LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
LUT Kone
BK10A0402 Kandidaatintyö

VAIPPALEVYJEN KULJETTAMISEEN KÄYTETTÄVÄN TUEN SUUNNITTELU MUUNNELTAVAKSI JA UUDELLEENKÄYTETTÄVÄKSI

DESIGNING A STEEL SUPPORT STRUCTURE TO BE REUSABLE AND MODIFIABLE FOR TRANSPORTING STEEL SHEETS

Lappeenrannassa 26.11.2018

Janne Parviainen
Tarkastaja DI Heli Mettänen
Ohjaaja DI Antti Ahola

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT Energiajärjestelmät
LUT Kone

Janne Parviainen

Vaippalevyjen kuljettamiseen käytettävän tuen suunnittelu muunneltavaksi ja uudelleenkäytettäväksi

Kandidaatintyö

2018

32 sivua, 20 kuvaa ja 1 liite

Tarkastaja: DI Heli Mettänen

Ohjaaja: DI Antti Ahola

Hakusanat: Staattinen mitoitus, teräsrakenne, uudelleenkäytettävyys, FE-laskenta

Tämän kandidaatintyön tarkoituksena on suunnitella Viafin Terästorni Oy:n käyttöön teräksisten vaippalevyjen kuljetuslaatikko tai vastaava rakenne. Tämän työn tavoitteena on suunnitella rakenne, joka voidaan palauttaa yrityksen haltuun ja käyttää uudelleen, sekä rakenne jonka koko olisi säädettävissä kuljetettavan levykoon mukaan. Rakenne on tarkoitus valmistaa suurlujuusteräksestä ja se voidaan valmistaa joko teräslevyistä tai palkeista.

Suunnittelutyö aloitettiin hahmottelemalla niin palkki kuin levyrakenteita. Erilaiset suunnitelmat esiteltiin yrityksen edustajille, jotka valitsivat parhaat suunnitelmat jatkokehitystä varten. Alustavasti valittiin yksi palkkiratkaisu ja yksi levyistä valmistettava ratkaisu. Molemmista vaihtoehdoista tehtiin tarkat 3D-mallit joiden avulla niiden muoto alkoi selventyä. Säädettävyys toteutettiin erilaisin teleskooppiratkaisuin sekä vaihtamalla eri pituisia palkkeja tai levyjä tilanteen mukaan. Toiveena oli, että takaisinkuljetusta varten rakenteet voitaisiin purkaa ja taittaa mahdollisimman pieneen tilaan, jotta kuljettaminen takaisin olisi järkevää. Tarkempi suunnitelma levy ja palkkiratkaisusta esiteltiin jälleen yrityksen edustajille ja palkkiratkaisu valittiin lopullista tarkkaa mitoitusta varten.

Rakenteen mitoitus aloitettiin selvittämällä analyyttista laskentaa hyödyntäen vaadittavat palkkikoot. Palkkikokojen valinnassa oli tärkeää säilyttää mahdollisuus teleskooppirakenteisiin. Palkkikokojen valinnan jälkeen tarkat yksityiskohdat, kuten hitsit ja nostokorvakkeet mitoitettiin ja lisättiin 3D-malliin. Tämän jälkeen rakenteen kestävyys varmistettiin FEM-analyysiä apuna käyttäen.

Työssä onnistuttiin kehittämään uudenlainen ratkaisu yrityksen käyttöön.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
LUT School of Energy Systems
LUT Mechanical Engineering

Janne Parviainen

Designing a steel support structure to be reusable and modifiable for transporting steel sheets

Bachelor's thesis

2018

32 pages, 20 figures and 1 appendix

Examiner: M. Sc. (Tech.) Heli Mettänen

Supervisor: M. Sc. (Tech.) Antti Ahola

Keywords: Static design, steel structure, reusability, transportation, FEM calculation

The purpose of this bachelor's thesis was to design a transportation crate for steel plates to be used by the company Viafin Terästorni Oy. The company now uses a dispensable transportation box and the aim of this thesis was to design a structure which was both reusable and the size could be modified based on the size of the plates being transported. Structure is to be made of high-strength structural steel and it can be manufactured of either steel plates or steel beams.

Design work began by drawing sketches of both plate and beam solutions. The different designs were then presented to representatives of the company who chose the best solutions for further development. Initially two designs were chosen; a structure made of steel plates and structure made of steel beams. 3D-models were compiled of both of these structures. The ability to modify the size of the structure was accomplished by using telescopic structures with beams that were able to slide within one another and by changing to longer beams or plates accordingly. For reusability it was important to make sure that the size of the structure could be made small enough that transporting it back to the factory was sensible. In order to do that the structures could be taken apart or folded into as small as possible. After both of the structures were modelled they were again shown to the company's representatives who made the choice for the final design.

Analytical calculation was used initially to find the correct sized beams to withstand the applied forces. It was important when choosing beams that the telescoping ability remained. After calculating the beam sizes, smaller details were also designed, such as the lifting brackets and welds. The finished model was then modelled accurately into a 3D-model and then finally checked using FEM-analysis.

In this thesis a completely new design and structure were developed for the company's use.

ALKUSANAT

Haluan työssäni kiittää erityisesti Viafin Terästorni Oy:tä ja Antti Matikaista erittäin käytännönläheisestä työstä. Työ tarjosi erinomaisen mahdollisuuden siirtää opitut teoriat käytäntöön ja oppia suunnitteluprosessista ja siihen liittyvistä asioista. Haluan ehdottomasti kiittää myös työn ohjaajia Heli Mettästä sekä Antti Aholaa ammattitaitoisesta ohjauksesta ja monista ongelmatilanteissa opastamisista.

Janne Parviainen

Janne Parviainen
Lappeenrannassa 26.11.2018

SISÄLLYSLUETTELO

TIIVISTELMÄ
ABSTRACT
ALKUSANAT
SISÄLLYSLUETTELO
SYMBOLILUETTELO
1 JOHDANTO ... 8
2 RAKENTEEN IDEOINTI ... 10
2.1 Kuljetettavat levyt ja lähtökohdat ... 10
2.2 Palkkirakenteita ... 10
2.2.1 L-mallinen teleskooppi ... 11
2.2.2 Kotelopalkki ... 13
2.2.3 H-palkkirunko ... 14
2.3 Levyrakenteita ... 15
2.4 Muita ideoita ... 17
2.4.1 Levyt ylösalaisin ... 17
2.4.2 Nivelmalli ... 18
3 RAKENTEEN MITOITUS ... 20
3.1 Rakenteeseen kohdistuvat kuormat ... 21
3.2 Nostokorvakkeiden mitoitus ... 23
3.3 Päädyn niveltapit ... 24
3.4 FEM-laskenta ... 24
4 TULOSTEN POHDINTA ... 28
5 JOHTOPÄÄTÖKSET ... 30
LÄHTEET ... 32

LIITTEET

Liite I: laskut numeroarvoineen

SYMBOLILUETTELO

a	Etäisyys korvakkeen reiän reunasta korvakkeen päähän [mm]
d	Nostokorvakkeiden etäisyys päätytuista [mm]
$d_{reikä}$	Nostokorvakkeen reiän halkaisija [mm]
E	Teräksen kimmomoduuli [GPa]
f_y	Materiaalin sallittu myötölujuus [MPa]
F_{levyt}	Levynipun tukeen kohdistama voima [N]
F_{nosto}	Korvakkeen kantama kuorma [N]
h	Tarkasteltavan palkin korkeus [mm]
I	Poikkileikkauksen jäyhyysmomentti [mm^4]
m_{levyt}	Levynipun mitoituksessa käytettävä kokonaismassa [kg]
$M_{maxpitk}$	Pitkittäispalkkiin kohdistuva maksimimomentti [Nm]
P_{cr}	Nurjahduskestävyys [N]
t	Nostokorvakkeen levynpaksuus [mm]
$W_{pitkittäis}$	Pitkittäispalkin vaatima taivutusvastus [mm^3]
γ_{M0}	Poikkileikkauksen kestävyyden osavarmuusluku
γ_{M2}	Liitoksen osavarmuusluku

1 JOHDANTO

Tämä työ tehtiin yhteistyössä Viafin Terästorni Oy:n kanssa. Viafin Terästorni Oy sijaitsee Lappeenrannan Muukossa ja se on erikoistunut paperi- ja selluteollisuuden säiliöiden kokonaistoimituksiin kotimaahan ja vientiin. Päätuotteita ovat sellu- ja paperiteollisuuden suuret varastosäiliöt ja painelaitteet, kuten keittimet ja reaktorit. Terästorni suunnittelee tuotteet aina tilaajan antamien lähtötietojen perusteella. Yritys vastaa rakenteiden lujuuslaskennasta, mitoituksesta, valmistuksesta, kuljetuksesta ja asennuksesta. Säiliöiden koot vaihtelevat muutamasta kymmenestä kuutiometristä aina kymmeniin tuhansiin kuutiometreihin saakka, ja ovat kokoluokaltaan maailman suurimpia. (Viafin 2017.) Tässä kandidaatintyössä tavoitteena on ideoida ja suunnitella rakenne, jolla voidaan kuljettaa säiliöiden valmistukseen tarvittavat taivutetut vaippalevyt Viafin Terästorni Oy:n tehtaalta asiakkaille ympäri maailman. Suunnittelun tavoitteena on löytää sellainen ratkaisu, jossa rakenteen koko niin pituus-, leveys- kuin korkeussuunnassakin on muunneltavissa aina kyseistä kuljetettavaa levymallia varten ja myös niin, että se on uudelleenkäytettävissä. Tutkimuskysymykset ovat seuraavat:

- Millainen rakenne sopii tavoitteisiin parhaiten?
- Millä eri tavoilla säädettävyys voidaan toteuttaa?
- Miten pieneen kokoon rakenne on purettavissa takaisinkuljetusta varten?

Kuljetettavien levyjen vaihdellessa niin leveydeltään, pituudeltaan kuin taivutussäteeltäänkin, tässä työssä suunniteltavan tuen olisi muunneltavuudellaan kyettävä vastaamaan jokaisen eri levytyypin tarpeisiin. (Matikainen, 2018a.)

Päävaatimukset suunniteltavalle rakenteelle ovat: pituus muutamasta metristä yli kymmeneen metriin, leveys noin kahdesta metristä ylöspäin, kuljetettavien levyjen taivutussäteet muutamasta metristä yli viiteen metriin ja laskennassa käytettävä massa muutamia kymmeniä tonneja. (Matikainen, 2018b) Kuljetettavat levyt eivät saa ylittää tukea päädyistä ja nostotilanne maasta lavetin päälle tapahtuu neljästä pisteestä. (Matikainen, 2018c.) Nosto todettiin kriittisimmäksi tilanteeksi ja sitä käytettiinkin pääasiallisena mitoituskriteerinä. Mitoitus tehtiin staattisena ja rajatiloiksi määriteltiin äärikestävyys sekä rakenteen stabiliteetti. (Matikainen, 2018a.)

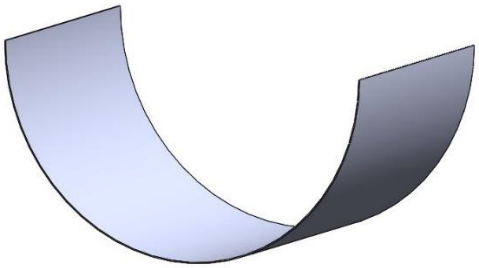
Nykyinen rakenne valmistetaan S355 rakenneteräksestä. Rakenne hitsataan vaadittavaan kokoon ja muotoon tehtaalla levyjen toimitusta varten. Uuden suunniteltavan rakenteen olisi tarkoitus olla kuljetuksen jälkeen purettavissa niin pieneksi, että sen kuljettaminen takaisin Viafin Terästorni Oy:n tiloihin olisi kannattavaa ja rakenne voitaisiin käyttää uudelleen. Tämän toteutuksessa voitaisiin hyödyntää esimerkiksi pulttiliitoksia. Työssä suunniteltu rakenne tullaan valmistamaan suurlujuusteräksestä. (Matikainen, 2018a.)

2 RAKENTEEN IDEOINTI

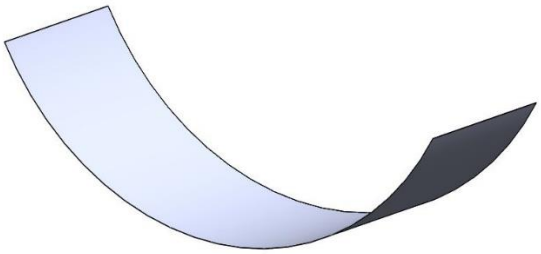
Ensitapaamisen jälkeen rakenneratkaisuja lähdettiin pohtimaan tapaamisessa esille tulleiden rajoitteiden ja vaatimusten perusteella kynää ja paperia käyttäen. Erilaisia vaihtoehtoja lähdettiin pohtimaan niin, että rakenne valmistettaisiin joko teräslevyistä, rakenneputkista tai mahdollisesti niiden yhdistelmästä. Nykyiset levyistä valmistettavat tuet ja niistä saatavilla olleet kuvat antoivat jonkin verran suuntaa sille, minkälainen lopullisen ratkaisun tulisi olla.

2.1 Kuljetettavat levyt ja lähtökohdat

Levyjen taivutussäteen vaihdellessa suuresti, samoin kuin pituuden ja leveyden, vaaditaan suunniteltavalta tuelta suurta muuntautumiskykyä. Kuvissa 1 ja 2 on esitetty havainnekuvat levyistä ja siitä kuinka eri muotoisia ne voivat olla.



Kuva 1. Pienen taivutussäteen levy



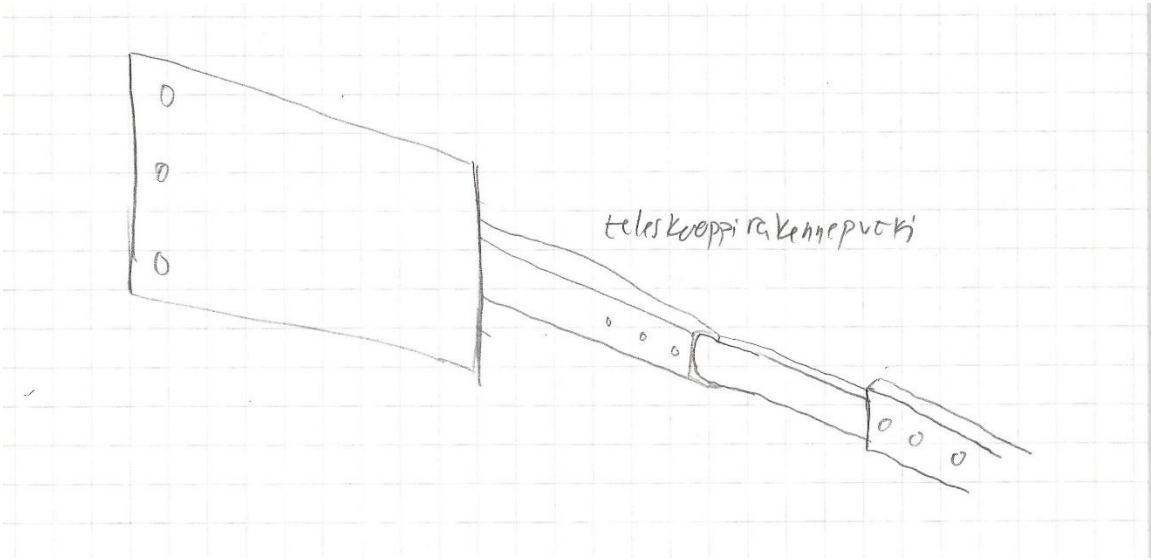
Kuva 2. Suuren taivutussäteen levy

Kuten kuvista voidaan havaita, eri taivutussäde tarkoittaa sitä, että päätytukien on pystyttävä mukautumaan kullekin levytyypille, jotta vaatimus siitä, että levyn päät eivät ylitä tukea täyttyy. Samasta syystä pituuden täytyy myös olla säädettävissä.

2.2 Palkkirakenteita

Vaadittavat pituuden ja leveyden säätömahdollisuudet olivat ensimmäinen asia, jota lähdettiin luonnostelemaan. Pituuden tuli olla säädettävissä aina 2000 mm:stä 10000 mm asti ja leveyden 2400 mm – 3500 mm. Ensimmäisenä ratkaisuvaihtoehtona oli sisäkkäisistä rakenneputkista valmistettavat teleskoopit. Tällaisen ratkaisun etuina olisi hyvä, lähes portaaton säädettävyys, helppokäyttöisyys ja isonkin rakenteen saaminen pieneen tilaan

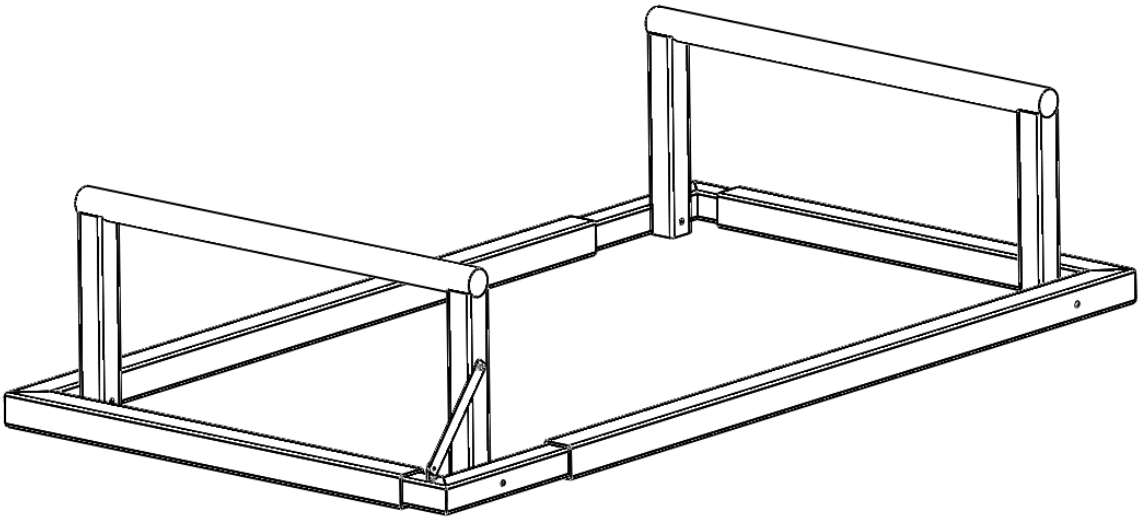
teleskooppien ollessa täysin toistensa sisällä. Tämän tyyppinen ratkaisu on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Hahmotelma teleskooppimallisesta pituuden säädöstä

2.2.1 L-mallinen teleskooppi

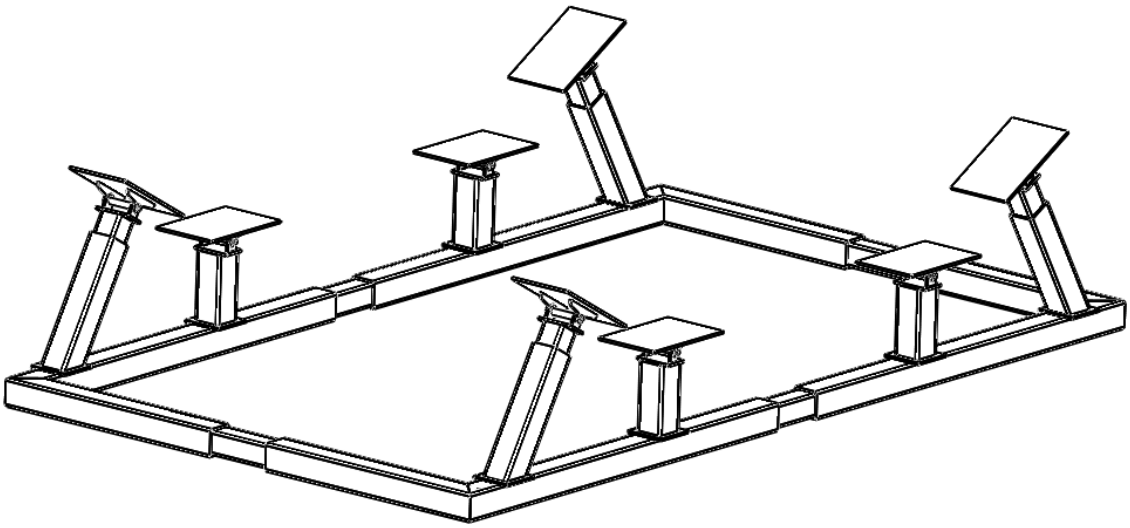
Kuvassa 3 nähtävässä ratkaisussa on hahmoteltu vain pieni osa mahdollista rakennetta teleskoopein, mutta tämä jalostui kokonaiseksi kehikoksi jossa pituuden lisäksi säädettävissä on myös leveys. Tästä on nähtävissä 3D-malli kuvassa 4.



Kuva 4. 3D-malli teleskooppi säädöllisestä tuesta

Rakenne valmistettaisiin neljästä L-mallisesta hitsatusta palkkirakenteesta, jotka teleskooppimaisesti liukuisivat toistensa sisään. Kun rakenne on säädetty haluttuihin mittoihin, voidaan se lukita pulttiliitoksin paikalleen. Palautusta varten teleskoopit voidaan joko työntää kasaan mahdollisimman pieneen kokoon, tai vaihtoehtoisesti ottaa kokonaan irti ja kasata pieneen tilaan. Levyjen tuenta tapahtuisi kahdesta päätytuesta sekä pitkittäissuuntaisista palkeista keskellä.

Vaadittavan säätövaran ollessa suuri, tämänkaltaisen rakenteen todettiin olevan hyvä lähtökohta, mutta melko vaikea toteuttaa lopulliseksi ratkaisuksi. Jatkokehityksen tuloksena saatiin kuitenkin aikaan rakenne, jossa päädyt ovat kiinteät, ja pituuden ja leveyden säätö voidaan toteuttaa vaihdettavin teleskoopein, jolloin myös pisimmät levyt voidaan kuljettaa. Tässä vaihtoehdossa myös levyjen tuentapisteitä muutettiin, ja levyt tuetaan nyt neljästä pisteestä. Tämä ratkaisu on esitetty kuvassa 5.



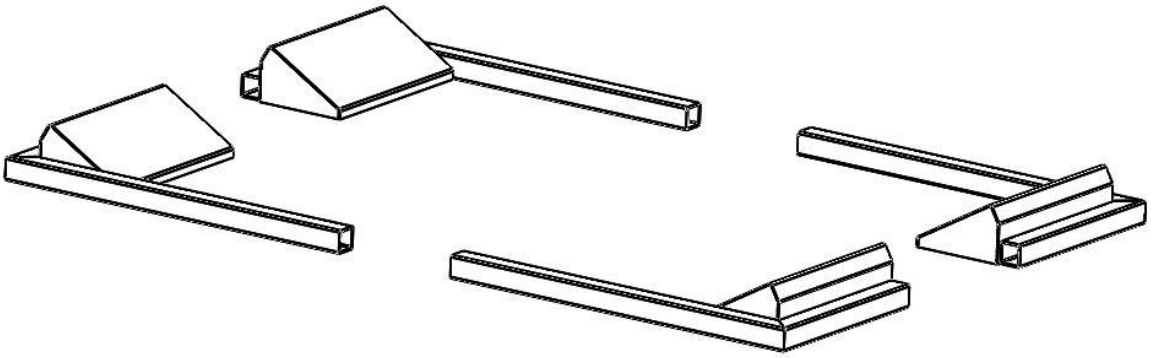
Kuva 5. Palkkimalli kiinteällä päätyratkaisulla

L-muotoiset kulmat hitsataan kulmista kuten kuvan 4 ratkaisussa, mutta nyt säätö tapahtuu keskeltä. Näin mahdollistetaan se, että säätöpalkki voidaan vaihtaa pidemmäksi siinä vaiheessa, kun säätövara loppuu. Tällä ratkaisulla on mahdollista päästä myös pisimpiin mittoihin asti.

Tuenta levyille on tässä ratkaisussa neljästä pisteestä. Nostotilannetta ajatellen se on parempi kuin aikaisemmin nähty kolmesta pisteestä tapahtuva tuenta. Myös tukipilareissa on hyödynnetty teleskooppeja, joka mahdollistaa tukipisteiden laskemisen ja nostamisen. Näiden kaikkien säätömahdollisuuksien avulla pystytään kuljettamaan jo paljon eri muotoisia levyjä. Rakenteen stabiliteetti herätti kuitenkin kysymyksiä ja sitä päätettiin vielä kehittää eteenpäin.

2.2.2 Kotelopalkki

Yhtenä vaihtoehtona tuennalle pohdittiin myös isompaa kotelopalkkimaista ratkaisua. Ajatuksena tässä oli neljä tukevaa rakennetta kaikissa neljässä kulmassa, ja edellisten tavoin sisäkkäiset rakenneputket pituuden ja leveyden säätöön. Hahmotelma tällaisesta ratkaisusta on esitetty kuvassa 6.

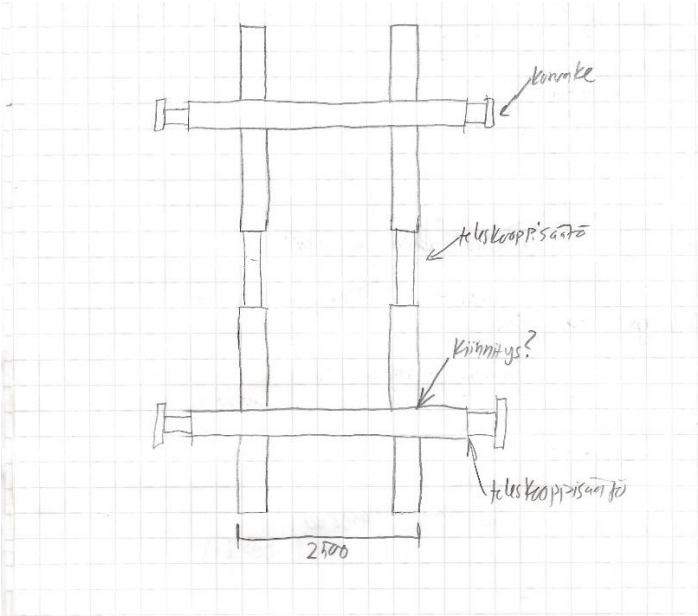


Kuva 6. Kotelomalli

Rakenne on hyvin yksinkertainen ja helposti säädettävissä. Levyt ovat tukevasti tuettuna neljästä pisteestä ja kotelot voidaan saada hyvin kestäviksi. Ongelmaksi rakenteessa muodostui tuennan korkeus. Pitkät, suurella taivutussäteellä valmistetut levyt sopivat hyvin, koska niiden tuennan ei tarvitse olla kovin korkealla. Pienen taivutussäteen levyt pitää tukea riittävältä korkeudelta, ja siinä tilanteessa koteloista tulisi todella suuret. Tästä syystä tätä rakenneratkaisua ei suunniteltu eteenpäin.

2.2.3 H-palkkirunko

Aikaisempien luonnosten perusteella yhdessä työn tilaajan kanssa saatiin rakenne, jossa runko on H-muotoinen palkisto, jossa levyjen tuenta tapahtuu kolmesta pisteestä: keskeltä palkkien päällä ja molemmista päädyistä korkeussäädettävillä rakenneputkilla. Rakenne on hahmoteltu kuvassa 7.

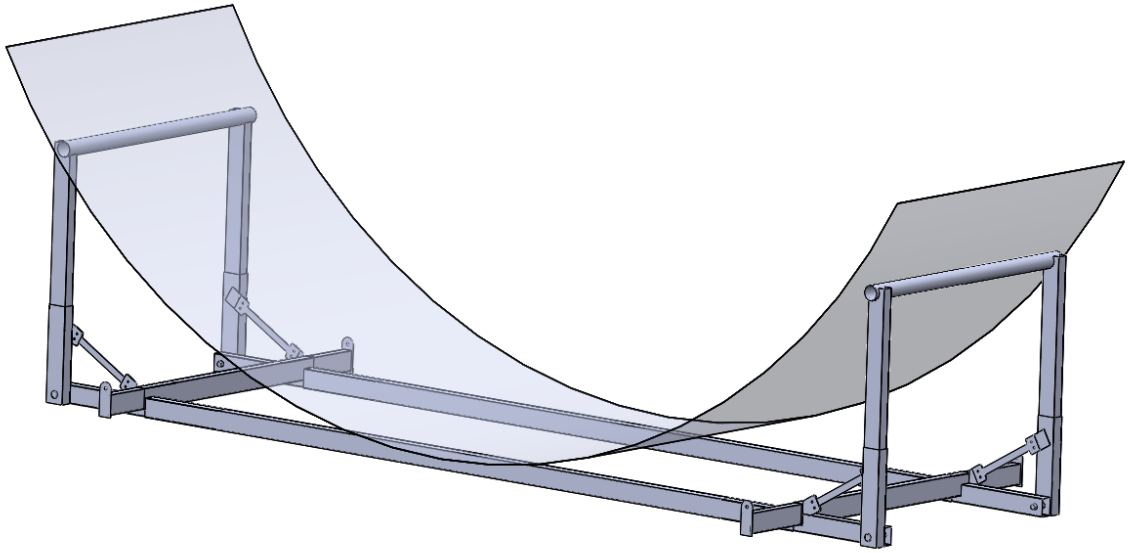


Kuva 7. H-palkkirakenne

Pitkittäissuunnassa, eli kuvassa alhaalta ylös olevat palkit ovat kiinteällä, 2,5 metrin etäisyydellä toisistaan. Valitut mitat määräytyivät kuljetuksen vaatimusten perusteella.

Pitkittäispalkkien päälle tulevilla palkeilla voidaan säätää haluttu leveys tuelle. Näiden palkkien päissä sijaitsee nostokorvakkeet, joista levynippua voidaan nostaa käsittelyn yhteydessä. Pituutta voidaan säätää pitkittäispalkkien keskellä olevista teleskooppipalkeista.

Levyjen tuenta päädyistä tapahtuu myös rakenneputkien avulla. Päätytuen korkeutta voidaan säätää teleskooppimaisilla rakenneputkilla, joiden suurin korkeus voidaan säätää n. metristä muutamaan metriin. 3D-malli rakenteesta on nähtävissä alla kuvassa 8.



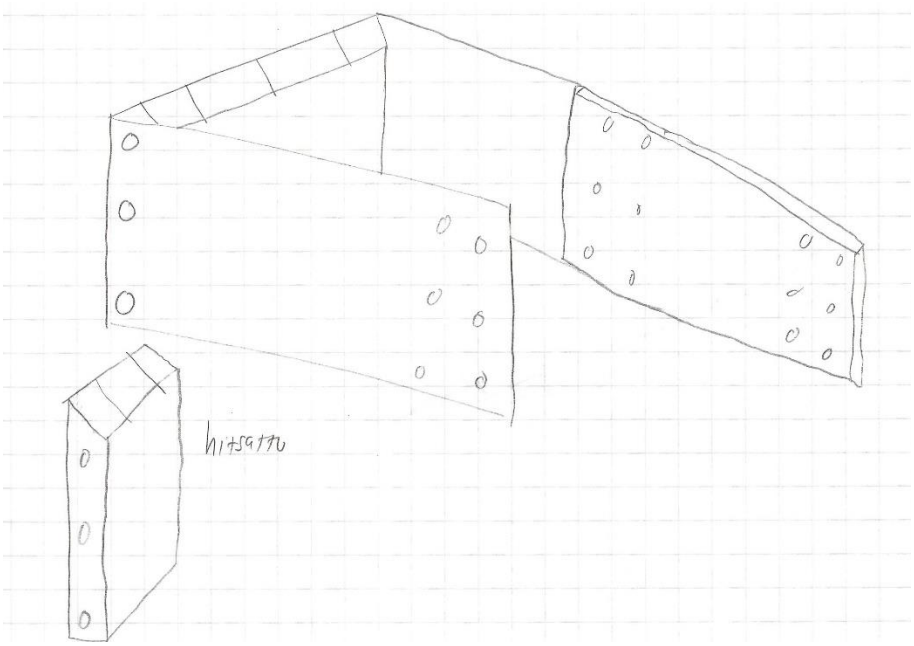
Kuva 8. 3D-malli viimeisimmästä ratkaisusta

Kuvassa 8 näkyvä ratkaisu valittiin tässä työssä lopulliseksi ratkaisuksi, jota lähdettiin tarkemmin mitoittamaan.

2.3 Levyrakenteita

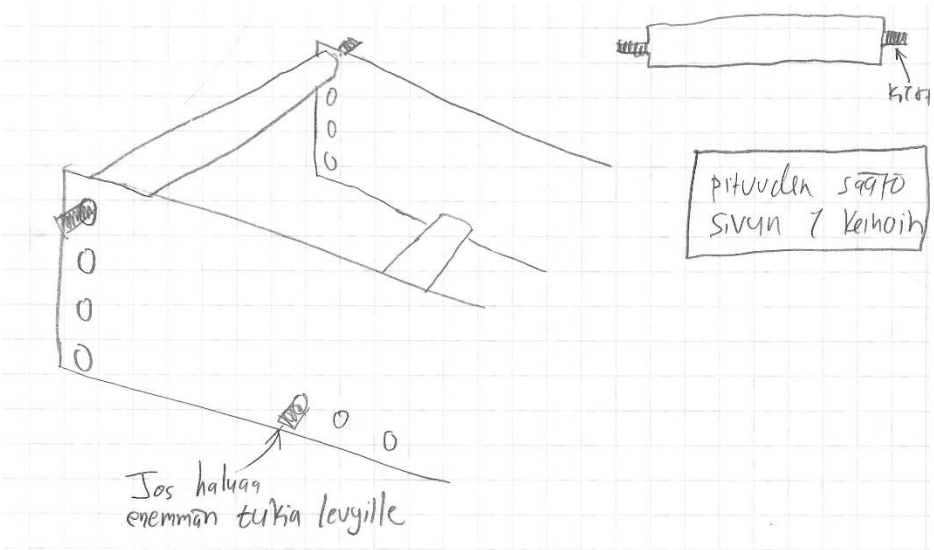
Toisena vaihtoehtona rakenteen toteuttamiselle pohdittiin teräslevyistä valmistettavaa rakennetta. Tämän hetkiset kuljetustuet on valmistettu teräslevyistä ja niitä käytettiin inspiraation lähteenä levyrakennetta pohtiessa. Tässä vaihtoehdossa säädettävyys suunniteltiin toteutettavaksi limittäisillä teräslevyillä joka mahdollistaa myös todella hyvän ja lähes portaattoman säädettävyyden.

Ensimmäinen pohdittu ratkaisu näkyy alhaalla kuvassa 9.



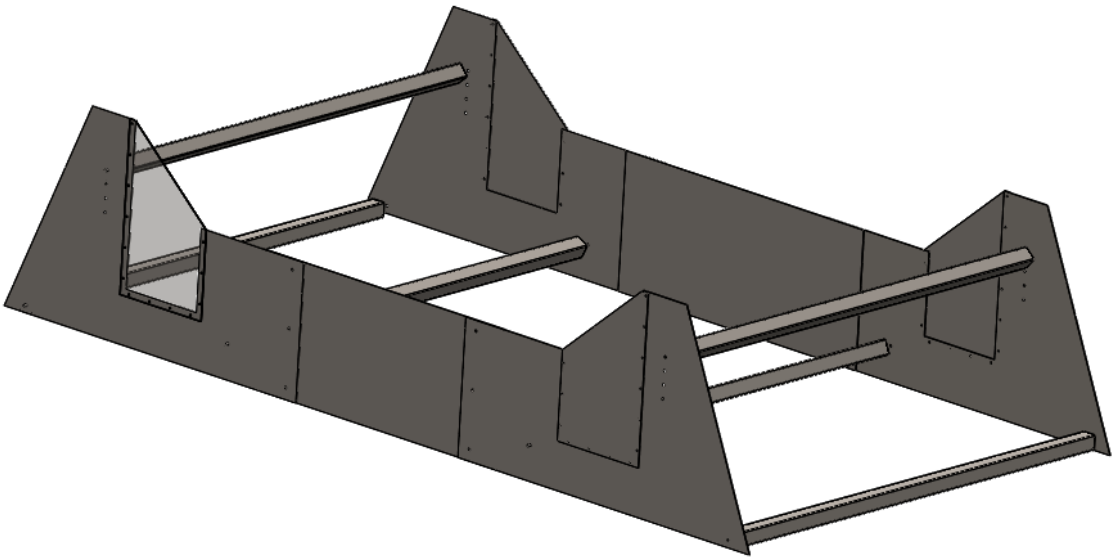
Kuva 9. Levyratkaisu

Niin sivut kuin päädyt on kaikki valmistettu teräslevyistä. Pituuden säätö on toteutettavissa limittäisillä teräslevyillä, joiden kiinnitys tapahtuu pulttiliitoksin. Leveys on säädettävissä kuvassa näkyvillä paloilla, joita voidaan lisätä tai ottaa pois määräytyen halutusta tuen leveydestä. Ongelmaksi tässä ratkaisussa muodostuu korkeus. Koska levyjen päätytuennan täytyy tapahtua eri korkeudella erilaisista taivutussäteistä ja pituuksista johtuen, täytyisi tuennan korkeus olla säädettävä. Tällaisessa ratkaisussa korkeutta ei voida kovin helposti säätää. Tätä kuitenkin jatkokehitettiin ja seuraava versio näkyy kuvassa 10.



Kuva 10. Levyrakenne säädettävällä korkeudella

Päädyt on nyt korvattu rakenneputkilla. Sivuilla olevissa levyissä on päädyssä reikiä, joihin rakenneputki voidaan kiinnittää ja näin saada haluttuun korkeuteen. Keskemmällä levyssä on myös mahdollisuus lisätukiin, joiden ansiosta levyt saadaan tuettua neljästä pisteestä. 3D-malli tästä rakenteesta on nähtävissä kuvassa 11.



Kuva 11. 3D-malli levyrakenteesta

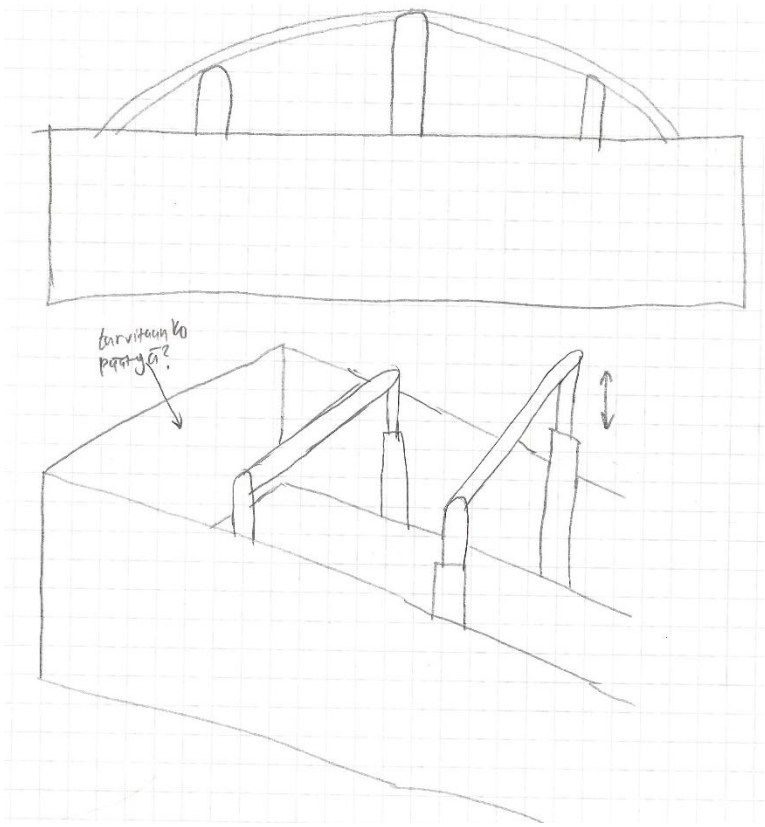
Kuten piirustuksessa, taivutetut levyt on tuettu neljästä pisteestä. Levyt ovat keskeltä matalampia kuin päädyistä, millä saadaan säästettyä materiaalikustannuksissa.

2.4 Muita ideoita

Tässä osiossa esitellään muita työn aikana syntyneitä ideoita, jotka hylättiin erinäisistä syistä johtuen. Monissa tapauksissa huomattiin hyvin nopeasti hahmotelmien tekemisen jälkeen, että tällainen ratkaisu ei ole toteutettavissa.

2.4.1 Levyt ylösalaisin

Yksi ajatus oli kääntää levyt ylösalaisin, jolloin korkeuden säätävä tuki sijaitsis tuen keskellä ja taivutettujen levyjen päät koskettaisivat maata. Normaalisti taivutetut levyt kuljetetaan niin, että ne koskettavat keskeltä maahan ja ovat tuetut molemmista päistä. Havainnekuva on nähtävissä alla kuvassa 12.

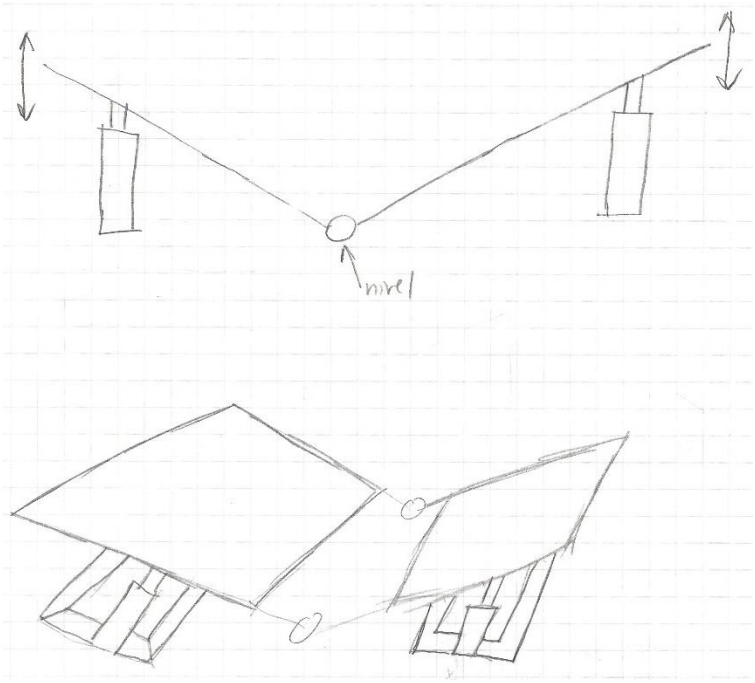


Kuva 12. Tuki, jossa levyt toisinpäin

Hyvä puoli tässä vaihtoehdossa on se, että levyihin päästään helposti käsiksi. Säädettävyys eri kokoisille levyille onnistu myös kätevästi teleskooppisilla rakenneputkilla. Tätä vaihtoehtoa ei lähdetty kehittämään pidemmälle, koska yrityksen edustajan mukaan levyjen kuljettaminen ylösalaisin ei ole järkevää.

2.4.2 Nivelmalli

Nivelmallissa rakenteen keskellä on nivel, jonka avulla siivekkeiden välistä kulmaa saadaan muutettua levykokoon sopivaksi. Hyvää rakenteessa on helppo säädettävyys ja melko yksinkertainen rakenne. Levyjen tuenta on myös tukevasti siivekkeiden päällä. Huono puoli on säädettävyys. Niin pituutta kuin leveyttä on hyvin hankala säätää. Pahimmassa tapauksessa rakenne pitäisi valmistaa niin, että se sopii suurimmalle levykoolle ja käyttää sitä myös pienemmille. Tämä taas vaatisi valtavasti materiaalia ja rakenne olisi ylimitoitettu pienemmille levyille. Tästä syystä tätä rakenneratkaisua ei kehitetty pidemmälle. Nivelmalli on esitettynä kuvassa 13.



Kuva 13. Havainnekuva nivelmallista

3 RAKENTEEN MITOITUS

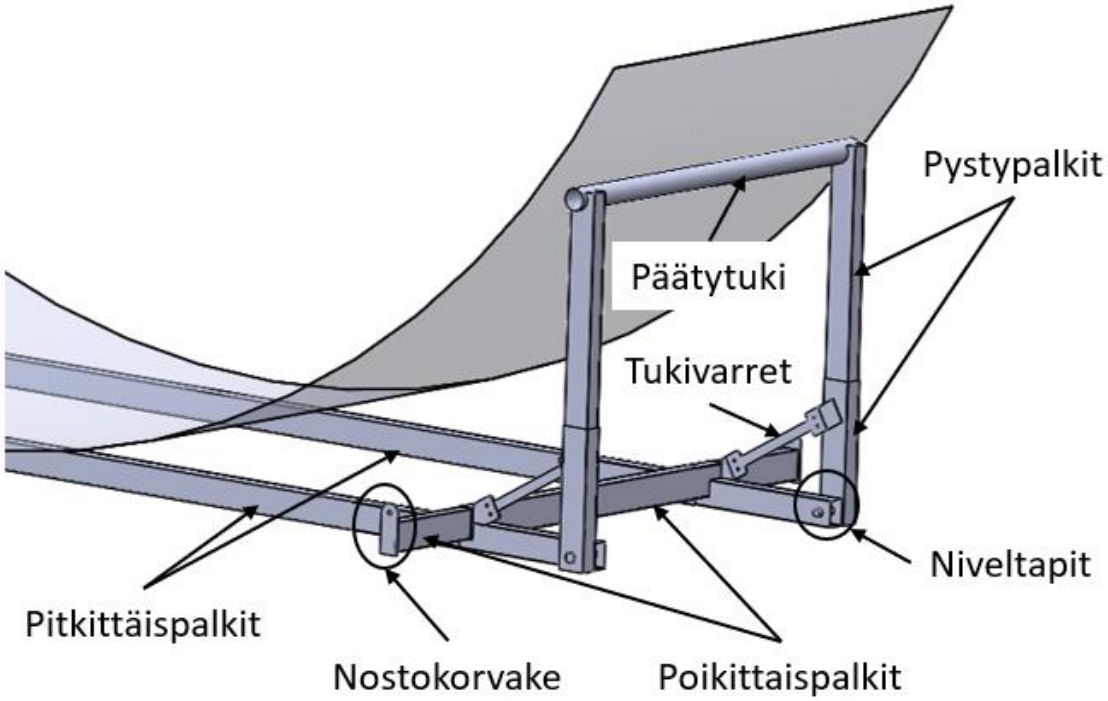
Kuten luvussa 2.2.3 todettiin, työssä valittiin H-palkkiratkaisu tarkempaan suunnitteluun ja mitoitukseen. Mitoitus lähti liikkeelle rakenteeseen kohdistuvien voimien selvittämisestä. Rakenne mitoitettiin staattisen kuormituksen mukaisesti niin, että nostotilanne määrää rakenteen koko mitoituksen. Nostotilanteessa rakenteeseen oletettiin kohdistuvan suuremmat kuormitukset, joten se valittiin käytettäväksi tarkemmassa mitoituksessa.

Nostotilanteessa rakenne on tuettu neljästä nostokorvakkeesta, jotka hitsataan poikittaispalkkien päihin. Taakasta aiheutuvan kuorman oletetaan kohdistuvan rakenteessa kolmeen pisteeseen: keskelle palkkien päälle sekä molempien päätyjen päätytukiin. Käytettävien rakenneputkien koot ja profiilit saatiin selvittämällä suurin niihin kohdistuva momentti ja sitä kautta vaadittava taivutusvastus.

Nostokorvakkeiden sekä tukivarsien kiinnityskorvakkeiden mitoitus tapahtui standardin SFS 1993-1-8 -mukaan.

Päätytuista tarkistettiin myös nurjahduskestävyys ja niitä tukevista tukivarsista vetokuorman kestävyys.

Kuvassa 14 on esitetty kaikki rakenteen mitoitettavat komponentit.



Kuva 14. Rakenteen komponentit

3.1 Rakenteeseen kohdistuvat kuormat

Mitoitettavan rakenteen hyötykuormaksi määritettiin yrityksen toimesta 30 000 kg. Tämä massa jaettiin tasan kolmeen osaan niin, että päätytuet kantavat 1/3 kumpikin päätytyki ja pitkittäispalkit kantavat loput 1/3. Keskellä levyt aiheuttivat ainoastaan pystysuuntaista kuormitusta, mutta päissä myös vaakasuuntaista kuormitusta. Levyjen massan aiheuttama voima F_{levyt} saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$F_{levyt} = m_{levyt} * g \tag{1}$$

Kaavassa 1 m_{levyt} on levyjen kokonaismassa ja g on putoamiskiihtyvyys. Koska levyt on tuettu päädyistä ja keskeltä, täytyy voima jakaa kaikille tukipisteille.

Voimien selvittämisen jälkeen voidaan laskea rakenteeseen kohdistuva maksimimomentti. Momentti M_{max} saadaan laskettua kaavalla:

$$M_{max} = F_{levyt} * d \tag{2}$$

M_{max} on palkkiin kohdistuva suurin momentti, ja d on nostokorvakkeiden etäisyys päätytuista. Palkkien vaadittava mitoitus toteutettiin taivutusvastuksen avulla koska palkit ovat pääasiassa vain taivutuksen alaisina. Vaadittava taivutusvastus saadaan laskettua momentin ja sallitun jännityksen avulla ja kaava on esitettynä alla.

$$W_{pitkittäis} = \frac{M_{max}}{\sigma_{sall}} \tag{3}$$

$W_{pitkittäis}$ on palkilta vaadittava taivutusvastus ja σ_{sall} on suurin sallittu jännitys rakenteessa. Mitoitusesimerkin materiaaliksi valittiin S690 lujuusluokan teräs varmuusluvulla 1.5. Tästä saadaan sallituksi jännitykseksi 460 MPa.

Pystypalkit ovat levyjen painosta johtuen myös puristuksella, ja tästä syystä niille on laskettava nurjahduskestävyys, joka saadaan laskettua seuraavalla kaavalla (Pennala 1994, s. 294).

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 * E * I}{h^2} \tag{4}$$

P_{cr} on palkin nurjahduskestävyys, E teräksen kimmomoduuli, I poikkileikkauksen jäyhyysmomentti ja h tarkasteltavan palkin korkeus.

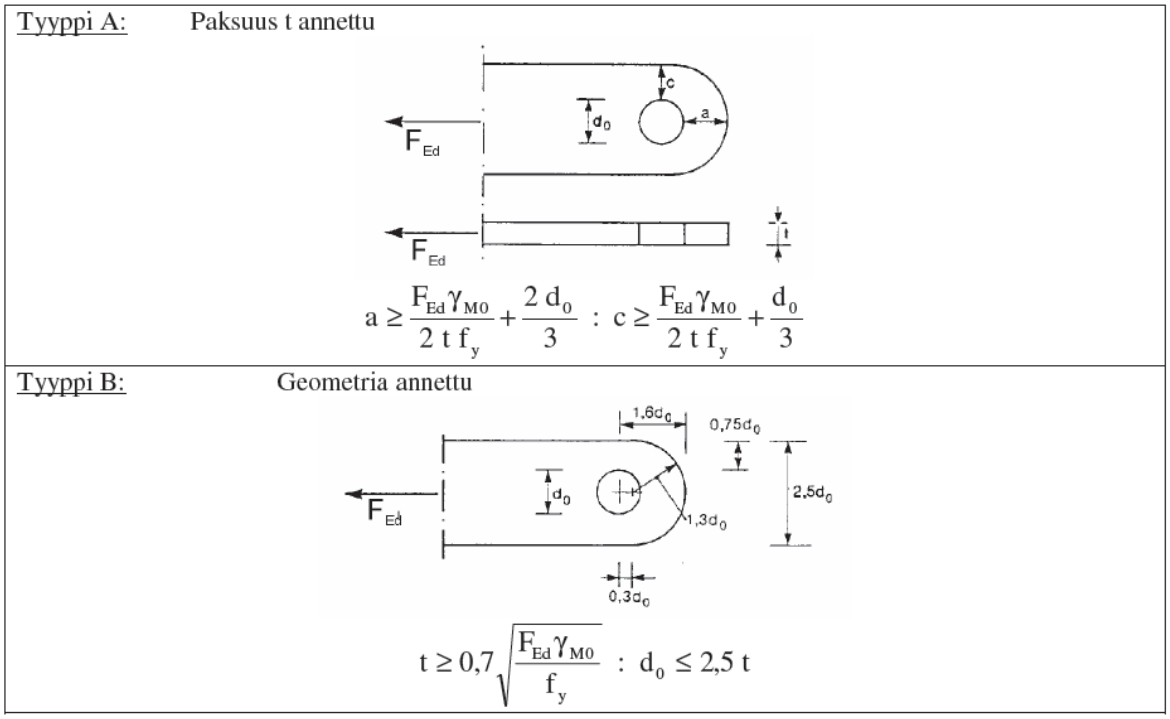
Taulukossa 1 on listattu valitut palkkikoot rakenteelle.

Taulukko 1. Mitoitusesimerkin valitut palkkikoot

Palkki	**Palkkikoko** korkeus x leveys x seinämä [mm]
Pitkittäispalkki	180 x 120 x 4
Päätytuki	152.4 x 3 (pyöröputki)
Pystypalkki (sisä)	189 x 109 x 5
Pystypalkki (ulko)	200 x 120 x 5
Poikittaispalkit	200 x 100 x 4

3.2 Nostokorvakkeiden mitoitus

Rakenteen nostamiseen hyödynnetään neljää nostokorvaketta, jotka hitsataan poikittaispalkkien päihin. Nostokorvakkeiden mitoittaminen tapahtuu Eurokoodin mukaisesti. Nostettavan kuorman oletetaan jakautuvan tasaisesti kaikille neljälle korvakkeelle. Varmuuslukuna korvakkeiden mitoittamisessa käytetään arvoa 3.



Kuva 14. Nostokorvakkeiden suunnitteluperusteet (SFS-EN 1993-1-8 2005, Taulukko 3.9).

Nostokorvakkeiden paksuudeksi valittiin 6 mm, jolloin voidaan käyttää tyypin A -mukaista mitoitusta. Kuvassa mitta a saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$a = \frac{F_{nosto} * \gamma_{M0}}{2 * t * \frac{f_y}{n_{varmuus}}} + \frac{2 * d_{reikä}}{3}, \tag{5}$$

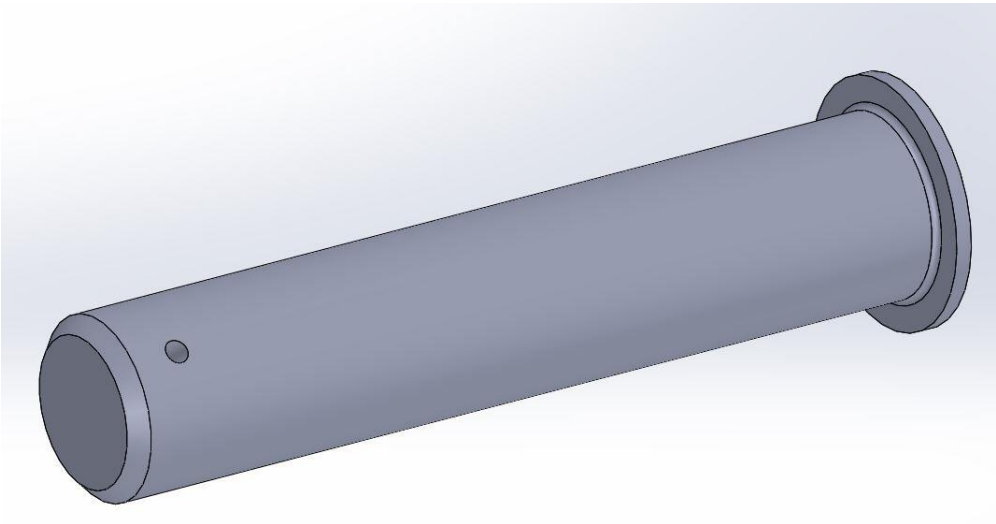
,jossa a on reiän reunasta etäisyys korvakkeen päähän, F_{nosto} korvakkeen kantama kuorma, γ_{M0} liitoksen osavarmuusluku, t korvakkeen paksuus, f_y sallittu jännitys korvakkeessa ja $n_{varmuus}$ käytetty varmuusluku. C mitta saadaan laskettua seuraavasti:

$$c = \frac{F_{nosto} * \gamma_{M0}}{2 * t * \frac{f_y}{n_{varmuus}}} + \frac{d_{reikä}}{3} \quad , \tag{6}$$

,jossa c on reiän reunasta etäisyys korvakkeen kylkeen.

3.3 Päädyn niveltapit

Kuvassa 15 on esitetty suunnitellut niveltapit.



Kuva 15. Niveltappi

Päädyn niveltappien avulla rakenteen pystypalkit voidaan kääntää vaakatasoon ja näin pienentää rakenteen kokoa. Niiden mitoittaminen perustui niiden leikkauskestävyyteen ja sen varmistamiseen. Leikkauskestävyys tapeille saatiin seuraavalla kaavalla:

$$\sigma_{nt} = \frac{F_{ay} * c_{säde}}{\frac{\pi}{c_{säde}} * c_{säde}{}^{4}}, \tag{7}$$

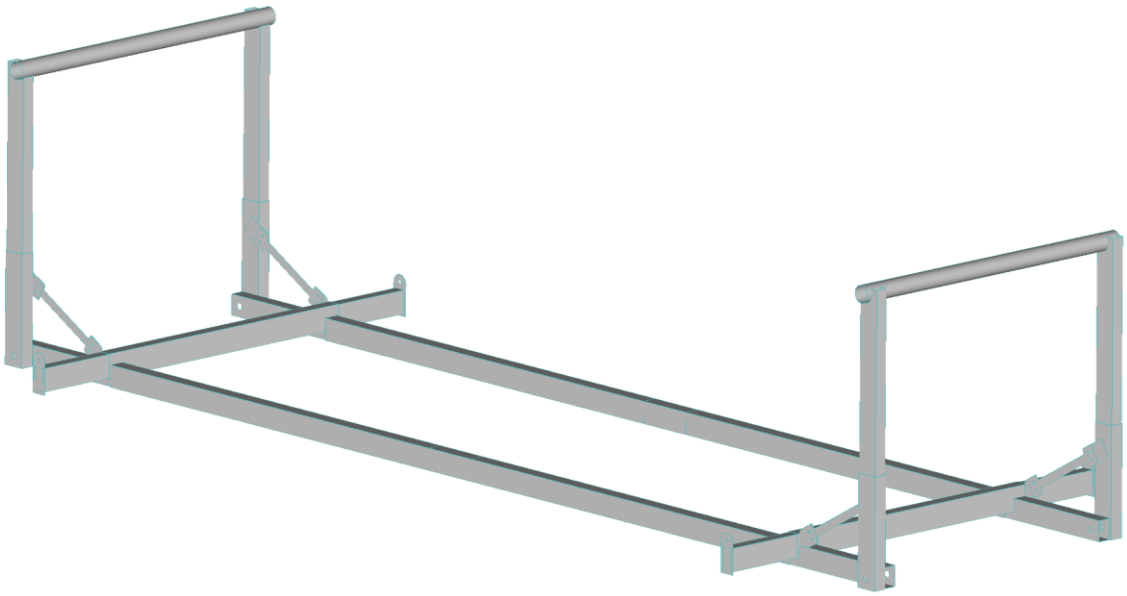
,jossa σ_{nt} on leikkausjännitys, F_{ay} tappiin kohdistuva leikkausvoima ja $c_{säde}$ niveltapin säde.

Tarkemmat laskennat löytyvät liitteestä 1.

3.4 FEM-laskenta

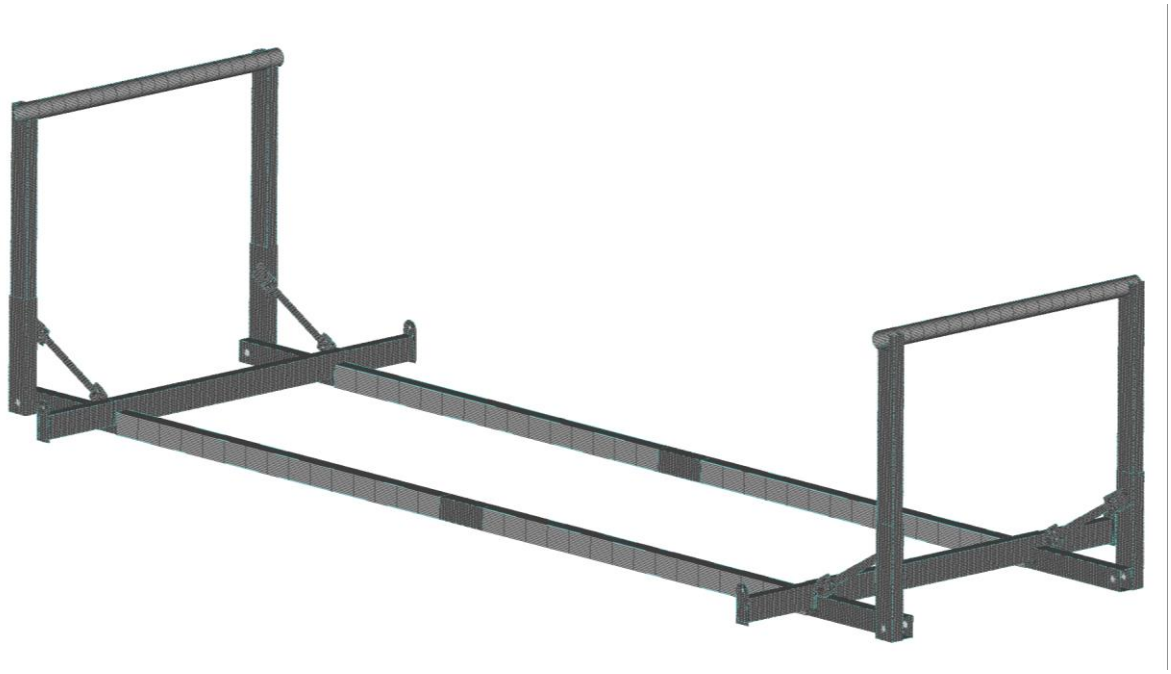
Rakenteen kestävyyttä tarkasteltiin myös elementtimenetelmää hyödyntäen. Palkkimallin geometria tuotiin FEMAP-ohjelmistoon, jossa rakenteesta tehtiin keskipintamalli, joka verkotettiin levyelementeillä. Elementtikoko vaihteli rakenteessa niin, että tiheämpää

verkotusta käytettiin kriittisemmissä kohdissa kuten liitoksissa, ja suurempaa elementtikokoa rakenneputkien pitkillä osuuksilla. Elementtikoon muutoksilla voitiin lyhentää laskenta-aikaa. Voimat kohdistettiin tasaisesti päätyjen poikittaispalkeille sekä keskelle rakennetta. Kuvassa 16 on esitetty keskipintamalli rakenteesta.



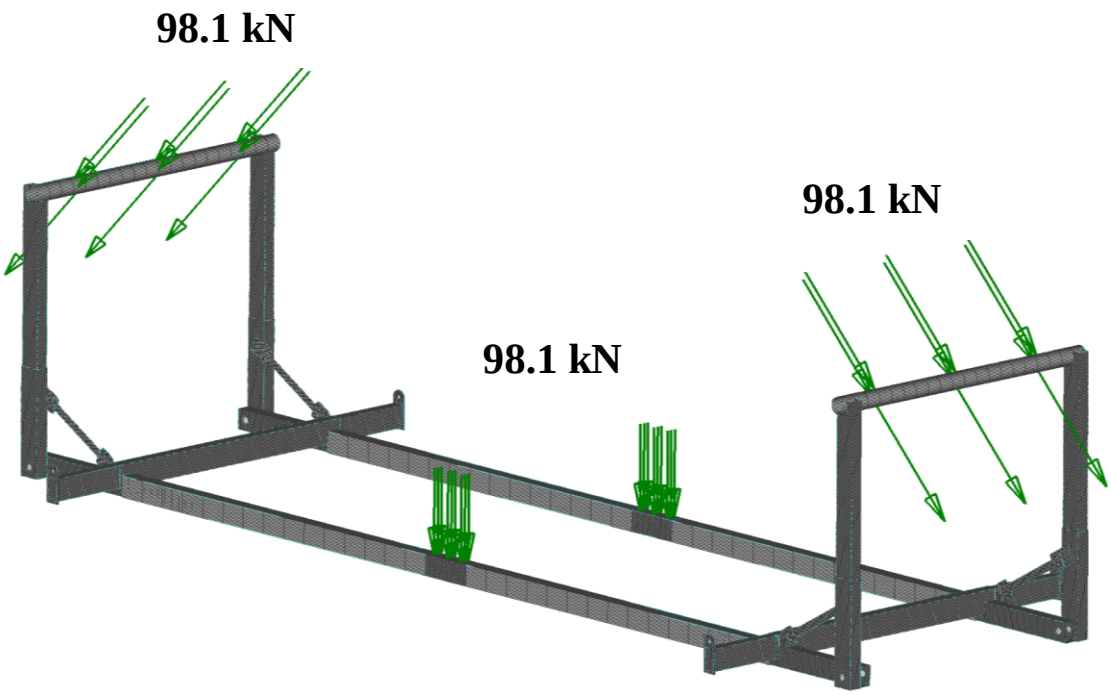
Kuva 16. Keskipintamalli rakenteesta

Kuvassa 17 on esitetty verkotettu malli. Materiaalina oli teräs, jonka kimmokerroin oli 207 GPa ja Poissonin vakiona käytettiin arvoa 0,3. Kuvasta voidaan havaita kuinka verkotus on tiheämpi kriittisemmillä alueilla sekä voimien vaikutusalueilla. Elementtien paksuudet vastaavat kunkin palkin paksuutta. Eri komponentit on yhdistetty toisiinsa liimakontaktein.



Kuva 17. Verkotettu malli

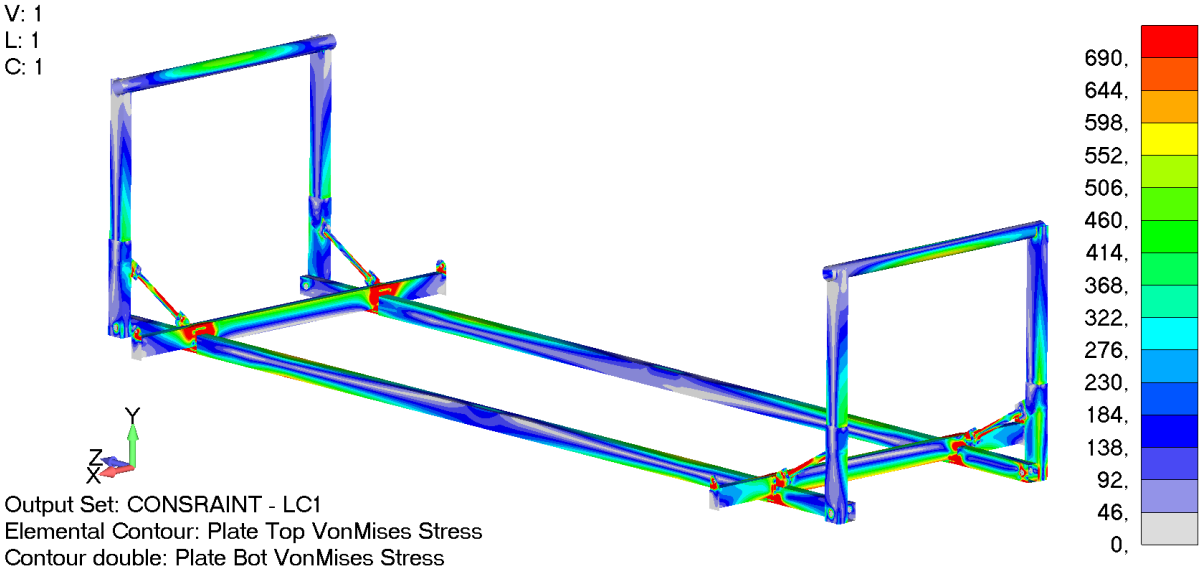
Rakenteeseen kohdistetut voimat on esitetty kuvassa 18.



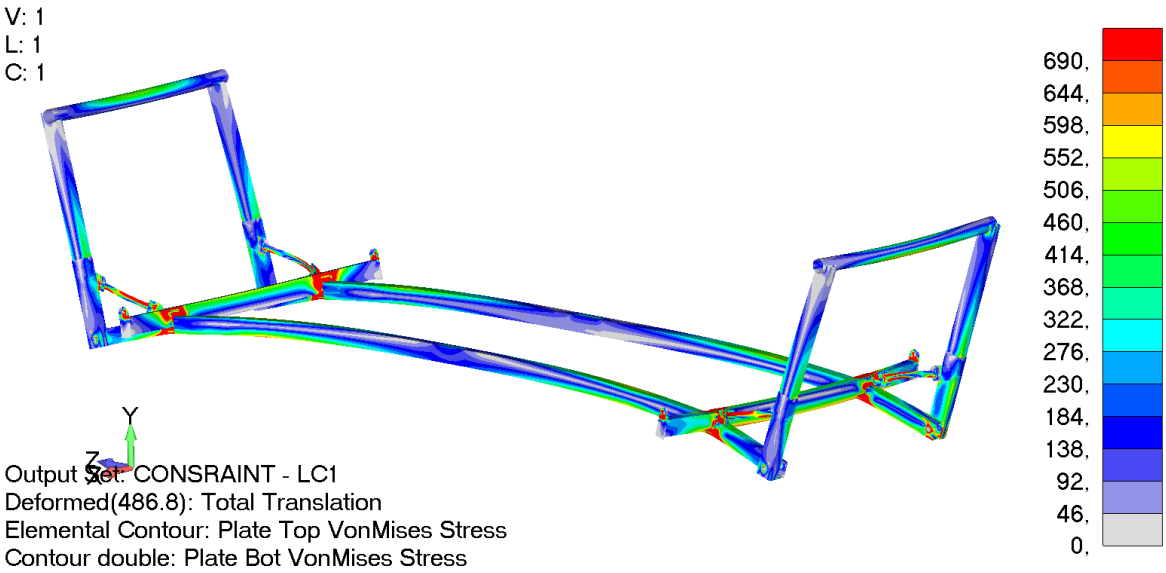
Kuva 18. Voimien vaikutusalueet

Reunaehdoiksi valittiin kriittisin tilanne eli nostotilanne. Nostotilanteessa kehto on tuettu kaikista neljästä nostokorvakkeesta niin, että kiertymät ovat vapaat mutta siirtymät on

estetty. Kuvassa 19 on esitetty Von Mises jännitykset rakenteessa nostotilanteen aikana ja kuvassa 20 nähdään deformoitu muoto.



Kuva 19. Von Mises -jännitykset rakenteessa



Kuva 20. Deformoitunut kuva. Skaalattu luvulla 2.

Kuvasta 19 voidaan havaita suuria myötörajan ylittäviä jännitysalueita tukivarsissa sekä poikittaispalkkien ja pitkittäispalkkien liittymäkohdassa. Pystypalkkien suurten momenttivarsien voi olettaakin aiheuttavan suuria jännityksiä juuri tukivarsiin ja niiden kiinnityskohtiin.

4 TULOSTEN POHDINTA

Rakenteen alkumittojen saamiseksi hyödynnettiin analyyttista laskentaa ja palkkien vaatimaa taivutusvastusta hyödynnettiin oikeiden palkkikokojen valinnassa. Palkkikokojen valintaa rajoitti vaatimus teleskooppirakenteesta, jossa sopivien mittojen saaminen samaan rakenteeseen saavutetaan hyödyntämällä sisäkkäisiä, säädettäviä palkkeja. Näin ollen palkkikoot eivät voineet olla mielivaltaisia vaan piti varmistua siitä, että valituille palkeille löytyy myös vastaava sisäkkäinen palkkikoko standardikoossa.

Mitoittavan massan ollessa 30 000 kg, oli alusta asti selvää, että rakenteen tulee kestää hyvin suuria kuormia. Rakenteen palkit oletettiin taivutuspalkeiksi ja mitoitettiin sen perusteella. Valittujen palkkikokojen mukaan mallinnettiin koko rakenne 3D-mallinnusohjelmalla ja näin rakenteen lopullinen muoto saatiin konkreettisesti näkyviin. Lopulta rakenne analysoitiin FEMAP FEM-ohjelmistolla, jossa ratkaisijana on NXNastran. Sen avulla voitiin varmistua rakenteen kestävyydestä staattisen analyysin perusteella. Analyysin perusteella voitiin todeta, että rakenteessa on kohtia, jotka vaativat tarkempaa tarkastelua halutun kestävyyden saavuttamiseksi. Palkkikokojen suurentaminen olisi aiheellista FEM tulosten perusteella. Ennen kaikkea pitkittäispalkin ja poikittaispalkin liitoskohta osoittautui kriittiseksi kohdaksi, sekä tukivarsi pystypalkista poikittaispalkkiin. Pystypalkkien suuri momenttivarsi yhdistettynä suureen voimaan aiheuttivat oletetusti suuria voimia ja jännityksiä niin tukivarteen kuin tukivarren ja poikittaispalkin liitoskohtaan. Nostotilanteen aiheuttamat reunaehdot vielä entisestään lisäsivät liitoskohdan rasituksia.

Rakenteen varmuuden lisäämiseksi palkkikokojen kasvattaminen olisi selkeä ja helppo ratkaisu sillä edellytyksellä, että teleskooppi mahdollisuus saadaan säilytettyä. Liitoskohta sen sijaan voidaan saada kestävämmäksi myös palkkikokoja kasvattamalla, mutta se saattaisi helposti johtaa ylimitoittamiseen, jossa muu rakenne olisi turhan järeä. Näin ollen paras ratkaisu olisi suunnitella liitoskohta tarkemmin ja sitä kautta hakea parempaa ja kestävämpää rakennetta. Liitoksen haastavuutta lisää myös sen vaatima teleskooppi rakenne, minkä johdosta sisemmän palkin on pystyttävä kulkemaan pitkittäispalkin läpi.

Pystypalkin tukivarressa ratkaisu olisi sitä parempi mitä korkeammalla tukivarsi on kiinni pystypalkissa. Sen toteuttamista vaikeuttaa jälleen vaadittu teleskooppi rakenne, jonka

johdosta ulompi palkki ei voi olla määränsä korkeampi jolloin säädettävyys mataliin korkeuksiin menetettäisiin.

Tulosten perusteella voidaan todeta, että korkean lujuusluokan terästen käyttö on perusteltua, jotta rakenteen koko ei kasva liian suureksi. Väsymistarkastelun teko, joka rajattiin pois tästä työstä, on myös kannattavaa tehdä mikäli rakennetta halutaan uudelleen käyttää.

5 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli suunnitella uudelleenkäytettävä sekä kooltaan säädettävä kuljetuslaatikko tai vastaava rakenne vaippalevynipun kuljettamiseen. Rakenteen koon täytyi olla säädettävissä niin pituus-, leveys- kuin korkeussuunnassakin ja kokoon taitettava niin, että sen voisi palauttaa takaisin yrityksen tiloihin mahdollisimman pienessä koossa. Kuljetettava massa rakenteelle oli 30 000 kg ja kriittisin tilanne nostotilanne.

Rakenteen ideointi aloitettiin hahmottelemalla erilaisia vaihtoehtoja ja ratkaisuja. Ratkaisuina oli niin palkeista kuin levyistä valmistettavia rakenteita sekä niiden yhdistelmiä. Säädettävyysvaihtoehtoina käytettiin erilaisia nivelratkaisuja sekä teleskooppirakenteita. Nivelillä pyrittiin mahdollistamaan rakenteen saaminen mahdollisimman pieneen kokoon, jotta takaisin kuljettaminen olisi järkevää.

Erilaiset vaihtoehdot esiteltiin yrityksen edustajille, joiden kanssa tehtiin päätökset kahdesta erilaisesta ratkaisusta, joita lähdettiin jatkokehittämään ja mitoittamaan tarkemmin. Valittiin sekä palkki-, että levyrakenne. Palkeista valmistettava rakenne olisi yritykselle täysin uusi vaihtoehto, ja levyistä valmistettava rakenne olisi kehitetty versio jo käytössä olevasta rakenteesta. Molemmille rakenteille valittiin materiaaliksi suurlujuusteräs ja varmuusluvuksi 1.5. Jatkokehitystä varten yritys toimitti tarkemmat mitat ja säädettävyysvälit rakenteelle. Kun tarvittavat dimensiot oli selvitetty, molemmista rakenteista mallinnettiin 3D-mallit SolidWorks mallinnusohjelmalla. 3D-mallien avulla saatiin varmistus siitä, että rakenteisiin suunnitellut ratkaisut ovat mahdollisia. Niiden avulla saatiin myös havainnollistavat kuvat esitettyä yrityksen edustajille, ja niiden perusteella valittiin palkkimalli tarkempaa mitoitusta varten. Rakenteen suurten dimensioiden takia levymallissa olisi suuria vapaita levykenttiä joiden stabiilius sekä varmistuminen siitä, että myötörajoja ei ylitettäisi herätti kysymyksiä. Sen avulla olisi myös mahdollista saada uutta tietoa yrityksen käyttöön, joka koettiin arvokkaaksi.

Analyyttisen laskennan avulla aloitettiin selvittämään vaadittavia palkkikokoja. Niiden selvittyä 3D-malli päivitettiin. 3D-mallin jälkeen keskityttiin pienempiin yksityiskohtiin kuten nostokorvakkeisiin, hitseihin sekä niveliin kokoon taittamista varten ja niiden

mitoittamiseen. Nostokorvakkeet ja hitsit mitoitettiin eurokoodin mukaisesti, jonka jälkeen ne voitiin lisätä jo olemassa olevaan 3D-malliin.

Valmis 3D-malli voitiin tämän jälkeen siirtää FE-analyysi ohjelmistoon, jonka avulla pystyttiin varmistumaan rakenteen kestävyydestä sille suunnitellun kuorman alla. FE-analyysin perusteella huomattiinkin suuria sallitun jännitysrajan ylityksiä kriittisillä, oletetuilla, alueilla. Sen avulla jatkokehitettäviä kohteita pystyttiin hyvin tunnistamaan.

Työn aikana onnistuttiin kehittämään uudenlainen ratkaisu levyjen kuljettamiseen, mutta jatkokehittäminen on välttämätöntä tuotteen käyttöön saattamiseksi. Kuten tulosten pohdinta -osiossa käytiin läpi, rakenteessa on alueita, jotka vaativat tarkempaa suunnittelu- ja mitoitustyötä. Yritykselle saatiin kuitenkin kehitettyä rakenne, jollaista he eivät ole aikaisemmin käyttäneet ja pystyvät pohtimaan palkeista rakennetun mallin käyttöä tulevaisuudessa.

LÄHTEET

Matikainen, A. 2018a. Kandityö – kierrätys osaksi tuotesuunnittelua [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Janne Parviainen, Heli Mettänen. Lähetetty 16.1.2018 klo 11:43 (GMT +0200). Liitetiedosto: ”Kierrätys osaksi tuotesuunnittelua_Viafin TT_Kandidaatintyö levyjen kuljetuskehdosta_tarkennuksia aiheeseen-2018-01-16.pdf”.

Matikainen, A. 2018b. Kandi kysymyksiä [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Janne Parviainen. Lähetetty 31.1.2018 klo 12:29 (GMT +0200). Liitetiedostot: ”Havainnekuva levyistä.dwg, Malli kuljetuslaatikosta.dwg”.

Matikainen, A. 2018c. Kuljetuslaatikko [yksityinen sähköpostiviesti]. Vastaanottajat: Janne Parviainen. Lähetetty 7.3.2018 klo 18:42 (GMT +0200).

Pennala, E. 1994. Lujuusopin perusteet. Helsinki: Hakapaino Oy. 400 s.

Ruukki. Rakenneputket. [www-tuotedokumentti]. [Viitattu 25.3.2018]. Saatavissa: https://software.ruukki.com/Ruukki-Rakenneputket-Kasikirja-2012_PDF-versio.pdf

SFS-EN 1993-1-1. 2005. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-1 Yleiset säännöt ja rakennuksia koskevat säännöt. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 99 s.

SFS-EN 1993-1-3. 2006. Eurokoodi 3. Teräsrakenteiden suunnittelu. Osa 1-3 Yleiset säännöt. Lisäsäännöt kylmämuovatuille sauvoille ja levyille. Helsinki: Suomen standardisoimisliitto SFS. 127 s.

Viafin Terästorni Oy. 2018. [Viafinin www-sivuilla]. [Viitattu 25.3.2018]. Saatavissa: http://www.viafin.fi/terastorni-oy.

Liite I

Levyjen massan aiheuttama kuormitus

$m_{levyt} := 30000kg$ $\quad g := 9.81\frac{m}{s^2}$ $\quad n := 1.5$

Varmuuslukuna käytetään 1.5 paitsi korvakkeiden mitoituksessa 3.0

$F_{levyt} := m_{levyt} \cdot g = 294.3 \cdot kN$ $\quad n_{nosto} := 3.0$

Rakenteen symmetrisyyden vuoksi rakennetta tarkastellaan niin, että se jaetaan kahteen osaan pituussuunnassa. Tästä syystä myös kuormituksia voidaan jakaa

Pitkittäispalkin tarkastelu

$L_{pitkittäis} := 10000mm$ $\quad d := 1000mm$ $\quad$ d = päätytukien ja nostokorvakkeiden välimatka

$F_{keski} := \frac{F_{levyt}}{6} = 49.05 \cdot kN$ $\quad F_{päädyt} := \frac{F_{levyt}}{6} = 49.05 \cdot kN$

$F_{nosto} := \frac{F_{levyt}}{4} = 73.575 \cdot kN$

$\sigma_{sall} := \frac{690MPa}{n} = 460 \cdot MPa$

$M_{maxpitk} := F_{päädyt} \cdot d = 4.905 \times 10^7 \cdot N \cdot mm$

$W_{pitkittäis} := \frac{M_{maxpitk}}{\sigma_{sall}} = 1.066 \times 10^5 \cdot mm^3$ *Eli 106.6 x 10^3 mm^3*

Taivutusvastuksen perusteella valitaan sopiva palkkikoko. Tässä tapauksessa valitaan kevyin vaihtoehto eli 180x120x4

Poikittaispalkin tarkastelu

Poikittaispalkki on nostokorvakkeiden kiinnityspalkki. Valitaan sen leveydeksi pisin mahdollinen eli 4000mm. Nosto tapahtuu päistä ja kuorma jakautuu keskelle kahteen pisteeseen 2500mm päähän toisistaan.

$L_p := 4000mm$ $\quad L_{uloke} := 750mm$ $\quad L_{uloke}$ = etäisyys korvakkeista hitsiin

$F_{nosto} = 73.575 \cdot kN$

$F_{kuorma} := \frac{F_{levyt}}{4} = 73.575 \cdot kN$

$M_{maxpoik} := F_{kuorma} \cdot L_{uloke} = 5.518 \times 10^7 \cdot N \cdot mm$

$W_{poikittais} := \frac{M_{maxpoik}}{\sigma_{sall}} = 1.2 \times 10^5 \cdot mm^3$ *Eli 120 x 10³ mm³*

Taivutusvastuksen perusteella valitaan jälleen sopiva palkkikoko, tällä kertaa 200x100x4.

Pystypalkin tarkastelu

Pystypalkki tukee levyt molemmista päistä. Pystypalkin korkeus on välillä 1200mm ja 2500mm, riippuen kuljetettavista levyistä. Laskennassa käytetään suurinta arvoa, eli 2500mm.

$\Sigma F_y = 0$ $F_{päädyt} = 49.05 \cdot kN$ $\alpha := 45deg$ $\beta := 30deg$

$\Sigma F_x = 0$ $F_{px} := F_{päädyt} \cdot \cos(\alpha) = 34.684 \cdot kN$ $h := 2500mm$ $k := 530mm$

$F_t := \frac{F_{päädyt} \cdot \cos(\alpha) \cdot h}{\cos(\beta) \cdot k} = 188.911 \cdot kN$

$F_{tx} := F_t \cdot \cos(\beta) = 163.602 \cdot kN$

$F_{ax} := -F_{px} + F_{tx} = 128.918 \cdot kN$

$F_{ay} := F_{päädyt} \cdot \sin(\alpha) + F_t \cdot \sin(\beta) = 129.139 \cdot kN$

h = kokonaiskorkeus
k = korkeus tukivarteen asti
F_{tx} = tukivarren aiheuttama x-suuntainen komponentti
F_{ax} = pystypalkin x-suuntainen tukireaktio
F_{ay} = pystypalkin y-suuntainen tukireaktio
F_{px} = levyjen aiheuttama x-suuntainen komponentti
F_t = tukivarren aiheuttama voima
α = voiman vaikutuskulma
β = tukivarren kulma

Taivutusvastuksen selvittäminen

$M_{maxpysty} := F_{ax} \cdot k = 6.833 \times 10^7 \cdot N \cdot mm$

$W_{pysty} := \frac{M_{maxpysty}}{\sigma_{sall}} = 1.485 \times 10^5 \cdot mm^3$ *Eli 148.5 x 10³ mm³*

Tämän perusteella ulko-pystypalkiksi valitaan 200x120x5

Tarkastetaan vielä nurjahduskestävyys

$E := 210 \cdot GPa$ $I := 750.1 \cdot 10^4 mm^4$

$P_{cr} := \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I}{h^2} = 2.487 \times 10^3 \cdot kN$ *Verrattaessa suurimpaan normaalivoimaan eli F_{ay} niin ei ole vaaraa nurjahtamiselle kun P_{cr} = 2478 kN*

Liite I

Selvitetään sisä-pystypalkin koko

$h_{liitos} := 1670mm$ $\sigma_{sall} = 460\,MPa$

Jäykästi tuettu liitoskohdasta $W_{tarv} := \frac{F_{px} \cdot h_{liitos}}{\sigma_{sall}} = 1.259 \times 10^5\,mm^3$ *Eli 125.9 x 10³ mm³*

Valitaan mitat 189x109x5 ja tarkistetaan riittääkö taivutusvastus

$W_{spp} = \frac{I_{spp}}{c}$ I_{spp} = sisä-pystypalkin jäyhyys c = suurin etäisyys neutraaliakselilta

$$W_{spp} := \frac{109mm \cdot \frac{(189mm)^3}{12} - 99mm \cdot \frac{(179mm)^3}{12}}{\frac{189mm}{2}} = 1.482 \times 10^5\,mm^3$$

Eli 148.2 x 10³ mm³, joka riittää hyvin

Levyt tukeva poikittaispalkki

$L_{pp} := 2500mm$

Poikittaispalkki on jäykästi molemmista päistä tuettu palkki, johon kohdistuu levyjen massasta aiheutuva tasainen jatkuva kuorma koko sen matkalle

$Q := \frac{m_{levyt}}{3} \cdot g = 98.1 \cdot kN$ $q := \frac{Q}{L_{pp}} = 39.24 \cdot \frac{N}{mm}$

$$M_{maxlevy} := \frac{q \cdot L_{pp}^2}{12} = 2.044 \times 10^7 \cdot N \cdot mm$$

$W_{levy} := \frac{M_{maxlevy}}{\sigma_{sall}} = 4.443 \times 10^4 \cdot mm^3$ *Eli 44.4 x 10³ mm³*

Tämän perusteella valitaan pyöröputki d = 152.4 mm, t = 3mm

Tukivarsi pystyputkelle

Jotta pystyputki pysyy pystyssä, asennetaan siihen tukivarsi joka on kiinni pystyputkessa ja pitkittäispalkissa. Tämä varsi on hyvin yksinkertainen ja vain puhtaan vedon alaisena.

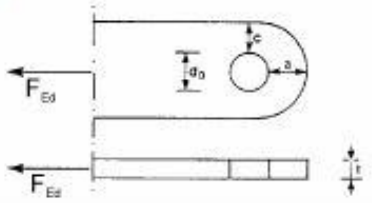
Vaadittu pinta-ala tukivarrelle: $A_{tv} := \frac{F_t}{\sigma_{sall}} = 4.107 \times 10^{-4}\,m^2$

$A_{tv} := 410mm^2$ *Mitat voivat olla esimerkiksi 6 x 69 mm*

Liite I

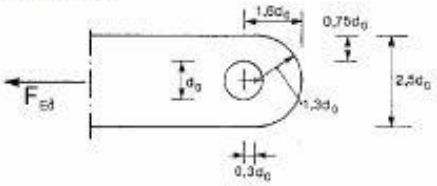
Taulukko 3.9: Niveltapillisen rakenneosan geometriset mittavaatimukset

Tyyppi A: Paksuus t annettu



$$a \geq \frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{2\,t\,f_y} + \frac{2\,d_0}{3} \;:\; c \geq \frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{2\,t\,f_y} + \frac{d_0}{3}$$

Tyyppi B: Geometria annettu



$$t \geq 0{,}7\sqrt{\frac{F_{Ed}\gamma_{M0}}{f_y}} \;:\; d_0 \leq 2{,}5\,t$$

SFS-EN 1993-1-8 Taulukko 3.9.

Nostokorvake

Nostokorvakkeet sijaitsevat poikittaispalkkien päissä ja niitä on rakenteessa yhteensä neljä kappaletta. Muusta rakenteesta poiketen niiden mitoituksessa varmuuslukuna käytetään arvoa 3.

$F_{nosto} = 73.575 \cdot kN$ $\quad t := 6mm$ $\quad \varphi_{M0} := 1$ $\quad f_y := 690MPa$ $\quad n_{varmuus} := 3$

$l_{hitsi} := 600mm$ *a-mitta on reiän etäisyys korvakkeen yläreunasta ja c-mitta on etäisyys sivulle*

$d_{reikä} := 30mm$

$$a := \frac{F_{nosto} \cdot \varphi_{M0}}{2 \cdot t \cdot \frac{f_y}{n_{varmuus}}} + \frac{2 \cdot d_{reikä}}{3} = 46.658 \cdot mm$$ *Valitaan a-mitaksi 47mm*

$$c := \frac{F_{nosto} \cdot \varphi_{M0}}{2 \cdot t \cdot \frac{f_y}{n_{varmuus}}} + \frac{d_{reikä}}{3} = 36.658 \cdot mm$$ *Valitaan c-mitaksi 37mm*

Liite I

Päädyn niveltappi

Niveltapin avulla pystypalkit voidaan kaataa vaakatasoon.

$F_{ay} = 129.139 \cdot kN$

$F_{ax} = 128.918\,kN$

$F_{leikkaus} := \sqrt{F_{ay}^{2} + F_{ax}^{2}} = 182.474\,kN$ *Tappiin kohdistuva leikkausvoima*

$\tau_{sall} := \frac{460}{\sqrt{3}} MPa = 265.581\,MPa$ *Sallittu leikkausjännitys*

$y_r := \frac{4 \cdot c_{säde}}{3 \cdot \pi}$ *Osapinnan pintakeskiön etäisyys neutraaliakselilta*

$Q_{stat} := \frac{\left(\pi \cdot c_{säde}^{2}\right)}{2} \cdot y_r$ *Staattisen momentin lauseke*

Given

$\tau_{sall} = \frac{F_{leikkaus} \cdot Q_{stat}}{\frac{\pi}{4} \cdot c_{säde}^{4} \cdot 2 \cdot c_{säde}}$ *Leikkauskestävyyden lauseke*

$$\tau_{sall} = \frac{F_{leikkaus} \cdot \frac{\left(\pi \cdot c_{säde}^{2}\right)}{2} \cdot \frac{4 \cdot c_{säde}}{3 \cdot \pi}}{\frac{\pi}{4} \cdot c_{säde}^{4} \cdot 2 \cdot c_{säde}}$$

$$\mathrm{Find}\left(c_{säde}\right) \rightarrow \begin{pmatrix} \frac{0.017076409429439864203 \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{Pa}} & -\frac{0.017076409429439864203 \cdot \sqrt{N}}{\sqrt{Pa}} \end{pmatrix} = (17.076 \quad -17.076) \cdot mm$$

$c_{säde} := 17.076mm$ *Vaadittu säde niveltapille*

Liite I

Tukivarren korvakkeet

Korvakkeet ovat kiinni pystypalkissa ja rungossa. Korvakkeita tulee kutakin tukivartta kohti kaksi kappaletta

$F_t = 188.911 \cdot kN$ $\quad f_{ytv} := \frac{690}{1.5} MPa = 460 \cdot MPa$

$t_{tv} := 6mm$ $\quad d_{0tv} := 20mm$

$$a_{tv} := \frac{F_t \cdot \varphi_{M0}}{2 \cdot t_{tv} \cdot f_{ytv}} + \frac{2 \cdot d_{0tv}}{3} = 47.556 \cdot mm$$ *Valitaan a-mitaksi 48 mm*

$$c_{tv} := \frac{F_t \cdot \varphi_{M0}}{2 \cdot t_{tv} \cdot f_{ytv}} + \frac{d_{0tv}}{3} = 40.89 \cdot mm$$ *Valitaan c-mitaksi 41mm*

Tukivarren ruuvit

$$F_{vRd} = \frac{\alpha_u \cdot F_{ub} \cdot A}{\varphi_{M2}} \qquad A = \frac{F_{vRd} \cdot \varphi_{M2}}{\alpha_u \cdot F_{ub}}$$

$F_{ub} := 800MPa$ $\quad \alpha_u := 0.6$ $\quad F_{vRd} := F_t$ $\quad \varphi_{M2} := 1.25$

$$A_r := \frac{F_{vRd} \cdot \varphi_{M2}}{\alpha_u \cdot F_{ub}} = 4.92 \times 10^{-4} m^2 = 492\ mm^2$$

$r := 10mm$

$A_{M20} := \pi \cdot r^2 = 3.142 \times 10^{-4} m^2 = 314\ mm^2$ *Todetaan, että vaaditaan 2 kpl 8.8 M20 ruuvia*

H-rungon hitsit

Lasketaan a-mitat käyttäen tarkempaa komponenttimenetelmää

$\beta_w := 1$ $\quad \varphi_{M2} = 1.25$ $\quad f_u := 770MPa$

$t_{korvake} := 6mm$

$$a_{korvakkeet} := \frac{\sqrt{2} \cdot \beta_w \cdot \varphi_{M2} \cdot f_y \cdot t_{korvake}}{2 \cdot f_u \cdot \varphi_{M0}} = 4.752 \cdot mm$$