

Lasse Törmänen

OHUTLEVYKENNORAKENTEEN FEM-ANALYYSI

OHUTLEVYKENNORAKENTEEN FEM-ANALYYSI

Lasse Törmänen
Opinnäytetyö
Kevät 2016
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma
Oulun ammattikorkeakoulu

TIIVISTELMÄ

Oulun ammattikorkeakoulu
Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma, koneautomaatio

Tekijä: Lasse Törmänen
Opinnäytetyön nimi: Ohutlevykennorakenteen FEM-analyysi
Työn ohjaaja: Kai Jokinen
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: kevät 2016 Sivumäärä: 59 + 0 liitettä

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin FEM-analyysin soveltuvuutta ohutlevykennorakenteiden kuormituksen tutkimiseen. Työn tilaajana toimi Kenno Tech Oy. Työn tarkoituksena oli simuloida ohutlevykennorakenteiden eri kuormitustilanteita FEM-ohjelmistossa ja vertailla tuloksia käytännön kokeisiin. Käytännön koheet jäivät aikataulullisten ongelmien vuoksi suorittamatta.

Työssä suoritettiin FEM-analyysit eri rakenteille ja materiaalivaihtoehdoille Solidworksin simulaatiotyökalulla ja esisuunniteltiin koejärjestelyjä. Opinnäytetyössä ratkaistiin myös kennorakenteiden geometriamallien simulointivalmisteluiden ongelmia. Analyyseissä saatiin rakenteiden siirtymän ja voiman välille yhteys. Simuloinneissa saatiin selville myös karkeat arviot voiman maksimiarvoille rakenteiden eri kuormitustapauksissa.

Elementtimenetelmän käyttö osoittautui erinomaiseksi työkaluksi rakenteen jäykkyyden ja jännityshuippujen tutkimiseen. Kennorakenteiden suurimman rasituksen määrittämiseksi sen soveltuvuus on kuitenkin heikko, koska rakenteisiin kohdistuu suuria paikallisia jännityshuippuja erityisesti teräviin nurkkiin tai hitsausseamoihin kuormitustapauksen mukaan mallista riippuen.

Työn tuloksia voidaan kuitenkin käyttää hyväksi rakenteen jännityshuippujen paikan määrittämiseen rakenteen suunnittelussa. Simulointimalleissa voidaan myös helposti vaihtaa kuormitusta ja tuentatapaa, mikä mahdollistaa eri kuormitustapausten arvioitujen maksimijännitysten määrittämisen.

Asiasanat: ohutlevykennorakenne, elementtimenetelmä, FEM, Solidworks

ALKULAUSE

Haluan välittää vilpittömät kiitokset tämän opinnäytetyön mahdollistaneelle Kenno Tech Oy:lle sekä opinnäytetyön ohjaajalle yliopettaja Kai Jokiselle. Eri-tyiskiitokset myös lehtori Esa Kontiolle korvaamattomasta avusta Solidworksin saralla sekä laboratorioinsinööri Janne Ilomäelle käytännön järjestelyistä.

Suurimmat kiitokset kuuluvat oikeutetusti avopuolisolleni, joka jaksoi kannustaa opinnäytetyön teossa vaikeuksista ja vastoinkäymisistä huolimatta.

Oulussa 27.4.2016.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
SISÄLLYS	5
1 JOHDANTO	6
1.1 Kenno Tech Oy	6
1.2 Työn tavoitteet	6
2 ELEMENTTIMENETELMÄ	7
2.1 Historiaa	7
2.2 Elementtityypit	8
2.3 Elementin valinta	8
2.4 Solidworks Finite Elements Analysis	9
3 OHUTLEVYRAKENTEEN KUORMITUS	11
3.1 Plastinen muodonmuutos	11
3.2 Ideaalisen levyn lommahdus	13
4 OHUTLEVYKENNORAKENNE	16
4.1 Käyttömahdollisuudet	16
4.2 Tutkittavat kennorakenteet	16
4.2.1 Yhteen suuntaan jäykkä kennorakenne	17
4.2.2 Kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne	17
5 LEVYRAKENTEIDEN FEM-ANALYYSIT	19
5.1 Geometriamallien muokkaus simulointia varten	19
5.2 Geometrian käsittely simulaatiotyökalussa	25
5.3 Puristustestit	28
5.4 Lommahdustestit	39
5.5 Taivutustestit	40
6 KOEJÄRJESTELYISTÄ	50
6.1 Käytännön kokeet	50
6.2 Taulukointi	51
6.3 Erytishuomioita käytännön kokeisiin	53
7 YHTEENVETO	55
LÄHTEET	58

1 JOHDANTO

Opinnäytetyössä tutkitaan Solidworksin Simulation-työkalun FEM-analyysin soveltuvuutta ohutlevykennolevyrakenteen kuormituksen mallintamiseen. Työn tuloksia voidaan käyttää suunniteltaessa ohutlevykenno- rakenteiden käyttökel- poisuutta erilaisissa käyttötarkoituksissa.

1.1 Kenno Tech Oy

Kenno Tech Oy on vuonna 2012 perustettu riihimäkeläinen konepajayritys. Kenno Tech keskittyy laserhitsattujen kerroslevyelementtien valmistukseen, suunnitteluun ja tuotekehitykseen. Yrityksen päätuotteita ovat teollisuuden tehokkaat lämmönvaihdinelementit, muut laserhitsatut kerroslevyrakenteet sekä ballistista suojaa tarjoavat suojaratkaisut. (Laserhitsatut kerroslevyt vaativiin sovellutuksiin.)

1.2 Työn tavoitteet

Ohutlevykenno- rakenteiden rasitusten laskeminen on erittäin vaikeaa. Käsien las- keminen vaatii erikoisasiantuntijan tekemiä lujuuslaskelmia ja kuoriteorian hal- lintaa. Elementtimenetelmäohjelmistojen käyttö on yleistä, koska ohjelmistot nopeuttavat huomattavasti lujuuslaskelmia. Ohjelman antamat tulokset ovat kuitenkin likimääräisiä ja käyttö vaatii ammattitaitoa, minkä vuoksi ohjelman an- tamiin tuloksiin tulee suhtautua kriittisesti.

Työn tavoitteena on saada yhteys käytännön kokeiden ja FEM-analyysimallien välille kennolevyrakenteiden suunnittelussa. Tämä mahdollistaa kennolevyra- kenteiden käyttämisen erinäisissä sovelluksissa, kun vertailtavuus FEM- analyysin ja käytännön rasituksen välillä on selvitetty. Käytännön kokeet suori- tetaan kuitenkin aikataulullisista syistä tämän opinnäytetyön ulkopuolella.

Työssä käytetään Solidworksin Simulation-työkalua FEM-ohjelmistona. Kenno- rakenteiden piirustuksia tai ultralujan teräksen materiaalitietoja ei julkaista tässä työssä tilaajan toivomuksen mukaisesti.

2 ELEMENTTIMENETELMÄ

Elementtimenetelmä (FEM, FEA) on numeerinen menetelmä insinöörin maattisen fysiikan ongelmien ratkaisuun. Tyypillisimpiä ongelmia ovat rakenneanalyysi, lämmön johtuminen, nestevirtaus, massan liike ja sähkömagneettinen potentiaali. (Logan 2007, 1.) Tämä luku käsittelee ainoastaan rakenneanalyysiä.

Tyypillisesti rakenteellista rasitusongelmaa tutkittaessa pyritään määrittämään siirtymät ja jännitykset koko rakenteessa. Useissa rakenteissa on vaikeaa määrittellä siirtymä ja muodonmuutos perinteisin menetelmin. Tämän vuoksi elementtimenetelmän käyttö on välttämätöntä. (Logan 2007, 7.)

FEA perustuu geometriamallin jakamiseen pieniin toisiinsa liitettyihin elementteihin. Tätä yksittäisten elementtien joukkoa kutsutaan elementtiverkoksi. Jokaisen elementin välille muodostuu siirtymäfunktio. Jokainen toisissaan kiinni oleva elementti on liitetty toisiinsa joko suorasti tai epäsuorasti yhteisen pisteen tai/ja reunaviivan ja/tai pinnan suhteen. Käyttämällä tunnettua voimaa tai rasitusta voidaan määrittää pisteen käyttäytyminen minkä tahansa muun rakenteen pisteen suhteen. (Logan 2007, 8.)

2.1 Historiaa

Nykyaikaisen elementtimenetelmän kehittelyn aloittivat 1940-luvulla Hrennikoff ja McHenry. He käyttivät yksiulotteisia viivoja ja palkkeja kiinteiden ja jatkuvien kappaleiden jännitysten laskemiseen. Vuonna 1943 Courant ehdotti jännitysten asettamista vaihtelevissa muodoissa. Hän esitti myös funktioita kolmiulotteiselle muodolle, mikä loi aivan uuden aluevaltauksen numeeristen ratkaisujen laskemiseen. (Logan 2007, 2.)

Elementtimenetelmää käytettiin ensimmäisenä lentokoneiteollisuudessa, mutta se levisi pian kone- ja rakennusteollisuuden käyttöön. Menetelmä kehittyi nopeasti 1960- ja 1970-luvulla tietokoneiden mukana. Ohjelmistot toimivat kuitenkin vain suurilla keskustietokoneilla. 1980-luvulla ohjelmistoihin tuli käyttäjäystävällisempiä esi- ja jälkikäsitteilyohjelmistoja, minkä vuoksi niistä tuli käyttökelpoisia myös mikrotietokoneilla. Nykyaikaiset ohjelmistot osaavat laskea lineaaris-

ten lujuusopillisten tapausten lisäksi myös epälineaarista käyttäytymistä. (Lähteenmäki 2012, 1.)

2.2 Elementtityypit

Elementtimenetelmäohjelmistoissa on nykypäivänä laaja valikoima erilaisia elementtityyppejä, joista kukin perustuu vastaavaan lujuusopin teoriaan. Elementtityyppejä saattaa olla joidenkin markkinoilla olevien ohjelmistojen kirjastoissa jopa satoja, mutta vain noin parikymmentä peruselementtiä on vakiinnuttanut asemansa. Elementtejä voidaan myös yhdistellä yhden mallin sisällä ja tämä tekee menetelmän käytöstä joustavaa. (Lähteenmäki 2012, 2.)

Elementtityyppejä voi jaotella lujuusopin teorian mukaisesti rakennetyypeittäin. Elementit voidaan jakaa seitsemään ryhmään:

- sauvaelementit
- palkkielementit
- 2D-solidielementit
- laattaelementit
- kuorielementit
- 3D-solidielementit
- erityiselementit.

Elementtien menestyksellä käyttö vaatii jokaisen eri elementin lujuusopillisen sekä elementtimenetelmän teorian tuntemusta. Jokaisen elementtityypin käyttöön sisältyy olettamuksia ja rajoituksia. Tämän vuoksi olisi aina perehdyttävä käytetyn elementtityypin teoriaan ennen elementtimenetelmäohjelmiston käyttöä. (Lähteenmäki 2012, 9–10.)

2.3 Elementin valinta

FEM-laskentamallit voidaan jakaa kolmeen eri tyyppiin:

- keskiviiva- eli 1D-malliin
- keskipinta- eli 2D-malliin
- solidi- eli 3D-malliin.

Keskipintamallia käytetään sauva- ja palkkirakenteisiin. Keskiviivamallia käytetään levy-, laatta- ja kuorimalleihin. Solidimalleja käytetään yleensä silloin, kun kahta edellä mainittua ei voida käyttää mallin geometrian vuoksi. (Lähteenmäki 2012, 11.)

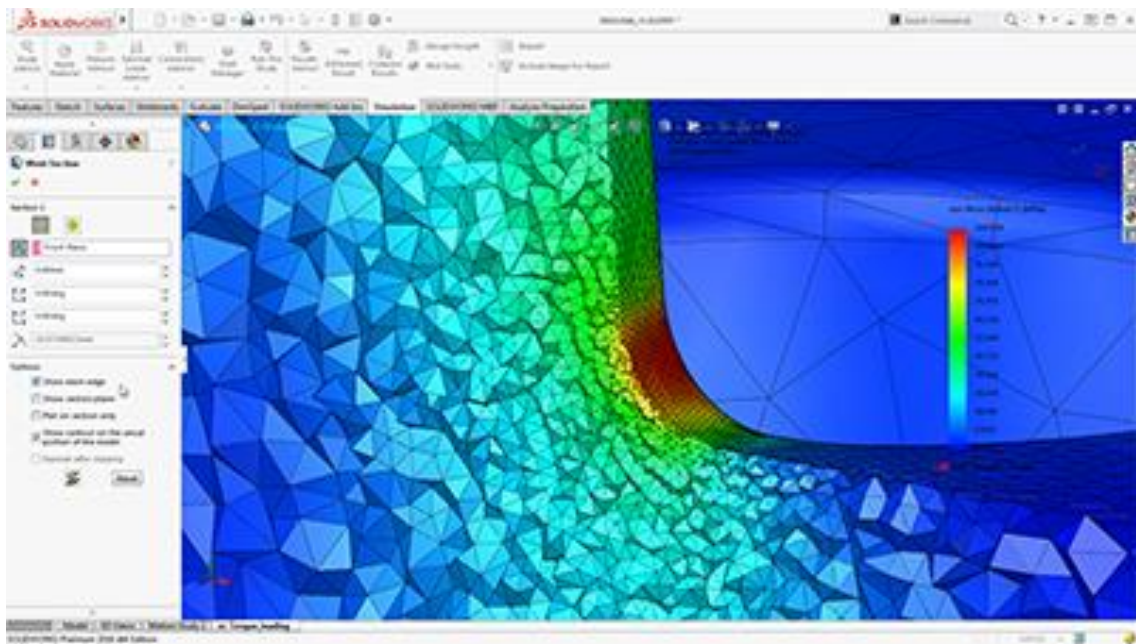
Elementin valinta on tehtävä jo laskennan alkuvaiheessa. Mallin geometria ja elementtiverkon luonti on otettava huomioon haluttujen tulosten saavuttamiseksi. Tämä on välttämätöntä myös tehokkaan laskennan saavuttamiseksi. (Lähteenmäki 2012, 11.)

Tarkan geometriamallin käyttö FEM-laskennassa on usein epäedullista ja hyvin raskasta ratkaista tavallisella tietokoneella. 3D-malliin on usein tehtävä valitun elementin vaatimia yksinkertaistuksia. Geometriamalli saatetaan joutua myös luomaan täysin uudestaan. Yksinkertaistettu malli antaa kyseisen elementin lujuusopillisen teorian mukaisen likimääräisratkaisun. (Lähteenmäki 2012, 1.)

2.4 Solidworks Finite Elements Analysis

Solidworksin simulointiohjelmisto käyttää siirtymäkaavioita laskiessaan komponenttien siirtymiä, vääntymiä ja rasituksia sisäisten ja ulkoisten rasitusten alaisena. Analysoitava geometria jaetaan tetraedri-, kolmio- ja sauvaelementteihin. Tämän jaon ohjelma tekee automaattisesti annettujen parametrien mukaisesti. (Finite Element Analysis | SOLIDWORKS 2016.)

Kuvassa 1 nähdään esimerkki Solidworksin luomasta elementtiverkosta, jossa näkyy elementtiverkoksi luotu geometriamalli rasituksen alaisena. Mallin pyöristyksen sisäreuna on kuvassa suurimman jännityksen alaisena. Tähän kohtaan ohjelmaan on myös luotu tiheämpi elementtiverkko kuin muussa rakenteen näkyvässä osassa.



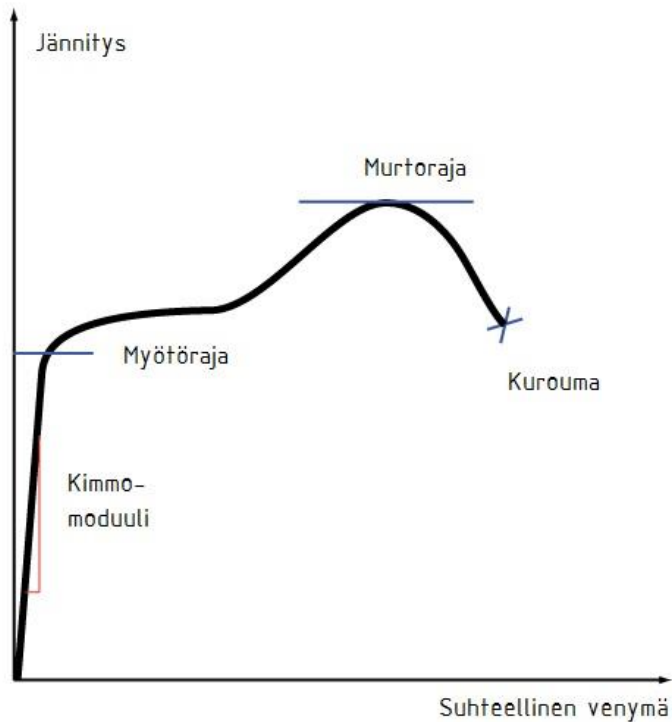
KUVA 1. Elementtiverkko Solidworksissa (Finite Element Analysis | SOLIDWORKS 2016)

3 OHUTLEVYRAKENTEEN KUORMITUS

Tässä opinnäytetyössä tarkasteltavien profiilien rasitusta tutkittaessa on otettava huomioon staattinen kuormitus ja ytimen lommahtaminen. Käytännön kokeet ja huomiot levyrakenteiden käyttäytymisestä ovat osoittaneet, että rakenteen ytimiin syntyy suuria paikallisia jännityksiä. Pienet paikalliset jännitykset eivät kuitenkaan vaikuta rakenteen ulkomittoihin. Kuormituksen kasvaessa rakenteet hajoavat lopulta ytimien lommahtamisella. (Pekkanen 2016.)

3.1 Plastinen muodonmuutos

Plastisella muodonmuutoksella tarkoitetaan kappaleen muodon pysyvää muuttamista. Kimmoinen muodonmuutos on palautuvaa muodonmuutosta. Kimmoisen ja plastisen muodonmuutoksen rajaa kutsutaan kimmorajaksi. Koska tarkkaa kimmorajaa on käytännössä mahdotonta määrittää, käytetään plastisen muodonmuutoksen alkamiskohtana myötörajaa. Teräksen suurin sallittu jännitys staattisessa kuormituksessa saadaan jakamalla myötöraja varmuusluvulla. Varmuuslukuna käytetään yleensä arvoa 1,3...1,5 myötörajaan nähden. (Koivisto – Laitinen – Niinimäki – Tiainen – Tiilikka – Tuomikoski 2008, 64.) Kuvassa 2 nähdään teräkselle tyypillinen voima-venymäpiirros.



KUVA 2. Teräksen voima-venymäpiirros

Kimmorajaa alhaisemmalla venymällä jännityksen ja muodonmuutoksen välistä yhteyttä kuvaa kaavan 1 mukainen Hooken laki (Koivisto ym. 2008, 64.).

$$R = Ee$$

KAAVA 1

R = jännitys

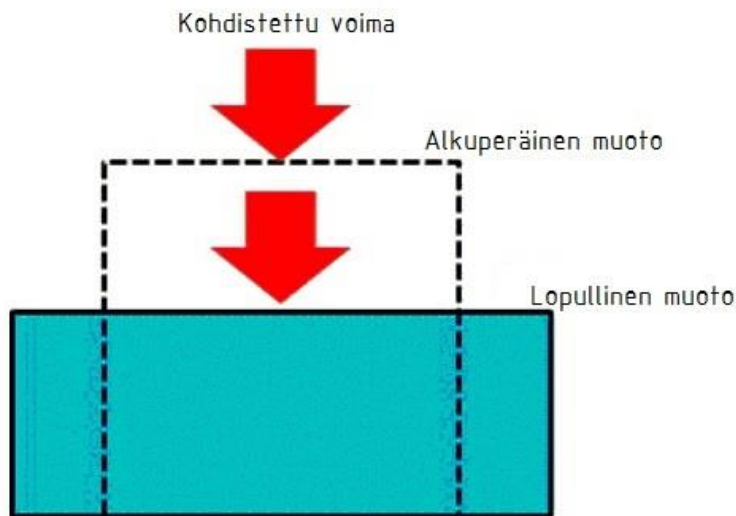
E = kimmomoduuli

e = suhteellinen venymä.

Materiaali on sitä jäykempää, mitä suurempi kimmomoduuli on. Tavalliselle teräkselle käytetään yleensä kimmomoduulin arvoa $206\,000\text{ N/mm}^2$. (Koivisto ym. 2008, 64.)

Poissonin luku vaikuttaa rakenteen kohtisuorien muodonmuutosten väliseen yhteyteen. Luku voi teoreettisesti tarkasteltuna olla lukujen 0...5 välillä. Poissonin luku on 0, jos rakenteeseen ei synny lainkaan muodonmuutoksia voimaa kohtisuorassa olevaan suuntaan. Luku on 0,5, jos kohtisuora muodonmuutos pitää kappaleen tilavuuden vakiona. Teräkselle käytetään usein lukua 0,3. (Saa-

rineva 1995, 4.5). Kuva 3 havainnollistaa kappaleen kohtisuoraa muodonmuutosta.

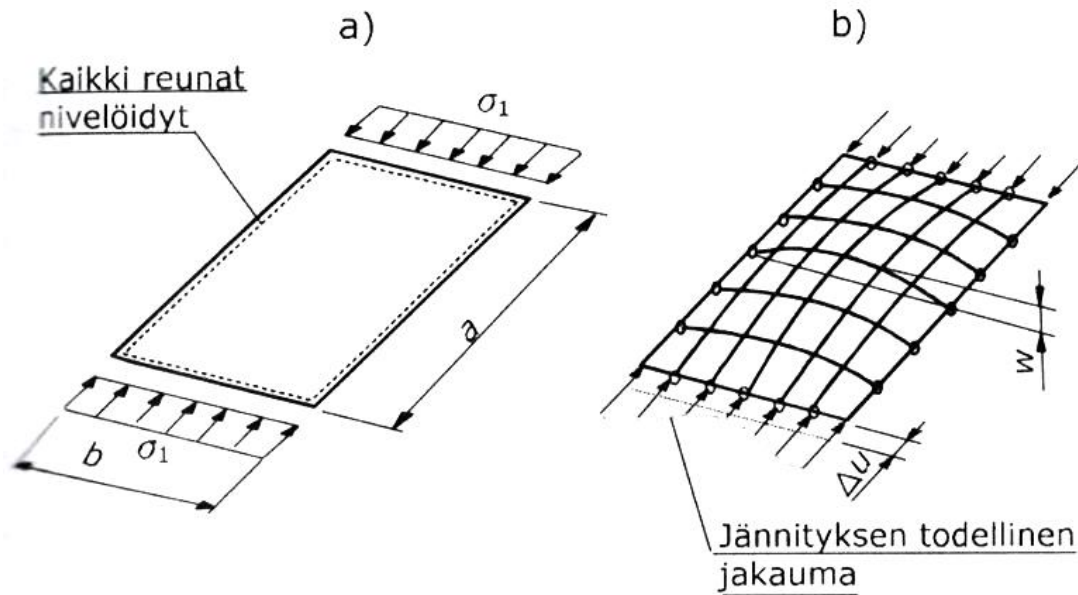


KUVA 3. Kappaleen muodonmuutos kohtisuoraan voimaan nähden

3.2 Ideaalisen levyn lommahdus

Ohutlevyrakennetta suunniteltaessa on otettava huomioon, että puristuksen alaiset levykentät saattavat lommahtaa heikentäen rakenteen kestävyyttä. Ohutlevyille tyypillistä on se, että levyn pituuden ja leveyden suhde on suuri levyn paksuuteen nähden. Lommahdus tapahtuu yleensä myötörajaa jo huomattavasti alhaisemmassa jännityksessä. (Niemi 2003, 17.)

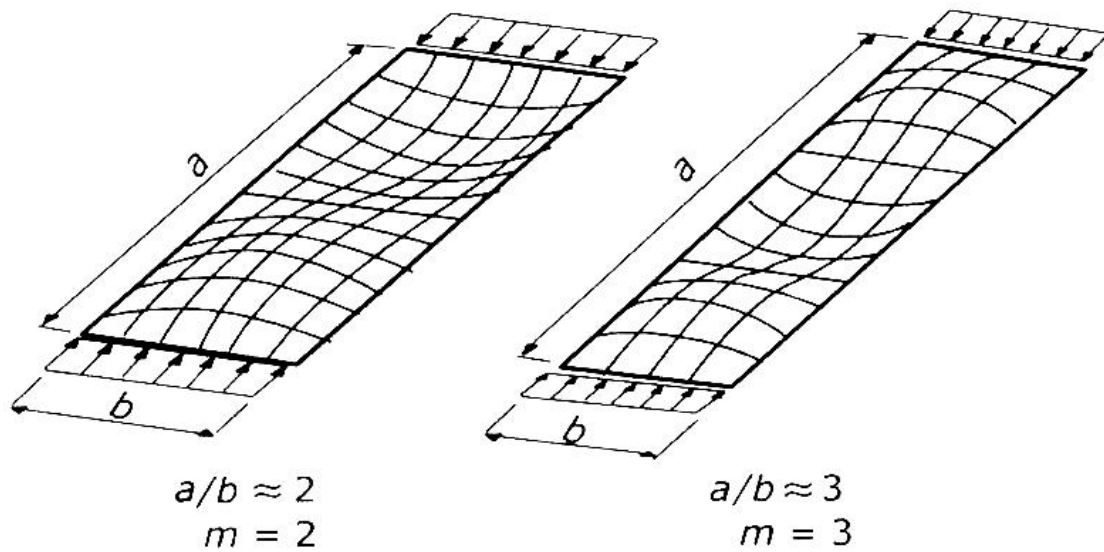
Ideaalisella levyllä tarkoitetaan täysin kimmoisasta aineesta tehtyä, ideaalisen suoraa levyä, jossa ei ole lainkaan jäännösjännityksiä (Niemi 2003, 17). Kuvassa 4 tarkastellaan ideaalista suorakaiteen muotoista levyä, joka on tuettu nivellisesti ja johon kohdistuu vastakkaisilta sivuilta puristava kalvojännitys σ_1 . Kuvassa on levy ennen lommahdusta ja lommahduksen jälkeen.



KUVA 4. Ideaalisen lommahduksen perustapaus (Niemi 2003, 17)

Levyä puristettaessa jännitys kasvaa lineaarisesti kriittiseen pisteeseen asti. Levy puristuu kimmoisesti kokoon ja laajenee sivusuunnassa, mutta pysyy edelleen suorana. Kun jännitys on noussut kriittisen suureksi, levyn tasapainoasema on indifferentti eli epästabili. Tällöin levyyn kohdistuva pienikin häiriö saa levyn taipumaan siniaallon mukaisesti jompaankumpaan suuntaan. Levyn lommahdus on sukua puristussauvan nurjahdukselle, mutta levyn tapauksessa lommahdus ei tapahdu levyn koko pituudelta. (Niemi 2003, 17.)

Tarkastellaan kuvassa 5 ideaalisen lommahduksen perustapausta tilanteessa, jossa sivun a pituus on huomattavasti pidempi kuin b . Kun levyä kuormitetaan kuvan 4 tapaan tasaisella jännityksellä σ_1 , syntyy kappaleeseen yhden puoliaallon sijaan useita puoliaaltoja sivujen a ja b suhteen mukaan. (Niemi 2003, 17.)



KUVA 5. Pitkän levyn ideaalinen lommahdus vakiojännityksessä (Niemi 2003, 17)

Ideaalisen levyn teoreettiselle lommahdusjännitykselle voidaan ilmoittaa kaavan 2 mukainen yhtälö yleispätevässä muodossa (Niemi 2003, 18).

$$\sigma_{cr,p} = k_{\sigma} * \frac{\pi^2 E}{12 * (1 - \nu^2)} * \frac{t^2}{b^2} \quad \text{KAAVA 2}$$

$\sigma_{cr,p}$ = ideaalisen levyn teoreettinen lommahdusjännitys

E = levymateriaalin kimmomoduuli

ν = aineen suppeumaluku

t = levyn paksuus

b = kuormitetun reunan leveys

k_{σ} = lommahduskerroin

Levyn todellisen lommahdusjännityksen laskeminen on erittäin vaikeaa. Työssä käytetty levyrakenne on myös niin monimutkainen, että jännityksen laskeminen ilman elementtimenetelmäohjelmaa on mahdotonta. Levyrakenteeseen kohdistuva kuormitus on myös täysin poikkeava ideaalitapauksesta.

4 OHUTLEVYKENNORAKENNE

Ohutlevykennorakenteeseen kuuluvat tyypillisimmin pintalevyt sekä ydinrakenne. Ydinrakenne voi olla terästä, komposiittia tai käyttötarkoitukseen sopivaa muuta materiaalia. Teräksestä valmistettu ydinrakenne voidaan tarvittaessa täyttää esimerkiksi hiekalla tai soralla. (Pekkanen – Vallikari 2010, 14–15.)

Tässä työssä tutkitaan rakenteita, joissa käytetään samaa teräsmateriaalia sekä pintalevyissä että ydinrakenteessa. Levyn ainevahvuus on myös molemmissa rakenteissa sama. Ydinrakenteen levyt laserhitsataan pintalevyihin kiinni. Laserhitsauksen lämmöntuonti on niin vähäinen, ettei ydinten hitsaaminen vähennä seinän karkaisua (Pekkanen – Vallikari 2010, 14–15).

4.1 Käyttömahdollisuudet

Ohutlevykennorakenteita käytetään rakenteissa, joissa on tarkoitus saada mahdollisimman kevyt mutta jäykkä rakenne. Levyrakenteita käytetään tai on mahdollista käyttää muun muassa puolustusvoimien sirpalesuojissa, kantavien rakenteiden pohjalevyinä ja tuotantokoneiden runko- ja suojarakenteina. Levyrakenteiden käyttöä on tutkittu myös 2000-luvun vaihteessa Tekeksen KENNO – Kevyet levyt teknologiaohjelma 1998–2012 -ohjelmassa. Teknologiaohjelman useissa tutkimuksissa todettiin, että kennorakenteilla on monia käyttökelpoisia käyttötarkoituksia muun muassa suoja-, kotelo- ja kuljetusrakenteissa. (KENNO – Kevyet levyt -teknologiaohjelman loppuraportti. 2003.)

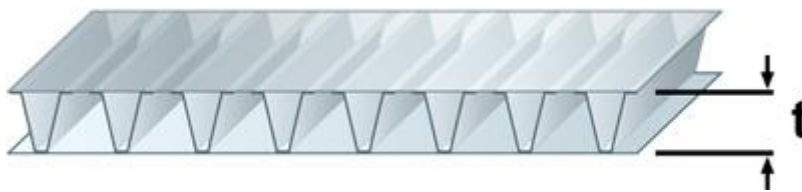
4.2 Tutkittavat kennorakenteet

Tutkittavia levyrakenteita olivat yleisesti käytetty yhteen suuntaan jäykkä VF-kennorakenne sekä Kenno Tech Oy:n patentoima kahteen suuntaan jäykkä Z-kennorakenne. Tutkittavien levyrakenteiden materiaaleina käytettiin S235-rakenneterästä sekä ultralujaa terästä 1 350 MPa:n myötörajalalla. Levyrakenteiden ulkomitat olivat 900 x 650 x 52,5 millimetriä. Levyjen ainevahduudet olivat 1,25 millimetriä ja pintalevyjen välinen etäisyys eli ytimen korkeus oli 50 millimetriä.

4.2.1 Yhteen suuntaan jäykkä kennorakenne

Tyypillisiä kennorakenteen ydintyypppejä ovat V-, Z- ja U-muotoisella ytimellä olevat kennorakenteet. Myös pystylevyistä muodostuvaa ydinrakennetta eli I-kennoa sekä putkipalkeista syntyvää ydintä eli O-kennoa käytetään. (Kenno Tech – Laserhitsatut kerroslevyt, linkki Kenno® tuotteet ja palvelut.)

Työssä tutkittava yhteen suuntaan jäykkä kennorakenne on VF-kenno, jonka ominaisuuksia haluttiin vertailla kahteen suuntaan jäykkään kennoon. Kuvassa 6 havainnollistetaan VF-kennon rakennetta.

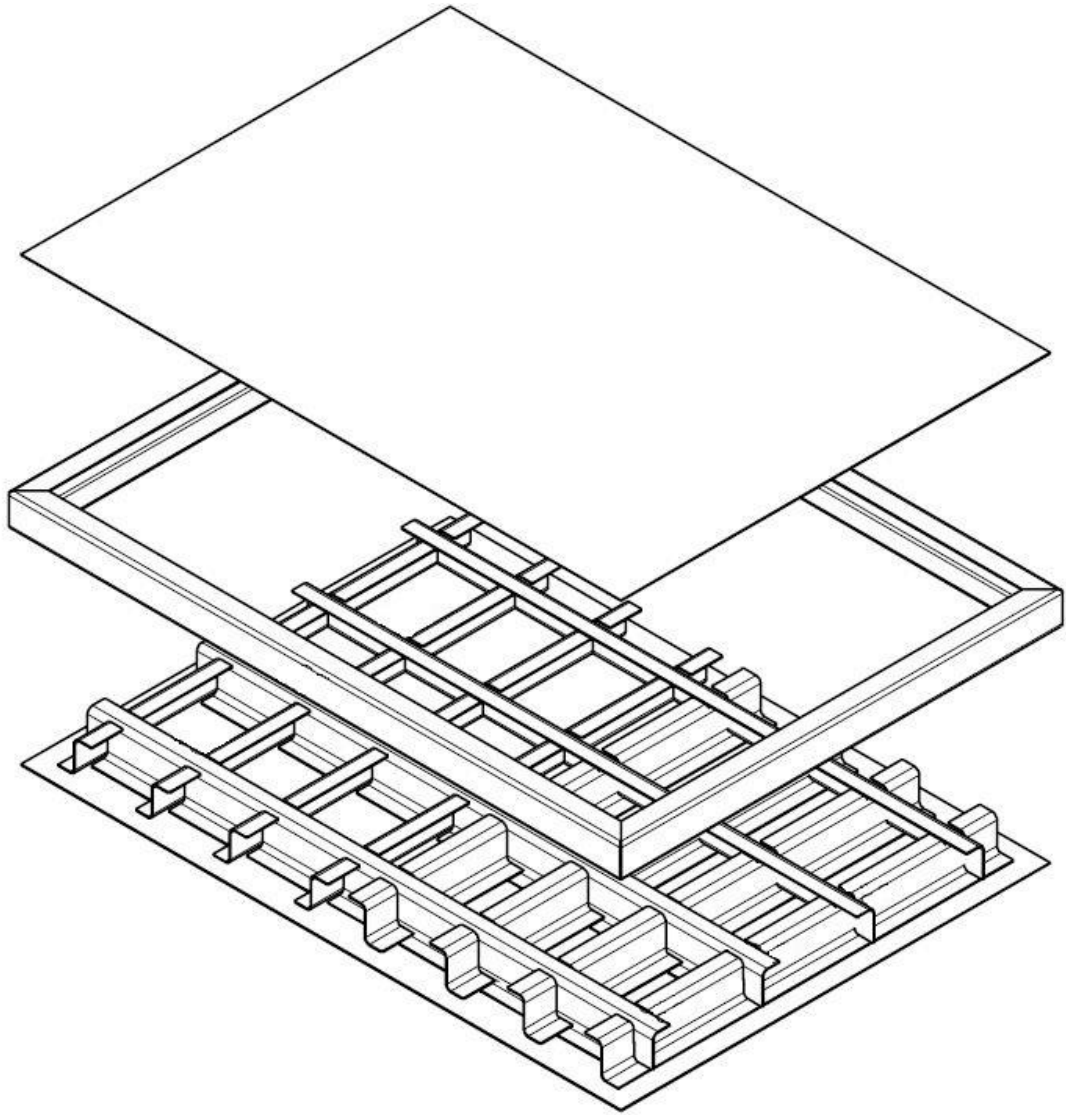


KUVA 6. VF-kennorakenne (Kenno Tech – Laserhitsatut kerroslevyt, linkki Kenno® tuotteet ja palvelut)

VF-kennorakenne muodostuu pintalevyistä sekä ydinrakenteesta. Ydin muodostuu erillisistä levyistä, jotka on särmätty noin 60°:n kulmaan levyn pintaan nähden. Ytimet on mahdollista joko liimata tai hitsata pintalevyihin. Kenno Tech Oy on valinnut liittämistavakseen laserhitsauksen. (Kenno Tech – Laserhitsatut kerroslevyt, linkki Kenno® tuotteet ja palvelut.)

4.2.2 Kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne

Kenno Tech Oy:n patentoima kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne muodostuu pintalevyistä, limittäin menevistä Z-muotoisista ytimistä sekä reunalistoista. Patentoitu ydinrakenne on käytännön havaintojen perusteella osoittautunut erinomaiseksi ratkaisuksi verrattuna perinteiseen yhteen suuntaan jäykkään kennorakenteeseen (Pekkanen 2016). Kuvassa 7 on havainnollistettu kennorakennetta.



KUVA 7. Kahteen suuntaan jäykän kennorakenteen rakennekuva

5 LEVYRAKENTEIDEN FEM-ANALYYSIT

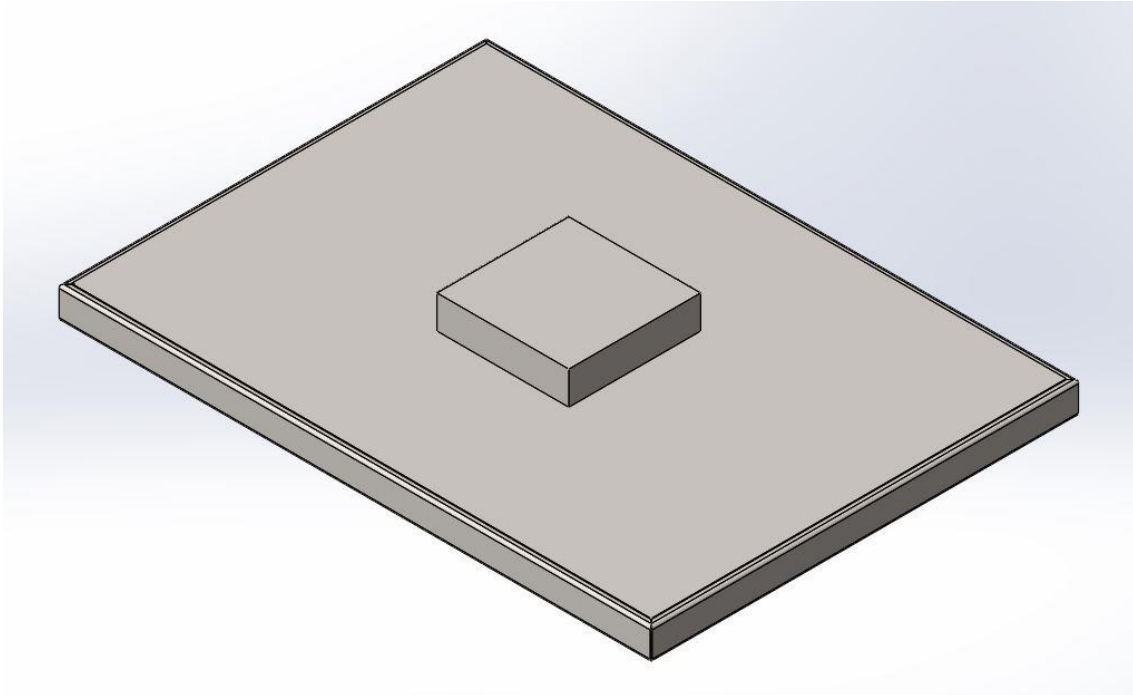
Ohutlevykennorakenteiden FEM-analyysit suoritettiin Solidworksin Simulation-työkalulla. Simuloinneissa jouduttiin tyytymään suhteellisen harvaan elementtiverkkoon. Tarkemmat elementtiverkot olivat kohtuuttoman hitaita laskea tavallisella ylemmän tason kuluttajaluokan pöytätietokoneella. Elementtiverkon tiheydelle pyrittiin kuitenkin tekemään optimointia luotettavien tulosten saamiseksi.

FEM-analyyseissä levyrakenteille tehtiin lommahdustesti yhdellä tuentatavalla ja staattinen testi kahdella eri tuentatavalla. Lommahdustestissä saatiin selville teoreettinen raja-arvo voimalle, jolla rakenne nurjahtaa. Staattista testiä tarvittiin rakenteen pinnan siirtymän määrittämiseen. Staattisesta testistä saatiin myös tietoa rakenteeseen kohdistuvista jännityksistä.

5.1 Geometriamallien muokkaus simulointia varten

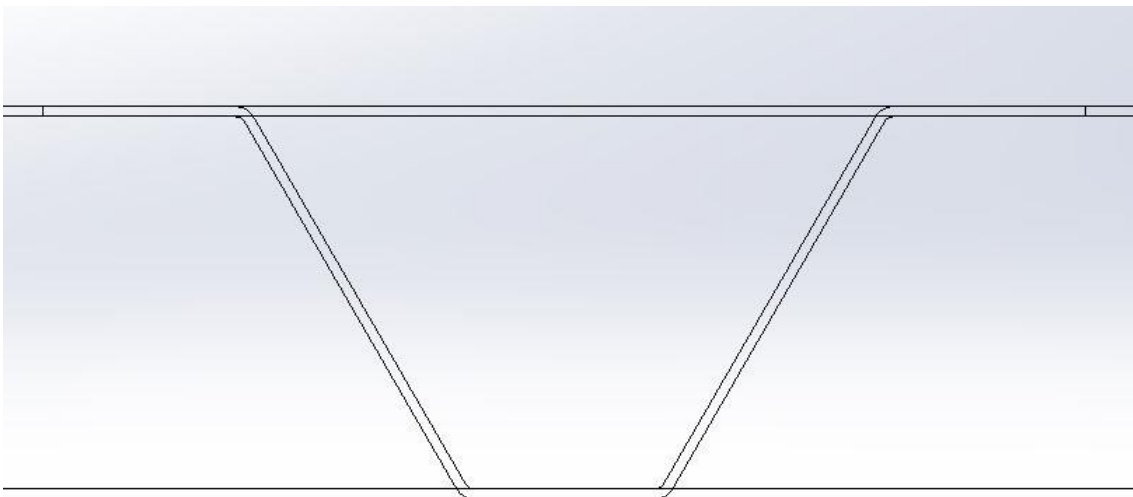
3D-malleille piti tehdä esivalmisteluja ennen kuin niitä pystyttiin käyttämään simulaatiotyökalussa. Malli voi olla joko ohutlevymalli tai toisesta ohjelmasta tuotu (imported) geometriamalli. Ohjelma osaa toisinaan tehdä imported-mallille onnistuneen piirteiden tunnistuksen, mutta simulaation kannalta tällä ei ole merkitystä.

3D-kokoonpanomalleihin mallinnettiin 200 x 200 mm:n kokoinen geometriamalli vastaamaan käytännön kuormitusta. Geometrialaatta sijoitettiin pintalevyn keskelle. Reunalevyjen vahvuus muutettiin vastaamaan muun geometrian levyjen vahvuutta (kuva 8).



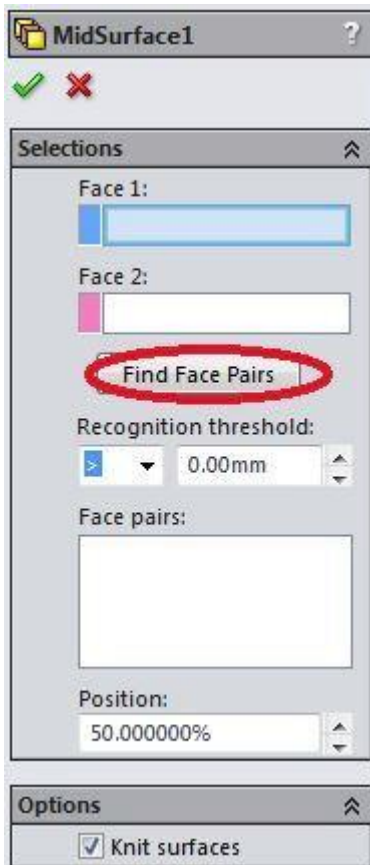
KUVA 8. Kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne (ZZ) kuormitusgeometrialla

Ensiksi 3D-malli piti koota niin, että toisissaan kiinni olevat levyt ovat toistensa kanssa päällekkäin (kuva 9). Tämä piti tehdä myöhemmin määriteltävien hitsisaumojen vuoksi, josta lisää myöhemmin. Kokoonpano oli myös saatava täysin määritellyksi, sillä jokaisen osan tuli olla kiinteästi paikallaan kokoonpanossa.



KUVA 9. Päällekkäin olevat ohutlevygeometriat (VF)

3D-malli piti muuttaa tämän jälkeen pintamalliksi (surface model). Surface-työkaluvalikon Mid Surface -toimintoa käyttämällä luotiin pinta geometrian pintojen puoliväliin. Kuvan 10 mukaisesti käytettiin toiminnon automaattista vastakkaiden pintojen tunnistusta 50,0 prosentin asettelulla.

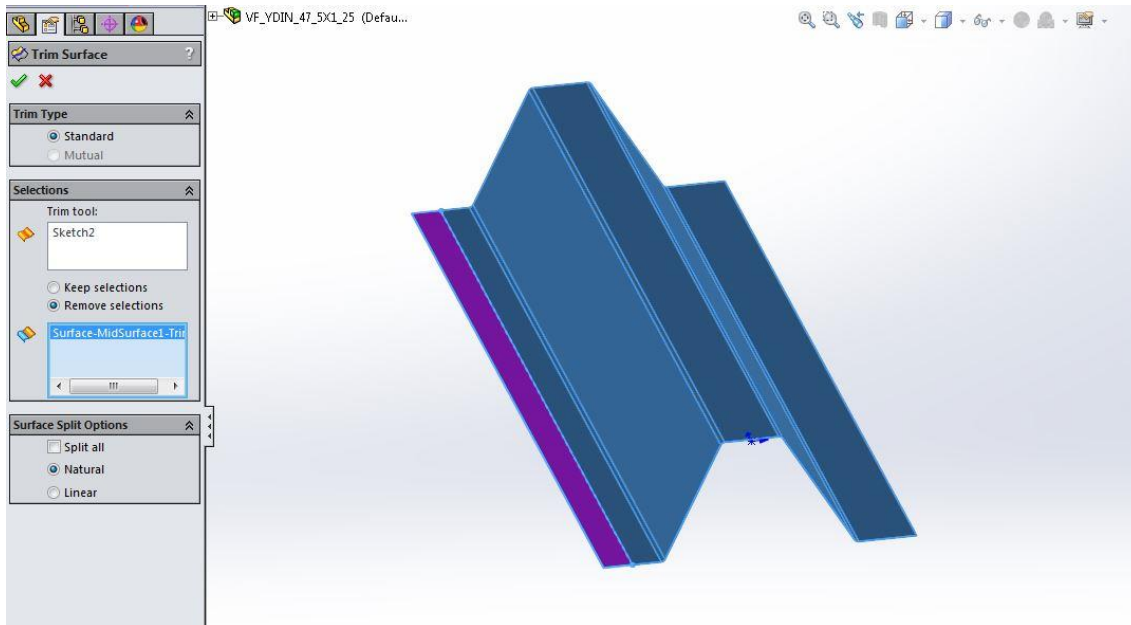


KUVA 10. Pinnan luonti solidimalliin keskipintaan

Saaduille pinnoille piti tehdä myös muutoksia simulointia varten, koska Solidworksin simulaatio-työkalu on joiltain osin hyvin rajoittunut verrattuna kaupallisiin erikoistuneisiin simulaatio-ohjelmiin. Solidworks ei osaa muodostaa hitsisaumaa kahden pinnan väliin, ellei hitsiä muodosta pinnan reunalle. Tämän vuoksi työssä käytettiin kahta eri tekniikkaa hitsien määrittämisen mahdollistamiseksi.

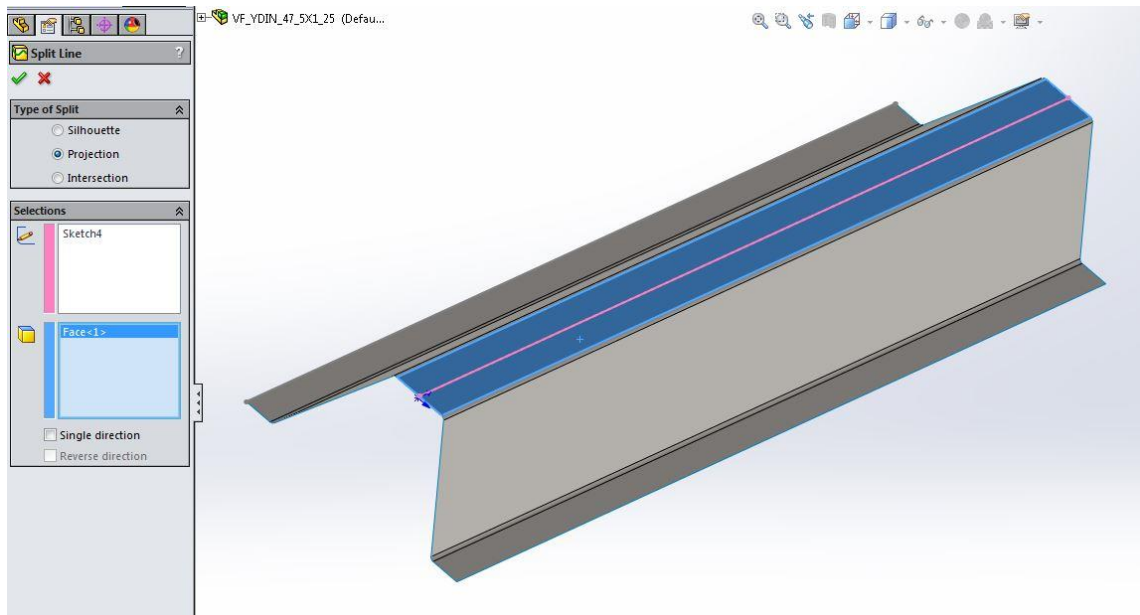
Työssä tutkittavien kennorakenteiden hitsisaumat osuvat jäykistelevyjen puoliväliin. Hitsin puolivälin ja reunan välisellä materiaalilla ei ole juurikaan merkitystä simulaatiossa, varsinkaan kun kitkan vaikutusta ei oteta malleissa huomioon. Ensimmäinen hitsin mahdollistava toimenpide oli poistaa ylimääräiset osat pin-

noista Trim Surface -työkalulla (kuva 11). Tämä toimenpide tehtiin molemmille kokoonpanoille, VF-kennolle sekä ZZ-kennolle.



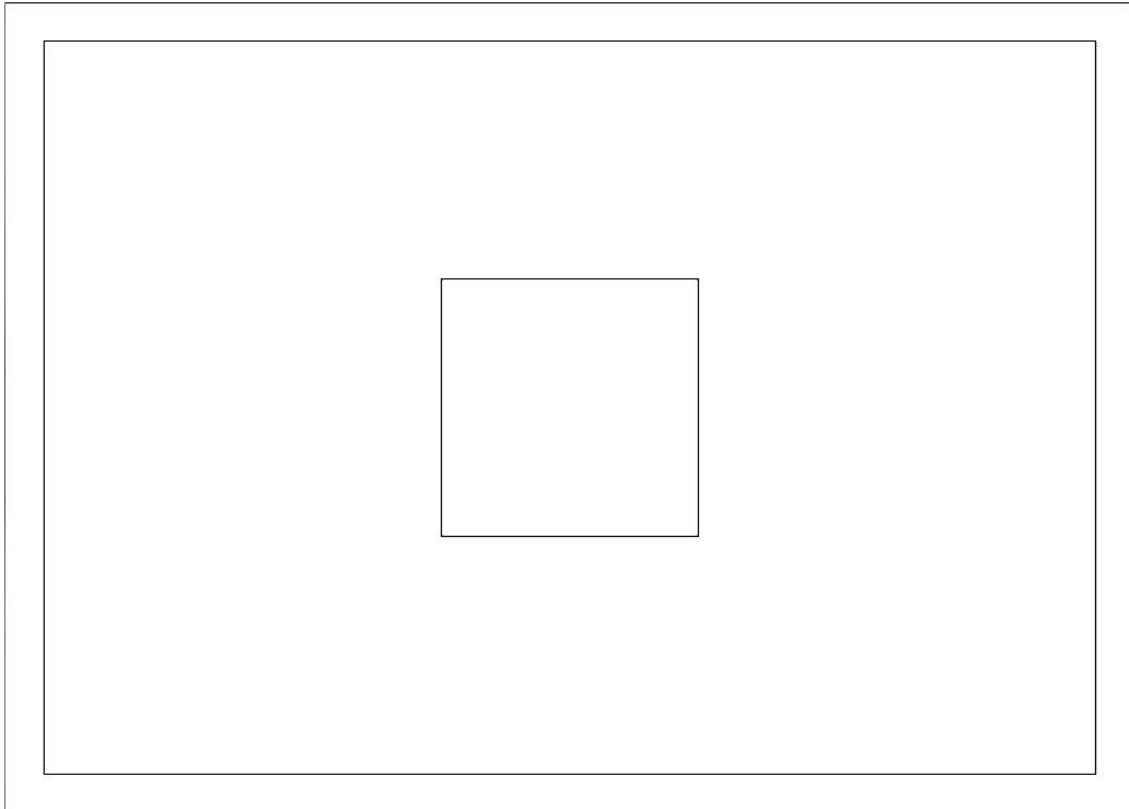
KUVA 11. Trim Surface -työkalun käyttöä (VF)

Toinen toimenpide oli saada paikka hitsisaumalle VF-rakenteen ydinlevyn keskiosaan. Trim Toolin käyttö ei soveltunut tähän tapaukseen. Käytettiin Split Line -työkalua pintamallin työkaluista (kuva 12). Split Line jakaa pinnan kahteen eri pintaan, mutta pitää pinnat kuitenkin fyysisesti yhdessä.



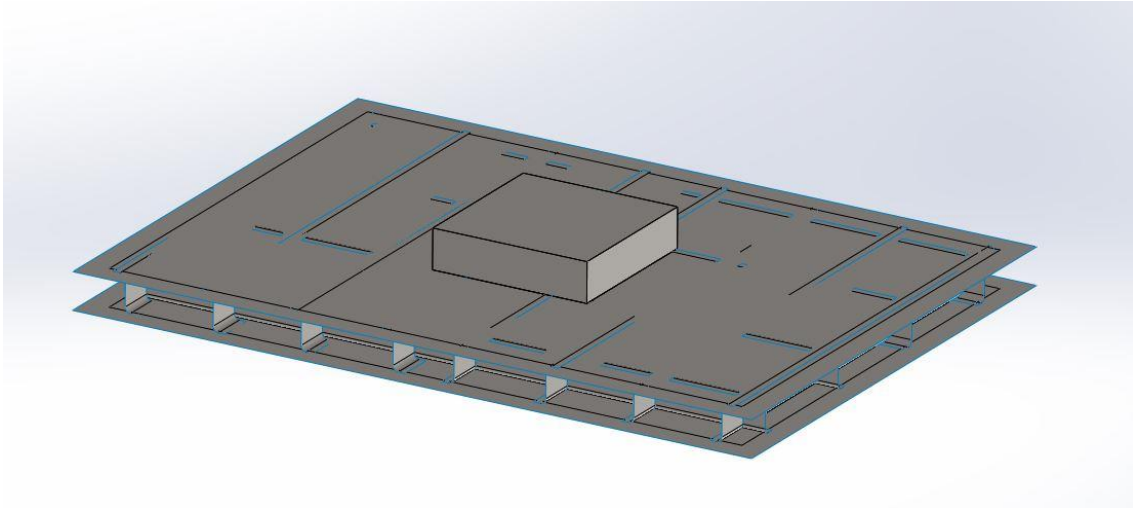
KUVA 12. Split Line -työkalun käyttöä (VF)

Pintalevy jaettiin kuvan 13 mukaisiin osapintoihin. Keskellä oleva pinta on painolaatan tuennan määrittämiseen. Reunoja kiertävä pintojen välinen reuna luotiin taivutustestin reunatuenta varten.



KUVA 13. Pintalevy osapintoihin jaettuna

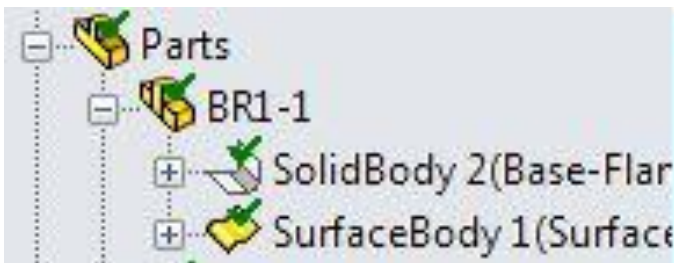
Tarvittavien pintamalliin tehtyjen muutosten jälkeen solidimallit piilotettiin myöhemmin tehtävien toimenpiteiden vuoksi. Tämän jälkeen geometriassa näkyi vain pintamallikokoonpano sekä pinnan päälle asetettu solidikappale. Toimenpiteet tehtiin molemmille kennokokoonpanoille. Kuvassa 14 on poistettu reunalistat pintamallin havainnollistamiseksi.



KUVA 14. ZZ-kennon pintamallikokoonpano (ilman reunalistoja)

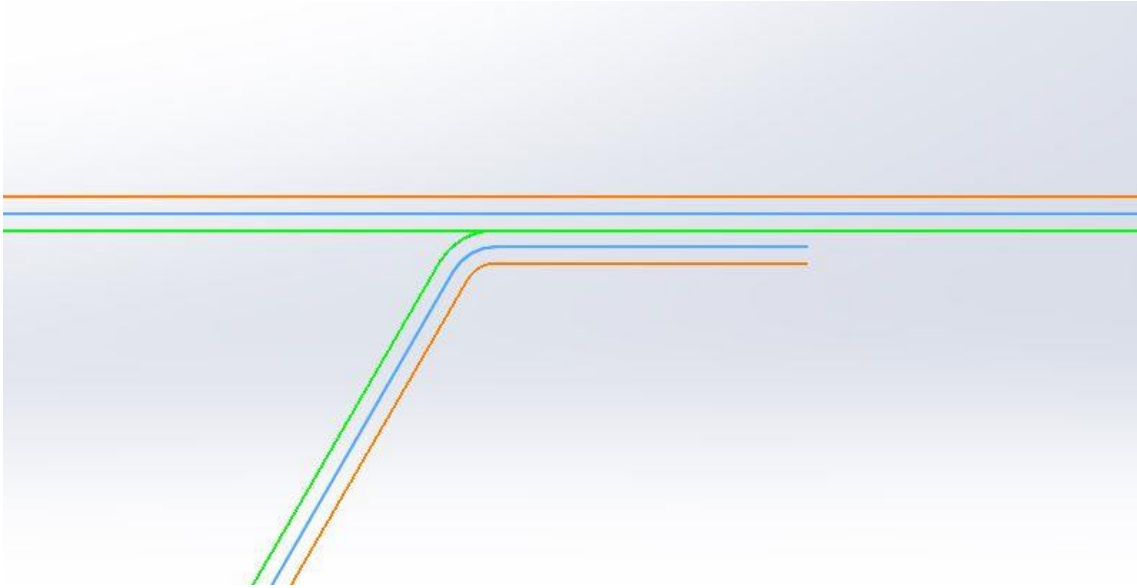
5.2 Geometrian käsittely simulaatiotyökalussa

Kun geometrialle oli tehty tarvittavat muutokset, geometria vietiin simulaatiotyökaluun. Geometriasta täytyi seuraavaksi jättää testin ulkopuolelle kokoonpanoon jätetyt levyjen solidiosat. Kuvassa 15 pintalevyn solidiosa nimellä SolidBody 2. Poistettiin jokaisen levykokoonpanon osan solidiosat.



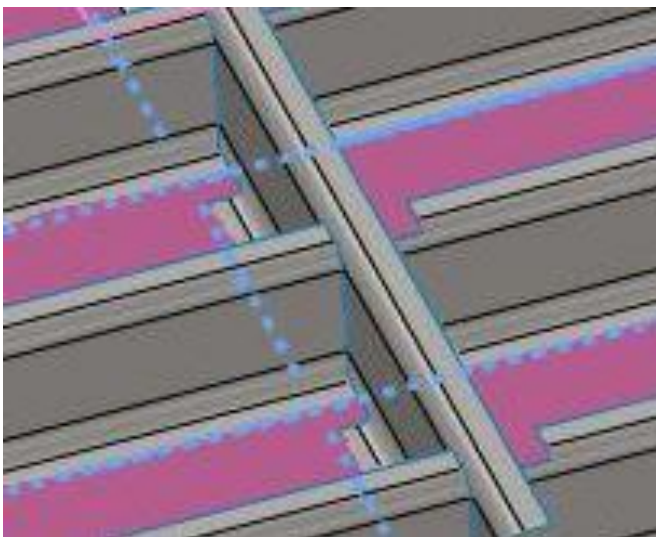
KUVA 15. Solidiosan poisjätö

Tämän jälkeen määritettiin pintamalleille levynvahvuudet sekä materiaalitiedot. Levyn paksuudeksi asetettiin todellisen levyn vahvuus 1,25 mm. Kuvassa 15 näkyy pintalevyn pintamalli SurfaceBody 1. Kun levyjen paksuus oli määritetty, määriteltiin pintalevyjen todellinen asema. Tämä suoritettiin siirtämällä pintalevyjä 50 prosenttia pois päin ytimestä (kuva 16).



KUVA 16. Pintalevyjen todellinen asema

Rakenteelle oli oletuksena määritelty koko mallin kattava bonded-ehto. Muutettiin tämä ehto no penetration -vaihtoehdoksi todenmukaisempien pintakosketusten takaamiseksi. Rakenteelle oli kuitenkin määritettävä kontaktit vastaamaan hitsisaumoja. Kontakteina käytettiin bonded-ehtoa (kuva 17), sillä käytännössä on huomattu että hitsisaumat eivät ole rakenteen heikoin kohta (Pekkanen 2016). Bonded-liitoksella päästään samaan lujuuteen perusmateriaalin kanssa.



KUVA 17. Hitsisaumojen määrittäminen bonded-liitoksella (katkoviivat)

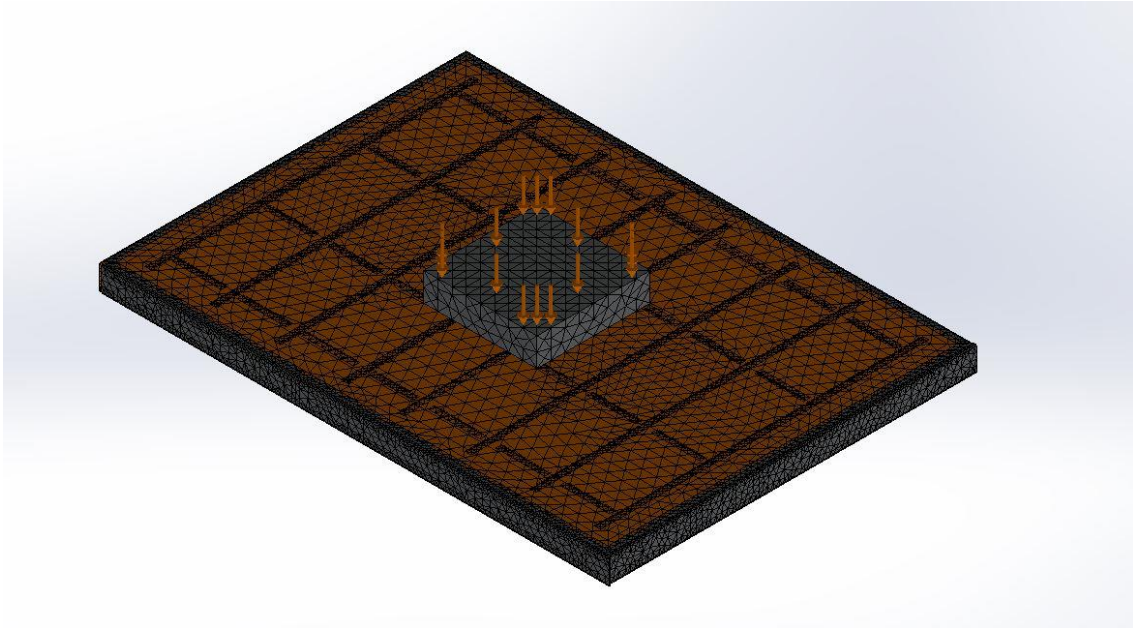
Liitosten määrittämisen lisäksi rakenteelle oli vielä määritettävä tuennat sekä kuormittavan voiman sijainti. Voima sijoitettiin sitä varten tehdyn kuormituslaatan päälle. Laatta sidottiin kiinni rakenteeseen kahdelta sivulta bonded-ehdolla ja laatalle määriteltiin käytettävä voiman arvo.

Rakenteille määriteltiin tuennat. Puristus- ja nurjahdustestissä kappaleen oli tarkoitus olla tuettuna tasaista pintaa vasten. Määritettiin rakenteen koko pohjapinta fixed-ehdolla.

Taivutustestissä rakenne lepää reunoiltaan alustan päällä jättäen levyn keski-osan ilmaan. Tätä tuentaa varten käytetään pintaan alun perin tehtyä pintalevyn pinnan jakoa. Reunoihin asetettiin referenssiehdot pintalevyn suuntaiseen pääkoonpanon tasoon. Määriteltiin jokainen viiva myös pystysuorassa kiinteäksi. Lisättiin kahteen, levyn lyhyempien sivujen suuntaiseen viivaan referenssiehto viivan suuntaisesti.

Lopuksi rakenteelle luotiin elementtiverkko. Elementtiverkko mallinnettiin käyttämällä kuorimalliin (curvature based mesh) perustuvaa elementtiä mallin ytimien särmäysten vuoksi. Kaarevan elementin laskenta on myös raskaampaa kuin levymäisen elementin (standard mesh), mutta sopivalla elementin koon valinnalla laskenta-aika saatiin pidettyä järkevänä. Tulokset ovat myös luotettavampia kuin pintaelementtiä käyttämällä.

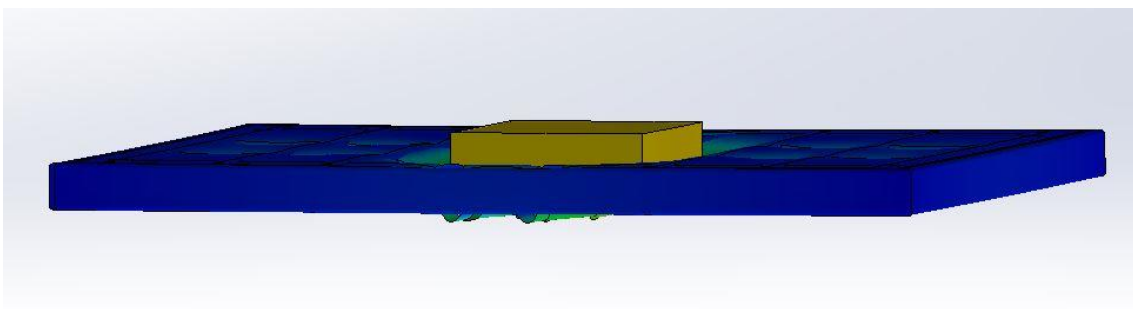
Testeissä käytettiin 20,00 - 6,67 mm:n kokoista elementtiverkkoa, jossa 20 millimetriä on elementin suurin ja 6,67 millimetriä on pienin koko. Kyseisellä elementtiverkon tiheydellä saatiin yhtä suuria arvoja siirtymälle kuin ± 5 mm:n elementin koon muutoksella. Kuvassa 18 näkyy ZZ-rakenteen elementtiverkko.



KUVA 18. ZZ-rakenteen elementtiverkko

5.3 Puristustestit

Staattisen puristustestin päätarkoitus oli saada selvillä ydinrakenteen jäykkyys, kun levyrakennetta puristetaan tasaista pintaa vasten. Simulaatiosta saatiin pinnalle asetetun solidikappaleen siirtymä pystysuunnassa. Vaihtelemalla voiman arvoa saatiin taulukoitua siirtymälle eri arvoja. Kuva 19 havainnollistaa 100-kertaisen siirtymän 20 kN:n voimalla ZZ-kennon puristustestissä.



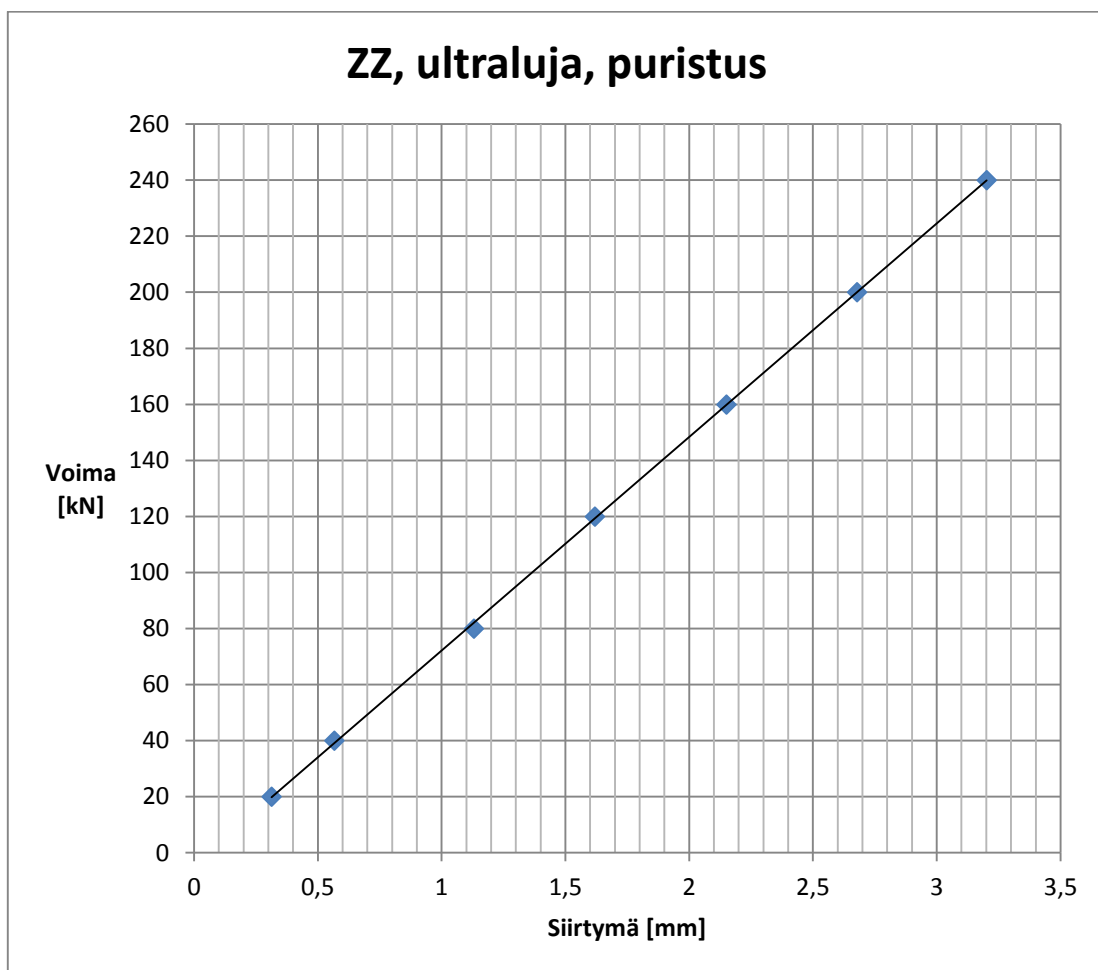
KUVA 19. 20 kN:n voima, ZZ-kennon, 100-kertainen siirtymä

Simuloitavia ohutlevyrakenteita oli kolme erilaista:

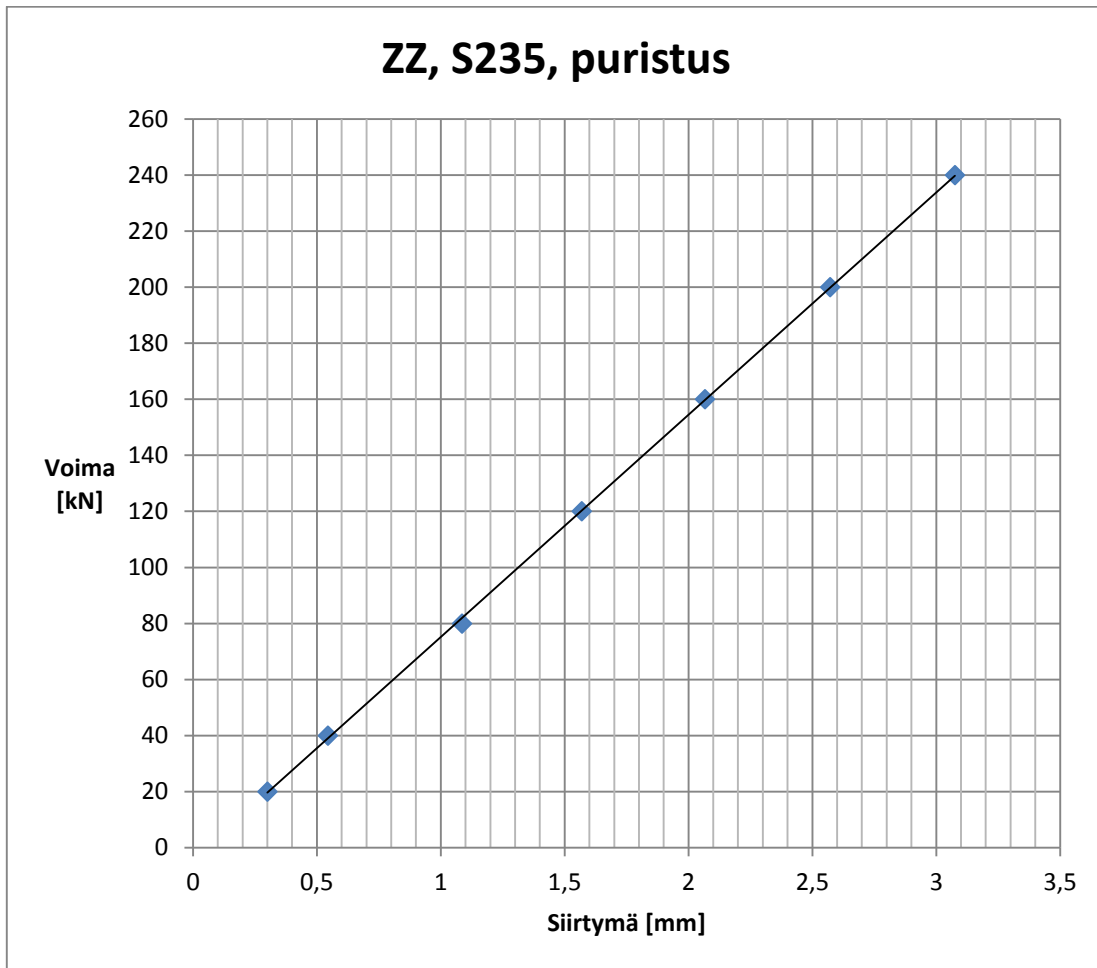
- ZZ ultraluja
 - myötöraja 1 350 MPa

- ZZ S235
 - myötöraja 210 MPa
- VF S235
 - myötöraja 210 MPa.

Simulaatiot suoritettiin voiman eri arvoilla 20 - 240 kN:n välillä. Siirtymän arvot taulukoitiin ja niistä tehtiin siirtymä-voimakuvaajat. Kuvista 20 ja 21 nähdään, että kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne taipuu lineaarisesti puristustestissä.

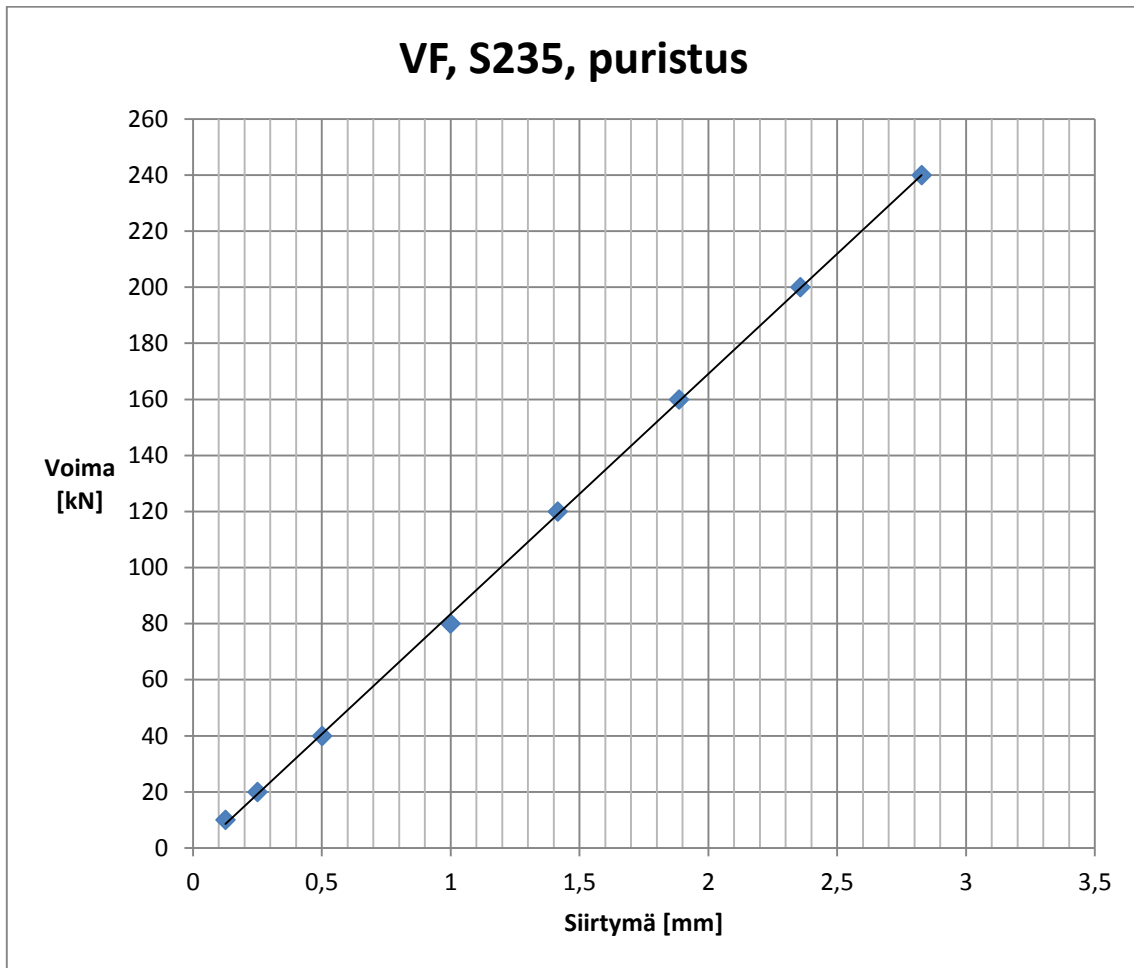


KUVA 20. Ultralujan ZZ-rakenteen puristus



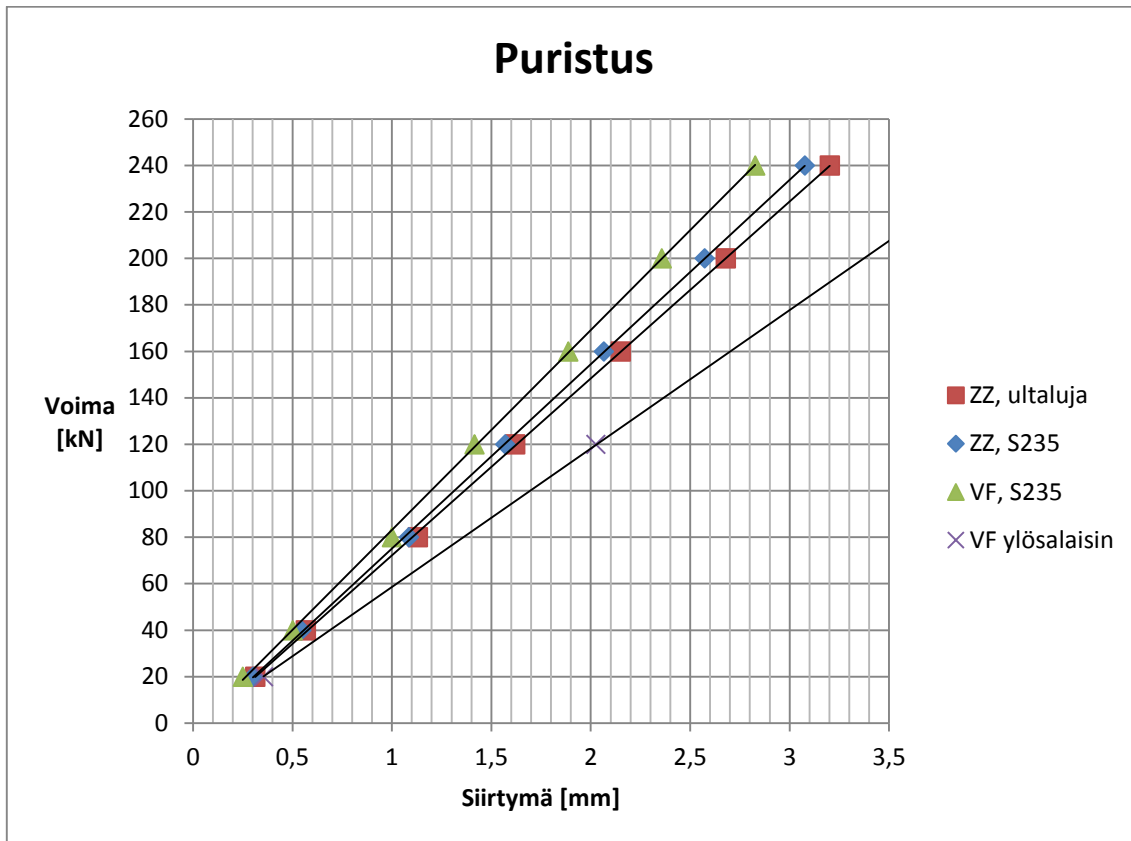
KUVA 21. ZZ-rakenteen puristus (S235)

Kuvasta 22 nähdään, että myös yhteen suuntaan jäykkä kenno taipuu lineaarisesti kahteen suuntaan jäykän kennorakenteen tavoin.



KUVA 22. VF-rakenteen puristus (S235)

Yhdistämällä jokaisen eri rakenteen kuvaajat voitiin vertailla rakenteiden jäykkyyksiä (kuva 23).



KUVA 23. Rakenteiden siirtymä-voimakuvaajat

Kuvasta 23 nähdään, että VF-rakenteen ydin on simulaation perusteella hiukan jäykempi kuin ZZ-rakenteen ydin. Tämä on täysin päinvastoin kuin alkuun oletettiin. Tutkittiin myös VF-kennon jäykkyyttä asettamalla rakenne toisinpäin niin, että ytimet muodostavat kirjaimen A. Rakenne osoittautui huomattavasti joustavammaksi kuin V-muotoon asetettuna. Tämän johdosta VF-kennoa tarkasteltiin jatkossakin ytimet V:n suuntaisena sivulta päin katsottuna.

Materiaalin vaikutus ZZ-rakenteen jäykkyyteen puolestaan johtuu ohjelman materiaalipankissa käytetystä myötölujuuden erosta. Eroa ei todellisuudessa kuuluisi tapahtua, joten tämä on ainoastaan ohjelman virheellinen ominaisuus. Poissonin ja kimmomoduulin arvolla ei ollut merkitystä. Erot levyrakenteiden jäykkyydessä ovat kuitenkin vain noin 12 %:n sisällä toisistaan 240 kN:n voiman arvolla.

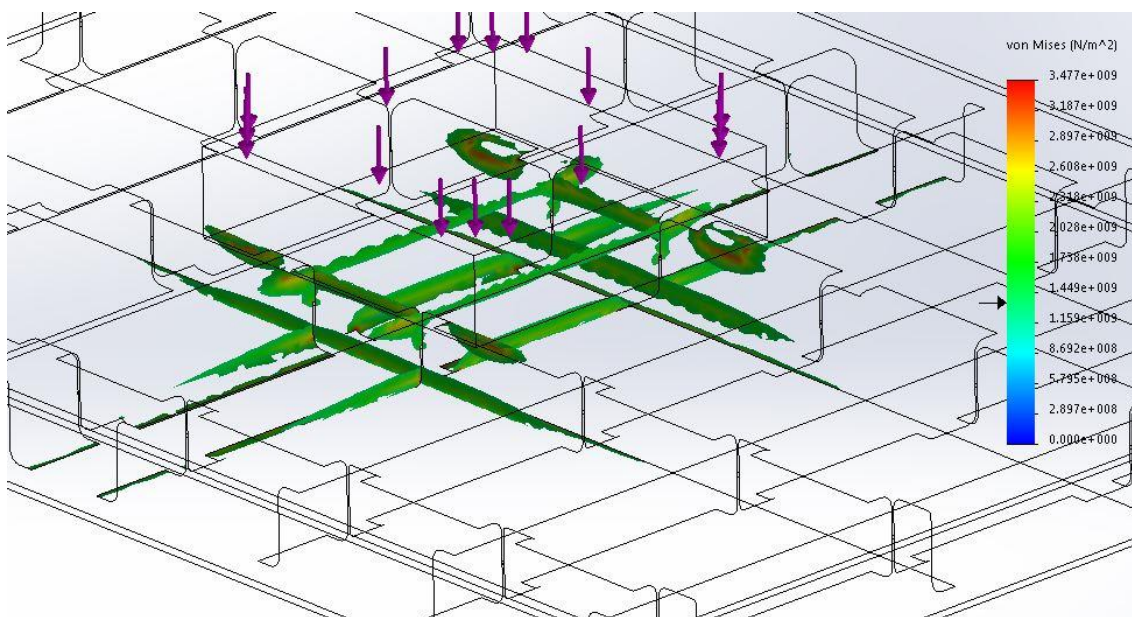
Rakenteille saatiin laskettua seuraavat jäykkyyden arvot kulmakertoimina:

- ZZ ultraluja 75,2 kN/mm

- ZZ S235 78,1 kN/mm
- VF S235 84,7 kN/mm.

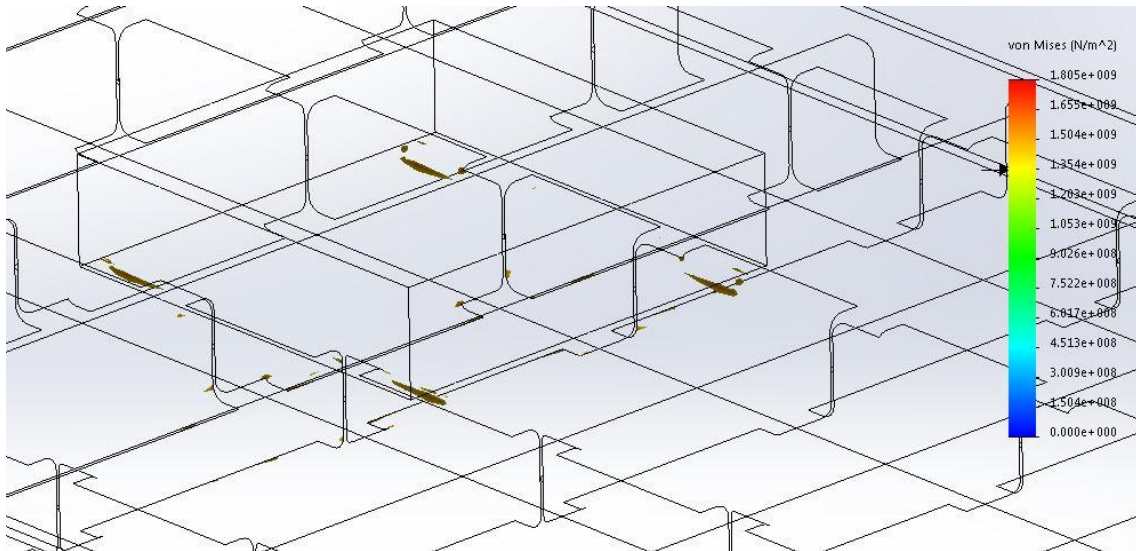
Puristustestissä oli mahdollisuus tutkia myös rakenteen jännityksiä. Rakenteen suurin jännitys oli kuitenkin käytännössä mahdotonta todistaa, koska rakenteiden jännityshuiput sijaitsevat rakenteen levyjen terävissä nurkissa (ZZ) tai hitsaussaumassa (VF). Tiheämmällä elementtiverkolla elementin keskimääräinen jännitys on nurkassa sitä korkeampi, mitä pienempi elementin koko on. Jännityksiä tutkittiin lopulta 1,5:n varmuuskerroin myötörajan nähden huomioon ottaen.

Kuvassa 24 tutkitaan jännityksen näkyviä suurimpien arvojen sijaintia ZZ-kennossa, jossa värillä on kuvattu jännitykset yli todellisen myötörajan (1 350 MPa). Kennoa on puristettu kuvassa 240 kN:n voimalla.



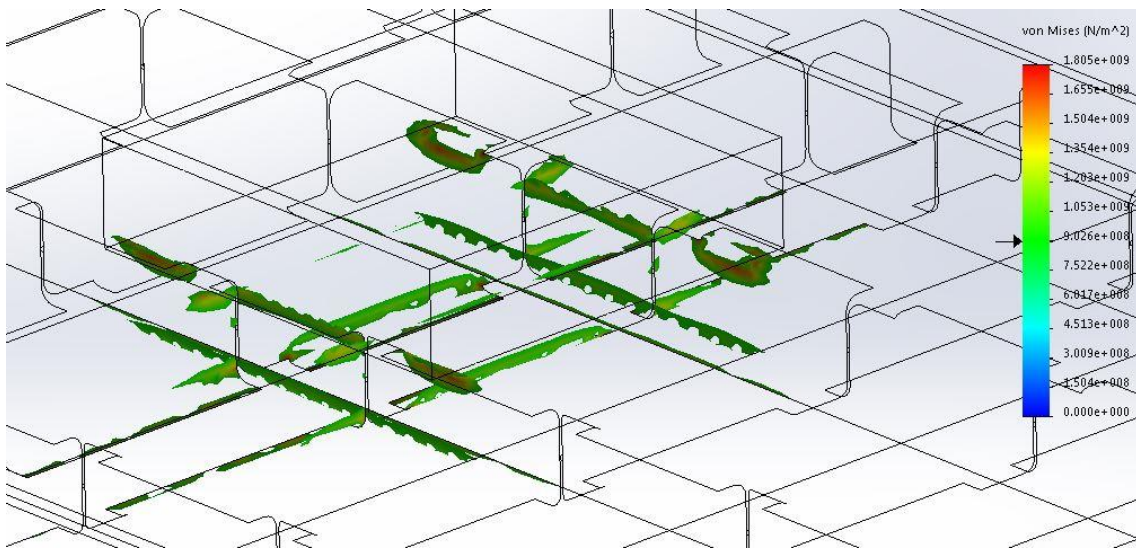
KUVA 24. Myötörajan ylittävät jännitykset (240 kN, ZZ, ultraluja)

Kuvasta 24 nähdään, että jännityshuiput sijaitsevat lähellä painokohtaa erityisesti ydinrakenteen särmäyskohdissa. Tämän vuoksi voidaan olettaa, että koko rakenne myötää ensimmäisenä näistä kohdista. Kokeiltiin rakenteelle voiman eri arvoja. Haarukoimalla saatiin selville voiman arvo, jolla rakenteeseen muodostuu enää vain pieniä myötörajan ylittäviä näkyviä jännityksiä (kuva 25).



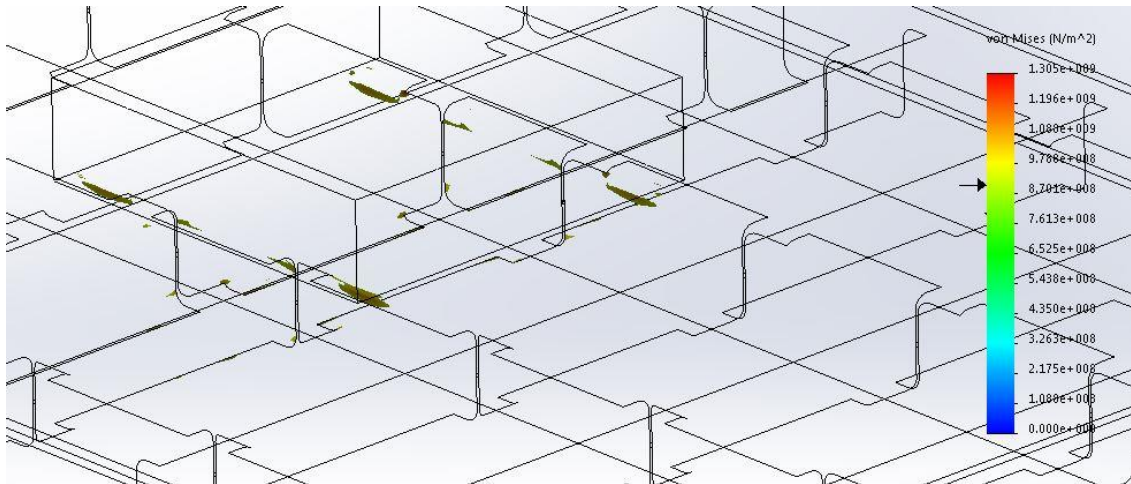
KUVA 25. Myötörajan ylittävät jännitykset (120 kN, ZZ, ultraluja)

Kuvasta 25 nähdään, että 120 kN:n voimalla rakenteeseen kohdistuu enää pieniä paikallisia jännityskeskittymiä. Tutkittiin rakenteen jännitykset myös 1,5:n varmuuskertoimella myötörajaan nähden (kuva 26).



KUVA 26. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (120 kN, ZZ, ultraluja)

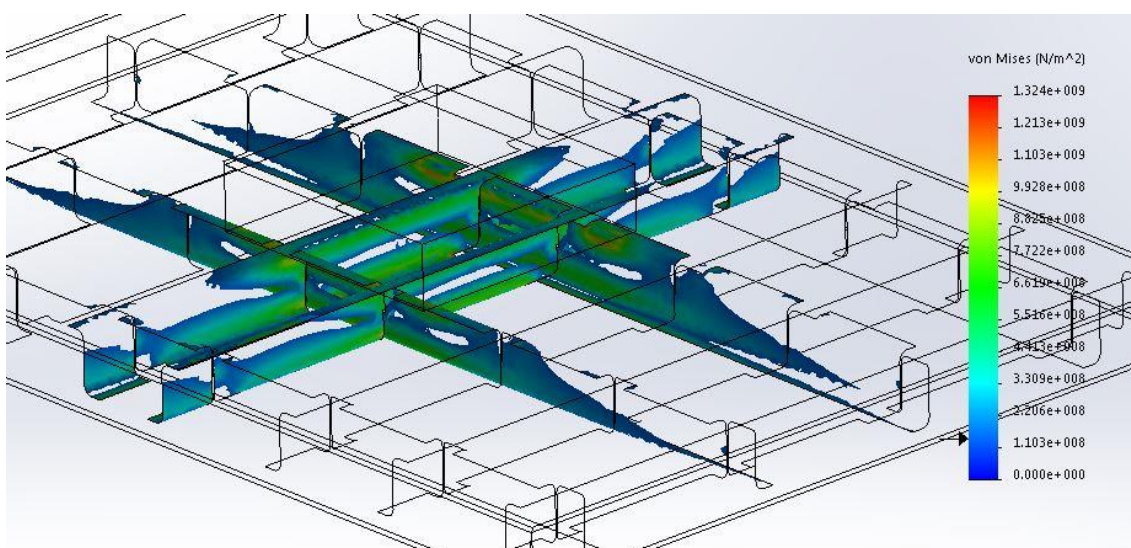
Kuvasta 26 nähdään, että varmuusluku huomioituna rakenteeseen kohdistuu vielä laajoja muodonmuutosvyöhykkeitä. Kuvassa 27 rakennetta on kuormitettu 80 kN:n voimalla. Kuvassa näkyvät jännitykset varmuusluku huomioiden.



KUVA 27. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (80 kN, ZZ, ultraluja)

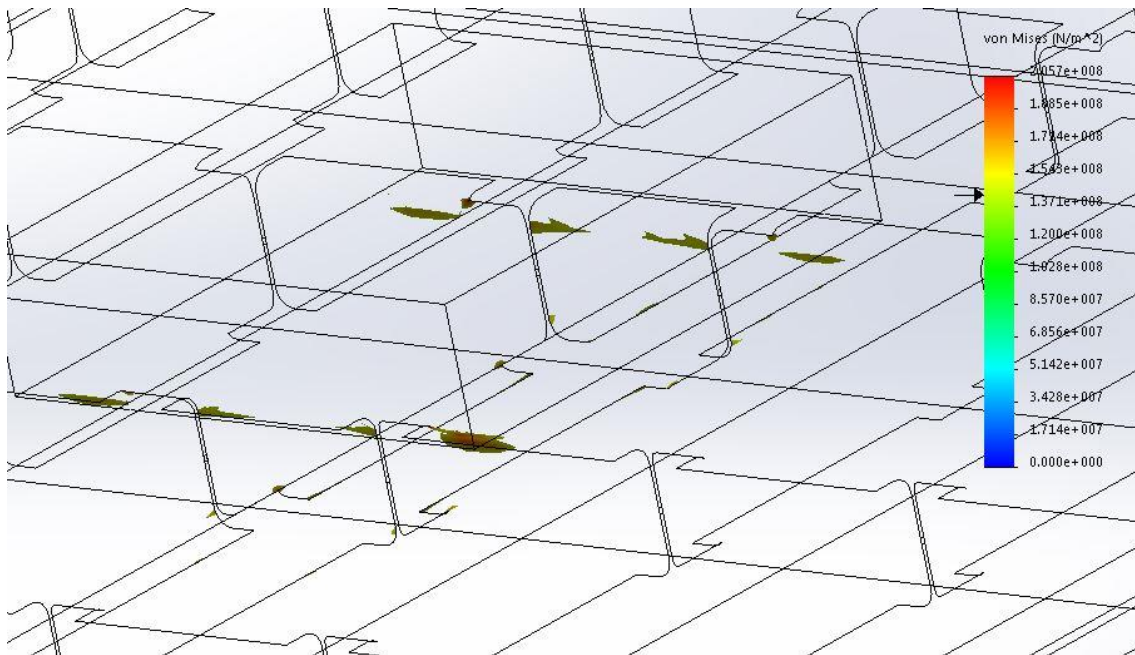
Kuvasta 27 nähdään, että rakenteeseen syntyy enää pieniä paikallisia näkyviä jännityskeskittymiä. Voidaan olettaa, että 80 kN on raja-arvo ultralujaan ZZ-rakenteen puristuskestävyydelle. Rakenteen painuma oli silloin 1,13 millimetriä.

Tutkittiin ZZ-rakenteen jännityksiä, kun materiaalina käytettiin S235:ta 210 MPa:n myötörajalla. Tutkittiin jännityksiä samalla 80 kN:n voiman arvolla 1,5:n varmuusluku huomioiden. Kuvasta 28 nähdään, että rakenteeseen kohdistuu suuria myötörajan ylittäviä alueita. Rakenne ei odotetusti kestä yhtä suurta voiman arvoa kuin ultralujana.



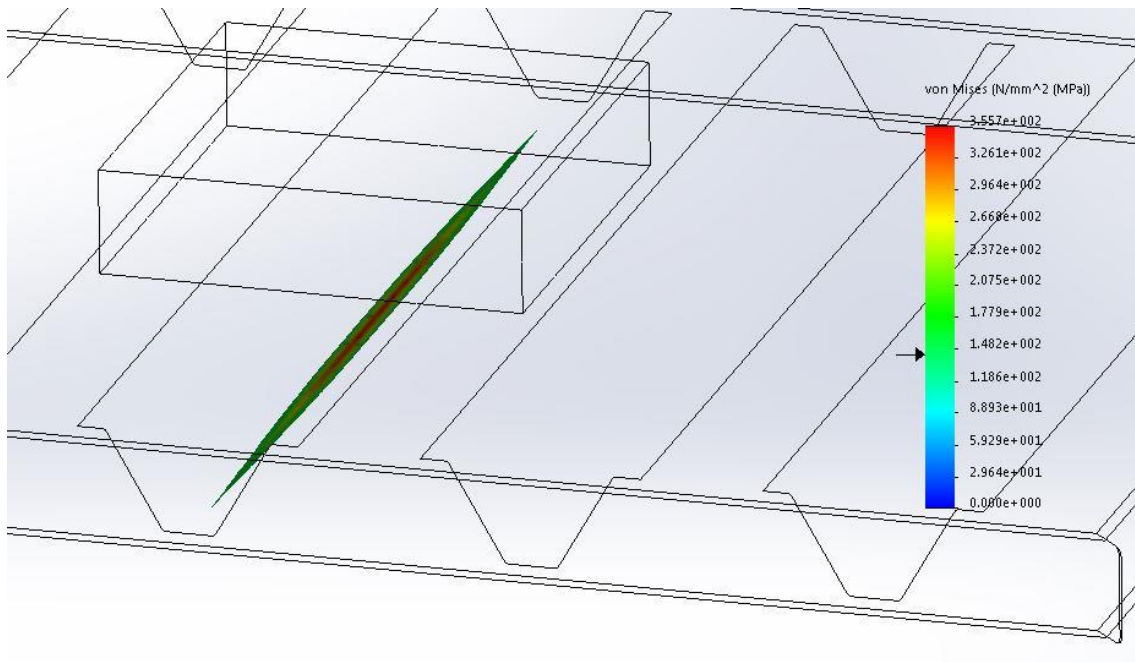
KUVA 28. Myötörajan ylittävät jännitykset (80 kN, ZZ, S235)

Kuvasta 29 nähdään rakenteen jännitykset 12 kN:n arvolla varmuusluku huomioiden. Jännityskeskittymät vaikuttavat olevan laajuudeltaan samanlaisia kuin ultraluja rakenne 80 kN:n kuormalla. Rakenteessa näkyy vain pieniä myötörajan ylittäviä jännityskeskittymiä. Oletetaan, että kyseinen 12 kN:n voima on suurin arvo, jonka ylittyessä S235:stä valmistettu rakenne ei pidä puristuksessa ulko- muotojaan. Siirtymä oli tällöin 0,18 millimetriä.



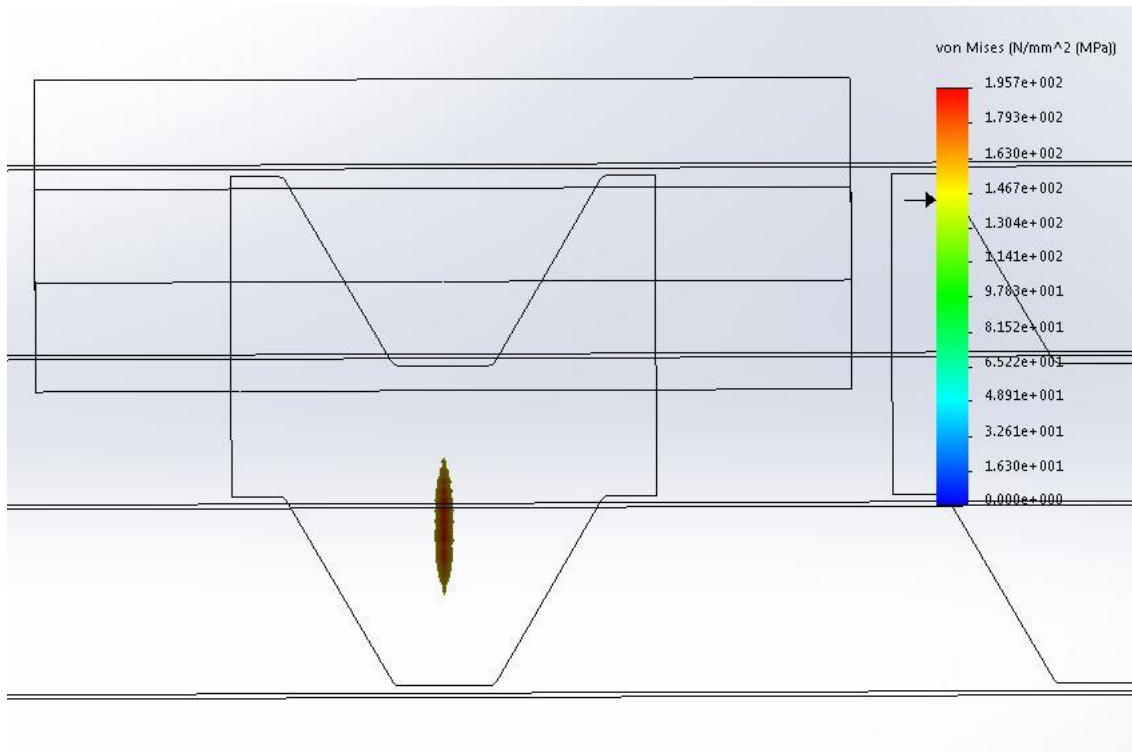
KUVA 29. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (12 kN, ZZ, S235)

Tutkittiin myös VF-rakenteen staattista kuormitusta puristuksessa. Materiaalina käytettiin S235:ta, joten aloitettiin voiman haarukointi edelleen alhaisemmalla voiman arvolla. Kuvassa 30 VF-rakennetta on kuormitettu 10 kN:n voimalla.



KUVA 30. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (10 kN, VF, S235)

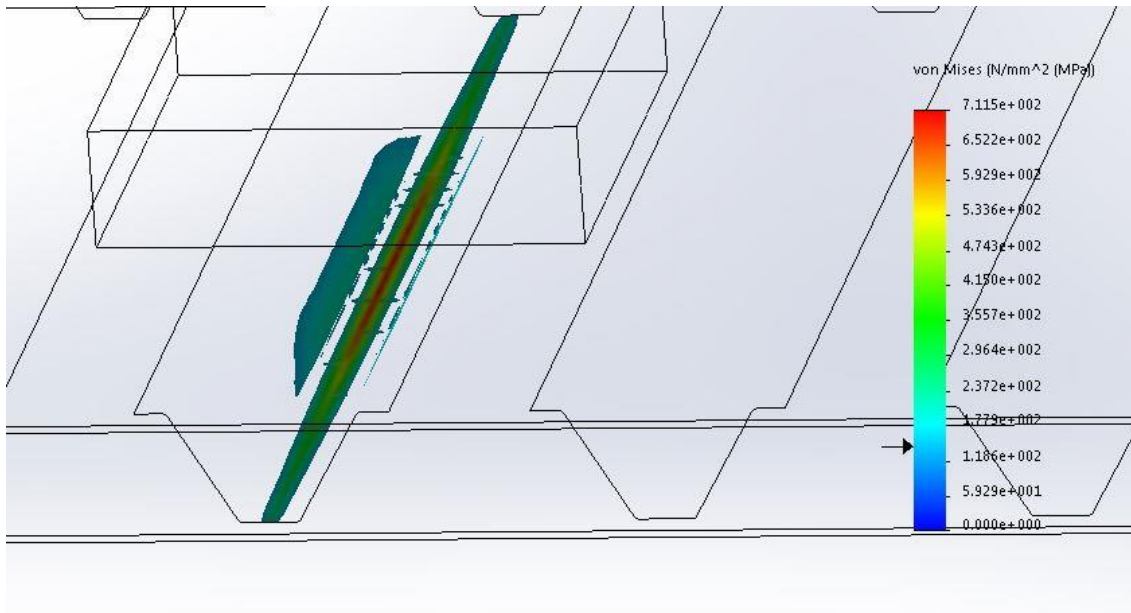
Kuvasta nähdään, että jopa 1,5:n varmuuskerroin huomioiden rakenteen pinnalle, erityisesti V-ydinprofiilin ja pintalevyn hitsisauman alueelle, rakenteeseen syntyy suuria jännityksiä. Kun voiman arvoa pienennettiin, päästiin lopulta 5,5 kN:n arvoon (kuva 31). Siirtymä oli silloin 0,069 millimetriä.



KUVA 31. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (5,5 kN, VF, S235)

Kun voimaa pienennettiin 5,25 kN:n arvoon, todellisen myötörajan ylittäviä jännityksiä ei esiintynyt mallissa lainkaan ja siirtymän arvo nousi poikkeavasti 0,26 millimetriin. Siirtymän poikkeama jatkui aina 3,5 kN:iin asti. Kun voimana käytettiin 3,25 kN:ia, siirtymä oli 0,041 millimetriä ja arvo sijoittui taas lineaariselle käyrälleen.

Voineen arvioida, että VF-rakenteen suurimman kuormituksen raja on noin 3,25 - 5,5 kN:a. Siirtymä on silloin 0,041... 0,069 millimetriä. Rakenteen suurin jännitys sijoittuu ydinlevyn hitsisaumaan, joten todellisen rajan arviointi on erittäin vaikeaa. Kuvassa 32 havainnollistetaan VF-rakenteen jännityksiä 20 kN:n voimalla varmuusluku huomioiden.



KUVA 32. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (20 kN, VF, S235)

Voimaa kasvattaessa jännitys etenee VF-ytimen reunoille. 20 kN:n voimalla siirtymä olisi kuitenkin jo 0,25 millimetriä.

5.4 Lomahdustestit

Lomahdustestissä rakenteelle saatiin teoreettinen lomahdusvoima. Solidworksissa levykenttien lomahdusta tutkitaan nurjahdustestissä. Nurjahdustestissä ohjelma olettaa, että rakenteeseen ei kohdistu pysyviä muodonmuutoksia ennen nurjahdusta. Tämän johdosta saatu arvo on teoreettinen.

Nurjahdustestissä tuenta ja voima määriteltiin samoin kuin puristustestissä. Ohjelmaan asetettiin 1 newtonin voima. Nurjahdustarkastelu antaa kertoimen kyseiselle voimalle. Tämä kyseinen voima on rakenteen teoreettinen nurjahdusvoima, jolla rakenne lommahtaa.

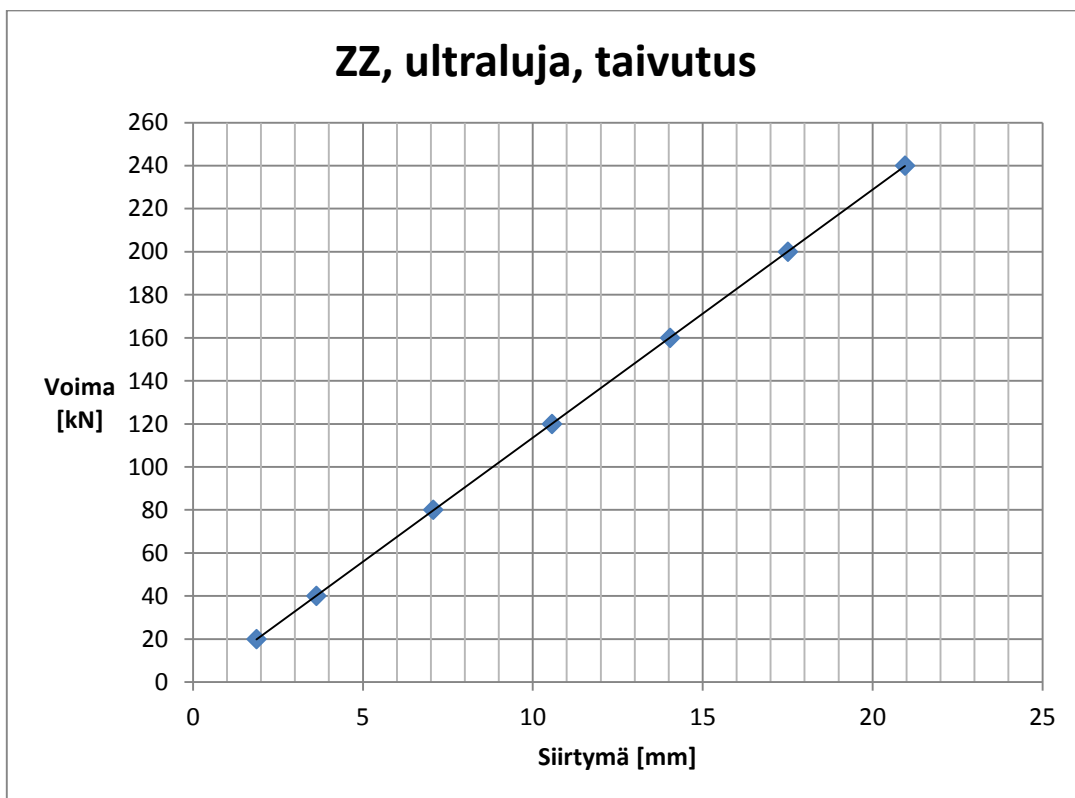
Kolmelle eri rakenteelle saatiin seuraavat lomahdusvoimat:

- ZZ ultraluja 519 kN
- ZZ S235 540 kN
- VF S235 184 kN.

Materiaalin vaikutus ZZ-rakenteen teoreettiseen nurjahdusvoimaan on tulosten perusteella lähinnä kosmeettinen. Ero on edelleen seurausta käytetyistä myötöluvun arvoista. S235:lle käytettiin lukua 210 MPa ja ultralujalle 1 350 MPa. Tämän vuoksi ZZ-rakenteen nurjahdusvoimana voidaan pitää teoreettisesti 540 ± 20 kN:n arvoa. VF-rakenne nurjahti odotetusti jo alhaisemmalla 184 kN:n arvolla.

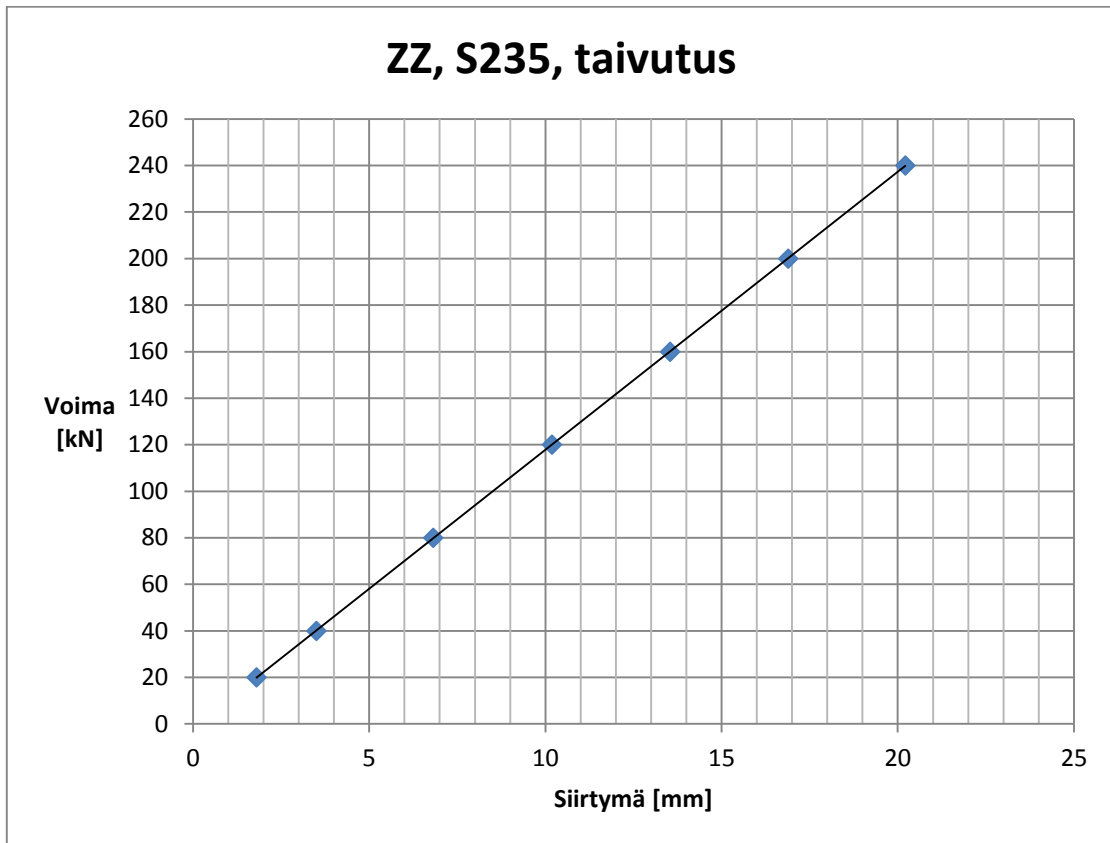
5.5 Taivutustestit

Staattisen taivutustestin päätarkoitus oli saada selville koko rakenteen jäykkyys, kun sitä painetaan keskeltä reunat tuettuina. Simulaatiosta saatiin pinnalle asetetun solidikappaleen siirtymä pystysuunnassa. Vaihtelemalla voiman arvoa saatiin taulukoitua siirtymälle arvoja. Saaduista arvoista muodostettiin siirtymävoima-kuvaajat (kuvat 33, 34, 35).



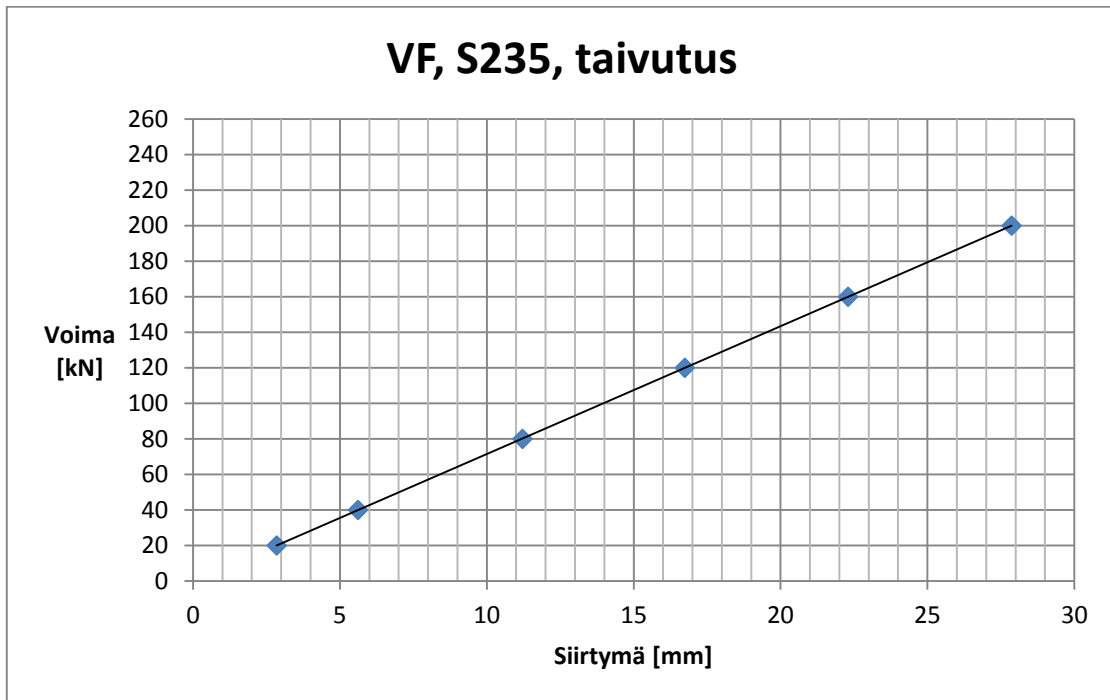
KUVA 33. ZZ-rakenteen taivutus (ultraluja)

Kuvaa 33 vastaava kuvaaja tehtiin myös S235:stä valmistetulle rakenteelle.



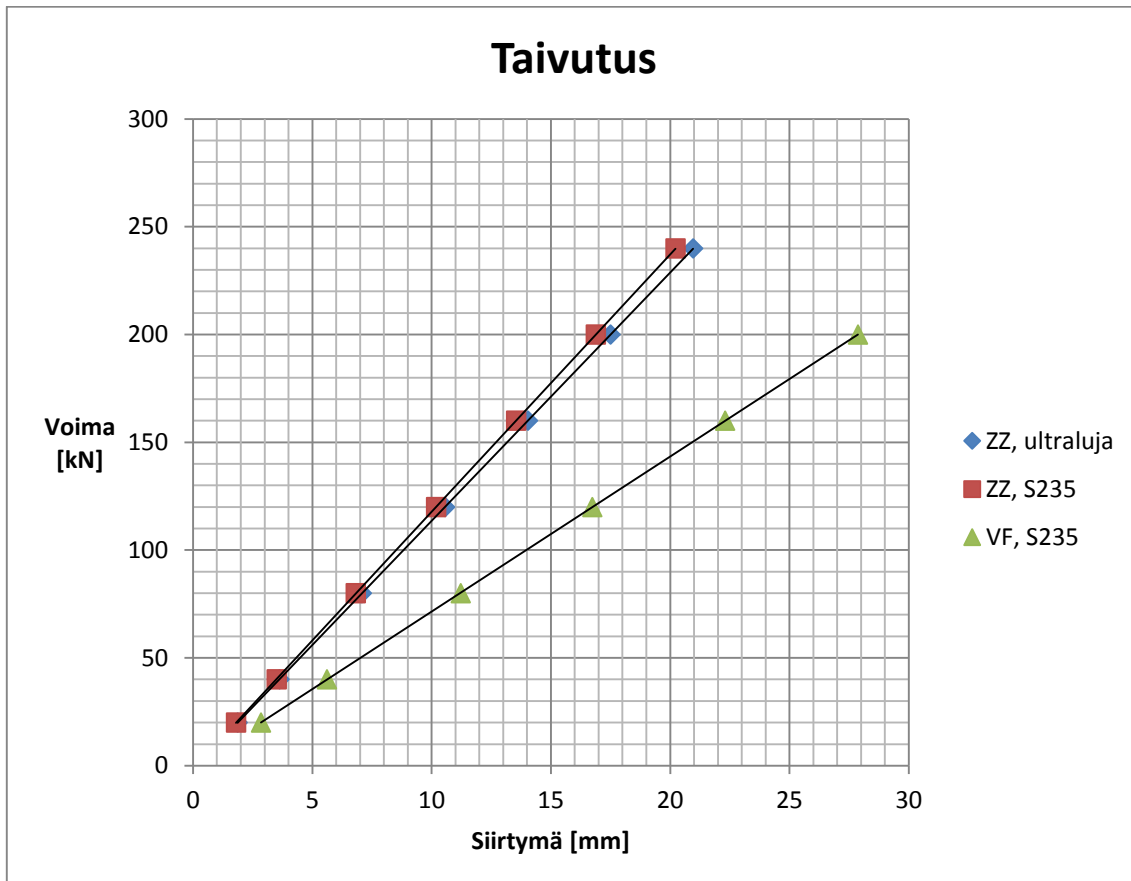
KUVA 34. ZZ-rakenteen taivutus (S235)

Kuvasta 34 nähdään, että rakenne taipuu kuten ultralujasta valmistettu rakenne. Kuvaaja tehtiin myös VF-rakenteelle (kuva 35).



KUVA 35. VF-rakenteen taivutus (S235)

Yhdistämällä jokaisen eri rakenteen kuvaajat voitiin vertailla rakenteiden jäykkyyksiä. Kuvasta 36 nähdään selkeä ero eri kennorakenteiden jäykkyyden välillä.



KUVA 36. Rakenteiden siirtymä-voima-kuvaajat

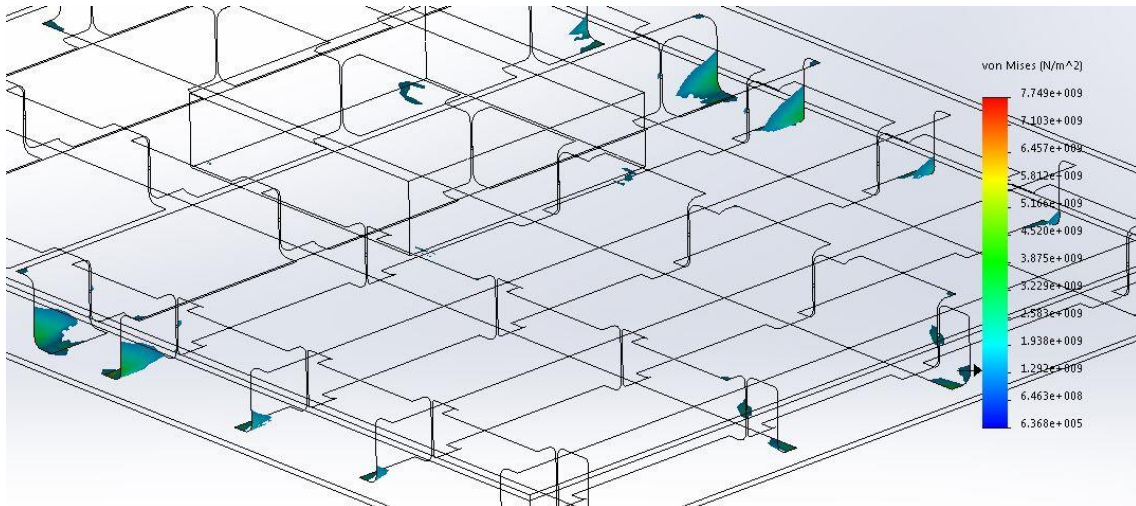
Rakenteille saatiin laskettua seuraavat jäykkyyden arvot kulmakertoimina:

- ZZ ultraluja 11,5 kN/mm
- ZZ S235 11,9 kN/mm
- VF S235 7,2 kN/mm.

Simulaatioiden tuloksista huomataan, että kahteen suuntaan jäykkä kenno on huomattavasti jäykempi taivutuksessa kuin yhteen suuntaan jäykkä VF-kenno.

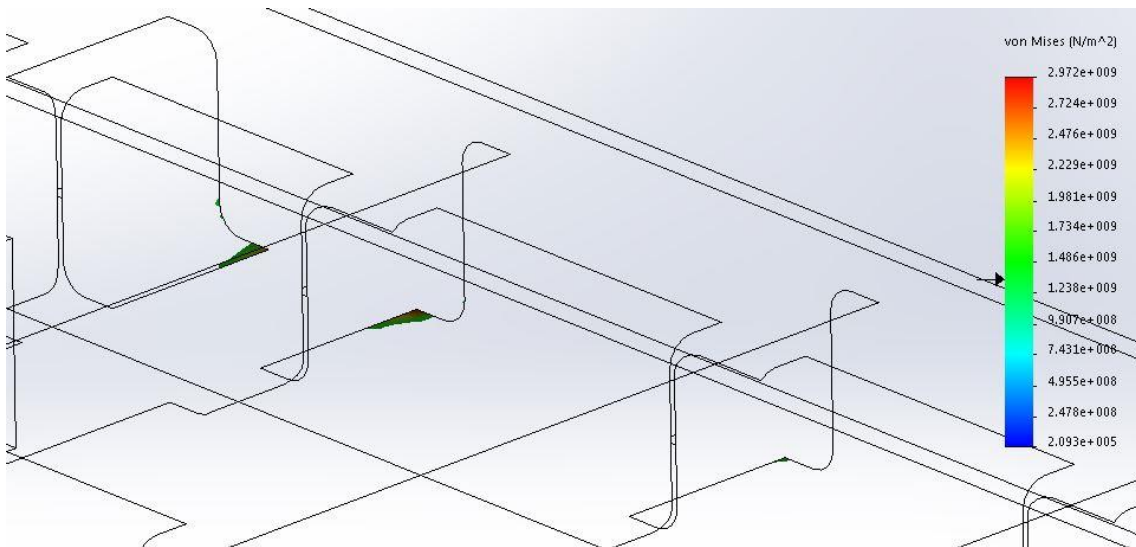
Taivutustestissä oli mahdollisuus tutkia myös rakenteen jännityksiä. Rakenteen suurin jännitys oli edelleen käytännössä mahdotonta todistaa.

Tutkitaan kuvasta 37 jännityksen näkyviä suurimpien arvojen sijaintia ZZ-kennossa, jossa värillä on kuvattu jännitykset yli myötörajan. Kennoa on puristettu kuvassa 120 kN:n voimalla. Kuvasta nähdään, että rakenteen jännityskeskittymät sijoittuvat rakenteen reunojen keskiosan ydinlevyihin.



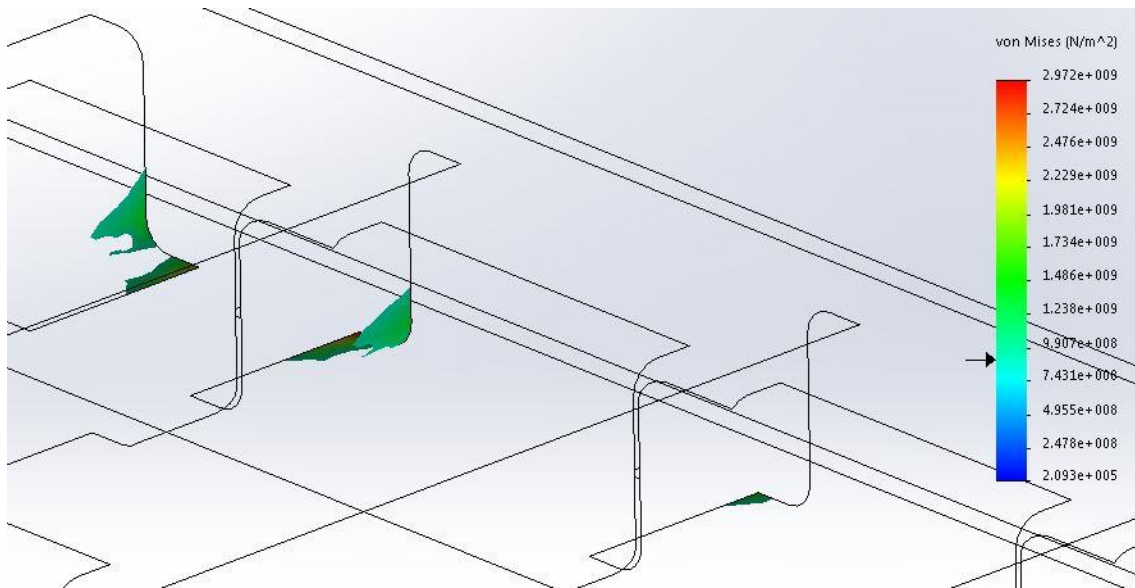
KUVA 37. Myötörajan ylittävät jännitykset (120 kN, ZZ, ultraluja)

Pienennettiin voiman arvoa. Kuvassa 38 näkyvät myötörajan ylittävät jännitykset, kun voimana käytettiin 30 kN:a.



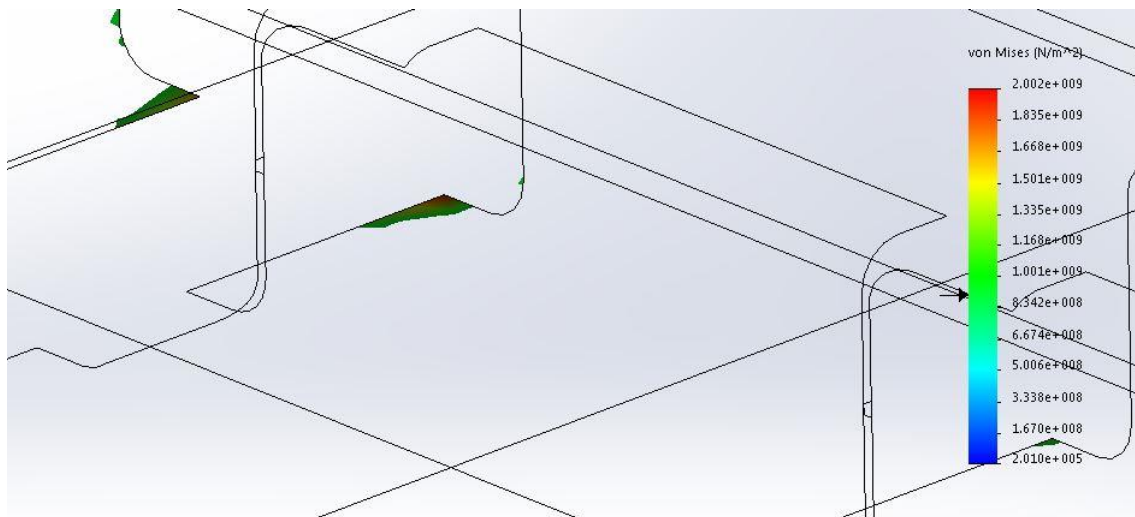
KUVA 38. Myötörajan ylittävät jännitykset (30 kN, ZZ, ultraluja)

Jännitykset näyttivät kuvan mukaan olemattomilta. Tutkittiin jännityksiä vielä 1,5 varmuuskertoimella myötörajaan nähden (kuva 39).



KUVA 39. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (30 kN, ZZ, ultraluja)

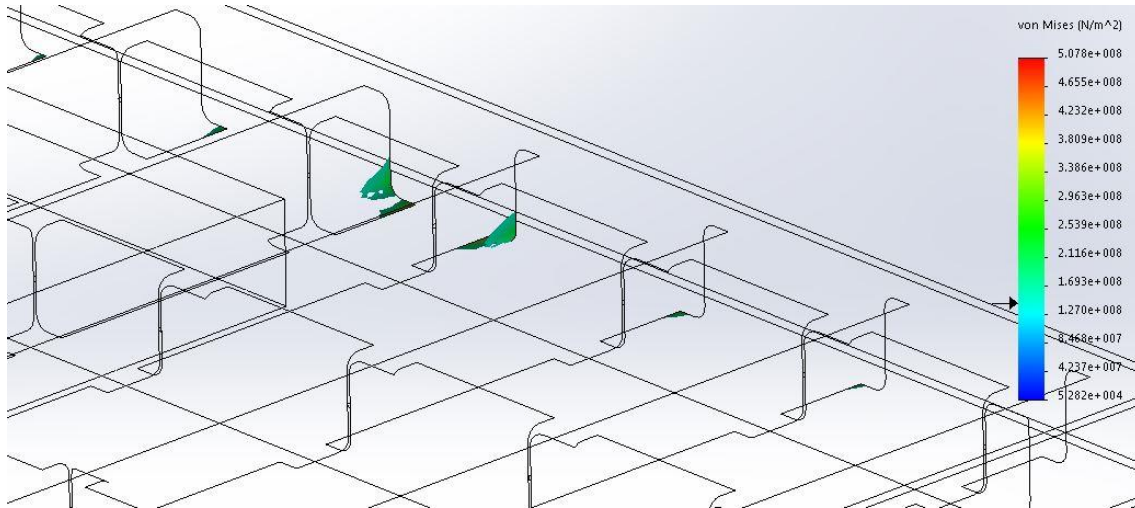
Kuten kuvasta 39 nähdään, jännityksiä esiintyy vielä huomattavasti ja voimaa oli pienennettävä. Kuvassa 40 nähdään rakenteen jännitykset 20 kN:n voimalla 1,5 varmuuskerroin huomioituna.



KUVA 40. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (20 kN, ZZ, ultraluja)

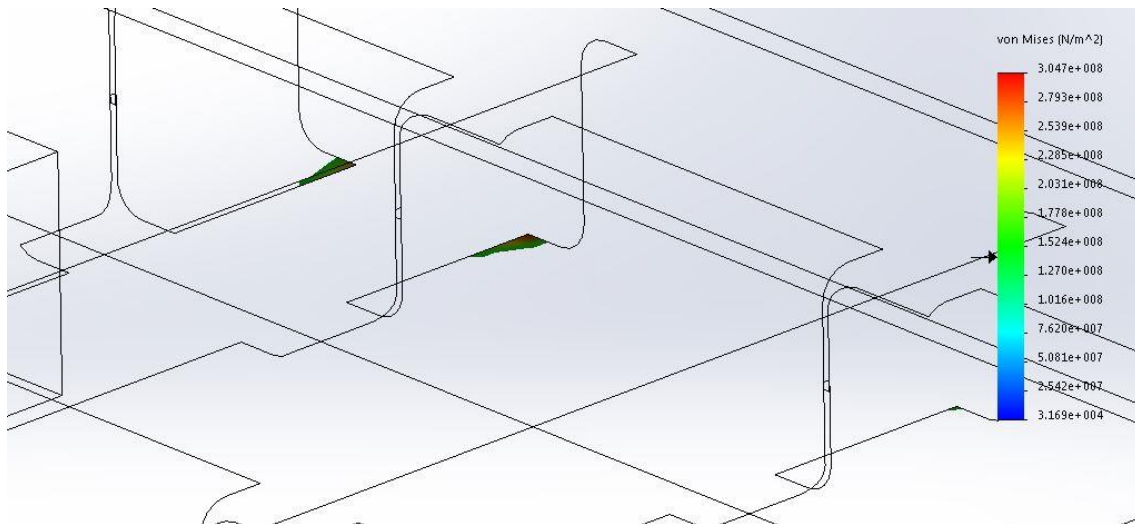
Kuvan 40 mukaisesti voineen olettaa, että ultraluja ZZ-rakenne kestää noin 20 kN:n kuormaa taivutustestissä ilman rakenteen pysyviä muodonmuutoksia. Pinnan siirtymä oli silloin 1,87 millimetriä.

Tutkittiin rakenteen jännityksiä, kun materiaalina käytetään S235:ta. Kuva 41 havainnollistaa jännityksiä 5 kN:n voimalla, kun huomioidaan 1,5:n varmuuskertoimen. Rakenteessa näkyy vielä jännityksiä ydinrakenteen särmäskohdissa.



KUVA 41. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (5 kN, ZZ, S235)

Kuvassa 42 nähdään jännitykset 1,5:n varmuusluku huomioituna, kun kuormittavana voimana käytettiin 3 kN:a.

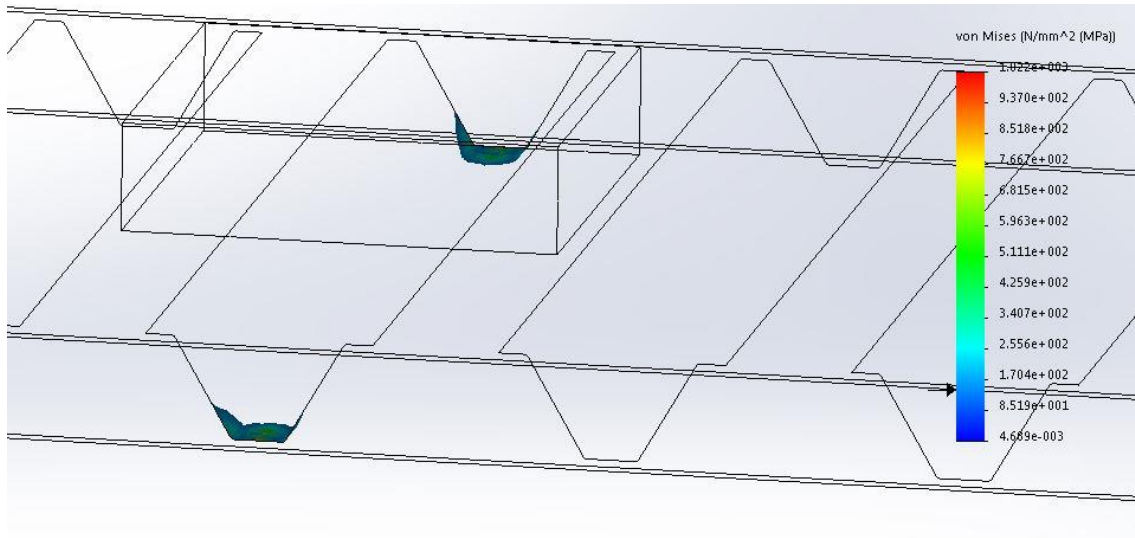


KUVA 42. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (3 kN, ZZ, S235)

Kuvien 41 ja 42 mukaan voineen olettaa, että S235:tä tehty ZZ-rakenne kestää vain noin 3 - 5 kN:n kuormaa taivutuksessa. Siirtymä rakenteen pinnalle on täl-

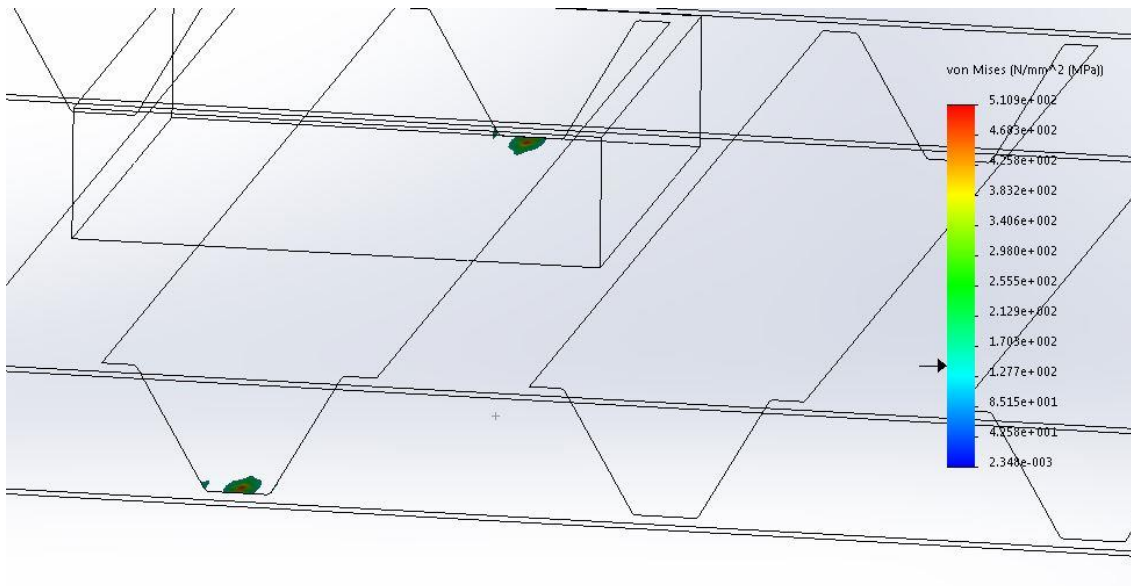
lön 0,27... 0,45 millimetriä. Tarkkaa arvoa on tietenkin vaikea määrittää, sillä kriittisen jännityskeskittymän koon määrittäminen on täysin arvioitua.

Tutkittiin myös VF-rakenteen staattista kuormitusta taivutuksessa. Materiaalina käytettiin S235:ta, joten aloitettiin voiman haarukointi edelleen alhaisemmalla voiman arvolla. Kuvasta 43 nähdään, että rakenteen VF-ytimeen syntyy vielä jännityksiä särmäyskohtiin 3 kN:n voimalla. Siirtymä oli silloin 0,45 millimetriä.



KUVA 43. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (3 kN, VF, S235)

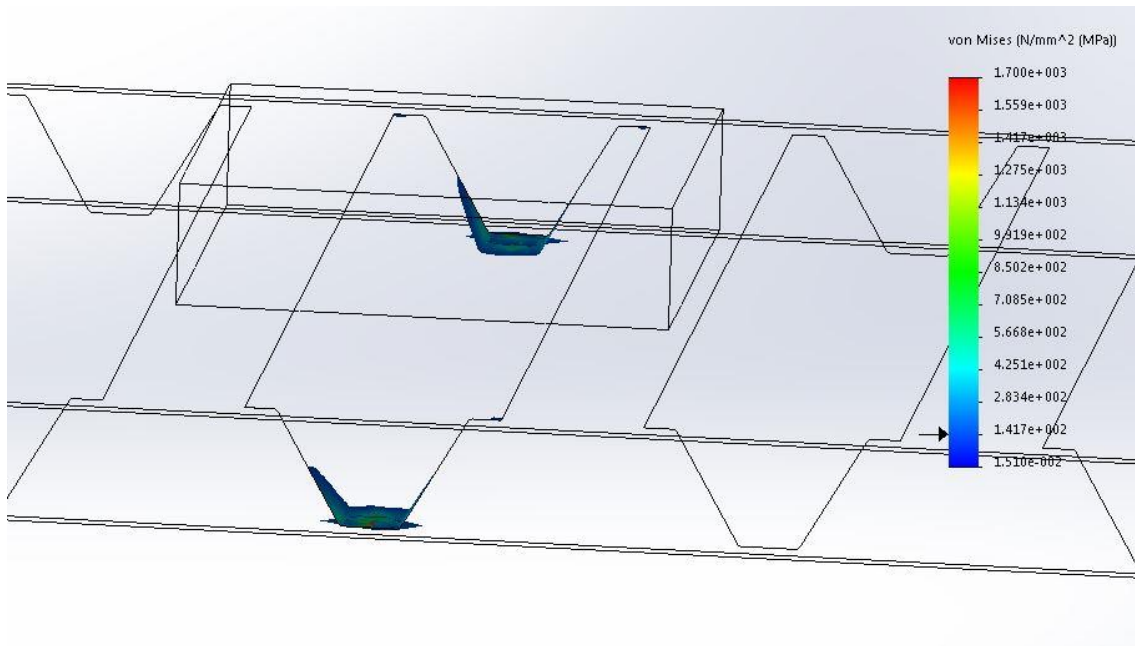
Voiman arvoa laskettiin 1,5 kN:iin (kuva 44). Siirtymä oli silloin 0,23 millimetriä. Jännityksiä ei esiintynyt enää ydinlevyjen särmäyskohdissa.



KUVA 44. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (1,5 kN, VF, S235)

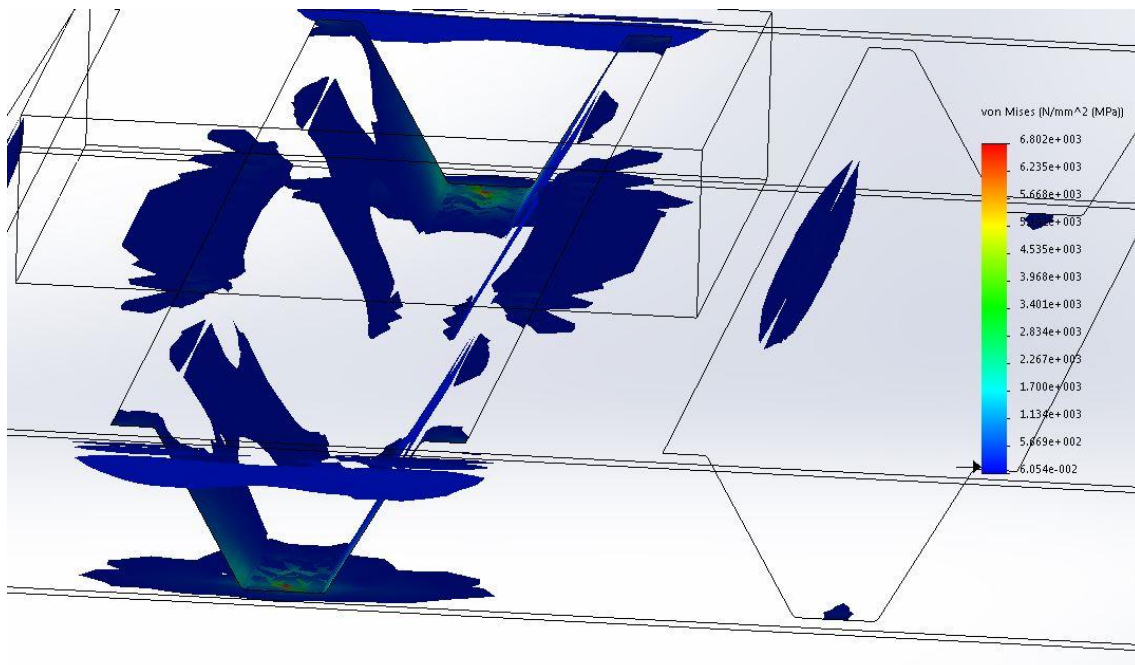
Rakenteesta on todella vaikea määrittää voiman arvoa, jolloin se ei enää palautu kuormituksen jälkeen alkuperäisiin mittoihinsa. Taivutuksessa VF-kennon arvioitu suurin sallittu voima on 1,5...3,0 kN:ia siirtymän ollessa 0,23...0,45 millimetriä.

Tutkitaan vielä jännityksien sijoittumista rakenteeseen suuremmilla voiman arvioilla. Kuvassa 45 nähdään, kuinka jännitysalueet leviävät ydinrakenteen reunojen särmäskohtiin.



KUVA 45. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (5 kN, VF, S235)

Kasvatettiin voiman arvoa vielä 20 kN:iin. Kuvasta 46 nähdään, että jännityskeskittymät leviävät laajalle ydinrakenteen reunoille ja särmäyskohtiin.



KUVA 46. Varmuuskertoimen 1,5 ylittävät myötörajan jännitykset (20 kN, VF, S235)

6 KOEJÄRJESTELYISTÄ

Opinnäytetyössä oli alun perin tarkoitus suorittaa myös käytännön kokeet. Levyrakenteiden saapumisen viivästyksen vuoksi testejä ei ehditty kuitenkaan tekemään. Tästä syystä opinnäytetyöhön tehtiin vain testimenetelmän esisuunnitelu.

6.1 Käytännön kokeet

Koestuksissa ohutlevykennorakenteille on tarkoitus suorittaa kolme erilaista testiä. Ensimmäisessä testissä eli puristustestissä kennorakenteet asetetaan tasaiselle alustalle ja niitä painetaan 200 mm x 200 mm kokoisella paksulla teräslaataalla tai -rakenteella. Laatta asetetaan pintalevyn keskelle, jolloin laatta peittää laserhitseistä muodostuvan neliön muotoisen alan. Tällä tavalla estetään painon kohdistumisen vapaana ilmassa olevalle teräslevylle ja pintalevyn paikallinen luhistuminen.

Kokeissa on tarkoitus painaa levyjä hydraulipuristimella. Samalla taulukoidaan painolaatan pystysuorainen siirtymä. Kyseinen siirtymä saadaan joko koneen siirtymäanturista tai erillisestä siirtymäanturista. Anturi kalibroidaan nollassentoon silloin, kun levyyn ei kohdistu lainkaan voimaa. Kun levyä on painettu alaspäin, nostetaan voiman tuottoon käytettyä hydraulisyylinteriä ylöspäin ja luetaan taas anturin arvo. Sen pitäisi näyttää nolaa pienillä voiman arvoilla.

Seuraavaksi rakennetta painetaan uudelleen hiukan suuremmalla arvolla. Testiä jatketaan niin kauan, kunnes rakenne ei enää palaudu ennalleen. Jos testikappale ei palaudu minkään voiman jälkeen alkuperäiseen mittaansa, taulukoidaan kuitenkin pysyvät siirtymän arvot. Rakenteen taivuttaminen useaan kertaan voi aiheuttaa kuitenkin muokkauslujittumista. Voi olla järkevää painaa rakenne yhdellä painalluksella, myötöraja ylittyy varmasti ja rakenne ei palaudu enää alkuperäiseen mittaansa. Jos siirtymä-voima-kuvaaja käyttäytyy lineaarisesti myötörajaan asti rakenneteräksen tavoin, voidaan kuvaajasta nähdä suoraan suurin sallittu siirtymä ja sitä vastaava voima.

Toisessa testissä eli nurjahdustestissä jatketaan edellisen levyn painamista sen jälkeen, kun rakenne ei enää palaudu alkuperäiseen muotoonsa. Tarkoituksena on lommauttaa levyrakenne ja kirjata levyyn kohdistunut voima sekä siirtymän arvo.

Kolmannessa testissä levyä painetaan vastaavalla tavalla, mutta levyrakenne on asetettu sitä hiukan pienemmän kehikon päälle. Tällä tavalla rakenne on tuettu reunoilta, jolloin voidaan tutkia sen kykyä vastustaa taivutusta molempiin suuntiin. Levyn on oltava vähintään 40 mm jokaiselta reunalta kehikon päällä. Näin varmistetaan ydinrakenteen vaikutus taivutukseen. Jos sivuttaissiirtymää ilmenee voimaa kasvattaessa, kehikkoa voi tarvittaessa pienentää. Kehikon sisämitoiksi saadaan maksimissaan 820 mm x 570 mm.

6.2 Taulukointi

Jokaisessa testissä on tarkoitus kirjata ylös voiman ja siirtymän arvot eri kuormitustilanteissa. Kirjataan jokaiselle eri rakenteelle erilliset taulukot taulukon 1 mukaisesti

TAULUKKO 1. Voima ja siirtymä taulukoituna käytännön kokeissa

Voima [kN]	Siirtymä	Siirtymä, kun $F=0$
0,5	x	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.

Käytännön kokeiden tarkoituksena on selvittää rakenteiden jäykkyys sekä voiman arvo, minkä rakenne kestää myötämättä. On mahdollista, että siirtymä-

voima-kuvaaja ei ole lineaarinen, vaikka simuloinneissa tuloksiksi näin saatiinkin.

Simulaatioiden mukaan ultralujan ZZ-rakenteen pitäisi kestää peräti 80 kN:n kuormitus ilman rakenteeseen kohdistuvia suuria pysyviä muodonmuutoksia. S235:stä tehdyt kennot kestävät kuitenkin huomattavasti vähemmän. Jokaisen rakenteen siirtymät ovat pieniä, joten siirtymän määrittämiseen käytetyn siirtymäanturin tarkkuus on oltava erityisen suuri. Taulukosta 2 nähdään puristustestin arvioidut maksimivoimat sekä niitä vastaavat siirtymät.

TAULUKKO 2. Puristustesti, arvioidut voimat simulointien perusteella

Rakenne	Voima [kN]	Siirtymä [mm]
ZZ ultraluja	80	1,13
ZZ S235	12	0,18
VF S235	3,25... 5,5	0,041... 0,069

Taivutustestissä rakenteiden suurimmat sallitut voimat tulevat olemaan huomattavasti pienempiä kuin puristustestissä. Taivutuksessa rakenteet taipuvat enemmän, joten rakenteisiin syntyy suurempia jännityksiä jo paljon pienemmillä voiman arvoilla. Ultraluja ZZ-kenno kestää simulointien perusteella huomattavasti paljon enemmän kuormaa kuin S235:stä valmistetut kennot. Taulukosta 3 nähdään taivutustestin arvioidut maksimivoimat ja niitä vastaavat siirtymät.

TAULUKKO 3. Taivutustesti, arvioidut voimat simulointien perusteella

Rakenne	Voima [kN]	Siirtymä [mm]
ZZ ultraluja	20	1,87
ZZ S235	3,0... 5,0	0,27... 0,45
VF S235	1,5... 3,0	0,23... 0,45

Taulukosta 4 nähdään simulointien perusteella saadut teoreettiset nurjahdusvoiman arvot puristustestiä varten. Oletettavissa on, että kennorakenteiden ytimet myötävät jo paljon ennen taulukon arvoja.

TAULUKKO 4. Teoreettinen nurjahdusvoima

Rakenne	Voima [kN]
ZZ ultraluja	519
ZZ S235	540
VF S235	184

6.3 Erityishuomioita käytännön kokeisiin

Käytännön kokeissa on kiinnitettävä erityisesti huomiota myös seuraaviin asioihin:

- Painolaatan on oltava täysin keskellä rakennetta. Sen on myös oltava neliön muotoinen 200 mm:n sivusärmällä. Simuloinnissa neliön paksuutena käytettiin 50 mm:ä. Käytännön kokeissa levy ei saa ottaa vastaan muodonmuutoksia.
- Painolaattana voidaan käyttää myös riittävän suurta ympyrän muotoista kappaletta. Simulaatiot on tämän jälkeen tehtävä kuitenkin uudelleen.
- VF-kenno täytyy asettaa niin, että sen ydinrakenne on sivultapäin katsottuna V-asennossa. Levy asetetaan testeihin niin, että levyn keskiosan hitsisauma on alaspäin.
- Taivutustesteissä on edettävä erittäin pienin välein ylöspäin. Reunoilta tuetut kennorakenteet ovat erittäin taipuisia, ja ne saavat pysyviä muodonmuutoksia jo hyvin pienillä voiman arvoilla.
- Tuennan on oltava riittävän jäykkä. Jos tukirakenteet antavat periksi, siirtymän arvoista saadaan liian suuret. Voiman arvot pysyvät kuitenkin todenmukaisina.

7 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä tutkittiin FEM-analyysin soveltuvuutta ohutlevykennorakenteiden kuormituksen tutkimiseen. Työssä simuloitiin ohutlevykennorakenteiden eri kuormitustilanteita FEM-ohjelmistossa. Työn tarkoituksena oli alun perin vertailla tuloksia myös käytännön kokeisiin. Kokeet jäivät aikataulullisten ongelmien vuoksi suorittamatta. Työssä tehtiin kuitenkin koejärjestelyjen esisuunnittelua.

Työssä suoritettiin FEM-analyysit eri rakenteille ja materiaalivaihtoehdoille Solidworksin simulaatiotyökalulla. Huomattiin, että rakenteena VF-kenno on puristuksessa samanarvoinen vaihtoehto kahteen suuntaan jäykälle kennolle. Materiaalina ultralujan teräksen ylivoimaisuus näkyi erityisesti suurimman sallitun voiman määrittämisessä. Korkeamman myötölujuuden teräs kestää odotetusti huomattavasti suurempia jännityksiä.

Puristustestissä VF-kennon suurin jännitys muodostui painolevyn kohdalla olevan V-ytimen alaosaan. Alaosan hitsisauma ja ytimen sivut särmäyksestä ylöspäin saavat suurimman jännityksen arvot. Kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne tasasi jännityksiä paljon paremmin. Vaikka rakenteeseen kohdistuu erittäin suuria paikallisia jännityksiä teräviin nurkkiin, laajemmat jännitysalueet sijoittuvat tasaisesti rakenteen kuormituskohdan läheisyydessä oleviin ydinlevyjen särmäyksiin.

Puristustestissä VF-kenno osoittautui kahdeksan prosenttia jäykemmäksi kuin kahteen suuntaan jäykkä kenno. Tulos ei ollut odotetun kaltainen, mutta pienen eron vuoksi arvo saattaa osua myös virhemarginaalin sisään. Rakenteille saatiin laskettua seuraavat jäykkyyden arvot:

- ZZ ultraluja 75,2 kN/mm
- ZZ S235 78,1 kN/mm
- VF S235 84,7 kN/mm.

Lommahdustarkastelussa rakenteille saatiin seuraavat teoreettiset lommahdusvoimat:

- ZZ ultraluja 519 kN

- ZZ S235 540 kN
- VF S235 184 kN.

Lommahdusvoiman arvot ovat kuitenkin täysin teoreettisia, koska rakenne myö-
tää jo paljon pienemmillä voiman arvoilla.

Taivutustestissä VF-kennon jännityshuiput osuivat keskimmäisen ydinlevyn mo-
lempiin päihin. Jännitys oli edelleen erityisen suurta kuormituskohdan alla ole-
van pintalevyn ja VF-ytimen hitsisaumassa, mutta myös hitsin vierellä ydinle-
vyssä ja sen särmäyskohdissa. Kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne jakoi
jännityksen edelleen tasaisemmin. Jännityshuiput osuivat VF-kennon tavoin
keskimmäisen poikittain asetetun ydinlevyn molempiin päihin. Rakenteille saa-
tiin laskettua seuraavat jäykkyyden arvot:

- ZZ ultraluja 11,5 kN/mm
- ZZ S235 11,9 kN/mm
- VF S235 7,2 kN/mm.

Taivutustestissä kahteen suuntaan jäykkä kennorakenne osoittautui peräti 65
prosenttia jäykemmäksi kuin yhteen suuntaan jäykkä VF-rakenne.

Opinnäytetyössä ratkaistiin myös kennorakenteiden geometriamallien simuloin-
tivalmisteluiden ongelmia. Eniten ongelmia aiheutti kokoonpanon tuennan ja
hitsien mallinnuksen suunnittelu sekä rakenteen stabilisointi analyysiä varten.

Analyyseissä saatiin yhteys myös siirtymän ja voiman välille. Arvioita voidaan
pitää erittäin karkeina ja olettamuksia jouduttiin tekemään. Elementtiverkon ko-
koa suurentamalla olisi päästy eroon paikallisista jännityshuipuista, jolloin oltai-
siin saatu selville arvio rakenteen kestävyydelle. Tämä menetelmä olisi tehnyt
tuloksista kuitenkin epätarkempia. Tämän vuoksi työssä suoritettiin rakenteen
jännitysanalyysit täysin ohjelman antamien jännityskeskittymien silmämääräisel-
lä tulkinnalla ja vertailulla.

Elementtimenetelmän käyttö osoittautui erinomaiseksi työkaluksi rakenteen
jäykkyyden ja jännityshuippujen tutkimiseen. Kennorakenteen suurimman rasi-
tuksen määrittämiseen sen soveltuvuus on kuitenkin heikko, koska rakenteisiin

kohdistuu suuria paikallisia jännityshuippuja erityisesti teräviin nurkkiin tai hit-saussiaumoihin tapauksen mukaan.

Työn tuloksia voidaan käyttää hyväksi rakenteen jännityshuippujen määrittämiseen kennorakenteiden suunnittelussa. Simulointimalleissa voidaan helposti vaihtaa kuormitusta ja tuentatapaa, mikä mahdollistaa eri kuormitustapausten arvioidun maksimirasituksen määrittämisen. Elementtimenetelmää käytettäessä on kuitenkin huomioitava, että sen käyttö on aina suuntaa antavaa.

LÄHTEET

Finite Element Analysis | SOLIDWORKS. 2016. Dassault Systèmes. Saatavissa: <https://www.solidworks.com/sw/products/simulation/finite-element-analysis.htm>. Hakupäivä 14.2.2016.

Kenno Tech – Laserhitsatut kerroslevyt, linkki Kenno® tuotteet ja palvelut. Riihimäki: Kenno Tech Oy. Saatavissa: <http://www.kennotech.fi/>. Hakupäivä 16.2.2016.

KENNO – Kevyet levyt -teknologiaohjelman loppuraportti 2003. Helsinki: Teknologian kehittämiskeskus. Saatavissa: <https://kansalliskirjasto.finna.fi/Record/fennica.745296>. Hakupäivä 20.2.2016.

Koivisto, Kaarle – Laitinen, Esko – Niinimäki, Matti – Tiainen, Tuomo – Tiilikka, Pentti – Tuomikoski, Juho 2008. Konetekniikan materiaalioppi. Helsinki: Edita Publishing.

Laserhitsatut kerroslevyt vaativiin sovellutuksiin. Riihimäki: Kenno Tech Oy. Saatavissa: <http://www.kennotech.fi/>. Hakupäivä 3.2.2016.

Logan, D.L. 2007. A First Course in the Finite Element Method, Fourth Edition. Canada: Nelson, a division of Thompson Canada. Saatavissa: http://www.cengagebrain.com.mx/content/logan52986_0534552986_02.01_chapter01.pdf. Hakupäivä 13.2.2016.

Lähteenmäki, Matti 2012. K12120/2012 Elementtimenetelmien perusteet 5 op. Luentomateriaali. Tampere: Tampereen ammattikorkeakoulu. Saatavissa: http://personal.inet.fi/koti/m/lahteen/arkistot/elpe_pdf/johdanto.pdf. Hakupäivä 7.3.2016.

Niemi, Erkki 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiainfo Teknova Oy.

Pekkanen, Harri 2016. Toimitusjohtaja, Kenno Tech Oy. Puhelinkeskustelu 14.1.2016.

Pekkanen, Harri - Vallikari, Jouko 2010. Laserhitsattu ohutlevykenno pysäyttää ammuksset ja sirpaleet. Ohutlevy 2/2010. Saatavissa (rajoitettu saatavuus): <http://www.e-julkaisu.fi/ohutlevy/2010/02/>. Hakupäivä 20.2.2016.

Saarineva, Jarmo 1995. Lujuusoppi, peruskurssi. Tampere: Pressus Oy.