

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikka koulutusohjelma

Juha-Matti Toivanen

**ULTRAKEVYEN RAHTIALUKSEN KANSILUUKKIJEN SEKÄ LUUKKIJEN
SIIRTO- JA VARASTOINTIJÄRJESTELMÄN SUUNNITTELU HYÖDYNTÄEN
KEVYTRAKENNEKONSEPTEJA**

Työn tarkastajat: Professori TkT Aki Mikkola ja TkT Kimmo Kerkkänen

Työn ohjaaja: Olli Junnila

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Konetekniikka
Koneensuunnittelu

Juha-Matti Toivanen

Ultrakevyyden rahtialuksen kansiluukkujen sekä luukkujen siirto- ja varastointijärjestelmän suunnittelu hyödyntäen kevytrakennekonsepteja

Diplomityö

2010

127 sivua, 97 kuvaa, 13 taulukkoa ja 5 liitettä

Tarkastajat: Professori TkT Aki Mikkola ja TkT Kimmo Kerkkänen

Hakusanat: vaahtomainen alumiini, kenno, kansiluukku, rahtialus,
Keywords: aluminum foam, sandwich, deck hatch, cargo vessel,

Tämän työn tarkoituksena oli tutkia miten rahtialuksen kansiluukut voitaisiin valmistaa mahdollisimman kevyiksi. Katettavan ruuman pinta-ala on n. 10 m x 40 m. Luukkujen suuresta jännevälisestä johtuen, rakenteelta vaaditaan suurta jäykkyyttä. Erilaisina vaihtoehtoina tutkittiin vaahtomaista alumiinia, alumiinisia kennorakenteita ja polyuretaanisia sandwich-rakenteita.

Työssä vertailtiin myös erilaisia geometrisia ratkaisuja, joilla kansiluukkujen jäykkyyttä pyrittiin lisäämään ja sitä kautta pääsemään pienempään materiaalin tarpeeseen. Geometriaa suunniteltaessa huomioitiin myös vaikutukset ruuman tilavuuteen ja lainsäädännön asettamat reunaehdot. Lainsäädännöstä saatiin esimerkiksi turvakaiteiden minimikorkeus, joka vaikuttaa suoraan ruuman tilavuuteen, kun aluksen korkeimmaksi kohdaksi on valittu laivan keskilinja ja tämä korkeus on annettu suunnittelun lähtötietona.

Tietokoneavusteisen lujuuslaskennan avulla eri vaihtoehdoista muodostettiin elementtimallit. Malleja varioimalla ja tuloksia vertailemalla saatiin selville kevyin mahdollinen rakenne ja geometria. Malleista saatiin selville myös luukkujen tukireaktivoimat, eli voimat, jotka luukut kohdistavat aluksen muihin rakenteisiin.

Lisäksi työssä mietittiin erilaisia tapoja ruuman avaamiseen ja avaamistavan vaikutusta kansiluukkujen painoon, geometriaan ja ruuman tilavuuteen.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology
Degree Programme of Mechanical Engineering

Juha-Matti Toivanen

Deck hatches, transmission and storage system design for ultra-light cargo vessel, using lightweight structural concepts.

Master's thesis

2010

127 pages, 97 figures, 13 tables ja 5 appendices

Examiners: Professor Dr. Aki Mikkola and Dr. Kimmo Kerkkänen

Keywords: aluminum foam, sandwich, deck hatch, cargo vessel,

Purpose of this study was to examine how the ship's cargo hatches could be produced as light as possible. The covered area of the cargo hold is approximately 10 m x 40 m. Because hatches have large span length, high stiffness is required for the structure. Various options were studied, aluminum foam, aluminum cell structures and polyurethane sandwich structures.

Variety geometric solutions to increase the stiffness of the hatches were studied in this thesis also. When designing geometry the effects to the cargo hold volume and boundary conditions from legislation were taken into account. For example the height of the safety railings were get from legislation, this height effects directly to the cargo hold volume when the highest point of the ship is on the ship's center line and this height is given as design input data.

Element models of different choices were constructed with FEM (Finite Element Method). With varying models and comparing the results the lightest possible structure and geometry were found out. Models were also used to identify the support reaction forces of the hatches which targets to other structures of the vessel.

In this study different ways to open the cargo hold and impact of opening method to mass, geometry, and volume of the hold were taken into account also.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on toteutettu Rejlers Oy:n Turun toimistolla.

Haluaisin esittää kiitokset työni tarkastajille, professori Aki Mikkolalle ja tekniikan tohtori Kimmo Kerkkäselle, jotka auttoivat työn rakenteellisten ja sisällöllisten asioiden kanssa.

Kiitokset myös työpaikalla ohjaajana toimineelle Olli Junnilalle, joka avusti teknisten ratkaisujen hahmottelussa.

Lisäksi haluaisin kiittää vanhempiani ja avovaimoani Jennaa kärsivällisyydestä, luottamuksesta ja kannustavista sanoista.

SISÄLLYSLUETTELO

1 JOHDANTO	1
2 KANTAVAN RAKENTEEN SUUNNITTELUN PERUSTEITA.....	4
2.1 Teknisiä vaatimuksia kantavalle rakenteelle	4
2.2 Rakenteen kuormituksia	4
3 MEKATRONIIKAN LUONNOSTELUVAIHE	5
3.1 Järjestelmän vaatimusten selvittäminen	5
3.2 Abstrahointi.....	6
3.3 Järjestelmän toimintojen selvittäminen	7
3.4 Ratkaisuperiaatteiden ideointi ja luonnostelu.....	11
4 KANSILUUKKIJEN GEOMETRIAN ARVIOINTI	13
4.1 Kaarevuuden vaikutus kansiluukkujen siirtymiin	13
4.2 Kaarevuuden vaikutus tukirakenteisiin kohdistuviin voimiin	15
4.3 Kaarevuuden vaikutus lastiruuman tilavuuteen	17
4.4 Kenno	19
4.5 Sandwich	23
4.5.1 Vaahtomainen alumiini	23
4.5.2 Polyuretaani	29
4.6 Ristikko	31
5 TOIMINTOVAIHTOEHTOJEN ARVIOINTI JA MALLINNUS.....	33
5.1 Toimintovaihtoehtojen hyvien ja huonojen puolien taulukointi	33
5.2 Toimintovaihtoehtojen kokoaminen rakenne-ehdotuksiksi.....	36
5.3 Mallinnus	37
5.3.1 Ruuman mallinnus.....	38
5.3.2 Siirtojohteiden mallinnus.....	39
5.3.3 Luokkuvaraston mallinnus.....	42
5.3.4 Siirtojärjestelmän mallinnus.....	45
5.3.5 Kansiluukkujen mallinnus	49
6 LUJUUSLASKENTA	51
6.1 Kuormitukset.....	51
6.1.1 Aalto- ja jääkuormat	51
6.1.2 Lumikuormat.....	52
6.1.3 Tuulikuormat.....	53
6.1.4 Ihminen hyppää tai kaatuu	54
6.2 Kennosta valmistettu kaareva luukku	57
6.3 Polyuretaanista valmistettu kaareva luukku.....	70
6.4 Vaahtomaisesta alumiinista valmistettu kaareva luukku	72
6.5 Siirtojärjestelmään kohdistuvat voimat.....	79
6.6 Luokkuvaraston sylinterin nurjahtaminen.....	83
6.7 Luokkuvarasto	87

6.8 Ruuman kiskot.....	91
6.9 Siirtolaitteen laakerien tuki.....	95
7 TULOKSET.....	106
8 TULOSTEN TARKASTELU.....	107
9 YHTEENVETO.....	109

LÄHTEET
LIITTEET

KÄYTETYT MERKINNÄT

σ_L	ketjun lenkin normaalijännitys
τ_T	ketjun tapin leikkausjännitys
A_{L_p}	luukun tuulen suuntaan kohtisuora projektiopinta-ala
A_T	ketjun tapin poikkipinta-ala
a	kiihtyvyys
b_1	vaahtomaisesta alumiinista valmistetun luukun uuman leveys
b_2	vaahtomaisesta alumiinista valmistetun luukun perusosan leveys
d_2	ketjun tapin halkaisija
d_h	hammaspyörän jakohalkaisija
E	materiaalin kimmomoduuli
F_K	ketjun lenkkiin kohdistuva voima
F_{Lumi}	lumen luukkuihin kohdistama voima
$F_{LV_{kok}}$	luukkuvaraston alaspäin kohdistama kokonaisvoima
F_S	sylinterin voima
F_{Tuuli}	tuulen luukkuihin kohdistama voima
F_T	luukkujen siirtovoima
g	putoamiskiihtyvyys
h_p	perusosan korkeus
h_u	uuman korkeus
I	neliömomentti
I_S	sylinterin varren neliömomentti
M_M	siirtolaitteen moottorin vääntömomentti
N	Newton
P_{nS}	sylinterin nurjahdusvoima
t	aika

v	nopeus
v_0	nopeus ajan hetkellä 0
v_k	keskinopeus
x	paikka
x_0	paikka ajan hetkellä 0
y_c	painopisteen etäisyys x-akselista
dA	differentiaalelementti
Pa	Pascal
R_a	pinnankarheus

1 JOHDANTO

Jyväskylän voima rakentaa Jyväskylään biovoimalaitoksen, jonka polttoaineen tarve vuorokaudessa on n. 11000 irtokuutiometriä, kun laitoksessa on täysi kuormitus.

Polttoaineena laitos käyttää puuhaketta ja turvetta. Polttoaineen kuljettamiseen tarvitaan yhteensä 95 rekkaa, jos kuljetukset tapahtuvat kokonaan maanteitse, tai 77 junavaunua, jos kuljetukset tapahtuvat kokonaan rautateitse. /1/

Vesitiekuljetuksiin siirtyminen laajentaisi hankinta-aluetta ja sitä kautta parantaisi polttoaineen saantia. Se myös parantaisi liikenneturvallisuutta vähentämällä maantieliikennettä. Lisäksi se on EU:n maantiekuljetusten vähennystavoitteiden mukaista. /1/

Vesitiekuljetuksiin siirtymisen hyödyn maksimoimiseksi Laffcomp Oy on lähtenyt kehittämään ultrakevyttä jäissä kulkevaa Bioship1-rahtialusta (kuvat 1.1 ja 1.2). Rahtialuksen koko maksimoidaan vesireitin sulkuporttien ja siltojen mukaan, lisäksi osaa silloista korotetaan ja osaa väylistä syvennetään. Aluksen alustavat mitat ovat: pituus 115 m, leveys 14 m ja korkeus 10,4 m. /2/ Ensimmäiset alukset toimisivat Päijänteen ja Keiteleen vesistöissä, mutta myöhemmin aluksia myytäisiin myös Venäjän ja Euroopan järvi- ja jokikuljetuksiin.

Kevytrakennekonsepteja hyödyntämällä aluksen painoa voidaan pudottaa jopa 50 %. Tyhjänä laivan uintisyvyys on vain 0,6 m. Aluksen ruumaan tulisi mahtua 7000 m³ haketta tai turvetta. Aluksen tulisi myös pystyä lastaamaan ja tyhjentämään itsensä ilman ulkopuolista apua ja ilman, että miehistön (2-4 henkeä) tarvitsee poistua aluksesta. Tällöin säästöt verrattuna täysperävaunurekkaliikenteeseen, kun kuljetetaan 5 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, olisivat n. 12,6 miljoonaa euroa vuodessa. Maksimitilanteessa, jossa kuljettaisiin 60 miljoonaa kuutiometriä vuodessa, säästöt olisivat n. 151,5 miljoonaa euroa. /3/

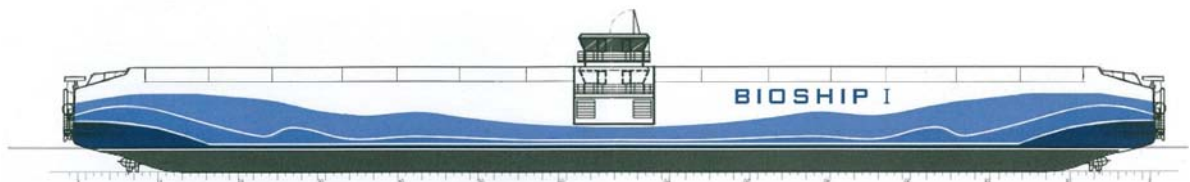
Tämän työn tarkoituksena on tutkia millaisella kevytrakennetekniikalla rahtialuksen kansiluukut voidaan tehdä mahdollisimman kevyiksi. Vertaillaan esim.

vaahtomaisesta alumiinista tai polyuretaanista tehtyjä sandwich-rakenteita sekä kennorakenteita.

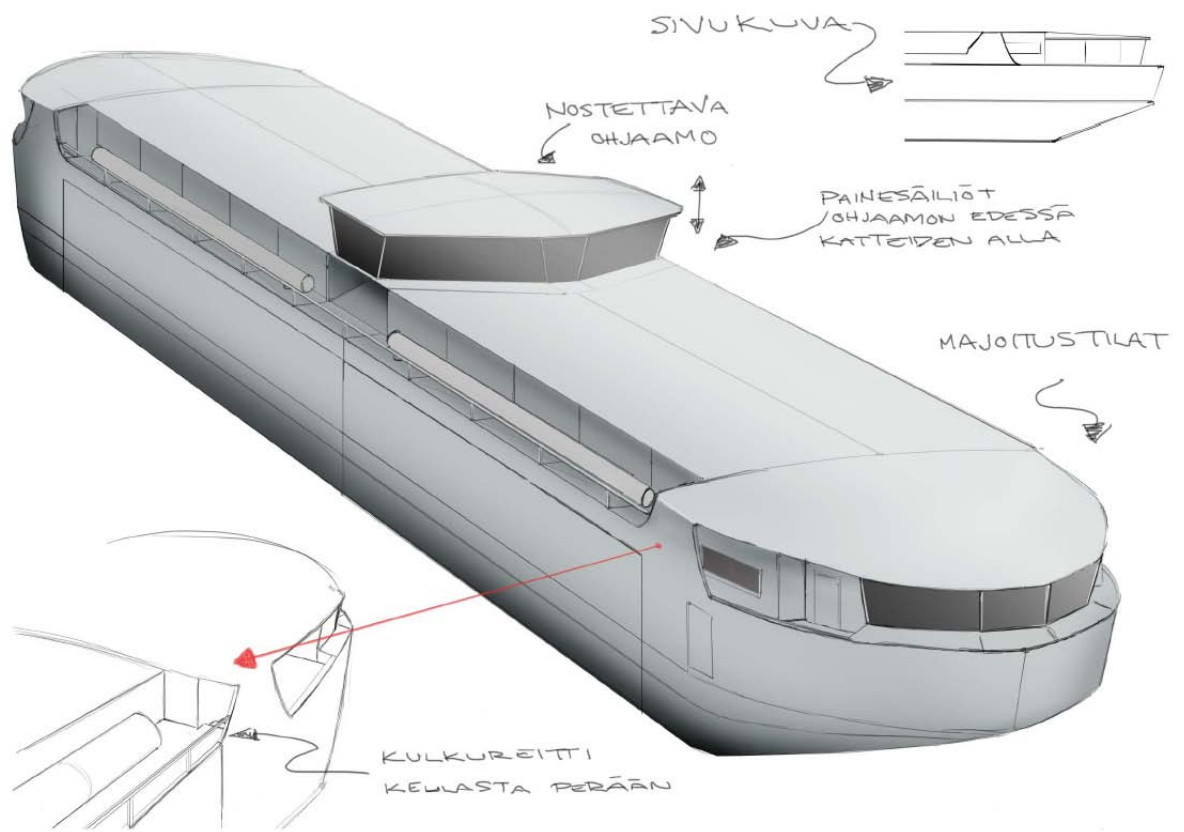
Sandwich-rakenteissa pintalevyinä voidaan käyttää esim. teräs- tai alumiinilevyä tai hiilikuidulla vahvistettua muovia. Ydinmateriaalina käytetään ainetta, jonka tiheys on huomattavasti pienempi kuin pintamateriaalin. Ydinmateriaaleja ovat esim. alumiinivaaho ja polyuretaani.

Kennoissa pintalevyt voivat olla samoja materiaaleja kuin sandwich-rakenteissakin, mutta yhtenäisen ydinaineen tilalla on ohuesta pellistä valmistettu esim. sini-käyrän muotoon taivutettu ydin.

Työssä pyritään myös optimoimaan rakennetta ja saamaan sille pitkä huoltoväli. Lisäksi suunnitellaan kansilevyjen siirto- ja varastointijärjestelmä ja tehdään lujuuslaskelmat tärkeimmille osille.



Kuva 1.1, hahmotelmakuva Bioship1-aluksesta /4/



Kuva 1.2, hahmotelmakuva Bioship1-aluksesta /4/

2 KANTAVAN RAKENTEEN SUUNNITTELUN PERUSTEITA

2.1 Teknisiä vaatimuksia kantavalle rakenteelle

- Sallii tuotteen pää- ja sivutoimintojen toteutumisen
- Käyttöominaisuudet ovat hyvät, esim. siirtymät ja värähtelyt ovat pieniä
- Hyvä käytettävyys
- Täyttää turvallisuusvaatimukset
- Vähäinen huollon tarve, esim. hyvä korroosion kesto
- Rakenne kestää kaikki mahdolliset kuormitustilanteet
- Rakenne ei sorru odottamattomissakaan tilanteissa
- Rakenne on riittävän pitkäikäinen
- Materiaalit kierrätettävissä /5/

2.2 Rakenteen kuormituksia

- Pysyvät kuormat
 - Omapaino
- Muuttuvat kuormat
 - Hyötykuorma
 - Luonnonkuormat
 - Tuuli
 - Lumi
 - Lämpölaajenemisesta johtuvat
 - Liikkuva kuorma
 - Kiinteä kuorma (vain suuruus muuttuu) /5/

3 MEKATRONIIKAN LUONNOSTELUVAIHE

3.1 Järjestelmän vaatimusten selvittäminen

Mekatroninen kone valmistetaan aina toteuttamaan ennalta määriteltäviä tehtäviä. Tehtävät ovat koneen päätoimintoja, joiden vuoksi asiakas tuotteen ostaa.

Koneen tehtävien ja vaatimusten selvittämistä helpottaa vaatimusluettelon tekeminen (taulukko 3.1.1). Vaatimusluettelossa otetaan huomioon asiakkaan asettamien vaatimusten lisäksi, lainsäädännölliset sekä fysikaaliset vaatimukset. /6/

Vaatimusluetteloon voidaan koota myös toivomuksia, eli ominaisuuksia joiden ei ole pakko toteutua, mutta jotka toteutuessaan tuovat tuotteelle lisäarvoa.

Taulukko 3.1.1, vaatimusluettelo

Pää tunnuspiirre	V/T	V = vaatimus, T = toivomus
Geometria	V	Kansiluukkujen oltava siirrettävissä lastauksen ajaksi
Geometria/Materiaali	V	Kansiluukkujen oltava mahdollisimman kevyet = kapasiteetti lisääntyy, pieni paino ylhäällä lisää laivan vakautta
Geometria	V	Kansiluukkujen oltava niin tiiviit, ettei vettä tai lunta pääse ruumaan
Geometria	V	Luukkujärjestelmä vie mahdollisimman vähän tilaa ruumasta
Geometria	V	Jos luukkujen käsittelylaitteet kannen yläpuolelle, maksimikorkeus luukkujen korkein kohta
Voimat	V	Järjestelmä kestää viranomais määräyksissä asetetut kuormitukset
Käyttö	V	Järjestelmä soveltuu käytettäväksi Suomen sääolosuhteissa sisävesillä.
Käyttö	V	Järjestelmän käyttövoimana sähkö tai hydraulikka

Aines/Kunnossapito	V	Laite kestää korroosion
Kunnossapito	V	Pitkä huoltoväli
Käyttö/Geometria	V	Lumen poistaminen luukkujen päältä turvallista
Turvallisuus	V	Laitteessa tunnistimet, jotka pysäyttävät laitteen ihmisen ollessa liian lähellä
Käyttö	T	Lumen poisto automaattista
Kunnossapito	T	Luukut huollettavissa ilman irrottamista
Estetiikka/Geometria	T	Järjestelmä tyylikkään näköinen ja aluksen ilmeeseen sopiva
Valmistus/Kustannukset	T	Rakenteet yksinkertaisia =edullinen
Kunnossapito/Turvallisuus	T	Rakenteiden kunto helposti määriteltävissä
Kierrätys	T	Materiaalit kierrätettävissä
Kuljetus/Valmistus	T	Luukkujen kuljetus mahdollista kokonaisina

3.2 Abstrahointi

Seuraava suunnitteluprosessin vaihe on abstrahointi, jonka avulla pyritään löytämään ongelman ydin, rajoittamatta ratkaisuvaihtoehtoja. Abstrahointi voidaan jakaa 5 askeleeseen, jotka ovat:

1. poistetaan vaatimusluettelosta toivomukset
2. poistetaan toissijaiset vaatimukset
3. muutetaan määrälliset vaatimukset laadullisiksi
4. yleistetään edellistä askelta
5. muotoillaan ongelma siten, että se on ratkaisun kannalta neutraali /7/

Ensimmäisen ja toisen vaiheen jälkeen vaatimusluettelo saadaan taulukon 3.2.1 muotoon. Taulukosta on siis poistettu kaikki ominaisuudet, jotka eivät ole täysin välttämättömiä järjestelmän toiminnan kannalta, tai joita ei ole mainittu tehtävänannossa perusvaatimuksiksi.

Taulukko 3.2.1, vaatimusluettelo

Päätunnuspiirre	V/T	V = vaatimus, T = toivomus
Geometria	V	Kansiluukkujen oltava siirrettävissä lastauksen ajaksi
Geometria/Materiaali	V	Kansiluukkujen oltava mahdollisimman kevyet = kapasiteetti lisääntyy, pieni paino ylhäällä lisää laivan vakautta (siirrä vertailukohtaan)
Geometria	V	Kansiluukkujen oltava niin tiiviit, ettei vettä tai lunta pääse ruumaan
Geometria	V	Luukkujärjestelmä vie mahdollisimman vähän tilaa ruumasta
Geometria	V	Jos luukkujen käsittelylaitteet kannen yläpuolelle, maksimikorkeus luukkujen korkein kohta
Voimat	V	Järjestelmä kestää kuormitukset viranomais määräyksissä asetetut kuormitukset

Kolmas kohta on tässä vaiheessa hyödytön, koska vaatimusluettelossa ei ole esitetty mitään selkeitä määrällisiä vaatimuksia.

Neljännän ja viidennen askeleen jälkeen ongelma saadaan muotoiltua ratkaisuun nähden neutraaliksi:

”Suojaa lastin sääolosuhteilta, mahdollisimman kevyellä rakenteella ja mahdollisimman vähän ruuman tilavuutta rajoittamalla”.

3.3 Järjestelmän toimintojen selvittäminen

Koneen toimintoja voidaan järjestelmällisesti analysoida toimintorakenteen avulla. Rakenteen selvittäminen selkeyttää suunnittelutehtävää ja sen avulla voidaan monimutkaisen laitteen kokonaistoiminto jakaa päätoimintoihin ja sivutoimintoihin. Toimintorakenteessa esitetään mitä laite tekee, mutta ei oteta kantaa siihen miten se sen tekee. /7/

Menetelmä mahdollistaa myös suunnittelun hajauttamisen, jolloin tiettyyn toimintoon voidaan etsiä ratkaisu erikseen. /7/

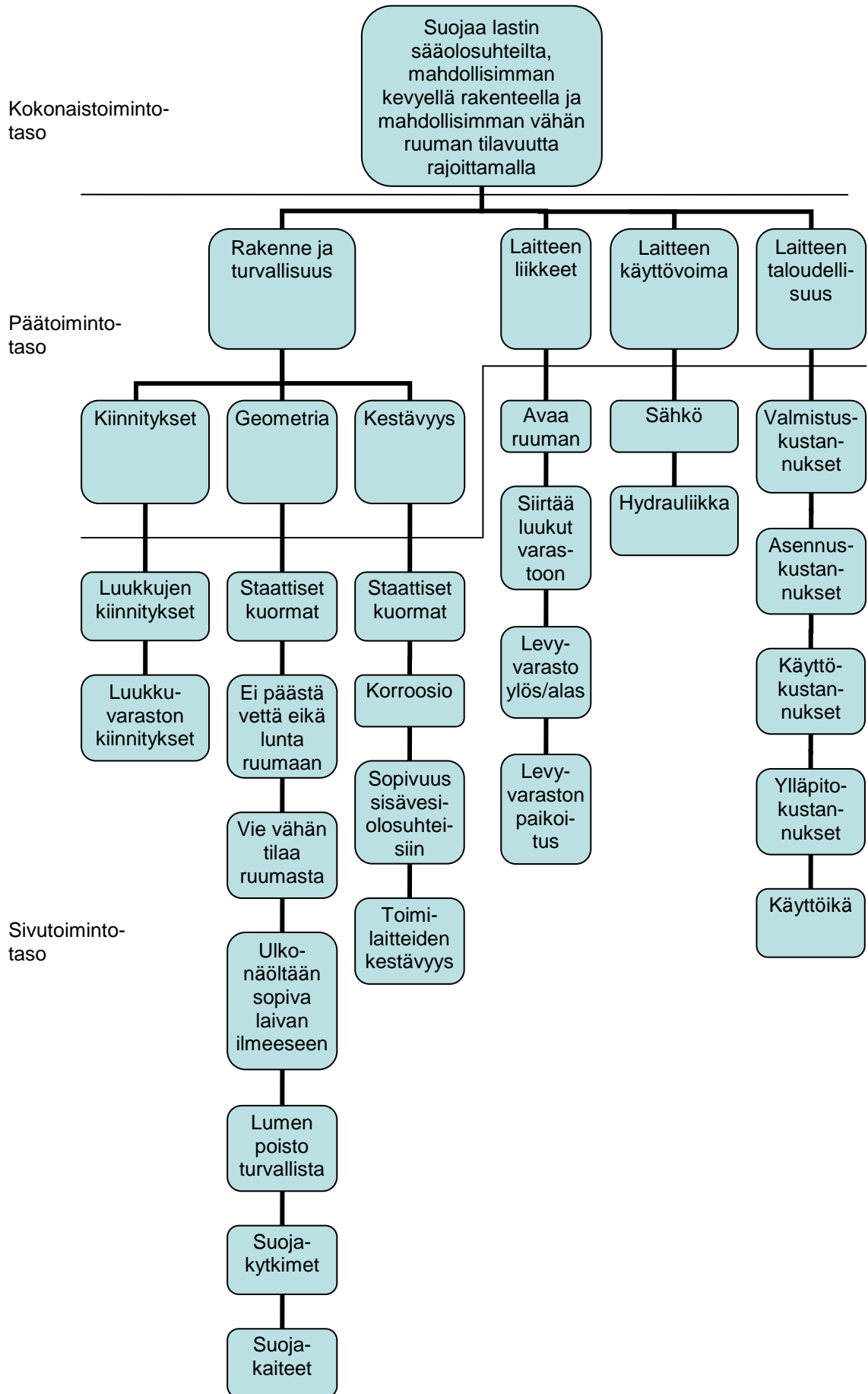
Listataan ensin laitteelta vaadittuja toimintoja ja mietitään mitkä niistä ovat päätoimintoja ja mitkä sivutoimintoja:

- Laitteen kestävyys (päätoiminto)
- Laitteen geometria (päätoiminto)
- Laitteen rakenne (päätoiminto)
- Laitteen turvallisuus (päätoiminto)
- Laitteen liikkeet (päätoiminto)
- Laitteen kiinnitykset (päätoiminto)
- Laitteen käyttövoima (päätoiminto)
- Laitteen taloudellisuus (päätoiminto)
- Luukkujen kiinnitykset (sivutoiminto)
- Luukkuvaraston kiinnitykset (sivutoiminto)
- Laitteen staattisen kuormituksen kesto (sivutoiminto)
- Ei päästä vettä eikä lunta ruumaan (sivutoiminto)
- Vie vähän tilaa ruumasta (sivutoiminto)
- Ulkonäöltään sopiva laivan ilmeeseen (sivutoiminto)
- Lumen poisto turvallista (sivutoiminto)
- Suojakytkimet (sivutoiminto)
- Suoja-kaiteet (sivutoiminto)
- Laitteen korroosion kesto (sivutoiminto)
- Sopivuus sisävesiolosuhteisiin (sivutoiminto)
- Toimilaitteiden kestävyys (sivutoiminto)
- Avaa ruuman (sivutoiminto)
- Siirtää luukut varastoon (sivutoiminto)
- Luukkuvarasto ylös/alas (sivutoiminto)
- Luukkuvaraston paikoitus (sivutoiminto)
- Käyttövoimana sähkö tai hydraulikka (sivutoiminto)

- Valmistuskustannukset (sivutoiminto)
- Asennuskustannukset (sivutoiminto)
- Käyttökustannukset (sivutoiminto)
- Ylläpitokustannukset (sivutoiminto)
- Käyttöikä (sivutoiminto)

Listatut toiminnot voidaan seuraavaksi esittää havainnollisemmassa muodossa toimintorakenteena (kuva 3.3.1).

Kaaviosta on helpompi erottaa mitkä toiminnot kuuluvat yhteen ja muodostavat selkeitä kokonaisuuksia.

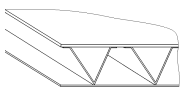
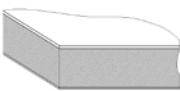

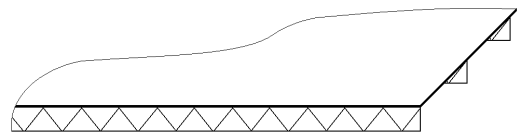
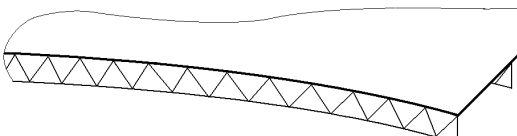
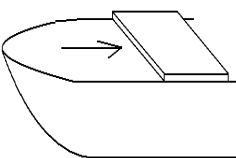
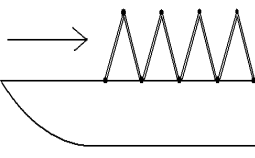
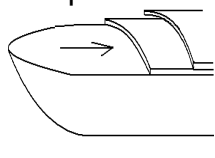
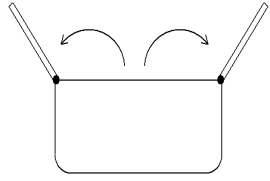
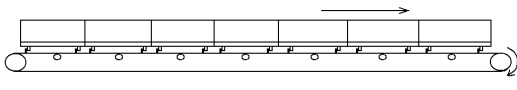
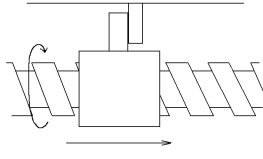
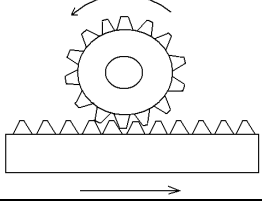
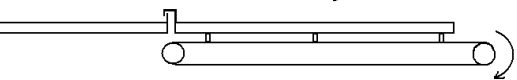
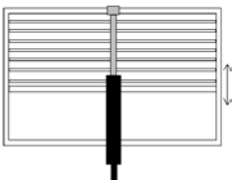
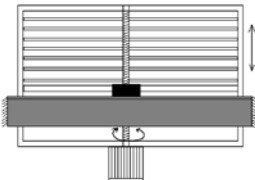
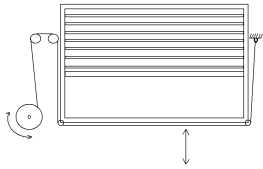


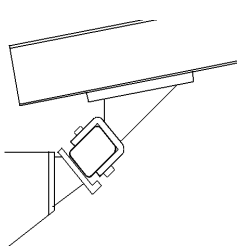
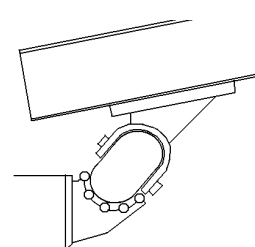
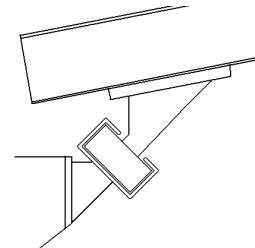
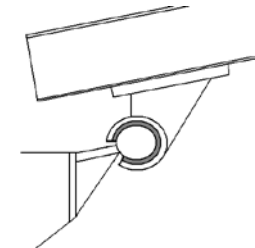

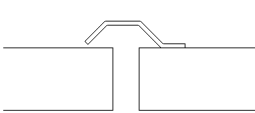
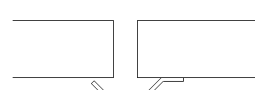

Kuva 3.3.1, toimintorakennekaavio

3.4 Ratkaisuperiaatteiden ideointi ja luonnostelu

Valitaan edellä esitetyistä osatoiminnoista keskeisimmät ja mietitään niille erilaisia toteutusvaihtoehtoja. Tätä vaihetta helpottaa huomattavasti ratkaisujen taulukointi, eli ideamatriisin tekeminen (taulukko 3.4.1).

Taulukko 3.4.1, ideamatriisi

Geo- metria	Suora kenno 	Suora sandwich 	Jäykistetty sandwich 	Kaa- reva kenno	Kaareva sandwich	Kaareva jäykistetty sandwich
	Suora ristikko 			Kaareva ristikko 		
Avaa ruuman	Liukuu suoraan 	Haitariluukut 	Liukuu toistensa päälle 	Aukeaa sivuille 		
Siirtää luukut varas- toon	Koko matkalla ketju, jossa kiinnitykset luukuille 			Kuularuuvi 	Hammastanko+ hammaspyörä 	
	Levyt kytketty toisiinsa, ketju kuljettaa yhtä luukua kerrallaan 					
Levy- varas- ton nosto/ lasku	Hydraulisyylinteri 	Kuularuuvi 	Vaijeri 	Pneumaattinen sylinteri		

Luukkujen kiinnitykset	Renkaat maksimivoiman suuntaan 	Pyöreäprofiilinen rengas + pyörötangoista tehty tuki 	Liukukisko 	Pyöreä johde + auki leikattu liukulaakeri 
Ei päästä vettä/lunta ruumaan	Luukkujen välissä tiiviste 	Yläpuolinen suoja 	Alapuolinen suoja 	Yhdistelmä 
Levyvaraston paikoitus	Induktiiviset rajakytkimet	Vaijeritoimiset asema-anturit	Mekaaniset rajakytkimet	Optiset kytkimet
Korroosio	Maali	Materiaali	Sähkö- / kuumasinkitys	
Lumen poistoturvallista	Levyssä kohokuviointi	Maali jonka seassa kitkaa lisääviä kiteitä	Pintaan tasavälein liimattavat karhennusnauhat	Koneiden hukkalämpö johdetaan sulattamaan lumi

Ideamatriisin toteutusvaihtoehtoista voidaan kasata huomattava määrä erilaisia kokonaisuuksia. Toteutuskelpoisten yhdistelmien määrää voidaan supistaa esimerkiksi karsimalla yhdistelmät joita ei voi toteuttaa tai jotka tulevat liian kalliiksi.

/7/

Seuraavissa kappaleissa tutkitaan hieman tarkemmin keskeisimpiä toimintojen toteutusvaihtoehtoja ja arvioidaan niiden hyviä ja huonoja puolia. Luukkujen geometriaan esimerkiksi liittyy niin monta tekijää, ettei voida suoralta kädeltä arvioida parasta vaihtoehtoa.

4 KANSILUUKKIJEN GEOMETRIAN ARVIOINTI

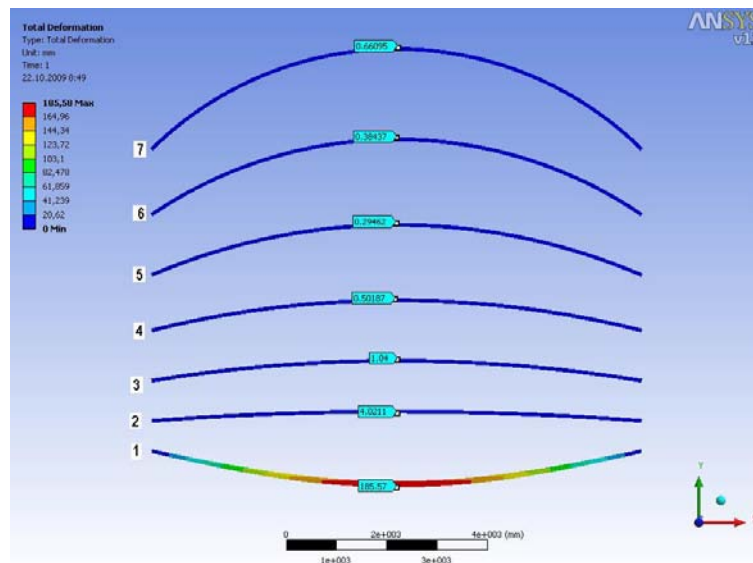
Laivan korkeimmaksi kohdaksi tulee kansiluukkujen korkein kohta. Korkeus veden pinnasta 10,4 m. Ohjaamosta tehdään liikkuva, jolloin se voidaan siltojen kohdalla laskea kansiluukkujen tasolle.

4.1 Kaarevuuden vaikutus kansiluukkujen siirtymiin

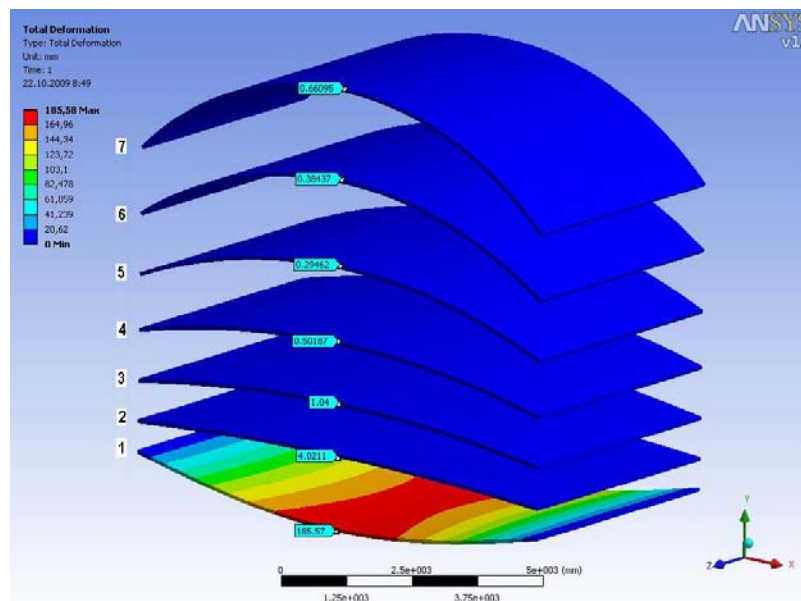
Tutkitaan millainen kaarevuus olisi lujuudeltaan ja muilta ominaisuuksiltaan optimaalinen kyseiseen kohteeseen.

Kansiluukuista tehtiin yksinkertaiset laskentamallit, joilla selvitetään kaarevuuden suhteellista vaikutusta siirtymiin, jännityksiin ja tukirakenteisiin kohdistuviin voimiin. Yksinkertaistetussa mallissa, levy on 75 mm paksu alumiinilevy, johon vaikuttaa maanvetovoiman lisäksi maksimilumikuorma 1800 Pa eli n. 180 kg/m² (ks. kohta 6.1.2 Lumikuormat). Levyjen reunat on kiinnitetty siten, että translaatiot x- ja y-akselin suhteen on lukittu, mutta rotaatio z-akselin suhteen on jätetty vapaaksi.

Kuvista 4.1.1 ja 4.1.2 nähdään, että pienikin kaarevuus jäykistää huomattavasti luukkuja suhteessa suoraan luukkuun (luukku nro 1).



Kuva 4.1.1, kansiluukkujen siirtymät

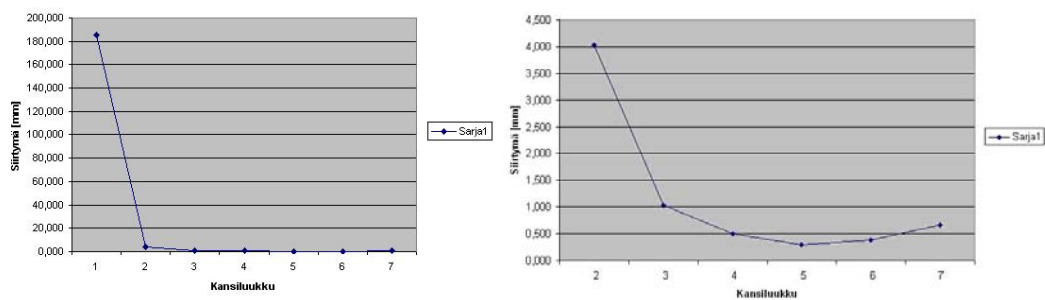


Kuva 4.1.2, kansiluukkujen siirtymät

Taulukosta 4.1.1 ja kuvasta 4.1.3 nähdään, että siirtymä pienenee hyvin voimakkaasti, kun siirrytään suorasta kaarevaan muotoon. Siirtymä alkaa kuitenkin taas kasvaa, kun kaarevuussäde pienenee tarpeeksi.

Taulukko 4.1.1, kansiluukkujen siirtymät

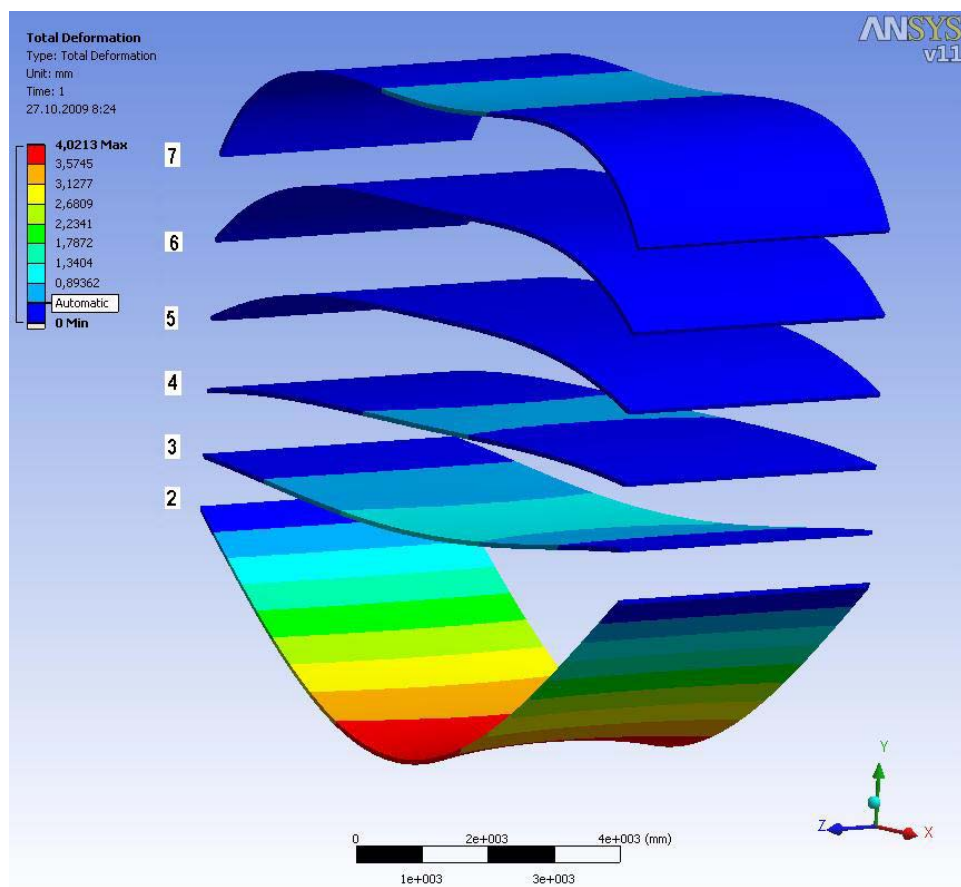
Kansiluukku	Siirtymä [mm]	Keskikohdan korkeus [mm]	Kaarevuussäde [mm]
1	185,570	0	-
2	4,021	200	59500
3	1,040	400	29900
4	0,502	600	20100
5	0,295	1000	12400
6	0,384	1500	8670
7	0,661	2000	6940



Kuva 4.1.3, kaavio kansiluukkujen siirtymistä kaikilla luukuilla, ja kun luukku 1 on rajattu pois

Kun poistetaan suora kansiluukku ja skaalataan muodonmuutokset 830-kertaisiksi, nähdään miksi siirtymät alkavat uudestaan kasvaa vaikka kaarevuus lisääntyy (kuva 4.1.4).

Kaarevammat luukut alkavat puristua sivuille päin, kun taas sopivalla kaarevuudella oleva luukku säilyttää muotonsa. Tämä johtuu levyjen sivusuunnassa jäykästä tuennasta. Jos reunat olisivat vapaasti tuetut sivusuunnassa, olisi kaarevin levy jäykin.



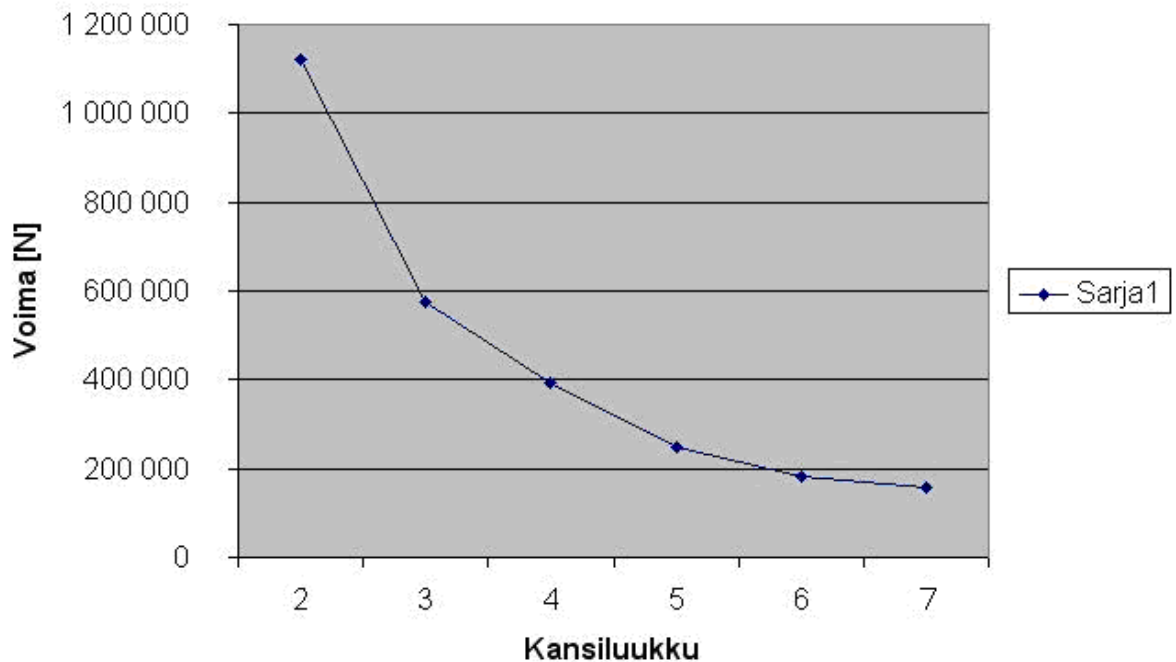
Kuva 4.1.4, siirtymät, kun muodonmuutokset on skaalattu 830-kertaisiksi

4.2 Kaarevuuden vaikutus tukirakenteisiin kohdistuviin voimiin

Tutkitaan kuuden jäljelle jääneen luukun tukirakenteisiin aiheuttamia voimia. Kuten taulukosta 4.2.1 ja kuvasta 4.2.1 voidaan nähdä, voimat pienenevät eksponentiaalisesti kaarevuuden lisääntyessä. Pienillä kaarevuuksilla ongelmana on suurien voimien lisäksi myös lommahdusvaara.

Taulukko 4.2.1, kaarevien luukkujen aiheuttamat voimat

Kansiluukku	x-akselin suuntainen voima [N]	y-akselin suuntainen voima [N]	Kokonaisvoima [N]
2	1 115 400	93 640	1 119 400
3	567 680	93 954	575 400
4	380 370	94 477	391 930
5	229 940	96 137	249 230
6	154 930	99 331	184 040
7	117 550	103 700	156 750

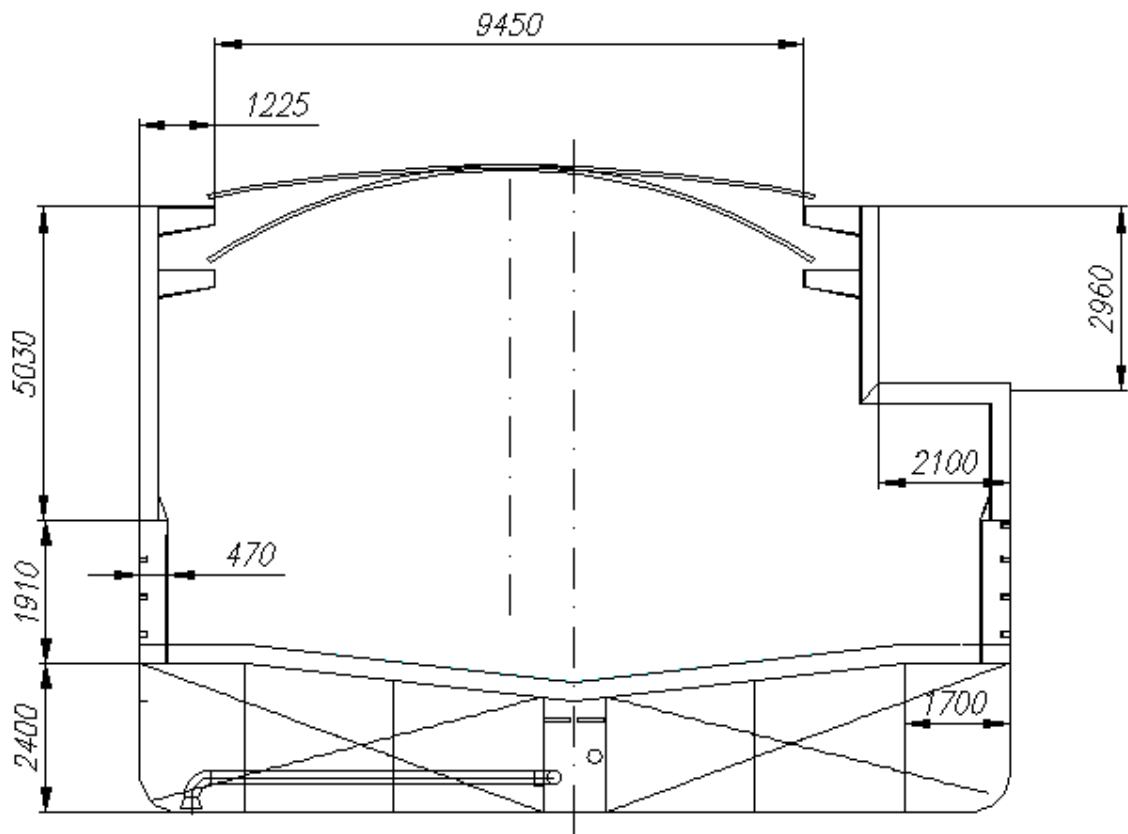


Kuva 4.2.1, kaavio kansiluukkujen aiheuttamista voimista

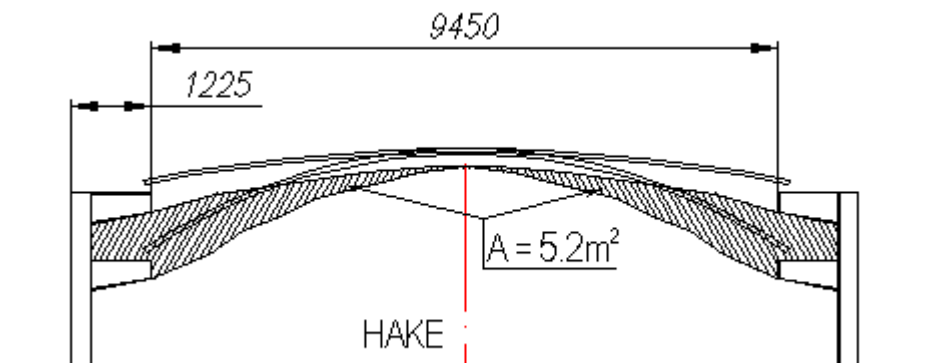
Maksimi lumikuormaa ei esiinny laivan ollessa käytössä, vaan mahdollisesti tilanteessa, jossa laiva joutuu olemaan satamassa käyttämättömänä koko talven. Tällaisessa tilanteessa voidaan asentaa kiristysvaijerit luukkujen alle lastiruuman runkopalkista toiseen. Tällöin seinien mitoituksessa ei tarvitse huomioida ylimääräistä sivusuuntaista kuormaa, joka ei välttämättä koskaan toteudu.

4.3 Kaarevuuden vaikutus lastiruuman tilavuuteen

Optimaalista kaarevuutta haettaessa pitää lujuuden lisäksi huomioida myös kaarevuuden vaikutus lastiruuman tilavuuteen. Koska laivan korkein kohta on kansiluukkujen korkein kohta, lastiruuman tilavuus on sitä pienempi mitä kaarevampia kansiluukut ovat (kuvat 4.3.1 ja 4.3.2).



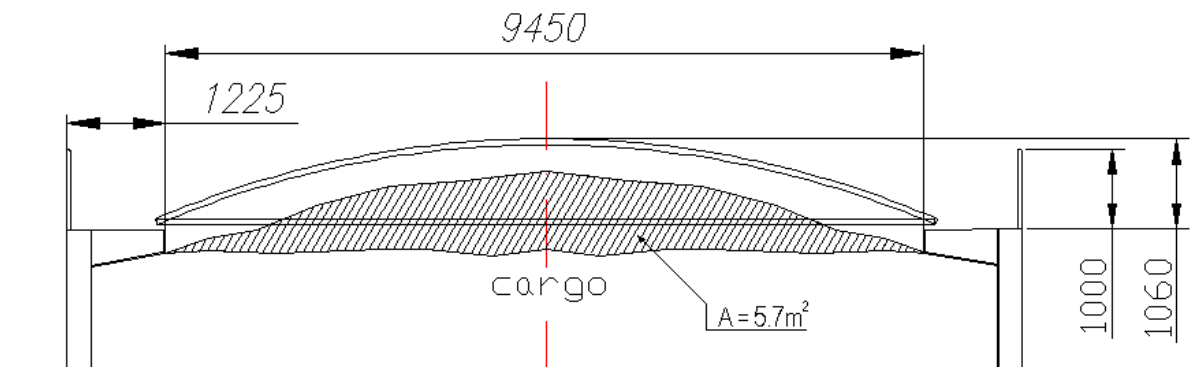
Kuva 4.3.1, kansiluukkujen kaarevuuden vaikutus lastiruuman tilavuuteen



Kuva 4.3.2, kansiluukkujen kaarevuuden vaikutus lastiruuman tilavuuteen

Lisäksi pitää huomioida Bureau Veritaksen ja Suomen viranomaismääräykset turvakaiteille. Bureau Veritas vaatii rahtialuksen kaiteille korkeutta 700 mm /8/ ja suomen viranomaismääräykset vähintään 1000 mm /9/. Koska alus tulee seilaamaan Suomen lipun alla, pitää tässä tapauksessa noudattaa tiukempaa vaatimusta eli kaiteiden korkeudeksi tulee 1000 mm.

Kuvasta 4.3.3 huomataan, että suora luukku on huonoin vaihtoehto tilavuuden kannalta, kun huomioidaan kaiteiden vaikutus. Kansiluukuilla, joiden korkein kohta on hieman kaiteita ylempänä, lastiruuman tilavuutta voidaan kasvattaa n. 460m³.



Kuva 4.3.3, turvakaiteiden vaikutus lastiruuman tilavuuteen

Edellä mainittujen seikkojen lisäksi kaareva luukku sopii laivan yleisilmeeseen paremmin kuin suora luukku. Näin ollen jatkokehitykseen voidaan valita luukku, jonka kaarevuussäde on n. 12400 mm.

Kuvasta 4.2.1 nähdään myös, että tällä luukulla (luukku nro 5) kokonaisvoima on jo suhteellisen matalla tasolla.

Kaarevan luukun valinta sulkee ideamatriisista pois haitariluukuvaihtoehdon, koska se on toteutettavissa ainoastaan suorille luukuille. Myös geometria-kohdan suorat vaihtoehdot poistuvat käytöstä.

Seuraavaksi tutkitaan erilaisia poikkileikkausgeometrioita ja arvioidaan niiden vaikutusta kansiluukkujen painoon.

4.4 Kenno

Hitsattu teräskkenno- tai alumiinikennorakenne koostuu pintalevyistä ja niitä yhdistävästä ydinrakenteesta. Kennolla voidaan toteuttaa huomattavasti yhtenäistä levyrakennetta kevyempi ja jäykempi rakenne. /10/

Kuvassa 4.4.1 on esitetty Kenno Technin tekemä arvio jäykkyyden lisääntymisestä, kennon paksuutta kasvatettaessa. /10/

Esimerkiksi 4 mm levyyn verrattuna 2 mm pintalevyistä valmistettu 100 mm korkea kenno kantaa 2000 kertaa suuremman kuorman samalla taipumalla, vaikka paino nousee ydinten vuoksi ainoastaan n. 27 %. /11/



Paksuus (t)	Jäykkyys	Paino
1	1,0	1,0
2	7,0	1,03
4	37,0	1,06

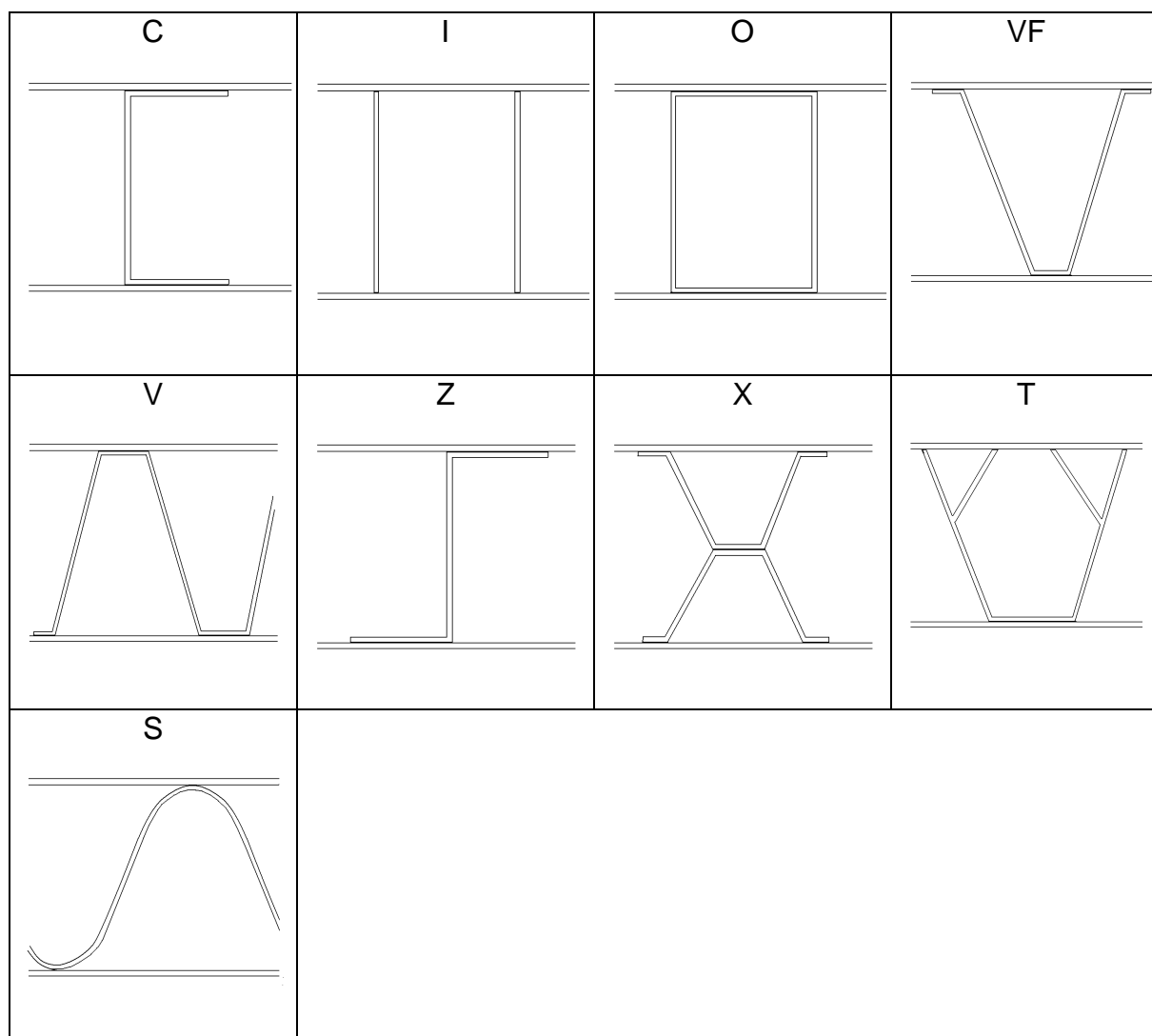
Kuva 4.4.1, kennon jäykkyys suhteessa kennon paksuuteen /10/

Kennossa voidaan käyttää monia eri materiaaleja ja esimerkiksi alumiini teräs yhdistelmiä. Käytännössä voidaan käyttää kaikkia materiaaleja ja yhdistelmiä, joita laserhitsauslaitteilla voi hitsata.

Pintalevynä voidaan esimerkiksi käyttää teräslevyä, jos pinnalta tarvitaan hyvää kulutuskestävyyttä ja pistekuorman kantokykyä, mutta silti käyttää alumiinisia ydinrakenteita ja pohjalevyä.

Erilaisia ydinvaihtoehtoja on runsaasti ja taulukossa 4.4.1 on esitetty niistä muutamia.

Taulukko 4.4.1, kennojen ydinten geometrioita



Standardin SFS-EN ISO 14122-2 mukaan koneiden kiinteiden kulkuteiden pitää kestää 1,5 kN kuormitus, joka kohdistuu 200 mm x 200 mm alueelle. Tämä, lumikuormaan verrattuna, pistemäinen kuormitus jäljittelee ihmisen ja mukana olevien työkalujen painoa. /12/

Lähtövaatimuksena oli, että rakenteen tulee olla mahdollisimman kevyt. Eli tässä tapauksessa se tarkoittaa mahdollisimman ohutta pintalevyä. Ajatellaan siksi tuon 1,5 kN voiman kohdistuvan 125 mm halkaisijaltaan olevan ympyrän alalle. Tämä vastaa yhden päkiän varassa seisovaa ihmistä.

Tasaisen kuormituksen kannalta ei ole suurtakaan eroa, millainen ytimen muoto on, mutta pistemäistä kuormitusta tarkasteltaessa saadaan aikaan eroja suhteellisiin poikkileikkauksen massoihin.

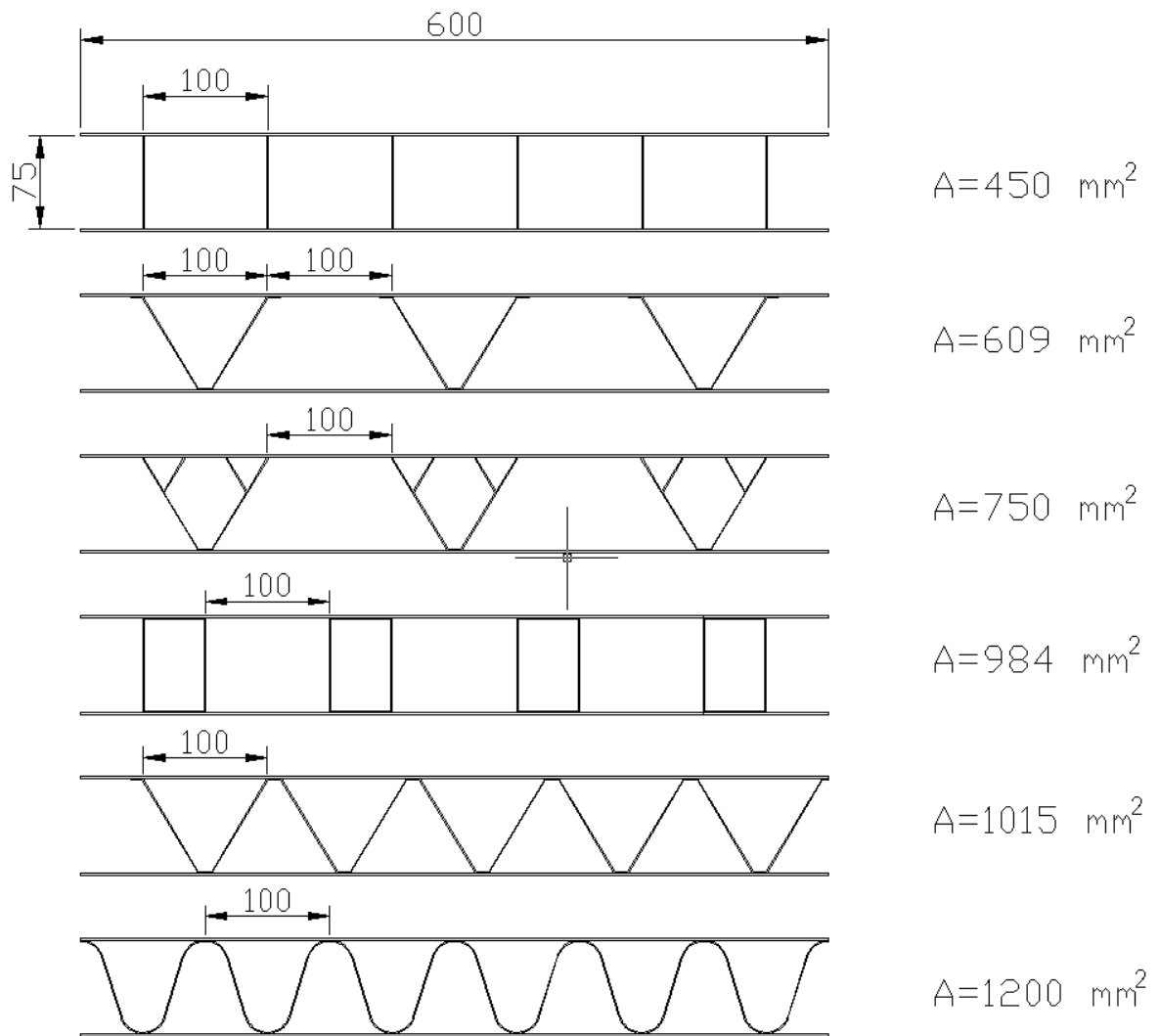
Kuvassa 4.4.2 on vertailtu ydinten suhteellisia pinta-aloja 600 mm leveältä alueelta. Kuvassa näkyvät pinta-alat ovat kyseisellä alueella olevien ydinten yhteenlasketut pinta-alat. Ydinten paksuudeksi on valittu 1 mm.

Ydinten suurimmaksi sallituksi etäisyydeksi valitaan tässä vaiheessa 100 mm, ettei ihmisestä aiheutuva pistekuormitus aiheuta lommahdusta pintalevyyn. Väliä voidaan kaventaa jatkossa, jos lujuuslaskelmien tulokset antavat siihen aihetta. Tässä vaiheessa kuitenkin riittää likiarvoinen tarkastelu ydinten välillä.

Kuvasta nähdään, että pienin mahdollinen pinta-ala saavutettaisiin I-tyyppin ytimillä. Niiden huonona puolena ovat korkeammat valmistuskustannukset, johtuen ytimien hitsausvaiheessa vaadittavasta tarkasta paikoituksesta.

I-tyyppistä johdetut muunnelmät C ja Z olisivat helpompia hitsata, mutta kuten I-tyyppiltäkin, myös näiltä puuttuvat hyvät lujuusominaisuudet pistemäisessä sivukuormitustilanteessa. Tällä tarkoitetaan luokkuun jalkojen kautta kohdistuvaa sivuttaissuuntaista siirtovoimaa.

Näiden jälkeen seuraavaksi kevyin ydintyyppi on VF, joka on myös halpa ja helppo valmistaa. Ydin voidaan taivuttaa levystä ja se on helppo hitsata kiinni tasaisista kohdista. Paikoitus on helppoa, koska ydin pysyy tukevasti pystyssä, kun ensin hitsataan kiinni pintalevy. Tällä tyyppillä on myös hyvät sivuttaissuuntaiset jäykkyyso ominaisuudet.



Kuva 4.4.2, ydinten suhteelliset pinta-alat

Kennon keventämiseksi keksittiin myös keino, jollaista ei ilmeisesti ole aiemmin käytetty.

Yleensä kennot ovat suorita, jolloin on pakko käyttää yhtenäistä alalevyä lujuusominaisuuksien säilyttämiseksi pituus- ja leveyssuunnissa.

Kaarevan kennon tapauksessa voidaan alalevy korvata tasaisin välein asetelluilla levysuikaleilla, koska kaareva muoto itsessään jäykistää kennon pituussuunnassa ja lisäjäykkyyttä tarvitaan vain leveyssuunnassa.

Tehdään karkea arvio painon pienenemisestä. Korvataan yhtenäinen alapinta esim. 50 mm x 1 mm suikaleilla ja asettamalla ne 500 mm välein. Oletetaan luukun olevan n. 10 m pitkä, jolloin suikaleita tarvitaan n. 20 kappaletta. Päädyistä katsottuna suikaleiden pinta-ala on n. 50 mm x 1 mm x 20=1000 mm². Yhtenäisen levyn päätyypinta-ala on 10000 mm². Pinta-ala pienenee 90 %, ja koska päädyn pinta-ala on suoraan verrannollinen tilavuuteen ja sitä kautta massa, voidaan olettaa, että tällaisella ratkaisulla on mahdollista pudottaa 90 % alapintalevyn massasta. Koko rakenteeseen suhteutettuna massa putoaisi n. 22 %.

Lujuuslaskennan yhteydessä tutkitaan tarkemmin, kuinka leveitä ja millä etäisyydellä toisistaan suikaleiden tulee olla.

Pitää myös arvioida muuttuuko valmistus hankalammaksi levysuikaleita käytettäessä ja millaiset vaikutukset sillä on valmistuskustannuksiin.

4.5 Sandwich

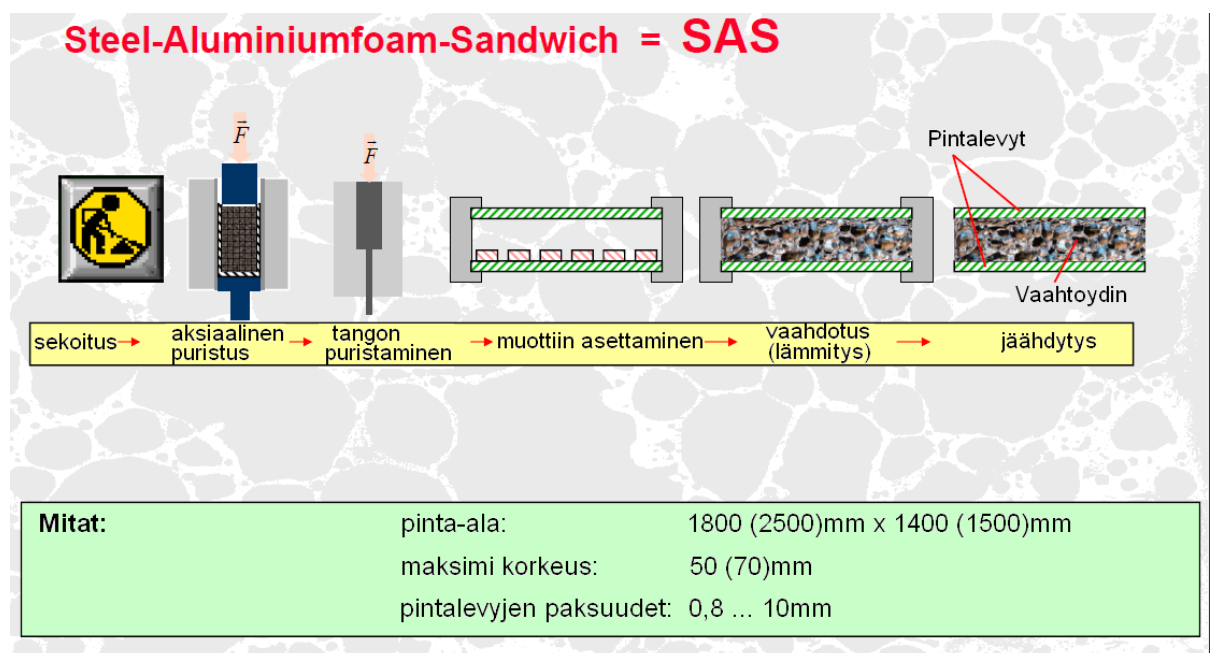
Sandwich-rakenteilla on kuten kennoillakin, kolme eriteltävää osaa: pinta- ja pohjalevy sekä ydinmateriaali. Joissain tapauksissa kennojen katsotaan kuuluvan sandwich-rakenteisiin, mutta tässä työssä ne käsitellään erikseen, koska halutaan korostaa eroja ns. onttojen ja yhtenäisten ydinmateriaalien ominaisuuksissa.

4.5.1 Vaahtomainen alumiini

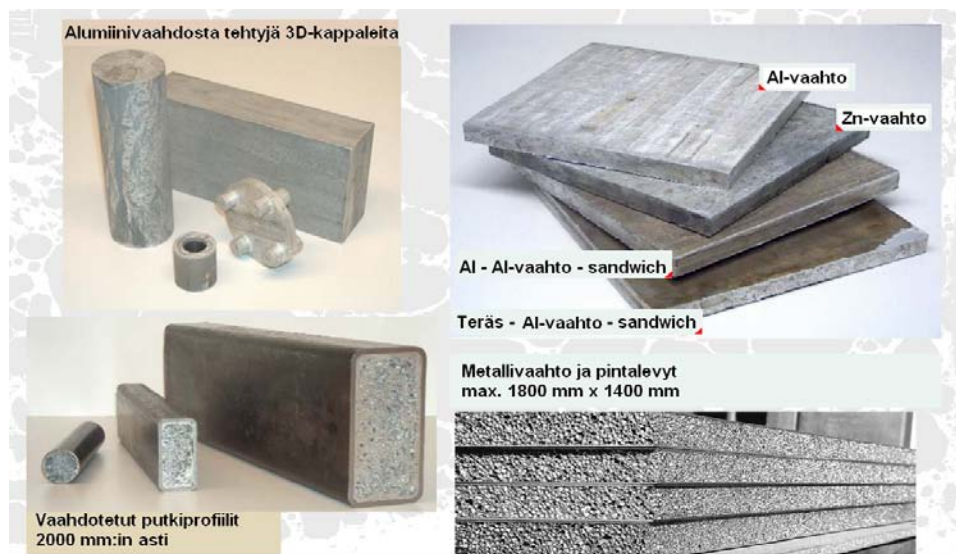
Vaahtomainen alumiini on suhteellisen uusi keksintö, jonka käyttöä laivanrakennuksessa vaikeuttaa puuttuvat viranomaisvaatimukset materiaalille. Etenkin kantavissa rakenteissa pitää kyetä todistamaan, että vaahtomaisesta alumiinista valmistettu rakenne täyttää perinteisille materiaaleille asetetut vaatimukset.

Kuvassa 4.5.1.1, on esitetty pääpiirteissään vaahtomaisen alumiinin valmistusprosessi. Alumiini jauhetaan hienoksi jauheeksi, johon sekoitetaan tarvittavat lisäaineet. Jauheseoksesta puristetaan pellettejä, jotka asetetaan muotin sisään. Muotin osana voi toimia valmiin rakenteen pintalevyt, kuten kuvassa, mutta pintalevyjä ei ole pakko käyttää. Jos pintalevyjä ei käytetä, vaahto laajenee muottiin asti ja pinnasta tulee sileää. Jos halutaan nähdä huokoinen rakenne, sileä osa leikataan pois. Kuvassa 4.5.1.2 on esitetty erilaisia tuotteita, joista osa on valettu suoraan muottiin, osa putkiin ja osa pintalevyjen väliin. Ydinaineena voi olla muitakin metalleja kuin alumiini, esim. kuvassa 4.5.1.2 on yhdessä tuotteessa käytetty sinkkivaahtoa. /13/

Valmistusprosessin pääpiirteisestä kuvasta (4.5.1.1) nähdään tuotteiden maksimikoot. Leveyttä rajoittaa lämmityslaitteiston koko ja saatavilla olevat levykoot. Paksuudessa ongelmana on pellettien asettelu. /13/



Kuva 4.5.1.1, vaahtomaisen alumiinin valmistusprosessi ja mitat /13/

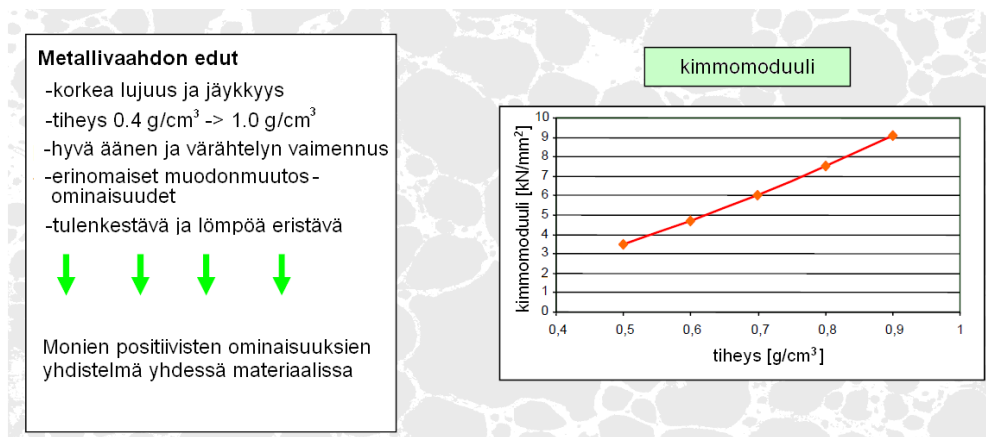


Kuva 4.5.1.2, erilaisia metallivaahdotuotteita /13/

Kuvassa 4.5.1.3 on esitelty vaahtomaisen alumiinin ominaisuuksia. Tässä sovelluskohteessa merkittävimmät ominaisuudet ovat korkea lujuus ja jäykkyys, sekä pieni tiheys. Vaahtomainen alumiini on vettä kevyempää ja umpinaisen solurakenteensa ansiosta se on myös vesitiivistä.

Tulenkestävyydestä, lämmöneristävyydestä, äänen ja värähtelyn vaimennuksesta on hyötyä esimerkiksi miehistötilojen seinien, lattioiden ja kattojen rakenteissa.

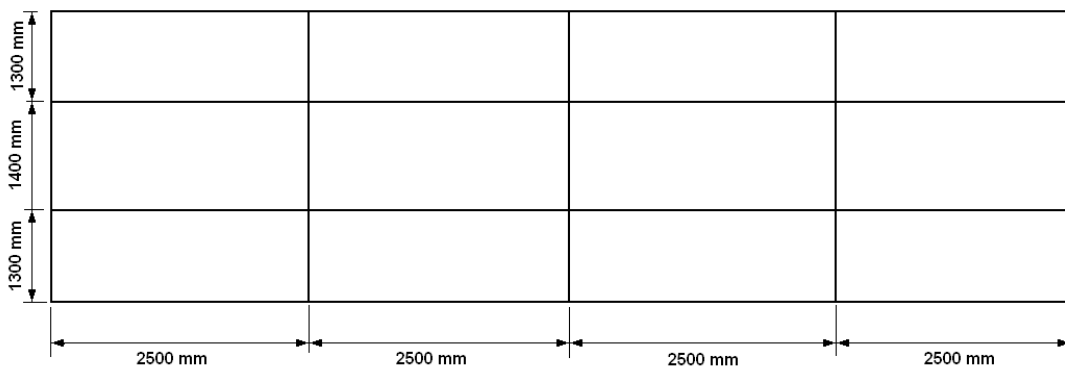
Kimmomoduuli on lähes suoraan verrannollinen alumiinivaahdon tiheyteen vaihdellen välillä 3,5 – 10 GPa. Kiinteän alumiinin kimmomoduuli on 70 GPa.



Kuva 4.5.1.3, vaahtomaisen alumiinin ominaisuudet /13/

Kansiluukun mitat ovat n. 10 m x 4 m, joten luukussa pitäisi yhdistää monta erillistä levyä (kuva 4.5.1.4).

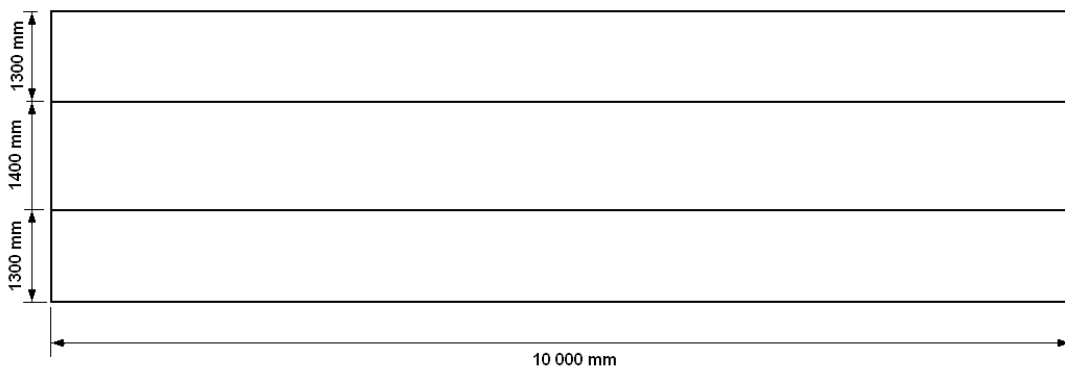
Sandwich-rakenteiden yhteen liittämistä vaikeuttaa ydinmateriaali. Huokoista alumiinia ei voida esim. hitsata, jolloin ainoastaan pintalevyt voidaan liittää kiinteästi toisiinsa. Ydinaineeseen jää siis epäjatkuvuuskohtia, jotka heikentävät rakennetta ja jotka pitää ottaa huomioon lujuuslaskentavaiheessa.



Kuva 4.5.1.4, kansiluukku valmistettuna levyaloista, ylhäältä katsottuna

Aiheesta pidetyssä palaverissa (6.10.2009) Fraunhofer instituutin edustaja Thomas Hipke totesi, että prosessi on mahdollista muuttaa jatkuvaan muotoon, jolloin voitaisiin valmistaa suoraan 10 m:n pituisia ja 1,4 m:n levyisiä aihioita.

Tällöin levyt pitäisi liittää vain sivuistaan (kuva 4.5.1.5) ja rakenne olisi kyseisessä kuormitustapauksessa käytännössä yhtä vahva kuin täysin yhtenäinen levy.



Kuva 4.5.1.5, kansiluukku valmistettuna pituussuunnassa yhtenäisistä levyaloista, ylhäältä katsottuna

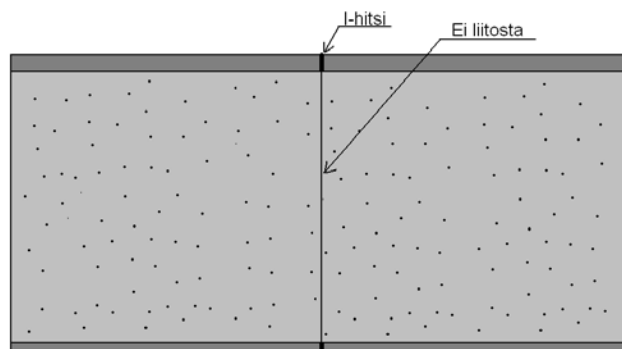
Tässä tapauksessa liittämiskeinoina voitaisiin harkita myös hitsausta, koska liitosten täytyy kestää ainoastaan siirrosta aiheutuva sivuttaissuuntainen voima. Liitostyyppin hyvänä puolena on vesitiiviys (kuva 4.5.1.6).

Muina liittämistapoina voisi käyttää alumiiniprofiilin avulla tapahtuvaa lukitsemista tai ruuviliitosta. Kummassakin liitostavassa rajapintana toimiva kappale muodostaa kiinteän liitoksen ydinaineen kanssa ja lisäksi se voidaan hitsata kiinni pintalevyihin (kuvat 4.5.1.7 - 9).

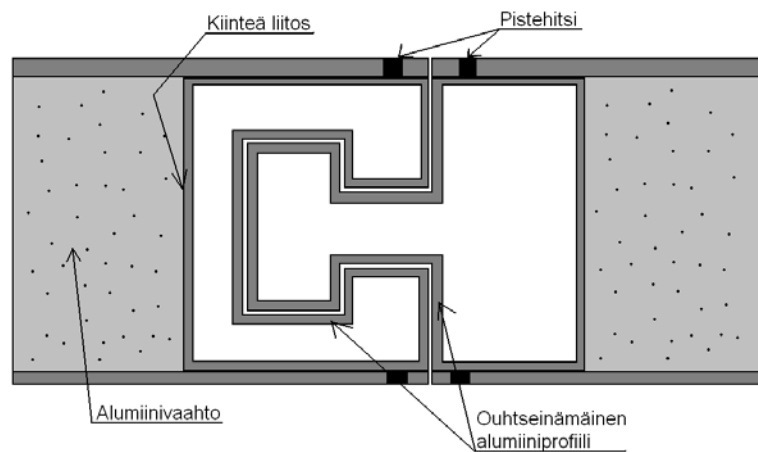
Alumiiniprofiililla liitettäessä, voidaan käyttää profiilia, joka liu'utetaan paikoilleen päädyistä. Periaatteessa tämän pitäisi onnistua kaarevillekin muodoille, kun kaarevuussäde on sama. Pitää vain löytää sopivan väljä profiili, etteivät valmistusepätarckkuudet jumiuta osia ennen kuin ne ovat paikoillaan.

Toinen vaihtoehto on käyttää lukittuvaa profiilia, joka painetaan paikoilleen sivusuunnassa.

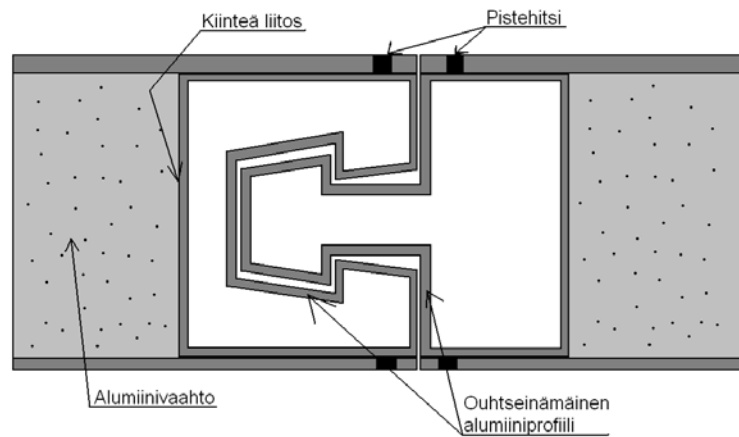
Tällaisilla profiileilla toteutettu liitos on myös siinä mielessä vesitiivis, että kaarevassa luukussa, rakoon tihkuva vesi ohjautuu luukun reunalle toisin kuin ruuviliitoksen tapauksessa.



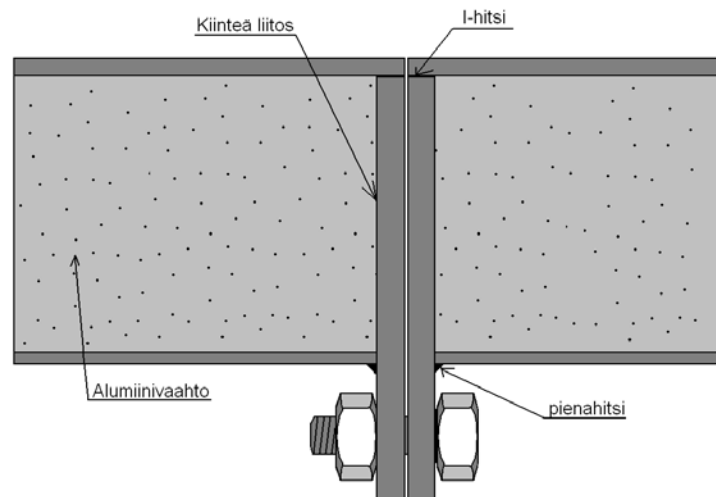
Kuva 4.5.1.6, hahmotelma levypalojen liittämistavasta



Kuva 4.5.1.7, hahmotelma levypalojen liittämistavasta

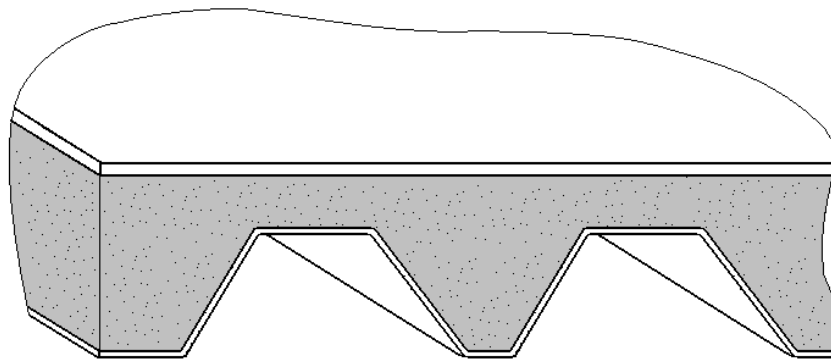


Kuva 4.5.1.8, hahmotelma levypalojen liittämistavasta



Kuva 4.5.1.9, hahmotelma levypalojen liittämistavasta

Lujuuslaskentavaiheessa voidaan myös tutkia kuinka paljon rakennetta voitaisiin keventää tekemällä rakenteeseen kuvan 4.5.1.10 mukaisia jäykisteitä. Pituussuuntaisten jäykisteiden lisäksi levyissä voisi olla sivuttaisia jäykisteitä, mutta ne sulkisivat pois jatkuvan prosessin mahdollisuuden. Tästä syystä on parempi tutkia kuinka tiheässä ja minkä paksuisia jäykisteiden tulisi olla, jotta päästäisiin parhaaseen lopputulokseen.



Kuva 4.5.1.10, jäykistetty sandwich-rakenne



4.5.2 Polyuretaani

Sandwich-rakenteessa, jossa ydin on toteutettu polyuretaanivaahdolla, voidaan käyttää pintalevyinä esim. lasikuidulla vahvistettuja muovilevyjä tai alumiini- ja teräslevyjä.

Polyuretaanilla on erinomainen tarttuvuus ja sitä voidaan vielä parantaa esimerkiksi hiekkapuhaltamalla pintalevyjen sisäpinnat. /14/

Polyuretaanivaahdon tiheys on $30 - 40 \text{ kg/m}^3$. Monessa yhteydessä mainitaan, että polyuretaanilla on hyvät lujuusominaisuudet, mutta lujuuslaskennassa tarvittavaa kimmomoduulia harvemmin ilmoitetaan. Polyuretaanin puristus- ja vetolujuus on $100 - 250 \text{ kPa}$ eli $0,1 - 0,25 \text{ MPa}$. /15/

Finnfoamin eli suulakepuristetun polystyreenin lujuusominaisuuksista saa helpommin tietoa, mutta luukun valmistus ei onnistu ruiskuttamalla, vaan valmiista levypaloista liimaamalla. Normaali levykoko on 600 mm x 2500 mm. Finnfoamin tekniset tiedot on esitelty kuvassa 4.5.2.1. /16/

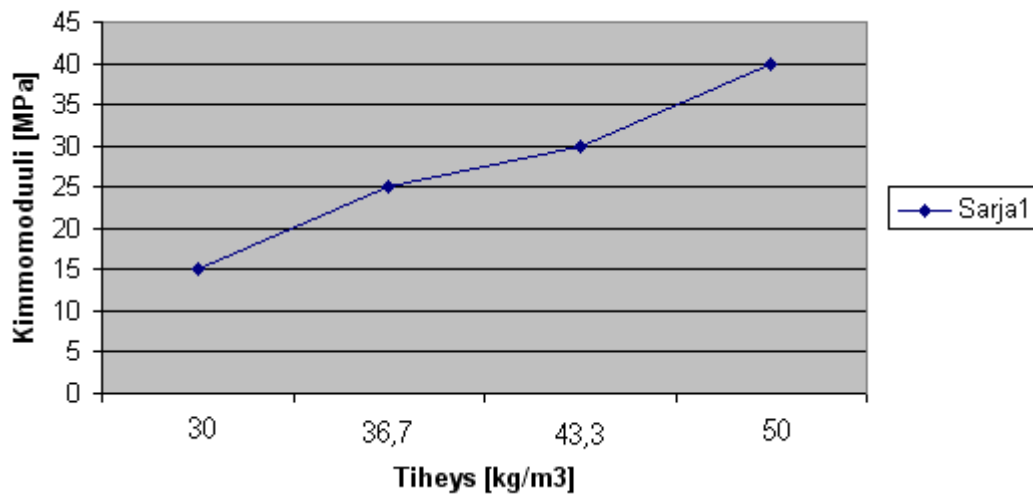
	FI-300	FI-400	FI-500	FI-700
Paksuus	20, 30, 40, 50 60, 70, 80, 100	30,40,50,60, 70,80,100	50,60,70 80,100	50
Pituus x Leveys	2500 x 600	2500 x 600	2500 x 600	2500 x 600
Reunamuoto	Suora 	Suora 	Suora 	Suora 
Puristuslujuus lyhytaikainen (kPa)	300	400	500	700
Puristuslujuus lyhytaikainen 45 vrk:n iässä (kPa)	250	300	400	
Puristuslujuus pitkäaikainen (kPa)	150	200	250	300
Kimmomoduli (kPa)	15000	25000	30000	40000
Leikkauslujuus (kPa)	300	300	300	300
Taivutuslujuus (kPa)	500	500	500	500
Vetolujuus (kPa)	300	350	400	500
Veden imeytyminen 28 vrk (t%)	0,1	0,1	0,1	0,1
Lämpölaajeneminen [mm/(m K)]	0,07	0,07	0,07	0,07
Käyttölämpötila kuormitettuna (C°)	-150...+75	-150...+75	-150...+75	-150...+75

Kuva 4.5.2.1, Finnfoamin tekniset tiedot

Finnfoamista ei vapaudu terveydelle haitallisia aineita, se ei lahoa eikä mätäne, se kestää hyvin vettä, sillä on erinomainen eristyskyky ja sitä voidaan liimata PU-, epoksi- ja erilaisilla rakennusliimoilla. Valmistus voidaan suorittaa esim. siten, että ensin hitsataan pintalevyt yhtenäisiksi, koska ydin ei kestä hitsauksen lämpöä vaan sulaa tai syttyy palamaan. Tämän jälkeen voidaan liimaus suorittaa kaarevassa muotissa, jolloin saadaan aikaan haluttu kaarevuus. Finnfoamin paloluokka on F eikä se edistä paloa. Lujuuslaskennassa tarvittava POISSONin vakio on 0,38 ja tiheys 30 – 50 kg/m³. /17/

Kuten kuvasta 4.5.2.1 nähdään, lujuusominaisuudet paranevat luokasta FL-300 luokkaan FL-700. Oletetaan, että lujuusominaisuuksien paraneminen tarkoittaa tiheyden kasvua, kuten vaahtomaisen alumiinin tapauksessakin. Oletetaan vielä,

että paino kasvaa tasaisesti. Nyt voidaan yhdistää lujuusominaisuudet tiheyteen (kuva 4.5.2.2).

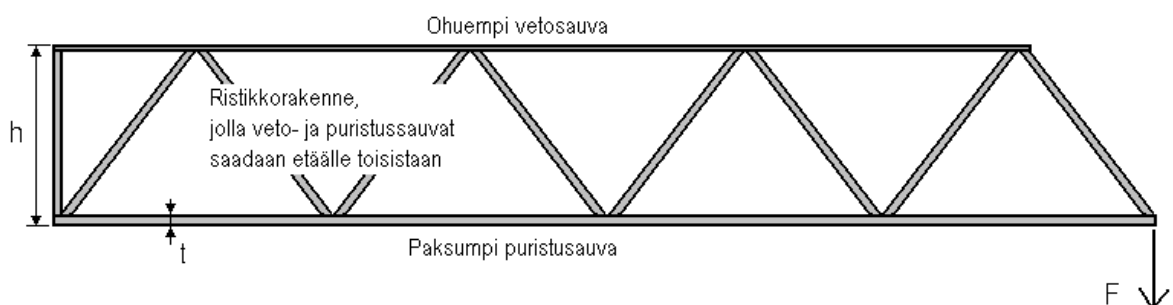


Kuva 4.5.2.2, Finnfoamin kimmomoduuli suhteessa tiheyteen

Lujuuslaskentavaiheessa voidaan varioida tiheyttä ja kimmomoduulia ja tutkia riittääkö, noin alhainen kimmomoduuli ylipäättään pitkän jännevälän omaavan rakenteen valmistamiseen (alumiini on 1750 kertaa jäykempää, kuin jäykin Finnfoam).

4.6 Ristikko

Ristikkorakenteiden jäykkyys suhteessa painoon perustuu puristus ja vetosauvoihin, jotka vievät etäälle toisistaan varsinaisen ristikko-osan avulla (kuva 4.6.1).



Kuva 4.6.1, ristikon periaatekuva

Olellainen materiaalisäästö saadaan aikaan, kun ristikon korkeus h suhteessa aineenpaksuuteen t on suuri.

Kansiluukkujen tapauksessa korkeuden h pitäisi olla mahdollisimman pieni, joten ristikoilla on vaikea päästä hyvään lopputulokseen. Ristikoiden käyttöä vaikeuttaa myös se, että niitä pitäisi olla hyvin tiheässä tai sitten pintalevyn pitäisi olla paksumpi. Ristikoiden valmistaminen on myös huomattavasti kalliimpaa kuin edellä mainittujen rakenteiden. Näiden syiden nojalla voidaan sulkea ristikkorakenteet pois jatkokehittävien rakenteiden joukosta.

5 TOIMINTOVAIHTOEHTOJEN ARVIOINTI JA MALLINUS

5.1 Toimintovaihtoehtojen hyvien ja huonojen puolien taulukointi

Nyt kun tärkeimmät toiminnot on saatu arvioitua, voidaan kohdan 3.4 ideamatriisista muodostaa uusi taulukko, jossa toteutusvaihtoehdoille merkitään niiden hyvät ja huonot puolet (taulukko 5.1). Tämän jälkeen niistä voidaan muodostaa jatkokehittävää erilaisia vaihtoehtoja.

Taulukosta poistetaan edellä olleiden kohtien perusteella sopimattomiksi katsotut vaihtoehdot.

Taulukko 5.1.1, toimintovaihtoehtojen hyvät ja huonot puolet

Geo- metria	Kaareva kenno	Kaareva Sandwich (alumiini- vaahto)	Kaareva jäykistetty sandwich (alumiini- vaahto)	Kaareva Sandwich (poly- uretaani)	Kaareva jäykistetty sandwich (polyuretaani)
Avaa ruuman	Liukuu suoraan + vie vähän tilaa ruumasta + koko ruuman saa auki - tarvitsee erillisen luukkuvaraston			Liukuu toistensa päälle + ei tarvitse erillistä luukku varastoa - puolet luukuista on eri tasolla kuin toiset (ulkonäkökysymys) - vie enemmän tilaa ruumasta - koko ruumaa ei saada kerralla auki - tarvitsee kahdet päällekkäiset kiskot	
Siirtää luukut varas- toon	Koko matkalla ketju, jossa kiinnitykset luukuille + jokaiselle luukulle kohdistuu sama siirtovoima + siirtovoima voidaan jakaa vielä kullekin luukun jalalle - tarvitaan molemmille puolille pitkät ketjut (yhteensä n. 160 m) - painava - ketjun venymä - ketjun vaihtokustannukset			Kuularuuvi + kestää hyvin kulutusta - kallis - hankala toteuttaa kyseiseen kohteeseen	Hammastanko+ hammaspyörä - ei sovellu kyseiseen kohteeseen

	<p>Levyt kytketty toisiinsa, ketju kuljettaa yhtä luukku kerrallaan</p> <p>+ lyhyt ketju +kevyt +ketjun venyminen ei muodostu ongelmaksi - siirtovoima kohdistuu yhteen luukun jalkaan molemmilla puolilla - ensimmäiseen levyyn kohdistuu huomattavasti suurempia voimia kuin viimeiseen</p>			
Levy-varaston nosto/lasku	<p>Hydraulisylinteri</p> <p>+ tarkat liikkeet + käyttövoimaa valmiiksi saatavilla + voidaan asentaa sen verran vinoon, että kiinnitys onnistuu laivan runkorakenteisiin - tarvitaan suhteellisen pitkä isku</p>	<p>Kuularuuvi</p> <p>+ tarkat liikkeet + käyttövoimaa valmiiksi saatavilla + itse pidättyvä - tarvitaan tukeva tukipalkki, jolla mekanismi viedään keskelle</p>	<p>Vaijeri</p> <p>+ käyttövoimaa valmiiksi saatavilla + halpa ja kevyt - epätarkat liikkeet - tarvi varmistuksen vaijerin katkeamisen varalle</p>	<p>Pneumaattinen Sylinteri</p> <p>- Käyttövoimaa ei valmiiksi saatavilla - epätarkat liikkeet - ei sovellu kunnolla raskaille kuormille ja pitkille iskuille</p>
Luukujen kiinnitykset	<p>Renkaat maksimivoiman suuntaan</p> <p>+ pieni kitka - vaihtelevan kuormituksen vuoksi renkaiden kulma muuttuu - renkaat kuluvat epätasaisesti - tarvitsee lisäkiinnityksen alapuolelta puhaltavaa tuulta vastaan (tapaus jossa ruumaa juuri avataan, ja tuuli pääsee puhaltamaan ruumaan) - kiskolle jäävä pöly ja hake voivat aiheuttaa ongelmia</p>	<p>Pyöreäprofiilinen rengas + pyörötangoista tehty tuki</p> <p>+ pieni kitka + kulman muuttuminen ei haittaa pyöreässä renkaassa + pöly ja pienehkö hake putoavat pyörötankojen raoista - isompi puunkappale jää kouruun - tarvitsee lisäkiinnityksen alapuolelta puhaltavaa tuulta vastaan</p>	<p>Liukukisko</p> <p>+ ei tarvitse erillistä kiinnitystä alapuolista tuulta vastaan - pienehkö kitkakerroin, mutta saattaa kasvaa pölyn ja hakkeen vaikutuksesta - voiman kulman muuttumien voi aiheuttaa epätasaista kulumista - kiskoon jäävä hake saattaa jumiuttaa koko systeemin</p>	<p>Pyöreä johde + auki leikattu liukulaakeri</p> <p>+ ei tarvitse erillistä kiinnitystä alapuolista tuulta vastaan + pienehkö kitkakerroin, kiinteiden voiteluaineiden ansiosta pöly ja hake eivät tartu kiskoon. + kestää hyvin suuria kuormituksia + voima kohdistuu aina oikeassa kulmassa</p>

Ei päästä vettä/ lunta ruumaan	Luukkujen välissä tiiviste + vaimentaa luukkujen osumisen toisiinsa - ei täysin vedenpitävä - kiinnijäätyminen saattaa olla ongelma	Yläpuolinen suoja + suojaa hyvin sateelta - lumi saattaa päästä ruumaan tuulen mukana - ei vaimenna luukkujen kolahtelua (erilliset vaimentimet voidaan asentaa) - on tiellä lunta poistettaessa ja saattavat vääntyä	Alapuolinen suoja + suojaa hyvin sateelta + ei ole tiellä lunta poistettaessa - lumi saattaa edelleen päästä ruumaan - ei vaimenna luukkujen kolahtelua (erilliset vaimentimet voidaan asentaa)	Yhdistelmä + suojaa hyvin sateelta + lumi ei pääse ruumaan + ei ole tiellä lunta poistettaessa + vaimentaa luukkujen osumisen toisiinsa - kiinnijäätyminen saattaa olla ongelma
Levyvaraston paikointus	Induktiiviset rajakytkimet + mahdollistaa tarkan paikoinnituksen + ei kosketusta, eli ei kulumista + ei pölyherkkä	Vaijeritoimiset asema-anturit + mahdollistaa tarkan paikoinnituksen - pöly saattaa aiheuttaa ongelmia	Mekaaniset rajakytkimet + halpa - ei kovin tarkka paikointus - kuluminen (tässä kohteessa kuluminen minimaalista)	Optiset kytkimet + tarkka paikointus + ei kulumista - herkkä pölylle
Korroosio	Maali + suojaa hyvin - vaatii huoltoa - kennorakenteen maalaaminen sisäpuolelta vaikeaa, ellei alapinta levysuikaleista	Materiaali + oikein valittu materiaali ei vaadi huoltoa + esim. alumiini on lisäksi kevyttä	Sähkö- / kuumasinkitys + kestää hyvin makeaa vettä - suomessa ei ole tarpeeksi suuria altaita koko luukun käsittelemiseen kerralla - vaikeuttaa hitsaamista	

Lumen poisto turvalista	<p>Levyssä kohokuviointi</p> <p>+ kauttaaltaan tasalaatuinen + ei tarvitse huoltoa - levyn massa kasvaa jonkin verran (8,3 %)</p>	<p>Maali jonka seassa kitkaa lisääviä kiteitä</p> <p>+ kauttaaltaan tasalaatuinen + nostaa painoa vain vähän - tarvitsee huoltoa - saattaa kulua nopeastikin lunta poistettaessa</p>	<p>Pintaan tasavälein liimattavat karhennusnauhat</p> <p>+ nostaa painoa vain vähän - nauhojen välissä liukkaampia paikkoja - haittaavat lumen poistoa ja kuluvat</p>	<p>Koneiden hukkalämpö johdetaan sulattamaan lumi</p> <p>+ ei vaadi ylimääräistä työtä + ei nosta luukun painoa - hukkalämpö ei välttämättä riitä sulattamaan lunta - ei sovellu sandwich-rakenteille niiden lämmön-eristävyyden johdosta</p>
-------------------------	---	--	---	---

5.2 Toimintovaihtoehtojen kokoaminen rakenne-ehdotuksiksi

Työhön käytettävän ajan rajallisuuden vuoksi ei voida valita jatkokehittelyyn montaa erilaista kokoonpanoa. Taulukossa 5.2.1 on esitetty kolme erilaista rakenne-ehdotusta, joihin on pyritty valitsemaan edellä mainittujen seikkojen perusteella toimivimmat ratkaisut. Pääpaino pidetään luukkujen kehittämissä ja niistä valitaan tarkemmin tutkittaviksi muutama erilainen vaihtoehto.

Taulukko 5.2.1, toimintovaihtoehtojen kokoaminen rakenne-ehdotuksiksi

Geometria	Kaareva kenno	Kaareva Sandwich (alumiini-vahto)	Kaareva jäykistetty sandwich (alumiini-vahto)	Kaareva Sandwich (polyuretaani)	Kaareva jäykistetty sandwich (polyuretaani)
Avaa ruuman		Liukuu suoraan		Liukuu toistensa päälle	
Siirtää luukut varastoon	Koko matkalla ketju, jossa kiinnitykset luukuille			Kuularuuvi	Hammastanko+hammaspyörä
	Levyt kytketty toisiinsa, ketju kiihittää yhtä luukku kerrallaan				
Levyvaraston nosto/lasku	Hydraulisylinteri	Kuularuuvi	Vaijeri	Pneumaattinen Sylinteri	
Luukkujen kiinnitykset	Renkaat maksimivoiman suuntaan	Pyöreäpromin renkas + pyörötangoista tehty tuki	Liukukisko	Pyöreä johde + auki leikattu liukulaakeri	
Ei päästä vettä/ lunta ruumaan	Luukkujen välissä tiiviste	Yläpuolinen suoja	Alapuolinen suoja	Yhdistelmä	
Levyvaraston paikoitus	Induktiiviset rajakytkimet	Vaijerit ja mekaaniset asema-anturit	Mekaaniset rajakytkimet	Optiset kytkimet	
Korroosio	Maali	Materiaali	Sähkö- / kuumasinkitys		
Lumen poisto turvallista	Levyssä kohokuvioitu	Maali jonka seassa kitkaa lisääviä kiteitä	Pintaan tasavälein liimattavat karhennusnauhat	Koneiden hukkalämpö johdetaan sulattamaan lumi	

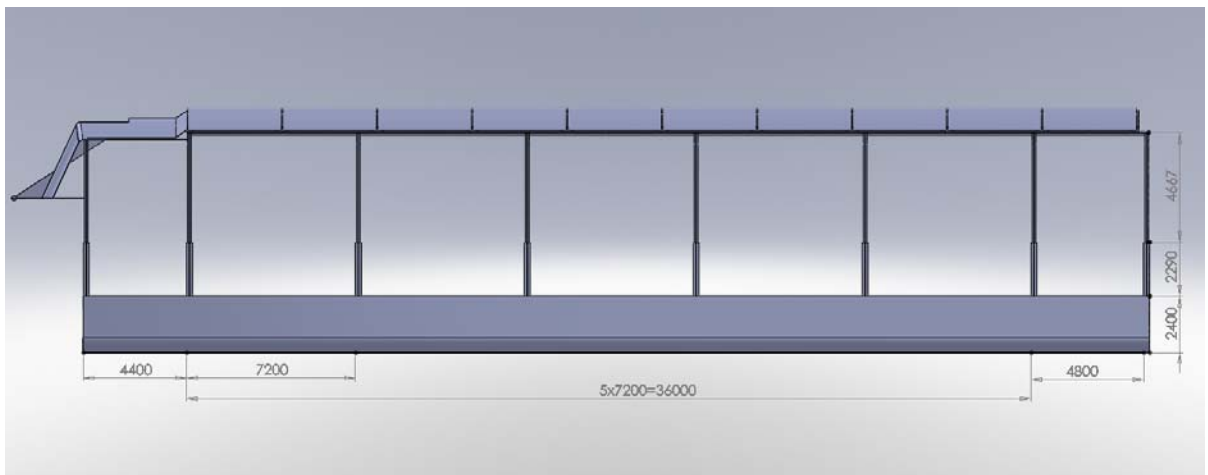
5.3 Mallinnus

3D-mallinnus suoritetaan SolidWorks 2009-ohjelmistolla. Ensimmäisissä versioissa aineenpaksuudet arvioidaan, jonka jälkeen suoritetaan lujuslaskenta kyseisillä aineenpaksuuksilla ja tehdään muutoksia, jos tarve vaatii.

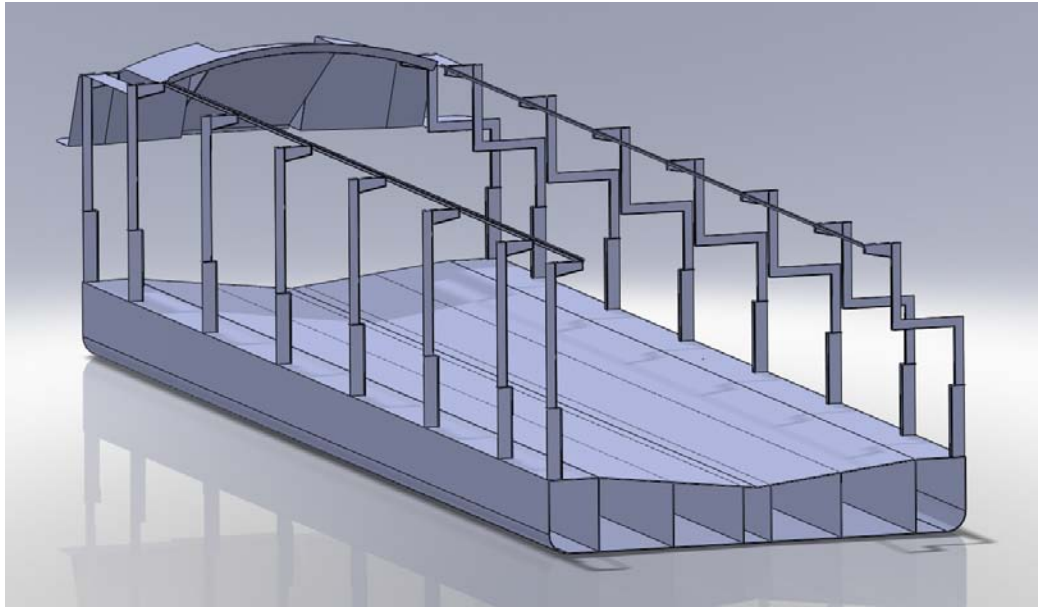
5.3.1 Ruuman mallinnus

Aluksi mallinnetaan laivan runkorakennetta ruuman osalta, liitteen 1 mukaisesti, jotta saadaan parempi käsitys tarvittavien osien mitoista. Kuvassa 5.3.1.1 on esitetty yhden ruuman päämitat. Ruumat ovat symmetriset, joten samat osat sopivat kumpaankin ruumaan.

Kuvan vasemmassa reunassa näkyy osa luokkuvaraston kohdalla olevasta kansirakenteesta. Tällä kohdalla pohja on jo keulaan päin kaareva, mutta tässä vaiheessa sitä ei vielä ole mallinnettu, koska laivan pohjan linjapiirustuksia ei ole vielä saatavilla. Oikeassa reunassa malli loppuu ruuman päätyseinään, jonka toisella puolella on tila liikkuvaksi suunnitellulle ohjaamolle. Tätä kohtaa ei mallinnettu, koska se ei vaikuta kansiluukkujen toimintaan.



Kuva 5.3.1.1, ruuman päämitat



Kuva 5.3.1.2, ruuman teräsrakenteet

5.3.2 Siirtojohteiden mallinnus

Kappaleessa 5.2, taulukossa 5.2.1 ruuman avaamistavaksi valittiin suoraan liukuva vaihtoehto ja johdetyypiksi pyöreä johde. Luukut liukuvat johteita pitkin auki leikattujen liukulaakereiden avulla.

PMC Polarteknik Oy Ab antoi tarjouksen itsevoitelevista liukulaakereista (liite 2). Johdemateriaalin pinnankarheuden eli R_a arvon tulee olla välillä 0,2 – 0,8 μm . Tämä vastaa hiomalla käsiteltyä pintaa. Lisäksi mainitaan, että pinnan Brinell-kovuus pitää olla vähintään 180 HB, ja että pinnan pitää ehdottomasti pysyä korroosiovapaana. Koneenrakentajan taulukkokirjan mukaan materiaali AISI 316 täyttää vaatimukset ja sitä on saatavissa hiottuna tankona ($\text{\O}40\text{ mm}$).

Kuvassa 5.3.2.1 on nähtävissä erilaisia itsevoitelevia Deva liukulaakereita. Laakeri koostuu pronssirungosta, johon on upotettu kiinteästä voiteluaineesta valmistettuja tappeja. Hiottu materiaali sopii johteeksi kiillotettua paremmin, koska kiinteän voiteluaineen toiminta perustuu siihen, että voiteluainetta tarttuu jonkin verran myös johteeseen. Kiillotettu pinta on liian sileä, jotta voiteluaine voisi siihen tarttua. /18/

Liukulaakereilla on pieni kitkakerroin 0,1 – 0,15 ja ne kestävät suuria kuormituksia. Sallittu staattinen kuormitus on 150 MPa ja dynaaminen kuormitus 90 MPa.

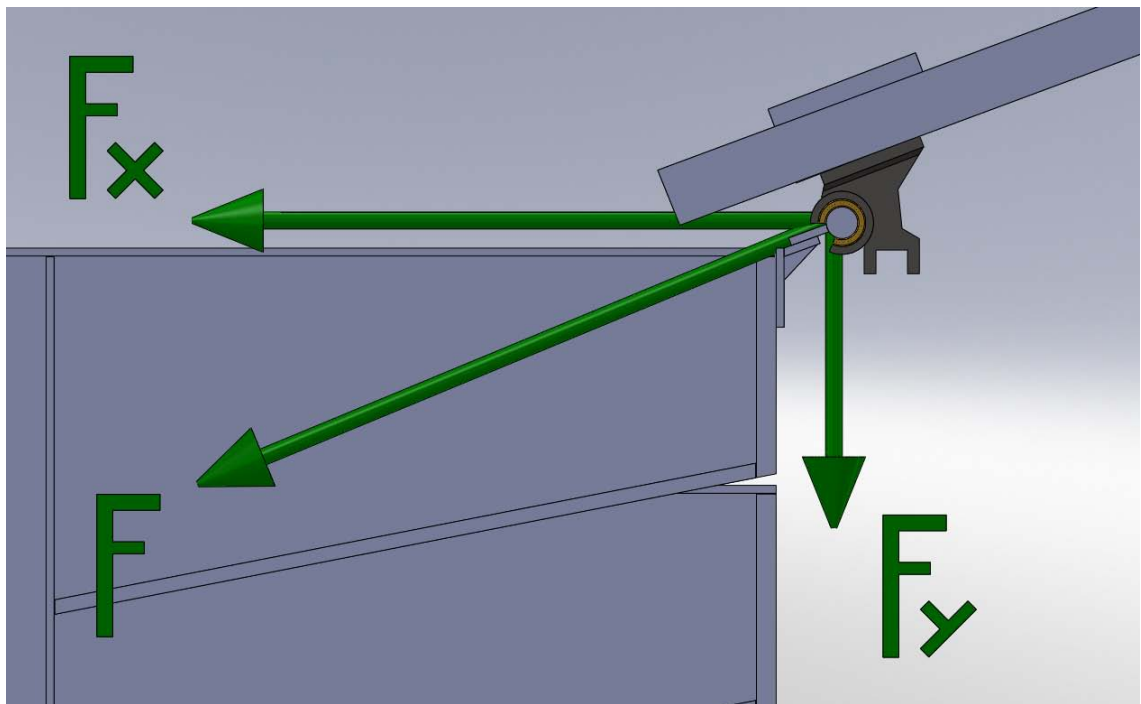


Kuva 5.3.2.1, itsevoitelevia Deva liukulaakereita /18/

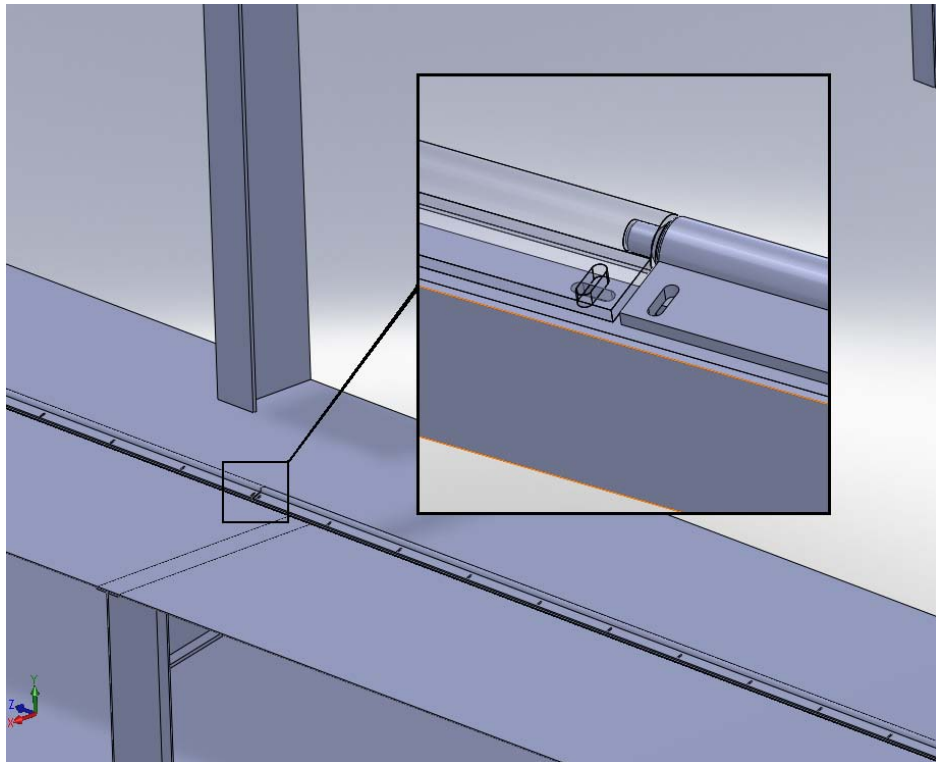
Pyöreät johteet valittiin alun perin sen vuoksi, että luukuista aiheutuva maksimivoima kohdistuu akseliin aina sopivalla tavalla. Lisäksi tämän tyyppisessä liitoksessa ei tarvita erillistä kiinnitystä pystysuuntaisia voimia varten. Tällaisia voimia ovat esim. ruuman avausvaiheessa ruumaan puhaltava tuuli, joka voi yrittää nostaa luukut paikoiltaan. Lisäksi on esitetty, että koneiden hukkalämpö voitaisiin ohjata ruumaan, jolloin hakkeen kuivatus voidaan aloittaa jo matkalla. Puhaltimien aiheuttama pienikin ylipaine aiheuttaa kohtalaisen suuren voiman luukkujen suuresta pinta-alasta johtuen. Jo 0,002 barin eli 200 Pa:n paine-ero aiheuttaa yhteen luukkuun 8000 N voiman. Luukun arvioidaan painavan n. 500 kg, joten tuolla voimalla luukku nousee jo paikoiltaan.

Voimien suunta pitää ottaa huomioon johdinten kiinnitystapaa suunniteltaessa, eli tuennan pitäisi olla maksimivoiman suuntainen (kuva 5.3.2.2). Vaikka luukut ovatkin tietyllä tavalla joustavia, ja jäykkyys lisääntyy huomattavasti vasta kun luukut asetetaan johteille, pitää johteissa silti olla säätömahdollisuus. Pätkestä valmistetut

johteet saadaan osumaan paremmin toisiinsa ja luukkujen ja johteiden välinen kitkavoima pysymään pienenä, kun kiskot ovat säädettävissä sopivalle etäisyydelle toisistaan. Kuvassa 5.3.2.3 näkyy säätöreiät, joista toiset ovat johdintankoon hitsattavassa lattatangossa ja toiset runkoon kiinteästi hitsattavassa osassa. Samassa kuvassa näkyy paikoittamisen helpottamiseksi tankojen päihin koneistettavat ohjaustapit ja kolot. Jyrsintä voidaan suorittaa ainoastaan umpinaiselle johdetangolle. Jos lujuuslaskennan tulokset viittaavat umpitangon olevan liian vahvaa, voidaan tangon tilalle harkita paksuseinämäistä putkea. Tässä tapauksessa putken hinnassa täytyy huomioida pintakäsittelykustannukset ja miettiä päiden paikoitus uudestaan.



Kuva 5.3.2.2, johdinten kiinnitys on maksimivoiman suuntainen



Kuva 5.3.2.3, siirtojohteiden liitoskohta

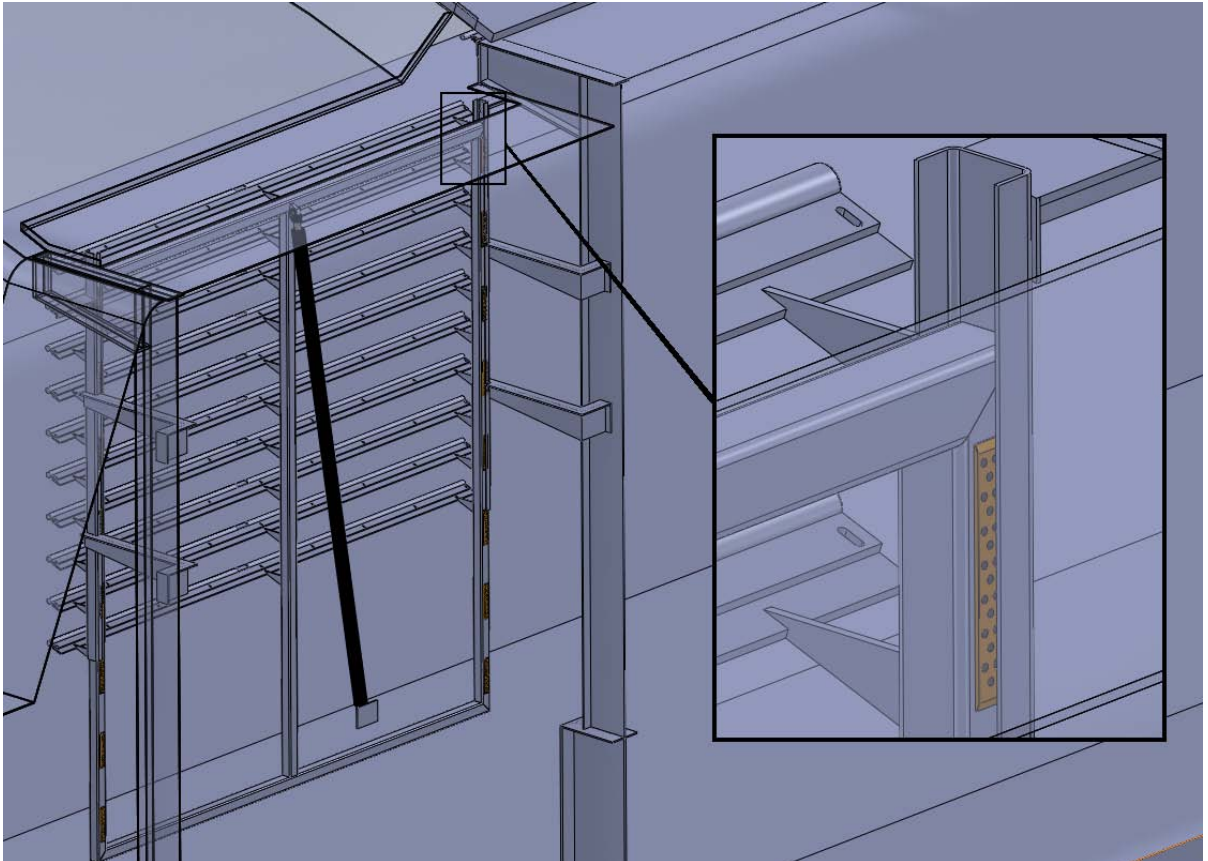
5.3.3 Luokkuvaraston mallinnus

Luokkuvaraston toimivuuden vuoksi takakantta päätettiin laskea yhden luukun matkalta alaspäin, jottei luokkuvarastossa itsessään tarvitse olla kantta. Johdannossa esitetystä hahmotelmakuvasta 1.1 on myös esitetty madallettu kansiosa, joten muotoilun puolesta tämä ratkaisu sopii hyvin laivan ulkonäköön. Laivan molempiin päihin tulee myös rampit, joita pitkin työkoneita voi ajaa ruumaan. Nämä laitteet tarvitsevat oman tilansa ja tukevat kiinnityskohdat. Luokkuvarastossa oleva kiinteä kansi olisi ramppien edessä.

Kansirakenteiden suunnittelu ei kuulu tähän työhön, joten keula-/peräkansi on mallinnettu vain karkeasti ja pääpaino tältä osin on rakenteiden tilavarauksissa.

Luokkuvaraston nosto-/laskutavaksi valittiin hydraulisylinteri hyvän paikoitustarkkuutensa ja vinon asennustavan mahdollistaman runkokiinnityksen

vuoksi. Luokkuvarasto liikkuu ylös - alas suunnassa U:n mallisten kiskojen välissä. Pintoja ei tarvitse koneistaa, koska sopiva välys voidaan hakea varaston palkkeihin kiinnitettävien tasomaisten itsevoitelevien Deva liukulevyjen avulla (kuva 5.3.3.1). Kulumistakaan ei juuri tapahdu, koska siirtomatka on lyhyt ja luukut avataan keskimäärin kaksi kertaa päivässä.



Kuva 5.3.3.1, luokkuvarasto alhaalla, osasuurennoksessa Deva liukukisko

Nostoon liittyvä paikoituksen automatisointi ei kuulu tähän työhön, mutta alustavasti mietittiin erilaisia anturointivaihtoehtoja ja tapaa, jolla paikoitus hoituu tarpeeksi tarkasti.

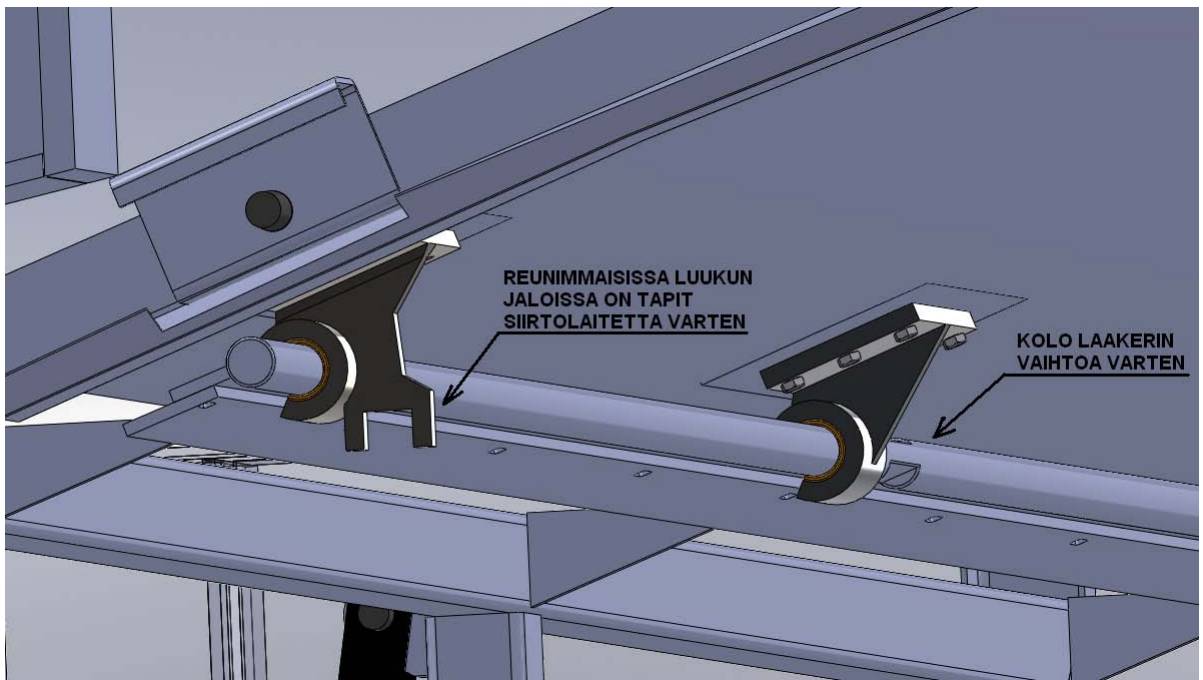
Antureiksi valittiin induktiiviset raja-anturit, koska niillä paikoitus onnistuu tarkasti eivätkä ne ole herkkiä pölylle. Ruuman molemmilla puolilla on samanlaiset anturit, joista lähtee pysäytyssignaali, kun luokkuvaraston johteet ovat ruuman johteiden

kanssa kohdakkain. Siirtojärjestelmä lähtee liikkeelle vasta, kun molemmilta antureilta on tullut signaali. Kuvassa 5.3.3.2 luukkuvarasto on yläasennossa.



Kuva 5.3.3.2, luukkuvarasto on ylhäällä

Luukkuvarastossa jatkuu samanlaiset johdekiskot, kuin ruuman sivuillakin. Varasto on suunniteltu siten, että luukkujen huolto voidaan suorittaa varastossa. Käytännössä luukuissa ei ole muita vaihdettavia osia kuin liukulaakerit. Liukulaakereiden kiinnittämiseen on erilaisia tapoja, kuten alijäähdytys, pesään puristus, liimaaminen Loctite-liimalla tai lukitsemalla esim. lukkorenkaalla tai ruuvilla. Devan tarjouksessa (liite 2) ehdotetaan, että laakerit kiinnitetään liimaamalla. Laakereiden vaihto on suunniteltu siten, että reunimmaisat laakerit voidaan vaihtaa johteiden päistä liu'uttamalla. Keskimmäisten laakerien vaihtoa varten johdetta on kavennettu sen verran, että laakerin saa liu'utettua paikoilleen. Liimakiinnityksessä pitää miettiä, saako vanhan laakerin helposti irtoamaan esim. holkin avulla lyömällä, vai pitääkö koko kiinnitysalku irrottaa laakerin vaihtamista varten (kuva 5.3.3.3).



Kuva 5.3.3.3, keskimmäisen laakerin vaihtoa varten ohennettu johde

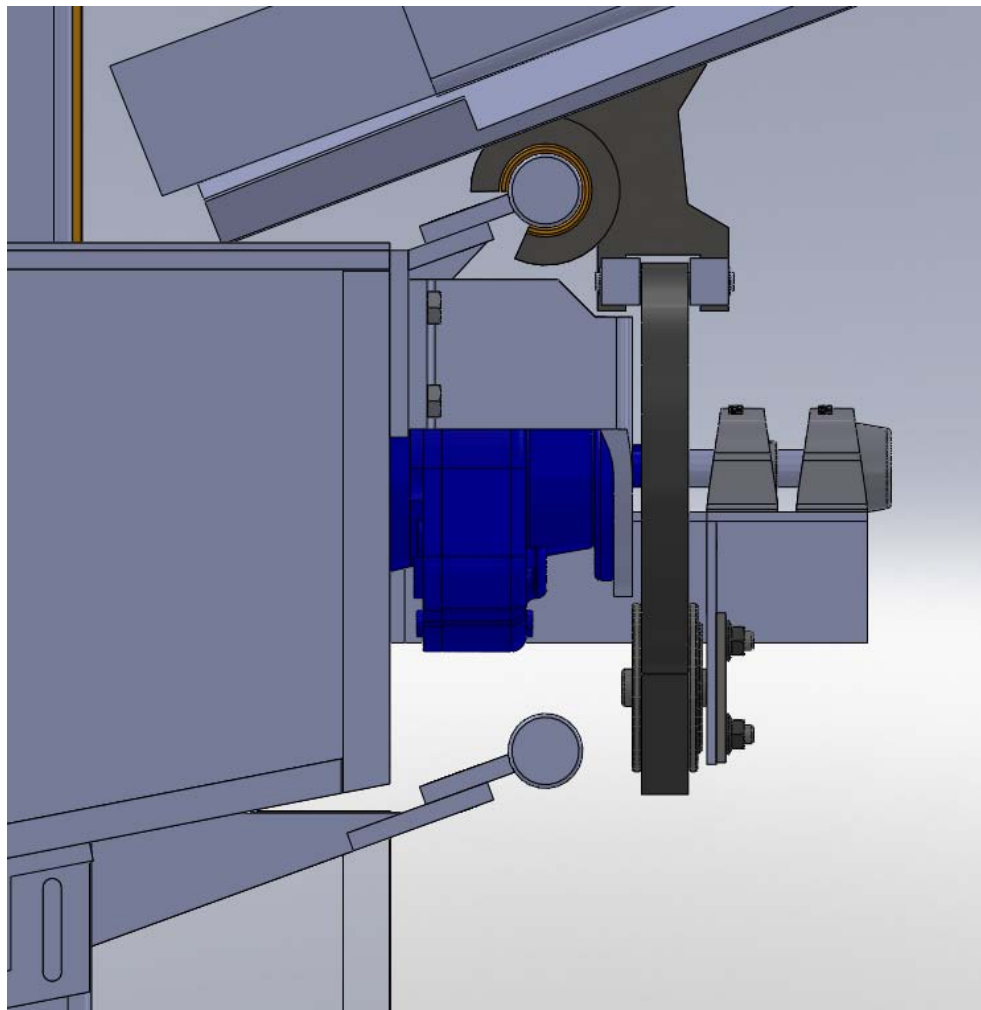
5.3.4 Siirtojärjestelmän mallinnus

Siirtojärjestelmässä päädyttiin ratkaisuun, jossa ruuman molemmilla reunoilla on kuvan 5.3.4.1 mukaiset laitteet. Painon pienentämiseksi ketju suunniteltiin yltämään hieman yhtä luukku pitemmälle matkalle. Ketju olisi voitu ulottaa koko ruuman matkalle, jolloin jokaiselle luukulle olisi voinut olla omat tartuntansa. Tällöin jokaiseen luukkuun olisi kohdistunut vain sen itsensä liikuttamiseen tarvittava voima ja luukun jalat ja tukilevyt olisi voitu tehdä kevytrakenteisemmiksi. Myös kiinnityskoukut olisivat jääneet kokonaan pois. Tässä tapauksessa ketju kuitenkin olisi tukirullineen ja kiristyspyörineen painanut huomattavasti enemmän, kuin painoa olisi säästetty keventyneissä rakenteissa.

Toinen vaihtoehto olisi ollut tehdä ketjusta suurin piirtein puolen luukun pituinen. Tällöin ketjussa oleva siirtopala (kuva 5.3.4.2) työntää luukku eteenpäin vuorotellen kustakin luukun kolmesta jalasta. Tässä tapauksessa ketju on kevyempi, mutta luukut pitää kytkeä toisiinsa koukuilla ja lisäksi keskijalan ja sen tukilevyn pitää olla yhtä kestäviä kuin, reunimmaistenkin jalkojen.

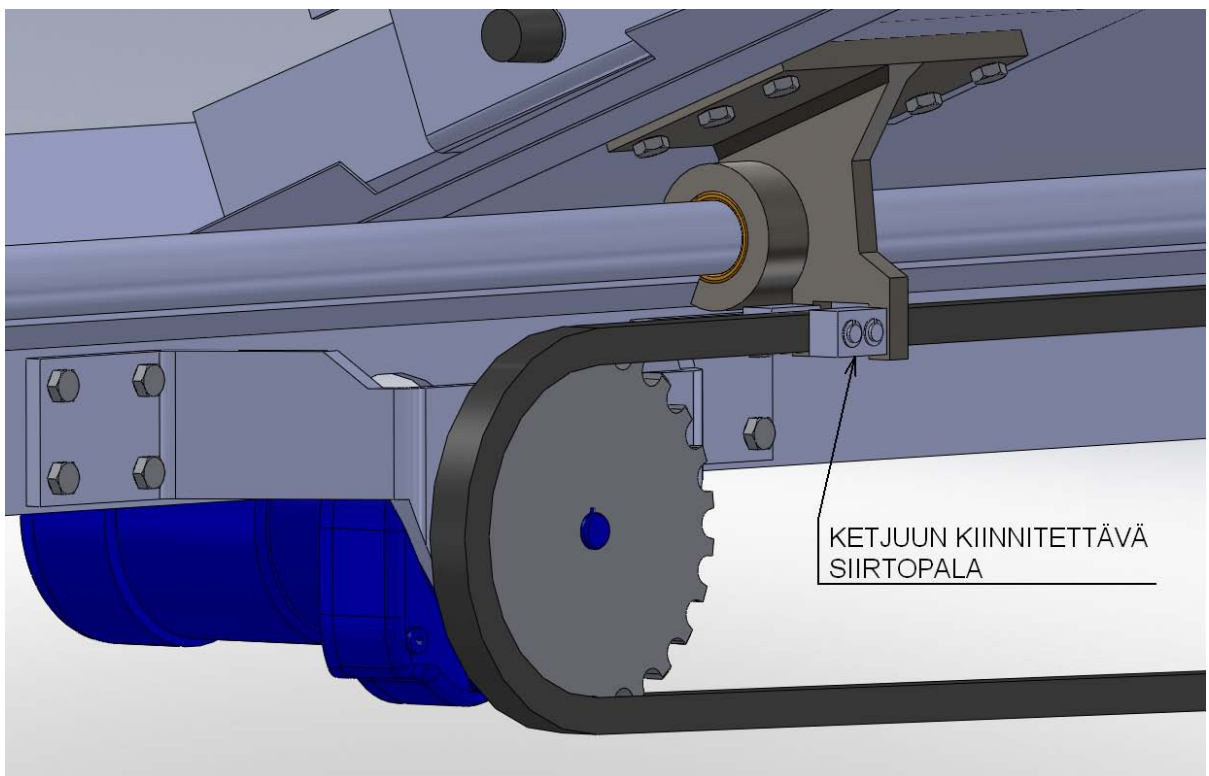
Kaiken kaikkiaan kevyimmäksi vaihtoehdoksi muodostuu tilanne, jossa ketju yltää yhden luukun alueelle ja työntää ainoastaan reunimmaisista jaloista, jolloin keskimmäistä jalkaa voidaan keventää ja sen tukilevyä pienentää. Siirtämisestä aiheutuva sivusuuntainen voima vääntää jalkaa, jolloin sen tukilevyn pitää ulottua tarpeeksi monen VF-profiilin yli.

Periaatteessa jokaisen luukun siirtämiseen tarvitaan asteittain pienempi voima, kuin ensimmäisen, eli luukkuvarastoa lähinnä olevan luukun siirtämiseen. Sen vuoksi jokaisen luukun siirtojalat ja tukilevyt voisivat olla edellistä hieman kevytrakenteisemmat. Kustannusten kannalta on kuitenkin järkevää tehdä esim. ensimmäisten viiden luukun jalat paksummasta materiaalista ja viimeisten viiden hieman ohuemmasta, jotta osat voidaan valmistaa sarjatyönä.



Kuva 5.3.4.1, siirtojärjestelmä

Kuvissa 5.3.4.2 ja 5.3.4.3 näkyy siirtämisen kannalta epäedullisempi tapaus, jossa siirtopala on työntävällä puolella moottoriin ja siirtosuuntaan nähden. Tämän vuoksi ketjun pitää olla kohtalaisen kireällä, jottei siirtopala pääse lipsahtamaan jalan ali. Ketjun alapuolelle olisi mahdollista asentaa liukukisko estämään mahdollinen lipsahdus, mutta siitäkin aiheutuu pientä lisäpainoa rakenteeseen. Sen vuoksi päädyttiin tekemään toisen pään ketjupyörästä säädettävä ja vielä lisäämään rakenteeseen kiristyspyörä. Kiristyksen säätämistä voisi helpottaa, ruuvien löysäämisen sijasta, tekemällä laakeripukkiin sopivat kiskot ja lukittavan kierretangon. Toisaalta jaloissa voisi olla pykälät, jotka ulottuisivat siirtopalan alle, mutta siinä tapauksessa nostovaiheessa ketjua pitäisi ajaa pieni matka taaksepäin.

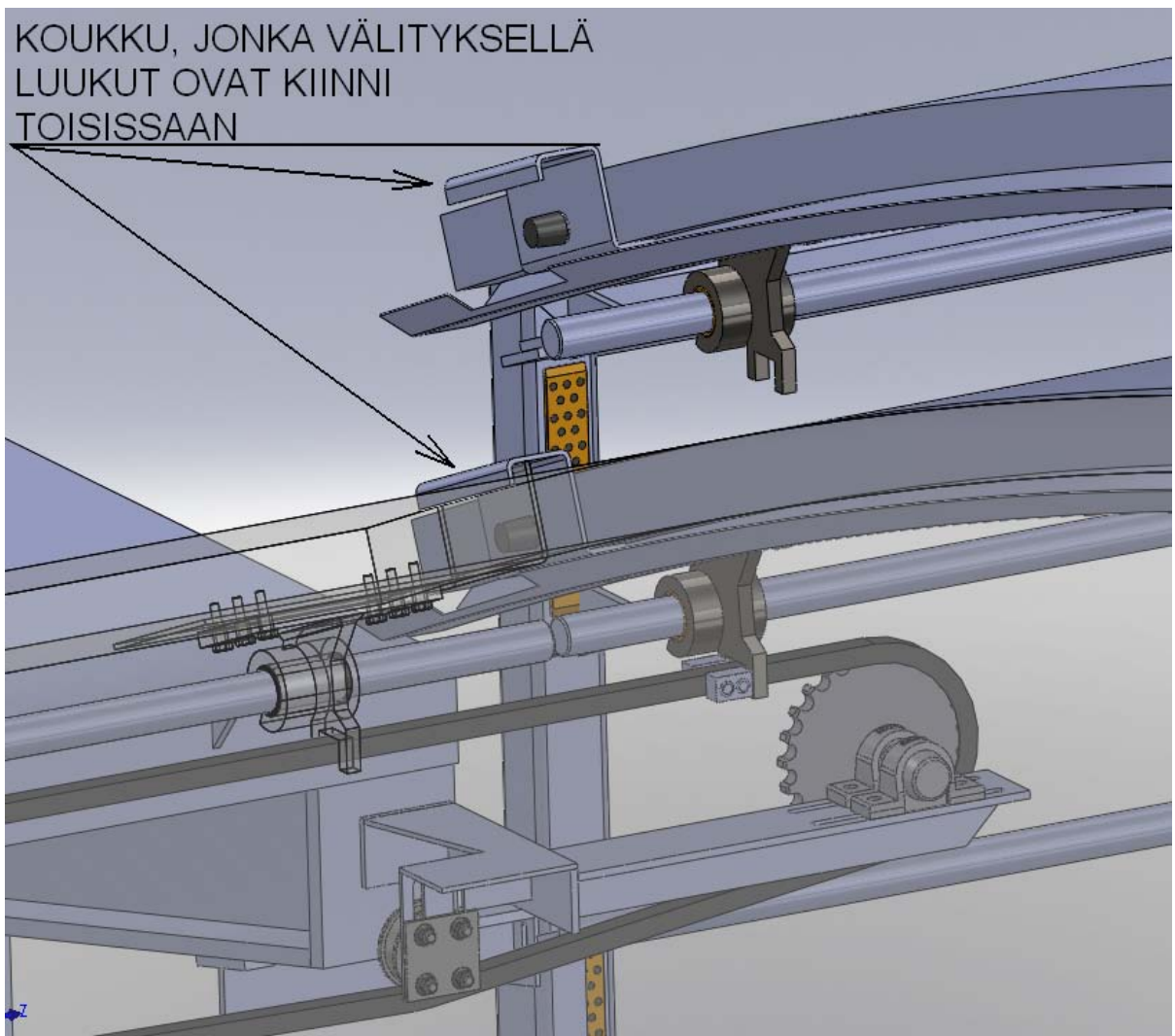


Kuva 5.3.4.2, siirtopala

Kuvassa 5.3.4.3 on esitetty tilanne, jossa levy on siirtynyt luukkuvaraston johteille. Luukkuvarastossa on anturi, joka antaa siirtolaitteelle pysähtymiskäskyn, kun levy on oikealla paikallaan. Luukun molemmissa päissä on samanlaiset anturit ja kumpikin anturi antaa käskyn omalle siirtolaitteelleen. Leveä luukku voisi muussa tapauksessa jäädä hieman vinoon asentoon. Kun levy on pysähtynyt, luukkuvarasto nousee yhden pykälän.

Ketjussa voisi olla kaksi siirtopala sopivalla etäisyydellä toisistaan. Tällöin luukun noustua pykälän, toinen siirtopala olisi jo valmiina seuraavan luukun kohdalla, eikä tarvitsisi odottaa siirtopalan tekevän turhaa puolikasta kierrosta. Kierrosnopeutta pitäisi myös laskea vähän ennen kuin siirtopala osuu luukun jalkaan, jottei tapahdu liian suuria nykäyksiä.

Kuvassa 5.3.4.3 näkyvien koukkujen pitää olla suhteellisen leveitä, johtuen ensimmäisiin luukkuihin kohdistuvista suhteellisen suurista siirtovoimista ja ohuesta materiaalista, johon koukut kiinnitetään. Koukkujenkin pitää ulottua vähintään kahden VF-profiilin yli luukun alapinnalla. Lujuuslaskennassa tutkitaan tilannetta tarkemmin.

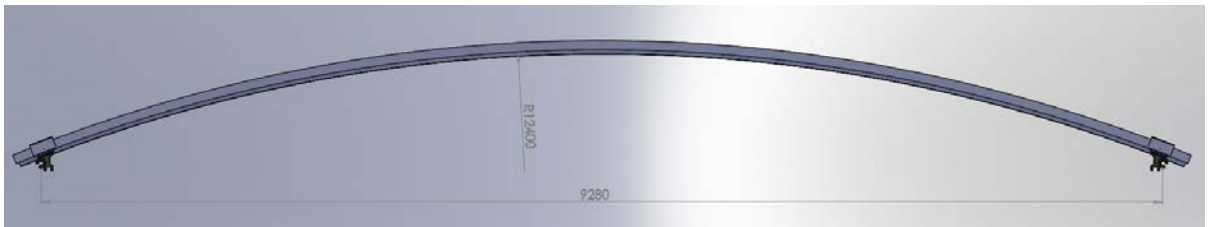


Kuva 5.3.4.3, kiristyslaite ja koukut joiden avulla luukut vetävät toisiaan perässä

5.3.5 Kansiluukkujen mallinnus

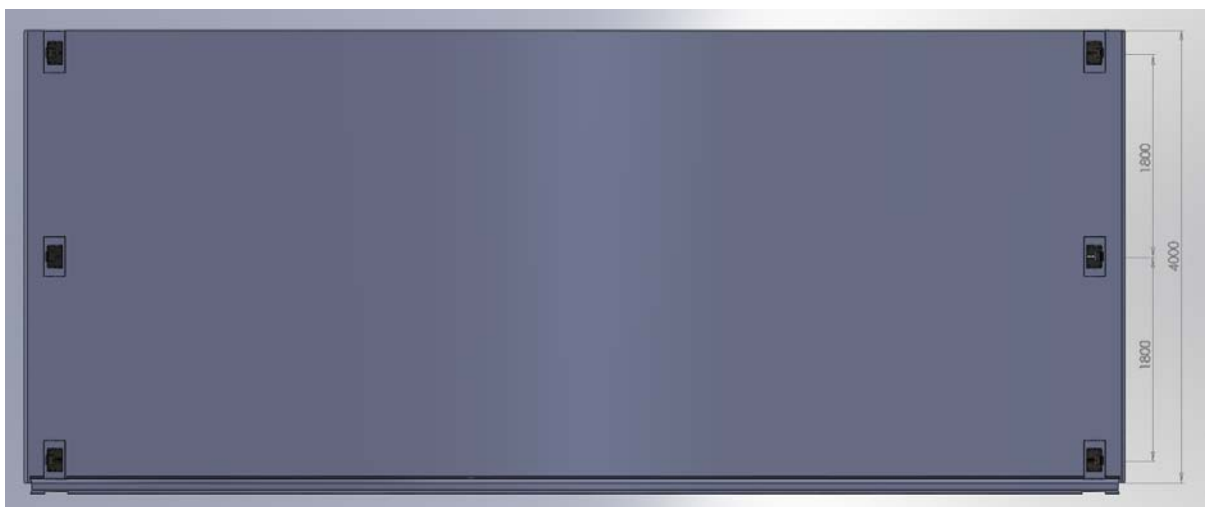
Kansiluukuista ei tehdä kovin tarkkaa 3D-mallia, koska niitä ei kuitenkaan voi hyödyntää lujuuslaskelmissa. Esim. kennon geometriaa ei kannata turhaan mallintaa, koska laskenta on suoritettava kuorielementeillä, ja sitä varten tarvitaan luukuista pintamalli, josta on karsittu pyöristykset ja aineenpaksuudet.

Luukut mallinnettiin 75 mm paksuna kaarevana levynä, kuvan 5.3.5.1 mukaisilla mitoilla.



Kuva 5.3.5.1, luukun päämitat

Luukuissa oli aluksi jalat vain nurkissa, mutta alustavissa lujuuslaskelmissa huomattiin, että kaarevan luukun heikoin kohta on luonnollisesti vapaana oleva reuna. Keskimmäisen jalan lisäämisellä reuna tulee huomattavasti jäykemmäksi ja luukkua voidaan keventää.

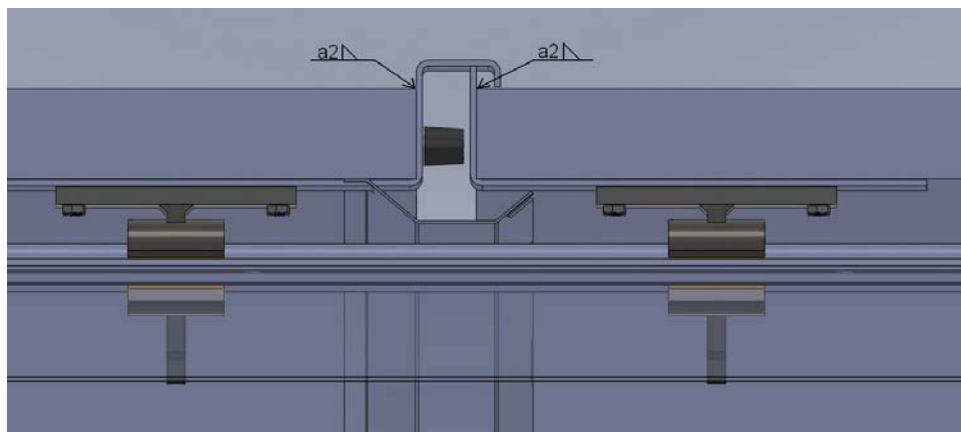


Kuva 5.3.5.2, luukun jalat

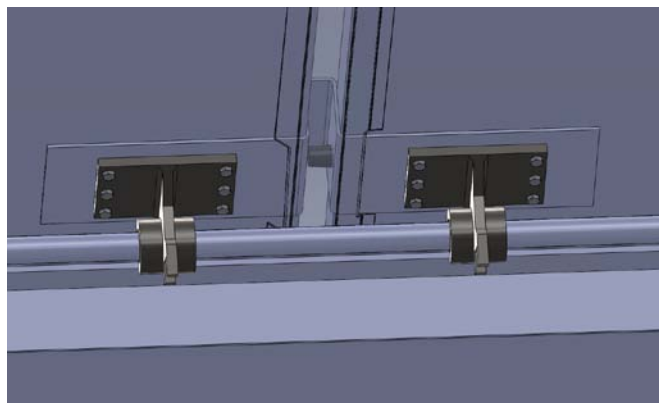
Kuvissa 5.3.5.3 ja 5.3.5.4 on esitetty luukkujen koukut, törmäysvaimentimet, vedenohjaukouru ja jalkojen kiinnitystapa. Koukut on tehty jalkojen tukilevyjen jatkoksi, jolloin saadaan sivusuuntaisen siirtovoiman vaikutuksia jaettua isommalle alueelle. Kriittisin paikka on ylälevyn pienhitsi, koska ylälevy on vain 2 mm paksu.

Jalat, jotka valmistetaan teräksestä, kiinnitetään ruuveilla alumiiniseen tukilevyyn, joka on hitsattu pienahitseillä VF-profiilien alareunoihin. Tukilevyn paksuus ja koko tarkentuu lujuuslaskentavaiheessa.

Tiivistettä ei ole mallinnettu, mutta luukkujen välissä on kuminen iskunvaimennin vaimentamassa luukkujen kolahtelua. Vetosuunnassa ei ole vaimennusta, koska haluttiin mahdollistaa pieni terävä liikkeellelähtönykäys. Nykäys voi olla tarpeen esim. talvella, jos laakerit ovat jäätyneet kiskoon kiinni. Jälkiasennuksena on kuitenkin helppo lisätä vaimennusta toiseenkin suuntaan jos luukut kolisevat liikaa.



Kuva 5.3.5.3, luukun koukut ja iskunvaimennus



Kuva 5.3.5.4, jalkojen kiinnitys

6 LUJUUSLASKENTA

Elementtimenetelmä, FEM (Finite Element Method), tarkoittaa nimensä mukaisesti äärellisten elementtien menetelmää. Se on numeerinen laskentamenetelmä, jonka avulla rakenteiden siirtymiä voidaan approksimoida. FE-laskennasta saatavat suureet ovat ensisijaisesti siirtymiä, mutta lisäksi voidaan selvittää rakenteen sisäisiä tukireaktivoimia, jännityksiä sekä venymiä. Lisäksi voidaan tutkia esimerkiksi ominaistuuksia. Rakenteesta muodostetaan elementtimalli, jonka elementit kiinnittyvät toisiinsa solmupisteiden välityksellä. /19/

Elementtimenetelmä perustuu materiaalien joustavuudelle. Kaikille materiaaleille on mahdollista määrittää jousivakio. /19/

Kuorielementti on ehkä kaikkein käytetyin elementtityyppi. Niillä voidaan mallintaa monimutkaisia ohutseinämäisiä rakenteita, joita yksinkertaistetaan hieman pyöristysten ja pienimpien muotojen osalta. Kuorielementeillä voidaan mallintaa kaareviakin muotoja, kunhan elementtikoko on sopiva kaarevuussäteeseen nähden. Kuorielementti on palkkielementin laajennus, jolle on määritetty fyysinen leveys. Kuorielementin ei ajatella lyhenevän taipumisen johdosta, eli elementtiin liittyy vain tason normaalin suuntaiset translaatiot sekä rotaatiot reunan ympäri. Aksiaaliset vapausasteet saadaan mukaan yhdistämällä kuorielementtiin 2D-tilavuus- eli kalvoelementti. /19/

Kuorielementti sopii hyvin kansiluukkujen mallintamiseen, koska luukkujen pinta-ala suhteessa ainevahvuuksiin on huomattavan suuri.

6.1 Kuormitukset

6.1.1 Aalto- ja jääkuormat

Kyseessä on sisävesillä, myös talviolosuhteissa liikkumaan tarkoitettu alus. Valtion avustuksen saaminen rahtialukselle vaatii kuitenkin myös

merilläliikkumismahdollisuuden. Tämän vuoksi alukselle voitaisiin antaa luokitus IN(1,2<X<2,0). Tämä luokitus antaa mahdollisuuden navigoida 2 m merkitsevällä aallonkorkeudella, mutta joka kerta kun alus on menossa merialueelle, on pyydettävä lipun lupa ja säätodistus siitä, että kulloinenkin aallonkorkeus on maksimissaan 2 m. /20/

Jääluokaksi Bureau Veritaksen edustaja, Mikko Törne, ehdottaa luokkaa A1.

Aalto ja jääkuormien suuruudet eivät vaikuta kansiluukkujen lujuuslaskentaan, koska niiden vaikutukset kohdistuvat ainoastaan runkoon. Rungon laskennassa kannattaa huomioida, että luukut eivät ole itsessään kovin jäykkiä, vaan niiden jäykkyys perustuu jäykiksi suunniteltuihin tukirakenteisiin. Tästä syystä ruuman yläosaan luukkujen alapuolelle kannattaisi suunnitella muutamiin kohtiin esim. ristikkotuet, joilla laidat yhdistettäisiin toisiinsa.

6.1.2 Lumikuormat

Suomen ympäristöministeriön julkaisemasta, RakMK B1: Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, määräyskokoelmasta (liite 3) nähdään, että Päijänteen ja Keiteleen vesialueilla lumikuormat ovat $1,8 \text{ kN/m}^2$ katon kohtisuoran projektion mukaan mitattuna. /21/

Lumen luukkuun kohdistama voima F_{Lumi} on:

$$F_{Lumi} = 4\text{m} \cdot 10\text{m} \cdot 1,8 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (6.1.2.1)$$

$$\underline{\underline{F_{Lumi} = 72\text{kN}}}$$

6.1.3 Tuulikuormat

Myös tuulikuorma saadaan RakMK B1:stä (liite 4). Tuulikuormat lasketaan painekertoimen avulla, johon vaikuttavat esim. rakenteen muoto, tuuliolosuhteet ja tuulen suunta. Tämä tapaus kuuluu maastoluokkaan 1, eli laaja avoin maa-alue tai järvenselkä. /21/

Tuulen nopeuspaine q voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

$$q = 0,77 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,2}, \text{ jossa } z \text{ on korkeus maan/veden pinnasta} \quad (6.1.3.1)$$

$$\Rightarrow q = 0,77 \left(\frac{10,4}{10} \right)^{0,2}$$

$$\underline{\underline{q = 0,78 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}}}$$

Tuulen paine lasketaan tuulta vastaan kohtisuoralle projektiopinta-alalle A_{L_p} :

$$A_{L_p} = 1\text{m} \cdot 4\text{m}$$

$$A_{L_p} = 4\text{m}^2$$

Tuulen luukkuihin kohdistama voima F_{Tuuli} :

$$F_{Tuuli} = 0,78 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 4\text{m}^2 \quad (6.1.3.2)$$

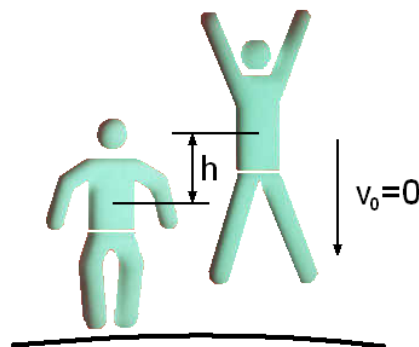
$$\underline{\underline{F_{Tuuli} = 3,12\text{kN}}}$$

6.1.4 Ihminen hyppää tai kaatuu

Ihmisen hyppäämisen tai kaatumisen vaikutusta ei ole esimerkiksi koneiden kiinteiden kulkuteiden standardissa, SFS-EN ISO 14122-2, otettu huomioon. Kaarevan luukun tapauksessa, on kuitenkin kaatumisen mahdollisuus huomioitava, vaikka kaatumisriskiä pyritään pienentämään valitsemalla pintamateriaaliksi kohokuvioitu levy.

Tehdään laskenta hyppäämistilanteen mukaan, koska kaaduttaessa paino jakautuu isommalle alueelle ja on rakenteiden kestävyuden kannalta riskittämpi kuin hyppäämistilanne.

Oletetaan ihmisen, jolla on varusteita ja jonka massa on yhteensä 150 kg, pystyvän hyppäämään 0,3 m ylöspäin. Tässä hyppykorkeudella tarkoitetaan ihmisen massakeskipisteen nousukorkeutta. Hypyn lakikorkeudessa ihmisen liikenopeus v_0 on 0 m/s (kuva 6.1.4.1)



Kuva 6.1.4.1, hyppäämistilanne

Lasketaan ensin ihmisen loppunopeus v , kun hän putoaa 0,3 m:

$$v = v_0 + at \quad , \text{ jossa } a = g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \quad (6.1.4.1)$$

Ihmisen paikka x tiettyä ajanhetkenä saadaan yhtälöstä:

$$x = x_0 + v_0 t + \frac{1}{2} a t^2 \quad , \text{ jossa } x = 0,3\text{m}, x_0 = 0\text{m} \text{ ja } t \text{ on aika} \quad (6.1.4.2)$$

Edellisestä yhtälöstä voidaan ratkaista putoamiseen kuluva aika:

$$\Rightarrow t = \sqrt{\frac{0,3\text{m}}{\frac{1}{2} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{t \approx 0,247\text{s}}}$$

Nyt voidaan ratkaista ihmisen loppunopeus yhtälöstä 6.1.4.1:

$$v = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,247\text{s}$$

$$\underline{\underline{v \approx 2,426 \frac{\text{m}}{\text{s}}}}$$

Ratkaistaan seuraavaksi ihmisen kansiluukkuihin kohdistama voima, kun oletetaan ihmisen polvien menevän koukkuun ja painopisteen pysähtyvän 0,2 m:n matkalla:

Pysähtyminen tapahtuu 0,2 m:n matkalla ja hidastumisen oletetaan olevan lineaarista, joten pysähtymiseen kuluu aikaa:

$$t = \frac{s}{v_k} \quad , \text{ jossa } s \text{ on matka ja } v_k \text{ on keskinopeus} \quad (6.1.4.3)$$

$$v_k = \frac{v_0 + v}{2} \quad (6.1.4.4)$$

$$v_k = \frac{2,426 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 0}{2} \approx 1,213 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\Rightarrow t = \frac{0,2\text{m}}{1,213 \frac{\text{m}}{\text{s}}}$$

$$\underline{\underline{t \approx 0,165\text{s}}}$$

Nyt voidaan ratkaista hidastuvuus:

$$a = \frac{v - v_0}{t} \tag{6.1.4.5}$$

$$a = \frac{0 - 2,426 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0,165\text{s}} \approx 14,703 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Ihmisen kansiluukkuihin kohdistama voima F on:

$$F = ma \quad , \text{ jossa } m \text{ on ihmisen massa} \tag{6.1.4.6}$$

$$F = 150\text{kg} \cdot 14,703 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \approx 2205,5\text{N}$$

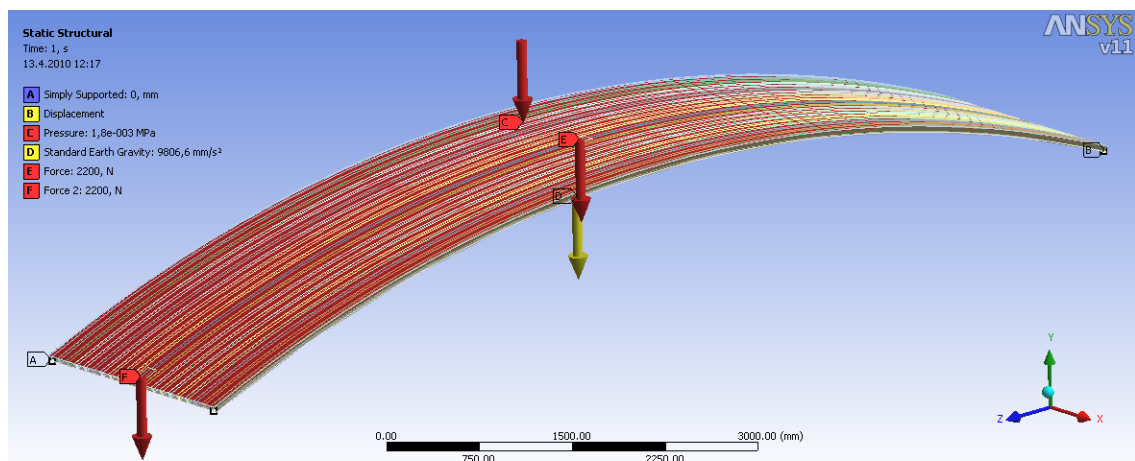
$$\underline{\underline{F = 2200\text{N}}}$$

Käytetään jatkossa tätä kuormitusta ihmistä kuvaavana pistekuormituksena.

6.2 Kennosta valmistettu kaareva luukku

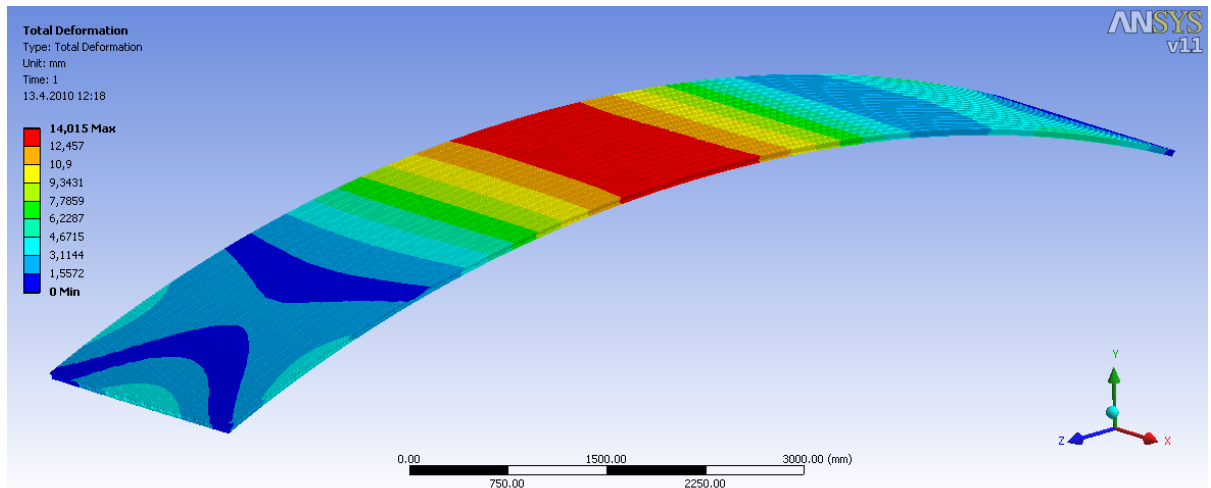
Kaarevasta luukusta mallinnettiin ensin yksinkertaisempia malleja, joissa oli yhtenäinen alapinta rimojen tilalla ja joissa ei ollut jalkoja eikä tukilevyjä. Näiden mallien avulla haarukoitiin selville suurin piirtein sopiva kennon paksuus. Mallinnukset aloitettiin 20mm ja noin 50 mm kohdalla huomattiin luukun kestävän ja siirtymien olevan riittävän pieniä. Tähän lisättiin vielä varmuuden vuoksi 25 mm, koska paino nousi ainoastaan n. 35 kg/luukku. Pohjalevyn korvaaminen rimoilla ei vaikuttanut juurikaan jännitysten suuruuksiin.

Kuvassa 6.2.1 on yläpinnasta riman alapintaan mitattuna 50 mm paksu luukku. Luukkuun kohdistuu maan vetovoiman lisäksi 1800 Pa:n lumikuorma luukun kohtisuoralle projektiolle mitattuna. Lisäksi luukkuun kohdistuu kaksi 2200N voimaa, jotka kuvaavat lunta poistamassa olevia ihmisiä. Luukku on tuettu kulma pisteistä siten, että yhdessä kulmassa on estetty translaatiot x- y- ja z-akselin suhteen ja rotaatiot y- ja z-akselin ympäri. Muissa kulmissa on estetty translaatiot y- ja z-akselin suhteen ja rotaatiot y- ja z-akselin ympäri. Tällöin malli on täysin määritelty, mutta käyttäytyy samoin, kuin todellinen luukku, joka pääsee kiertymään pyöreän johteen ympäri. Tässä tapauksessa luukku oli kapeampi, kuin lopullinen versio ja siitä puuttui keskimmäinen jalka. Tämän vuoksi reunalla oleva kuormitus painaa reunan mutkalle, ja toisen jaloista on päästävä siirtymään lähemmäs, jottei malli käyttäydy liian jäykästi verrattuna todellisuuteen.



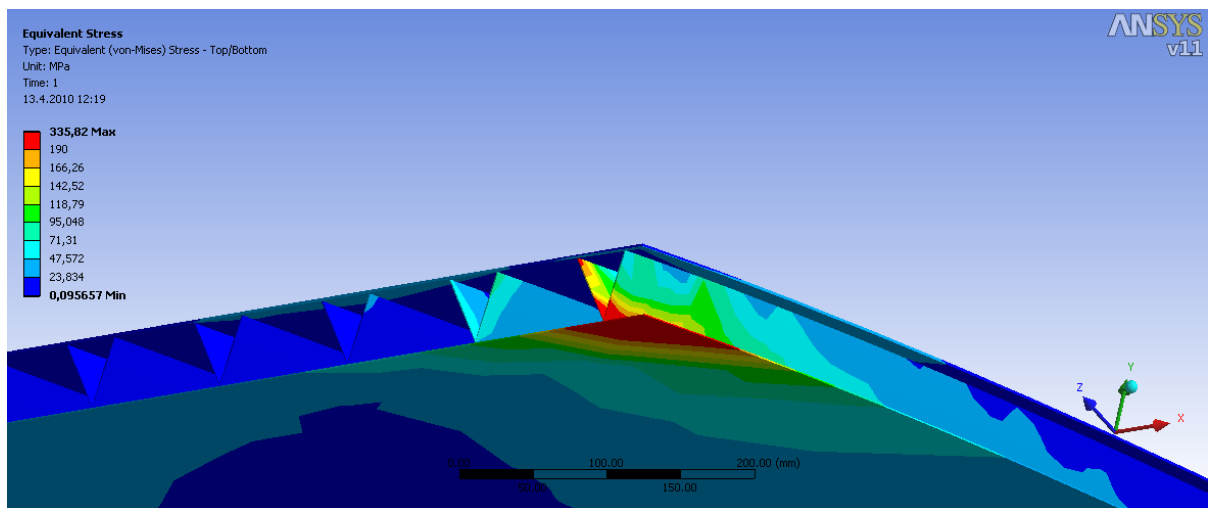
Kuva 6.2.1, yksinkertaistettuun luukkumalliin kohdistuvat voimat ja tuennat

Kuvassa 6.2.2 on esitetty edellä mainittujen voimien luokkuun aiheuttamat siirtymät. Siirtymät ovat maksimikuormitustapauksessa luukun keskellä ainoastaan 14 mm, tästä syystä lopullisessa mallissa VF-profiilien jakoa harvennettiin. Alumiinin kimmomoduulina käytettiin 71 GPa ja POISSONin vakiona 0,33. Näitä samoja arvoja käytetään jatkossa kaikille alumiiniosille paitsi alumiinivaahdolle.



Kuva 6.2.2, yksinkertaistetun luukkumallin siirtymät

Kuvassa 6.2.3 on esitetty rakenteeseen syntyvät jännitykset edellä mainitussa kuormitustapauksessa. Kuvasta nähdään, että jännityshuippuja esiintyy ainoastaan kiinnityspisteiden läheisyydessä. Jännitykset on rajattu 190 MPa:iin, joka on AlMg 3 materiaalin 0,2 %:n venymäraja. Tarkemmin sanottuna tällä jännityksen arvolla materiaalissa tapahtuu korkeintaan 0,2 %:n pysyvä venymä. Venymärajaa käytetään materiaaleille, joilla ei ole selvää myötörajaa. Tällaisia materiaaleja ovat esim. alumiinit ja lujat teräkset. Tässä vaiheessa jännityskonsentraatiolla ei ole merkitystä, koska jatkossa kuormitukset jakautuvat jalan ja jalan tukilevyn ansiosta suuremmalle alueelle.



Kuva 6.2.3, yksinkertaistetun luukkumallin jännitykset

Seuraavaksi luukku mallinnettiin tarkentuneiden mittojen mukaisesti ja malliin lisättiin jalat ja tukilaput. VF-profiilit jaettiin kuvassa 4.4.2 esitetyllä tavalla, lukuun ottamatta reunoja, joissa profiilien välejä tiivistettiin, koska jalkojen tukilaput tarvitsevat enemmän tukea.

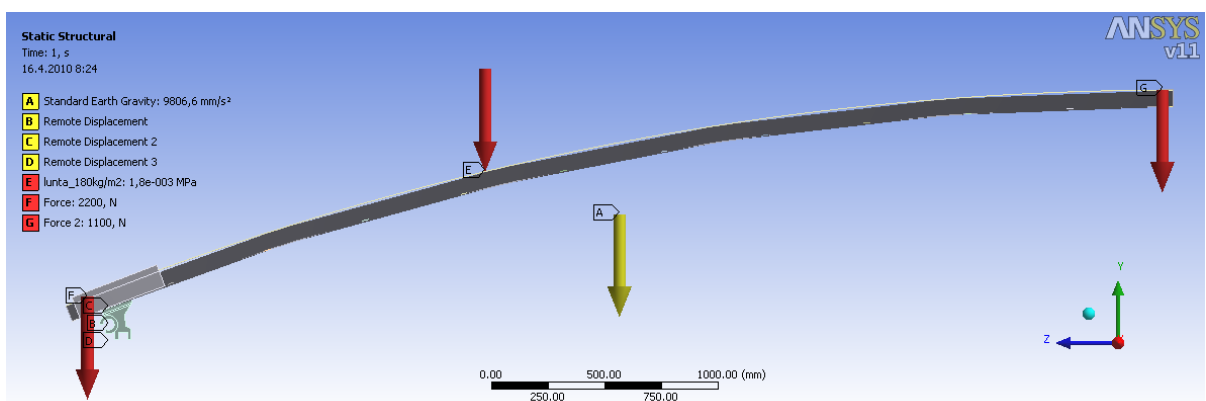
Kuvassa 6.2.4 luukku on mallinnettu hyväksikäyttäen symmetriaa, eli vain puolet luukusta on mallinnettu. Tällä tavalla laskenta-aikaa saadaan lyhennettyä, koska elementtien määrä puolittuu. Ansys Workbench-ohjelmisto lisää symmetriareunaehdot automaattisesti. Symmetriareunaehdoilla puolitettu malli saadaan käyttäytymään kokonaisen mallin tavoin. Tässä tapauksessa luukun symmetriatasolla olevilta solmuilta suljetaan translaatiovapausasteet z-akselin suunnassa ja rotaatiovapausasteet x-akselin ympäri.

Mallin tuennat ovat samanlaiset kuin edellisessä tapauksessa, mutta nyt ne on siirretty vaikuttamaan luukun jalkoihin, kohtaan josta luukku on kosketuksissa johteeseen. Tämä luukku on leveämpi, kuin edellinen luukku, joten jalkoja ja tukipisteitä on kolme.

Kuormitukset ovat myös samat, kuin edellä lukuun ottamatta keskellä olevaa ihmistä kuvaavaa kuormitusta, joka piti symmetrian vuoksi puolittaa. Toisaalta myös luukun alareunalla oleva kuormitus on kopioitunut luukun toiselle puolelle, mutta sen

vaikutus siirtymiin on pieni. Tällä voimalla tutkitaan lähinnä levyn alareunan taipumista ja paikallisia vaikutuksia jännityksiin. Keskellä olevan kuorman kaksinkertaistuminen samassa pisteessä taas aiheuttaa n. 10 mm siirtymien kasvun.

Symmetrian vuoksi tuulikuormaa ei voitu ottaa huomioon tässä mallissa. Tuulikuorman vaikutusta kokeiltiin, kuitenkin muissa malleissa, ja koska sen vaikutus on häviävän pieni verrattuna lumikuormaan, tulosten katsotaan olevan riittävän lähellä todellisia arvoja.



Kuva 6.2.4, luukkumallin tuennat ja siihen kohdistuvat kuormitukset

Seuraavaksi malliin luotiin elementtiverkko (kuva 6.2.5), josta pyrittiin saamaan mahdollisimman symmetrinen. Kuorimalliin on melko helppo saada syntymään säännöllinen neliskulmaisista elementeistä koostuva verkko, valitsemalla pinnoille sopivat peruselementin koot. Jos elementtiverkosta tulee liian tiheä, voidaan elementtien kokoa kasvattaa vähemmän merkityksellisissä suunnissa. Kuvassa 6.2.5 on esimerkiksi uumissa elementtien koot asetettu siten että, pystysuuntaan saatiin kolme elementtiä. Pituussuunnassa elementtejä venytettiin hieman pidemmiksi, koska tässä suunnassa elementtejä on riittävän paljon.

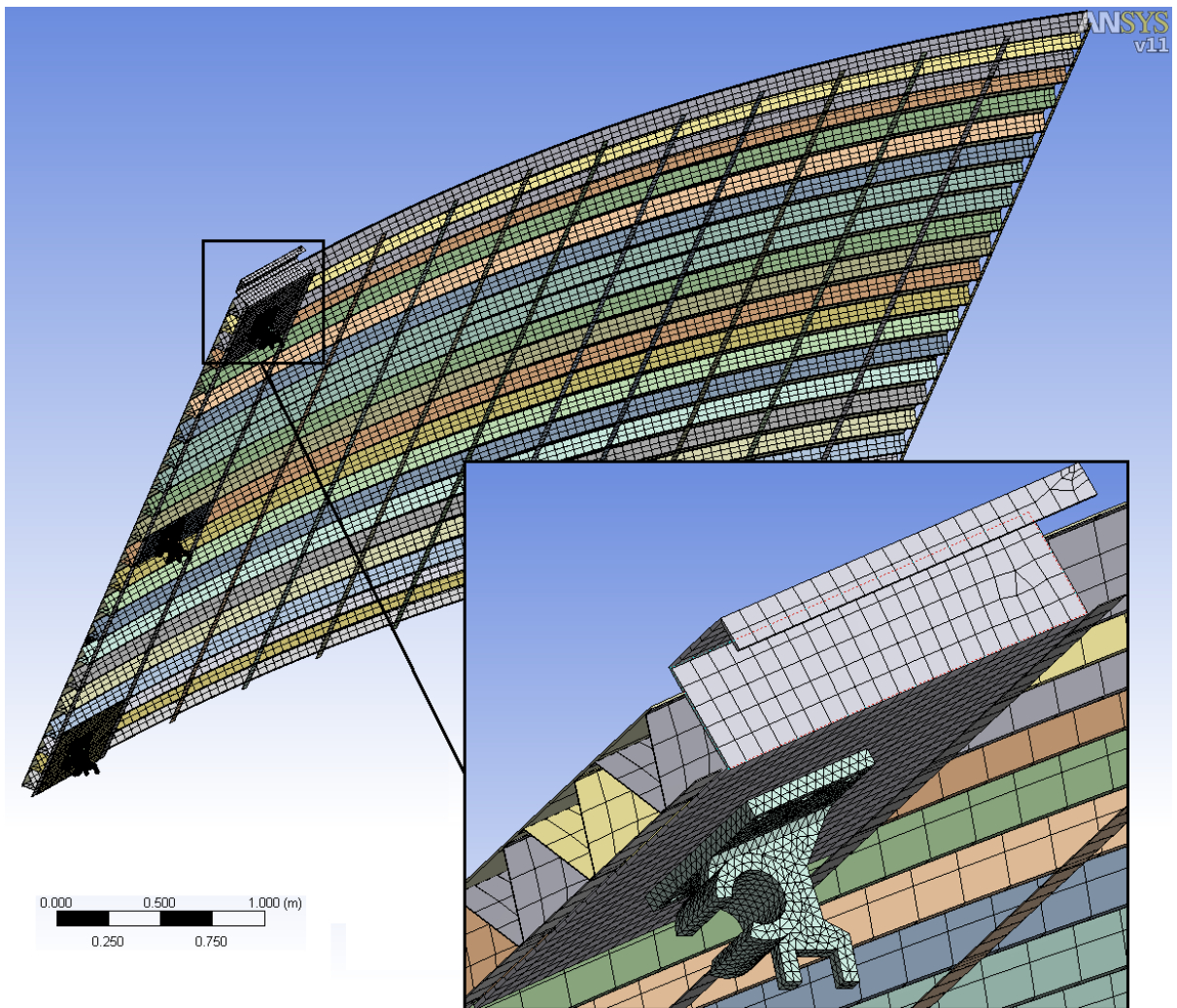
Mallin variointivaiheessa laskenta suoritettiin myös niin, että pystysuunnassa elementtejä oli vain yksi ja pituussuunnassa ne oli venytetty hyvin pitkiksi. Siirtymät eivät suuresti eronneet lopullisista, joten kuvan elementtiverkon tarkkuuden todettiin riittävän. Elementtikokojen variointi on käsin laskennan lisäksi ainoa tapa varmistaa siirtymien vastaavan suurin piirtein todellisuutta. Elementtikokojen variointi ei

tietenkään auta, jos mallissa on virheitä, kuten vääränlaiset tuennat, voimat, kuormitussuunnat jne. Varioinnilla kuitenkin nähdään siirtymien lähestyvän, jotain tiettyä lukuarvoa, ja kun kahden perättäisen mallin siirtymien erotus on riittävän pieni, voidaan variointi lopettaa.

Kuvassa 6.2.5 näkyvässä suurennoksessa luukun jalkaan, joka on mallinnettu solidielementeillä, on muodostunut tetraedrin muotoisia elementtejä. Tämä johtuu Ansys Workbenchin tavasta käsitellä Solidworksistä tuotuja solidimalleja. Workbench tulkitsee Solidworksistä tuodun kappaleen olevan ”yhtä puuta”, jos sitä ei ole mallinnettu kokoonpanona vaan yksittäisenä osana, tai jos sitä ei ole slice-komennolla pilkottu pienempiin osiin.

Tetraedrin muotoiset elementit käyttäytyvät jäykemmin, kuin kuution muotoiset, ja vastaavasti kolmion muotoiset jäykemmin, kuin neliön muotoiset elementit. Vaikutuksen arvioitiin olevan tässä tapauksessa kuitenkin sen verran pieni, että mallia ei lähdetty uudestaan muokkaamaan, vaan virhettä kompensoitiin tihentämällä elementtiverkkoa jalkojen osalta.

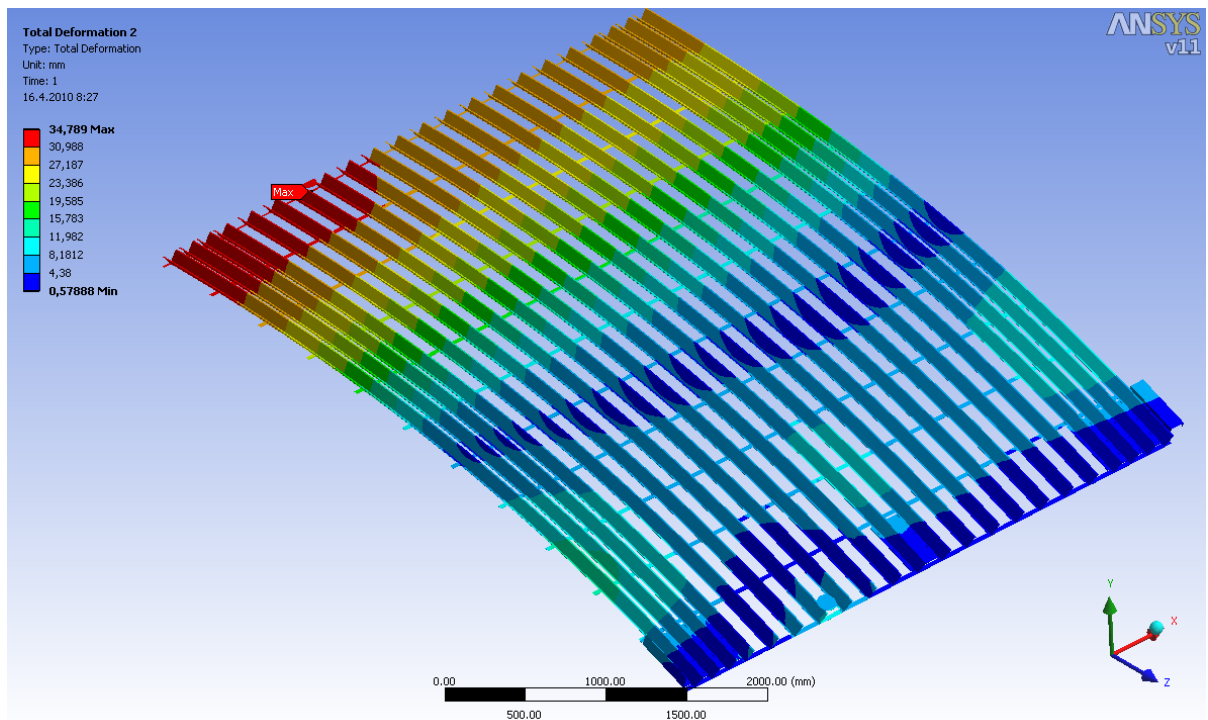
Luukun jalat on kiinnitetty kiinnitysreikien reunoilta tukilevyyn ”edge to face”-kontaktilla, jotteivät jännitykset jakaannu todellisuutta suuremmalle alalle. Tukilevy on kiinnitetty ”edge to face”-kontaktilla pintalevyn reunaan ja uumien alareunoihin. Uumat on kiinnitetty alapinnan rimoihin ja yläpintalevyyn ”face to face”-kontaktilla, koska kiinnittymispintojen alat ovat niin pienet, ettei vaikutusta jännityksiin juurikaan ole.



Kuva 6.2.5, luukun elementtimalli

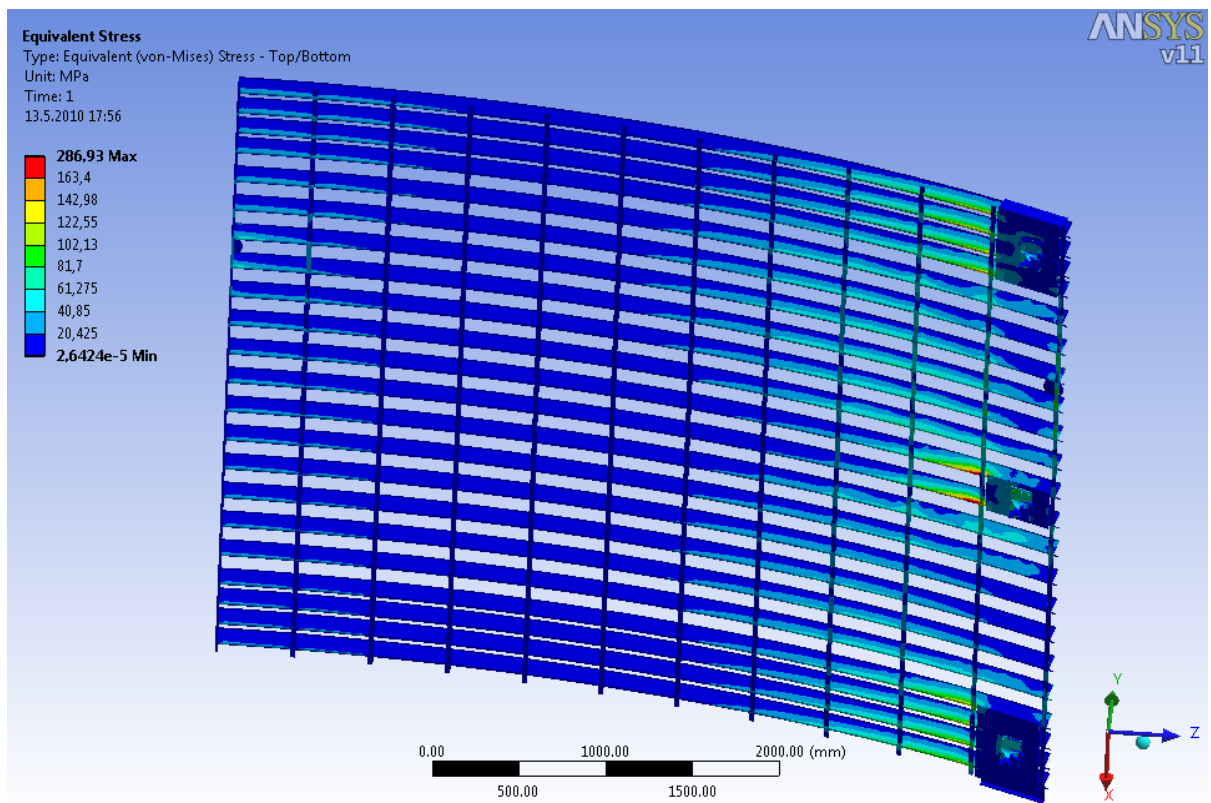
Seuraavaksi laskettiin kuvassa 6.2.6 esitetyn luukun siirtymät edellä mainituilla kuormituksilla. Pintalevy on piilotettu, jotta luukun rakenne näkyisi paremmin. Kuten kuvasta näkyy, maksimisiirtymä 34,7 mm, sijaitsee luukun keskivaiheilla, toisessa reunassa. Maksimisiirtymä sijaitsee reunassa johtuen ihmistä kuvaavasta lisäkuormituksesta. Luukun alareunassa lisäkuormitus on asetettu pahimpaan kohtaan, eli jalkojen puoleen väliin.

Siirtymä ei ole kovin suuri näin pitkän jännevälin omaavalle rakenteelle. Normaalitilanteessa, jossa luukkuja rasittaa korkeintaan 10 cm:n lumikerrosta vastaava kuorma (10 kg/m^2), ja kaksi ihmistä, siirtymä on ainoastaan 2,75 mm.

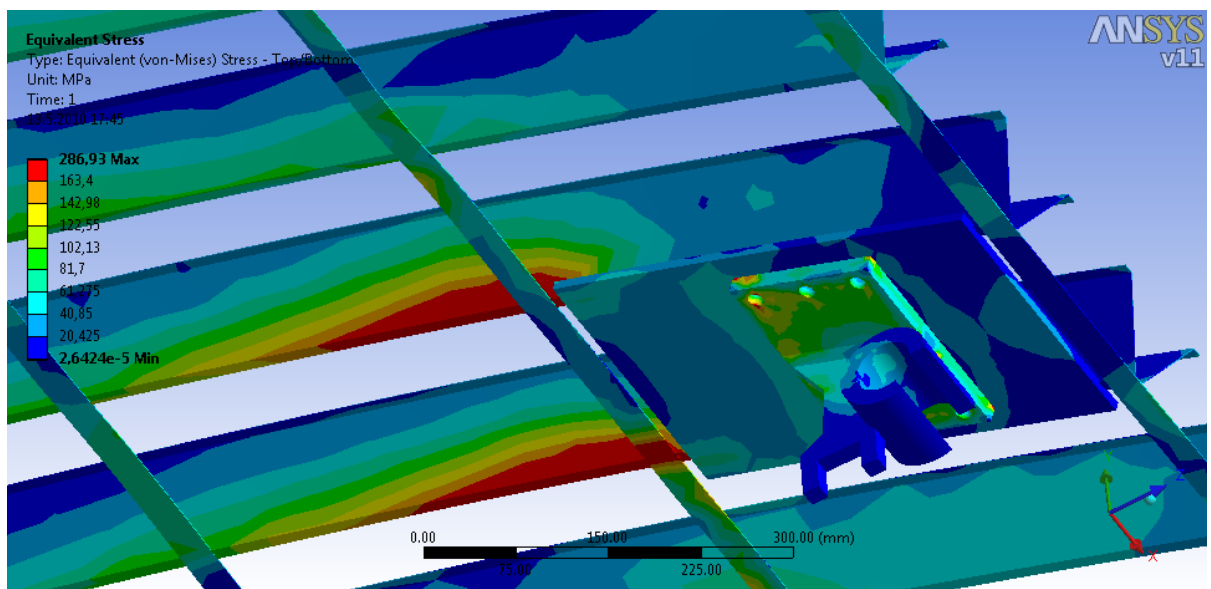


Kuva 6.2.6, luukun siirtymät

Tässä tapauksessa siirtymiä tärkeämpi tekijä ovat jännityskonsentraatiot. Turvakertoimista johtuen suurin sallittu jännitys on $0,86 \times$ myötöraja, vaikka kyseessä onkin staattinen laskenta. Tässä tapauksessa suurin sallittu jännitys on $0,86 \times 190 \text{ MPa} = 163 \text{ MPa}$. Kuvista 6.2.7 ja 6.2.8 nähdään, että jännitykset jakaantuvat rakenteessa hyvin tasaisesti ja ovat matalalla tasolla. Kiinnityspisteiden läheisyydessä, jännitykset luonnollisesti kasvavat, mutta ainoa ongelmia tuottava kohta on keskimmäinen jalka, jonka tukilappua kevennettiin, koska sivusuuntaisen siirtovoiman puuttumisen vuoksi jalan oletettiin kestävän pienemmällä tukilevyllä. Keskimmäiselle jalalle kohdistuu kuitenkin sen verran enemmän lumikuormaa, kuin reunimmaisille jaloille, että tukilappua on levennettävä.

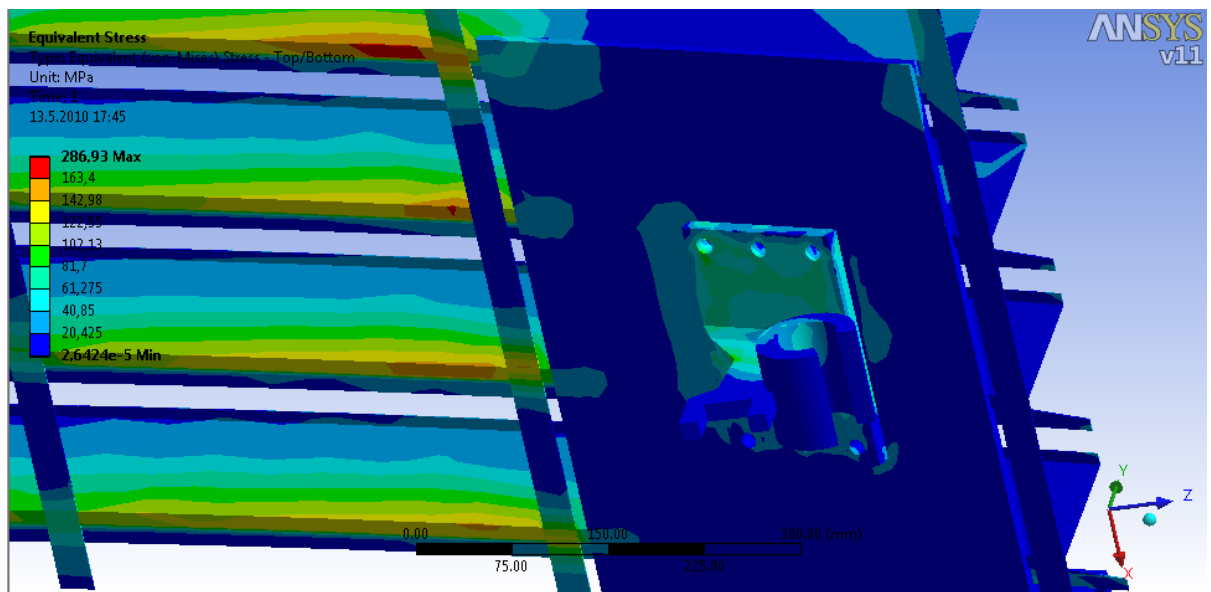


Kuva 6.2.7, luukun jännitykset



Kuva 6.2.8, jännitykset ylittävät sallitut arvot punaisella alueella

Kuvassa 6.2.9 on esitetty jännitykset keskimmäisen jalan tukilevyn leventämisen jälkeen. Kuten kuvasta näkyy, jännitykset ovat laskeneet sallitulle tasolle.



Kuva 6.2.9, keskimmäisen jalan alueella

Seuraavaksi lasketaan jalkoihin kohdistuvat voimat siirtotilanteessa. Tässä tilanteessa luukkua kuormittaa pahimmassa tapauksessa maan vetovoiman lisäksi 100 Pascalin (vastaa 10 cm:n kerrosta) lumikuorma. Jos luukkujen päällä on enemmän lunta, niitä ei voi ajaa luukkuvarastoon, vaan lumi on ensin poistettava. Siirtovaiheessa ihmiset eivät ole luukkujen päällä, joten nämä kuormat jätetään pois.

Edellä olleen mallin kuormituksia muuttamalla saatiin selvitettyä siirtotilanteessa luukun jalkoihin kohdistuvat tukireaktiot (taulukko 6.2.1).

Taulukko 6.2.1, luukun jalkojen tukireaktiot siirtotilanteessa

Jalka	x-komponentti [N]	y-komponentti [N]	z-komponentti [N]	tukireaktio [N]
1	0	1243	2528	2817
2	0	1464	2740	3106
3	0	1288	2551	2858

Liukulaakerin valmistajan ilmoittama maksimikitkakerroin μ_{\max} on 0,15.

Nyt voidaan laskea ensimmäisen luukun siirtämiseen tarvittava siirtovoima F_T :

Yhden luukun siirtämiseen tarvitaan kitkavoiman F_μ suuruinen voima:

$$F_\mu = 2817\text{N} \cdot 0,15 + 3106\text{N} \cdot 0,15 + 2858\text{N} \cdot 0,15$$

$$F_\mu = 1317\text{N}$$

Sama voima kohdistuu luukun molemmille puolille, joten:

$$F_\mu = 1317\text{N} \cdot 2 = 2634\text{N}$$

Eli yhden luukun siirtämiseen tarvitaan n. 270 kg:aa vastaava voima.

Koska siirtolaitteet ovat luukun molemmin puolin, pahimmalla rasituksella olevalle siirtokoukulle kohdistuu siirtovoima:

$$F_T = 1317\text{N} \cdot 10 = 13170\text{N}$$

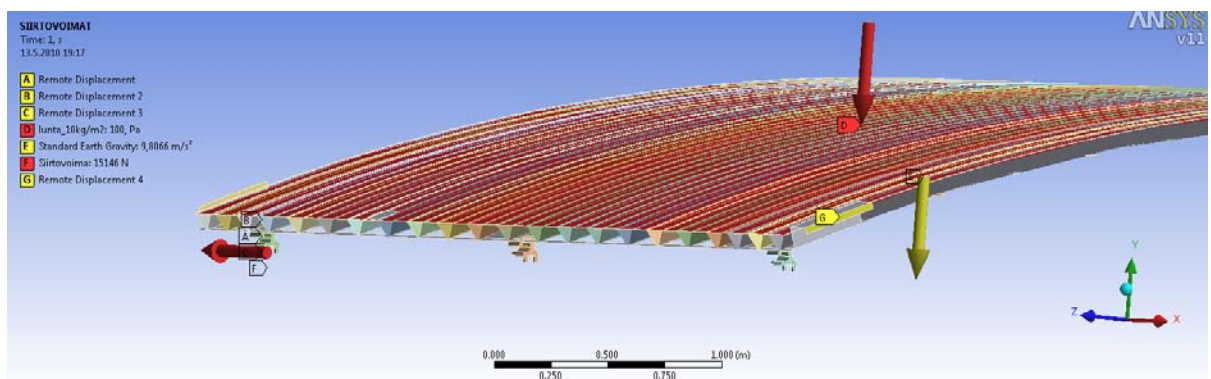
Siirtovoima kerrotaan vielä liikkeellelähdössä nykyäksiä kuvaavalla dynaamisella kertoimella 1,15.

$$F_T = 13170\text{N} \cdot 1,15$$

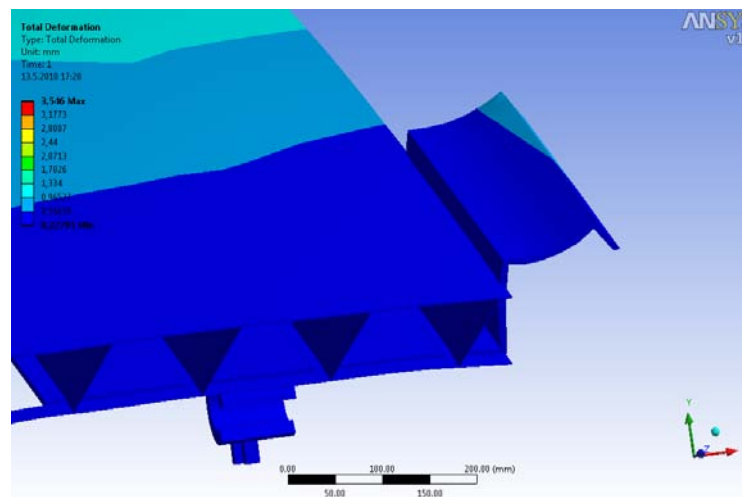
$$\underline{\underline{F_T = 15146\text{N}}}$$

Kuvassa 6.2.10, on esitetty luukun kuormitukset ja tuennat siirtotilanteessa. Voima F_T on asetettu vaikuttamaan kiskon suuntaisesti reunimmaisen jalan siirtokorvakkeisiin. Lumikuorma on edellä mainittu 100 Pa ja jalkojen tuennat ovat samanlaiset kuin aiemminkin paitsi, että reunimmaisen jalan x-akselin suuntainen

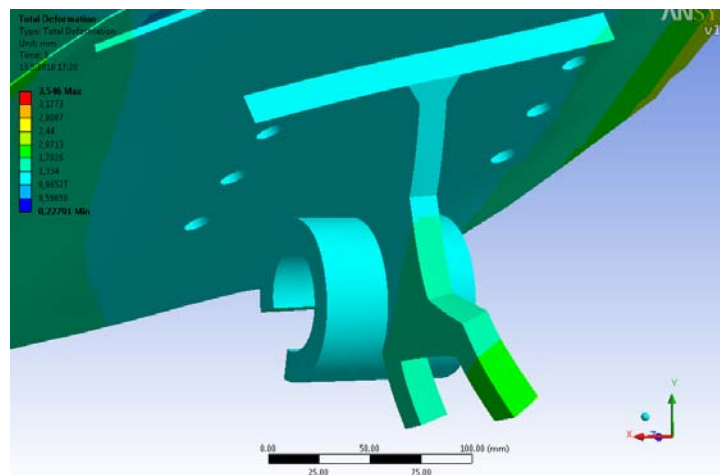
translaatio on vapautettu. X-suunta pitää kuitenkin sulkea, jostain kohdasta, koska muuten malli ei ole täysin määritelty, eikä laskentaa voida suorittaa. Translaatio suljetaan toisen reunan vetokoukulta siten, että kaikki rotaatiot ja kaksi muuta translaatiosuuntaa jätetään auki. Tällöin koukku käyttäytyy kuten todellisuudessaakin ja pääsee esim. taipumaan ylöspäin (kuva 6.2.11). Kuvassa 6.2.12 on esitetty jalan siirtymät.



Kuva 6.2.10, luukun kuormitukset ja tuennat siirtotilanteessa

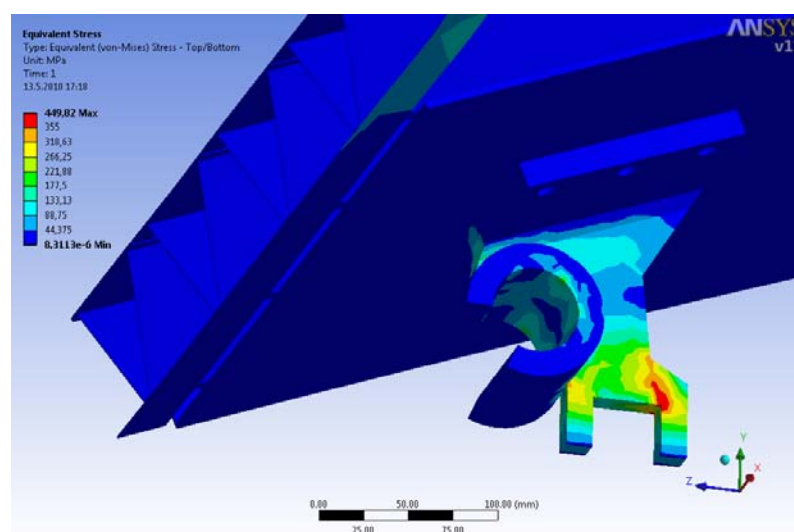


Kuva 6.2.11, koukun taipuminen siirtotilanteessa, siirtymät skaalattu 50-kertaisiksi



Kuva 6.2.12, jalan taipuminen siirtotilanteessa, siirtymät skaalattu 50-kertaisiksi

Turvakertoimet huomioidaan vain kantavissa rakenteissa. Jalan siirtokorvakkeiden murtuminen ei vaaranna ihmishenkiä, joten sallittuna jännityksenä voidaan käyttää materiaalin myötörajaa 355 MPa. Ongelma esiintyy ainoastaan parin ensimmäisen luukun jaloissa, seuraavissa luukuissa jännitykset ovat jo huomattavasti matalampia. Lisäksi tilanteen, jossa luukkuja joudutaan siirtämään tällaisessa lumikuormassa, oletetaan olevan harvinainen. Tämän vuoksi tuloksia voidaan tarkastella staattisen laskennan näkökulmasta eikä väsymistä tarvitse huomioida. Tästä johtuen jalkoja ei myöskään ruvettu tässä vaiheessa vahvistamaan.

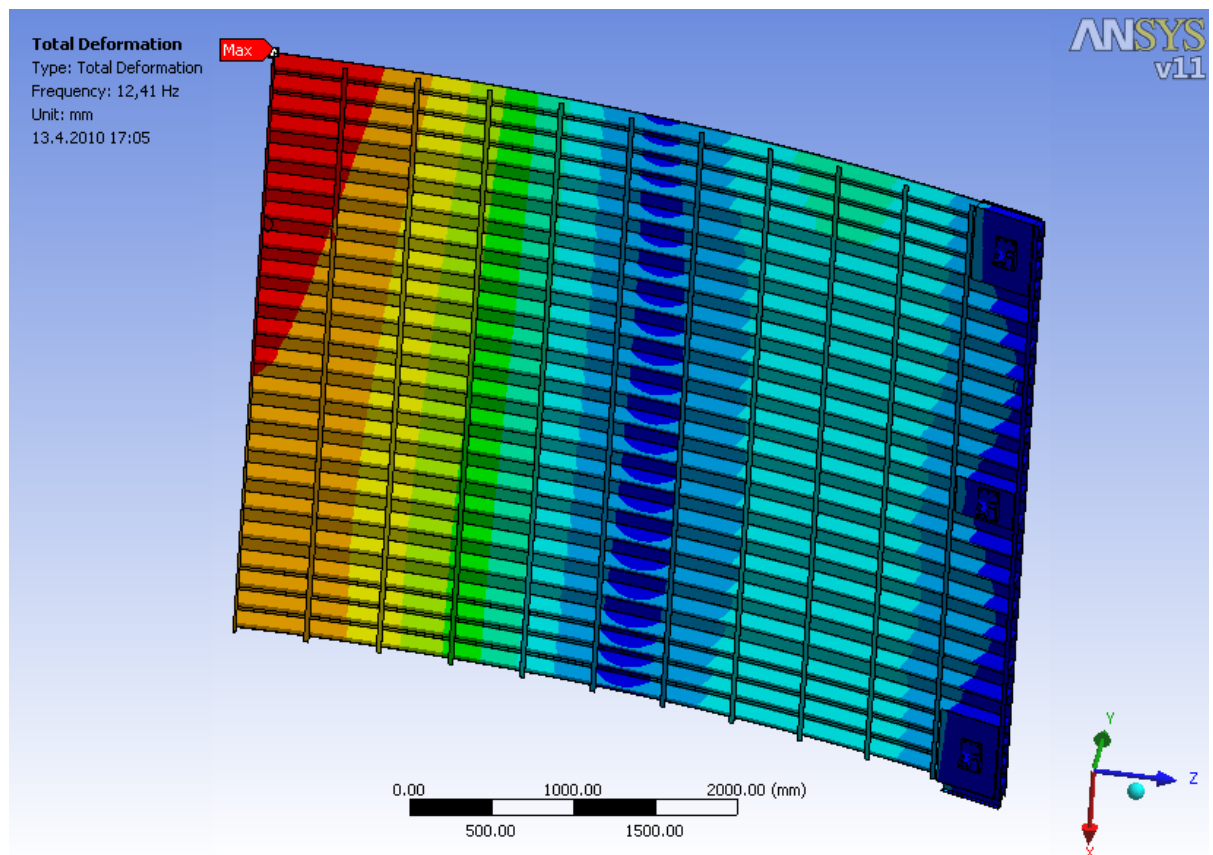


Kuva 6.2.13, jalan jännitykset siirtotilanteessa

Yksi laivanrakennuksessa tärkeä tekijä ovat värähtelyt. Moottoreiden ja muiden toimilaitteiden aiheuttamat herätteet voivat pahimmassa tapauksessa saada koko aluksen resonoimaan. Tämä ongelma poistuu, kun rakenteen ominaistaajuus on suurempi kuin toimilaitteiden esim. moottorien kierrosnopeudet. Joissakin tapauksissa, rakenteen ominaistaajuutta ei saada tarpeeksi korkeaksi, tällöin ongelmaa vältetään asettamalla ominaistaajuus sellaiseksi, että vastaava heräte esiintyy vain hetkellisesti esim. kiihdytettäessä.

Kuvassa 6.2.14, on esitetty luukun alin ominaistaajuus, joka on 12,4 Hz. Resonanssiin vaadittava heräte syntyisi esim. moottorilla, jonka käyntinopeus olisi 744 r/min. Ominaistaajuuden riittävyys pitää tarkistaa siinä vaiheessa, kun tiedetään millaiset moottorit alukseen on tulossa.

Ominaistaajuus on laskettu kuormittamattomalle rakenteelle, jonka tuennat ovat samanlaiset kuin maksimilumikuormitustilanteessa.



Kuva 6.2.14, luukun alin ominaistaajuus on 12,4 Hz

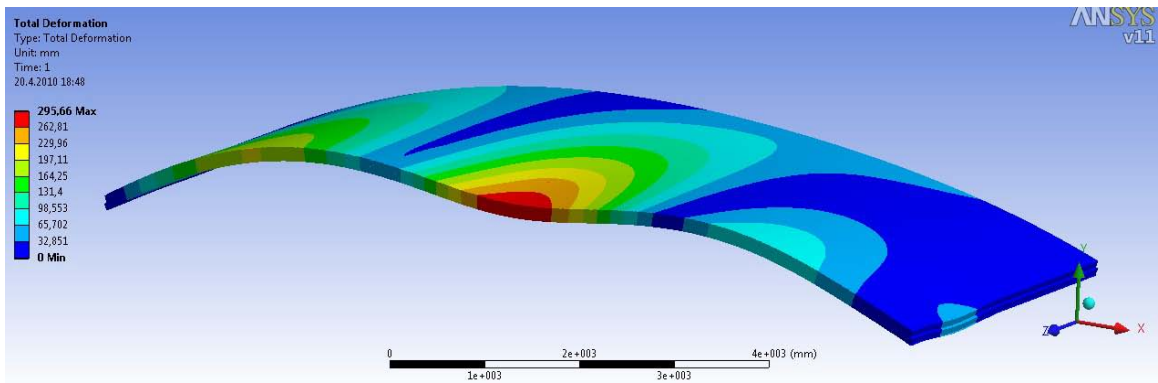
6.3 Polyuretaanista valmistettu kaareva luukku

Polyuretaanista valmistetussa luukussa käytettiin yläpintalevynä kahden ja alapintalevynä yhden millimetrin alumiinilevyä. Ytimenä toimivan Finnfoamin kimmokerrointa ja tiheyttä varioitiin kappaleessa 4 olleen kuvan 4.5.2.2 mukaisesti. Ytimen paksuudeksi valittiin suoraan maksimipaksuus, jolla luukkuvarasto saadaan vielä mahtumaan kannen alle. Maksimipaksuus on noin 150 mm, koska tukijalat tarvitsevat myös tilaa, jolloin luukun pinoamiskorkeus on noin 350 mm. Varastoon ajon kannalta levyjen välissä pitää olla lisäksi muutaman kymmenen millimetrin rako, ettei törmäyksiä tapahdu heti, jos joku pellin reuna tai siirtokoukku on hieman kolhiintunut. Lisäksi varaston rakenteesta johtuen lisäkorkeutta tulee noin metri, jotta varaston liikkuva osa pysyy tukevasti kiskoillaan.

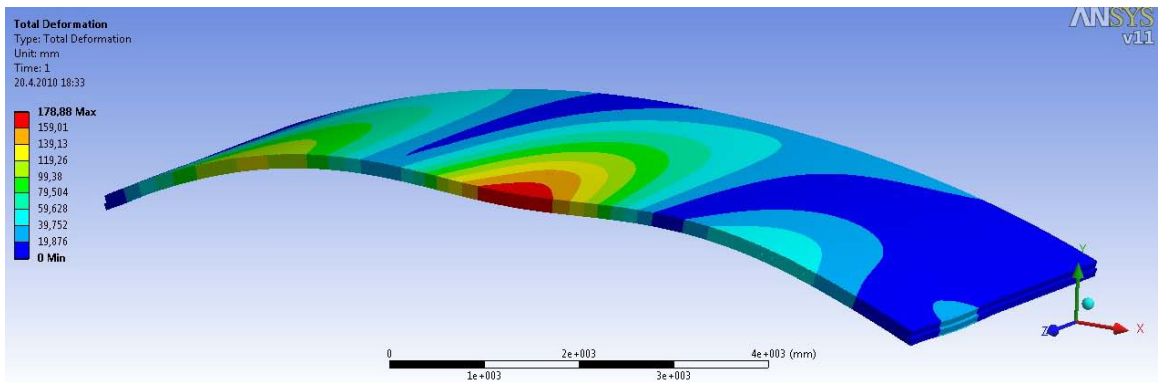
Kuormituksena käytettiin aluksi painovoiman lisäksi kahta ihmistä kuvaavaa kuormaa. Lumikuorma jätettiin pois, koska luukun ei uskottu kestävän maksimikuormituksia.

Malli tuettiin jalkojen kiinnityslapuista samaan tapaan, kuin edellisessäkin tapauksessa, eli rotaatio z-akselin ympäri sallittiin. Paksusta ydinosasta johtuen, mallissa käytettiin solidielementtejä. Pintalevyt mallinnettiin kuorielementeillä.

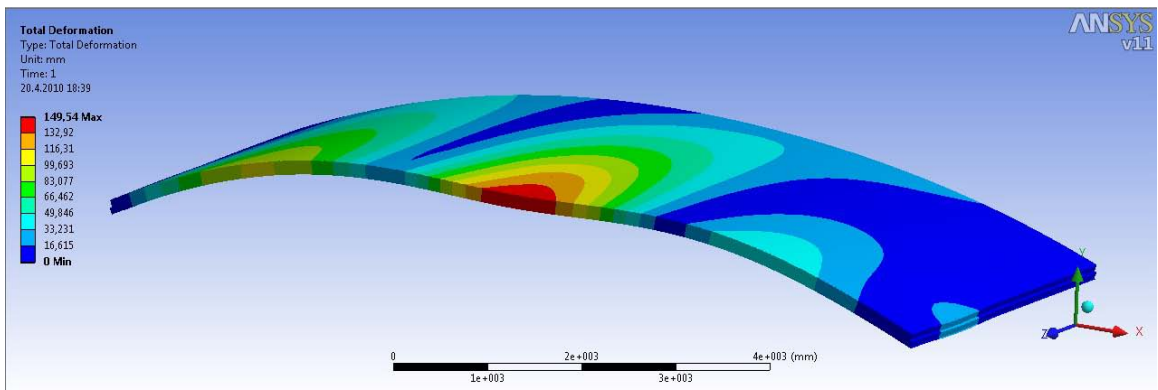
Kuvista 6.3.1–6.3.4 nähdään miten siirtymä muuttuu Finnfoamin kimmomoduulin ja tiheyden muuttuessa. Ensimmäisessä kuvassa tiheys on 30 kg/m^3 ja kimmomoduuli 15 MPa. Toisessa kuvassa tiheys on $36,7 \text{ kg/m}^3$ ja kimmomoduuli 25 MPa. Kolmannessa kuvassa tiheys on $43,3 \text{ kg/m}^3$ ja kimmomoduuli 30 MPa. Neljännessä kuvassa tiheys on 50 kg/m^3 ja kimmomoduuli 40 MPa.



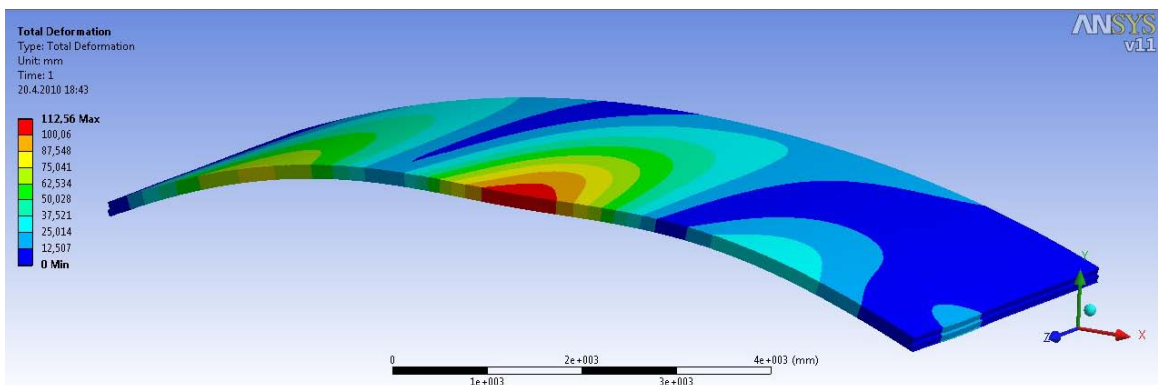
Kuva 6.3.1, Finnfoamista valmistetun kansiluukun siirtymät, kun tiheys on 30 kg/m^3



Kuva 6.3.2, Finnfoamista valmistetun kansiluukun siirtymät, kun tiheys on $36,7 \text{ kg/m}^3$



Kuva 6.3.3, Finnfoamista valmistetun kansiluukun siirtymät, kun tiheys on $43,3 \text{ kg/m}^3$



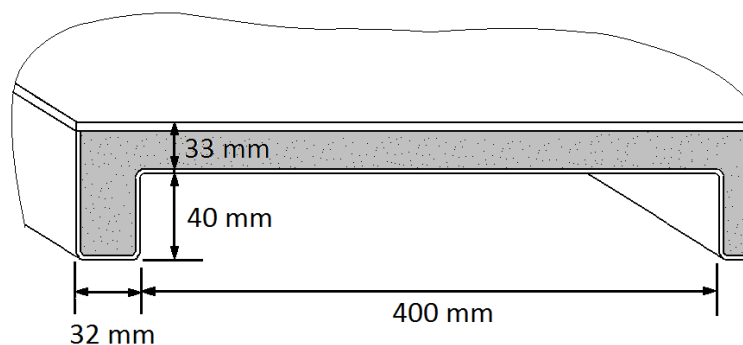
Kuva 6.3.4, Finnfoamista valmistetun kansiluukun siirtymä, kun tiheys on 50 kg/m^3

Siirtymän suhteen tilanne parani tiheyden ja kimmomoduulin kasvaessa, koska kimmomoduuli kasvoi suhteessa enemmän kuin tiheys. Viimeisessä variaatiossa siirtymä on kuitenkin edelleen huomattavasti liian suuri, vaikka lumikuorma on jätetty pois. Lisäksi kansiluukun paino on jo tässä vaiheessa n. 600 kg, joten tämä rakennevaihtoehto voidaan sulkea pois.

6.4 Vaahtomaisesta alumiinista valmistettu kaareva luukku

Vaahtomaiseksi luukuvaihtoehdoksi valittiin kohdassa 5.2 jäykistetty sandwich. Tällainen sandwich voidaan toteuttaa esimerkiksi sopivaan muotoon taivutetun alapintalevyn avulla. Jolloin levyyn muodostuu paksumpia kohtia, joihin vaahtomainen alumiini laajetessaan muodostaa jäykistävät tukikaaret. Taivutettu levy muodostaa metallisidoksen vaahton kanssa, joten alapintalevy ei pääse lommahtamaan. Alapinnan pystyosuudet jäykistävät huomattavasti luukkuja, vaahtoon verrattuna korkean kimmomoduulinsa ansiosta.

Mallinnuksessa pitää muistaa vaahtomaisen alumiinin rajoittavat tekijät, kuten maksimipaksuus (70 mm). Pintalevyjen paksuudet ovat samat, kuin edellisessä kohdassa (kuva 6.4.1).



Kuva 6.4.1, jäykistetyn sandwichin geometrian perusmuoto tietyillä mitoilla

Tässä vaihtoehdossa varioitavia muuttujia ovat kaikki kuvassa esitetyt mitat. Parhaan ratkaisun haravointi yksitellen mittoja muuttelemalla ja listaamalla

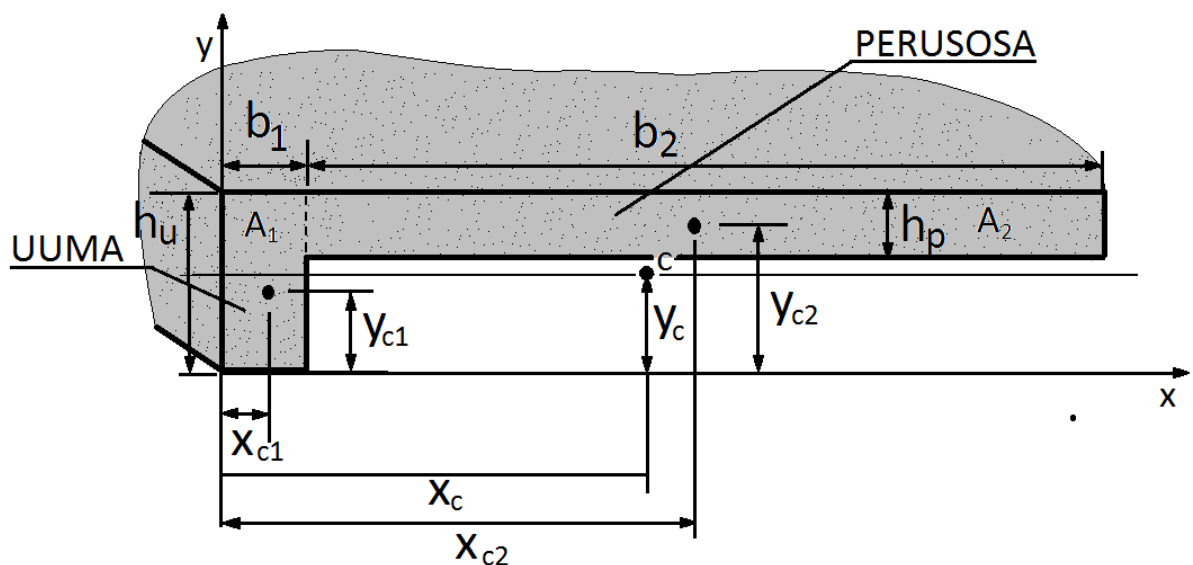
laskentatuloksia, veisi huomattavasti aikaa laskenta-ajan pituudesta johtuen. Sen vuoksi pyrittiin muodostamaan optimointiyhtälö, jolla voi haarukoida nopeasti esiin potentiaalisimmat ydinaineen muodot ilman FEM-laskentaa.

Vapaasti tuetun palkin pään siirtymää kuvataan yhtälöllä:

$$v = \frac{FL^3}{3EI} \quad (6.4.1)$$

Jossa F on voima, L on palkin massa, E on kimmomoduuli ja I on neliömomentti. Näistä neliömomentti on ainoa, joka on kytketty poikkipinnan geometriaan. Koska poikkileikkauksen ala on suoraan verrannollinen massaan, ja tässä halutaan hyvä massan ja jäykkyyden suhde, pitää optimointiyhtälön perustua neliömomentin variointiin.

Käsitellään yhden uuman ja yhden perusosan muodostamaa kokonaisuutta. Ensiksi pitää muodostaa yhtälö, jolla saadaan selville tällaisen poikkipinnan painopiste. Sitä varten pala jaetaan kuvan 6.4.2 mukaisesti kahteen osaan. Tässä tapauksessa riittää, kun saamme selville x -akselin suuntaisen keskeissuoran etäisyyden x -askelista.



(Kuva 6.4.2, pinnan painopiste)

Painopisteen etäisyys X-akselista saadaan selville seuraavalla yhtälöllä:

$$(A_1 + A_2)y_c = A_1y_{c1} + A_2y_{c2} \quad (6.4.2)$$

$$\Rightarrow y_c = \frac{A_1y_{c1} + A_2y_{c2}}{A_1 + A_2}$$

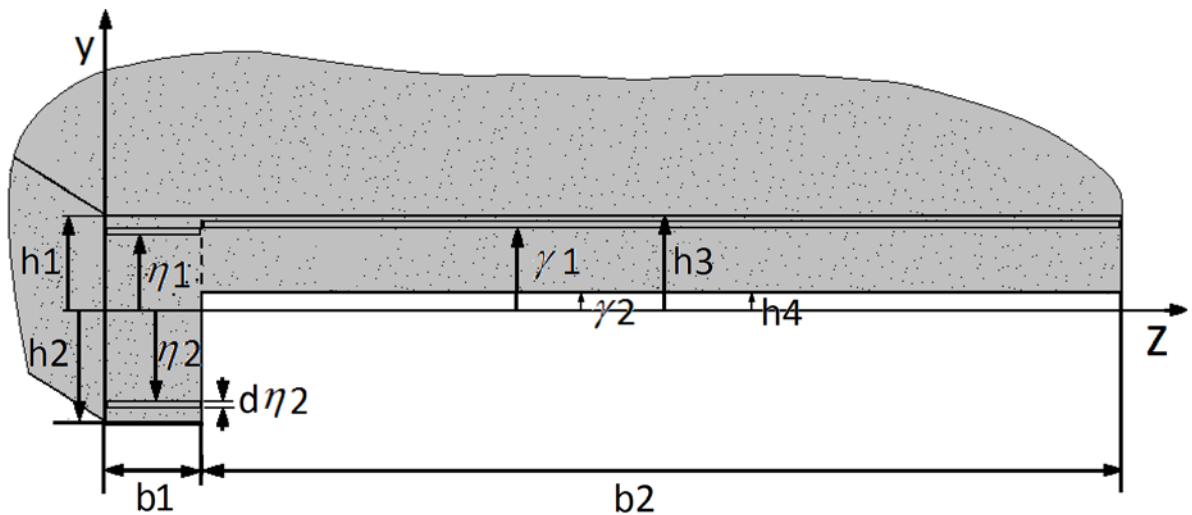
$$\Rightarrow y_c = \frac{h_u b_1 y_{c1} + h_p b_2 y_{c2}}{h_u b_1 + h_p b_2}$$

Nyt kun keskeissuoran paikka tiedetään, voidaan laskea neliömomentin, I_Z , arvo. Z-akseli on keskeissuoran kohdalla. Neliömomentin arvo lasketaan paloittain integroimalla pintojen yli kuvan 6.4.3 mukaisesti. Käyttämällä differentiaalelementtejä $dA = b_1 d\eta_1$, $dA = b_1 d\eta_2$, $dA = b_1 d\gamma_1$ ja $dA = b_2 d\gamma_2$ voidaan muodostaa yhtälö:

$$I_Z = \int_0^{h_1} \eta_1^2 b_1 d\eta_1 + \int_0^{h_2} \eta_2^2 b_1 d\eta_2 + \int_0^{h_3} \gamma_1^2 b_2 d\gamma_1 - \int_0^{h_4} \gamma_2^2 b_2 d\gamma_2 \quad (6.4.3)$$

Integroinnin jälkeen yhtälö saadaan muotoon:

$$I_Z = \frac{1}{3} b_1 h_1^3 + \frac{1}{3} b_1 h_2^3 + \frac{1}{3} b_2 h_3^3 - \frac{1}{3} b_2 h_4^3 \quad (6.4.4)$$



(Kuva 6.4.3, neliömomentti z-akselin suhteen)

Tämän jälkeen voidaan excel-ohjelmalla muodostaa yhtälö, jonka avulla taulukoidaan tarpeellinen määrä erilaisia variaatioita (taulukko 6.4.1). Taulukon kolmen ensimmäisen rivin mitoilla levystä tulee tasapaksu, joten edellä esitetyt kaavat eivät sovi sellaisenaan niiden neliömomentin laskentaan, vaan ne on laskettu erikseen.

Muuttujille asetettiin tietyt reunaehdot, jottei taulukosta olisi tullut liian pitkä:

- $10 \leq h_p \leq 30$
- $h_p \leq h_u \leq 70$
- $10 \leq b_2 \leq 30$
- $200 \leq b_2 \leq 400$

Taulukko, 6.4.1, neliömomentin ja pinta-alan suhteen maksimointi

Uuman		perusosan		osien määrä	yhteen laskettu pinta-ala	Yhden osan	Suhde
korkeus h_u [mm]	leveys b_1 [mm]	korkeus h_p [mm]	leveys b_2 [mm]	[kpl]	$(A1+A2) \times \text{kpl}$ [mm ²]	I_z [mm ⁴]	$I_z/\text{pinta-ala}$ [%]
10	10	10	200	19,048	40000	17500	0,438

20	10	20	200	19,048	80000	140000	1,75
30	10	30	200	19,048	120000	472500	3,938
20	10	10	200	19,048	41905	86970	2,075
30	10	10	200	19,048	43810	141341	3,226
40	10	10	200	19,048	45714	245000	5,359
50	10	10	200	19,048	47619	410833	8,628
60	10	10	200	19,048	49524	650513	13,135
70	10	10	200	19,048	51429	974722	18,953
30	20	10	200	18,182	47273	203974	4,315
40	20	10	200	18,182	50909	387619	7,614
50	20	10	200	18,182	54545	675000	12,375
60	20	10	200	18,182	58182	1082917	18,613
70	20	10	200	18,182	61818	1626569	26,312
40	30	10	200	17,391	55652	507917	9,127
50	30	10	200	17,391	60870	893452	14,678
60	30	10	200	17,391	66087	1435614	21,723
70	30	10	200	17,391	71304	2153435	30,201
40	30	20	200	17,391	90435	970256	10,729
50	30	20	200	17,391	95652	1418561	14,831
60	30	20	200	17,391	100870	2066437	20,486
70	30	20	200	17,391	106087	2940014	27,713
20	10	10	200	9,756	40976	154286	3,765
30	10	10	200	9,756	41951	211647	5,045
40	10	10	200	9,756	42927	323030	7,525
50	10	10	200	9,756	43902	504167	11,484
60	10	10	200	9,756	44878	769855	17,154
70	10	10	200	9,756	45854	1134060	24,732
30	20	10	400	9,524	43810	282681	6,453

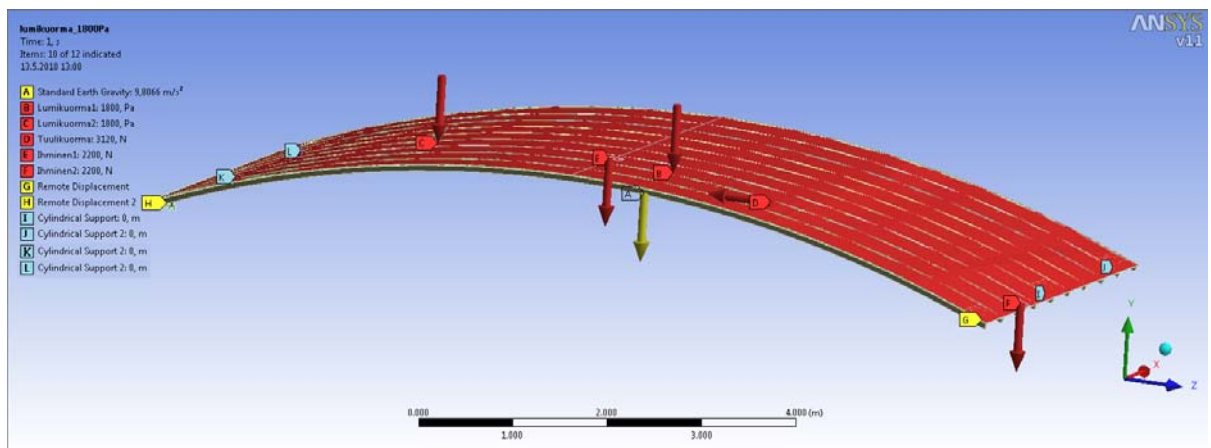
40	20	10	400	9,524	45714	490000	10,719
50	20	10	400	9,524	47619	821667	17,255
60	20	10	400	9,524	49524	1301026	26,271
70	20	10	400	9,524	51429	1949444	37,906
40	30	10	400	9,302	48372	639487	13,22
50	30	10	400	9,302	51163	1100379	21,507
60	30	10	400	9,302	53953	1759540	32,612
70	30	10	400	9,302	56744	2643292	46,583
40	30	20	400	9,302	85581	1539710	17,991
50	30	20	400	9,302	88372	2042325	23,111
60	30	20	400	9,302	91163	2782177	30,518
70	30	20	400	9,302	93953	3795454	40,397

Taulukosta nähdään, että pinta-alaansa suhteutettuna jäykin rakenne saavutetaan, kun uuma on mahdollisimman korkea, niiden väli on mahdollisimman suuri ja perusosa on mahdollisimman ohut.

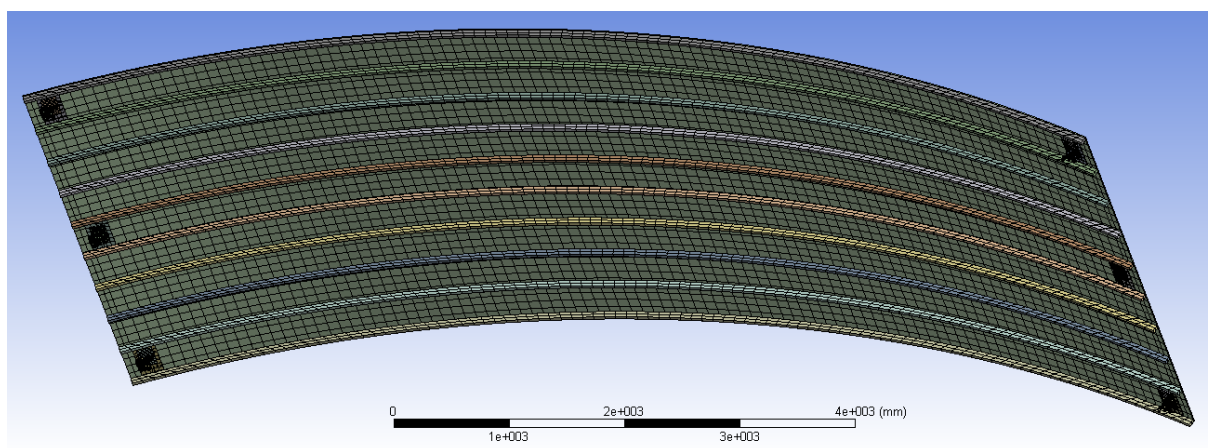
Kuvan 6.4.4 kansiluukku on tehty taulukon mittojen mukaan ja sen yläpintalevy on 2 mm ja alapintalevy 1 mm paksu. Tuennat ja kuormitukset ovat muuten samanlaiset, kuin edellä olleessa maksimilumikuormitustapauksessa, mutta tässä on lisäksi huomioitu tuulikuorma. Tuulikuorma on asetettu vaikuttamaan luukun toiseen puoliskoon siten, että voima on kohtisuorassa pinnan projektiota vastaan.

Tuulikuorma voitiin ottaa mukaan laskentaan, koska malli oli geometrialtaan sen verran yksinkertaisempi, ettei solmujen määrä elementtimallissa noussut kovin suureksi, vaikka vaahdon osuus mallinnettiin solidielementeillä (kuva 6.4.5).

Vaahdon tiheydeksi asetettiin 500 kg/m^3 , kimmomoduuliksi 3500 MPa ja POISSONin vakioksi $0,33$. Eli kuvan 4.5.1.3 mukaan alimmat arvot.

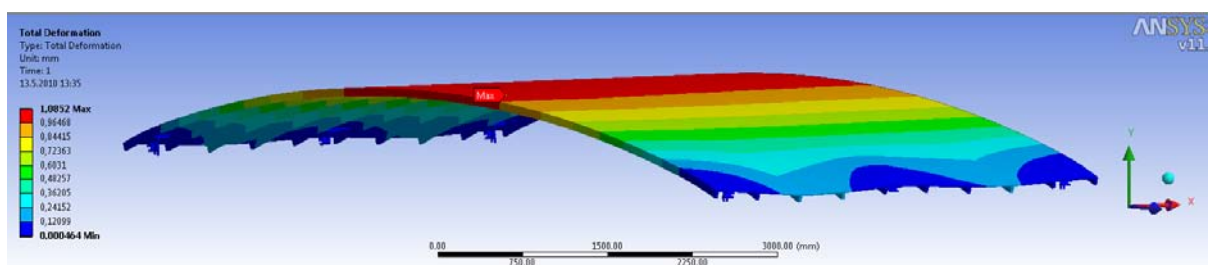


Kuva 6.4.4, vaahtomaisesta alumiinista tehdyn kansiluukun kuormitukset ja tuennat



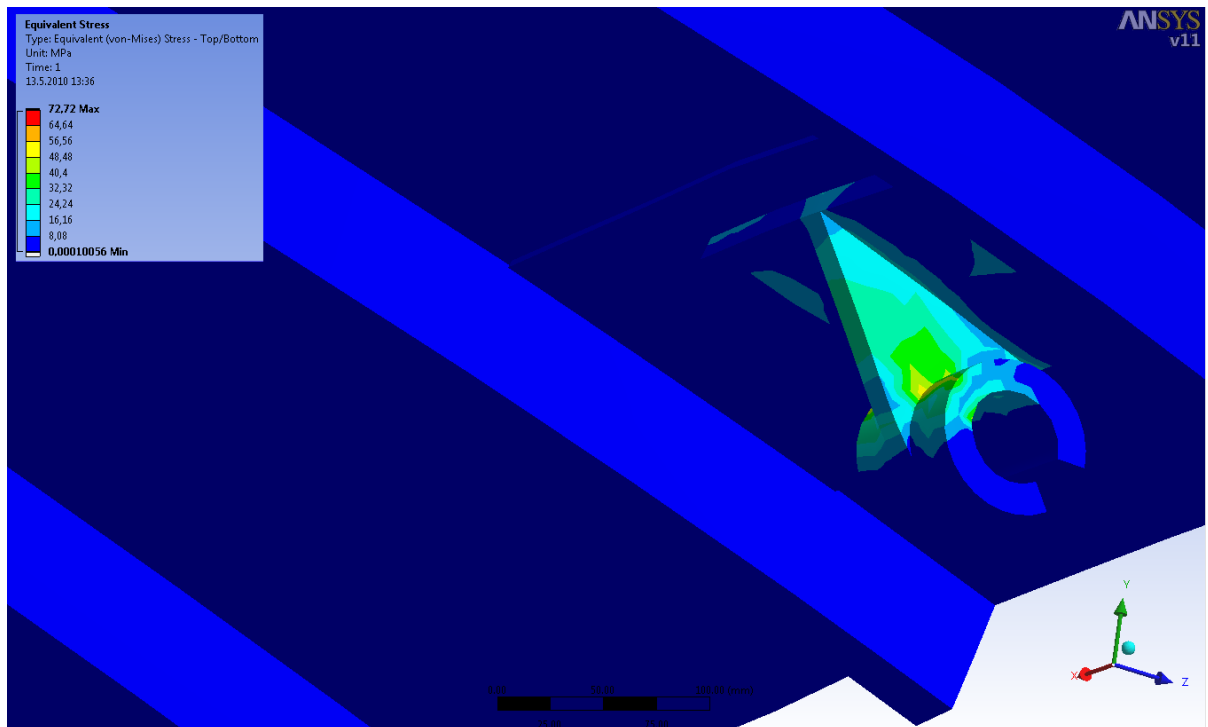
Kuva 6.4.5, vaahtomaisesta alumiinista tehdyn kansiluukun elementtimalli

Kuten kuvasta 6.4.6 voi nähdä siirtymät ovat erittäin pienet, eivätkä ihmistä kuvaavat pistekuormat aiheuta ongelmia. Reunalla oleva pistekuorma sijaitsee kahden keskimmäisen uuman puolella välissä, eli pahimmassa paikassa.



Kuva 6.4.6, vaahtomaisesta alumiinista tehdyn kansiluukun siirtymät, siirtymät skaalattu 240-kertaisiksi

Jännitykset ovat erittäin alhaisella tasolla, eikä suurempia jännityshuippujakaan esiinny. Kiinteän ydinaineen ansiosta jännitykset jakautuvat suuremmalle alueelle, joten jalan tukilevyn reunallekaan ei synny jännityskeskittymää.



Kuva 6.4.6, vaahtomaisesta alumiinista tehdyn kansiluukun jännitykset, siirtymät skaalattu 240-kertaisiksi

6.5 Siirtojärjestelmään kohdistuvat voimat

Siirtolaitteen tapauksessa ollaan lähinnä kiinnostuneita siitä kuinka suuri vääntömomentti moottorilta vaaditaan luukkujen liikkeelle saamiseksi ja kuinka paksu ketjun pitää olla, jotta se kestää siirtovoiman.

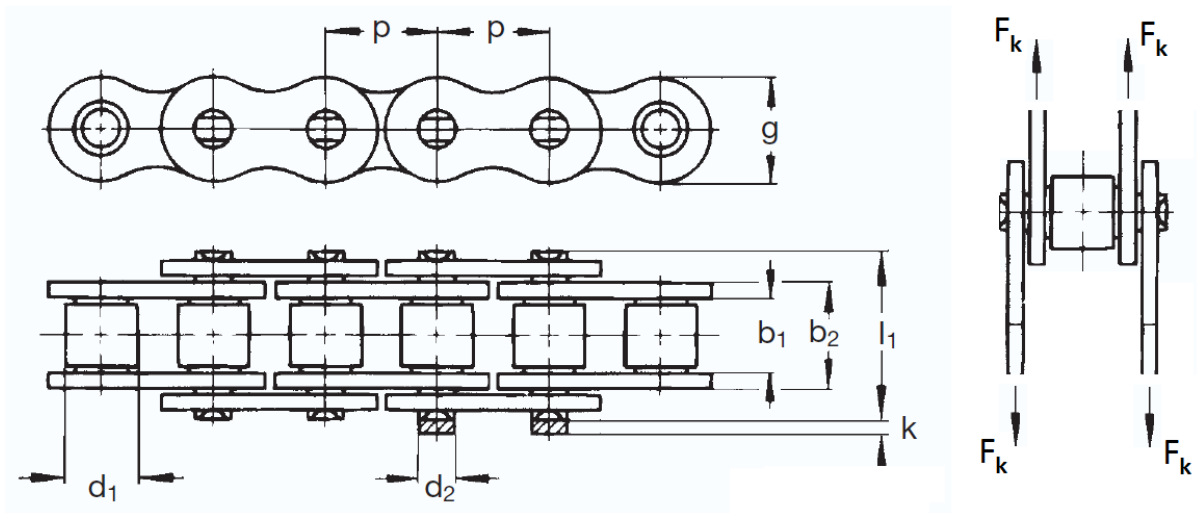
Sivulla 65 olleessa laskussa saatiin luukkujen siirtovoimaksi 15146 N. Lisäksi tiedetään hammaspyörän jakohalkaisija, joka on 194,6 mm. Näiden tietojen pohjalta voidaan helposti laskea moottorilta vaadittu vääntömomentti M_M :

$$M_T = F_T \cdot \frac{d_h}{2} \quad (6.5.1)$$

$$M_T = 15146\text{N} \cdot \frac{0,1946\text{m}}{2}$$

$$\underline{\underline{M_T = 1474\text{Nm}}}$$

Ketjussa kuormitukset kohdistuvat yhdelle tapille ja kahdelle lenkille (kuva 6.5.1).



Kuva 6.5.1, ketjun mitat ja voimat

Lasketaan ensin mikä tapin halkaisijan d_2 tulee vähintään olla, jottei se leikkaannu poikki:

Tapin poikkipinta-ala A_T on:

$$A_T = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} \quad (6.5.1)$$

Voima F_k on puolet siirtovoimasta F_T .

Tapin leikkausjännityksen τ_T yhtälö on:

$$\tau_T = \frac{F_K}{A_T} \quad (6.5.2)$$

Sijoitetaan poikkipinta-alan lauseke yhtälöön:

$$\Rightarrow \tau_T = \frac{F_K}{\frac{\pi \cdot d_2^2}{4}}$$

Pyörittelyn jälkeen yhtälö saadaan muotoon:

$$d_2 = \sqrt{\frac{4F_K}{\pi \cdot \tau_T}} \quad (6.5.3)$$

Ketjulle halutaan vähintään puolitoistakertainen varmuus myötöön nähden, joten:

$$\tau_{T_{sall}} = \frac{\tau_T}{1,5} \quad , \text{ ketjumateriaalin myötöraja on 235 MPa}$$

$$\Rightarrow \tau_{T_{sall}} = 156,6 \text{ MPa}$$

Nyt voidaan muodostaa yhtälö, jonka avulla ratkaistaan tapin minimihalkaisija:

$$d_{2\min} = \sqrt{\frac{4 \cdot 15146 \text{ N}}{\pi \cdot 156,6 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}}$$

$$\underline{\underline{d_{2\min} = 11.1 \text{ mm}}}$$

Lähin tapin halkaisija huoltovapaissa Marathon ketjuissa on 14,63. Tällaisen ketjun lenkit ovat 6,25 mm paksut ja 33,4 mm korkeat. Nyt voidaan laskea pinta-alat A_{L1} ja A_{L2} varmistaa että myös lenkit kestävät (kuva 6.5.2).

$$A_{L1} + A_{L2} = (33,4\text{mm} - 14,63\text{mm}) \cdot 6,25\text{mm}$$

$$A_{L1} + A_{L2} = 117,3\text{mm}^2$$

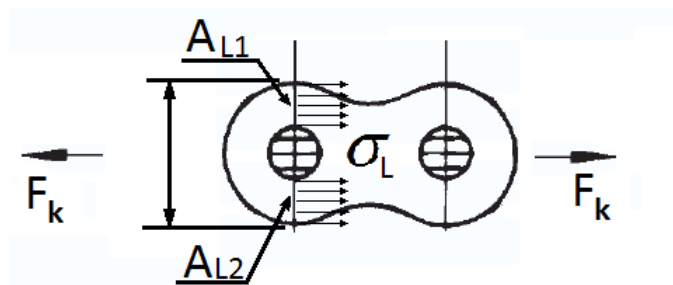
Nyt voidaan laskea normaalijännitys σ_L seuraavan yhtälön avulla:

$$\sigma_L = \frac{F_k}{A_{L1} + A_{L2}} \quad (6.5.4)$$

$$\sigma_L = \frac{15146\text{N}}{117,3\text{mm}^2}$$

$$\underline{\underline{\sigma_L = 129,2\text{MPa}}}$$

Jännitys ei siis ylitä sallittua arvoa.



Kuva 6.5.2, ketjun lenkin jännitykset

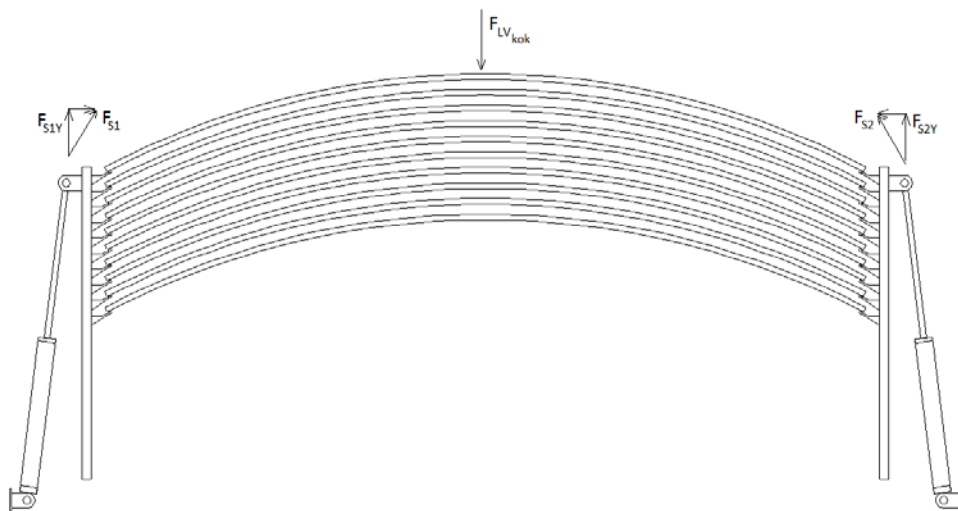
6.6 Luukkuvaraston sylinterin nurjahtaminen

Suurin kuormitus sylinteriin kohdistuu, kun luukkuvarasto on ylhäällä ja kaikki luukut ovat varastossa. Lisäksi huomioidaan tilanne, jossa lastauksen aikana sataa lunta. Oletetaan, että ylimmän luukun päälle kertyy maksimissaan 10 cm lunta. Vastataneen lumen ominaispaino on n. 100 kg/m^3 . Luukun päällä on siis n. 400 kg lunta.

Luukkujen yhteen laskettu paino on 3750kg ja luukkuvaraston n. 2250 kg. Luukkuvaraston alaspäin kohdistama kokonaisvoima $F_{LV_{kok}}$ on:

$$F_{LV_{kok}} = (400\text{kg} + 3750\text{kg} + 2250\text{kg}) \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 62784\text{N} \quad (6.6.1)$$

Kuvassa 6.6.1 on hahmotelma luukkuvaraston voimien jakautumisesta. Sylinterit ovat 7,8 asteen kulmassa luukkuvarastoon nähden.



Kuva 6.6.1, Voimien jakautuminen luukkuvarastossa

Tasapainosta seuraa, että sylinterin y-akselin suuntaisten voimakomponenttien

F_{S1y} ja F_{S2y} summa on yhtä suuri kuin $F_{LV_{kok}}$:

$$F_{LV_{kok}} = F_{S1y} + F_{S2y} \quad (6.6.2)$$

Symmetriasta seuraa, että voimat F_{S1y} ja F_{S2y} ovat yhtä suuret:

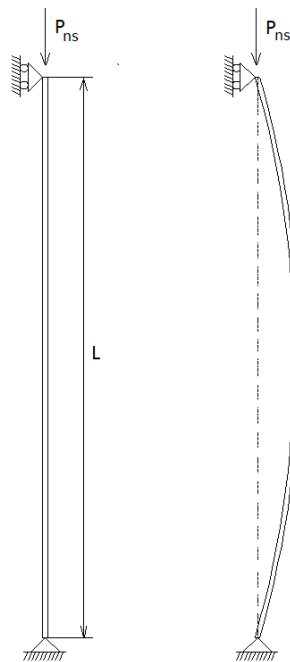
$$\Rightarrow F_{S1y} = \frac{F_{LV_{kok}}}{2} \quad (6.6.3)$$

$$\Rightarrow F_{S1} = \frac{F_{LV_{kok}}}{2 \cdot \cos 7,8^\circ} \quad (6.6.4)$$

$$\Rightarrow \underline{\underline{F_{S1} = 31685\text{N}}}$$

Sylinterin nurjahtaminen lasketaan yleensä yksinkertaisuuden vuoksi siten, että ajatellaan sylinterin männänvarren olevan yhtä pitkä, kuin koko sylinteri maksimi iskupituudellaan. Sylinteriosa jätetään siis huomioimatta.

Sylinteri on nivelellisesti kiinnitetty molemmista päistään, joten se käyttäytyy EULERin toisen perusnurjhdustapauksen mukaisesti (kuva 6.6.2).



Kuva 6.6.2, EULERin toinen perusnurjhdustapaus

Nurjahdusvoima P_n saadaan yhtälöstä:

$$P_n = \frac{\pi^2 EI}{nL^2} \quad (6.6.5)$$

Teräksen kimmomoduuli E on n. 210 000 MPa ja n on varmuuskerroin, joka liikkuvassa kalustossa on 2-4.

Nurjahdukselle halutaan nelinkertainen varmuus kuormitukseen nähden:

$$\Rightarrow P_{nS_{all}} = 4 \cdot F_{S1} \quad (6.6.6)$$

$$\Rightarrow P_{nS_{all}} = 126740\text{N}$$

Koska sylinterin pituus tiedetään, voidaan nyt yhtälöstä 7.6.5 ratkaista I_S :

$$I_S = \frac{L^2 P_{nS_{all}}}{\pi^2 E} \quad (6.6.7)$$

$$I_S = \frac{(4500\text{mm})^2 \cdot 126740\text{N}}{\pi^2 \cdot 210000 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}}$$

$$\underline{\underline{I_S = 1238282\text{mm}^4}}$$

Jos männän varsi voidaan valmistaa putkesta, saadaan sylinteriä kevennettyä huomattavasti, mutta tämä pitää selvittää sylinterivalmistajalta. Sylinterivalmistajalta pitää selvittää myös mahdolliset saatavilla olevat koot. Tässä lasketut koot ovat lähinnä suuntaa-antavia.

Lasketaan ensin putkesta valmistettu männänvarsi:

$$I = \frac{\pi}{64}(D^4 - d^4), \text{ jossa } D \text{ on putken ulko- ja } d \text{ sisähalkaisija.} \quad (6.6.8)$$

Lähimmäksi edellä ollutta neliömomentin arvoa päästään putkella 90x7,5:

$$I = \frac{\pi}{64}((90\text{mm})^4 - (75\text{mm})^4)$$

$$\underline{\underline{I = 1667467\text{mm}^4}}$$

Jos männänvarsi valmistetaan pyörötangosta, halkaisijaltaan 75 mm tanko on riittävä:

$$I = \frac{\pi}{64}((75\text{mm})^4) \quad (6.6.9)$$

$$\underline{\underline{I = 1553155\text{mm}^4}}$$

Mahdollisuus kääntää sylinteri toisin päin kannattaa tutkia jatkokehitysvaiheessa. Tällöin sylinterin toinen pää kiinnitettäisiin vahvistettuun kansirakenteeseen ja toinen pää luokkuvaraston alareunaan. Tässä tapauksessa voima on kokoajan vetoa ja nurjahdusriski poistuu. Nurjahdus on pitkillä sylintereillä voimaan nähden määräävä tekijä, joten sylinterin halkaisijaa voitaisiin pienentää.

6.7 Luokkuvarasto

Luukkujen ollessa varastossa lastauksen aikana, ylimmän luukun päälle voi pahimmassa tapauksessa sataa 10 cm lumikerros. Tällöin ylimmän luukun varastoon kohdistamat voimat voidaan katsoa taulukosta 6.2.1. Ylin luukku suojaa muita luokkua lumisateelta, joten niiden voimat lasketaan tilanteessa, jossa luokkuun kohdistuu ainoastaan maan vetovoima (taulukko 6.7.1).

Taulukko 6.7.1, kuormittamattoman luukun aiheuttamat voimat

Jalka	x-komponentti [N]	y-komponentti [N]	z-komponentti [N]	tukireaktio [N]
1	0	620	1168	1322
2	0	710	1262	1448
3	0	664	1192	1364

Luokkuvaraston laskentamallista saatiin sylinteriä suoraan alaspäin kuormittavaksi voimaksi n. 33124 N. Edellisessä kappaleessa kuormittava voima oli n. 31400 N. Ero on niin pieni ettei sylinterin nurjahduslaskuja tehdä tässä vaiheessa uudestaan.

Sylinterin vinoudesta johtuen sylinterin kiinnikkeeseen pitää asettaa vaakasuuntainen voimakomponentti F_{S1_x} .

$$F_{S1_x} = 33124\text{N} \cdot \tan 7,8^\circ \quad (6.7.1)$$

$$\underline{\underline{F_{S1_x} = 4537\text{N}}}$$

Luokkuvarasto liikkuu ylös - alas suunnassa U:n muotoisilla kiskoilla. Varaston pitää ylhäällä sylinteri, jonka voima kohdistuu yhteen nostokorvaan (kuva 6.7.3). Tämän korvakkeen reikään on asetettu "displacement"-reunaehto, jolta on suljettu y-suuntainen translaatio ja rotaatiot. Vapaiksi on jätetty z- ja x-akselien suuntaiset

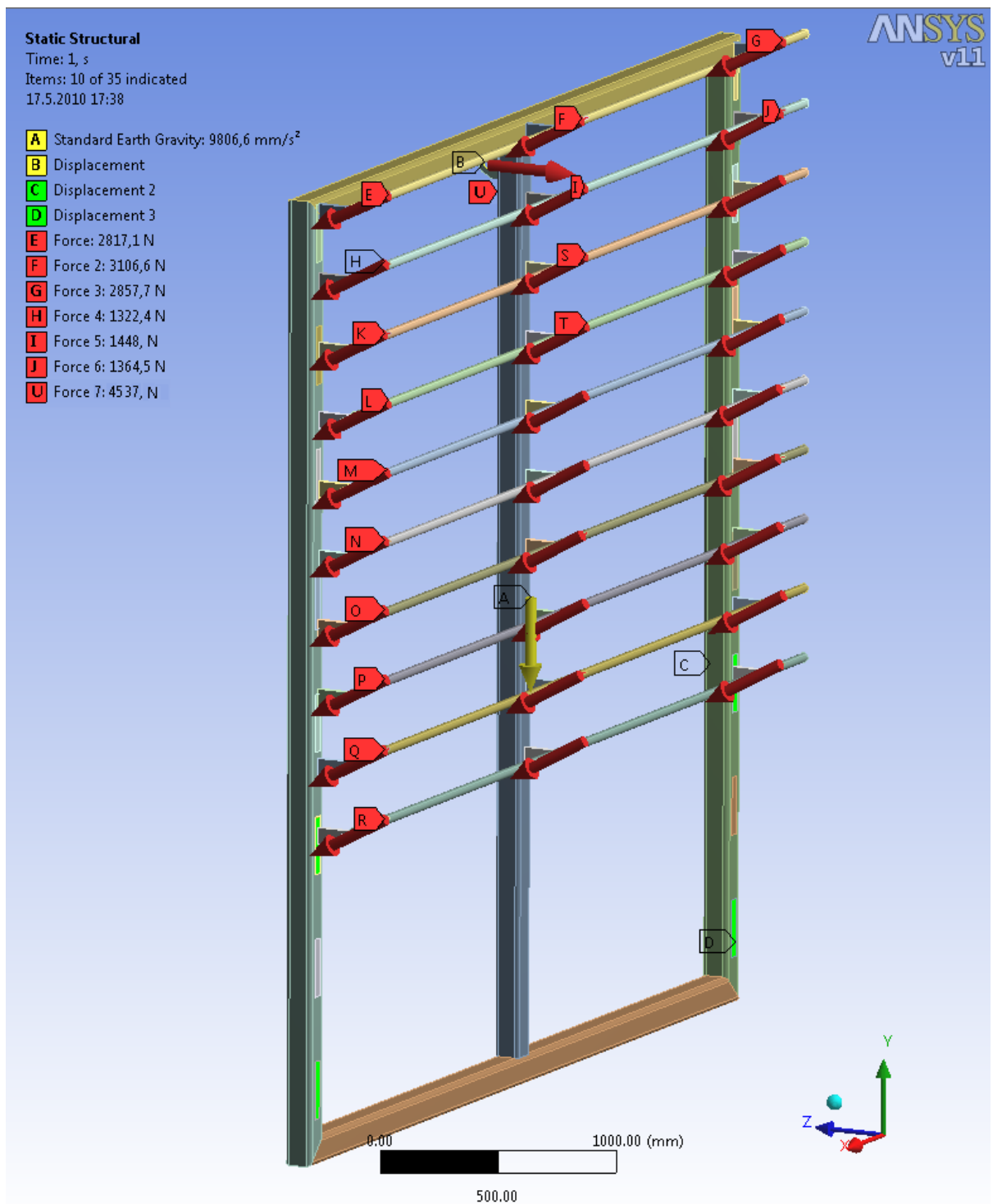
translaatiot, vaikka x-suunnalla ei ole tulosten kannalta juurikaan merkitystä. Lisäksi reiän reunaan on asetettu z-akselin miinus suuntaan edellä mainittu voimakomponentti.

Neljään liukulaakeriin on asetettu ”displacement”-reunaehdot, jotka sallivat y-suuntaisen translaation, mutta sulkevat rotaatiot ja x- ja z-akselin suuntaiset translaatiot. Kuvan 6.7.1 kuormitustapaus on pahin mahdollinen, muissa tilanteissa liukulaakereita on useampia kantamassa sivusuuntaisia voimia, momenttivarsi pienenee ja luokkuja on vähemmän varastossa.

Luokkuvaraston runkomateriaalina on mallissa käytetty S355 teräksestä valmistettua neliöputkipalkkia 120x120x10, jonka kimmomoduuli on 210 GPa ja POISSONin vakio 0,3.

Luokkuja kuvaavat kuormitukset on asetettu edellä olleiden taulukoiden mukaisesti, kohtiin, joissa luokkujen jalat olisivat.

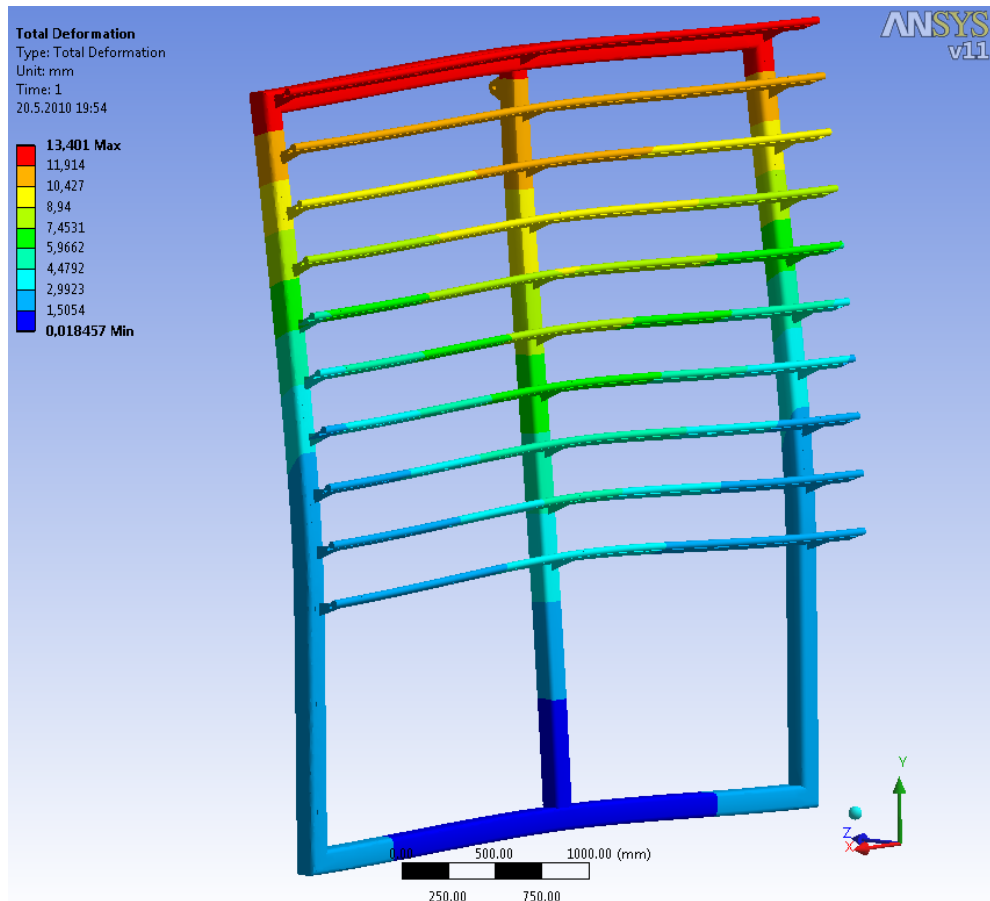
Voimat E, F ja G on otettu taulukosta 6.2.1 ja voimat H, I ja J taulukosta 6.7.1. Loput voimat ovat yhtä suuret, kuin H, I ja J paitsi voima U, joka kuvaa sylinterin vaakasuuntaista voimakomponenttia.



Kuva 6.7.1, luokkuvaston tuennat ja kuormitukset

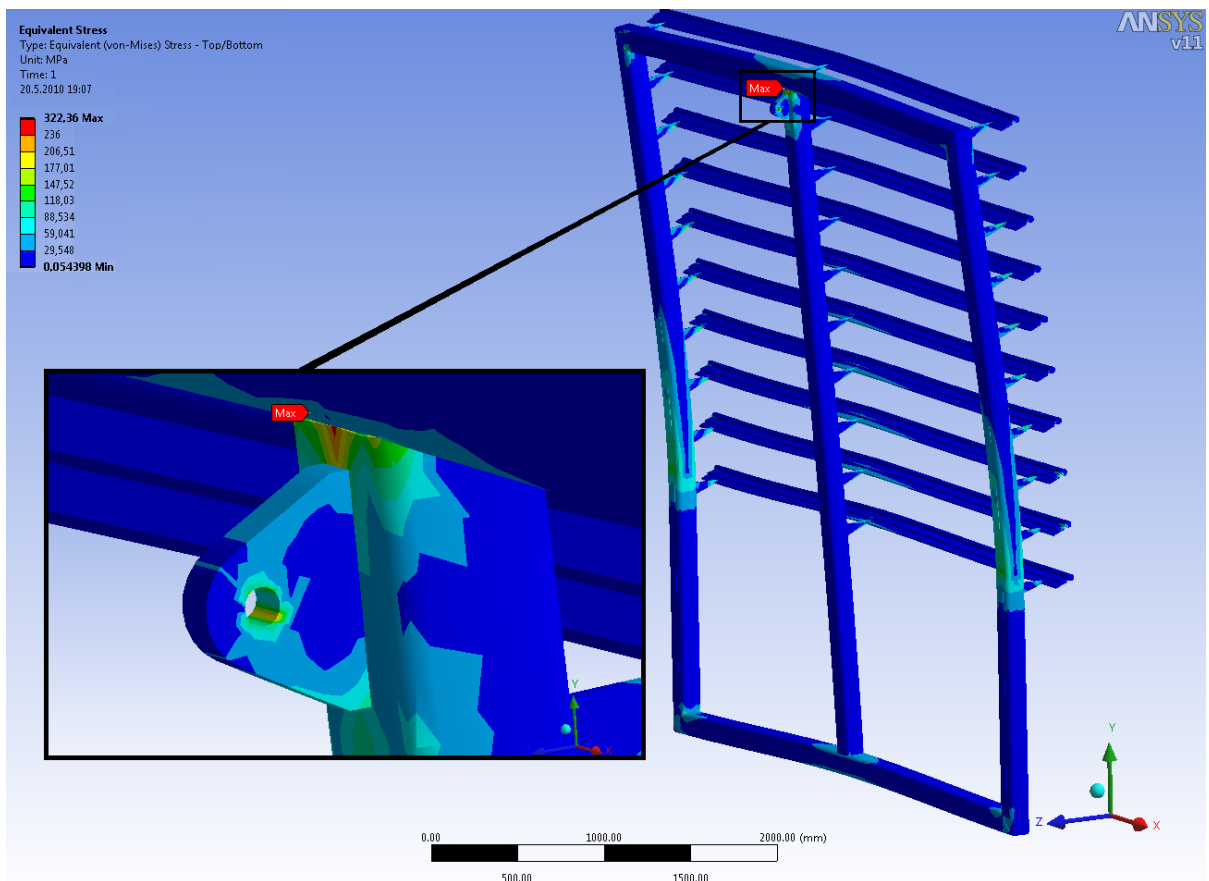
Kuten kuvasta 6.7.2 voi nähdä, malli käyttäytyy niin kuin todellinenkin rakenne, vastaavassa kuormitusilanteessa. Maksimisiirtymä 13,4 mm on melko suuri, mutta hyväksyttävällä tasolla, koska suurempia jännityksiä ei ilmene. Siirtymien ei

myöskään pitäisi haitata luokkuvaraston paikoittamista, koska U-kisko loppuu hyvin lähelle ruumasta tulevia johteita. Tällöin siirtymä kohdassa, jossa luokku siirtyy levyvarastoon, on lähinnä pystysuuntaista. Tämä siirtymä kompensoituu, koska anturit pysäyttävät liikkeen vasta, kun johteiden päät ovat kohdakkain.



6.7.2, luokkuvaraston siirtymät, kun siirtymät on skaalattu 22-kertaisiksi

Kuvassa (6.7.3) jännitykset on rajattu 236 MPa:iin. Tällä arvolla turvakerroin myötöön nähden on 1,5. Kuten kuvasta huomataan, ainoa kohta, jossa jännitykset nousevat yli myötörajan on, keskimmäisen runkopalkin yläpäässä. Tällaista hyvin pistemäistä jännityskeskittymää ei huomioida staattisessa laskennassa.



6.7.3, luukkuvaraston jännitykset, siirtymät skaalattu 20-kertaisiksi

6.8 Ruuman kiskot

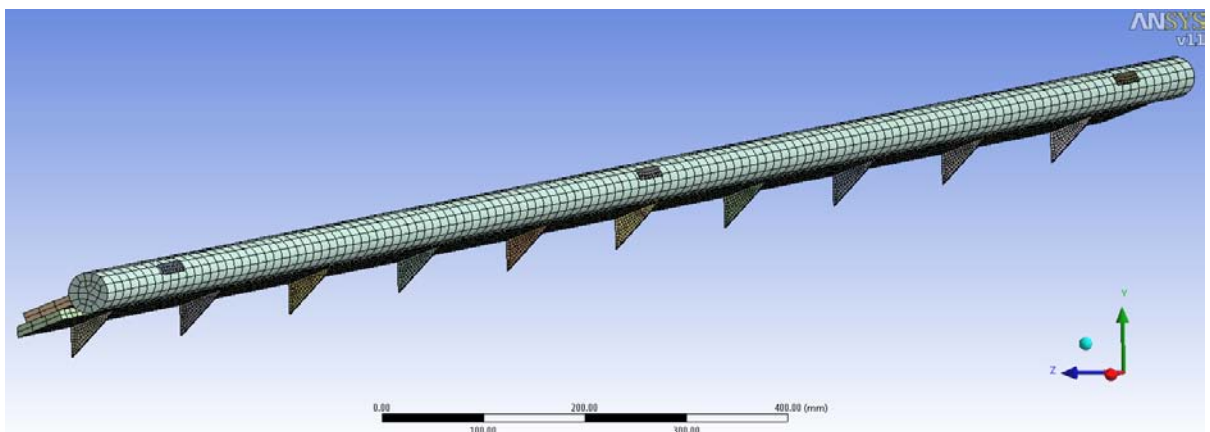
Edellisessä kohdassa luukkuvaraston johteet kestivät luukkujen aiheuttaman kuormituksen, mutta ruuman johteet pitää kuitenkin laskea erikseen, koska niiden pitää kestää myös maksimilumikuorman aiheuttamat kuormitukset (taulukko 6.8.1). Tilannetta helpottaa se, että kiskot ovat koko matkalta tuettu, toisin kuin luukkuvarastossa, jossa tuentapisteitä oli kolme. Lisäksi kiinnityskisko on hieman kapeampi, joten momenttivarsi on pienempi. Momenttivarrella ei tosin ole suurtakaan merkitystä, koska tuenta on kuormittavan voiman suuntainen.

Taulukko 6.8.1, kiskoihin kohdistuvat voimat, kun luukkujen päällä on maksimilumikuorma

Jalka	x-komponentti [N]	y-komponentti [N]	z-komponentti [N]	tukireaktio [N]
1	0	13319	27141	30234
2	0	16140	29577	33695
3	0	11815	25937	28501

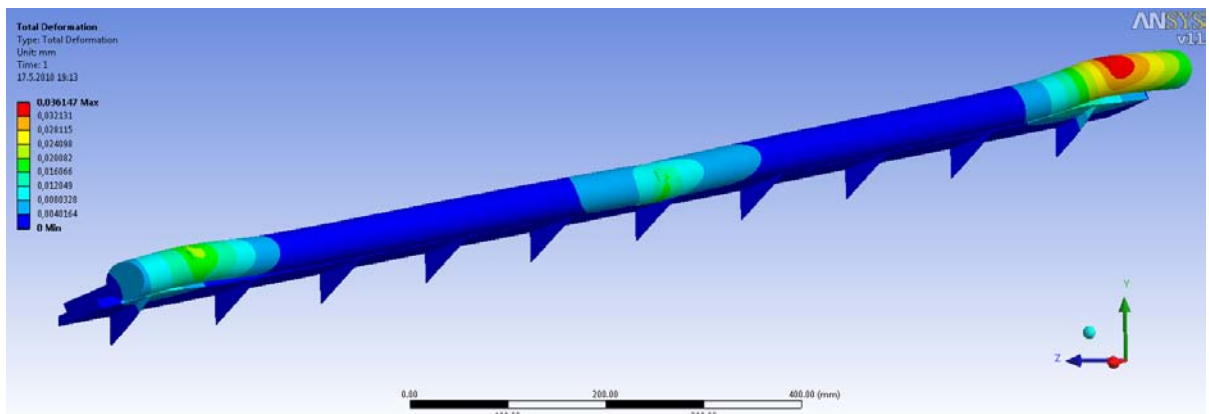
Kuvassa 6.8.1 on esitetty ruuman johteen elementtimalli. Elementtimalli on tehty solidielementeillä ja lisäksi siihen on mallinnettu kuorielementeillä voimien kohdistumisalueet. Ensimmäisessä mallissa käytetään johteen umpinaista pyörötankoa (Ø40 mm) ja kiinnityskiskot ovat 10 mm paksua lattarautaa. Johteiden materiaali on AISI 316 ja kiinnityskiskojen, rakenneteräs S355. Näillekin osille halutaan 1,5-kertainen varmuus myötöön nähden, joten johteelle sallittu jännitys on 133 MPa ja kiinnityskiskoille 236 MPa.

Malli on kiinnitetty "fixed"-reunaehdolla koko kiinnityskiskon matkalta, sekä tukipolvien pinnoista. Voimat kohdistuvat taulukon mukaisesti kuormituslappuihin, jotka sijaitsevat samalla linjalla vastakkaisella puolella olevan kiinnityskiskon kanssa.

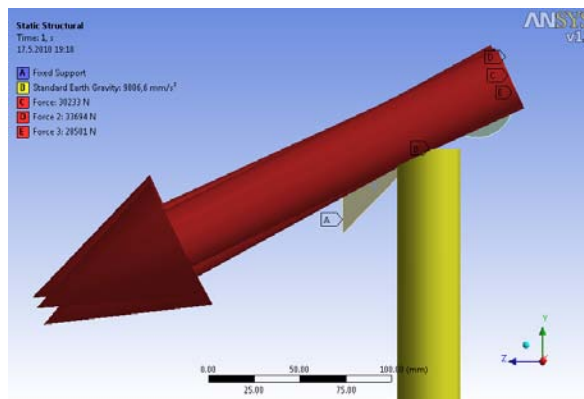


6.8.1, ruuman johteen elementtimalli

Johteen siirtymät ovat erittäin pienet (kuva 6.8.2). Maksimisiirtymän suuruus on ainoastaan 0,036 mm. Maksimisiirtymän paikka on poikkeuksellisesti toisen reunajalan kohdalla, eikä keskimmäisen, kuten voisi olettaa. Tämä johtuu pienistä eroista voimien suuntauksissa (kuva 6.8.3). Keskimmäisen jalan suunta on lähempänä optimaalista kulmaa, kuin reunimmaisten, joten sen aiheuttama siirtymä on pienempi.

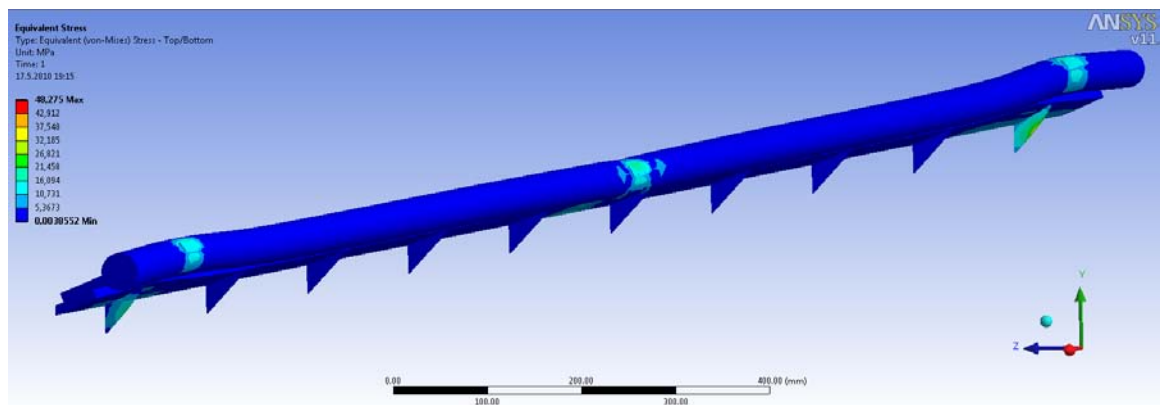


6.8.2, ruuman johteen siirtymät, kun siirtymät on skaalattu 500-kertaisiksi



6.8.3, voimien suuntauksessa on pieni kulmaero

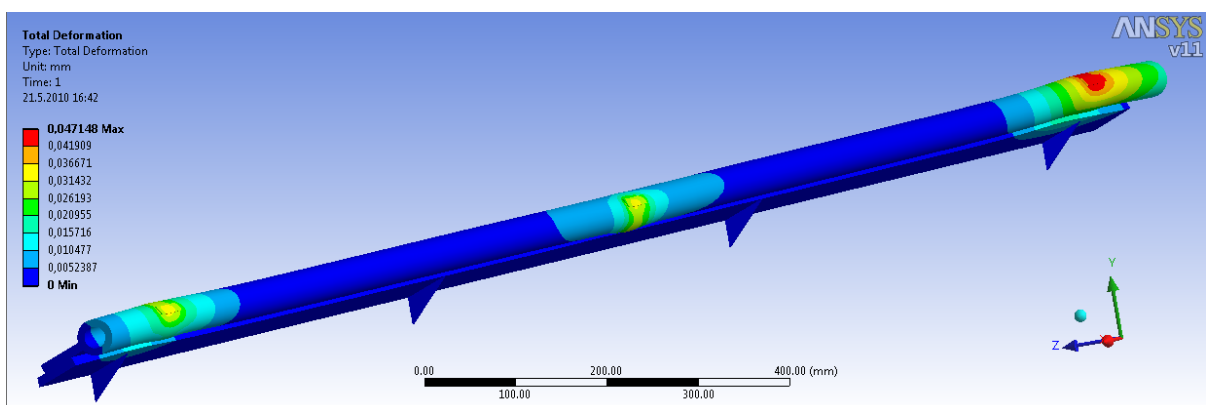
Jännitykset ovat myös erittäin alhaisella tasolla (kuva 6.8.4), joten tutkitaan seuraavaksi voiko johdetta keventää, käyttämällä putkea.



6.8.4, ruuman johteen jännitykset, siirtymät skaalattu 500-kertaisiksi

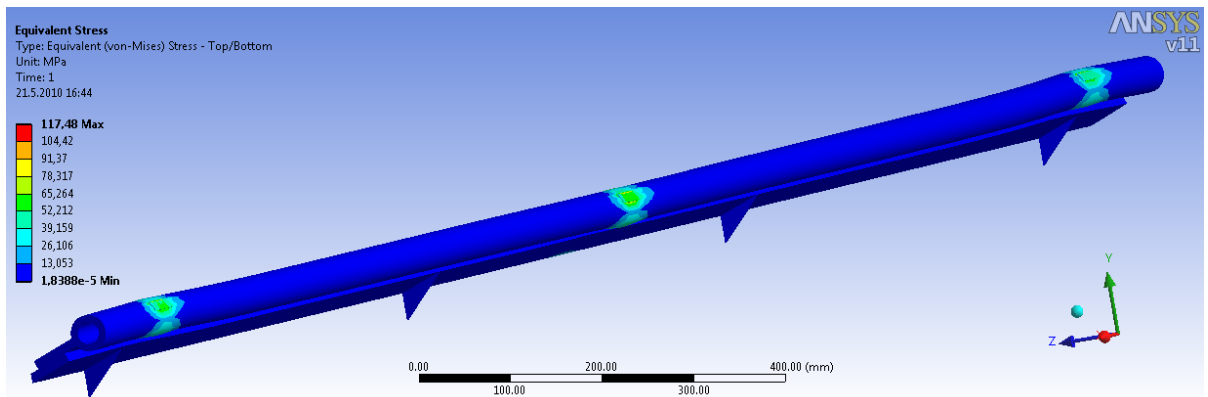
Kevennytyssä mallissa pyörötanko korvattiin ainesputkella, jonka ulkohalkaisija on 40 mm ja sisähalkaisija 20 mm. Kuvan 6.8.5 laskentamallissa putken ulkohalkaisijaksi asetettiin kuitenkin 38 mm, koska laskennassa on huomioitu kahden millimetrin kulumisvara (johde kuluu vain toiselta puolelta). Kyseisessä kohteessa kuluminen on tosin olematonta.

Kuten kuvasta näkyy, siirtymät ovat edelleen todella pieniä. Maksimisiirtymä on ainoastaan 0,047mm. Eli käytännössä siirtymä kasvaa n. sadasosamillimetrin ja materiaalia säästyy, molemmat ruumat ja luokkuvarastot mukaan luettuina, n. 800 kg.



6.8.5, ainesputkesta valmistetun ruuman johteen siirtymät, kun siirtymät on skaalattu 200-kertaisiksi

Jännitykset kohoavat suhteessa enemmän kuin siirtymät, mutta pysyvät silti alle sallitun jännityksen (6.8.6).

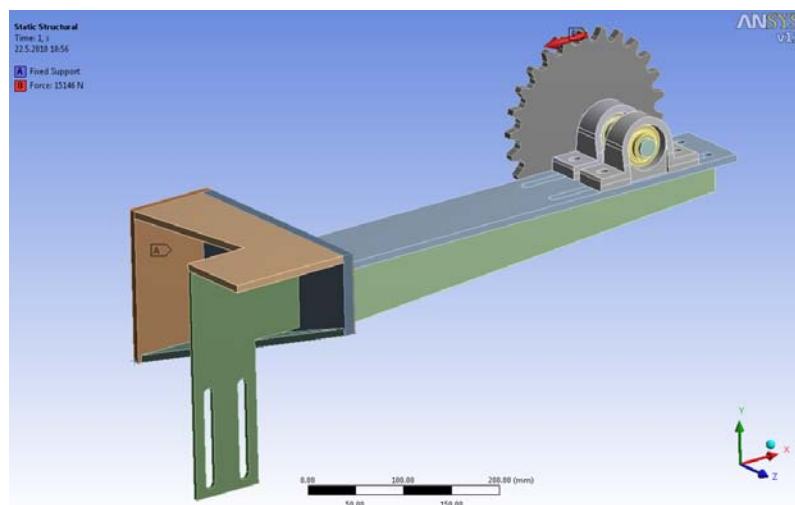


6.8.6, ainesputkesta valmistetun ruuman johteen jännitykset, siirtymät skaalattu 200-kertaisiksi

6.9 Siirtolaitteen laakerien tuki

Siirtolaitteen laakerien tuki osoittautui aivan liian heikoksi sellaisena, kuin se on mallinnuskohdassa esitetty.

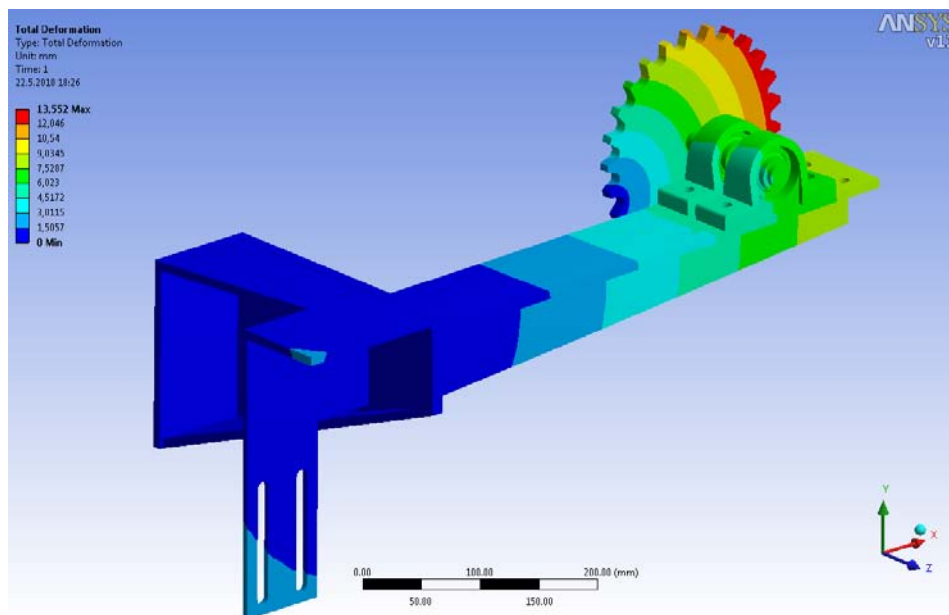
Kuvassa 6.9.1, laakerituki on esitetty hieman alkuperäistä versiota vahvistettuna. Siihen on esim. lisätty polvio myös alareunaan ja sen aineen paksuuksia on kasvatettu 3 mm (levyt 8 mm paksuja paitsi kiristyspyörän levy, joka on 5 mm paksu). Siirtovoima (15246 N) kohdistuu hammaspyörän jakohalkaisijalle x-akselin miinus suuntaan. Kiinnityslevyyn on asetettu koko takapinnalle "fixed"-reunaehto, eli kaikki vapausasteet on suljettu.



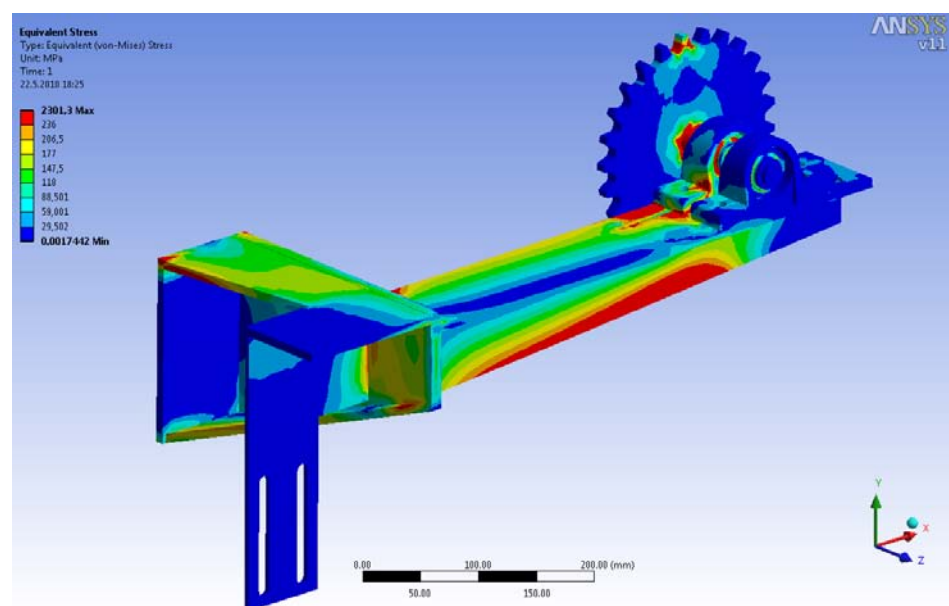
Kuva 6.9.1, alkuperäiseen laakeritukeen kohdistuvat voimat ja tuennat

Kuten kuvasta 6.9.2 voi nähdä, siirtymät ovat tällä vahvistetullakin rakenteella liian suuret. tukivarren pituus on n. 600 mm ja voima on n. 127 mm:n päässä tukivarren pinnasta. Lisäksi voima on z-akselin suunnassa 68 mm:n päässä tukivarren keskilinjalta. Nämä momenttivarret lisäävät huomattavasti siirtymää.

Myös jännitykset ovat suurelta alueelta yli sallitun jännityksen (kuva 6.9.3). Materiaalina käytetään terästä (S 355).



Kuva 6.9.2, alkuperäisen laakerituen siirtymät

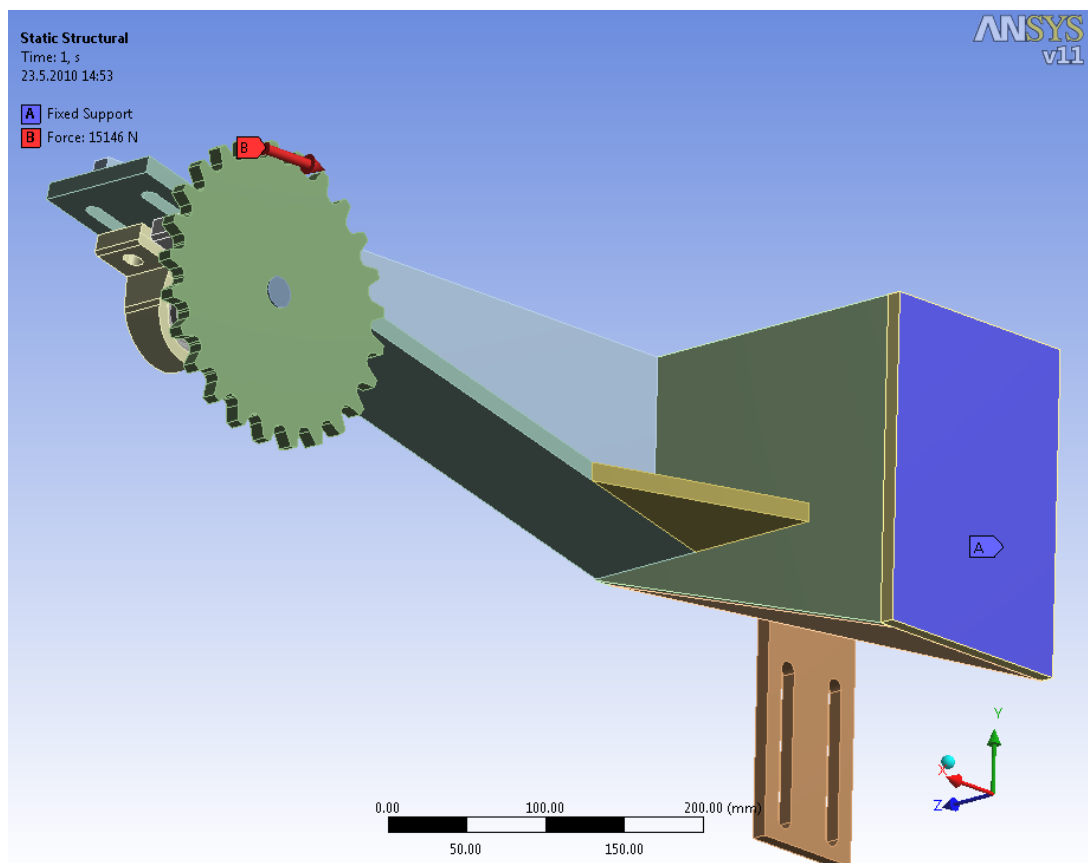


Kuva 6.9.3, alkuperäisen laakerituen jännitykset

Minimoidaan seuraavaksi näiden momenttivarsien vaikutus kääntämällä tukivarsi ylösalaisin, jolloin ketju kulkee hyvin läheltä tuen yläpintaa. Sivusuuntaista momenttivartta voitiin pienentää ainoastaan 10 mm, koska muuten ketju osuisi jo tukivarteen (kuva 6.9.4).

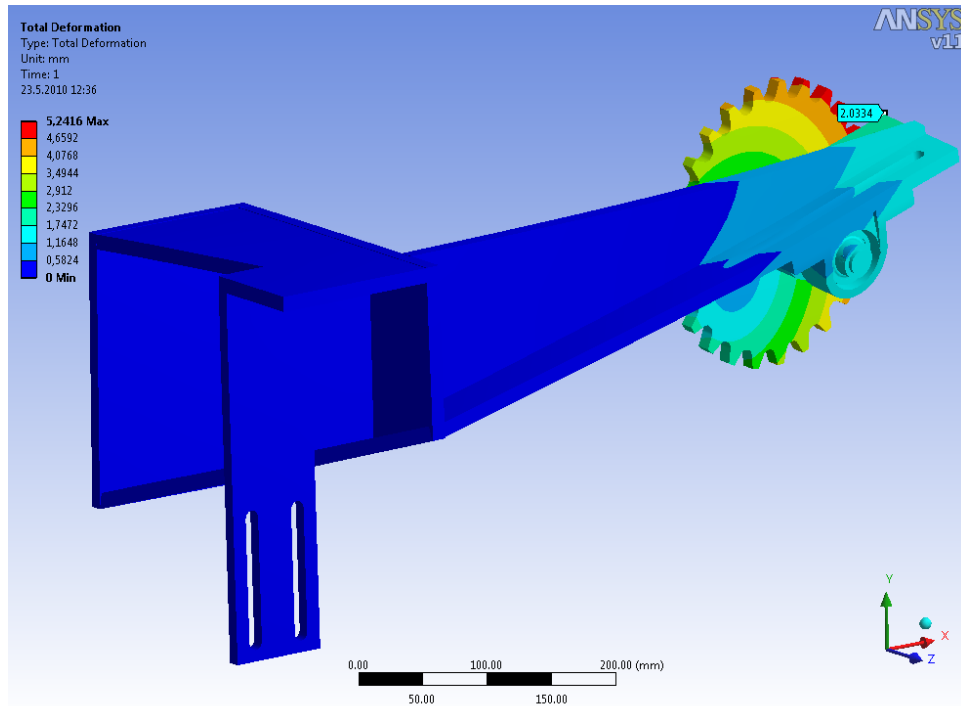
Voimat ja tuennat ovat samanlaiset kuin edellisessäkin kohdassa, mutta aineen paksuuksia on vielä kasvatettu siten, että nyt levyt ovat 12 mm paksuja lukuun ottamatta kiristyspyörän levyä, joka on 8 mm paksu. Lisäksi tukivarren juureen on lisätty pieni polvio, joka ehkäisee sivuttaisen momenttivarren vaikutusta. Polvio piti tehdä melko pieneksi, koska muuten luokkuvaraston johteet osuvat siihen.

Kiristyspyörän voimaa ei lisätty laskelmiin, koska sen vaikutus on häviävän pieni.



Kuva 6.9.4, vahvistettuun laakeritukeen kohdistuvat voimat ja tuennat

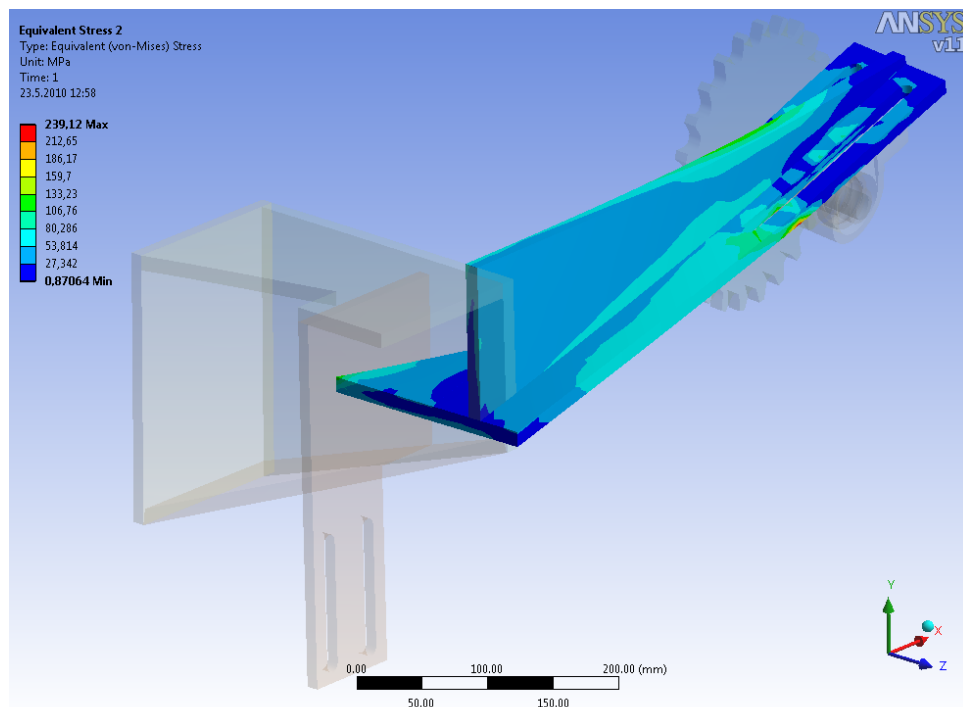
Kuvassa 6.9.5 on esitetty vahvistetun tuen siirtymät. Maksimisiirtymä on 5,24 mm, mutta tämä johtuu liian ohuesta akselista, joka päästää hammaspyörän kääntymään. Tässä tutkitaan lähinnä laakeritukea, jonka maksimisiirtymä on 2,03 mm. Tämän suuruinen siirtymä voidaan hyväksyä. Akselia vahvistetaan myöhemmin.



Kuva 6.9.5, vahvistetun laakerituen siirtymät

Myös jännityksiä tukitaan ainoastaan laakerituen osalta. Kuvassa 6.9.6 on korostettu suurimmalla jännityksellä olevaa osaa, eli tukivartta.

Kuten kuvasta nähdään, jännitykset ovat suurimmassa osassa rakennetta sallitun jännitysarvon (236 MPa) alapuolella. Pieni jännityskonsentraatio esiintyy kohdassa, jossa laakeripesä loppuu, koska tästä kohdasta rakenne pääsee taipumaan hieman jyrkemmin kuin muualta. Näin pientä jännityskeskittymää ei kuitenkaan huomioida staattisessa laskennassa



Kuva 6.9.6, vahvistetun laakerituen jännitykset

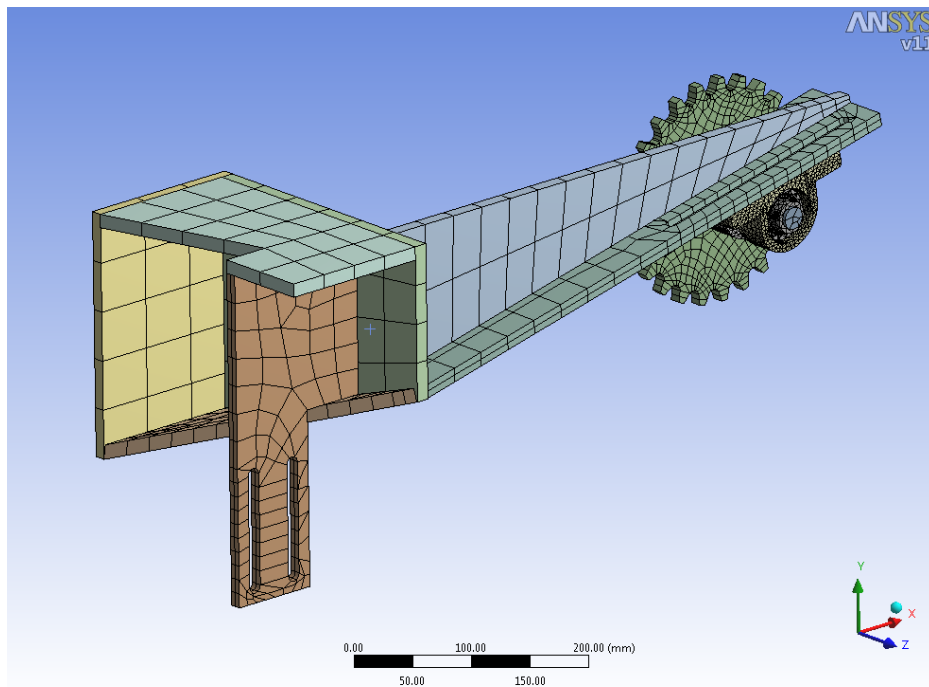
Tällaisella suhteellisen pienellä kappaleella voidaan tutkia elementtimallin solmumäärän vaikutusta siirtymiin ja ratkaisuaikoihin, koska päätelmiä voidaan tehdä jo ennen kuin laskenta-ajat venyvät tunteihin.

Varioidaan ainoastaan tukivarren elementtiverkkoa, eli laakerien ja hammaspyörien elementtiverkot pysyvät samoina jokaisessa laskennassa.

Kuvassa 6.9.7 on esitetty ensimmäisen laskentaversio elementtiverkko. Samasta mallista on otettu kuvien 6.9.5 ja 6.9.6 siirtymät ja jännitykset.

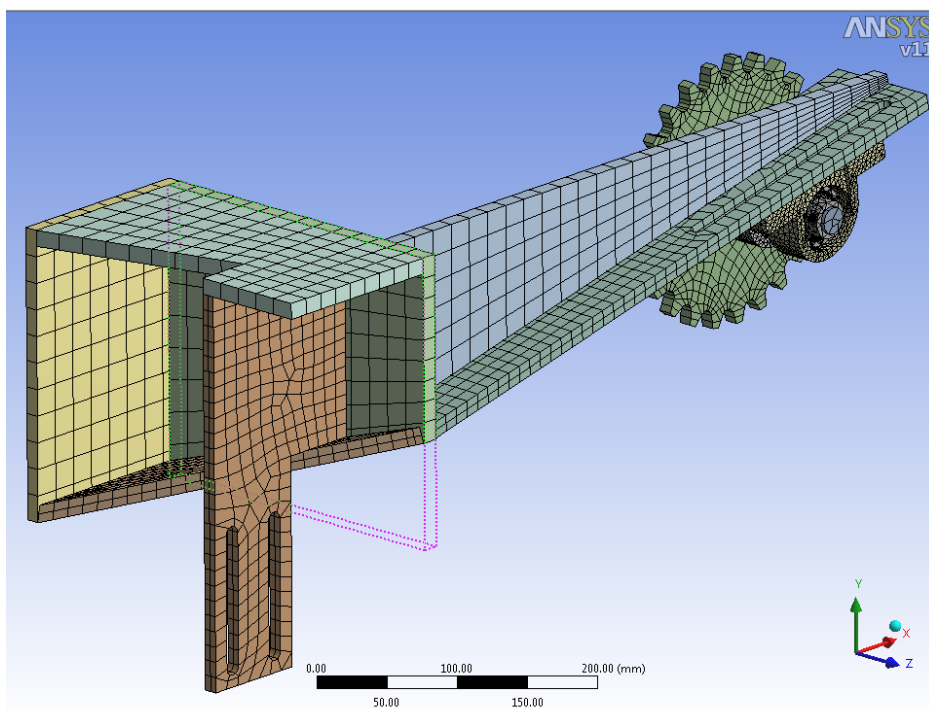
Elementtiverkko on hyvin karkea ja ainepaksuuden suunnassa on ainoastaan yksi elementtikerros. Kahteen osaan jouduttiin laittamaan kaksi elementtikerrosta, koska malliin tuli muuten epäjatkuvuuskohtia eikä laskenta mennyt läpi.

Tässä elementtimallissa on 42713 solmua. Tässä vaiheessa laakeripesien osuus solmuista on suuri, mutta koska niiden solmumäärä pysyy, joka laskennassa samana, tulokset eivät juuri vääristy. Aikaa tähän laskentaan meni 15,06 sekuntia.



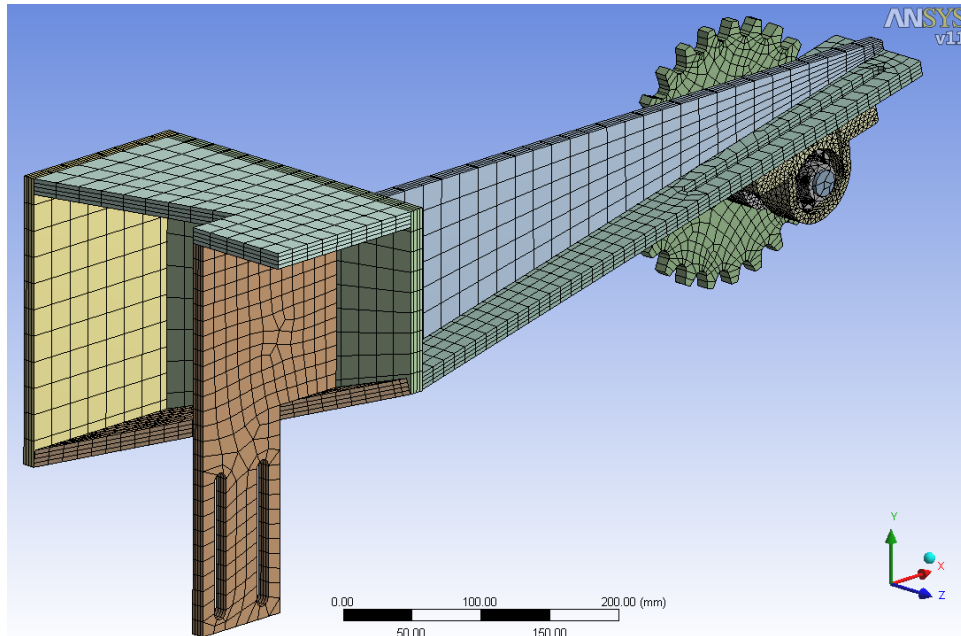
Kuva 6.9.7, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 1

Kuvassa 6.9.8 on esitetty toisen laskentaversioon elementtiverkko. Tässä versiossa elementtikokoa on pienennetty melko paljon, mutta kerroksia ei ole lisätty. Solmuja tässä verkossa on 52298 ja aikaa ratkaisuun meni 17,54 sekuntia.



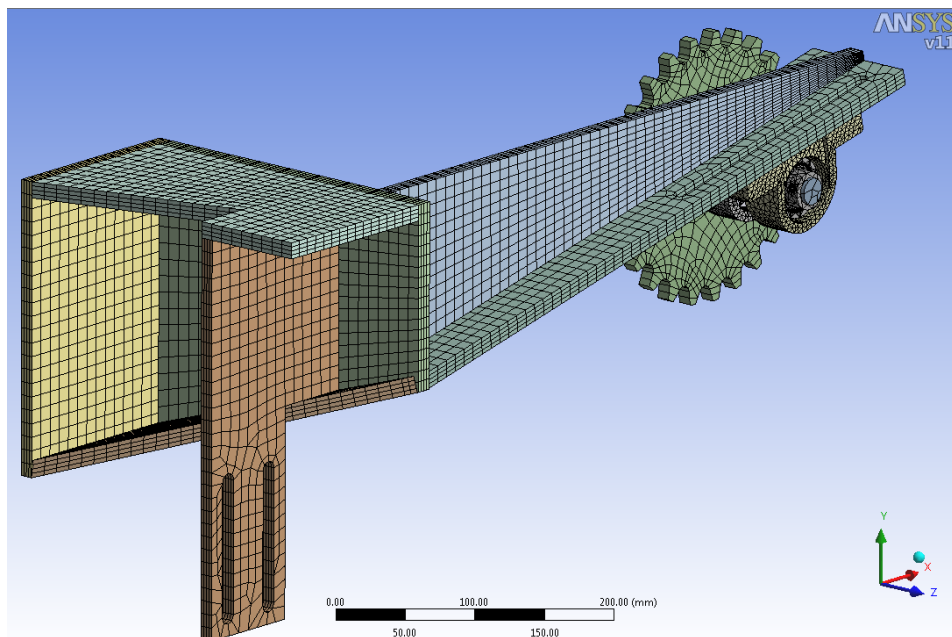
Kuva 6.9.8, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 2

Seuraavassa mallissa elementtikerroksia on kolme ainepaksuuden suunnassa, muuten elementtikoko on sama kuin edellä. Solmuja mallissa on 66419 ja aikaa ratkaisuun meni 1 min ja 21,24 s (kuva 6.9.9).

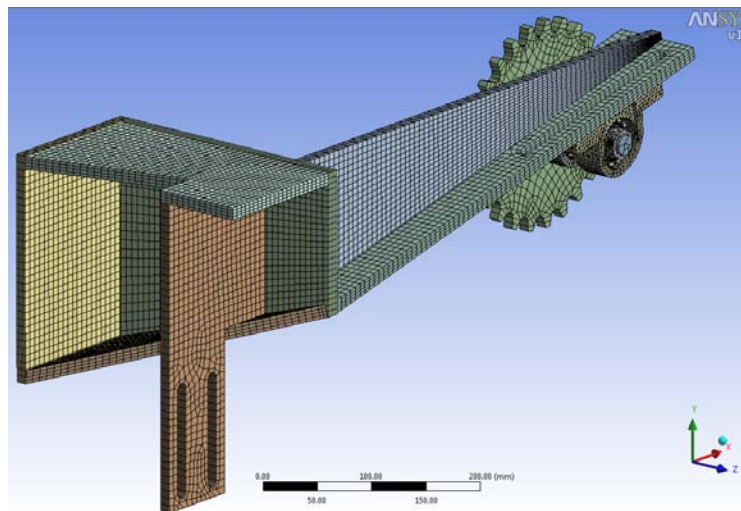


Kuva 6.9.9, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 3

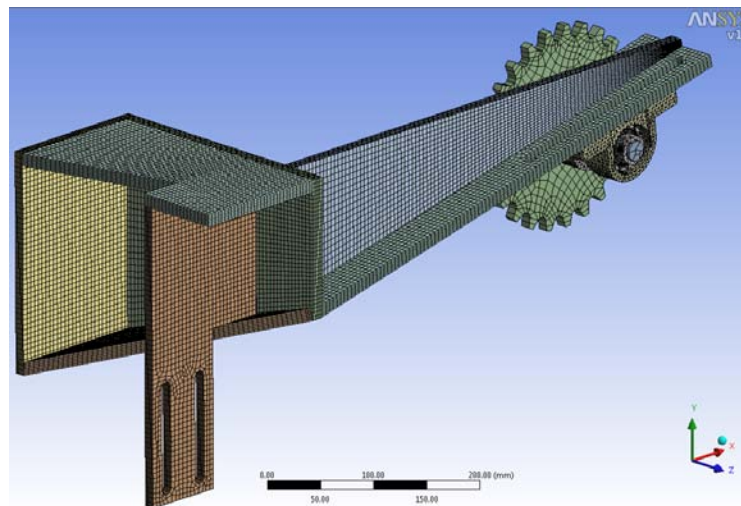
Kuvissa 6.9.10 - 6.9.12 elementtimallia on edelleen tihennetty siten että viimeisessä versiossa on jo yli 800000 solmua. Tulokset on kerätty taulukkoon 6.9.1.



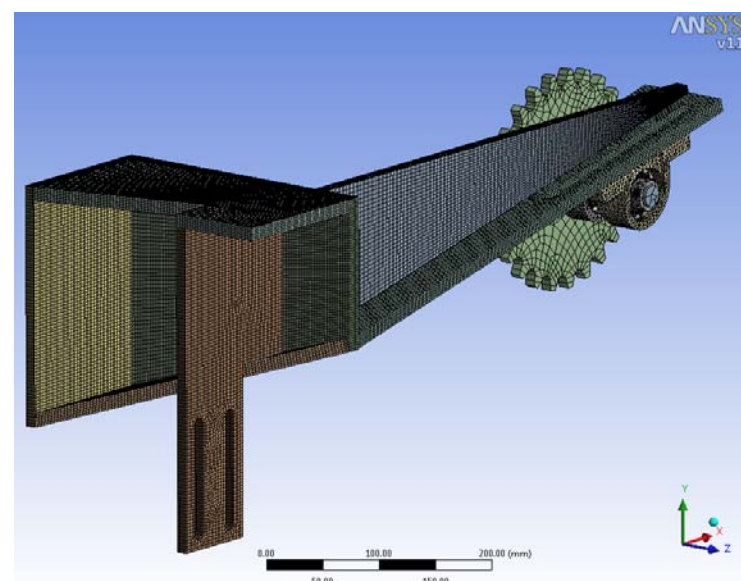
Kuva 6.9.10, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 4



Kuva 6.9.11, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 5



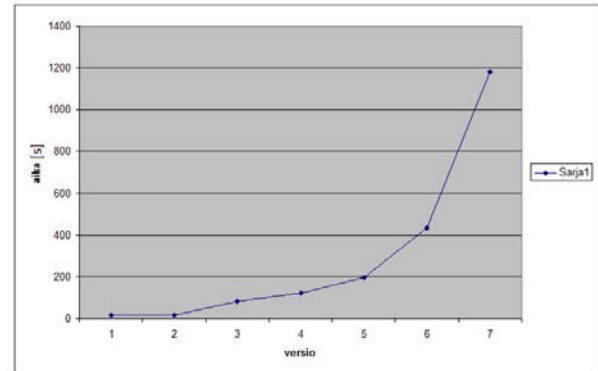
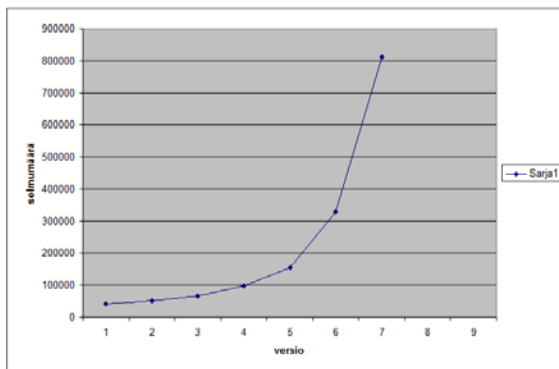
Kuva 6.9.12, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 6



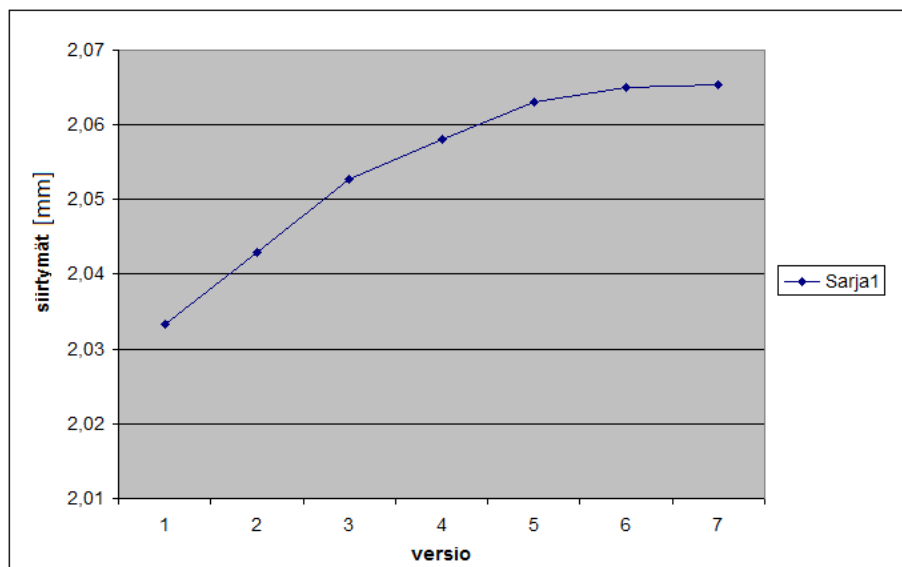
Kuva 6.9.13, vahvistetun laakerituen elementtiverkko, versio 7

Taulukossa 6.9.1 on esitetty eri laskentaversioiden tulokset. Tulokset on esitetty myös havainnollisempina kuvina (kuvat 6.9.14 ja 6.9.15).

versio	solmumäärä	siirtymät [mm]	ratkaisuaika
1	42713	2,0334	15,06
2	52298	2,0429	17,54
3	66419	2,0527	1.21,24
4	99108	2,0580	2.00,78
5	154608	2,0630	3.14,47
6	329753	2,0650	7.13,04
7	810501	2,0653	19.40,56



Kuva 6.9.14, versioiden 1-7 solmumäärät ja ratkaisuaajat

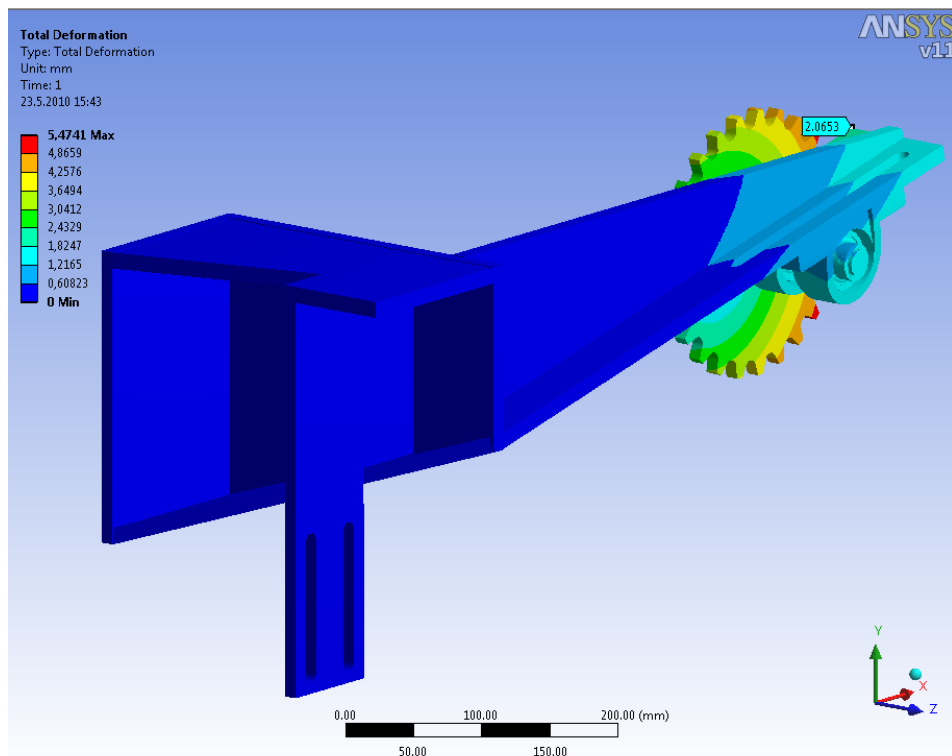


Kuva 6.9.15, versioiden 1-7 siirtymät

Kuten taulukosta 6.9.1 ja kuvista 6.9.14 ja 6.9.15 voidaan nähdä, solmumäärän lisääminen pidentää ratkaisuaikaa ja näiden arvojen lähestyessä ääretöntä, siirtymien arvot lähestyvät jotain tiettyä raja-arvoa. Tässä tapauksessa tuo siirtymien raja-arvo näyttäisi olevan n. 2.065 mm.

Taulukosta nähdään myös, että tässä tapauksessa oltiin jo karkeimmalla versiolla hyvin lähellä lopullista siirtymän arvoa.

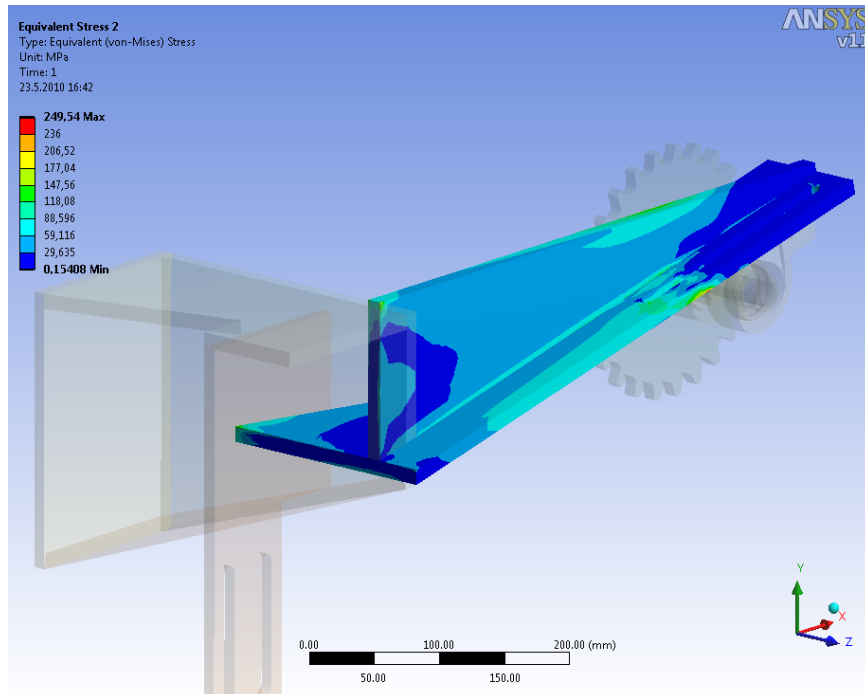
Kuvassa 6.9.16 on vielä esitetty version 7 siirtymät. Ero ensimmäiseen laskentaa on sen verran pieni, että ilman taulukointia se jäisi todennäköisesti huomaamatta.



Kuva 6.9.16, vahvistetun laakerituen siirtymät, versio 7

Kuvassa 6.9.17 on esitetty version 7 jännitykset. Jännityksissä on n. 10 MPa:n ero verrattuna version 1 jännityksiin, mutta kun rajataan jännitykset sallittuun arvoon, ei sallitun arvon ylittävän alueen suuruus käytännössä muutu. Jännityshuipun kasvu saattaa johtua siitä, että siirtymien arvot solmujen välissä lasketaan interpoloimalla elementtimallin solmujen arvoista. Tämä aiheuttaa epätarkkuutta varsinkin

pistemäisissä jännityshuipuissa, kun elementtikoko suhteessa jännityskeskittymän kokoon on suuri.



Kuva 6.9.17, vahvistetun laakerituen jännitykset, versio 7

7 TULOKSET

Tärkeimpänä päämääränä työssä pidettiin painon pudottamista perinteisiin valmistusmenetelmiin verrattuna. Seuraavassa on esitelty eri osien painot ja systeemin kokonaispainot eri versioilla.

Alumiinikennosta valmistetun luukun kokonaismassaksi tulee n. 400 kg, kun käytetään VF-profiileja mahdollisimman suurella välillä ja alapinta on tehty rimoista.

Vaahtomaisesta alumiinista valmistetun luukun kokonaismassaksi tulee n. 700 kg. Näin pieneen painoon voidaan vaahtomaisella alumiinilla päästä ainoastaan uumilla jäykistetyllä versiolla.

varmuuskertoimia, jotka lisäävät luukkujen painoa.

Molempien luukkujen ulkomitat ovat samat ja luukkuja on aluksessa yhteensä 20 kappaletta.

Polyuretaanista valmistettua luukkua ei saatu kestävämmän kyseisiä kuormituksia.

Luukkuvarasto voidaan valmistaa 120x120x10 neliöputkipalkista, jolloin sen painoksi tulee n. 1700 kg + sylinterin paino. Luukkuvarastoja on aluksessa yhteensä 4 kappaletta.

Ruuman johteet valmistettuna Ø40xØ20 ainesputkesta ja 10 mm paksuista lattarautoista, painavat 17,52 kg/m. Ruuman johteet ovat n. 40 m pitkät ja niitä on aluksessa 4 kappaletta.

Systeemin kokonaispainoksi tulee n. 17600 kg, jos käytetään alumiinikennoja, tai n. 23600 kg, jos käytetään alumiinivahtoluukkuja. Näihin painoihin ei ole laskettu mukaan luukkuvaraston sylinterien painoa eikä siirtolaitteiden painoa.

8 TULOSTEN TARKASTELU

Vaahtomaisella alumiinilla on hankala päästä kennoa kevyempään rakenteeseen koska tarvitaan yhtenäinen alapinta. Jo pelkistä pintalevyistä tulee painoa vähintään n. 320 kg.

Perusosa on laskennassa 10 mm paksu, joten sitä ei enää voi ohentaa luukun keventämiseksi, mutta 70 mm korkeiden uumien ansiosta luukku on niin jäykkä, että uuman korkeutta voisi hieman madaltaa. Uumien madaltaminen on kuitenkin painon kannalta lähes merkityksetöntä, koska uuman madaltaminen 10 mm keventää rakennetta ainoastaan 15 kg.

Molemmat ratkaisut ovat kuitenkin erittäin kevyitä perinteiseen laivanrakennukseen verrattuna. Molemmilla luukuilla on myös erilaiset ominaisuudet, joten tiettyjä ominaisuuksia painottamalla voidaan molemmat luukut nähdä varteenotettavina vaihtoehtoina.

Liitteessä 5 on esitetty perinteisen laivanrakennuksen likiarvokaava valtamerialuksen lastiluukkujen neliöpainon laskemiseksi. /22/

Valtamerialuksen kansiluukuilta vaaditaan suurempaa kuormankantokykyä kuin sisävesialuksen luukuilta, koska aallot voivat lyödä huomattavalla voimalla kannen yli. Käytetään sen vuoksi välikannen laskukaavaa, jolle ei huomioida aaltokuormia.

Tässä tapauksessa luukun kokonaispainoksi tulisi n. 6000 kg, joten painon pudotus on merkittävä, vaikka luukkuja jouduttaisiin viranomais määräysten vuoksi vielä vahvistamaankin.

Jatkokehiteltäviä kohteita ja muita tarkempaa tutkintaa vaativia kohteita jäi paljon.

Luokkuvaraston sylinterin kääntäminen ylösalaisin, poistaisi esimerkiksi nurjahtamisriskin. Tämä tapaus on tutkittavissa vasta, kun kansirakenteiden suunnitelmat tarkentuvat ja nähdään kestääkö rakenne tarvittavat kuormitukset.

Luokkuvaraston paikoituksen ja levyjen siirron automatisoimisen suunnittelussa on varmasti tarpeeksi työtä vaikka automaatiotekniikan diplomityöksi.

Tarkempaa suunnittelua kaipaa myös levyvaraston katto, tai muu systeemi, jolla varaston aukko peitetään, kun luokkuvarasto on alhaalla.

Luukut eivät ole itsessään jäykkiä, joten jos seiniä yrittää keventää liikaa, voi tulla ongelmia. Nämä ongelmat voisi olla helpoimmin ratkaistavissa muutamilla ristikkopalkeilla, jotka sitoisivat laidat yhteen ja lisääisivät jäykkyyttä huomattavasti. Jos kuitenkin näyttää siltä, ettei seiniin kohdistu suurempia voimia normaalitilanteessa, voidaan asentaa väliaikaiset tuet maksimilumikuorman vaikutusten ehkäisemiseksi.

Siirtolaitteen laakerituen konstruktioita kannattaa miettiä vielä uudestaan sitten, kun on selvillä peräkannen rakenne. Laakerit voidaan todennäköisesti kiinnittää pieneltä alueelta vahvistettuun kansirakenteeseen, jolloin pitkää tukivartta ei tarvita. Uusi laskenta pitää suorittaa myös vahvistetulla akselilla.

9 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli kehittää mahdollisimman kevyt ruuman avausjärjestelmä. Tässä työssä päädyttiin ratkaisuun, jossa luukut siirtyvät johteita pitkin levyvarastoon. Levyvarasto liikkuu pystysuunnassa ja se on matkan aikana kannen alapuolella.

Vartenotettavina vaihtoehtoina tutkittiin alumiinivaahdosta valmistettua sandwich-rakennetta ja alumiinikennoa. Sandwich-rakenteessa vaahto muodostaa metallisidoksen alumiinisten pintalevyjen kanssa, joten rakenteesta tulee hyvin jäykkä. Pintalevy voidaan korvata myös teräslevyllä, jos halutaan parempaa kulutuskestävyyttä ja ollaan valmiita tinkimään keveydestä. Laserhitsaamalla valmistettu kenno muodostaa myös erittäin jäykän rakenteen ja siinäkin voidaan käyttää teräksistä pintalevyä.

Molemmat valmistusmenetelmät osoittautuivat huomattavasti kevyemmiksi kuin perinteiset menetelmät, ja rakenteiden muotoja optimoimalla saatiin ensimmäisten kokeellisten versioiden massaa vielä huomattavasti kevennettyä. Työ siis täytti tältä osin sille asetetut tavoitteet.

LÄHTEET

/1/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:http://www.laffcomp.fi/dokumentit/jkl/1_Jyvaskylan_energia.pdf [s. 1-2]
[viitattu 19.10.2009]

/2/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:<http://www.vesitiet.org/seminaarit/2008/mkl%20sillst%20ja%20liikenne.pdf> [s. 5-10]
[viitattu 19.10.2009]

/3/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:http://www.laffcomp.fi/dokumentit/jkl/4_Laivan_yleistiedot.pdf [s. 3-7]
[viitattu 20.10.2009]

/4/ KymiDesign&Business. Tuottanut Laffcompin tilauksesta hahmotelmakuvia.

/5/ Verho, A. 2005. Teknisen suunnittelun peruskurssi. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Osio, Erkki Niemi. Kuormia kantavan teräsrakenteen suunnittelun perusteita. [s. 2]

/6/ Verho, A. 2005. Teknisen suunnittelun peruskurssi. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto [s. 24 - 33]

/7/ Phal, G & Beiz, W. 1990. Koneensuunnitteluoppi. Porvoo: WSOY [s. 74, 81-92, 99-137]

/8/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:http://erules.veristar.com/dy/data/bv/nr217/nr217_2009/pdf/n00010002/0070002.pdf

[viitattu 22.10.2009]

Bureau Veritas, Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels – April 2009 edition, Part B Hull design and construction, Chapter 7 Hull Outfitting, section 2 Bulwarks and Guard Rails, 2.1 Cargo vessels

/9/ [verkkajulkaisu], Saatavissa:<http://www.tyosuojelu.fi/fi/s19810417/1127>

[viitattu 11.11.2009]

Edita Publishing, Valtioneuvoston päätös työympäristöstä aluksessa 11.6.1981/417 [s. 9]

/10/ [verkkajulkaisu]

Saatavissa: <http://www.kennotech.fi/index.php?k=10686>

[viitattu 7.12.2009]

Kenno Tech, Mikä on kenno?

/11/ Jouko Vallikari. 2008. Kennokoulutus, Kennosuunnittelun perusteet -kurssi. [s. 4]

/12/ Suomen standardoimisliitto SFS. 2001. Koneturvallisuus. Koneiden kiinteät kulkutiet. Osa 2: Työskentelytasot ja kulkutasot. [s. 16]

/13/ Thomas Hipke. Light Weight Construction With Metal Foam – A Material For Extreme Conditions. Germany: Fraunhofer institut. [s. 2, 3, 4]

/14/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:https://publications.theseus.fi/bitstream/handle/10024/4770/Laulumaa_Jonna.pdf?sequence=1

[viitattu 20.1.2010]

Laulumaa, J. 2009. Opinnäytetyö: Polyolin ja ponneaineen vaikutus kovan polyuretaanin ominaisuuksiin. Keski-Pohjanmaa: Keski-Pohjanmaan ammattikorkeakoulu [s. 22]

/15/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:http://www.polyuretaani.com/fin/rakennuspolyuretaani/tekniset_ominaisuudet/lujuustekniset/

[viitattu 20.1.2010]

Rakennuspolyuretaaniteollisuus. 2007. Rakennuspolyuretaani, tekniset ominaisuudet, lujuustekniset ominaisuudet

/16/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:<http://www.finnfoam.fi/index.php?page=10c6358e6b4919d4647cf0091b53ce8>

[viitattu 21.1.2010]

Finnfoam – maan paras eriste. Ammattilaisille, ominaisuudet ja mitat, levyn mitat ja tyypit

/17/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:<http://www.finnfoam.fi/index.php?page=94cdb6dac68cc8e0c6b84a6ffc957b3> [viitattu 21.1.2010]

Finnfoam – maan paras eriste. Ammattilaisille, ominaisuudet ja mitat, ominaisuudet, muut ominaisuudet

/18/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa:http://www.pmcpolarteknik.com/files/brochures/d/deva_glide_ENG.pdf

[viitattu 11.2.2010]

Deva.glide. 2010. Where to use.

/19/ Tanskanen, P. 2005. Moniste luentojen tueksi – Fe-analyysin peruskurssi. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto. [s. 1, 5]

/20/ [verkkajulkaisu],

Saatavissa: <http://erules.veristar.com/dy/app/bootstrap.html>

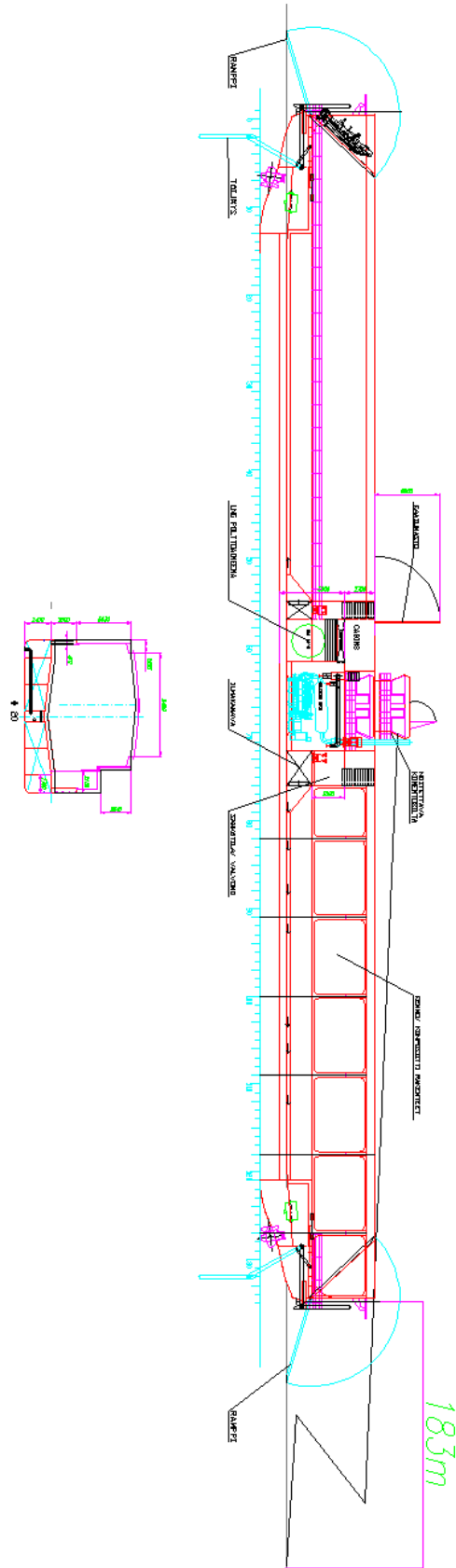
[viitattu 23.2.2010]

Bureau Veritas, Rules for the Classification of Inland Navigation Vessels – April 2009 edition, Part A Classification and surveys, Chapter 2 Classification, Section 3 Classification notations, 10.4 Range of navigation

/21/ RakMK B1, Ympäristöministeriö, asunto- ja rakennusosasto, Suomen rakentamismääräyskokoelma, Rakenteiden varmuus ja kuormitukset, Määräykset 1998. [s. 5,6]

/22/ Alanko, J. 2007. Laivan yleissuunnittelu. Turku: Karhukopio [s. XVI-12]

Rungon päämitat.



Tarjous Deva liukulaakereista



26.1.2010

Vastaanottaja:
Rejlers Oy
Juha-Matti Toivanen
Linnankatu 50
20100 Turku

TARJOUS NO. 2905387

Päiväys:	26.1.2010
Viite:	Bioship 1
Toimitusaika:	Sopimuksen mukaan
Toimitusehdot:	
Hinnat:	ALV 0 %
Maksuehdot:	30 pv netto
Tarjous voimassa:	26.4.2010 saakka
Erikoisehdot:	Hinnat EUR sis. ALV 0%. Myyjän kustannuksiin vaikuttavien tekijöiden olennaisesti muuttuessa varaamme oikeuden tarkistaa hintaa toimituspäivän kustannuksia vastaaviksi. Muilta osin noudatamme Yleisiä sopimusehtoja IIL 01 ja IILM 02

Itsevoiteleva, huoltovapaa tarkkuuslaakeriholkki deva.glide®, tyyppi dg05.12.22, jossa runkomateriaali 2.1052 (CuSn12), voiteluainetapeilla dg12 ja sisäänajoliukukerroksella dg22 deva.glide®- käsikirjan mukaan.

Pos.	Tuote	Määrä	a-hinta
1	Liukulaakeri, deva.glide Ø40 / Ø50 X 55 mm (D1/D2XB1), 90° avattuna piirustuksen 2905387-10 mukaan	120	21,53

PMC Polarteknik Oy Ab
Mestarintie 6
FI-01730 VANHAA
Finland

Tel +358 (0)20 77 09 700
Fax +358 (0)20 77 09 701
E-mail info@pmcpolarteknik.com
www.pmcpolarteknik.com

Toleranssit:

Pesä:	Ø 50 H7
Akseli:	Ø 40 h7
Laakerin sisähalk. (asennuksen jälkeen):	Ø 40 E8

Yleistoleranssit DIN ISO 2768-1 (keski) pätevät mainitsemattomiin toleransseihin.
Geometriset toleranssit sekä laakereiden pinnan karheudet Devan normien mukaan.

Yleistä: Deva.glide on itsevoiteleva ja huoltovapaa liukulaakeri jossa on pronssiseosrunko sekä luonnongrafiittia sisältävät voiteluainetapit.

Asennus: Laakerit asennetaan liimaamalla sopivalla Loctite- liimalla Deva.glide- käsikirjan ohjeiden mukaan.

Vastapinta: Teräs, kovuus vähintään 180HB ja pinnan karheus R_a : 0,2-0,8 μ m (hiottu, ei kiillotettu). Pinnan on ehdottomasti pysyttävä korroosiovapaana käytön aikana.

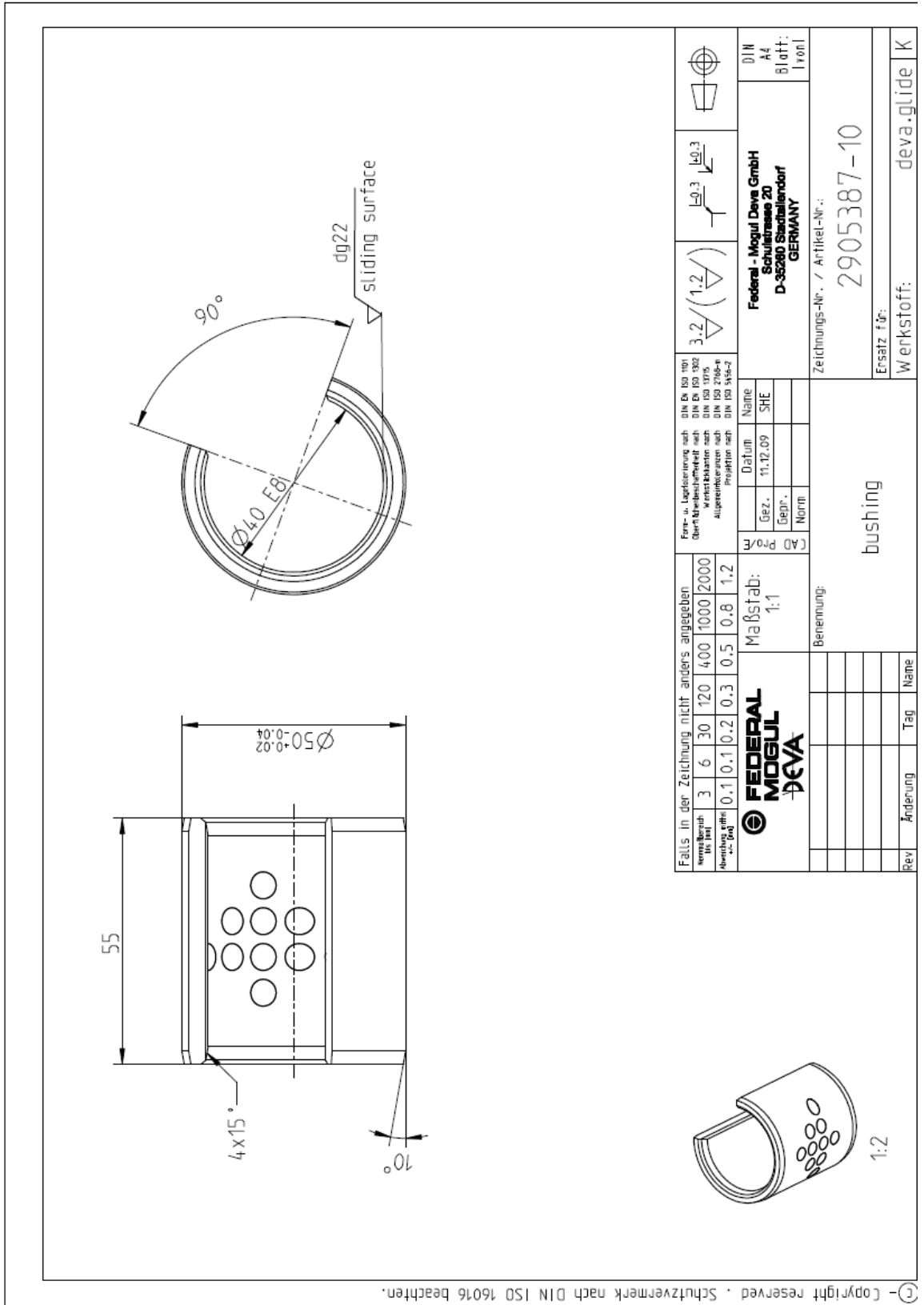
Käyttöön varmentamiseksi suositellaan, että laakerit testataan sopivissa olosuhteissa.

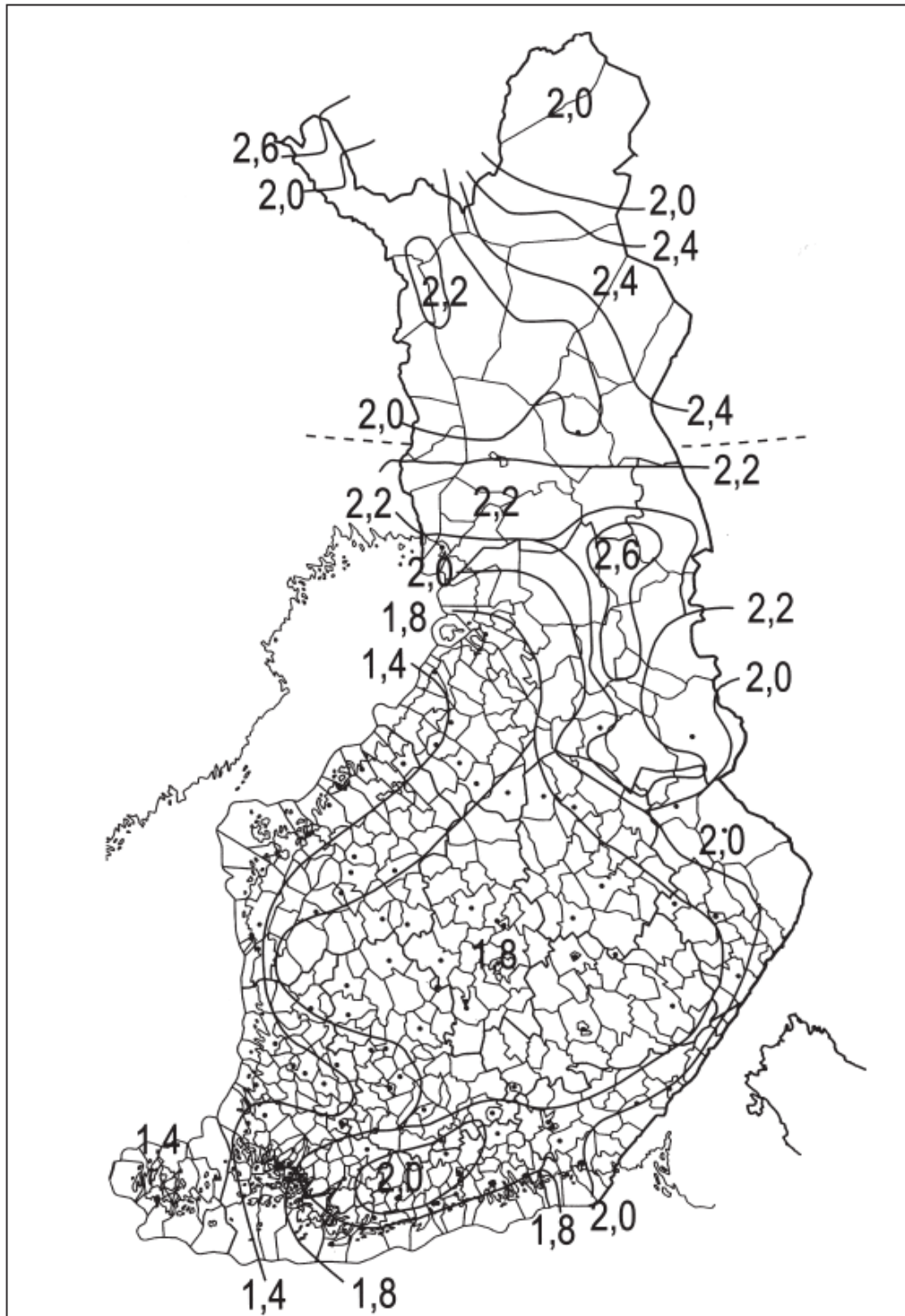
Lisätietoja käsikirjasta tai allekirjoittaneelta.

Ystävällisin terveisin,
PMC Polarteknik Oy Ab

Jaakko Kylmä
050-385 4055

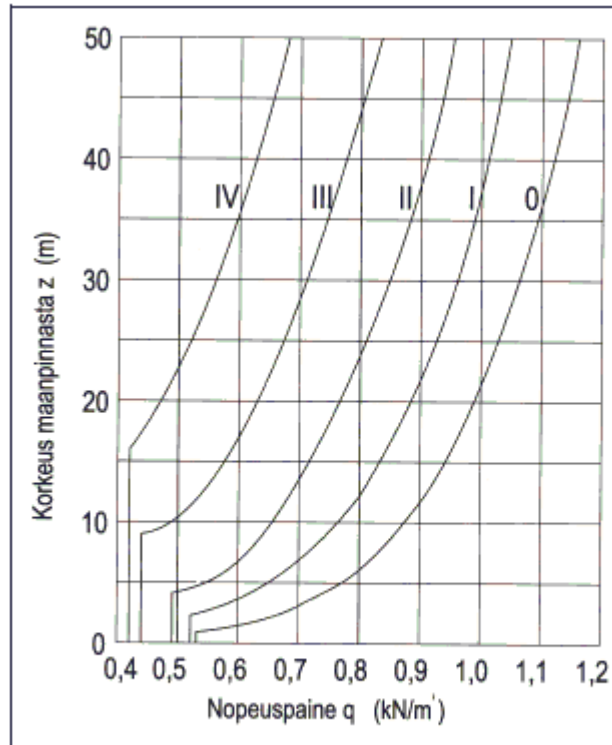
Kuva L2.1, liukulaakeri





Kuva 1.
Kattojen peruslumikuormat s_k . Rakennuspaikan sijaitessa alueella, jossa arvo ei ole vakio, väliarvot interpoloidaan suoraviivaisesti suhteessa etäisyyksiin lähimmistä käyristä.

Kuva L3.1, peruslumikuormat /21/



Kuva 2
Nopeuspaine eri maastoluokissa.

Taulukko 3.4.2
Nopeuspaine eri maastoluokissa

Maastoluokka	z_{\min} (m)	Nopeuspaine (kN/m^2)
0 Avomeri	1	$q = 0,87 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,18}$
I Laaja avoin maa-alue tai järvenselkä	2	$q = 0,77 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,20}$
II Maatalousmaa, satunnaisia pieniä esteitä kuten yksittäisiä rakennuksia, pensaikkoja ja puita	4	$q = 0,65 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,24}$
III Esikaupunki- ja teollisuus-alueet, metsät, pientaloalueet, vahtelevat viljelysalueet, joissa on maatilarakennuksia ja metsäsaarekkeita	8	$q = 0,49 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,32}$
IV Kaupunkien keskusta-alueet, rakennusten keskimääräinen korkeus yli 15 m	16	$q = 0,34 \left(\frac{z}{10} \right)^{0,44}$

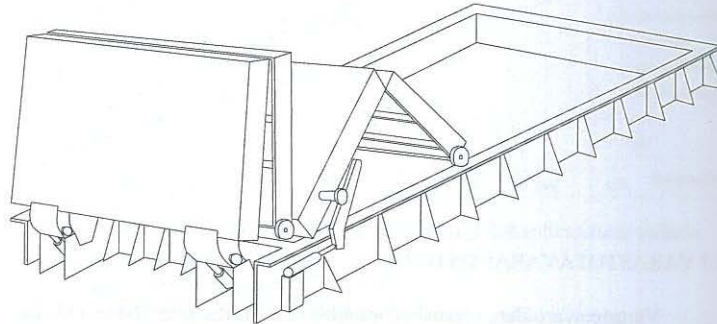
z on korkeus maaston pinnasta metreinä
Kaavat ovat voimassa kun korkeus $z \leq 200$ m.
Nopeuspaine on vakio korkeudesta z_{\min} maaston pintaan (z_{\min} :n mukainen).

4. LASTILUUKUT

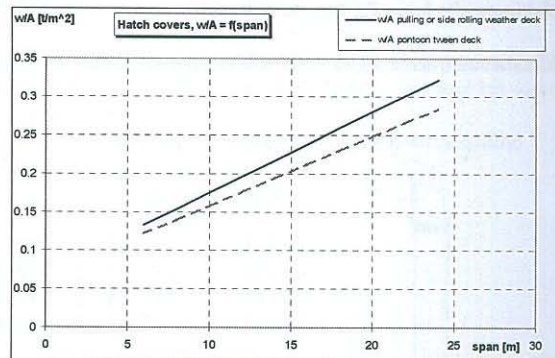
Lastiluukkuja on useita eri tyyppiä, yleisimmät ovat

- nostettava (lifted cover)
- luukun toiseen päähän kasaan vedettävä (direct pull cover)
- kasaan menevä (folding cover)
- sivulle rullattava (side rolling cover)

Alla olevassa kuvassa on multi-folding-tyyppinen lastiluukku.



Alla olevissa kuvassa on lastiluukkujen neliöpaino funktiona luukun jännevälistä (pienempi mitta), erikseen pääkannelle ja välikannelle.



Neliöpainot saadaan myös laskettua seuraavilla kaavoilla:

$$\begin{aligned} \text{pääkannelle} \quad w/A &= 0.07 + 0.0105 \cdot \text{span} \\ \text{välikannelle} \quad w/A &= 0.068 + 0.009 \cdot \text{span} \end{aligned}$$

Kuva L5.1, perinteisten kansiluukkujen neliöpainon laskenta /22/