



KUIVATUSLAITTEEN RUNGON OPTIMOINTI

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Konetekniikan diplomityö

2023

Maiju Niemi

Tarkastaja: Professori Timo Björk

DI Hans Sundqvist

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUTin energijärjestelmien tiedekunta

Konetekniikka

Maiju Niemi

Kuivatuslaitteen rungon optimointi

Konetekniikan diplomityö

2023

57 sivua, 22 kuvaa, 3 taulukkoa ja 2 liitettä

Tarkastaja: Professori Timo Björk

DI Hans Sundqvist

Avainsanat: Korkeat lämpötilat, lämpökuorma, sallitut jännitykset, sallitut muodonmuutokset, teräsrakenteet, levyn lommahdus

Tutkimuksen tavoitteena on suunnitella kuivatuslaitteen runko ohutlevyrakenteena. Rakenne halutaan kevyeksi ja kestäväksi eri työ- ja nostotilanteissa kustannustehokkaasti.

Ohutlevyrakenteen mitoitus perustuu tiedossa oleviin kuormitustapauksiin, sallittuihin jännityksiin ja muodonmuutoksien raja-arvoihin. Tämän tutkimuksen tutkimusmenetelmiä ovat numeerinen ja analyttinen laskenta, joita tuetaan kirjallisuuskatsauksella. Runkoon vaikuttavia kuormitustapauksia rungon omamassan lisäksi ovat korkeat ja pitkäaikaiset lämpötilat. Laskentatapauksia syntyy monista nosto- ja työasunnoista ja ratkaisijassa keskittään runkoon kohdistuviin siirtymä- ja jännitystiloihin. Lisäksi ohutlevyihin kohdistuvaa lommahdusriskiä tarkastellaan lommahdusanalyysin avulla. Luotettavuuden takaamiseksi kriittisimpiä tapauksia lasketaan myös analyttisesti. Analyttiset lausekkeet muodostetaan rakenteen lämpöpiteneemisestä sekä normaalijännitysten aiheuttamista levyyn kohdistuvista lommahdusvaikutuksista standardin avulla.

Nosto- ja työasunnoissa runkoon kohdistuu lommahdusriski, joka voidaan korjata pienillä rakennemuutoksilla. Tutkimuksessa todetaan, ettei ohutlevyrakenne sellaisenaan tule kestämään korkeita lämpökuormia, ja tähän esitetään vaihtoehtoisia ratkaisutapoja. Tuotekehitysprosessi vaatii jatkotutkimusta lämpökuorman, materiaalivalintojen sekä rungon rakenteiden uudelleensijoittelun suhteen.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

LUT School of Energy Systems

Mechanical Engineering

Maiju Niemi

Optimizing steel frame of the dryer

Master's thesis

2023

57 pages, 22 figures, 3 tables and 2 appendices

Examiner: Professor Timo Björk

M.Sc. Hans Sundqvist

Keywords: High temperature, thermal stress, allowable stresses, allowable transformations, steel structures, plane buckling

The aim of this Thesis work is to design a frame for a dryer from sheet metal. The structure of the frame is desired to be light-weighted and to withstand different working and lifting conditions in a cost-effective way.

The design of the sheet metal structure is based on known load cases, allowable stresses and limit values of deformations. The research methods used in this study are numerical and analytical calculation and they are supported by a literature review. The load cases affecting to the frame in addition to deadweight are high and long-term temperatures. Different load cases are collected from different lifting and working positions. In post-processing the study focuses on transition and strain, but also buckling is reviewed in this sheet metal structure. To ensure reliability, the most critical cases are also calculated analytically. Analytical expressions are formed by the thermal elongation of the structure and the buckling effects of the normal stresses on the plate according to the standard.

The frame is exposed to a bucking risk in different lifting and working positions, which can be corrected with small structural changes. The study states that the sheet metal structure does not withstand high thermal loads as it is, and alternative solutions are proposed. Product development process requires further research on thermal load, material selection and relocation of frame structural parts.

KIITOKSET

Opinahjo on ollut pitkä, mutta ei niin kivinen, lähinnä vain paikoin hiekoitettu. On suuri kunnia olla LUTilainen, mutta onneksi se ei koskaan poistu minusta, vaan elää tämän kirjan kansissa leimana nimeni vieressä.

Tätä työtä tehdessäni on ollut ilo huomata vilpittömää avun tarjoamista, jota ammattilaiset ja kollegat ympärilläni ovat minulle suoneet. Kiitos ajastanne ja kallisarvoisista neuvoista, se on ollut korvaamatonta.

Kiitos professori Timo Björk mielenkiinnostasi työtäni kohtaan ja asenteestasi, jolla pyritään palvelemaan ennen kaikkea asiakasta. Kanssasi on ollut erittäin mielekästä toteuttaa tätä työtä, johon en yksin olisi pystynyt. Kiitos koulukaverille ja ystävälle Idalle kieliasun tarkastamisesta. Kiitos lujuuslaskija Teo Parkkiselle laskennan tuesta. Koko työn mahdollistamisesta ja aiheeseen perehdyttämisestä iso kiitos Robin Roos ja Hans Sundqvist. Toivottavasti yhteistyömme jatkuu kaikkien kanssa myös tulevaisuudessa.

Erityiskiitos aviomiehelleni Pasille, olet mahdollistanut ajankäytön työn tekemiseen. Lapsiemme kaitsemisen lisäksi olet pitänyt yllä elämänhallintaani, sillä aikaa kun itse olen saanut keskittyä työn loppuun saattamiseen. Lupaan, että tulevaisuudessa yhteistyömme on tasavertaisempaa. Lämmin kiitos myös vanhemmilleni, olette olleet tukenani koko koulutaipaleen ajan, kannustaneet jatkamaan ja uskoneet minuun aina silloin kun itse en ole sitä tehnyt.

Nyt on aika aloittaa työura, toivottavasti se on pitkä ja paikoitellen myös hiekoitettu. Odotan sitä jo innolla!

Kiitosterveisin, Maiju

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	pinta-ala	[m ²]
a	levykentän leveys	[mm]
b	levykentän pituus	[mm]
E	kimmokerroin	[GPa]
F_y	Myötölujuus	[MPa]
L	pituus	[mm]
T	lämpötila	[°C]
t	levyn paksuus	[mm]

Kreikkalaiset

σ	jännitys	[MPa]
----------	----------	-------

Vakiot

g	painovoimakiihtyvyys	9,81 m/s
-----	----------------------	----------

Dimensiottomat luvut

α	lämpöpittemiskerroin
ε	venymä
ψ	jännityssuhde
k_σ	jännityssuhde
λ_p	muunnettu hoikkuusluku

ρ pienennystekijä

ν Poissonin vakio

Alaindeksit

0 arvo ennen muutosta

1 ensimmäinen tapaus tai mittaus

2 toinen tapaus tai mittaus

Δ muutos

c brutto

cr kriittinen

eff tehollinen

sall sallittu arvo

Lyhenteet

FEM lujuuslaskenta (Finite Element Method)

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Kiitokset

Symboli- ja lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	10
2	Tutkimuksen kuvaus	11
2.1	Tutkimuksen tausta	11
2.2	Tutkimuksen tavoitteet	12
2.2.1	Tutkimusongelma.....	12
2.2.2	Tutkimuskysymykset	13
2.2.3	Tutkimusmenetelmät ja rajaukset	13
3	Lämpötilan vaikutukset rakenteeseen	15
3.1	Fysikaaliset muutokset rakenteessa.....	15
3.2	Lämpölaajeneminen	18
4	Rakenteen analysointi.....	21
4.1	Rungon suunnittelu	21
4.2	Rakenteen analysointimalli.....	23
4.3	Ratkaisija	24
4.3.1	Elementtiverkko, kuormat ja reunaehdot	24
4.3.2	Sallitut arvot ja varmuusluvut.....	29
5	Tulokset	32
5.1	Numeeriset tulokset.....	32
5.1.1	Siirtymät ja jännitykset.....	34
5.1.2	Lommahdusanalyysi	38
5.2	Analyttiset tulokset.....	40
6	Pohdinta	45
6.1	Tulosten analysointi	45
6.1.1	Lämpökuormat.....	46
6.1.2	Omamassa.....	47

6.2	Numeeristen ja analyttisten tulosten vertailu.....	48
6.3	Vertailu kirjallisuuteen.....	49
6.3.1	Jatkotutkimusaiheet.....	50
6.4	Mahdollinen virheetanta.....	51
6.5	Johtopäätökset.....	52
7	Yhteenveto.....	55
	Lähteet.....	56

Liitteet

Liite 1. Lämpökuorma 400 °C astetta ja jännitys jakauma.

Liite 2. Käsineläskenta: Normaali jännitysten aiheuttamat levyn lommahdusvaikutukset.

1 Johdanto

Tutkimustyön aiheena on ohutlevyrakenteisen kuivatuslaitteen runkorakenteen kehittäminen. Runkorakenne on alttiina jatkuvalle korkealle lämpörasitukselle, jonka lisäksi sitä kuormittaa rungon omamassa. Työn päätavoite on suunnitella tuote, jonka edulliset valmistuskustannukset suhteessa kevyeen ja lujaan runkoon ovat optimaalisia toisiinsa nähden. Tuotekehitys on tärkeää yrityksen kilpailuedun ja tuotteen hinnoittelun kannalta. Tuote myydään painon mukaan, joten pienetkin painosäästöt ovat suoraan verrannollisia tuotteen kannattavuuteen. Yrityksen kilpailuaseman säilyttäminen nykypäivänä edellyttää paljon panostusta tuotekehitystyössä, mutta sillä voidaan saavuttaa merkittäviä etuja kilpailijoihin verrattuna.

Koneensuunnittelussa tuotteilta vaaditaan tarkoituksenmukaista käyttöikää, mikä voi vaihdella tuotekohtaisesti 5–50 vuotta. Tätä rajoittavat kuitenkin monenlaiset tekijät, esimerkiksi käyttötarkoitus sekä tuotteeseen vaikuttavat kuormat. Vaurioituneessa rakenteessa on voinut tapahtua jotain sellaista, jota hyvällä suunnittelulla olisi saatettu ennaltaehkäistä. Virheellisen suunnittelun estämiseksi pyritään parhaimpaan mahdolliseen ennusteeseen siitä, miten rakenne tulee käyttäytymään omassa toimintaympäristössään ja miten estetään sen normaalia toimintaa häiritsevät muutokset. (Airila 1995, 9.)

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan tuotetta, jonka toimintaympäristö on huoneenlämpö, mutta jonka sisällä vallitsee korkeat lämpötilat. Tuotteen rakenteen halutaan kestävän erilaisia nostoasentoja, sekä paikallaan tuotantolinjastossa itsensä ympäri kääntyviä työasentoja. Tutkimusmenetelmiksi on valittu numeerinen- ja analyttinen menetelmä, joita tuetaan kirjallisuuskatsauksella. Numeerinen menetelmä on toteutettu lujuuslaskentaohjelmalla ja analyttiset lausekkeet puolestaan on muodostettu standardin avulla kriittisimmistä lommahdustapauksista. Tutkimustuloksista haasteellisimmaksi osoittautui lämpökuorman vaikutus runkoon yhdessä ulkoisten kuormien ja omanmassan kanssa.

2 Tutkimuksen kuvaus

Tämä pääluku käsittelee kokonaisvaltaisesti lähtökohtia tutkimushankkeelle. Luvun tavoite on antaa käsitys tutkimuksen merkityksestä ja tarpeellisuudesta organisaatiolle. Lähtöarvona tässä luvussa on luoda tutkimukselle sellainen viitekehys, jolla vastataan lopuksi kysymyksiin, miksi työn tekeminen on ollut tarpeellista ja millä tavalla tutkimusongelma on ratkaistu?

2.1 Tutkimuksen tausta

Asiakas on toteuttanut tuotekehitysprojektin kuivaimen runkoon liittyen jo aiemmin, jolloin päämääränä oli runkorakenteen keventäminen. Painonsäästö toteutettiin suunnitelmalla ohutlevystä ja rakenneputkista tehty yläpalkki, joka kantaa koko rakenteen. Laskennassa rakenteelle annettiin yksi kuormitustapaus, jossa tuote oletettiin olevan pystyasennossa ja siihen kohdistui ainoastaan sen omamassa. Tuotteen työlämpötila rungon sisällä oletettiin olevan 200 °C astetta.

Asiakastarpeet muuttuivat ja todettiin tarve tuotteen jatkokehitykselle. Rungon tulee kestää korkeampia lämpötiloja sekä erilaisia nosto- ja työasentoja. Toisaalta rungon painon sekä valmistuskustannusten tulee kuitenkin pysyä maltillisina. Näiden tarpeiden pohjalta syntyi uusi tutkimusongelma, johon tässä työssä haetaan ratkaisua.

Tuotteelle on esitetty ehdotuksia jatkotutkimusaiheista, kuten sisällä kulkevien kanavien poistaminen tai muuttaminen tilantarpeen pienentämiseksi, rungon koon ja muodon muuttaminen, kanavien ilmavirtojen käyttäytyminen rungon sisällä ja sen vaikutus rataan nähden, sekä tuotteen käyttäytyminen korkeissa yli 550 °C asteen lämpötiloissa. Edellä mainittuja jatkotutkimusaiheita ei ole sellaisenaan toteutettu. Tämän työn suunnitteluvaiheessa pyritään hakemaan ratkaisua rungon muodon optimoimiseen, jotta sama runkomuoto olisi mahdollista skaalata vaihteleviin projektitarpeisiin.

Tämä tutkimus on organisaatiolle tärkeä tuotekehitysaskel, joka vaikuttaa tuotteen jatkokehitykseen. Tuotteen paino ja valmistuskustannusten säästö on myös taloudellisesti merkittävää. Osa lähtötiedoista perustuu subjektiivisiin päätelmiin, joille haetaan tässä tutkimuk-

nessa tieteelliseen tutkimukseen perustuvaa näyttöä. Tällaisia lähtötietoja ovat muun muassa käytettyjen materiaalien valinta, eristyksen paksuus, sekä rakenteessa käytettyjen rakenneputkien käyttö.

2.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen tavoitteena on ratkaista tunnistetut ongelmakohdat tuotekehityksessä. Tavoitteena on optimoida ohutlevyrakenteinen kuivatuslaitteen runko siten, että rakenne olisi mahdollisimman kevyt ja kestävä ja sen valmistus olisi mahdollisimman kustannustehokasta. Tutkimuksen tavoitteiden saavuttamiseksi käytetään viitekehystä, jonka sisällä määritellään tutkimusongelma, tutkimuskysymykset ja tutkimusmenetelmät. Tutkimusmenetelmät ovat työkaluja, joilla vastataan luotuihin tutkimuskysymyksiin ja sitä kautta haetaan ratkaisua tutkimusongelmaan. (Eskelinen ja Karsikas 2014, 15.)

2.2.1 Tutkimusongelma

Tässä työssä käsiteltävä tutkimusongelma on se, miten rungon kustannukset saadaan minimoitua valmistuksen ja painon suhteen ilman, ettei ohutlevyrakenteen lujuusominaisuuksia menetetä lämpökuorman vaikutuksesta.

Luvussa 2.1 on kuvattu työn tausta sekä muuttuneet asiakastarpeet. Näiden avulla on tunnistettu tärkeimmät ongelmakohdat, joista tutkimusongelma on muodostettu. Kuivaimen rungon aiemmassa tuotekehitysprojektissa runkorakenne suunniteltiin kestämään sen sisällä olevasta kanavistosta tulevat kuormitukset, sekä kantamaan rakenteen koko omapaino. Sen lisäksi suunnittelussa keskityttiin pystysuuntaiseen työasentoon, jossa rungon yläpalkki toimi ainoana kantavana rakenteena. Tuotekehityksen muutoksien rajaamiseksi, muut rakenneosat pidettiin ennallaan.

Tämä työ vastaa tuotekehitysprojektin seuraavaa vaihetta, jossa rungolta halutaan lujuutta ja lämmönkantokykyä siten, etteivät paino tai valmistuskustannukset nouse. Rungon sisäosan tulisi kestää 400 °C asteen lämpötilaa ilman rakenteessa tapahtuvia muodonmuutoksia, jolloin kantavien rakenteiden materiaaliominaisuuksia ei menetetä. Runkorakenteen kaikki rakenneosat korvataan ohutlevyllä.

2.2.2 Tutkimuskysymykset

Tutkimuksen aiheen, tavoitteiden ja ongelman pohjalta muodostetaan tutkimuskysymykset. Niiden avulla rajataan tutkimusta ja haetaan vastausta tutkimusongelmaan. Kysymyksillä pyritään hakemaan vastauksia oleellisimpiin asioihin työssä, jotka ohjaavat tiedonhakua ja toimivat suuntaviivoina tutkimusmenetelmien määrittelyssä.

Tunnistettua tutkimusongelmaa lähestytään seuraavilla tutkimuskysymyksillä:

TK1: Kuinka ohutlevyrakenne kestää staattista kuormitusta rungossa?

TK2: Miten rakenne käyttäytyy lämpökuormassa?

TK3: Millaisilla ratkaisuilla pystytään välttämään ohutlevyrakenteisiin kohdistuvaa lommahdusriskiä?

Rungon optimointi on työn yksi tärkeimmistä asioista painon ja valmistuskustannusten minimoimiseksi. Siksi on oleellista tietää, kuinka kevyt runko voi olla, jotta se kestää staattista eli ajasta riippumatonta kuormitusta. (Pennala 2000, 11.) Korkeat lämpötilat muuttavat materiaaliominaisuuksia ja lisäävät riskiä materiaalin virumiselle. Korkeissa lämpötiloissa olevan rungon koko ja muoto vaikuttaa kuormien aiheuttamiin jännityksiin ja jännitysjakautumisiin. (Pennala 2000, 34.) Toinen tutkimuskysymys liittyy lämpötilan ja rungon väliseen yhteyteen.

Runko halutaan ohutlevyrakenteeksi, jolloin ongelmaksi muodostuu lommahduserkkyys. Levykenttä on hoikka eli sen paksuus on pieni suhteessa muihin mittoihin. Kolmannella tutkimuskysymyksellä haetaan rakenteellisia ratkaisuja lommahduserkkyteen. (Outinen ja Salmi 2004, 11.)

2.2.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset

Tutkimusmenetelmät toimivat hankkeen työkaluina, jotta tutkimuksen tavoitteet toteutuvat. Menetelmät valitaan sen mukaan, millaista tietoa tutkimuksella tavoitellaan. Tästä syystä tutkimuskysymykset määrittävät sen, millaisia tutkimusmenetelmiä tutkimuksen toteuttamiseksi valitaan.

Kaikki tutkimuskysymykset rajautuvat pääsääntöisesti runkorakenteen lujuustekniseen käyttäytymiseen. Tästä syystä tutkimuskysymyksiin haetaan vastausta numeerisesta analyysistä, sekä sitä tukevista analyyttisistä lausekkeista. Hyvien tieteellisten käytänteiden mukaisesti on syytä vertailla tuloksia aiemmin julkaistujen tulosten kanssa, joka tässä työssä toteutetaan kirjallisuuskatsauksen muodossa. Kirjallisuuskatsauksen tavoitteena on kerätä tietoa, joka tukee muiden menetelmien tuloksien totuudenmukaisuutta. Valituilla tutkimusmetodeilla pyritään tutkimuksen lopussa vastaamaan tutkimuskysymyksiin ja sitä kautta tutkimusongelmaan.

Tutkimusta rajataan myös määrittämällä sovellusalueet, joiden avulla asetetaan peruskysymykset mallinnukselle. Tämän tutkimuksen sovellusalueita ovat termodynamiikka, jännitys-, siirtymä- ja lommahdusanalyysit. Näiden pohjalta pystytään tutkimuksen aikana vastaamaan tarvittavaan analyysityyppiin, eli onko laskenta lineaarista vai epälineaarista, sekä todellisiin reunaehtoihin ja kuormitustapauksiin, tuloksien varmentamiseen ja siihen, onko laskenta ajasta riippuvainen. Rajauksella on tärkeä tehtävä mallintamisessa, koska sillä pyritään pitämään analyysi luotettavana koko prosessin ajan.

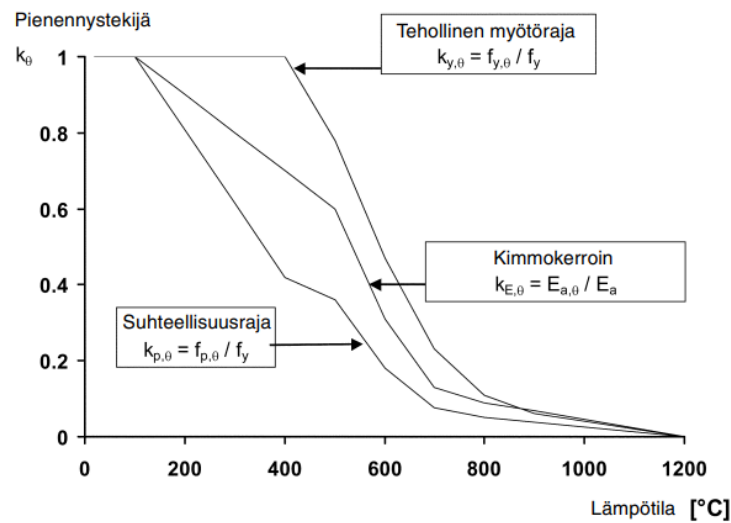
3 Lämpötilan vaikutukset rakenteeseen

Kolmannessa pääluvussa toteutetaan kirjallisuuskatsaus, jonka tavoitteena on tukea muita tutkimusmenetelmiä. Rakenteet pyritään suunnittelemaan aina ympäristöönsä sopivaksi, jossa materiaalivalinnoilla on suuri rooli. Lämpötilan vaikutukset teräksen käyttäytymisessä tulee aina ottaa huomioon suunnittelussa. Rakenne voi esiintyä arktisissa olosuhteissa, esimerkiksi jäänmurtajilla tai korkeissa lämpötiloissa, kuten höyrykattiloissa. Materiaalilta vaaditaan tällöin tiettyjä ominaisuuksia, ja suunnittelijalta taitoa valita niistä optimaalisin käyttökohteen mukaan. (Pennala 2000, 31-33.)

3.1 Fysikaaliset muutokset rakenteessa

Teräksen lujuusominaisuudet ja sitkeys muuttuvat lämpötilojen vaihtelusta. Lämpötilan noustessa teräksen ihanteelliset fysikaaliset ominaisuudet muuttuvat ja sen mikrorakenteessa tapahtuu muutoksia eli dislokaatioiden helpottumista. Sitkeillä teräksillä muodonmuutoskyky paranee lämpötilan noustessa eli se plastisoituu helpommin kuin alhaisissa käyttölämpötiloissa. Matalissa lämpötiloissa lujuusominaisuudet taas paranevat eli myötö- ja murtolujuus kasvavat haurasmurtumarajaan saakka. Lämpökuormaan pystytään vaikuttamaan siten, että valitaan seostettu teräs, jonka mikrorakenteessa ei tapahdu suuria muutoksia käyttölämpötilan asettamissa rajoissa.

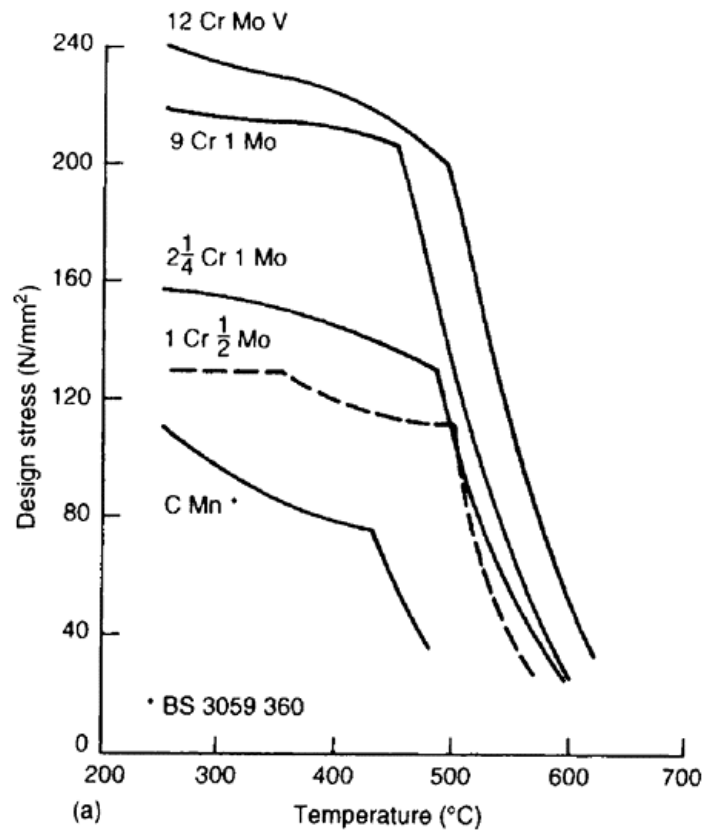
Teräksen myötö- ja murtolujuus heikkenevät korkeissa lämpötiloissa. Hiiliterästen heikentymistä korkeissa lämpötiloissa pystytään havainnoimaan kuvassa 1 esitetyillä pienennys-tekijöillä, jotka alentavat huomattavasti materiaalin lujuus- ja muodonmuutosominaisuuksia. (Koivisto 2008, 10.)



Kuva 1. Hiiliteräksen jännitys-venymäyhteys korkeissa lämpötiloissa (SFS-EN 1993-1-2: 2006, 21).

Jännitys-venymäyhteys kuvasta 1 havaitaan 200 °C asteen kohdalla pieni vaikutus hiiliteräksen materiaaliominaisuuksien kohdalla, ja 1200 °C asteessa materiaali on menettänyt lähes kokonaan lujuutensa ja kimmoisuutensa. Tehollinen myötöraja pysyy täydessä arvossa 450 °C asteeseen saakka, josta se putoaa lineaarisesti 900 °C asteeseen minkä jälkeen arvo on liki nolla. Teräksen kimmoisuutta kuvaava käyrä muuttaa suuntaa 500 °C asteen ja 700 °C asteen kohdalla. Kimmoisuuden arvo on 700 °C asteen jälkeen lähes nollassa.

Pitkään lämpökuormalle alttiissa materiaalissa saattaa esiintyä pysyviä muodonmuutoksia, eli venymiä, vaikka jännitys olisi materiaalin ko. lämpötilassa olevaa myötörajaa pienempi. Näitä muodonmuutoksia kutsutaan virumiseksi. Teräs kestää kuormia huoneenlämmössä, mutta korkeissa lämpötiloissa jännityksiä vastaavat kuormat voivat aiheuttaa pysyvää muodonmuutosta rakenteeseen. Pysyvän muodonmuutoksen ollessa vakio ja jännitystilän laukeamisen seurauksena syntyy relaksaatio. Edellä kuvatut ilmiöt ovat riippuvaisia ajasta, lämpötilasta, sekä materiaalivalinnoista, joiden tunteminen on erittäin tärkeää. (Jones ja Ashby 2019, 287.) Kuvassa 2 on esitetty eräiden seostettujen terästen viruminen jännitys- ja venymäkäyrällä.



Kuva 2. Virumispiirros jännityksen ja lämpötilan funktiona (Llewellyn ja Hudd 1998, 356).

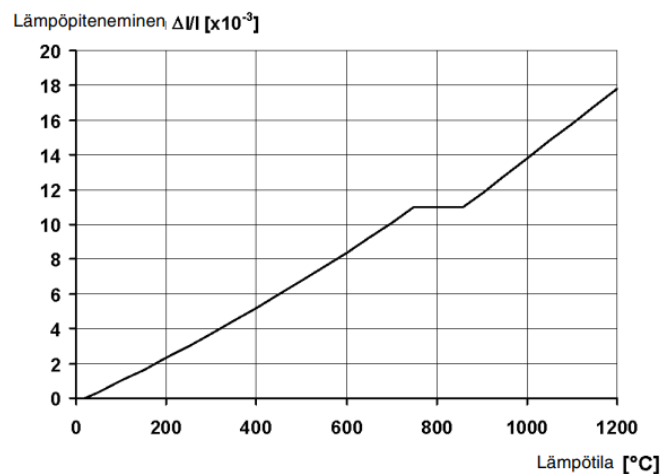
Kuvassa 2 esitetään lämpötilan vaikutus eräiden seostettujen terästen lujuuteen., jonka suunniteltu elinkaarena on 100 000 tuntia. Monen teräksen mitoitettu jännitysarvo alkaa rajusti laskemaan 500 °C asteen jälkeen, jolloin virumista alkaa syntyä huomattavasti enemmän.

Teräksen menettäessä lujuuttaan siihen kohdistuva lommahdusriski kasvaa. Lommahdus on yhtäkkiä tapahtuva muodonmuutos levykentässä. Puhtaasti kimmainen lommahdus palautuu, mutta jos se sisältää plastisuutta muodonmuutos on pysyvä. Molemmat lommahdustapaukset ovat mahdollisia, joita on korkeissa lämpötiloissa tarkasteltava erityisen tarkasti. Varmuuskertoimilla pystytään varmistamaan tällaisissa tapauksissa rakenteen kestävyys. Yleinen määrittäminen Airilan mukaan on yli 200 °C asteessa työskenteleville rakenteille alentaa laskentalujuusarvoja 20 %. (Airila 1995, 112.) Kuvan 1 mukaan Airilan väittämää voidaan kyseenalaistaa, koska pienennystekijän arvo ei jää paikalleen 200 °C asteen jäl-

keen, vaan tippuu lineaarisesti lämpötilan noustessa. Airilan yleistys on syytä kyseenalaistaa, koska tulokset voivat olla tällä menetelmällä todella epävarmoja.

3.2 Lämpölaajeneminen

Lämpötilan muutokset vaikuttavat rakenteen geometriaan. Korkeissa lämpötiloissa tapahtuu laajenemista ja matalissa supistumista. Tätä voidaan kuvata terästangolla, joka sijoitetaan kahden jäykän tuen väliin. Kun lämpötila nousee, teräs pyrkii laajenemaan, mutta tukien takia tanko ei pääse pitenemään, josta seuraa lämpöjännityksiä materiaaliin. Lämpöpiteneminen lämpötilan funktiona esitetään kuvassa 3, kun ilmiötä ei estetä. (Koivisto 2008, 10.)



Kuva 3. Lämpöpiteneminen lämpötilan funktiona (SFS-EN 1993-1-2: 2006, 23).

Kuvasta 3 voidaan havaita hiiliteräksen lineaarinen lämpöpiteneminen lämpötilan noustessa yli 700 °C asteeseen saakka. 800 asteen kohdalla oleva vaakakäyrä aiheutuu teräksen allotropioiden seurauksena eli faasimuutoksesta, jonka seurauksena mikrorakenne muuttuu austenniittiseksi tai toisinpäin. Teräksen heikkeneminen tai lujittuminen on melko nopea muutos, esimerkiksi martensiittireaktio tapahtuu muutamassa sekunnissa. Lämpötilan muutoksesta aiheutuva lineaarinen laajeneminen voidaan kuvata seuraavasti, jossa oletetaan, ettei pituuden muutosta estetä ja näin ollen jännitys, $\sigma = 0$.

$$\Delta L = \alpha L_0 \Delta T \quad (1)$$

, jossa α = lämpöpiteneemiskerroin, ΔT = lämpötilan muutos, T_0 ja T_1 välisen muutoksen arvo ja L_0 = pituus ennen muutosta. (Pennala 2000, 31.)

Yhtälössä 1 kuvataan tilannetta, jossa muutoksen aikana tapahtuva laajeneminen pääsee toteutumaan vapaasti, eikä siihen synny lämmöstä aiheutuvia jännityksiä. Jos laajeneminen täysin estetään, syntyy venymä ja jännityksiä. Venymä johdetaan seuraavasti:

$$\varepsilon = \alpha \Delta T \quad (2)$$

Venymien lisäksi rakenteelle aiheutuu jännityksiä, joka johdetaan edelleen seuraavasti:

$$\sigma = -E\alpha\Delta T \quad (3)$$

, jossa $\varepsilon = 0$. Useimmiten käytännössä rakenne on osittain estetty, jolloin voidaan tehdä oletus jännityksen maksimiarvosta seuraavasti:

$$\Delta\sigma \leq E\alpha\Delta T \quad (4)$$

Lämpölaajenemisen osittainen estäminen määrää jännityksen maksimiarvon, koska sen muodonmuutos ei kokonaan siirry jännitykseksi. (Pennala 2000, 31-32, Niemi 2003.)

Ulkoisen kuorman tai reunaehdon lisääminen kappaleeseen, jossa joustosta syntynyt venymä $\varepsilon = 0$ on täysin estetty, lasketaan seuraavasti:

$$\sigma = E(\varepsilon - \alpha\Delta T) \quad (5)$$

, jossa σ =jännitys ja E =kimmomoduuli.

Jos venymä $\varepsilon = 0$ on täysin vapaa, lasketaan seuraavasti:

$$\sigma = \alpha \Delta T \quad (6)$$

4 Rakenteen analysointi

Tässä pääluvussa esitetään tutkimukselle oleelliset lähtötiedot ja miten tutkimus on toteutettu. Suunniteltaessa kevyttä ja lujaa rakennetta pyritään ensisijaisesti määrittämään se raja-arvo, millä kuormituksilla kappaleeseen ei aiheudu suuria muodonmuutoksia eli laaja-alaista plastisoitumista tai lommahdusta puristuskalvojännityksen seurauksena. Suunnitteluvaiheessa otetaan huomioon rakenteen koko, muoto, valmistettavuus ja materiaaliratkaisut. Analysointimallin suunnittelussa valitaan rakennetyyppi ja geometria muokataan siten, että elementtiverkko saadaan jatkuvaksi. Ratkaisijassa mallille annetaan reunaehdot ja kuormitustapaukset, sekä luodaan elementtiverkko. (Pennala 2000, 9.)

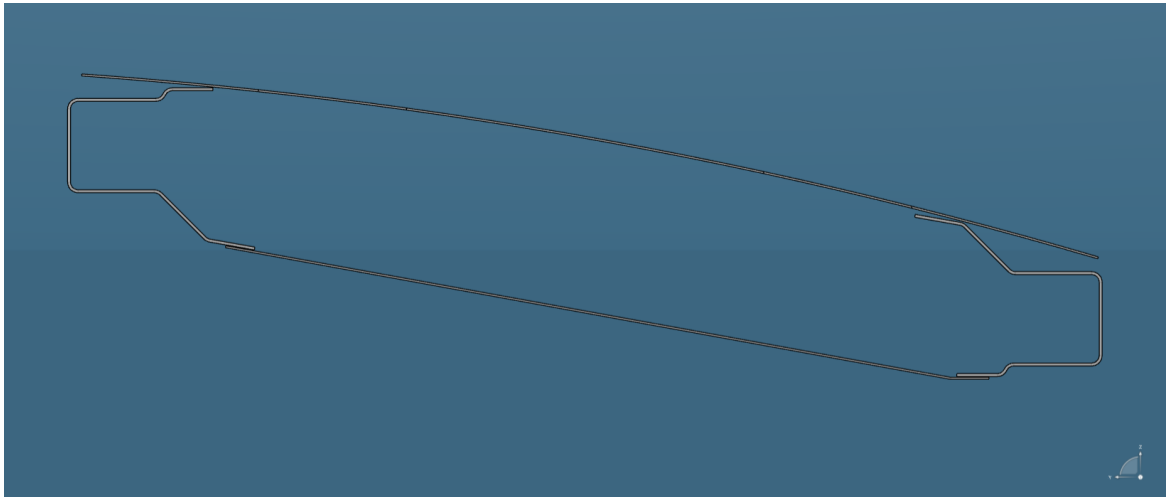
4.1 Rungon suunnittelu

Runko suunniteltiin Catia V6 -ohjelmaa apuna käyttäen. Rungon referenssiksi saatiin edellisessä tuotekehitysprojektissa luotu rakenne. Rakenteen päämitat ovat 1,1x2,7x6,2 metriä. Rakenteen kaikki seinäelementit ovat kennomaiset.

Tavoitteena rungon suunnittelussa on symmetrian hyödyntäminen geometriassa ja rakenneputkien tilalle taivutetut ohutlevyrakenteet. Rungon kokonaisuus sisältää ainoastaan hitsattuja levyosia eli levyjä ja jäykisteitä. Rungon sisälle asennetaan 100 mm eristettä, jotta lämpö ei pääse etenemään rakenteessa. Ulkorakenteelle vaaditaan enintään noin 60 °C asteen lämpötilaa, jolla eristeen paksuus määräytyy valmistajan antamien lähtötietojen mukaan.

Rungolle haetaan riittävää globaalia jäykkyyttä kehikkorakenteena. Kehikkorakenteen tehtävä on toimia tukirankana konstruktiossa. Rungon yläpalkin rakenne muutettiin kapeammaksi ja sinne jätettiin tilaa 100 mm eristettä varten. Palkin ulkokuoren muoto jätettiin ennalleen, mutta edessä oleva jäykistävä rakenneputki muutettiin taivutetuksi levyrakenteeksi. Samalla levygeometrialla jäykistettiin palkin takaosa, jotta koko rakenteen keuhkoratkaisu tulisi hyödynnettyä. Palkille haettiin jäykistystä pitkittäis- ja poikittaisrakenteilla. Jäykisteiden jänneväliksi määritettiin noin 750-1000 mm. Pitkittäisjäykisteet kevennettiin painonsäästön takia kevennysaukoilla. Yläpalkin levyjen paksuudeksi asetettiin 2 mm ja

jäykisteiden 4 mm. Symmetriaehtoa noudattaen yläpalkki tuotiin peilikuvana myös alapuolen rakenteeksi. Kuvassa 4 esitetään levystä taivutetut kantavat palkkirakenteet (kuva ei ole oikeissa mittasuhteissa).



Kuva 4. Levystä taivutetut palkkirakenteet.

Tilansäästön takia ylä- ja alapalkki muotoiltiin vinoon, jotta rakenteen takaosasta saatiin käyttämätön tila pois. Takaseinän levyn korkeutta madallettiin ja siihen valittiin 2 mm paksuinen levy, jota jäykistää 4 mm pystyjäykisteet. Pystyjäykisteet noudattavat samaa jänneväliä kuin ylä- ja alapalkin poikittaisjäykistys, jolloin kuorma saadaan jakautumaan tasaisemmin jäykisteitä pitkin eteenpäin.

Sivuseinäelementeistä poistettiin rakenneputket ja lisättiin lattarakenne ainoastaan nostolevyjen alle sekä levykenttien reunoihin. Kanava aukkojen ympäri lisättiin vahvikelevyitä jäykistämään aukkoja. Nostolevyjen sijainnit määrättiin nostokohtiin, jota päin hitsataan ohuet levyrakenteet, joiden hitsattava levyreuna on taivutettu paksuuseron takia. Tässä työssä nostolevyjen paikat määrättiin kanavien puolelta rakenteen ylä- ja alapuolelle, sekä toiselta laidalta lisäksi myös keskelle. Nostolevyjen paksuudeksi valittiin 20 mm levy, johon on mahdollista kiinnittää nostolenkit. Nostolenkkien kierteet ja asennustappien pituudet mitoitetaan levynpaksuuden. Kuvassa 6 ja 7 on näytetty nostolevyjen sijainnit. Kuvassa 6 kohdat A, B ja C näyttävät kolmen ensimmäisen nostolevyn sijainnit ja kuvassa 7 kohdassa C ja D on näytetty kahden seuraavan nostolevyn sijainnit. Kohtien A ja B puolella on kanaviston tulo- ja menoaukot.

Suunnitteluvaiheessa materiaalipaksuudet määrättiin mahdollisimman ohuiksi, johon lisätään laskennan tarpeen mukaan pakolliset vahvikkeet, jäykisteet ja materiaalipaksuudet. Rakenteet määritetään primääri- ja sekundaärrakenteisiin, jotka sanelevat myös asennusjärjestyksen. Takaseinäelementtiin kiinnitetään kaikki muut rakenteet hitsaamalla. Ylä- ja alapalkki ovat jatkuvia, joihin kiinnitetään sivuseinäelementit. Elementtien hierarkian suunnittelu on tärkeä vaihe jo suunnittelun aikana, jotta lujuustekniset asiat tulevat huomioidetuiksi.

4.2 Rakenteen analysointimalli

Numeerista laskentaa varten luotiin analysointimalli FEM-ohjelmalla, joka toteutetaan Ansys SpaceClaim 2022 R2 apuna käyttäen. Valmis malli avattiin SpaceClaimiin, jossa se muokattiin laskentaa varten kuntoon.

Rakenneanalyysin elementtityypiksi valittiin yksinkertainen 2D-kuorielementti. Kappale koostuu pelkästään levyosista, jolloin kuorielementti on toimiva vaihtoehto. Etuna kuorielementin käytössä on se, että pystytään tarkastelemaan niitä rasituksia, joita halutaan ratkaista, kuten esimerkiksi tasoa kohtisuoraan oleva todellinen normaalijännitys, kalvojännitys, tasoon kohdistuva neutraalijännitys ja taivutus. (Pennala 2000, 15.) Alkuperäisestä geometriamallista laskentaan otettiin mukaan kaikki lujuuden kannalta tärkeät levyosat. Mallin osat muutettiin kuorielementiksi valitsemalla levyosan molemmat puolet levykentästä. Ohjelman oletusarvona kuorielementti luodaan keskelle sen paksuutta, jota voi muuttaa tarvittaessa. Risteävät rakennekohdat on syytä tarkistaa huolella, jotta verkotusvaiheessa välttyy päällekkäisyyksiltä.

Mallia pyritään yksinkertaistamaan niin paljon, että elementtiverkko saadaan jatkuvaksi. Yksinkertaistaminen pitää tapahtua kuitenkin niin, että mallin rakenne vastaa todellista tilannetta mahdollisimman hyvin. Kappaleen yksinkertaistamiseksi kaikki rakenneosien pyöristykset, pienet reunat, terävät kulmat ja välit poistetaan, jolloin verkosta saadaan jatkuva ja tasalaatuinen. Ylimmän tason topologia tulee jakaa, jotta ohjelma ymmärtää rakenne-elementtien välisen jatkuvuussuhteen ja osaa luoda verkon yhtenäiseksi. Koska kappaleen pinnat ovat kaikki kuorielementtejä, ohjelma ei välttämättä ymmärrä kiinnittää kaikkia osia yhteen. Tällaiset tilanteet on korjattava manuaalisesti. Vaikka malli näyttääkin yhtenäiseltä, on vielä syytä tarkastella sitä muutamilla tarkastustyökaluilla, joilla saadaan pääl-

lekkäiset reunat, turhat pinnat ja muut laskentaa haittaavat geometriset epäjatkuvuudet määriteltäviä.

4.3 Ratkaisija

Ratkaisijana toimii Ansys 2022 R2 Workbench -ohjelma, johon analysointimalli siirretään suoraan SpaceClaimista. Mallille luodaan analyysityypit sekä tarkastetaan teknisten tietojen oikeellisuus, jotka tulevat automaattisesti materiaalivalintojen mukaan.

Kyseessä on mitoitustehtävä, jossa kaikki sallitut jännitys- ja muodonmuutosarvot sekä kuormavoimat ovat tiedossa ja runko optimoidaan niiden perusteella. (Pennala 2000, 9.) Laskenta perustuu lineaariseen analyysiin, joten se on otettava huomioon mallin luonnissa verkotuksen, materiaalimallin, reunaehtojen ja kuormitusten osalta. Pysyttäessä sallittujen arvojen sisällä eli ennen sallitun myötölujuuden ylittymistä, jännityksen ja muodonmuutoksen suhde on lineaarinen. Oletetaan myös, että siirtymät ovat suhteellisen pienet ohutlevyrakenteissa, jotta niiden vaikutukset eivät muuttuisi epälineaariseksi. Lineaarisen mallin ratkaisuaika on lyhyt, jolloin pystytään pienessä ajassa ratkaisemaan monta eri tapausta, kuten rakenteen eri asennot linjastossa. Ratkaisut ovat hyvin skaalautuvia ja superponoituvia, jolloin esimerkiksi kuormien kasvattaminen muuttaa myös jännityksiä samassa suhteessa. Geometria sekä kontaktipinnat tulee pitää yksinkertaisena, jolloin vaikeat muodot ja kontaktit eivät vaadi epälineaarista laskentaa. (Logan ja Chaudhry 2012, Mac Donald 2011) Materiaaliksi valitaan S355 rakenneteräs.

4.3.1 Elementtiverkko, kuormat ja reunaehdot

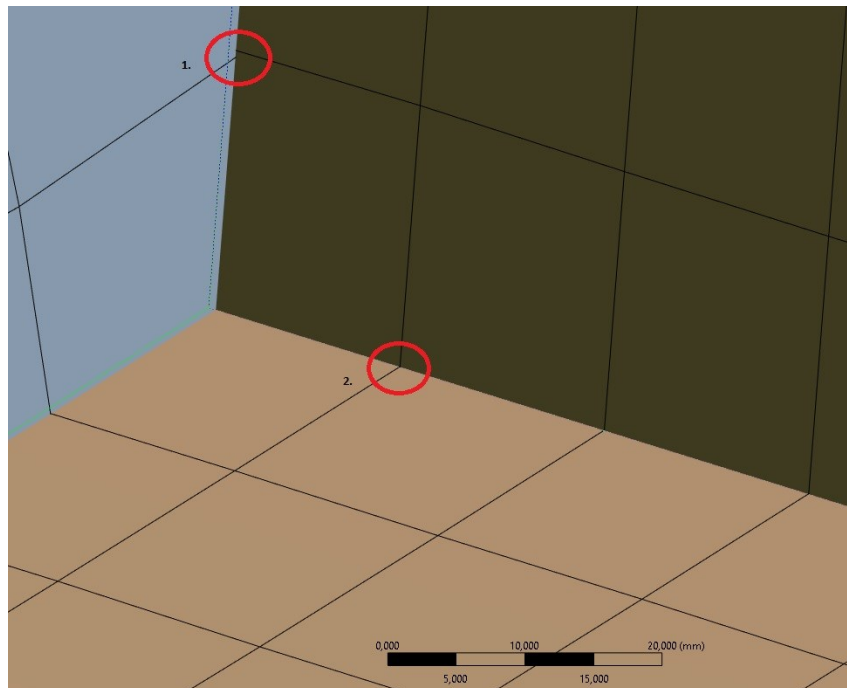
Malli avattiin Ansysissä ja geometria tarkastettiin materiaalin ja levynpaksuuksien osalta. Levyjen paksuudeksi valittiin 2 mm, jäykisteiden 4 mm ja nostolevyjen 20 mm. Osat jaettiin kunkin lujuusominaisuuksien perusteella ryhmiin, kuten levyt, pitkittäiset ja poikittaiset jäykisteet, jotta niitä on helpompi käsitellä määrittelyn aikana.

Koordinaattisysteemiin määritettiin globaalikoordinaatti, jonka mukaan myöhemmin annetaan gravitaation suunta paikalliskoordinaatin avulla. Automaattityökaluja käytettäessä ohjelma korjaa itse epäjatkuvuudet, jolloin virheen mahdollisuus on suuri. Tämä vaihe tehtiin manuaalisesti, jotta varmistuttiin siitä, että geometria on kunnossa ja jatkuva. Jos

geometria ei ole jatkuva ohjelma antaa virheilmoituksen, eikä luo elementtiverkkoa laskentamallille.

Kun geometriaa koskevat määrittelyt ovat kunnossa, luodaan elementtiverkko. Verkon generointia kutsutaan usein myös verkon luomiseksi, joka on prosessina aikaa vievä ja virheille altis vaihe. Ohjelma laskee automaattisesti mallille verkon algoritmeja käyttäen. Automaattisen verkon generoimisessa on määritettävä elementtityyppi ja siinä olevat solmujen lukumäärät sekä elementtikoko. Joissain tapauksissa on syytä tarkastaa automaattisesti luodun verkon solmusuunnat, jos ne eivät ole geometrian mukaisia. (Zienkiewicz ja Taylor 2005, 264-266.)

Generoitu verkko tulisi olla jatkuva ja yhdenmukainen, jossa eri osien välille muodostuu yhteiset solmupisteet. Alla olevassa kuvassa (kuva 5) on esitetty elementtisolmut, jossa solmu numero 1 on epäjatkua ja solmu numero 2 jatkaa rakenteesta toiselle.



Kuva 5. Elementtisolmujen tarkastelupisteet.

Elementtiverkolle annetaan elementtikoko, joka tässä tarkastelussa on 20 mm ja tulee asiakkaan käyttämistä arvoista tällaisiin tapauksiin. Elementtikoko määritettiin kohtuullisen suureksi, koska tarkastelun kohteena oli globaali rungon käyttäytyminen, eikä paikallisana-

lyysi. Globaalitarkastelussa pyritään nopeaan generointiaikaan, johon elementtikoko vaikuttaa.

Tutkimuksessa halutaan tutkia rungon lujuutta staattisessa kuormituksessa, jossa muodonmuutoksilla on suuri vaikutus rakenneosien koon määrittämisessä. Tämän takia analyysityypiksi valittiin Static Structural, josta runkoon kohdistuvat muodonmuutokset ja jännitystilat saadaan selville. Koska rakenneosat ovat ohutlevyä, on syytä tarkastella lisäksi lommahduskestävyyttä. Ohjelmasta valittiin Eigenvalue Buckling tarvittavan lommahdusanalyysin tutkimiseen.

Kuten jo edellä mainittiin, kennomaisen rakenteen sisäosa vuorataan eristeellä. Sen tehtävä on suojata kantavaa ulkorakennetta sisäosan korkeilta lämpötiloilta. Ohjelmaan tämän määrittäminen vaatii kaksi eri lämpökuormaa, joille molemmille määrätään kaksi ajanjaksoa. Lämpökuormitustapaus TC1 (Thermal Condition) määrätään sisärakenteille, jotka ovat kosketuksissa korkean lämpötilan kanssa. Ajanjaksolle 1 s huoneenlämpötila 22 °C astetta ja toiselle ajanjaksolle 2 s 400 °C astetta. Tapaus TC2 määrätään ulkorakenteille, jotka ovat suojattu eristeellä. Ajanjaksolle 1 s huoneenlämpötila ja 2 s 64 °C asteeseen. Lämpökuormitustapauksista esitetty taulukko 1 alla.

Taulukko 1. Laskennassa käytetyt lämpökuormitustapaukset.

Lämpökuormitustapaus (TC)	Ajanjakso / Lämpötila	Ajanjakso / Lämpötila
TC 1	1 s / 22 °C	2 s / 400 °C
TC 2	1 s / 22 °C	2 s / 64 °C

Sisä- ja ulkolämpötilojen lämpöalueet yksinkertaistetaan, mutta vaihtoehtoisesti ne voidaan laskea myös tarkemmin, jolloin lämpötilan siirtyminen rakenteesta toiselle olisi tasaisempaa. Tässä tutkimuksessa laskenta pidetään kuitenkin lineaarisena, jolloin myös korkeita lämpökuormia yksinkertaistetaan voimakkaasti.

Edellisten kuormien lisäksi kappaleelle annetaan sisäosien massa, joka määrätään ylä- ja alapalkin etupuolelle jaettuna massana. Massalisäys on 1350 kg, jossa on mukana asiakkaan käyttämä varmuuskerroin 1,35. Kerroin on asiakkaan vakioitu varmuuskerroin, joka

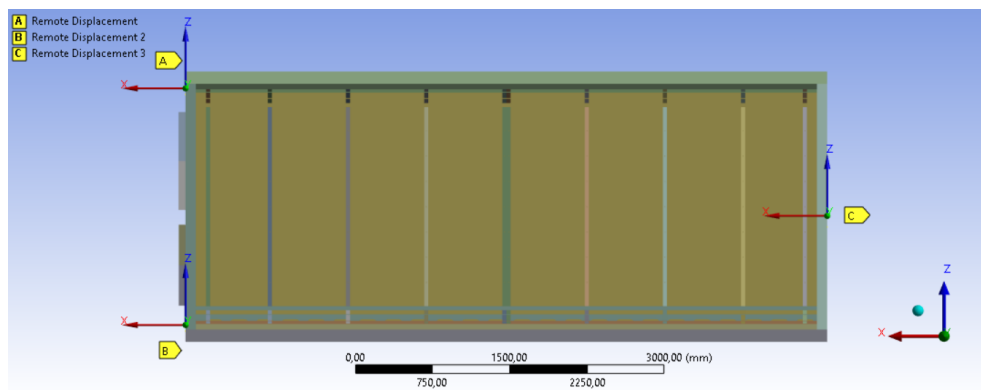
on hyväksi todettu myös käytännössä. Kerroin on myös EC3 mukainen osavarmuuskerroin omamassan aiheuttamalle kuormitukselle. Kerrointa valitessa on syytä ottaa huomioon kuormitustapauksen tyyppi, esimerkiksi onko kuormitus edullista ja epäedullista. Kaikki runkoon kohdistuva kuormitus on ajasta riippumatonta, eli staattista. Rungon on kestävä ainoastaan koko omapaino, joten kerroin on ulkoisen kuorman aiheuttaman rasituksen osavarmuuskerrointa 1,5 pienempi. (SFS-EN 1990+A1+AC: 2010, 90.)

Omanmassan huomioimiseksi rungolle määritetään painopiste globaalissa ympäristössä. Painopisteen suunta riippuu työ- ja nostoasennosta, joka määritetään kullekin tapaukselle erikseen. Taulukossa 2 on määritetty jokaisen tapauksen painovoiman suunta globaalin koordinaatin mukaan, X-akselin suhteen. Tapauksia on yhteensä 9 kappaletta, joista kaksi on nostotapausta ja loput linjastossa olevia työasentoja.

Taulukko 2. Tapauksien reunaehdot ja kiinnitykset.

Tapaus linjastossa	Kiinnityskoh- ta	Reunaeh- don ni- meäminen	Reunaehdot						painovoim- man kulma X-akselin suhteen	
			X	Y	Z	RX	RY	RZ		
1.	etuosa A,B,C	A	X	X			X	X		0° (-Z)
		B	X	X			X	X	X	
		C		X	X					
2.	etuosa A,B,C									45°
3.	etuosa A,B,C									90° (Y)
4.	etuosa A,B,C									135°
5.	etuosa A,B,C									225°
6.	etuosa A,B,C									270° (-Y)
7.	etuosa A,B,C									315°
Nostotapauk- set	takaosa A,C,B,D	A	X		X					painovoim- man suunta
		B	X		X					
		C			X					
		D			X					
B1	etuosa A,C takaosa B,D	A	X		X					Z
		B	X	X	X	X	X	X	X	
		C			X					
		D			X					

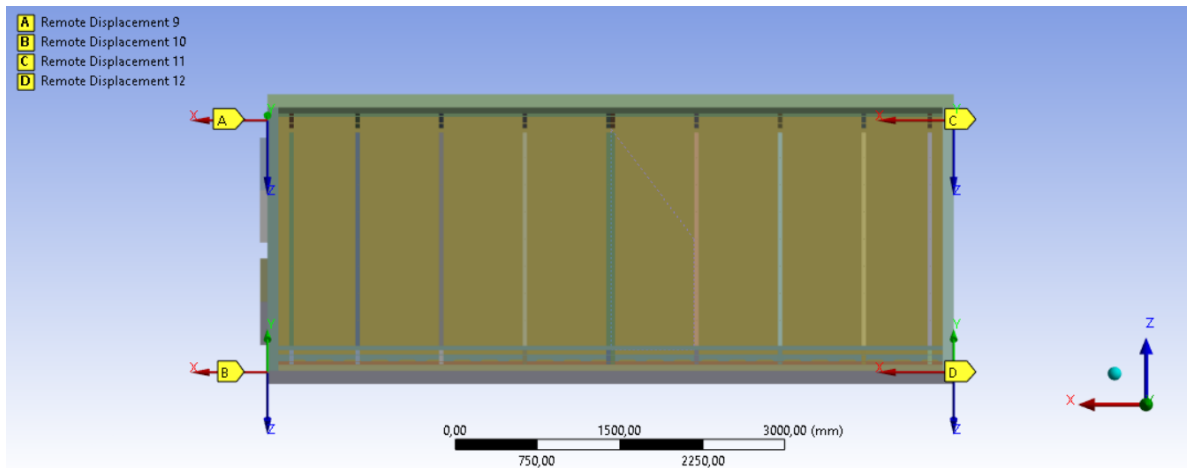
Reunaehtoja määritettäessä pohditaan kappaleen tuentaa, jotta saadaan selville mitkä niistä ovat vapausasteen suhteen vapaita tai täysin jäykkiä. (Pennala 2000, 12.) Ensimmäisessä tapauksessa runko on kiinni linjastossa pystyasennossa ja roikkuu kanavien puolelta ylhäältä ja alhaalta saranaliitoksella. Kanavapuolen alempi tuenta on jäykkä pystysuunnassa, joka kantaa Z-suuntaiset kuormat. Toinen puoli rungosta on tuettu keskeltä, joka on jäykkä pystysuunnassa, sekä kappaleen pituussuunnassa. Kuvassa 6 on havainnoitu kiinnityskohdat A, B ja C.



Kuva 6. Pystysuuntaisen työasennon kiinnityskohdat.

Taulukossa 2 on määrätty reunaehdot kiinnityskohdille A, B ja C. Linjaston kaikkien työasentojen reunaehdot määritetään samalla tavalla.

Nostotapauksien A1 ja B1 reunaehdot ja painovoiman suunta on näytetty taulukossa 2. Nostotapauksien kiinnityskohdat eroavat työasentojen kiinnityskohdista, koska runko kiinnitetään liinoilla, josta nostojen kriittisimmät asennot otettiin vertailuun. Kuvassa 7 on esitetty nostotapausten kiinnityskohdat.



Kuva 7. Nostotapauksien kiinnityskohdat.

Kappaleen pituussuuntaiset vapausasteet jätetään kokonaan vapaaksi kuvassa 7 oikealta puolelta (suunta $-X$), jotta lämpölaajeneminen pääsee mallissa tapahtumaan vapaasti.

4.3.2 Sallitut arvot ja varmuusluvut

Koska emme tarkkaan pysty tuntemaan kaikkia runkoon vaikuttavia rasituksia, sallituissa arvoissa käytetään varmuutta eli varmuuslukuja. Hyvänä lähtökohtana laskennalle on olla tietoinen epävarmuustekijöistä, jotka voivat vaikuttaa rungon muodonmuutoksiin. Jokaisella materiaalilla on omat materiaaliominaisuutensa, mutta nekin saattavat vaihdella valmistuserien ja kappaleissa olevien osien välillä. Vaikka kuormitustapaukset voidaan pääsääntöisesti tunnistaa hyvin, on vaikea päästä täyteen varmuuteen siitä, miten ympäröivät olosuhteet vaikuttavat kuormituksen luonteeseen. Ympäristöstä aiheutuvien epävarmuustekijöiden, kuten korroosion synnyn ja leviämisen, sekä rungon valmistuksessa ja ajansaatossa tapahtuvien epävarmuustekijöiden huomioiminen etukäteen on lähes mahdotonta. Luvussa 4.3.1 mainittu turvallisuuskerroin ottaa huomioon juuri näitä epävarmuustekijöitä. (Outilinen et al., 2004, 57.)

Standardin mukaan rakenneteräksen myötölujuus laskee lämpötilan noustessa, ja on lähes olematon, kun lämpötila kohoaa yli $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteeseen. Tästä voidaan päätellä, ettei rakenneterästä tulisi käyttää rakenteissa, joissa lämpötilat ovat korkeita, sillä sen lujuusominais-

suudet heikentyvät lämpötilan kohotessa. Alla kuva 8 standardista hiiliterästen jännitys-venymä yhteys korkeissa lämpötiloissa.

Teräksen lämpötila θ_a	Pienennystekijät lämpötilassa θ_a suhteessa 20 °C lämpötilaa vastaaviin arvoihin f_y tai E_a		
	Tehollisen myötörajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{y,\theta} = f_{y,\theta} / f_y$	Suhteellisuusrajan pienennystekijä (suhteessa arvoon f_y) $k_{p,\theta} = f_{p,\theta} / f_y$	Kimmokertoimen pienennystekijä (suhteessa arvoon E_a) $k_{E,\theta} = E_{a,\theta} / E_a$
20 °C	1,000	1,000	1,000
100 °C	1,000	1,000	1,000
200 °C	1,000	0,807	0,900
300 °C	1,000	0,613	0,800
400 °C	1,000	0,420	0,700
500 °C	0,780	0,360	0,600
600 °C	0,470	0,180	0,310
700 °C	0,230	0,075	0,130
800 °C	0,110	0,050	0,090
900 °C	0,060	0,0375	0,0675
1000 °C	0,040	0,0250	0,0450
1100 °C	0,020	0,0125	0,0225
1200 °C	0,000	0,0000	0,0000

HUOM. Väliarvot lämpötilan suhteen saadaan lineaarisesta interpolointia käyttäen.

Kuva 8. Hiiliteräksen jännitys-venymä yhteys korkeissa lämpötiloissa (SFS-EN 1993-1-2: 2006, 22).

Kuvan 8 mukaan hiiliteräkseen tulee pysyviä muodonmuutoksia jo 200 °C asteessa. Tehollinen myötölujuus puolestaan alkaa heikkenemään 500 °C asteessa ja materiaalin kimmoisuus alkaa heikentyä 200 °C asteen kohdalla

Rakenneteräs S355 on materiaalina lineaarisesti kimmoista ja plastista, joten jos kuormitukset poistetaan, muodonmuutoksen palautuvat, ellei se ole ylittänyt kriittistä rajaa eli myötölujuutta. Tapauksessa tämä taas tarkoittaa sitä, että rungon noston aikana siihen saattaa kohdistua muodonmuutosta, mutta palautuu kun se lasketaan linjastoon, jos myötörajaa ei ylitetä. Sallittuna myötörajan arvona käytetään huoneenlämpötilassa 355 MPa. Lämpötilan muuttuessa sallittu myötöraja valitaan tapauskohtaisesti.

Rakenteen sallituissa kokonaissiirtymissä on otettava huomioon lämpötiloista aiheutuva lämpölaajeneminen. Näitä lämpölaajenemisesta johtuvia pitenimiä tai venymiä voidaan välttää rakenneosien lyhentämisellä, kuten levykentän jakaminen. Lämpölaajenemisesta johtuvat ilmiöt ovat sidoksissa rakenteen geometriaan, joten niille on tehtävä oma tilava-

raus suunnitteluvaiheessa. Lämpöpiteneminen voidaan laskea analyttisesti, kuten luvussa 3.2. Sallittuna siirtymän rajana voidaan pitää 5 mm, poisluettuna lämpölaajeneminen. Sallittu siirtymä on asiakkaan vakioitu siirtymän arvo, joka on hyväksi todettu käytännössä. Kaikki ylimenevät siirtymät ovat kriittisiä ja niitä on tutkittava erikseen.

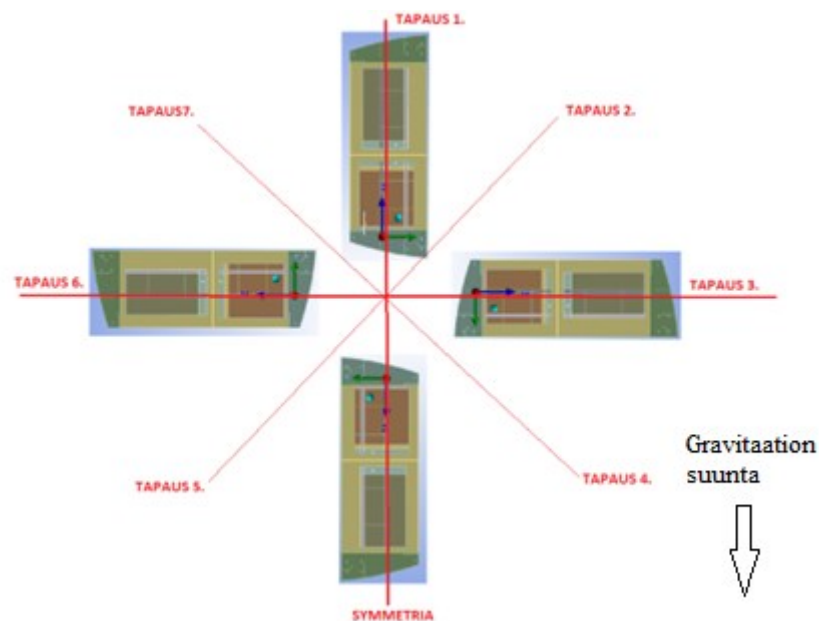
Lommahdusanalyysin tulosten raja-arvona käytetään muunnettua hoikkuutta, joka tulee olla ≥ 2 . Muunnettu hoikkuus on kerroin, jonka avulla levyn kohdistuvaa lommahdusriskiä pystytään tarkastelemaan. Levyn plastinen lommahdus on pysyvä muodonmuutostila, mutta se ei vielä kerro kestääkö levy kuormitusta. Tehollisen poikkipinta-alan laskemisesta selviää todellinen levyn kuormansietokyky. Hyvin usein levyn lommahdus halutaan estää, koska halutaan olla varmoja rakenteen kestävydestä. Pysyvä muodonmuutos on levyosalle aina rasite ja tämän takia se halutaan estää.

5 Tulokset

Tässä pääluvussa keskitytään saatuihin tuloksiin, koska koko tutkimustyön arvo määrittyy sen uudelleen toistettavuudella ja tuloksien hyödyntämisellä käytännössä. Jotta edellä mainitut arvot lunastetaan, mallin viimeisen iteraation tulokset näytetään alaluvussa: ”Numeeriset tulokset”. Numeeristen tulosten lisäksi vertailuun otetaan analyttiset tulokset, jottei tuloksien luotettavuus ole vain ohjelmiston varassa.

5.1 Numeeriset tulokset

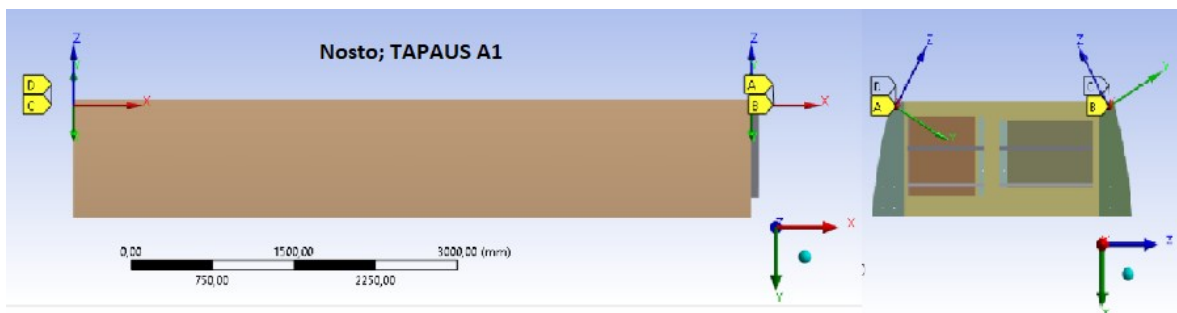
Malli analysoitiin linjaston eri asennoissa pyörittämällä rakennetta $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ asteen välein oman akselinsa ympäri, josta muodostui yhteensä seitsemän erilaista tapausa. Ainoastaan pystysuuntaisen kuivaimen peilauksessa pystyttiin hyödyntämään symmetriaa. Eri tapausien nimeäminen ja asentojen hahmotus on esitetty alla olevassa kuvassa 9. Rakenne päädyistä katsottuna, jossa gravitaatio vaikuttaa alaspäin jokaisessa tapauksessa.



Kuva 9. Tuotteen asennot linjastossa päädyistä katsottuna, jossa gravitaatio vaikuttaa alaspäin.

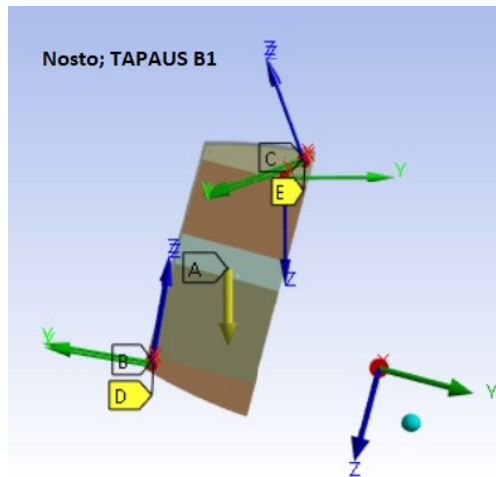
Kuvasta 9. tapauksen 1. peilikuva on täysin symmetrinen, kun otetaan huomioon lisätty painon vaikutus ylä- ja alapalkissa. Tästä syystä symmetriatapausta ei laskettu erikseen. Muissa tapauksissa painovoiman suuntaa muutettiin tapauskohtaisesti, jolloin lisätty massa jakaantui rakenteelle painovoiman mukaan epätasaisesti. Painovoima määrittää runkoon kohdistuvan ja lisämassasta johtuvan kuormituksen suuruuden eri osille. Tässä pääluvussa esitetään kriittisimmät tulokset, jotka syntyvät kuormitustapauksissa 1 ja 3. Kuvien skaalaus on 50.-kertainen, ellei toisin todeta.

Nostotilanteista valittiin kriittisimmät asennot. Nosto toteutetaan vaijerien avulla ja nostokuormitus kohdistuu runkoon vain sen kuljetuksen ja linjastoon viennin aikana. Nostotapauksia on kaksi A1 ja B1, jotka on kuvattu alla (kuva 10).



Kuva 10. Nostotapaus A1.

Jokaiseen nostopisteeseen on kytketty nostolenkki, joka on jäykkä pystysuunnassa eli globaalkoordinaatin -Y -suunnassa. Tätä tilannetta on pyritty kuvaamaan laskennassa pisteillä A-D, jotka ovat 200 mm päässä levyn nostoaukosta. Oikeanpuoleisen kuvan paikalliskoordinaatin z -suunta on määrätty näyttämään vaijerien suuntaan, josta vaijerien toinen pää on kiinni yhdestä pisteestä eli painopisteestä, jossa tuote on tasapainotilassa lappellaan.



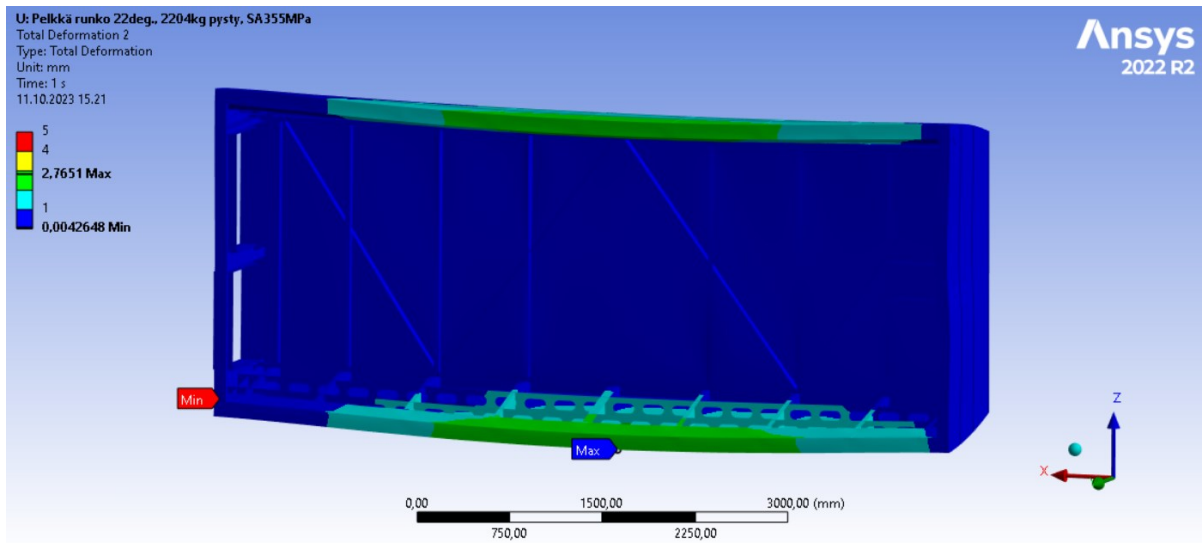
Kuva 11. Nostotapaus B1.

Nostotapauksessa B1 runko nostetaan niin pystyyn, kun se noston kannalta on mahdollista. Tässä tapauksessa haluttiin nostopisteet sitoa ylä- ja alarakenteeseen. Vaijerien pituudella pystytään määräämään eri nostokulmat, mutta niistä otettiin vain kriittisin ääriasento tarkasteluun. Myös tässä nostotapauksessa nostopisteissä on nostolenkit, joiden paikat on esitetty kirjaimin A-D kuvassa 11. Nostolenkit pyrittiin havainnoimaan malliin oikein, jolloin ne määrättiin 200 mm ulos levyn nostoaukosta. Paikallisen koordinaatin z-suunta kuvaa vaijerien suuntaa, ja vaijerien toinen pää on kiinni yhdestä pisteestä nostokoukussa.

5.1.1 Siirtymät ja jännitykset

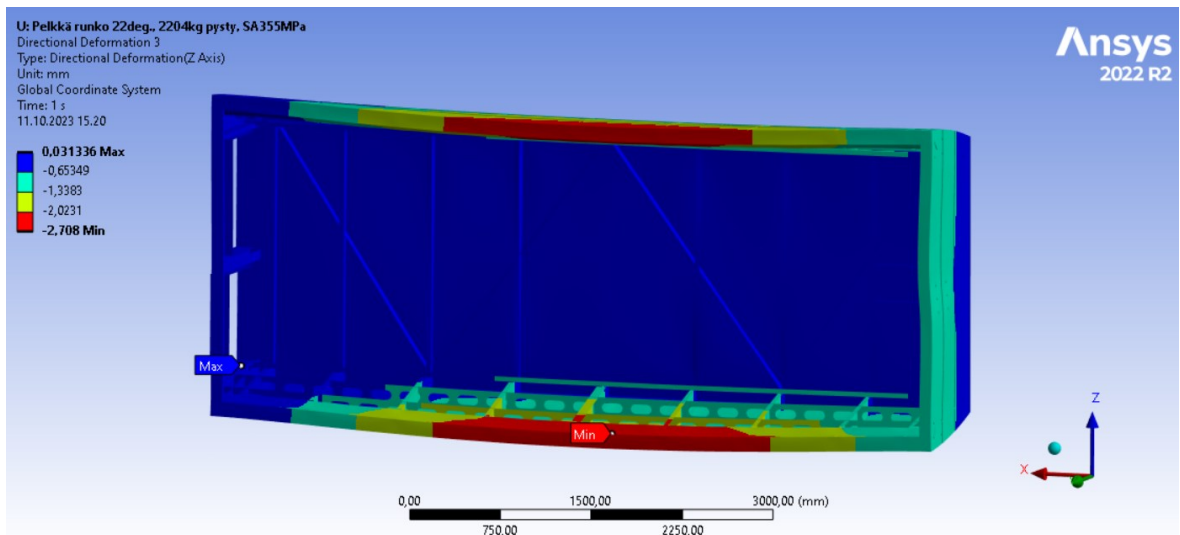
Tarkastelimme kuormitettua rakennetta xyz-koordinaatistossa, jossa tarkastuspisteillä voi olla muodonmuutos- tai jännitystiloja minkä tahansa akselin suhteen. Kokonaissiirtymissä esiintyy myös kahden eri koordinaatiston välistä muodonmuutosta, jota kutsutaan resultanttiksi. Poikkileikkauksessa koko seinämäpaksuudella vaikuttavaa tasaisestijakautunutta jännitystä kuvataan kalvojännityksellä. Jännitysten yhteisvaikutusta kuvataan Von-Mises -jännityksellä, jota voidaan soveltaa eri jännityskomponentteihin. Laskennasta tulleet kriittisimmät tapaukset on esitetty tuloksissa.

Kriittisimmästä tapauksesta 1. on näytetty tulokset alla kuvassa 12 kokonaissiirtymän resultantti.



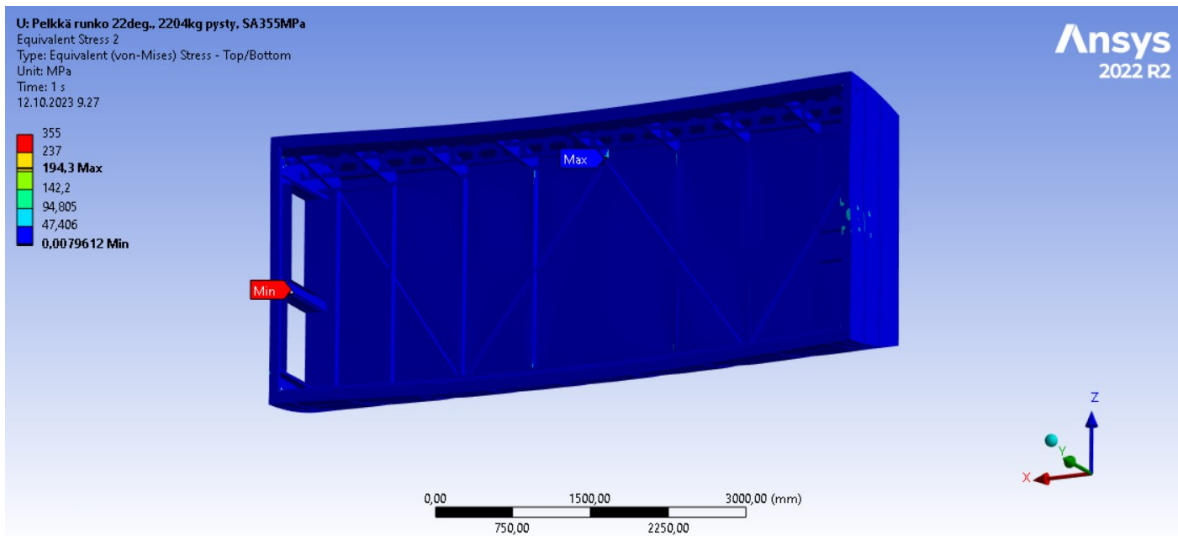
Kuva 12. Tapauksen 1 kokonaissiirtymän resultantti.

Kuvassa 12 kokonaissiirtymien resultantin maksimiarvo on 2,8 mm alapalkin keskellä punaisen nuolen kohdalla ja kokonaissiirtymä minimiarvo on alle 1 mm sinisen nuolen kohdalla tuotteen vasemmassa alareunassa. Sallittu siirtymä on 5 mm.



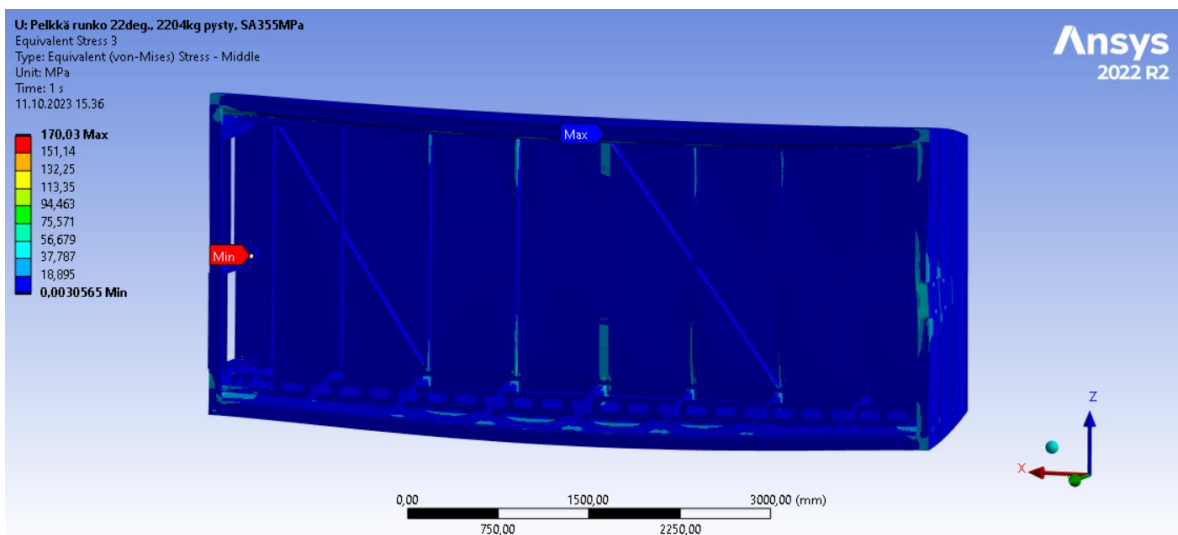
Kuva 13. Z-suuntaiset siirtymät.

Kuvassa 13 yhdensuuntaisessa siirtymien tarkasteluista suurin siirtymä löytyi Z-suunnasta. Pystysuuntainen eli gravitaation (painovoiman suunta $-Z$) mukainen siirtymän arvo on 2,7 mm. Muiden suuntien, eli X ja Y maksimiarvot olivat alle 1 mm suuruisia.



Kuva 14. Von-Mises jännitykset.

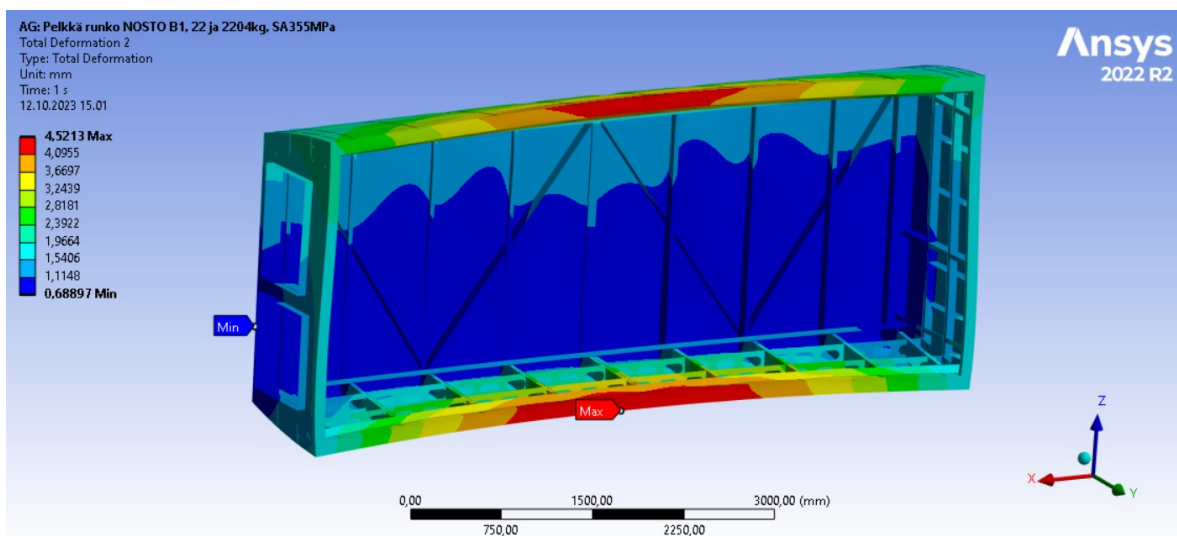
Kuvassa 14 Von-Mises jännitykset koko rungossa ovat maksimissaan 194 MPa takaseinän yläosassa keskellä punaisen nuolen kohdalla ja kokonaisjännityksen minimiarvo on alle 1 MPa oikean sivuelementin keskellä sinisen nuolen kohdalla. Sallittu jännitys 22 °C asteessa on 355 MPa tai kriittisen tarkastelun perusteella 1,5 turvallisuuskertoimella 237 MPa.



Kuva 15. Kalvojännitykset.

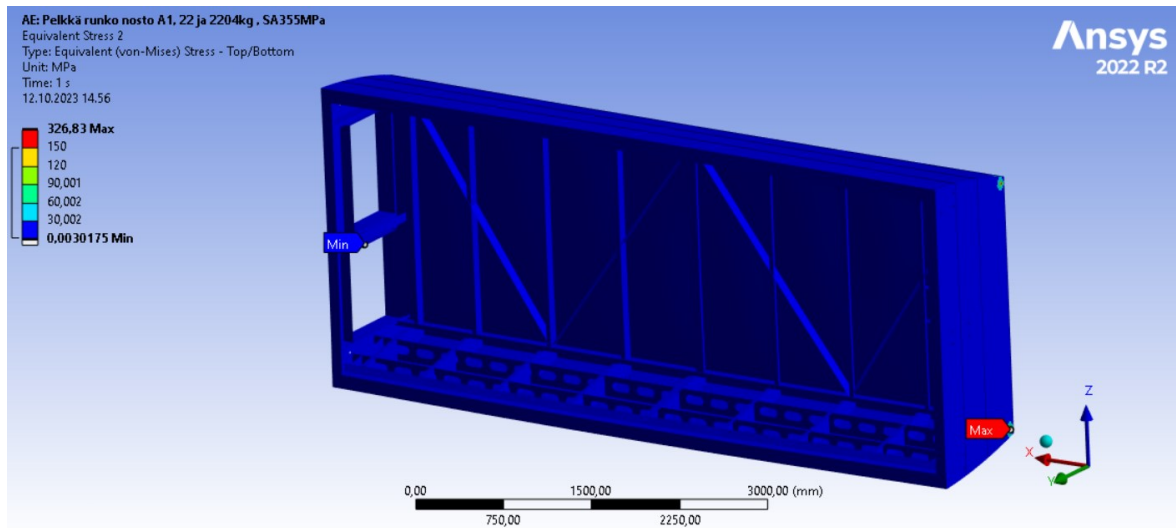
Kuvassa 15 kalvojäännitysten maksimiarvo on 170 MPa yläpalkin ja takaseinän risteyksessä rungon keskellä sinisen nuolen kohdalla ja kalvojäännitysten minimiarvo on alle 1 MPa sivuseinäelementin keskellä punaisen nuolen kohdalla.

Nostotapauksista B1 on kriittisempi kokonaissiirtymien perusteella ja A1 kriittisempi jännitysten mukaan tarkasteltuna. Tulokset näytetty seuraavissa kuvissa.



Kuva 16. Nostotapaus B1, kokonaissiirtymät.

Kuvasta 16 nostotapauksen B1 kokonaissiirtymän resultantin maksimiarvo 4,5 mm alapalkin keskellä punaisen nuolen kohdalla ja kokonaissiirtymän minimiarvo on alle 1 mm sinisen nuolen kohdalla tuotteen vasemmassa reunassa. Sallittu siirtymä on 5 mm.

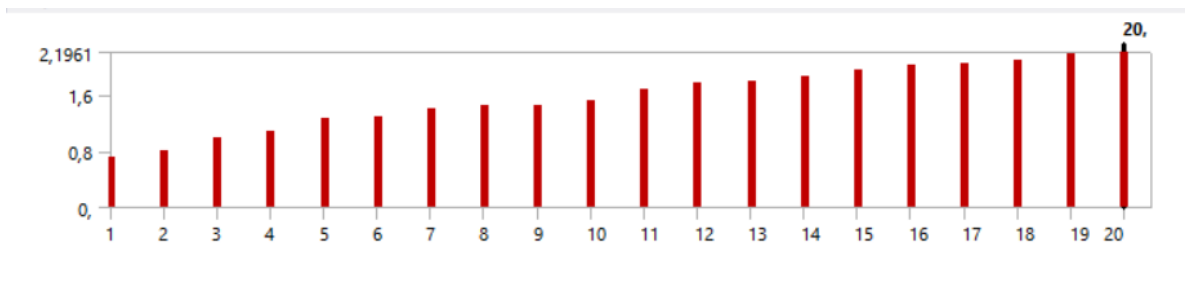


Kuva 17. Nostotapaus A1, Von-Mises jännitykset.

Kuvassa 17 Von-Mises jännitysten maksimiarvo 327 MPa oikealla alemmassa nostopisteessä punaisen nuolen kohdalla ja kokonaisjännityksen minimiarvo on alle 1 MPa oikean sivuelementin keskellä sinisen nuolen kohdalla. Sallittu jännitys 22 °C asteessa on 355 MPa tai kriittisen tarkastelun perusteella 1,5 turvallisuukskerroimella 237 MPa.

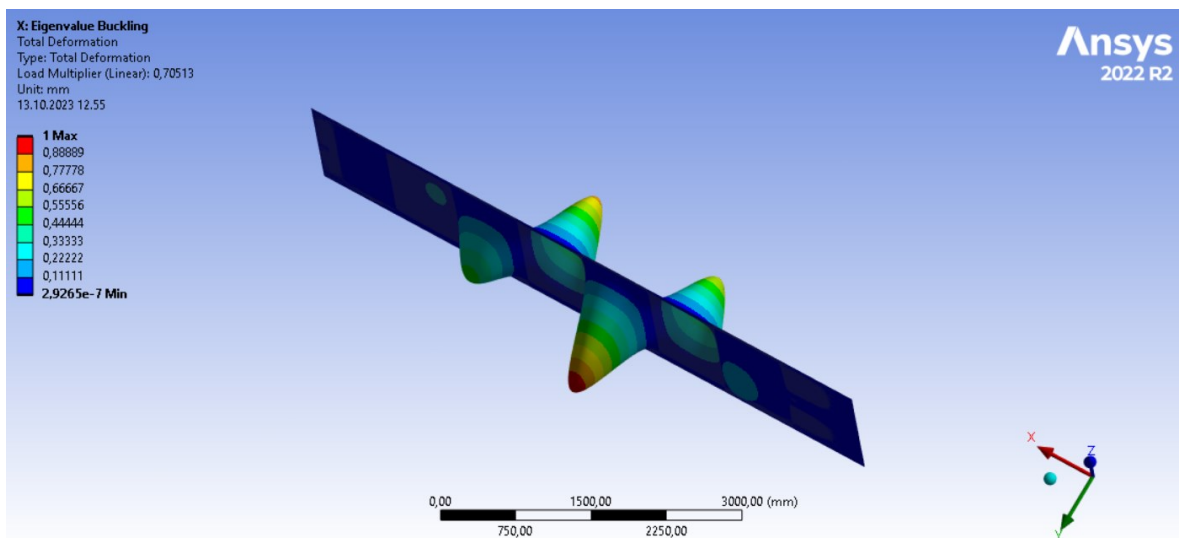
5.1.2 Lomahdusanalyysi

Ohutlevyrakenteessa pidettiin tärkeänä tutkia myös lommahdusta, nurjahdusta ja kiepahdusta. Työkaluna käytettiin Eigenvalue Buckling kriteeriä, jolla saatiin tarkastettua jokaisen kuormitustapauksen lommahdusriski. Kriteerinä lommahdusanalyysissä pidetään muunnettua hoikkuutta 2, jota mikään tapaus ei saa alittaa. Jokaiselle eri tapaukselle luotiin 20 erilaista kriittisintä moodia. Tapaus 3 ja nostot olivat kriittisimmät, joista näytetään tulokset alla kuvassa 18.



Kuva 18. Lommahdusten kertaluvut, iterointikierron 1.

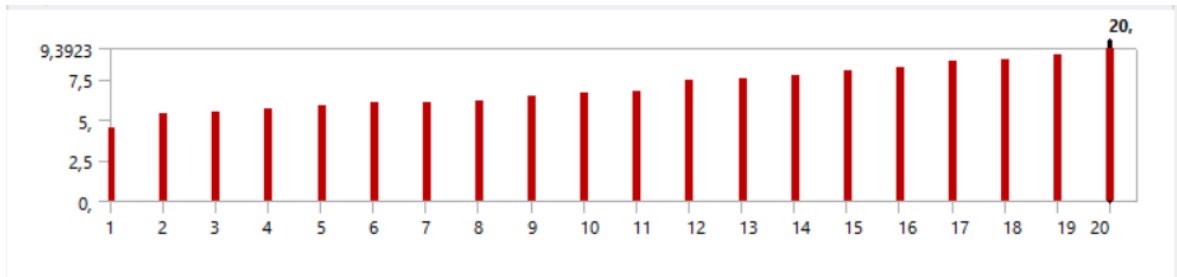
Ensimmäiset 15 tapausta jäivät alle 1, mikä tarkoittaa käytännössä varmaa lommahdusta levyrakenteessa. Ensimmäiset 15 tapausta eivät täytä kuormituskertoimen sallittua arvoa ≥ 2 . Tapausten lommahduspaikat olivat rungon takaseinän levyssä, jotka näytetty kuvassa 19.



Kuva 19. Takaseinän lommahdukset.

Kriittisin tapaus takaseinässä oli kuormituskertoimella 0,70513. Skaalaus on 1000-kertainen, jotta lommahduksen suunta erottuu selkeästi.

Takaseinän levynpaksuus muutettiin 4 mm. Toisella iterointikierröksellä tulokset näkyvät seuraavassa kuvassa 20.



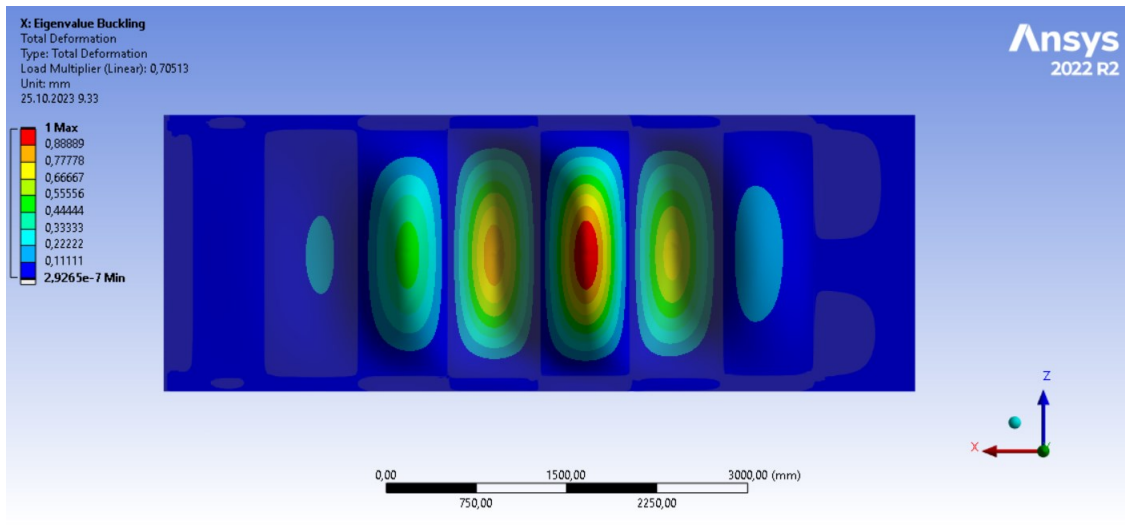
Kuva 20. Lommahduksien kertaluvut, iterointikierron 2.

Rakennemuutoksien jälkeen lommahduksen kuormituskerroin on noin 4,5. Tämän jälkeen tapauksien läpikäyntiä jatketaan numerojärjestyksessä ja viimeisimpänä nostot, joissa ei enää esiintynyt kriittisempiä hoikkuuslukuja.

5.2 Analyttiset tulokset

Tulosten tarkistamiseen tarvittiin vaihtoehtoisia laskentatapoja, jolla pyrittiin varmistamaan numeeristen tulosten luotettavuudesta. Siksi numeerisen laskennan tueksi otettiin mukaan käsinlaskenta, joka perustuu tunnettuun standardissa esitettyyn analyysiin. Käsinlaskentaa pyritään yksinkertaistamaan, jotta se on mahdollista toteuttaa, mutta yksinkertaistamisen periaatteena on pitää tulokset konservatiivisina. Laskenta on suoritettu Mathcad 15 -ohjelmaa apuna käyttäen.

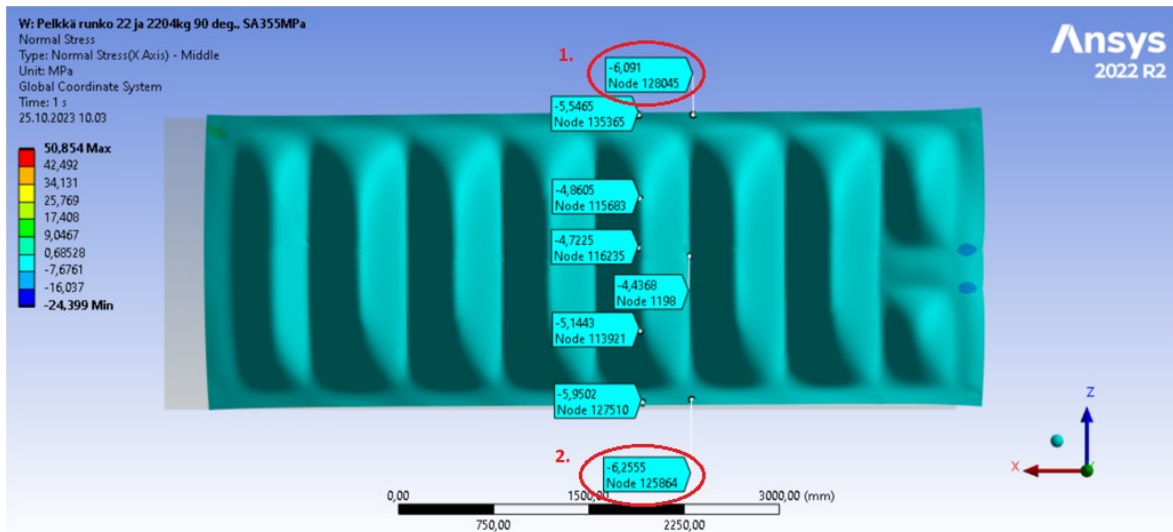
Tuotteen takaseinän lommahduskestävyys oli alle tavoitetasoksi asetetun kuormituskertoimen 2, kun tarkasteluun otetaan pahin tilanne lommahduksen kannalta. Tämä tilanne esiintyy levynpaksuuden ollessa 2 mm, jossa pitkittäisjäykisteet ovat tasaisin välein jäykistämässä levyä. Kriittisin tapaus esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Puristusjännitystä takaseinän levyssä.

Muodonmuutoksen luonteesta pystytään erottamaan puristusjännitystä (standardi määrittelee puristuksen positiiviseksi, ellei toisin esitetä) levyosien keskellä, jota käytetään Eurokoodin 3 mukaisen käsinlaskennan lähtötietona. Levyrakenteiden standardista löytyy normaalijännitysten aiheuttamat levyn lommahdusvaikutuksen parametrit, joita käyttämällä saadaan levyssä olevan tehollisen poikkileikkauksen arvo sekä sallittu jännitys. (SFS-EN 1993-1-5: 2007, 13-17.)

Standardin mukaiseen käsinlaskentaan tarvitaan jännitys jakauma, joka on saatu Ansyskseta. Jännitys jakaumavertailuun otettiin keskipinnan normaalijännitykset, joiden tulokset olivat hyvin saman suuruisia tarkastelupisteissä. Kuvassa 22 näytetään normaalijännityksen tarkastelupisteet puristusjännityksen keskeltä, sekä jäykisteen kohdalta lommahduksen reunalta.



Kuva 22. Tarkastuspisteet lommahduksesta.

Kuvan 22 tarkastelupisteet on otettu lommahduskriittisimmistä alueista, joista käsinlaskentaan valitaan suurimmat eli yli 6 MPa jännitykset. Tarkastelupisteiden tarkat lukemat ja sijainnit kuvassa 22 numeroituna 1. ja 2.

Kahdelta reunalta tuetun taso-osan jännityssuhde ψ on ~ 1 , joten lommahduskertoimeksi tulisi valita k_σ arvoksi 4 standardin taulukon 4.1 mukaisesti. Edellisessä esityksessä levyn jännitykset otetaan huomioon, mutta käsinlaskennassa asiaa tarkastellaan täysin analyytisesti käyttäen Garlandin funktiota. Kyseessä on yksinkertaisesti tuettu tasaisesti puristettu levykenttä lommahduskertoimen määrittämisessä, joka johdetaan seuraavasti: (Allen ja Bulson 1980.)

$$k_\sigma = 2 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 \quad (7)$$

Jännityssuhde k_σ , on syytä laskea Garlandin funktion avulla, koska levynpaksuus on koonsa nähden hyvin ohut. (Allen et al., 1980.) Taso-osan muunnettu hoikkuus λ_p voidaan johtaa kimmoteorian mukaisen levyn lommahdusjännityksen σ_{cr} , sekä f_y myötölujuuden perusteella seuraavasti:

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} \quad (8)$$

, jossa f_y = materiaalin myötölujuus [MPa] ja σ_{cr} . Kriittinen lommahdusjännitys saadaan johdettua seuraavasti:

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \left(\pi^2 \frac{E}{12(1-\nu^2)} \left(\frac{t}{b} \right)^2 \right) \quad (9)$$

, jossa E = materiaalin kimmokerroin, t = levyn paksuus ja b = levyn leveys.

Muunnetun hoikkuuden arvon ollessa $\lambda_p > 0.673$, missä $(3+\psi) \geq 0$ saadaan pienennystekijä ρ seuraavasti:

$$\rho = \frac{\lambda_p^{-0,055(3+\psi)}}{\lambda_p^2} \quad (10)$$

Pienennystekijällä ρ , voidaan kertoa levyn bruttopinta-ala A_c , josta saadaan tehollinen pinta-ala A_{ceff} . Tehollisesta pinta-alasta saadaan se levykentän alue, joka kantaa koko levykenttään kohdistuvan kuorman. Pienennystekijällä ρ , voidaan myös tarkastella kriittisen sallitun myötölujuuden raja-arvoa, jolla tehollinen levykenttä kestää kuormitusta seuraavasti:

$$f_{ysall} = \rho f_y \quad (11)$$

missä $f_y = 355$ MPa.

Muunnettu hoikkuusluku λ_p määrättiin analyttisesti, jossa ei otettu huomioon numeerisen laskennan tuloksia. Näin ollen on syytä tarkastella tapausta vertailun vuoksi vielä toisella tavalla.

Määritetään kaavan 6 mukaan myötörajaksi f_y 355 MPa, sekä pienennetään lommahduskertoimella 0,70513 saatua suurinta jännitystä tarkastelualueella kuvasta 21. Todellisen levyn jäykkyyden arvioimiseksi valitaan näistä kahdesta tarkastelusta kriittisempi jännitystapaus. Käsineläskenta on esitetty liitteessä 2, jossa on vertailtu lommahdusriskiä kahdella eri laskentatavalla. (SFS-EN 1993-1-5: 2007, 13-17.)

6 Pohdinta

Tässä pääluvussa arvioidaan edellä saatuja tuloksia, niiden luotettavuutta ja analyysin toistettavuutta. Luvussa vertaillaan numeerisia ja analyttisiä tuloksia keskenään, sekä aikaisempaan tutkimustietoon kirjallisuudesta. Tutkittavaksi ongelmaksi määriteltiin se, miten rungon valmistuskustannukset saataisiin minimoitua ilman rakenteen lujuusominaisuuksien kärsimistä lämpökuorman vaikutuksesta. Tätä ongelmaa lähestyttiin ohutlevyrakenteen staattista kuormitusta tarkastelemalla sekä tutkimalla rakenteen käyttäytymistä lämpökuorman alaisuudessa. Lisäksi tutkimuksessa tarkasteltiin ohutlevyrakenteisiin kohdistuvaa lommahdusriskiä.

6.1 Tulosten analysointi

Tulosten analysointi ja niiden ymmärtäminen ovat yksi tärkeimmistä työn sisältösuuksista. On tärkeää ymmärtää rungon käyttäytymistä eri tilanteissa, jotta sitä voidaan käyttää ja kehittää halutulla tavalla. Rungolta edellytetään tiettyjä ominaisuuksia, mutta sen elinkaaren ajalle saattaa osua sellaisia tapahtumia, joita pyritään etukäteen välttämään tai vähentämään. Pahin mahdollinen tilanne olisi tuotteen elinkaaren aikana kohtaama rungon vaurioituminen tai rikkoutuminen, jota pyritään ehkäisemään ottamalla huomioon sitä kohtaavat kuormitustapaukset.

Runkoa kuormittaa eniten omamassa ja lämpökuorma. Erityisesti lämpökuormat ovat hyvin suuria, joten tuloksia on analysoitu jo etukäteen sen suhteen, miten runko tulee kestämään siihen kohdistuvat kuormitukset. Tulosten etukäteen arviointi lisää myös tulosten luotettavuutta, sillä on aina riski tulkita väärät tulokset oikeiksi. Jos ennalta analysointi sekä numeeriset- ja analyttiset tulokset ovat kaikki samansuuntaisia, tulokset ovat luotettavimpia.

6.1.1 Lämpökuormat

Tutkittavassa tapauksessa lämpökuormat eivät ole vaihtuva amplitudisia, joka tekee kuormituksesta yksinkertaisemman ja ennalta arvattavamman. Toisaalta taas niiden vaikutukset rakenteeseen on vaikeammin estettävissä. Lämpökuorma vaikuttaa rakenteeseen koko ajan ja se pysyy hyvin tasaisena. Etukäteen arvioitiin, että 400 °C lämpötila tulee olemaan suurin haaste runkorakenteen tuotekehityksessä. Tätä näkemystä tuki lämpötilasta johtuvat materiaaliominaisuuksien muutokset standardeissa, joita on kuvattu myös tässä työssä otsikossa 4.3.3 sallitut arvot ja varmuuskertoimet.

Kuorman mallintaminen toteutettiin yksinkertaisesti antamalla sisärakenteelle 400 °C astetta ja ulkorakenteelle 64 °C asteen lämpökuormitukset. Tässä tapauksessa jo ensimmäisen iteraation tulokset olivat fyysisesti mahdottomia. Jännitykset olivat kauttaaltaan yli 5000 MPa ja siirtymät yli 30 mm. Tilannetta muutettiin korjaamalla 400 °C astetta 200 °C asteeseen, mutta se ei tuottanut toivottua tulosta. Tässä iteraatiossa levyn paksuuden kasvattamisella ja jäykisteiden lisäämisellä ei ollut suurta vaikutusta suhteessa tuloksiin. Levynpaksuuden kaksinkertaistaminen ei myöskään tuottanut toivottua tulosta, siitä saatiin ainoastaan vähäinen hyöty painon nousun kustannuksella.

Seuraavassa iteraatiossa rungon sisälevyt irrotettiin muusta rungosta, eli puhutaan kelluvasta sisärakenteesta. Kelluva sisärakenne kiinnitetään liukuvilla kiinnikkeillä, jotka antavat liikkumisvaran lämpötilojen vaikutuksessa. Kiinnikkeiden ideana oli myös irrottaa sisä- ja ulkorakenne toisistaan, jotta lämpö ei pääse etenemään rakenteessa. Tässä iteraatiossa ulkorakenteen tulokset olivat järjellisiä, mutta sisäkuoren kosketuspintoihin tuli yli 1000 MPa jännityspiikkejä. Liitteessä 1. on esitetty jännitys jakauma sisäkuorella lämpökuorman ollessa 400 °C astetta.

Sisälevyn kuoren tärkein tehtävä on antaa rungolle suojaa, kantokyvyn menetyksen tai muodonmuutoksen kestäminen ovat toissijaisia tehtäviä. Tämä todistaa sitä, että sisälevyn kuori toimii tarkoituksessaan. Siltä vaaditut tehtävät täyttyvät siinä tapauksessa, jos levy ei ala kuormittaa runkoa. Tällainen tilanne voi esiintyä, jos levyn kiinnitykset menettävät kantavuutensa ja näin ollen sisäosa romahtaa tämän seurauksena, tai jos levyn muodonmuutokset ovat niin suuria, että ne häiritsevät rungon toimintaa. Levyjen visuaalisella ilmeellä sisäosassa ei ole niinkään merkitystä, kunhan ne eivät haittaa sisäpuolen osien normaalia toimintaa.

Materiaalivalinnoilla voidaan estää lämmöstä johtuvia muodonmuutoksia. Korkeille lämpötiloille on suunniteltu teräksiä, jossa materiaali ei menetä ominaisuuksiaan. Tämä lisää kuitenkin kuluja, joiden hyötyhaittasuhdetta on mietittävä kustannuskriittisesti.

Rakenneosien uudelleen suunnittelulla voidaan myös löytää hyviä ratkaisuja lämpökuormia vastaan. Yhtenä vaihtoehtona voisi olla eristeen siirtäminen sisäpellin kylkeen ja jättää kantava runkorakenne tyhjäksi. Tyhjäan osaan olisi mahdollista tuoda pienillä kustannuksilla huoneilmakiertoinen ilmanvaihto. Tällä ratkaisulla eriste estää lämmön siirtymisen ja tyhjää tilaa jäähdytetään vielä entisestään kustannustehokkaasti.

6.1.2 Omamassa

Kolmannen iteraation tarkoituksena oli tarkastaa ulkorungon lujuus ilman lämpökuormia, erityö- ja nostotapauksissa. Tulokset -luvussa on esitetty tähän iteraatioon liittyvät kriittisimmät arvot. Iteraation tarkoituksena oli varmistua siitä, että runko kestää kuormitustapaukset huoneenlämmössä. Sisäosan levyt otettiin pois mallista, mutta ne huomioitiin rungon painossa. Omamassaan sisältyy rungon omapaino ~1560 kg, ~850 kg sisälevyt, sekä rungon sisällä olevat muut osat ~1000 kg, joka on laskettu varmuuskertoimella 1,35 eli yhteensä 1350 kg.

Jännitysten osalta tulokset olivat hyväksyttäviä eli ne pysyivät sallittujen arvojen sisällä. Ainoastaan nostotapauksessa A1 jännitykset ylittivät turvallisuuskertoimella lasketun sallitun myötörajan. Nostotapauksen A1 jännityspiikkejä pystytään selittämään teoreettisesti. Maksimijännityspiikit osuivat loven kohdalle, jossa ensimmäisen kuormituskerran jälkeen tapahtuu myötäämistä ja jännitykset jakautuvat uudelleen. Kuormituksen ollessa staattista on myös tyypillistä, että sen vaihtelu on hyvin pientä tarkasteluajanjaksolla. Koska kyseessä oli pienet paikalliset jännityspiikit, tarkempaa paikallistarkastelua ei tarvita. (Logan et al., 2012, Mac Donald 2011.)

Lommahdusanalyysin ensimmäinen tapaus on kriittinen, kun lommahdusherkkyyden raja-arvona pidetään 2:sta. Kriittisin alue lommahdukselle on takaseinän levy, jota vahvistettiin ja sen paksuudeksi tuli 4 mm. Ensimmäisiin tuloksiin haettiin tukea myös analyytisesti, josta enemmän seuraavassa luvussa. Yleisesti voidaan todeta, että ohutlevyrakenne ilman lämpökuormaa näyttää kestävä, mutta siitä huolimatta tuloksiin on syytä suhtautua kriitti-

sesti. Seuraavassa tuotekehitysvaiheessa on syytä kyseenalaistaa valitut materiaalit ja ainepaksuudet silläkin uhalla, että painonsäästöä ei synny. Rungon todellista käyttäytymistä on tarkasteltava kriittisesti, johon asiakkaan omilla referensseillä voi olla mittava vaikutus. Hiljaisella, eli käytännön kokemuksen kautta syntyneellä tiedolla voidaan ennakoida rungon todellista käyttäytymistä, ja välttää sellaisia tapahtumia, joissa runko menettää lujuutensa.

6.2 Numeeristen ja analyttisten tulosten vertailu

Käsinlaskenta otti kantaa siihen, mikä on todellinen sallittu jännitys rakenteessa, jotta tehollinen levykentän alue pystyy kantamaan kuorman levyn lommahtaessa. Lähestymistapoja oli kaksi ja niiden tulokset olivat lähellä toisiaan. Ensimmäisessä tapauksessa laskenta otti kantaa ainoastaan analyttiseen tarkasteluun ja toisessa tapauksessa oli mukana Ansys-käytännöstä saadut arvot. Toinen tarkastelutapaus oli kriittisempi, sillä siinä todellinen sallittu jännitys levyllä oli ~ 38 MPa. Tämä johtuu siitä, että Ansys ottaa huomioon laskennassa kiinnityskohtien ja rakenteessa olevien geometriakohtien käyttäytymisen ja muodostaa niiden pohjalta tarkemmat tulokset. Tuloksia tukee myös teoreettinen tutkimustieto, jossa on analysoitu tutkittuja, laboratoriokokein saatuja puristuslujuuksia. Kokeet perustuvat todellisiin tilanteisiin, jossa levykenttään kohdistuu lisäksi esimerkiksi hitsauksesta tulevat jännitys- ja muodonmuutostilat. (Niemi 2003.)

Vaikka pahimmassa lommahdustapauksessa lommahduskerroin oli alle 2 (kuvassa 18), se saattaa silti kestää, jos sallittu jännitys pysyy alle 38 MPa. On kuitenkin otettava huomioon jännityksen arvo, joka on melko pieni. Täytyy miettiä, halutaanko levyn lommahtavan, vaikka sen tehollinen alue kestäisi kuormaa ja lisäksi sallittu jännitys on hyvin pieni. Ratkaisuina voi olla levyn paksuuden kasvattaminen 2 mm:llä, jolloin lommahduskerroin kasvaa yli 2 ja todellinen sallittu jännitys nousee samalla. Tämän ratkaisun voidaan todeta olevan hyvä hyötyihin ja haittoihin nähden, sillä se tuo mukanaan muitakin etuja lujuuden kannalta, ja sillä on vähäinen vaikutus kokonaispainoon.

Pienennystekijöiden ero on näissä kahdessa laskentatapauksessa noin 14 MPa, joka on suhteellisen pieni vertailtaessa sitä esimerkiksi myötölujuuteen. Saadut sallitut jännitykset ovat noin 10 % myötölujuuden arvosta, joka tukee myös levynpaksuuden kasvattamista raken-

teessa. Numeeriset ja analyttiset olivat suhteellisen lähellä toisiaan, eli tästä voidaan päätellä, että tulokset olivat luotettavia.

Voidaan siis todeta, että laskentaan otettavilla lähtötiedoilla on vaikutusta lopputulokseen myös käsinlaskennassa. On kuitenkin hyvä kyseenalaistaa myös numeerisen laskennan tuloksia, kun pohditaan niiden luotettavuutta. Myös numeerisen tulosten osalta on mahdollista, ettei malli ei kykene kuvaamaan kaikkia rakenteeseen kohdistuvia rasituksia ja muodonmuutostiloja. Kuormien kohdalla syy voi olla jaettujen kuormien oikeellisuus tai reunaehtoien määrittäminen väärällä tavalla. On hyvä myös suhtautua kriittisesti geometrian, materiaalin, sekä analyysityypin valintaan. Laskentaan voi vaikuttaa myös tekijän kokemus, ja tämän takia työn toistettavuus ja kriittinen tarkastelu toisen laskijan toimesta on kannattavaa, jos halutaan minimoida riskit.

6.3 Vertailu kirjallisuuteen

Kirjallisuuskatsauksen perusteella voidaan todeta, että lämpölaajenemisella on suuri merkitys rakenneosissa. Tämän takia lämpölaajenemisen vaikutus tulee aina ottaa huomioon rakenteiden suunnittelussa. Hyviä suunnittelun lähtökohtia ovat joustavat liittimet tai rakenne, joka saa vapaasti elää ainakin toiseen suuntaan.

Lämpötilan vaikutuksesta myös siirtymät olivat suhteellisen suuria, mutta niistä osa on selitettävissä lämpölaajenemisella. Seuraavassa taulukossa 3 on näytetty rungon lämpölaajeneminen jokaisen koordinaatin kohdalla 200 °C ja 400 °C asteissa.

Taulukko 3. Sallittu lämpölaajeneminen.

Sallittu lämpölaajeneminen					
kuivaimen päämitat		lämpötilat			
koordinaatti	[mm]	maksimi	minimi	ΔT	lämpöpiteneimis-kerroin, α
z	2293	400	64	336	0,000012
y	1077	200	60	140	
x	6236				
TAPAUS1, 200 °C		TAPAUS2, 400 °C			
z	3,9		z	9,2	
y	1,8		y	4,3	
x	10,5		x	25,1	

Taulukon 3 lämpölaajenemiset on johdettu kaavasta 1, jossa tapauksien välinen ero on huomattava. Lämpötilan tuplaantuessa saman ilmiön voi huomata myös lämpöpiteneemisessä. Lämpöpiteneemiskerroin on yleisesti teräksillä käytettävä arvo, joka on selvitetty eri kirjallisuuslähteistä.

Tapauksissa, jossa tulokset olivat kriittisiä, tutkittiin materiaalipaksuuden kasvattamista. Sillä ei kuitenkaan todettu saavutettavan merkittävää hyötyä haittoihin nähden. Materiaalin kasvattamisella pystyttiin pienentämään jännityksiä, mutta esimerkiksi lämpökuorman alaisuudessa runkoon kohdistui niin suuria jännityksiä, ettei ainevahvuuden lisäämisestä ollut merkittävää hyötyä. Painoa rakeenteelle kertyi kuitenkin todella nopeasti, kun isojen levykenttien ainevahvuutta kasvatetaan 50%. Kirjallisuudessa aihetta on tutkittu lähinnä hitsauksen yhteydessä, jossa nopeasti kasvava lämpö tunkeutuu rakenteisiin. Vaikka tilanne ei täysin vastaa tätä tutkimusta, voidaan siitä kuitenkin tehdä oletuksia korkeiden lämpötilojen vaikutuksesta materiaalin mikrorakenteeseen. Tietyt seosaineet muuttavat teräksen mikrorakennetta, jolla pystytään saamaan etuja materiaaleille korkeissa lämpötiloissa. Materiaalivalinta on kuitenkin yksi jatkotutkimusaihe, jota käsitellään seuraavassa luvussa.

Tutkituissa lämpötiloissa ei tapahdu vielä selvää virumista, josta olisi haittaa rakenteelle. Materiaalin plastisoitumista tulisi käyttää hyödyksi sellaisissa osissa, jotka eivät ole kantavia. Tämä tarkoittaa sitä, että sisälevyjen tehtävä on ennen kaikkea suojata kantavaa osaa ja elää sen mukana, mutta ei rikkoa tai häiritä rungon toimintakykyä. Tästä syystä plastiset muodonmuutokset ovat hyväksyttäviä, jolloin voidaan käyttää edullisia materiaaleja niissä paikoissa joissa rakenteelta ei vaadita lujuutta.

6.3.1 Jatkotutkimusaiheet

Tässä työssä selvitettiin ja ymmärrettiin lämpökuorman hallitseva vaikutus runkoon yhdessä kuorman kanssa. Tämän takia runko halutaan kokonaan pois lämpökuormituksen alaisuudesta, mutta sen toteutustapa vaatii suurta työtä, joka toimii hyvänä jatkotutkimusaiheena. Jatkotutkimuksena voisi pohtia, onko kantavan rakenteen lämpökuormituksen poistaminen ainoa vaihtoehto, ja millä muilla keinoin lämmön siirtyminen rakenteesta toiseen saadaan tehokkaasti ja edullisesti estettyä. Materiaalivalinnoilla, lisäjähdytyksen tarpeella ja geometriamuutoksilla olisi mahdollista laskea tai kokonaan poistaa lämpö niiltä rakenteilta, joilta vaaditaan lujuutta ja kantavuutta.

Kuormaan voidaan vaikuttaa myös painon säästöllä, joka yhdessä lämmön kanssa kuormittaa rakennetta. Yksi mahdollinen jatkotutkimusaihe voisi olla keskittyä rakenteen sisäosaan, johon tämä työ ei ottanut ollenkaan kantaa. Kanavakoon pienennyksillä tai kokonaan poistamisella saadaan painohyötyjä, ja niiden tilalle voisi tuoda runkoon kevyemmän lisäjähdytyksen. Sisärakenteen uudelleen suunnittelulla voidaan saavuttaa myös tilansäästö, jolloin koko tuotteesta saadaan pienempi. Pienemmästä rakenteesta saadaan logistisia hyötyjä ja se vaatisi myös vähemmän tilaa linjastossa.

Yksi varteenotettava vaihtoehto on hyödyntää epälineaarista rakenneanalyysiä. Voisi pohdita, pitäisikö malli laskea epälineaarisesti lämpökuormien kanssa, kun suuret siirtymät (enemmän kuin puolet levyn paksuudesta) ja kalvojäännitys vaikuttavat levyosissa. Voidaan myös miettiä, olisiko epälineaarisuus perusteltua, jos levyysiin kohdistuu suoraa painetta. Rakenteen ollessa lämpökuormitettuna siihen kohdistui suuria paikallisia jännityksiä, jolloin niiden epäjatkuvuudet on syytä tarkistaa ja yksinkertaistaa epälineaarisisessa mallissa, jotta analyysi saadaan ajettua läpi. (Logan et al., 2012, Mac Donald 2011.)

Materiaalivalinnat olisi myös syytä tarkastella korkeissa eli yli 500 °C asteen lämpötiloissa. Monessa kirjallisuuslähteessä kehoitetaan vaihtamaan rakenneteräs kuumalujiin teräksiin. Tämä ei kuitenkaan ole kustannusten kannalta kovin edullinen vaihtoehto. Paloturvallisuus standardi antaa myötölujuudelle ja kimmokertoimelle varmuuslukuja, mutta ne eivät vastaa tutkimuksen todellista tilannetta, kun rakenne on pitkäaikaisen ja tasaisen lämpökuorman vaikutuksen alaisena. Palomitoitukset on annettu tilanteisiin, joissa lämpö nousee ajan suhteen ja määrittää rakenteen vastetta lämpökuormituksessa. Olisi siis syytä selvittää sellaisen lämpötilan raja, missä normaaliteräs esim. S355 kestää tasaista lämpökuormaa ja mikä on hyväksyttävä myötölujuuden arvo siihen kohdistuvilla jännityksillä.

6.4 Mahdollinen virheetanta

Vaikka tuloksien luotettavuuteen vaikuttaa vahvasti eri menetelmien käyttö, on syytä tarkastella ja poissulkea myös niitä asioita, jotka vaikuttavat tuloksien vääristymiseen. Analysointimallin onnistumiseen vaikuttaa monen tekijän summa, jossa yhtenä päätekijänä on mallintaja itse.

Luvussa 2.2.3 Tutkimusmenetelmät ja rajaukset käsiteltiin mallinnuksen sovellusalueita, joiden perusteella pyritään vastaamaan peruskysymyksiin. Peruskysymyksiin vastaamisen kannalta on oleellista, että käyttäjä hallitsee teorian-, ohjelman-, elementtimenetelmän ja reunaehtojen rajoitteet. Analysointimalli pyritään yksinkertaistamaan luomalla hypoteeseja, joiden rajoitusten tunteminen on hyvin oleellista yksinkertaistamisen onnistumiselle. Elementtityypin valitseminen vaatii ymmärrystä niiden sovelluseroista sekä rajoitteita.

FEM-analyysin aikana syntyviä ongelmia ja niiden ratkaisuja tulee myös tuntea, koska välillä ajo saattaa mennä läpi mutta tulokset eivät ole oikein. Niin kutsuttuja turvallisia ongelmia syntyy, kun ajo keskeytyy kokonaan esimerkiksi materiaalivakioiden puutteen vuoksi, elementtiverkko ei ole yhtenäinen, tuenta on riittämätön tai rakenteen osa on menettänyt stabiiliuden. Edellä mainitut johtavat ajon keskeytymiseen, joten käyttäjä ei voi jatkaa tuloksien tulkintaa ilman, että nämä turvalliset ongelmat on ratkaistu.

Suurempi riski on sellaisilla ongelmilla, jotka antavat suorittaa ajon loppuun, mutta vääristävät tuloksia merkittävästi. Tuloksien tarkastamisessa on syytä kyseenalaistaa elementtityyppi, yksiköt, reunaehdot ja kuormitukset. Mallin geometria on hyvä tarkastaa apuohjelmalla ja miettiä onko laskennan luonne pysynyt haluttuna. Haluttu lineaarinen laskenta voi muuttua esimerkiksi geometriasta tai materiaalivalinnasta johtuvista syistä. (Logan et al., 2012, Mac Donald 2011.)

Numeerisessa laskennassa saattaa myös esiintyä laskentavirhettä. Hyvänä esimerkkinä ketjureaktio, joka tapahtuu elementtimenetelmän ratkaisussa. Kun siirtymät on ratkaistu, jännitykset lasketaan siirtymistä derivoimalla. Näin ollen, jos siirtymissä on virhettä, se kertaantuu jännityksiin. (Logan et al., 2012, Mac Donald 2011.)

6.5 Johtopäätökset

Työn ensimmäisenä tavoitteena oli tutkia, miten ohutlevyrakenne kestää staattista kuormitusta rungossa. Ensimmäisen iteraation tuloksien perusteella tehtiin pieniä rakennemuutoksia, kuten materiaalipaksuuden kasvattaminen ja jäykisteiden lisääminen. Huomattiin, että valittujen jäykisteiden toimivien lattarautojen vapaat reunat oli poistettava lommahdusriskin takia. Kaikkien rakenteen jäykisteiden vapaat reunat taivutettiin, jonka avulla ne saatiin kestämään lommahtamatta. Rakenteen geometrinen jatkuvuus varmisti globaalin lujuuden

rungolle, jonka avulla tuotteen koon kasvattaminen on tulevaisuudessa mahdollista. Paino pysyi rungossa lähes samana vanhaan malliin verrattuna, mutta rungon kestävyys parani. Tämä johtuu siitä, että edellinen tuotekehitysmalli oli suunniteltu kestäväksi vain yhdensuuntaisen asennon linjastossa. Uuteen malliin on lisätty alapalkki ja jatkuva kehikkorakenne, jotka jakavat runkoon kohdistuvaa kuormaa tasaisemmin.

Runkoon ei kohdistu iskumaisia kuormia, eikä niiden suuruus vaihtelee ajan mukaan. Näin ollen kuormituksen luonne on staattista, ilman lämpökuorman vaikutusta. Tuloksien perusteella runko kestää siihen kohdistuvaa staattista kuormitusta ja se kantaa itsensä ohutlevyrakenteena eri nosto- ja työasunnoissa. Oletuksena nostoissa pidetään kuitenkin sitä, ettei runkoon saa kohdistua voimakkaita rasitusta, kuten liikkumista tai törmäyksiä.

Toisena tavoitteena työssä oli tutkia rakenteen käyttäytymistä lämpökuormassa. Rakenteelle määritettiin eri sisä- ja ulkolämpötilat, jotta eristeen vaikutus tulee otettua huomioon. Rakenteeseen kohdistuvasta lämpötilasta johtuvat jännitykset olivat suuria, eikä ne pysyneet sallittujen jännitysarvojen sisäpuolella. Lämpökuormalle altis rakenne on alttiimpi muiden kuormitusten vaikutuksille, jonka takia levyysiin syntyy herkemmin pysyviä muodonmuutoksia. Sisälevyissä tapahtuvat muodonmuutokset voidaan kuitenkin sallia, jos se ei riko kantavia rakenneosia tai häiritse tuotteen työtoimintoja. Ratkaisuna ehdotetaan kelluvaa sisärakennetta, jonka kiinnitys suunnitellaan niin että se sallii sisälevyn liikkumisen. Kelluva sisärakenne hidastaa lämmön siirtymistä kantaviin ulkorakenteisiin. Lisäksi rakenneosien väliin on mahdollista tuoda huoneenlämpöistä kiertoilmaa lisäjähdytystä varten.

Tutkimuksen kolmantena tavoitteena oli tutkia ohutlevyrakenteisiin kohdistuvaa lommahdusriskiä. Tapauksessa, jossa rakenne oli 90 asteen asennossa (tapaus 3) havaittiin suurin lommahdusriski. Varmoja lommahduksia esiintyi rakenteen takaseinän levyssä, jotka korjattiin kasvattamalla levyn paksuutta 2 mm:llä. Muiden levykenttien jännevälit pystyttiin arviomaan oikein jo suunnitteluvaiheessa.

Tutkimuksella pystytään osoittamaan, että kuivatuslaite voidaan tehdä ohutlevyrakenteesta, mutta luvussa 6.3.1 esitettiin monia tarvittavia jatkotutkimuksia, joita rakenne vielä vaatii ennen sen käyttöönottoa. Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin laskennan ja suunnittelun aikana syntyviä mahdollisia virheitä, joita pystytään tunnistamaan tulevaisuudessa paremmin. Sekä poissuljettiin joitakin geometrisia ratkaisuja, joiden takia rakenteelle ei saatu tarvitta-

vaa lujuutta. Laskennan osalta pystyttiin tunnistamaan ohutlevyrakenteeseen kohdistuvia kriittisimpiä kuormitustapauksia, joiden tunteminen on tuotteen jatkokehityksen kannalta hyvin tärkeää.

7 Yhteenveto

Tutkimuksen tavoitteena oli suunnitella kuivatuslaitteen runko ohutlevyrakenteesta. Rakenne haluttiin kevyeksi ja kestäväksi eri työ ja nostoasunnoissa kustannustehokkaalla tavalla. Rungon tulisi kestää eri nostotapauksia sekä työasentoja. Sen lisäksi runkoa kuormittaa pitkäaikainen korkea lämpötila. Tutkimuksella pyrittiin rungon painonsäästöön, lujuuteen ja kustannustehokkuuteen valmistuksen kannalta.

Tutkimusmenetelmiksi valittiin numeerinen- ja analyttinen laskenta, joita tuettiin kirjallisuuden avulla. Numeerisen laskennan avulla pyrittiin saamaan kokonaiskuva rungon käyttäytymisestä eri kuormitustapauksilla. Laskentatapauksia tuli monta, koska kriittisimmät nostotapaukset ja työasennot luotiin erikseen. Lisäksi lämpötila määritettiin eri ajanhetkiin, mutta laskenta toteutettiin myös ilman lämpökuorman vaikutusta. Tapauksia luotiin yhteensä 11 kappaletta, jotka kertoutuivat monilla eri variaatioilla, kun tutkittiin tiettyjä osia rakenteesta. Tuloksista haluttiin selvittää runkoon kohdistuvia jännitys- ja muodonmuutos-tiloja sallittujen raja-arvojen avulla. Ohutlevyyn kohdistuvaa lommahdusriskiä tutkittiin lommahdusanalyysillä. Kriittisintä tapausta lommahdusanalyysistä tuettiin analyttisillä lausekkeilla, jotta voidaan olla varmoja tulosten luotettavuudesta. Analyttinen tarkastelu tehtiin normaalijännitysten aiheuttamista levyn lommahdusvaikutuksista, standardin avulla. Korkeille lämpötiloille haettiin tietoa kirjallisuudesta, jossa lämpölaajenemista laskettiin analyttisesti.

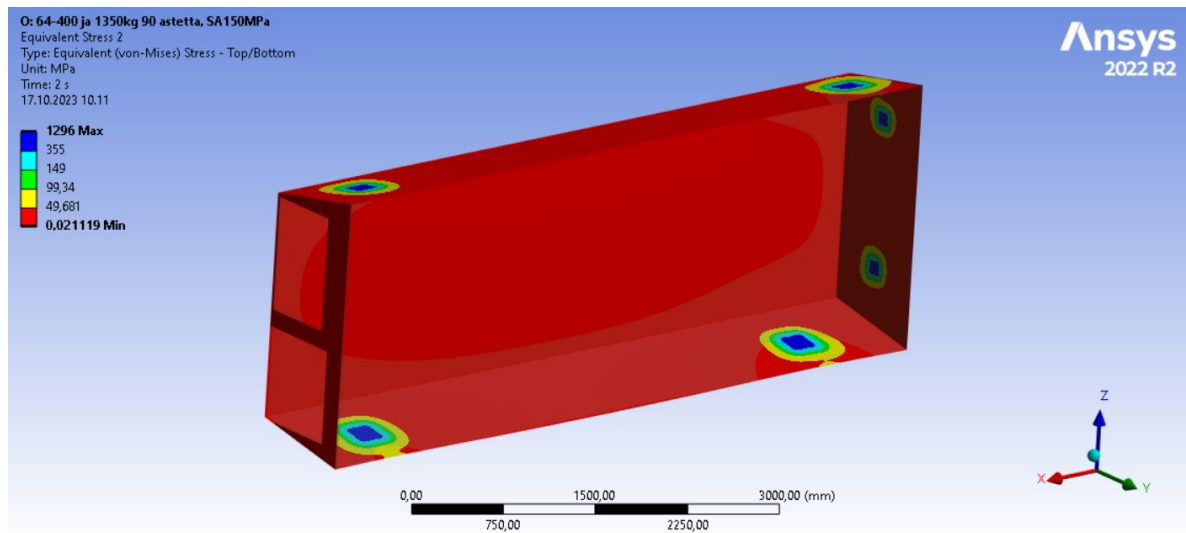
Nostotapauksista ja työasunnoista runkoon kohdistui lommahdusriskejä, jotka korjattiin geometriamuutoksilla. Globaalirakenne kestää kuormitukset edellä mainituilla muutoksilla, joissa paikallistarkastelua ei enää tarvittu. Kun tapaukseen lisättiin lämpökuorma, jännitykset olivat suuria ja jakautuivat tasaisesti runkoon. Levypaksuuden kasvattamisesta ei saatu toivottuja tuloksia jännityksiin, ainoastaan koko rakenteen kokonaispaino kasvoi. Tuotekehitys sai toivottuja tuloksia ilman korkeita lämpötiloja, mutta jatkotutkimusta vaaditaan lämpökuorman, materiaalivalintojen, sekä rungon geometrisen uudelleen sijoittelun ja kiinnityskohtien osalta.

Lähteet

- Airila, M. 1995. Koneenosien suunnittelu. Porvoo: WSOY. 796 s.
- Allen, H.G. and Bulson, P.S. 1980. Background to buckling. London: McGraw-Hill. 582 s.
- Eskelinen, H. and Karsikas, S. 2014. Tutkimusmetodiikan perusteet. 1 edn. Tampere: Amk-kustannusTammertekniikka. 224 s.
- Jones, D.R.H. and Ashby, M.F. 2019. Engineering materials. 1, an introduction to properties, applications and design. Oxford: Elsevier. 559 s.
- Koivisto, K. 2008. Konetekniikan materiaalioppi. 12 edn. Helsinki: Edita. 341 s.
- Llewellyn, D.T. ja Hudd, R.C. 1998. Steels metallurgy and applications. 3 edn. Oxford [England]: Butterworth-Heinemann. 28 s.
- Logan, D.L. ja Chaudhry, K.K. 2012. A first course in finite element method. 5 edn. Stamford [CT]: Cengage Learning. 925 s.
- Mac Donald, B.J. 2011. Practical stress analysis with finite elements. 2 edn. Dublin: Glasnevin. 388 s.
- Niemi, E. 2003. Levyrakenteiden suunnittelu. Helsinki: Teknologiainfo Teknova. 136 s.
- Outinen, H. ja Salmi, T. 2004. Lujuusopin perusteet. Tampere: Pressus. 464 s.
- Pennala, E. 2000. Lujuusopin perusteet. 10 edn. Espoo: Otatieto. 400 s.
- SFS-EN 1990 + A1 + AC. 2010. Eurokoodi. Rakenteiden suunnitteluperusteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 185 s.
- SFS-EN 1993-1-5. 2007. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-5: Tasomaiset levyrakenteet. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 58 s.
- SFS-EN 1993-1-2. 2006. Eurokoodi 3: Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-2: Yleiset säännöt. Rakenteen palomitoitus. Helsinki: Suomen Standardisoimisliitto. 76 s.

Zienkiewicz, O.C., Taylor, R.L., L. Zhu, J.Z. ja Zeinkiewicz, O.C. 2005. The finite element method its basis and fundamentals. 6 edn. Amsterdam: Elsevier Butterworth-Heinemann. 753 s.

Liite 1. Lämpökuorma 400 °C astetta ja jännitysjaakauma.



Liite 2. Käsinlaskenta: Normaalijännitysten aiheuttamat levyn lommahdusvaikutukset (SFS-EN 1993-1-5: 2007, 13-17).

$a := 760$	$b := 2292$	$t := 2$	Tutkittavan levyn mitat 760*2292*2
$f_y := 355\text{MPa}$			Myötölujuus
$E := 210\text{GPa}$	$\nu := 0.3$		Teräs
$\sigma_1 := 6.091\text{MPa}$			
$\sigma_2 := 6.255\text{MPa}$			Punistusjännitykset
$\psi := \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = 1.027$			Jännityssuhde
$k\sigma := 2 + \left(\frac{b}{a}\right)^2 + \left(\frac{a}{b}\right)^2 = 11.205$			Lommahduskerroin
$\sigma_{cr} := k\sigma \cdot \left[\frac{\pi^2 E}{12(1-\nu^2)} \right] \cdot \left[\left(\frac{t}{b}\right)^2 \right]$			Lommahdusjännitys
$\lambda_p := \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 14.806$	$\lambda > 0,673$	JA $3 + \psi = 4.027$	Muunnettu hoikkuus tapaus 1.
$\rho := \frac{\lambda_p - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{\lambda_p^2} = 0.067$	$\lambda \leq 1,0$		Pienennystekijä tapaus 1.
$A_c := 760\text{mm} \cdot 2292\text{mm} = 1.742\text{m}^2$			Bruttopinta - ala
$A_{eff} := \rho \cdot A_c = 0.116\text{m}^2$			Tehollinen pinta-ala
$f_y \cdot \rho = 23.618\text{MPa}$			Sallittu jännitys tapaus 1.
$\lambda_{p1} := \sqrt{\frac{f_y}{4.2\text{MPa}}} = 9.194$			Muunnettu hoikkuus tapaus 2.
$\rho_1 := \frac{\lambda_{p1} - 0.055 \cdot (3 + \psi)}{(\lambda_{p1})^2} = 0.106$			Pienennystekijä tapaus 2.
$f_y \cdot \rho_1 = 37.683\text{MPa}$			Sallittu jännitys tapaus 2.