



PAINEKUORMITETUN TERÄSLEVYRAKENTEEN LOMMAHDUSANALYYSI
BUCKLING ANALYSIS OF PRESSURE LOADED SHEET METAL STRUCTURE

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan kandidaatintyö

2022

Lari Honkanen

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Konetekniikka

Lari Honkanen

Painekuormitetun teräslevyrakenteen lommahdusanalyysi

Konetekniikan kandidaatintyö

32 sivua, 18 kuvaa, 1 taulukko ja 6 liitettä

Tarkastaja: TkT Antti Ahola

Avainsanat: FE-analyysi, lommahdustarkastelu, levyrakenne

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli tutkia painekuormitetun teräslevyrakenteen lommahdusta eri levynpaksuuksilla elementtimenetelmällä suoritetun laskennan (engl. Finite Element Analysis, FEA) avulla. Tarkoituksena oli selvittää mahdollisuudet keventää rakennetta lommahduksen näkökulmasta. Laskenta suoritettiin lineaarisena ominaisarvotehtävänä FE-ohjelmiston avulla. Tuloksien kannalta tällöin ei huomioitu mahdollisia hitsauksesta tai taivutuksesta syntyneitä jäännösännityksiä. Laskennassa ei otettu huomioon myöskään materiaalin epälineaarisuutta- tai geometriavirheitä. Nämä lineaarisen laskentatavan yksinkertaistukset otettiin huomioon tuloksia analysoitaessa.

Työ alkoi 3D-mallia muokkaamalla Femap-ohjelmalla. Geometriasta luotiin haluttu keskipintamalli, joka verkotettiin lommahdustarkastelua varten sopivalla tarkkuudella. Elementtityyppinä käytettiin laattaelementtiä. Malliin asetettiin myös laskentaa varten tärkeät parametrit, kuten kuormitukset, reunaehdot ja materiaaliparametrit. Työssä tutkittiin lommahduksen ominaisarvoja varioitaessa alipaineistetun levyn paksuutta. Tutkittiin myös käyttöasennon 180 asteen muuttamisen vaikutusta lommahtamiseen. Lopuksi vertailtiin alipaineen ja levynpaksuuden muutoksien vaikutusta lommahduksen ominaisarvolukemiin.

FE-ohjelmiston lommahdusanalyysin tulokset koottiin Excel-taulukkoon. Taulukosta pystyttiin muodostamaan havainnollistavat kuvaajat rakenteen lommahduskäyttäytymisestä eri levynpaksuuksilla. Tuloksista ilmeni, että rakennetta on mahdollista keventää lommahdusnäkökulmasta. Huomattiin myös, että levynpaksuuden muutoksella oli merkittävämpi vaikutus lommahduksen ominaisarvoihin, kuin paineen arvon muutoksella.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Lari Honkanen

Buckling analysis of pressure loaded sheet metal structure

Bachelor's thesis

2022

32 pages, 18 figures, 1 table and 6 appendices

Examiners: D.Sc. Antti Ahola

Keywords: FEA, buckling, sheet metal structure

Objective of this bachelor's thesis was to examine local buckling of pressure loaded sheet metal structure with finite element analysis (FEA). Research was done by varying the thickness of the sheet metal plate. The aim was to discover if it was possible to lighten the structure in an aspect of buckling. Analyses were conducted as a linear eigenvalue buckling analyses with FEA software. In linear analysis, potential residual stresses, caused by welding or forming, were not considered. In addition, material nonlinearity or geometrical imperfections were not considered. These simplifications of the linear eigenvalue buckling analysis were considered in the analysis of the results.

The research began with modifying the 3D-model with the Femap software. Mid-plate model was created from the geometry which was then meshed with appropriate density for the buckling analysis. Plate element was used as an element type for the model. After that all important parameters, such as loads, constraints and material parameters, were obtained for the model. In this thesis, eigenvalues of the linear analysis were examined when varying the thickness of the negatively pressurized metal plate. The impact to the eigenvalues, when changing the using position 180 degrees, was also examined. Lastly, the impact to the eigenvalues were compared, when altering the negative pressure and thickness of the metal plate.

The results of the buckling analysis were gathered to an Excel table. Demonstrative charts of the buckling in the structure with different sheet metal plate thicknesses could be formed from the Excel table data. It appeared from the results that, in an aspect of buckling, the structure can be lightened. Also, it was noticeable that change in thickness of the metal plate had greater affect to buckling than what change in pressure had.

KIITOKSET/ ACKNOWLEDGEMENTS

Työn aiheen antamisesta ja luottamuksesta haluaisin kiittää yrityksen yhteyshenkilöitä Seppo Kupiaista ja Oskari Levyä. Koen saaneeni motivaatiota ja sellaisia oppeja työtä tehdessä, mitä ei välttämättä muunlaisessa kandidaatintyössä olisi mahdollista saavuttaa. Haluaisin myös kiittää työni ohjaajaa Antti Aholaa tuesta, jota hän on pystynyt antamaan kiireisen keväänsä aikana.

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

E	materiaalin kimmokerroin [MPa]	
p	paine	[bar, Pa]

Kreikkalaiset

ρ	tiheys	[tn/mm ³]
--------	--------	-----------------------

Lyhenteet

FEA	Finite Element Analysis, elementtimenetelmällä suoritettu laskenta
FEM	Finite Element Method, elementtimenetelmä

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	8
1.1	Työn tavoite, suoritus ja tutkimuskysymykset.....	8
1.2	Rajaus.....	10
2	Kirjallisuuskatsaus.....	11
2.1	Lommahdus teräslevyrakenteessa	11
2.2	FEM-laskenta	13
3	3D-mallin valmistelu ja FEM-analyysi	16
3.1	3D-mallin valmistelu ja verkotus	17
3.2	FEM-analyysi.....	20
3.2.1	Materiaalitiedot.....	21
3.2.2	Kuormitukset ja reunaehdot.....	21
3.2.3	FEM-analyysin asetukset.....	22
4	Tulokset ja niiden analysointi.....	23
4.1	Normaali käyttöasento.....	23
4.2	Käyttöasennon 180 asteen muutos	25
4.3	Paineen muutoksen vaikutus ominaisarvoihin normaalissa käyttöasennossa	28
5	Johtopäätökset ja pohdinta	30
	Lähteet	32

Liitteet

Liite 1. Malliin asetetut reunaehdot kuvattuna.

Liite 2. FEM-analyysien data taulukoituna.

Liite 3. Lokaalien lommahduskohtien sijainnit normaalilla käyttöasennolla

Liite 4. Lokaalien lommahduskohtien sijainnit käyttöasentoa muutettaessa 180 astetta

Liite 5. Paineen ja levynpaksuuden muutoksien vaikutus stabiiliuden ominisarvolukemiin

Liite 6. Kalvojännityksen kriittinen kohta lähellä tuentaa ja lommahduskohta pienimmällä ominisarvolla levynpaksuudella 5 mm normaalilla käyttöasennolla.

1 Johdanto

Levyrakenteita hyödynnetään teollisuudessa monissa eri käyttökohteissa. Olkoon kyse sitten nostureiden puomeista tai rakennuksien runkorakenteista, niin hitsatut ja taivutetut teräslevyrakenteet tarjoavat hyvät lujuus- ja jäykkyysominaisuudet omaan painoonsa nähden. Levyrakenteet ovat siis levyistä muovaamalla tai yhteen liittämällä koottuja rakennekokonaisuuksia. Muita teräksestä valmistettavia rakenteita ovat muun muassa palkki-, ristikko- ja putkirakenteet.

Tämä kandidaatintyö tullaan tekemään yritykselle, joka valmistaa muun muassa paineenalaisia teräslevyrakenteita osana liiketoimintaansa. Yrityksen tavoitteena on saada uutta tietoa levyrakenteensa lommahduskestävyydestä ja löytää mahdollisuuksia keventää rakennetta. Lommahdus tarkoittaa levyrakenteen stabiiliuden menettämistä, jolloin levyn pintaan syntyy aaltomaisuutta ja rakenteen kestävyys heikkenee tai kantokyky menetetään (Niemi 2003, 15 & 17). Työssä esiteltävien tutkimusmenetelmien ja -tuloksien avulla FEM-ohjelmistojen tunteva lukija saa edellytykset suorittaa lommahdusanalyysin teräslevyrakenteelle. Tämän analyysin pohjalta lukija kykenee myös selvittämään lommahduksen kannalta teoreettisen minimiarvon levynpaksuudelle.

1.1 Työn tavoite, suoritus ja tutkimuskysymykset

Tässä kandidaatintyössä tutkitaan lommahdusta paineenalaisessa teräslevyrakenteessa FEM-ohjelmiston avulla. Tutkimuksessa keskitytään rakenteen stabiiliuden tarkasteluun ominaisarvotehtävänä ja pyritään sen pohjalta määrittelemään teoreettinen minimiarvo teräslevyn paksuudelle. Tarkasteltavassa kotelomaisessa teräslevyrakenteessa sen sisäpinnalle kohdistuu alipainetta ja rakenteeseen oman painon aiheuttamaa taivutusta. Normaalisissa käyttöasennossa alipaineen synnyttämä imuvoima sekä oman painon aiheuttama voima vaikuttavat eri suuntiin vähentäen näiden yhteisvaikutusta. Tarkasteltavan rakenteen yleiskuva on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1. Työssä tarkasteltava painekuormitettu teräslevyrakenne.

Työn stabiiliusongelman ratkaisemiseen hyödynnetään FE-analyysiä Siemens Femap -ohjelmistolla. Kriittinen jännitysarvo ratkaistaan lineaarisena ominaisarvottehtävänä. Niemen (2003, 42) mukaan tämä on toinen periaatteellinen ratkaisemistapa stabiiliusongelmille epälineaarisen ratkaisutavan lisäksi. Rakenne käsitetään pysyvän lineaarisesti kimmoisalla muodonmuutoksen alueella ja noudattavan sekä lineaarisen kimmoteorian materiaalimallia, että pienten taipumien oletuksia. Tällä alueella pätee Hooken-laki, jossa jännitys ja venymä ovat lineaarisesti kytköksissä toisiinsa. Siirryttäessä myötörajan yli tai huomioitaessa materiaalin ja geometrian virheitä tulisi ratkaisussa hyödyntää epälineaarista ratkaisutapaa. Työn avulla pyritään vastaamaan seuraaviin kysymyksiin:

- Miten rakenteen levynpaksuuden pienentäminen vaikuttaa stabiliteetin ominaisarvoihin vakiokuormituksella?
- Millainen vaikutus rakenteen käyttöasennon 180° muutoksella on stabiliteetin ominaisarvoihin?
- Onko alipaineen muutoksen vaikutus rakenteen lommahtamiseen suhteellisesti sama kuin rakenteen levynpaksuuden muutos?

1.2 Rajaus

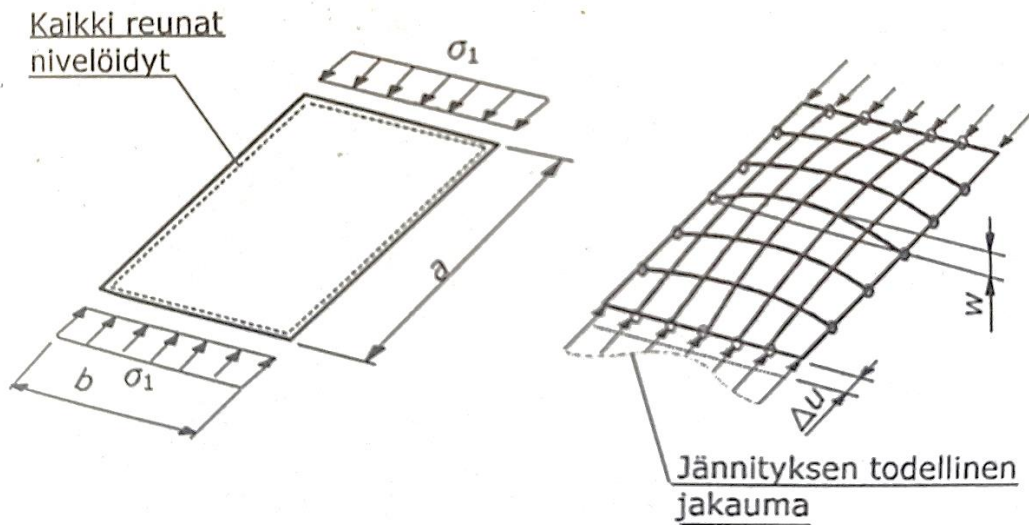
Työssä rajataan teräslevyrakenteen stabiiliustarkastelu niin, että pyritään optimoimaan ainoastaan keskimmäisen runkolevyn paksuutta ja tarkastellaan tämän levynpaksuuden muutoksen vaikutusta stabiliteetin ominaisarvoihin. Tutkimuksessa FE-menetelmän käyttö suoritetaan lineaarisena ominaisarvotehtävänä, joten mahdollisia materiaalin muotovirheitä, eikä jäännösjännityksiä oteta huomioon. Suoritettava lommahdusanalyysi pätee ainoastaan teräsmateriaaleille.

2 Kirjallisuuskatsaus

Tässä luvussa käydään tarkemmin läpi lommahdusta teräslevyrakenteessa ja esitetään FEM-laskennan periaatteet. Tarkoituksena on pohjustaa kandidaatintyössä tehtävää tutkimusta niin, että lukija ymmärtää seuraavan luvun keskeisimmät tutkimusmenetelmät. Kirjallisuuskatsauksessa lähdekirjallisuutena hyödynnetään perinteisiä tekniikan alan oppimistarkoitukseen luotuja teoksia. FEM-laskennasta ja teräsrakenteiden lommahtamisesta kertovaa kirjallisuutta löytyy useilta eri vuosikymmeniltä. FEM-laskennan ja lommahtamisen periaatteet tieteellisessä kirjallisuudessa eivät ole käytännössä muuttuneet viimeisimpien vuosikymmenien aikana. Vanhempaakin kirjallisuutta voidaan siis hyödyntää apuna periaatteiden selittämisessä.

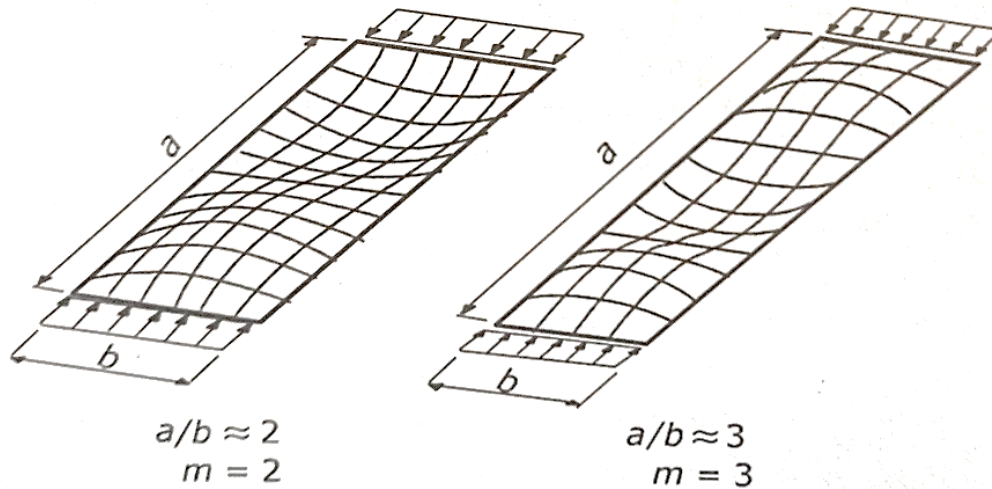
2.1 Lommahdus teräslevyrakenteessa

Teräslevyistä suunnitelluissa rakenteissa keskeiseksi suunnittelukriteeriksi muodostuu usein stabiiliustarkastelu eli lommahtaminen. Levyrakenteen lommahtaminen on ongelma varsinkin suurilla ja hoikilla levykentillä ja tällöin stabiiliustarkastelu voi olla rakenteen suunnittelua ajava tekijä. Lommahtaminen rakenteessa voi olla turvallisuusriski sen läheisyydessä oleville ihmisille. Painavat puomi- ja nosturirakenteet stabiiliuden menettäessään asettavat etenkin alla olevat ihmiset hengenvaaraan. Tästäkin syystä teräslevyrakenteiden lommahtamisen estäminen on rakenteen käyttökohteesta riippuen erityisen tärkeää. Kuva 2 esittää puristuskuorman alaista, kaikilta reunoilta nivelöityä levykenttää ennen, sekä jälkeen lommahtuksen.



Kuva 2. Lommahdus levykentässä (Niemi 2003, 17)

Levy rakenne voi lommahtaa saavuttaessaan tietyn kriittisen jännitystason. Tällöin levyn pinta muuttuu aaltomaiseksi. Lommahtamista esiintyy vain levyrakenteissa, jotka ovat puristusjännityksen alaisia. Pitkissä levykentissä, joissa levyn toinen sivu on merkittävästi toista sivua pitempi, syntyy lommahtaessa useampia puolialtoja riippuen levyn sivujen pituuksien suhteesta. Kuvassa 3 on havainnollistettu pitkän ja hoikan levykentän lommahdusta, jossa termi ”m” kuvastaa syntyneiden puolialtojen lukumäärää. Kuvasta huomataan kupruilevien aaltomaisten muotojen lukumäärän kasvavan, mitä hoikemmaksi levy rakenne muuttuu. Lommahduksen muodot noudattelevat siniaaltoja, jotka vuorottelevat vaihdellen suuntautuneina sekä ylös, että alas. (Niemi 2003, 17.)



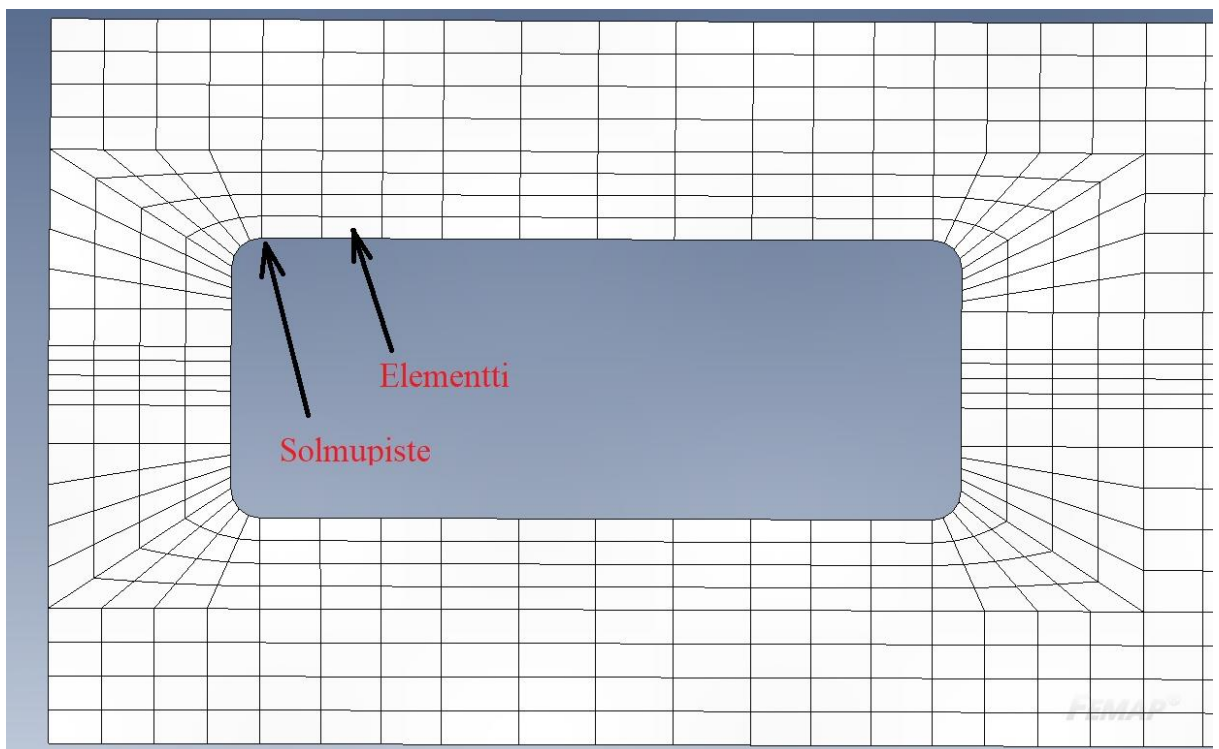
Kuva 3. Pitkän ja hoikan levykentän lommahdusmuodot (Niemi 2003, 17)

Levyrakenteen lommahdusta voidaan estää joko pitkittäis- tai poikittaisjäykisteillä. Kuvan 3 tapauksessa tehokkain tapa on käyttää pitkittäisjäykistettä, koska sen antama tuki sijoittuu koko rakenteen pituudelle jakaen rakenteen kapeisiin osakenttiin. Poikittaisia jäykisteitä käytettäessä lommahduksen amplitudin nollakohdat sijoittuisivat jäykisteiden kohdalle mahdollistaen lommahduksen jäykisteiden välillä. (Niemi 2003, 19–20.) Lommahdusanalyysiä tehdessä elementtimenetelmän eli FEM:n käyttö on tarpeen, kun tarkastellaan lommahdusta suorakaiteen muotoisesta poikkeavassa levykentässä. Myös reunaehtojen tai kuormitusten poikkeuksellisuus yksinkertaisista tapauksista ohjaa käyttämään elementtimenetelmää hyödyksi. (Niemi 2003, 41–42.)

2.2 FEM-laskenta

Työn tekemisessä käytettävä FEM-ohjelmisto hyödyntää tietokoneen laskentatehoa ja tarjoaa oivan vaihtoehdon analyttiselle laskennalle monimutkaisissa rakenteissa. Äärellisessä elementtimenetelmässä (engl. Finite Element Method, FEM) rakenne jaetaan äärelliseen määrään osasia eli elementtejä. Elementit luovat yhtenäisen verkon, joita yhdistävät

elementtien kulmien solmupisteet. (Akin 2005, 3.) FEM-laskennassa näiden solmujen (engl. nodes) vapausasteiden siirtymät voidaan selvittää ja sitä kautta approksimoida jännitystiloja. Tämä siirtymämenetelmäksi kutsuttu laskentatapa on Ellobodyn, Fengin ja Youngin (2014, 16) mukaan yleisempi, kuin tuntemattomien sisäisten voimien laskentatapa eli voimamenetelmä. Siirtymämenetelmän yhtälöt ovat tietokoneille laskennallisesti yksinkertaisempia suorittaa. (Ellobody ym. 2014, 16–17.) Kuvassa 4 on esitetty elementtimalli, jossa näkyvät elementit ja niitä yhdistävät solmupisteet.



Kuva 4. Elementtimalli ja elementtejä yhdistävät solmupisteet.

FEM-laskennassa yksittäinen funktio kuvaa ratkaisua ainoastaan tiettyjen elementtien alueella. Funktioiden tuntemattomien suureiden arvot sijaitsevat elementtien solmupisteissä. (Hakala 1980, 13.) FEM-laskenta on approksimointia todellisesta tilanteesta, ja elementtien lukumäärää kasvattamalla päästään entistä tarkempiin tuloksiin. Elementtien ja täten yhtälöiden suuren lukumäärän vuoksi FEM:n ratkaisut suoritetaan tietokoneavusteisesti. Elementtien lukumäärän kasvattamisella on myös varjopuolensa. Tällöin laskentaan vaadittava aika kasvaa merkittävästi. Voi myös olla, että elementtimäärän kasvattaminen ei enää

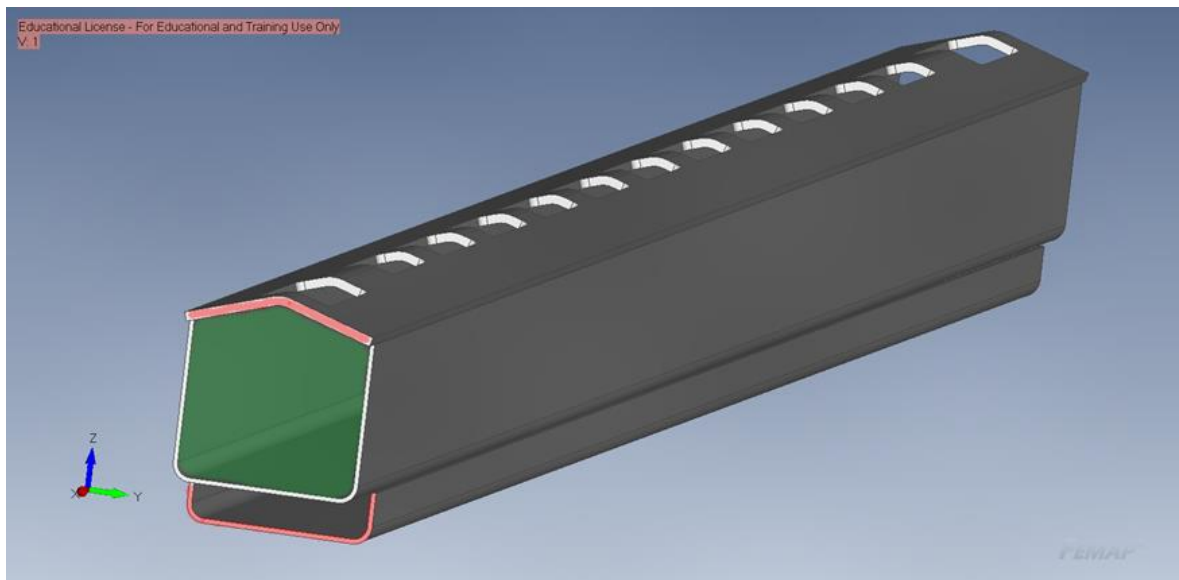
tietyssä pisteessä paranna tulosten tarkkuutta. Monesti laskennan suorittaja joutuukin tekemään kompromisseja laskentatarkkuuteen rajoittamalla mallin elementtien lukumäärää. Laskenta-aikaa voidaan myös optimoida esimerkiksi tihentämällä elementtiverkkoa vain tietyltä kiinnostavalta alueelta, jolloin mallin kokonaiselementtimäärä säilyy järkevänä. (Liu & Quek 2014, 5.)

FEM-ohjelmistojen käyttö koostuu mallin luomisesta, sekä analyysin suorittamisesta. FEM-ohjelmistojen mallinnusvaihe voidaan tiivistää neljään kohtaan. Aluksi luodaan haluttu geometriamalli, joka sen jälkeen verkotetaan elementtiverkolla. Seuraavaksi ohjelmaan määritetään materiaaliparametrit ja lopuksi lisätään vielä mallin reunaehdot ja alkuasetukset, sekä kuormitukset. (Liu & Quek 2014, 4.) Analyysin suorittaminen voidaan jakaa yhtälöryhmien ratkaisemiseen ratkaisijalla ja tuloksien havainnollistamiseen jälkikäsitteijällä. Yhtälöryhmien ratkaisu vaatii kaikista vaiheista eniten tietokoneen laskentatehoa. Se suoritetaan yleensä ohjelmistoon integroidulla ratkaisijalla. Ratkaisijan tulokset visualisoidaan FEM-ohjelmaan pakatun jälkikäsitteijän avulla. Se antaa käyttäjälle mahdollisuuden tarkastella tuloksia 3D-ympäristössä, jossa tuloksia voidaan esittää värien, animaatioiden ja muodonmuutosten avulla. (Liu & Quek 2014, 9–10.)

3 3D-mallin valmistelu ja FEM-analyysi

Työssä suoritettavaan stabiiliustarkasteluun vaaditaan 3D-mallin muokkausta ennen FEM-analyysiä. Tässä luvussa käsitellään tarkemmin, miten tutkimuksen vaiheet toteutetaan ja saadaan valmiudet analyysin suorittamiselle. Sekä 3D-mallin valmistelu, että FEM-analyysi suoritetaan Siemens Femap -ohjelmistolla, jossa integroituna ratkaisijana toimii NX Nastran.

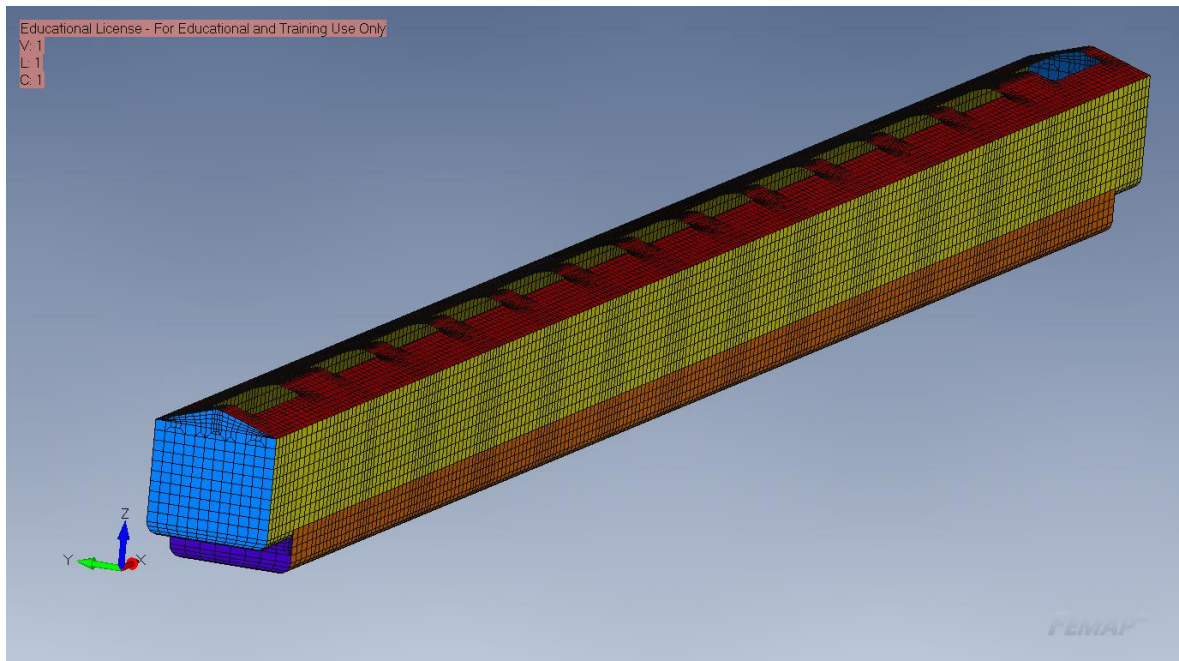
Kuvassa 5 näkyy levyrakenne ilman päätyrakenteita, mihin on merkitty alipaineen vaikutusalue vihreällä, sekä oman painon aiheuttamaa taivutuskuormaa suurimmaksi osaksi kantavat levyrakenteet punaisella. Rei'itetty kansilevy on valmistettu 25 mm paksusta levystä. Muut levyosat ovat 12 mm paksua teräslevyä, joista keskimäinen kiinnittyy paksumpiin päätylevyihin. Rakenteen tuentaväli on 10250 mm ja se on tuettu kuvassa 1 näkyviin päätyrakenteisiin nivelellisesti.



Kuva 5. Levyrakenne ilman päätyjä. Vihreällä merkitty alipaineen vaikutusalue ja punaisella taivutuskuormaa kantavat levyrakenteet.

3.1 3D-mallin valmistelu ja verkotus

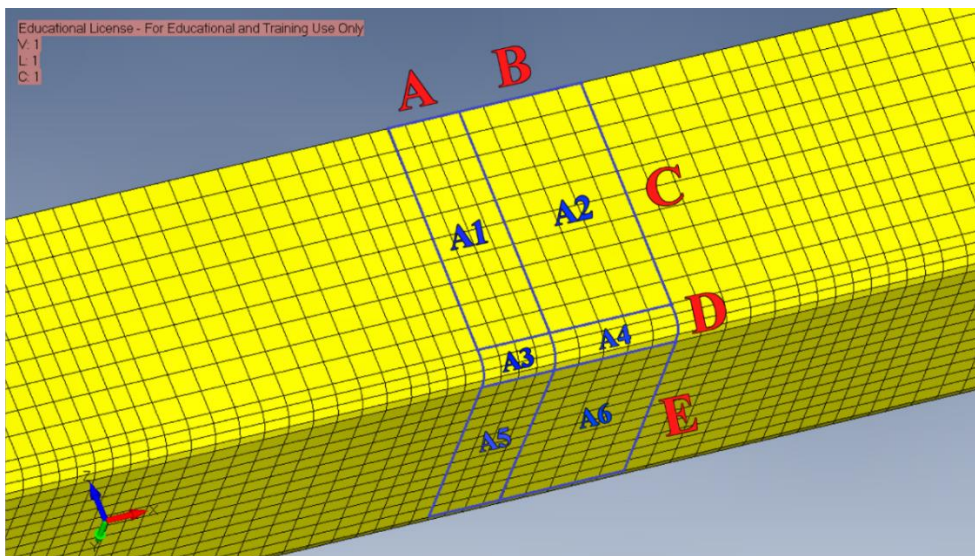
Työ aloitetaan esikäsittelmällä yrityksen antamaa step-tiedostona lähetettyä 3D-mallia, joka on esitetty kuvassa 1. Lommuhdusanalyysiä varten 3D-mallista luodaan keskipintamalli, johon pystytään rakentamaan verkotuksessa laattaelementtejä (engl. plate-element). Ensimmäiseksi luodaan keskipintamallit ja verkotetaan levyrakenteen pitkittäisen sivun kolme levyä, jotka näkyvät kuvassa 5. Verkotuksessa hyödynnetään rakenteen symmetriaa työvaiheen nopeuttamiseksi. Tällöin on mahdollista verkottaa vain pieni symmetriaosa keskipintamallista ja lopuksi heijastaa ja kopioida rakenteen toistuvat kohdat isommaksi kokonaisuudeksi. Kun kolme pitkittäistä levyä on saatu verkotettua, verkotetaan vielä kotelomaisen levyrakenteen päätylevyt. Valmis verkotettu rakenne on esitelty kuvassa 6. Malli jaetaan levyosien kesken eri parametreihin, jotka ilmenevät kuvassa levyosien eri väreinä. Tämä helpottaa osien tarkastelua omina komponentteinaan, ja mahdollistaa analyysivaiheessa runkolevyn eli kuvassa näkyvän keltaisen levyosan paksuuden muuttamisen kätevästi.



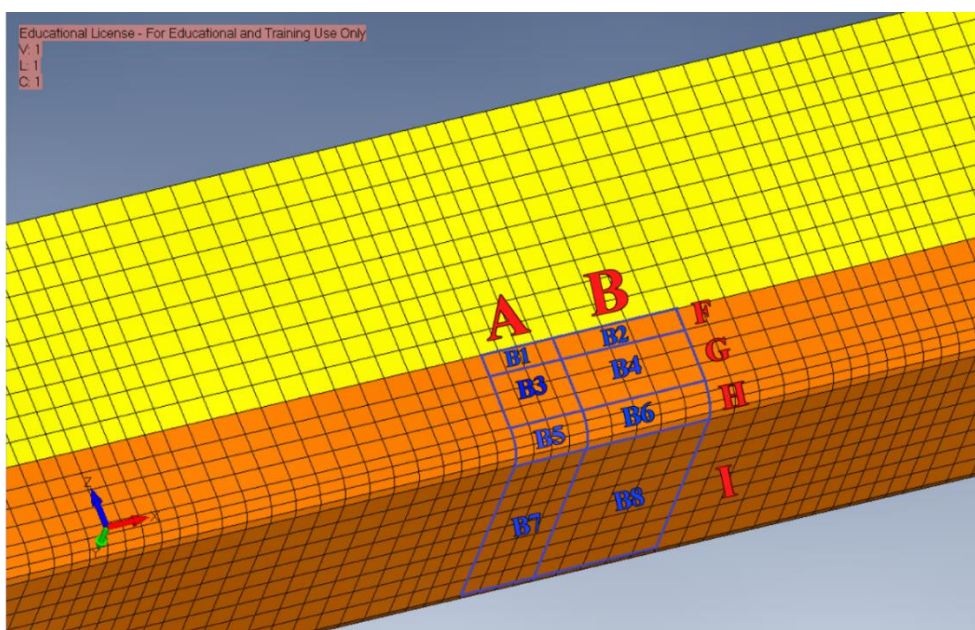
Kuva 6. Valmis verkotettu malli.

Lommuhduksen kannalta kriittisimmät kohdat päistään tuetulle rakenteelle löytyvät rakenteen keskikohdasta, jossa on oman painon aiheuttaman taivutusmomentin maksimiarvo.

Kuvissa 7 ja 8 on esitelty runkolevyssä (keltainen) ja alemmassa jäykistelevyssä (oranssi) lommahduskriittisten kohtien verkotus. Nämä verkotuksien elementtikoot toistuvat lommahduskriittisellä alueella, joten kuvissa on voitu esittää vain pieni osa koko verkosta. Taulukosta 1 löytyy tarkempi listaus runkolevyn ja jäykistelevyn elementtimääristä ja ko'osta. Taulukossa on esitetty myös mallin elementtien ja solmujen lukumäärä.



Kuva 7. Verkotus kriittisessä kohdassa painekuormitetussa runkolevyssä.



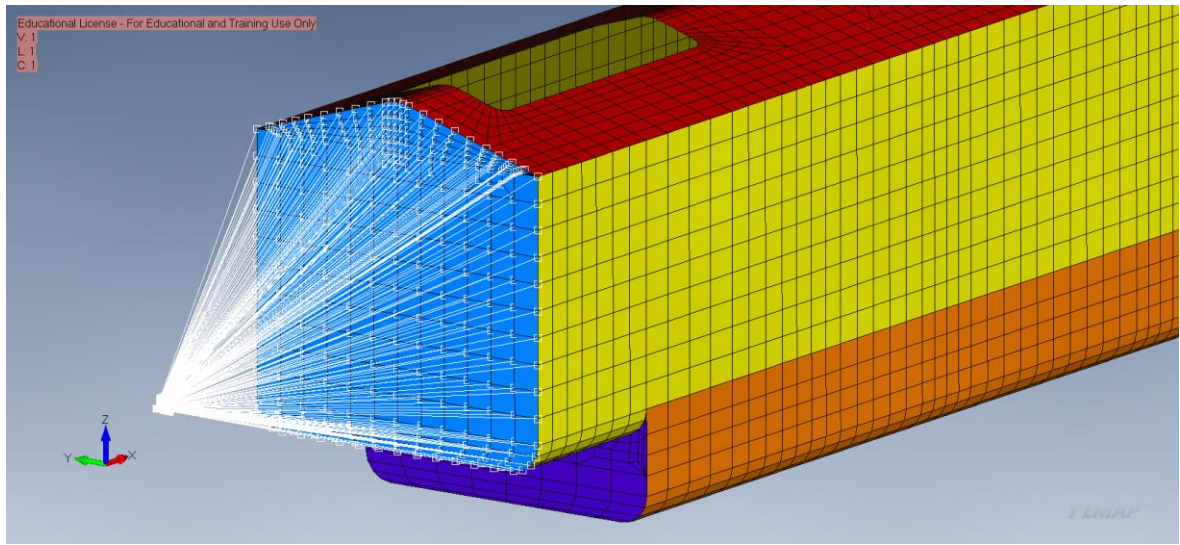
Kuva 8. Verkotus kriittisessä kohdassa alemmassa jäykistelevyssä.

Taulukko 1: Elementtien lukumäärät ja koot

	Elementtien lkm.
A	4
B	5
C	10
D	4
E	12
F	1
G	3
H	4
I	8
Mallin elementtien lkm.	21478
Mallin solmujen lkm.	21620
Alue	Elementtikoko (mm)
A1	30 x 40
A2	41 x 40
A3	30 x 17
A4	41 x 17
A5	30 x 34
A6	41 x 34
B1	30 x 38
B2	41 x 38
B3	30 x 31
B4	41 x 31
B5	30 x 17
B6	41 x 17
B7	30 x 51
B8	41 x 51

Kuvassa 1 näkyvät päätyrakenteet eivät ole suoritettavan lommahdusanalyysin kannalta kiinnostavia, joten niiden tilalle mallinnetaan tuentapisteistä kuvassa 6 näkyvälle vaaleansiiselle pinnalle Rigid link -elementit. Rigid link on elementtityyppi, joka yhdistää määritettyjen solmupisteiden vapausasteet. Tässä työssä rigid linkillä kiinnitettiin kaikki vapausasteet tuentapisteen solmun ja päädyn välillä. Toisin sanoen se ei salli minkäänlaista

muodonmuutosta kyseiselle välille. Tuloksien kannalta rigid linkiä käytettäessä esimerkiksi rakenteen kokonaistaipuma on hieman oikeaa arvoa pienempi, mutta tässä lommahdusanalyysissä se ei ole tuloksien kannalta merkityksellistä. Rigid link -elementin mallinnus on esitetty kuvassa 9.



Kuva 9. Päätyrakenne mallinnettuna Rigid link -elementillä tuentapisteestä päätylevyyneen.

3.2 FEM-analyysi

Työssä tutkitaan, kuinka runkolevyn paksuuden muutos vaikuttaa koko rakenteen stabiiliuteen. Näin ollen runkolevyn paksuutta muutetaan ja tarkastellaan lineaarisen analyysin ominaisarvojen tuloksia. Lähtöarvoisena oletuksena yrityksen kokemuksen pohjalta on, että nykyinen 12 mm levynpaksuus on stabiiliusmitoitukseltaan reilusti varmallalla puolella. Analyysijä suorittaessa onkin tarkoitus pienentää levynpaksuutta huomioiden saatavilla olevat levyt ja niiden paksuudet. Paksuuksiltaan levyjä on saatavilla yleensä tasalukuisina, joten pienennykset toteutetaan sen mukaisesti.

Toinen tutkittava tilanne on rakenteen käyttöasennon 180 asteen muutos, jolloin rakenteen alipaineen synnyttämä imuvoima ja oma paino aiheuttavat taipumaa samaan suuntaan. Lopuksi selvitetään, onko alipaineen suuruuden muutoksella yhtäläinen vaikutus

lommahtamiseen, kuin runkolevyn paksuuden muutoksella normaalissa käyttöasennossa. Tämä toteutetaan tutkimalla ominaiskertoimia, kun alipaineen arvo vähennetään puoleen (-30 kPa).

Lommahdusanalyysissä lineaarisen ominaisarvon tulos kertoo, kuinka moninkertainen kuormitus vaaditaan, että rakenne menettää stabiiliutensa ja lommahtaa. Toisin sanoen tulos ”1” tarkoittaisi, että rakenne lommahtaa nykyisellä kuormituksella ja tulos ”2”, että lommahtamiseen vaaditaan kaksinkertainen kuormitus nykyiseen verrattuna. Analyysien tuloksista eri levynpaksuuksilla taulukoidaan maksimipääjännitykset, -taipuma ja stabiiliuden ominaisarvolukema. Lisäksi kirjataan ylös lommahduksen sijainti rakenteessa.

3.2.1 Materiaalitiedot

Materiaalina käytetään ruostumatonta terästä, jonka tiheysarvona käytetään Femap:ssa $\rho = 7,8 \cdot 10^{-9} \text{ tn/mm}^3$ ja kimmokertoimena $E = 200\,000 \text{ MPa}$. Poissonin vakiona käytetään $\nu = 0,3$.

3.2.2 Kuormitukset ja reunaehdot

Rakenteeseen kohdistuvia kuormituksia ovat edellä mainitut alipaine, sekä oman painon aiheuttama taivutus. Kuvan 5 osoittamalla tavalla 60 kPa:lin alipaine kohdistuu runkolevyyn ja kansilevyyn, sekä kuvassa 6 näkyviin vaaleansinisiin päätylevyihin. Femap:ssa alipaine asetetaan negatiivisena arvona -0,06 MPa näiden rakenneosien sisäpintaan. Oman painon vaikutus saadaan asettamalla materiaalin tiheys, sekä putoamiskiihtyvyyden arvo -9810 mm/s^2 ohjelmaan. Analysoidessa rakenteen käyttöasennon 180 asteen muutosta, voidaan Femap:ssa vaihtaa putoamiskiihtyvyyden suunta positiiviseksi.

Levyrakenne on nivelellisesti tuettu tuentapisteistä päätyrakenteessa. Reunaehdot asetetaan näihin rigid link -elementin päädyssä oleviin tuentapisteisiin, jotka näkyvät kuvassa 9. Reunaehdoissa 1, 2 ja 3 Femap/Nx Nastran -ohjelmistossa viittaavat x-, y- ja z-translaatioiden

estoon ja 4, 5 ja 6 samassa järjestyksessä kyseisien koordinaattiakselien rotaatioiden estoon. Mallin toisessa tukipisteessä estetään translaatiot kaikkien akselien suhteen, sekä rotaatio x-akselin ympäri. Toisen pään tukipisteessä sallitaan pituussuuntainen siirtymä, joka mahdollistaa levyrakenteen taipuman. Tämä rakenteen pituussuuntaisen siirtymän salliminen on yleistä esimerkiksi laakeroiduissa rakenteissa. Tässä päässä reunaehdot estävät siis y-, sekä z-akselien translaatiot. Havainnollistava kuvaus asetetuista reunaehdoista löytyy liitteestä 1.

3.2.3 FEM-analyysin asetukset

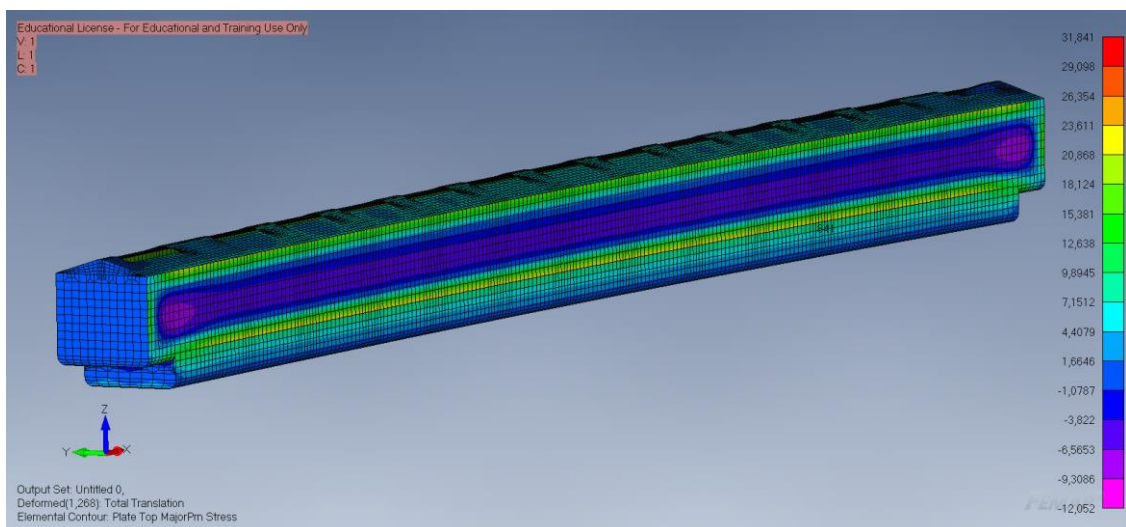
FEM-analyysi suoritetaan lineaarisena lommahdusanalyysinä (engl. linear buckling analysis). Analyysin asetuksista asetetaan ohjelman hakevan tuloksia vain kuormitusten nykyisillä suunnilla. Toisin sanoen analyysissä ohjelma ei hae tuloksia esimerkiksi positiivisilla paineen arvoilla. Analyysistä otetaan tuloksiksi viisi ensimmäistä ominaisarvoa lommahdukselle.

4 Tulokset ja niiden analysointi

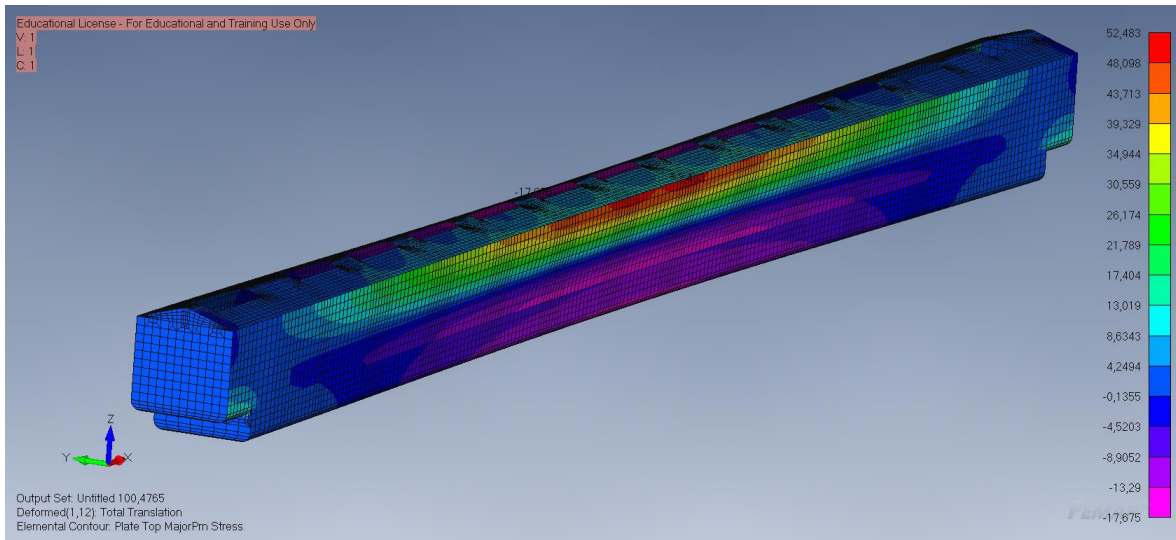
Tässä osiossa käydään läpi tuloksia, jotka on saatu äskeisessä luvussa esiteltyjen menetelmien mukaisesti. Saadut FEM-analyysin tulokset rakenteen ominaisarvoista eri levynpaksuuksilla kootaan Excel-taulukkoihin. Taulukoiden pohjalta muodostetaan havainnollistavat kuvaajat. Excel-taulukkoihin koottu data suoritetuista analyyseistä löytyy liitteestä 2.

4.1 Normaali käyttöasento

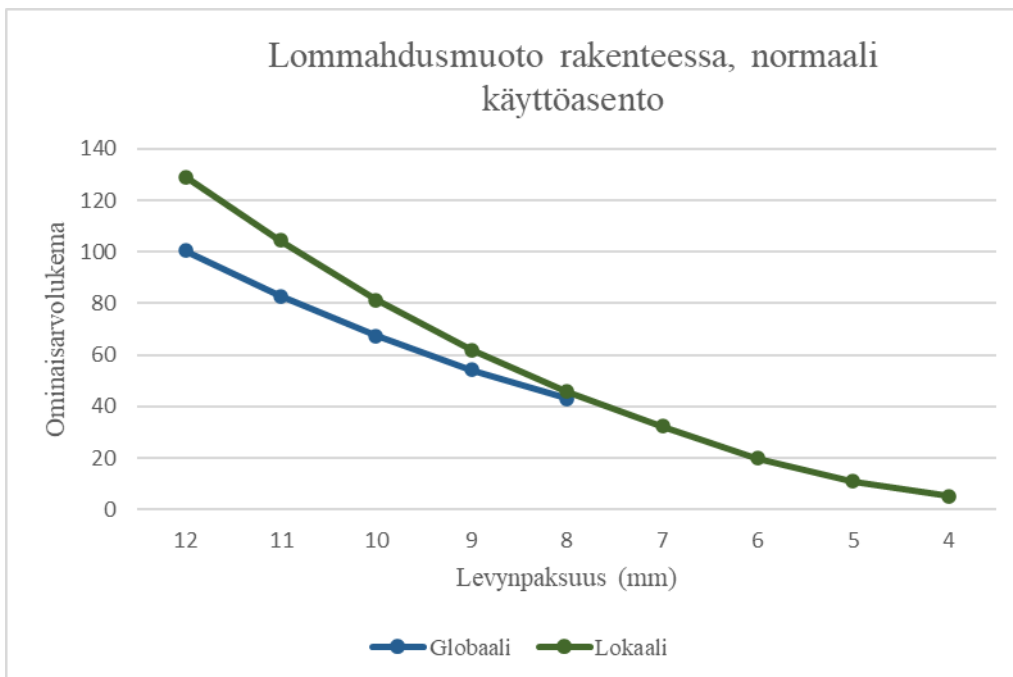
Kuvassa 10 on esitetty rakenteessa esiintyvät pääjännitykset asetetulla kuormituksella ja kuvassa 11 rakenteen lommahtaminen runkolevyn paksuudella 12 mm. Rakenteessa ei ole havaittavissa lokaalia lommahdusmuotoa, vaan rakenne lommahtaa globaalisti vinoutuen. Lineaariseksi ominaisarvolukemaksi saadaan satakertainen kuormitus asetettuun kuormitukseen nähden. Analyysien tuloksissa pienemmillä runkolevyn paksuuksilla muuttuu lokaali lommahdusmuoto globaalia kriittisemmäksi. Tällöin levykentissä on havaittavissa paikallisesti selviä puoliaaltoja, jotka useimmissa tapauksissa sijaitsevat runkolevyn pohjassa keskellä rakennetta. Lokaalin ja globaalin lommahdusmuodon esiintyminen eri levynpaksuuksilla on esitetty kuvassa 12.



Kuva 10. Levynpaksuudella 12 mm pääjännitykset.



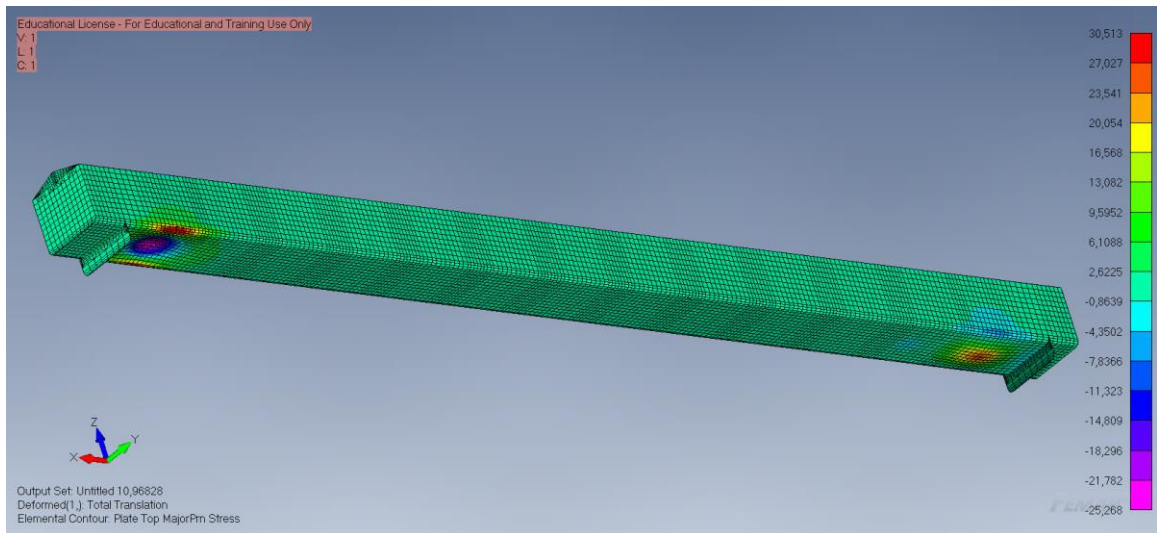
Kuva 11. Levynpaksuudella 12 mm rakenteen globaali lommahdus ominaisarvolla 100,477.



Kuva 12. Ominaisarvolukemat ja lommahdusmuodot eri levynpaksuuksilla.

Liitteen 2 kootuista tuloksista ilmenee, että alle 8 mm levynpaksuudella myös lähellä tuentaa esiintyvä lokaali lommahdus on mahdollinen. Havainnollistavat kuvaajat lokaalien lommahduskohtien sijainnista löytyvät liitteestä 3. Kuvassa 13 on esitetty 5 mm levynpaksuudella

runkolevyn pohjassa lokaali lommahdusmuoto. Tässä näkyy, kuinka pienimmillä levynpaksuuksilla lokaali lommahdus tapahtuu lähellä tuentaa, eikä rakenteen keskellä. Kuvassa alempi jäykistelevy on piilotettu.



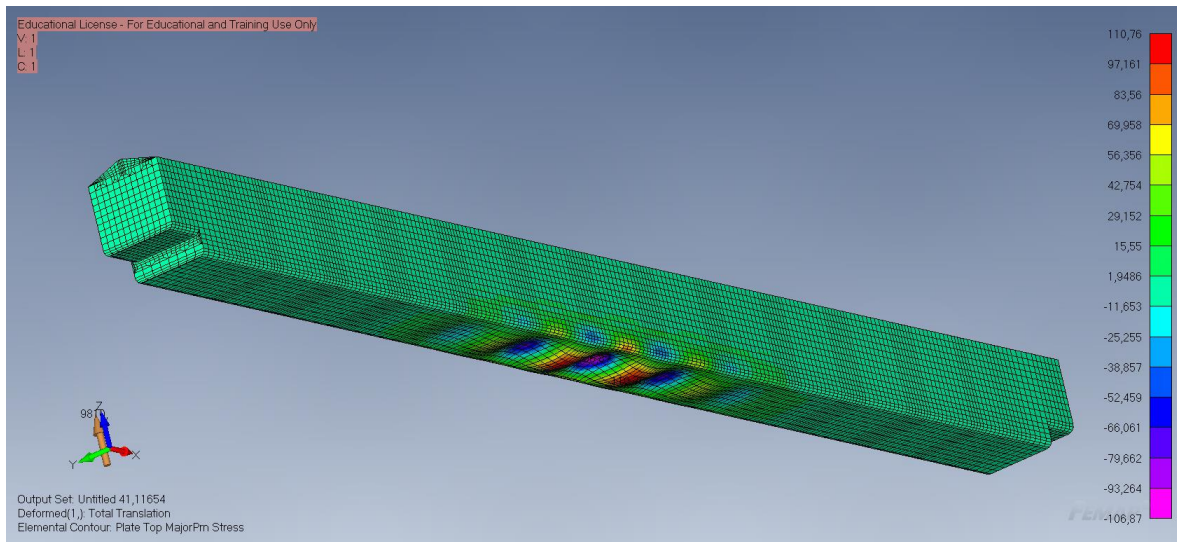
Kuva 13. Levynpaksuudella 5 mm rakenteen lokaali lommahdus ominaisarvolla 10,968.

4.2 Käyttöasennon 180 asteen muutos

Rakenteen käyttöasentoa muutettaessa 180 astetta vaikuttavat oman painon, sekä imuvoiman aiheuttama kalvojännityspuristus samaan suuntaan. Tämänkaltaisessa tilanteessa rakenteen taipuma kasvaa ja lommahduksen ominaisarvot pienenevät. Käyttöasennon muuttaminen vaikuttaa rakenteen jännityksiin ja voi aiheuttaa stabiiliteetin menetyksen rakenteessa eri komponentille, kuin normaalilla käyttöasennolla.

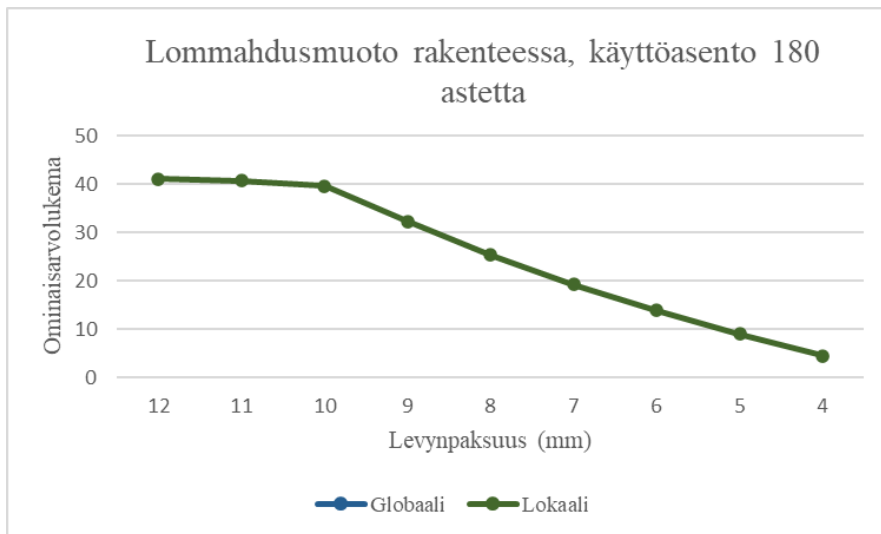
Kuvassa 14 on esitetty lokaali lommahdusmuoto runkolevyn paksuuden ollessa 12 mm. Lommahdus tapahtuu alemmassa jäykistelevyissä keskellä rakennetta. Liitteen 2 datasta huomataan, että rakenteen käyttöasennon 180 asteen muutos 12 mm levynpaksuudella tiputtaa ominaisarvolukeman alle puoleen verrattuna normaaliin käyttöasentoon. Kuitenkin pienemmillä levynpaksuuksilla ominaisarvolukemien ero suhteessa normaaliin käyttöasentoon kapenee. Tämä johtuu siitä, että lommahdus esiintyy pienemmillä levynpaksuuksilla

runkolevyssä ja omaa painoa suurimmaksi osaksi kantavat alempi, sekä ylempi jäykistelevy. Analyyyseissä runkolevyn isoimmilla levynpaksuuksilla taas alempi jäykistelevy muodostuu rakenteen lommahduskriittisimmäksi osaksi.



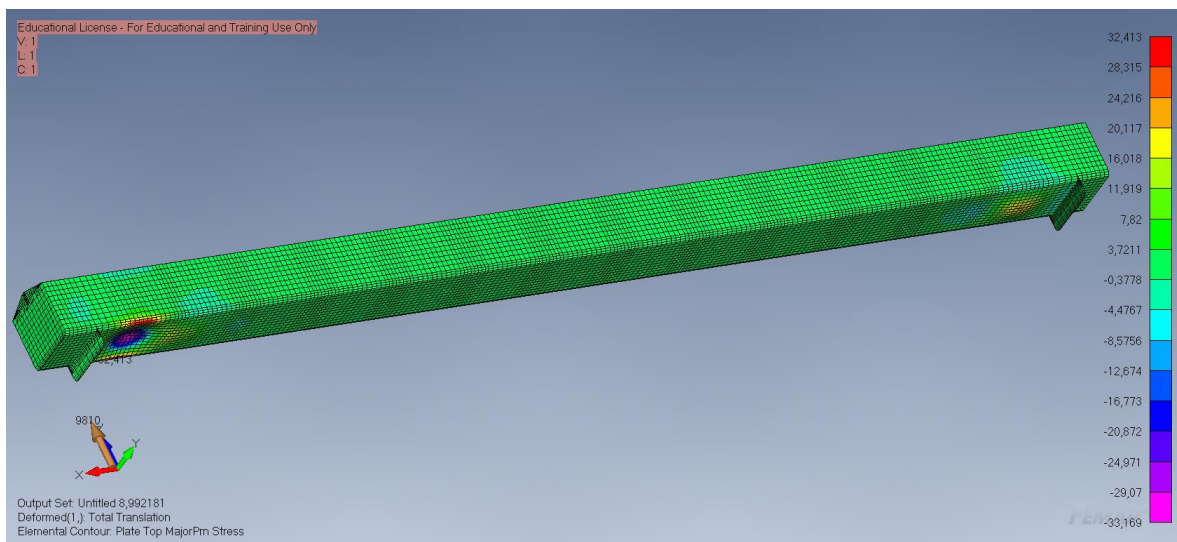
Kuva 14. Levynpaksuudella 12 mm rakenteen lokaali lommahdus ominaisarvolla 41,117.

Kuvan 15 kuvaajassa ilmenee stabiliteetin ominaisarvolukemat eri levynpaksuuksilla. Käyttöasentoa muutettaessa 180 astetta ei rakenteessa esiinny globaaleja lommahdusmuotoja. Verrattuna kuvan 12 kuvaajaan pienemmillä levynpaksuuksilla ominaisarvot ovat lähes yhtä suuria kuin normaalilla käyttöasennolla. Tämä tarkoittaa, että pienillä levynpaksuuksilla alipaineen aiheuttama kalvokuormitus määrittää lommahduskestävyyttä enemmän kuin käyttöasennon 180 asteen muutos.



Kuva 15. Ominaisarvolukemat eri levynpaksuuksilla käyttöasennon 180 asteen muutoksella.

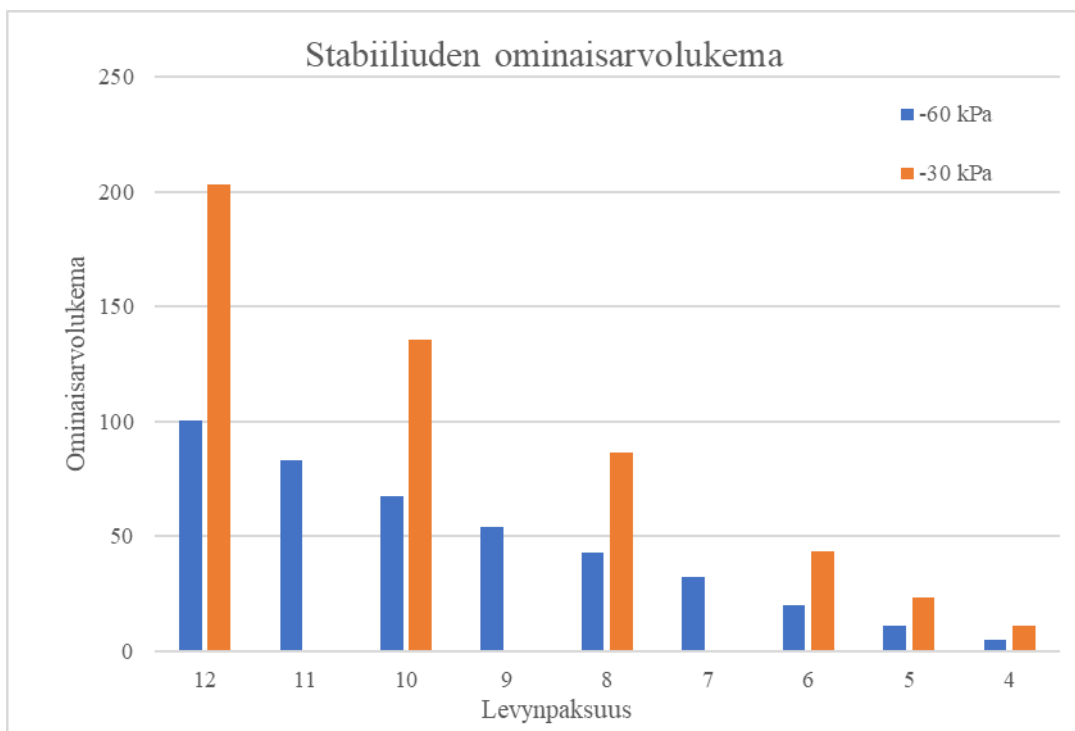
Käyttöasentoa 180 astetta muutettaessa esiintyy pienillä levynpaksuuksilla lokaaleja lommahdusmuotoja tuennan läheisyydessä. Liitteessä 4 on esitetty tarkemmin lommahduskoh- tien sijainnit rakenteessa eri levynpaksuuksilla. Kuvassa 16 näkyy rakenteen lommahdus tuennan läheisyydessä, kun runkolevyn paksuus on 5 mm. Kuvassa oranssi levy on piilotettu.



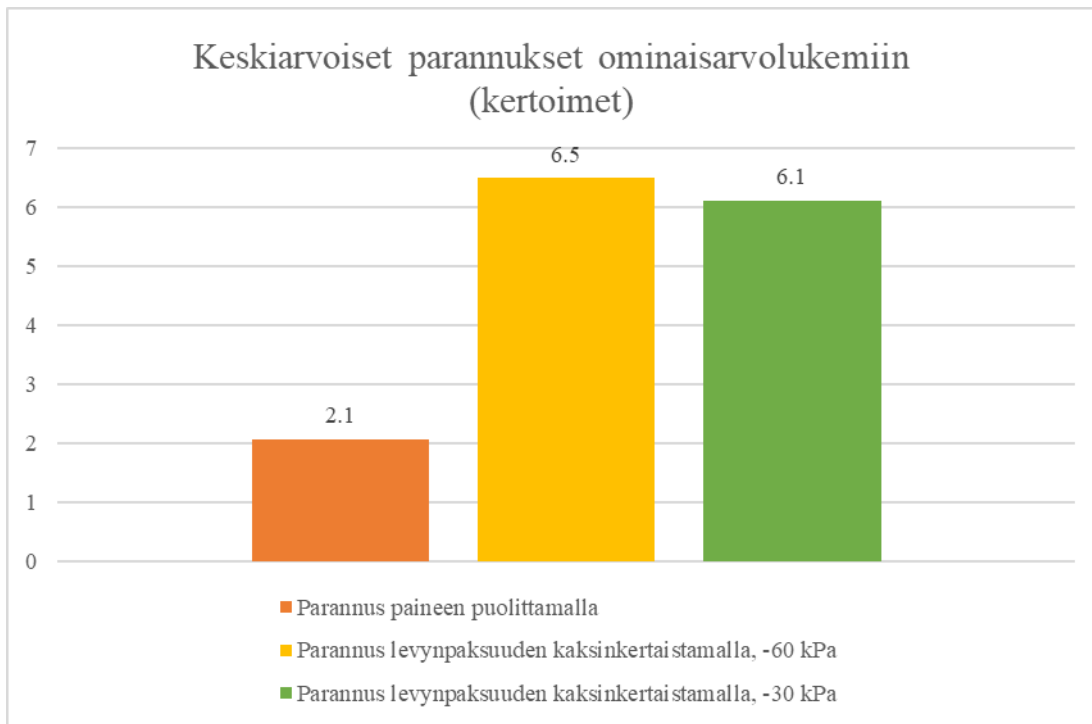
Kuva 16. Levynpaksuudella 5 mm rakenteen lokaali lommahdus ominaisarvolla 8,992.

4.3 Paineen muutoksen vaikutus ominisarvoihin normaalissa käyttöasennossa

Tutkimalla stabiiliuden ominisarvoja puolikkaalla paineen arvolla (-30 kPa) huomataan niiden paranevan noin kaksinkertaisiksi verrattuna alkuperäiseen tilanteeseen. Toisaalta havaitaan, että runkolevyn paksuuden muutoksella on merkittävämpi vaikutus rakenteen ominisarvoihin. Levynpaksuuden kaksinkertaistamalla saavutetaan yli kuusinkertainen ominisarvolukema lähtötilanteeseen nähden. Tulokset ovat koottuna liitteessä 5 ja havainnollistettu kuvissa 17 ja 18.



Kuva 17. Stabiiliuden ominisarvolukemat eri painearvoilla.



Kuva 18. Keskiarvoiset parannukset ominaisarvoihin painetta tai levynpaksuutta muuttamalla.

Levynpaksuuden kaksinkertaistamisella pienillä levynpaksuuksilla on vielä suurempi vaikutus rakenteen ominaisarvoihin, kuin kaksinkertaistamisella suuremmilla levynpaksuuksilla. Kuvan 18 havainnollisuuden vuoksi on kuitenkin laskettu keskiarvoiset parannukset eri tapauksista. Tällöin pystytään esittämään selkeästi paineen ja levynpaksuuden muutoksien merkitykset rakenteen lommahduskestävyyteen.

5 Johtopäätökset ja pohdinta

Edellisen luvun FEM-laskennan tuloksista ilmenee rakenteen lommahduskäyttäytyminen runkolevyn eri levynpaksuuksilla. Tulokset vastasivat oletusta siitä, että rakennetta on mahdollista keventää lommahdusnäkökulmasta ominaisarvolukemien ollessa suuria. Tärkeää on kuitenkin ottaa huomioon, että laskenta suoritettiin lineaarisena ominaisarvotehtävänä, jolloin mahdollisia materiaalin epälineaarisuutta- tai geometriavirheitä ei otettu laskennassa huomioon. Tällöin ei myöskään laskennassa oteta huomioon esimerkiksi hitseistä tai taivutuksista syntyviä jäännösjäännityksiä. Jotta voidaan olla tarkastelun kannalta varmallalla puolella, tulee lineaarisen ominaisarvolukeman olla tässä tapauksessa vähintään 3. Kuitenkin yrityksen rakenteelle asettamat muut vaatimukset, kuten sallittu maksimitaipuma, ovat tätä kriittisempiä suunnittelukriteereitä. Silloin ei voida mennä niin alhaisiin ominaisarvolukemiin.

Tuloksien kannalta yllättävää on, että paikalliset lommahdukset saattavat sijaita myös runkolevyn pohjassa lähellä tuentaa. Oman painon aiheuttaman taivutusjäännityksen maksimiarvo sijaitsee reunoista tuetun rakenteen keskellä. Tällöin keskikohdan voisi ajatella muodostuvan aina kriittisimmäksi kohdaksi lommahdukselle. Rakenteen geometria ja tuenta vaikuttavat jäännityksiin ja voivat mahdollistaa lommahduksen kannalta kriittisen kohdan syntymisen myös muualle. Levyrakenteen kansilevyssä olevat reiät aiheuttavat alipaineessa runkolevyn pohjaan vetoa reikien suuntaan. Kansilevyn reunimmaisat reiät ovat suurempia kuin toiset aiheuttaen suuremmat jäännitykset runkolevyn pohjaan lähellä tuentaa. Liitteessä 6 on havainnollistettu tuennan läheisyydessä esiintyvää lommahdusta. Nähdään, että kalvojäännityksen eli tässä tapauksessa puristusjäännityksen arvo kasvaa tuennan ja kansilevyn suuremman reiän kohdalla.

Lommahdusanalyysin kannalta FEM:iin tulisi luoda elementtiverkko, joka on riittävän tiheä kuvastamaan syntyviä lommahdusmuotoja. Mallin verkotuksen voidaan todeta olevan tulosten luotettavuuden kannalta riittävä, koska syntyvien puolialtojen alueelle mahtui vähintään kymmenen elementtiä. Huomionarvoista on myös se, että päätyrakenteiden tarkkojen

mallinnusten sijasta käytettyjen rigid link -elementtien vuoksi mallin kokonaistaipumat ovat hieman todellista pienempiä.

Työn metodien avulla saadut tulokset ja niiden analysointi onnistuvat vastaamaan työssä asetettuihin tutkimuskysymyksiin. Runkolevyn levynpaksuuden pienentämiselle saatiin selkeä yhteys rakenteen stabiiliuden ominaisarvojen pienenemiselle. Myös käyttöasennon 180° muutoksella selvitettiin ominaisarvojen käyttäytyminen eri levynpaksuuksilla ja huomattiin vaikutuksen olevan suuri etenkin suuremmilla levynpaksuuksilla. Tuloksista ilmeni runkolevyn paksuuden muuttamisen vaikuttavan alipaineen muuttamista merkittävämmiin rakenteen lommahtamiseen.

Yrityksellä on toisia samantyyppisiä, geometrialtaan poikkeavia rakenteita, joidenka lommahduksen analysointi kiinnostaisi yritystä. Kandidaatintyön ajallisen rajauksen vuoksi tarkasteltiin vain kyseistä rakennegeometriaa. Tämän työn perusteella tuloksia ei suoraan voi yleistää toisiin geometrioihin, vaikkakin suuntaa antavaa tietoa lommahduskäyttäytymisestä tämän työn tuloksien perusteella saadaankin. Kandidaatintyössä toteutetun tutkimuksen voidaan sanoa onnistuneen yrityksen saadessa samalla tärkeää tietoa rakenteensa lommahduskäyttäytymisestä.

Lähteet

Akin, J. E. 2005. Finite Element Analysis with Error Estimators. An Introduction to the FEM and Adaptive Error Analysis for Engineering Students. Oxford: Elsevier. 447 s.

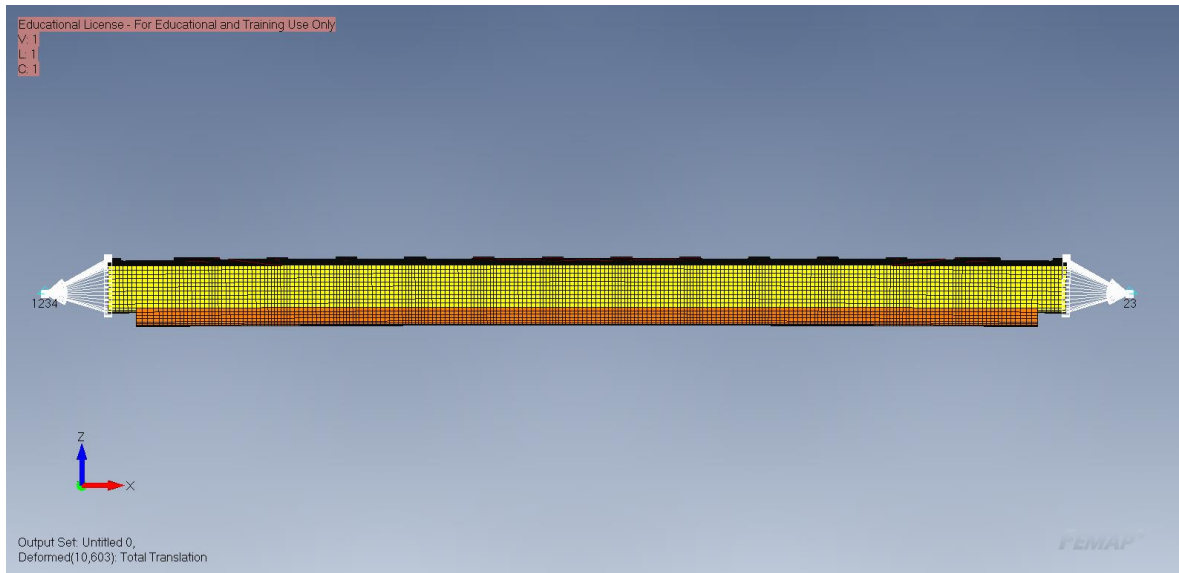
Ellobody, E., Feng, R. & Young, B. 2014. Finite element analysis and design of metal structures. Waltham: Butterworth-Heinemann. 211 s.

Hakala, M. K. 1980. Lujuusopin elementtimenetelmä. 3. painos. Espoo: Otakustantamo. 490 s.

Liu, G. R. & Quek, S. S. 2014. The finite element method a practical course. 2. painos. Amsterdam: Elsevier. 434 s.

Niemi, E. 2003. Tekninen tiedotus 2/2003, Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Savion Kirjapaino Oy. 136 s.

Liite 1: Malliin asetetut reunaehdot kuvattuna.

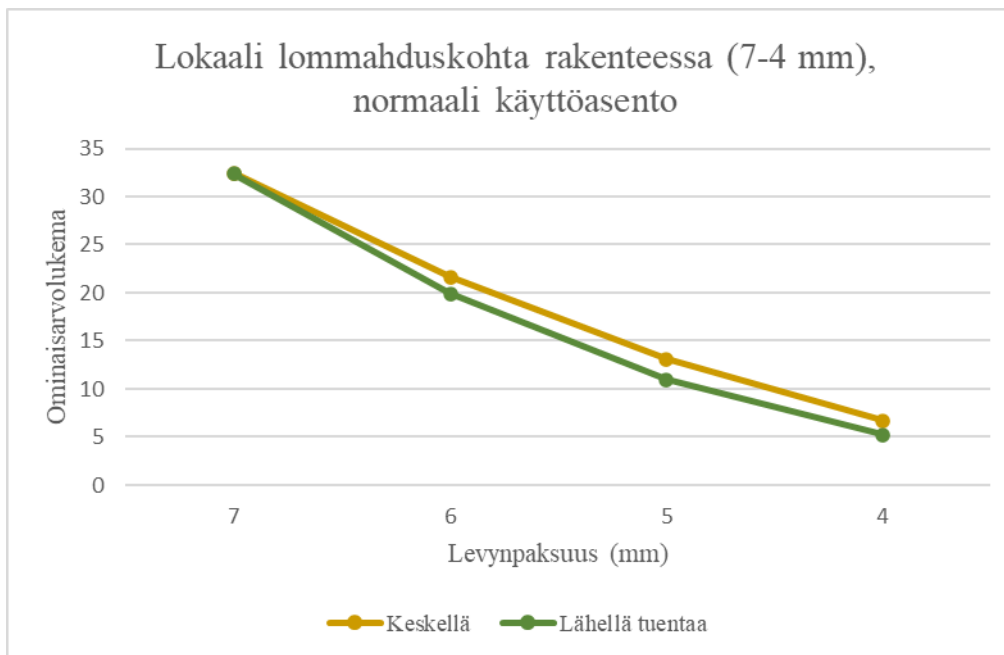
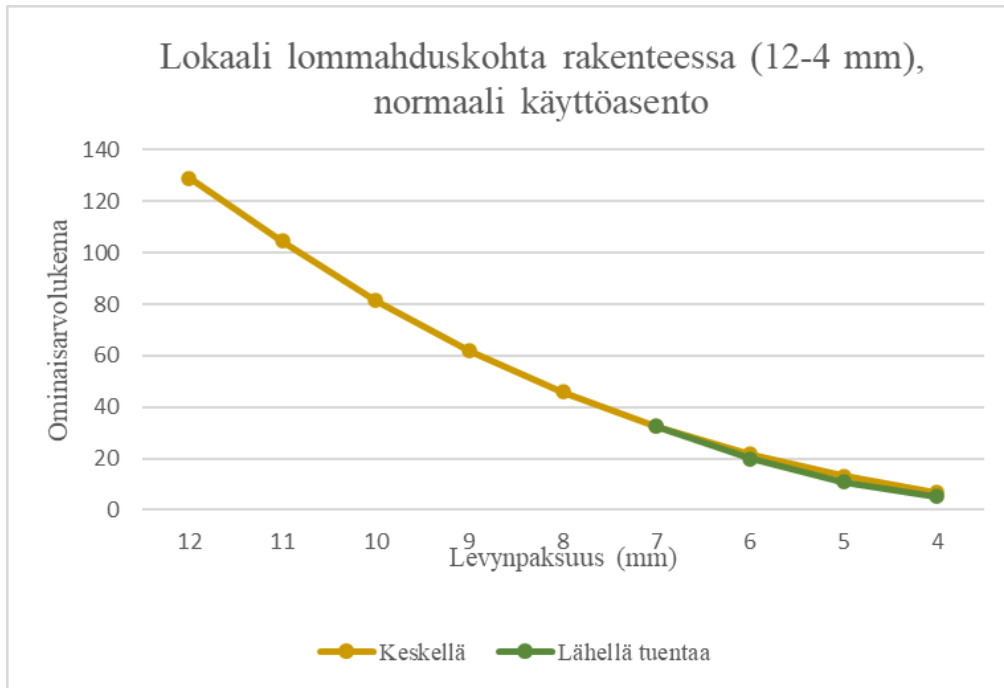


Liite 2: FEM-analyysien data taulukoituna.

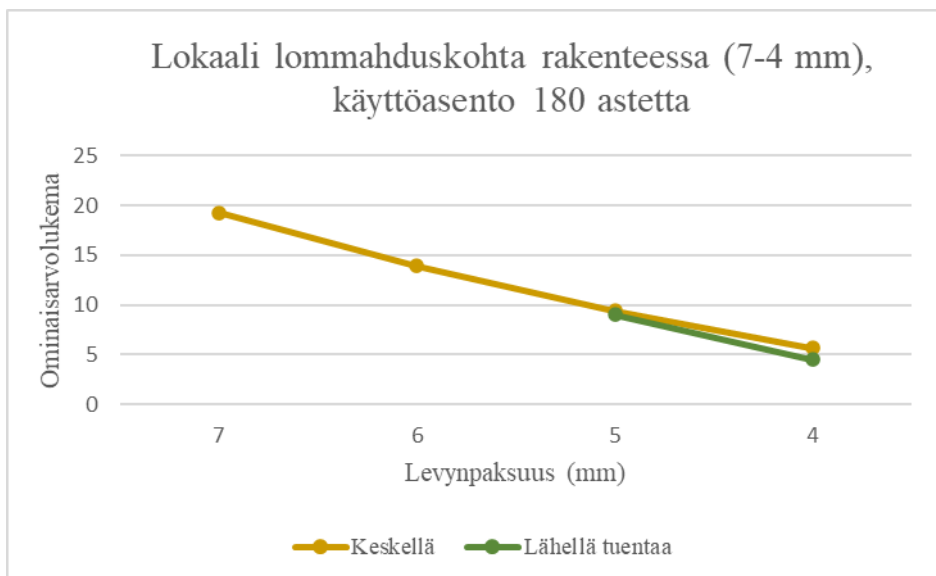
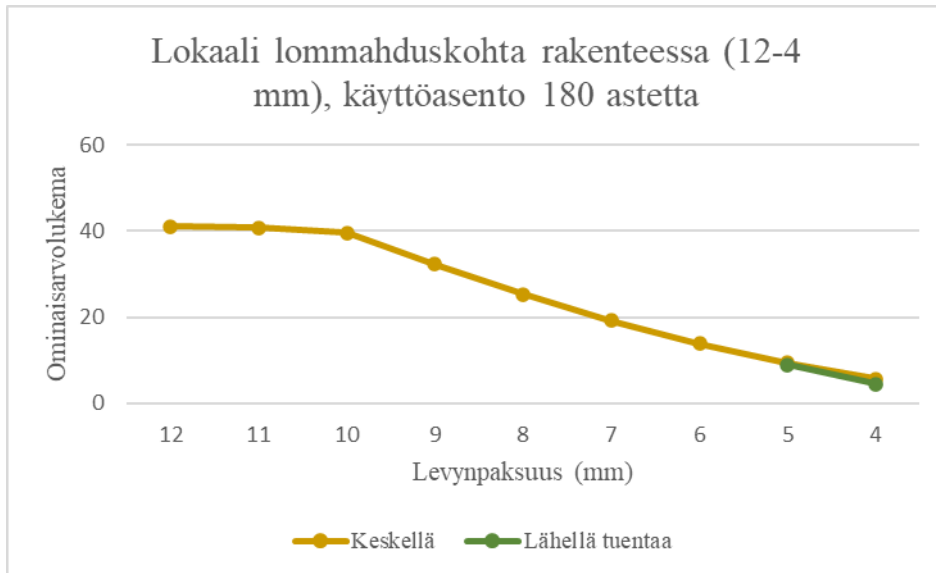
Normaalikäyttöasento		Kuormitusilanteen aiheuttamat jännitykset ja taipumat		Lommuksien ominaisarvolukema eri lommuksimuodoille		Lokaalin lommuksien sijainti rakenteessa ja sen ominaisarvolukema		Punainen värimerkkaus viittaa alimpaan ominaisarvoon ja sen sijaintiin rakenteessa
Levympaksuus (mm)	Stabiilisuuden ominaisarvolukema	Maksimipääjännitys rakenteessa (MPa)	Maksimitaipuma rakenteessa (mm)	Globaali	Lokaali	Keskellä	Lähellä tuentaa	Huomioita
12	100.5	31.8	1.3	100.5	129.1	129.1		129.1 lukemalla lokaali lommuksien alemmassa jäykistelevyissä.
11	82.9	37.6	1.4	82.9	104.5	104.5		131.6 lukemalla lokaali lommuksien runkolevyissä
10	67.5	45.2	1.6	67.5	81.4	81.4		Lokaalit lommuksien runkolevyissä
9	54.3	55.4	1.9	54.3	62.0	62.0		Lokaalit lommuksien runkolevyissä
8	43.0	69.7	2.3	43.0	45.8	45.8		Lokaalit lommuksien runkolevyissä
7	32.4	90.6	3.0		32.4	32.4	32.4	Lokaalit lommuksien runkolevyissä
6	19.9	122.7	4.1		19.9	21.6	19.9	Lokaalit lommuksien runkolevyissä
5	11.0	175.9	6.1		11.0	13.1	11.0	Lokaalit lommuksien runkolevyissä
4	5.2	273.0	10.6		5.2	6.7	5.2	Lokaalit lommuksien runkolevyissä

Käyttöasento 180 astetta		Kuormitusilanteen aiheuttamat jännitykset ja taipumat		Lommuksien ominaisarvolukema eri lommuksimuodoille		Lokaalin lommuksien sijainti rakenteessa ja sen ominaisarvolukema		Punainen värimerkkaus viittaa alimpaan ominaisarvoon ja sen sijaintiin rakenteessa
Levympaksuus (mm)	Stabiilisuuden ominaisarvolukema	Maksimipääjännitys rakenteessa (MPa)	Maksimitaipuma rakenteessa (mm)	Globaali	Lokaali	Keskellä	Lähellä tuentaa	Huomioita
12	41.1	32.8	3.4		41.1	41.1		Lommuksien alemmassa jäykistelevyissä.
11	40.8	38.7	3.5		40.8	40.8		Lommuksien alemmassa jäykistelevyissä.
10	39.6	46.5	3.7		39.6	39.6		Lommuksien alemmassa jäykistelevyissä ja runkolevyissä
9	32.4	56.9	3.9		32.4	32.4		Lommuksien runkolevyissä
8	25.4	71.4	4.3		25.4	25.4		Lommuksien runkolevyissä
7	19.2	92.5	4.9		19.2	19.2		Lommuksien runkolevyissä
6	13.9	125.0	6.0		13.9	13.9		Lommuksien runkolevyissä
5	9.0	178.7	8.0		9.0	9.4	9.0	Lommuksien runkolevyissä
4	4.5	276.5	12.5		4.5	5.6	4.5	Lommuksien runkolevyissä

Liite 3: Lokaalien lommahduskohtien sijainnit normaalilla käyttöasennolla



Liite 4: Lokaalien lommahduskohtien sijainnit käyttöasentoa muutettaessa 180 astetta



Liite 5: Paineen ja levynpaksuuden muutoksien vaikutus stabiiliuden ominaisarvolukemiin

Paineen ja levynpaksuuden muutoksien vaikutus stabiiliuden ominaisarvolukemiin						
Levynpaksuus (mm)	Stabiiliuden ominaisarvolukema, -60 kPa	Stabiiliuden ominaisarvolukema, -30 kPa	Ominaisarvojen suuruusero kerroinmääräisesti	Levynpaksuuden muutoksien tarkastelu	Parannus levynpaksuuden kaksinkertaistamalla, -60 kPa	Parannus levynpaksuuden kaksinkertaistamalla, -30 kPa
12	100.5	203.3	2.0	6 -> 12 mm	5.1	4.7
11	82.9					
10	67.5	135.9	2.0	5 -> 10 mm	6.2	5.8
9	54.3					
8	43.0	86.2	2.0	4 -> 8 mm	8.3	7.9
7	32.4					
6	19.9	43.3	2.2			
5	11.0	23.5	2.1			
4	5.2	11.0	2.1			
		Keskiarvot	2.1		6.5	6.1

Liite 6: Kalvojännityksen kriittinen kohta lähellä tuentaa ja lommahduskohta pienimmällä ominaisarvolla levynpaksuudella 5 mm normaalilla käyttöasennolla.

