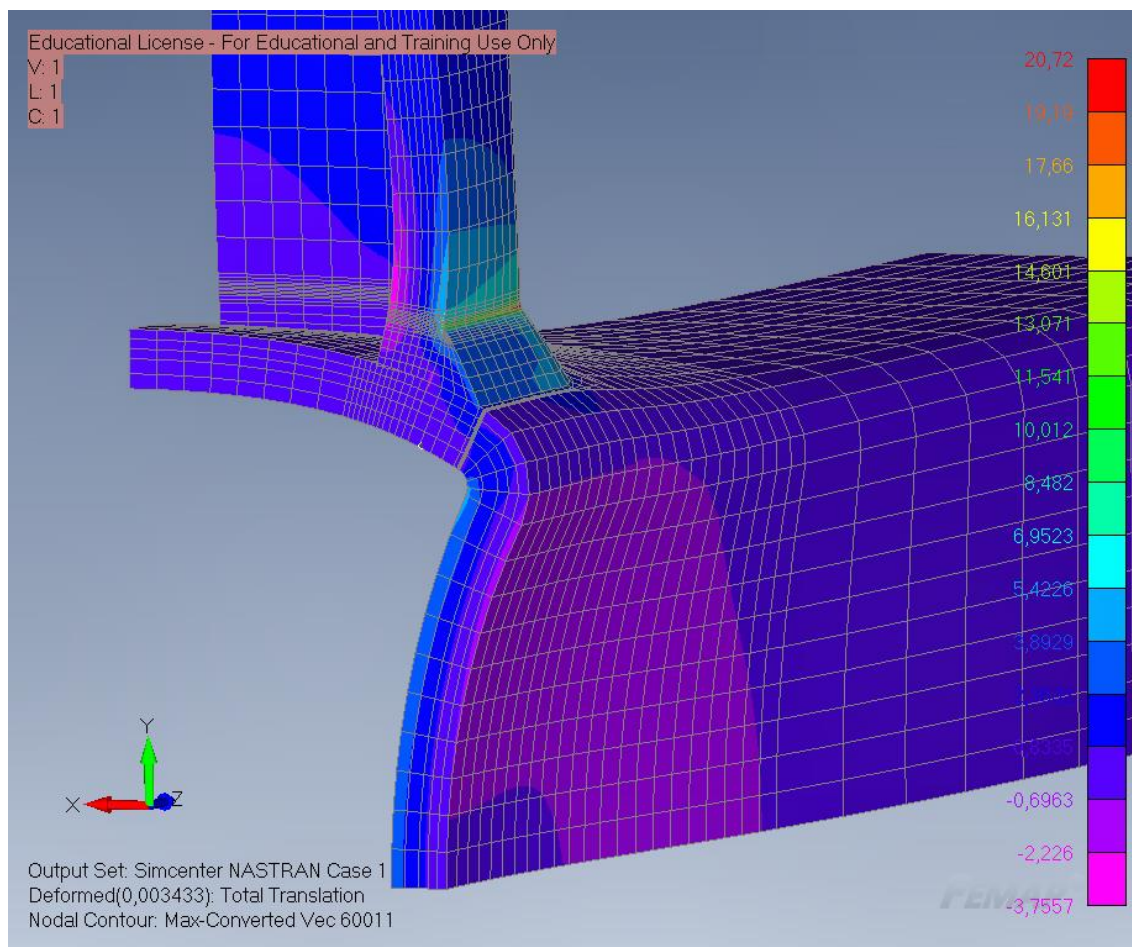
- Daneshvar, S. et al. (2020) Stress concentration factors for RHS-to-RHS X-connections near an open chord end. *Journal of constructional steel research*. 175. s. 4–6.
- Fricke, W. (2013) IIW guideline for the assessment of weld root fatigue. *Welding in the world*. 57 (6), s. 761.
- Hobbacher, A. 2013. Recommendations for fatigue design of welded joints and components. IIW-document XIII-2460-13/XV-1440-13. s. 12–27
- Kuhn, J. et al. 2019. Rectangular hollow section webs under transverse compression. *Canadian journal of civil engineering*. 46 (9), s. 813
- Niemi, E. et al. 2018. Structural Hot-Spot Stress Approach to Fatigue Analysis of Welded Components Designer's Guide. 2nd ed. 2018. Singapore: Springer Singapore. s. 5–12
- 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
- SFS-EN 10210-2. 2019. Kuumamuovattut teräksiset rakenneputket. Osa 2: Toleranssit, mitat ja poikkileikkaussuureet. Vahvistettu 17.05.2019. s. 4–12
- Werkle, H. 2021. Finite elements in structural analysis: theoretical concepts and modeling procedures in statics and dynamics of structures. Cham, Switzerland: Springer. s. 1–217
- Zienkiewicz, O. C. et al. (2013) The finite element method: its basis and fundamentals. Seventh edition. Oxford, UK: Butterworth-Heinemann. s. 1–14

Liitteet

Liite 1. Malli ja jännitysjaumat hitsin takapuolelta.



Liite 2. Malli muodonmuutostilassa.



Liite 3. Mathcad-ohjelma, jolla lasketaan komponentit.

$$x_{\text{data}} := \begin{pmatrix} 0 \\ 0.5 \\ 1 \\ 1.5 \\ 2 \\ 2.5 \\ 3 \\ 3.5 \\ 4 \end{pmatrix} \quad \sigma_{\text{data}} := \begin{pmatrix} 27.44423 \\ 11.37012 \\ 8.06615 \\ 5.074811 \\ 2.817276 \\ 0.700408 \\ -2.321952 \\ -4.652845 \\ -7.381939 \end{pmatrix} \quad t := 4$$

$$x := 0, 0.5.. t$$

$$\sigma(x) := \text{linterp}(x_{\text{data}}, \sigma_{\text{data}}, x)$$

$$\sigma_m := \frac{1}{t} \cdot \int_0^t \sigma(x) \, dx = 3.886$$

$$\sigma_b := \frac{6}{t^2} \cdot \int_0^t (\sigma(x) - \sigma_m) \cdot \left(\frac{t}{2} - x\right) \, dx = 12.85991$$

$\sigma(x) =$

27.444
11.37
8.066
5.075
2.817
0.7
-2.322
-4.653
-7.382

Liite 4. Tulostaulukko.

symx				nurkkax				nurkkaz				symz				
X	sincent	sig_m	sig_b	X	sincent	sig_m	sig_b	Z	sincent	sig_m	sig_b	Z	sincent	sig_m	sig_b	
b07t4																
	0	13,50645	0,656	7,97081	0	27,70187	4,435	12,51693	42	4,364465	0,606	1,99724	42	-0,124282	-0,555	0,38766
	0,5	5,611646			0,5	11,6542			41,5	1,653274			41,5	-0,264248		
	1	3,718827			1	8,441653			41	1,142221			41	-0,374792		
	1,5	1,778095			1,5	5,528553			40,5	0,788667			40,5	-0,476571		
	2	0,141343			2	3,354679			40	0,583626			40	-0,563505		
	2,5	-1,55874			2,5	1,32327			39,5	0,435839			39,5	-0,647097		
	3	-3,125841			3	-1,608747			39	-0,503911			39	-0,734707		
	3,5	-4,773255			3,5	-3,840377			38,5	-0,839299			38,5	-0,83482		
	4	-6,58857			4	-6,45362			38	-1,188897			38	-0,960467		
b07t6																
	0	12,57593	0,792	6,09024	0	22,54587	3,521	8,20268	42	5,238252	1,209	1,27014	42	-0,741817	-0,52	-0,07703
	0,5	5,544917			0,5	9,894053			41,5	2,282106			41,5	-0,532768		
	1	4,198831			1	7,670006			41	1,779628			41	-0,54326		
	1,5	2,901526			1,5	5,745444			40,5	1,399789			40,5	-0,547085		
	2	1,944053			2	4,466648			40	1,175362			40	-0,550656		
	2,5	1,086092			2,5	3,423927			39,5	1,003506			39,5	-0,542396		
	3	0,308342			3	2,55073			39	0,869548			39	-0,526706		
	3,5	-0,549111			3,5	1,745713			38,5	0,754753			38,5	-0,505625		
	4	-1,2962			4	0,971743			38	0,65542			38	-0,487908		
	5	-2,833921			5	-1,314114			37	0,509203			37	-0,456322		
	6	-4,609356			6	-3,351305			36	0,622236			36	-0,470841		
b07t8																
	0	11,98223	0,91	4,72424	0	19,63722	2,972	5,95117	42	5,913925	1,31	1,27867	42	-1,134743	-0,426	-0,37875
	0,5	5,322439			0,5	8,706868			41,5	2,68394			41,5	-0,701172		
	1	4,155468			1	6,886551			41	2,155688			41	-0,661297		
	1,5	3,094213			1,5	5,359283			40,5	1,74758			40,5	-0,625122		
	2	2,376436			2	4,39944			40	1,507811			40	-0,593324		
	2,5	1,774581			2,5	3,631535			39,5	1,323468			39,5	-0,558703		
	3	1,268179			3	3,016815			39	1,181915			39	-0,517657		
	3,5	0,810181			3,5	2,484781			38,5	1,063419			38,5	-0,470391		
	4	0,386017			4	2,01408			38	0,962515			38	-0,422835		
	5	-0,500487			5	1,263213			37	0,799464			37	-0,320966		
	6	-1,250275			6	0,554959			36	0,656002			36	-0,227978		
	7	-2,09729			7	-0,794682			35	0,549216			35	-0,148358		
	8	-3,111781			8	-1,821196			34	0,884218			34	-0,0882229		

Liite 5. Kuva jokaisesta mallista.

