

Opinnäytetyö (AMK)

Kone- ja tuotantotekniikka

Meritekniikka

2020

Atte Paloniemi

VESITIIVIIN OVEN LUJUUDEN JA PAINON OPTIMOINTI

– Excel-laskentaohjelman luonti

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Meriteknikka

Opinnäytetyön valmistumisajankohta: Kevät 2020 | 26 sivua, 5 liitesivua

Pekka Niemelä (Tebul Oy), Lauri Kosomaa (Turun AMK)

Atte Paloniemi

VESITIIVIIN OVEN LUJUUDEN JA PAINON OPTIMOINTI

- Excel -laskentaohjelman luonti

Tämän työn tarkoituksena on tarkastella vesitiiviitä ovia koskevia sääntöjä ja päivittää oven rakenteeseen liittyviä lujuuslaskelmia Tebul Oy:lle. Sääntöjä haluttiin tarkastella erikseen matkustaja-aluksille ja jahdeille. Näihin sääntöihin pohjautuen haluttiin luoda laskentaohjelmisto, jolla oven jäykkyyttä ja painoa saataisiin optimoitua, koska tällä hetkellä Tebul Oy:n vesitiiviit ovet ovat kilpailijoitaan painavimpia ja kalliimpia.

Työssä tarkasteltiin vesitiiviitä ovia koskevia säännöstöjä ja lisäksi tarkemmin kahden yleisesti käytetyn luokituslaitoksen vesitiiviiden ovien lujuutta koskevia laskukaavoja. Sääntöjä vertailtiin keskenään ja huomattiin, että sääntöjen vaatimustasossa oli eroja. Vaativimmat laskentakaavat valittiin laskentaohjelman perustaksi. Myös vesitiiviin oven rakennetta tarkasteltiin ja pohdittiin mahdollisia kehityskohteita. Oven rakenteen kehityskohteita olivat jäykkääjissä käytetty profiili ja materiaali sekä keskipalkin yksinkertaistaminen. Laskentaohjelmalla laskettuja tuloksia vertailtiin vanhan laskentakaavion tuloksiin ja huomattiin, että oven rakennetta on mahdollista keventää huomattavasti. Laskentaohjelmalla voidaan helposti vertailla erilaisia rakennevaihtoehtoja ja niiden vaikutusta lujuuteen.

ASIASANAT:

vesitiivis ovi, luokituslaitos, lujuuslaskeminen, optimointi

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical Engineering | Naval Architecture

Date: Spring 2020 | pages 26 , pages in appendices 5

Pekka Niemelä (Tebul Oy), Lauri Kosomaa (TUAS)

Atte Paloniemi

OPTIMIZING THE STRENGTH AND WEIGHT OF A WATERTIGHT DOOR

- Creating an Excel calculation software

The objective of this thesis was to review the rules for watertight doors and update the strength calculations for the door structure for Tebul Oy. The aim was to review the rules separately for passenger ships and yachts. Based on these rules, the aim was to create a calculation software that could be used for optimizing the stiffness and weight of the door. Currently Tebul Oy's watertight doors are heavier and more expensive than their competitors.

The thesis examines the regulations for watertight doors, as well as the calculation formulas for the strength of watertight doors of two commonly used classification societies. The rules were compared with each other and it was found that there were differences in the level of requirements of the rules. More demanding calculation formulas were chosen as the basis for the calculation software. The structure of the watertight door was examined as well and possible areas for development were considered. The development of the door structure included the profile and material used in the stiffeners and the simplification of the center beam. The results calculated with the calculation software were compared with the results of the old calculation chart and it was found that it is possible to significantly lighten the structure of the door. The calculation software can be used to easily compare different construction options and their effect on strength.

KEYWORDS:

watertight door, classification society, strength calculation, optimizing

SISÄLTÖ

1 JOHDANTO	5
2 VAATIMUKSET SÄÄNNÖISSÄ	6
2.1 SOLAS	6
2.2 Red Ensign Group Yacht Code	6
2.3 Kansalliset määräykset	7
2.4 Luokituslaitokset	7
2.5 Bureau Veritas	8
2.6 Lloyd's Register	13
3 SÄÄNTÖJEN VERTAILU	15
4 OVEN RAKENNE	17
4.1 Ovirunko	17
4.2 Ovilehti	20
5 EXCEL-LASKENTAOHJELMA	21
5.1 Vertailulaskelmat	21
5.2 Kehitysideat ja huomiot	23
6 YHTEENVETO	25
LÄHTEET	26

LIITTEET

Liite 1. Laskentaohjelma Matkustaja-alukset
Liite 2. Vertailulaskelmat Matkustaja-alukset
Liite 3. Vertailulaskelmat Jahdit

1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö tehdään Tebul Oy:lle, joka on Varsinais-Suomessa toimiva laiva-alan yritys. Yritys valmistaa matkustajalaivoihin ja suuriin jahteihin vesitiiviitä ovia (VT-ovia). Laivanrakennus alalla kilpailu kovenee jatkuvasti, ja tuotekehitys on suuressa roolissa. Tebul Oy:n VT-ovet ovat tällä hetkellä kilpailijoitaan painavimpia ja kalliimpia, joka on kilpailun kannalta ongelma. Tebul Oy:n tuotannosta yhä suurempi osa menee jahteihin, ja siksi painoon kannattaa kiinnittää huomiota.

Ovirakenteeseen liittyviä kattavia lujuuslaskelmia on tehty viimeksi Tebul Oy:ssä noin 20 vuotta sitten, ja ne on dokumentoitu puutteellisesti. Työn tarkoituksena on selvittää, onko oven rakennetta mahdollista keventää ja siten saavuttaa kustannussäästöjä. Lujuuslaskelmat halutaan päivittää viimeisten sääntöjen mukaisiksi ja luoda näihin sääntöihin perustuva laskentaohjelmisto, jolla voidaan laskea tarvittava ovirungon ja ovilehden jäykkäjäjien määrä sekä vertailla erilaisia rakenteellisia vaihtoehtoja.

Tebul Oy:ssä uskotaan, että ovien lujuus on tällä hetkellä turhan suuri ja rakenteen keventäminen olisi mahdollista. Lujuuslaskelmien jälkeen voidaan todeta, ovatko rakenteelliset muutokset mahdollisia. Tällä hetkellä jäykkäjäjien määrä määritetään vanhalla paperikaaviolla, joka perustuu puutteellisesti dokumentoituihin laskukaavoihin.

Laivat on jaettu vesitiiviisiin osastoihin, jotta mahdollinen vuotokohta saadaan rajattua mahdollisimman pienelle alueelle. Tämä on tärkeää laivan riittävän vakavuuden säilyttämisen kannalta. VT-ovet asennetaan vesitiiviisiin laipioihin, jotta liikkuminen vesitiiviiden osastojen välillä olisi mahdollista. Oven suunnittelupaine korkeus riippuu oven sijainnista suhteessa laipiokanteen. Laipiokansi on laivan ylin jatkuva kansi, johon kaikki vesitiiviit laipiot kiinnittyvät muodostaen vesitiiviitä osastoja.

Koska VT-ovet ovat kriittinen osa laivojen vesitiivistä osastointia, ne pitää sertifioida. Tätä varten lähetetään suunnitelmat luokituslaitoksen tarkastettavaksi. Luokituslaitos määräytyy rakennettavan aluksen tilausvaiheessa. Tässä työssä tarkastellaan kahden yleisimmin käytetyn luokituslaitoksen laskentasääntöjä. Sääntökohdat ovat erilaisia riippuen siitä, onko kyseessä matkustaja-alus vai jahti, joten näitä koskevat säännöt käsitellään erikseen. Tilausvaiheessa selviää myös sertifiointiluokka eli minkä alustyyppin säännöt ovat voimassa kyseisessä aluksessa.

2 VAATIMUKSET SÄÄNNÖISSÄ

Laivojen rakentamista ja operointia koskevia sääntöjä alettiin kehittää vasta 1800-luvun puolessa välissä, kun merenkulkuvaltiot alkoivat ymmärtää, että merellä tapahtuvat onnettomuudet voitaisiin välttää. Merkittävä askel meriliikenteen turvallisuuden parantamiseksi tehtiin vuonna 1914, kun kansainvälinen yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä tuli voimaan. Sopimus kantaa nimeä SOLAS (International Convention for Safety of Life at Sea) ja sen ylläpitämisestä vastaa kansainvälinen merenkulkujärjestö eli IMO (International Maritime Organization). (Davies 2007.)

2.1 SOLAS

SOLAS-sopimuksesta on useita eri versioita, joista viimeisin on vuodelta 1974. Tämä versio sisältää hiljaisen hyväksymismenettelyn, jonka mukaan sääntömuutos tulee voimaan määrättyinä päivinä, jollei sovittu määrä osapuolia vastusta muutosta määrättyyn päivään mennessä. Tämän seurauksena vuoden 1974 yleissopimusta on päivitetty ja muutettu useita kertoja. (IMO 2020a.)

Vesitiiveydellä tarkoitetaan kykyä estää veden kulkua mihin tahansa suuntaan suunnittelupaine korkeuden alaisena. Minkä tahansa rakenteen osan suunnittelupaine korkeus tulisi olla määritetty perustuen sen sijaintiin suhteessa laipio- tai varalaitakanteen. Vesitiiviin oven on ylläpidettävä vesitiivistä eheyttä siinä laipiossa, jossa se sijaitsee. (SOLAS 2019.)

VT-ovet ja niiden rungot ovat osa hyväksyttyä suunnittelua, ja niiden tulee täyttää lippuvaltion viranomaisten vaatimukset. Lisäksi niiden tulee säilyttää sen vesitiiviin laipion lujuus, johon ne on suunniteltu. (SOLAS 2019.)

2.2 Red Ensign Group Yacht Code

Red Ensign Group Yacht Code (REG Yacht Code) on Yhdistyneen kuningaskunnan kehittämä säännöstö, jossa esitetään jahteja koskevia sääntöjä turvallisuuteen ja saastuttamiseen liittyen. Säännöstö on kehitetty sen vuoksi, että osa laivoja koskevista yleissopimusten määräyksistä on kohtuuttomia sovellettaviksi jahteihin. Säännöstö koostuu A

ja B osasta. A-osa pitää sisällään päivitetyn version LY3 (Large Yacht) -säännöstöstä. Se koskee kaupallisessa käytössä olevia yli 24 metrisiä jahteja, jotka saavat kuljettaa enintään 12 matkustajaa. B-osa pitää sisällään päivitetyn version PYC (Passanger Yacht Code) -säännöstöstä. Se koskee minkä tahansa kokoisia jahteja, jotka kuljettavat 12–36 matkustajaa. (Red Ensign Group 2019.)

REG Yacht Code -säännöstön, mukaan vesitiiviiden laipoiden ja niissä olevien läpivientien tulee täyttää luokituslaitoksen asettamat lujuuden vaatimukset (Red Ensign Group 2019).

2.3 Kansalliset määräykset

SOLAS-sopimus vaikuttaa myös kansallisella tasolla. SOLAS-sopimuksen ratifioineet valtiot ovat vastuussa sopimuksen noudattamisesta ja ovat ottaneet sen osaksi omaa lainsäädäntöä. (IMO 2020a.)

Aluksille on voimassa lippuvaltion lainsäädäntö, joka huomioidaan jo rakennusvaiheessa. Kansalliset säännökset voivat olla kansainvälisiä sopimuksia vaativimpia, sillä sopimukset antavat vaatimustasolle vain alarajan. Laiva-asioita hoitavia viranomaisia on yhdessä maassa useita, joten laivanrakentajan tulee olla perillä missä mitäkin on hyväksyttävä. (Räisänen 1997, 17–11.)

2.4 Luokituslaitokset

Luokituslaitokset ovat yleensä kansainvälisiä riippumattomia yrityksiä, joiden tehtävänä on luoda ja ylläpitää teknisiä standardeja merialusten ja offshore-rakenteiden (myös muualla teollisuudessa) rakentamiseksi. Luokituslaitosten ensisijainen tehtävä on luokitella alukset ja varmistaa, että niiden suunnittelu ja laskelmat ovat julkaistujen standardien mukaisia. Alusten katsastaminen kuuluu myös luokituslaitosten tehtäviin. (Maritime connector 2019.)

Lippuvaltiot pitävät yllä alusrekisteriä, jossa kaikki lipun alla purjehtivat alukset on rekisteröitävä. Luokituslaitokset ovat saaneet lippuvaltioilta luvan tarkastaa ja luokitella aluksia sekä myöntää todistuksia lippuvaltion puolesta. (Maritime connector 2019.)

Säännöissä, jotka koskevat VT-ovia, määritetään minimilevynpaksuus ja -taivutusvastus jäykkääjille. Myös minimi leikkautumisala jäykkääjille on määritetty. Leikkautumisalalla tarkoitetaan jäykkääjien päiden uuman pinta-alaa, josta jäykkääjä on kiinnitetty. Uuma kantaa leikkaustilanteessa lähes koko voiman ja siksi sille vaaditaan minimipinta-ala (Räisänen 1997, 29-29). VT-oville ei ole omia laskukaavoja säännöissä, vaan niihin sovelletaan vesitiiviitä laipioita koskevia laskukaavoja. Kaavoissa saattaa kuitenkin olla kertoimia, jotka koskevat nimenomaan VT-ovia ja tämä tulee ottaa laskennassa huomioon.

Tebul Oy:ssä kaksi yleisimmin käytettyä luokituslaitosta VT-ovien sertifiointissa ovat Bureau Veritas ja Lloyd's Register joiden VT-ovien lujutta koskevia sääntöjä käsitellään seuraavaksi. Matkustaja-alukseksi määritetään alukset, jotka kuljettavat yli 12 matkustajaa (IMO 2020b).

2.5 Bureau Veritas

Matkustaja -alukset

Matkustaja-aluksia koskevat säännöt löytyvät Bureau Veritaksen nr. 467 -sääntökirjasta. VT-ovien lujutta koskevissa sääntökohdissa on määritetty oven levyn miniminettopaksuus sekä jäykkääjien minimitaivutusvastus ja -leikkautumisala. Levyn minimipaksuuden laskemiseen käytetään kaavaa:

$$t = 14,9 c_a c_r s \sqrt{\gamma_r \gamma_m \frac{\gamma_{s2} p_s + \gamma_{w2} p_w}{R_y}}, \quad (Pt B, Ch. 7, Sec 1 [3.5.1]) \quad (1)$$

missä

$$c_a = 1,21 \sqrt{1 + 0,33 \left(\frac{s}{l}\right)^2} - 0,69 \frac{s}{l}, \quad \leq 1,0, \quad (Pt B, Ch 7, Sec 1, s. 187)$$

$$c_r(\text{kaarevuuskerroin}) = 1 - 0,5 s/r, \quad \geq 0,5$$

s = levyn lyhimmän sivun pituus, (m)

l = levyn pidemmän sivun pituus, (m)

r = kaarevuussäde, (m)

$\gamma_r, \gamma_m, \gamma_{sz}, \gamma_{w2} = \text{turvallisuuskertoimia, (Pt B, Ch 7, Sec 1, Table 1)}$

$p_s(\text{staattinen vedenpaine}) = \rho g d_F, (kN/m^2)$

$p_w = \text{aaltopaine tai dynaaminen paine}$

$R_y = \text{minimi myötöraja käytetyllä materiaalilla}$
 $= 235/k \text{ N/mm}^2, \text{ jos ei muuten määritetty}$

Levyn nettopaksuuden määrittämiseen on lisäksi olemassa myös muita kaavoja, jotka riippuvat laivan pituudesta ja siitä, onko ovi pitkittäisessä vai poikittaisessa laipiossa. Seuraavassa taulukossa on esitettyä kaavat eri tapauksille:

Taulukko 1. Levyn minimipaksuus (Pt B, Ch 7, Sec 1, Table 2).

Poikittaisessa laipiossa	
$L < 120m$	$1,3 + 0,004Lk^{0,5} + 4,5s$
$L \geq 120m$	$2,1 + 2,20k^{0,5} + s$
Pitkittäisessä laipiossa	
$L < 120m$	$1,7 + 0,013Lk^{0,5} + 4,5s$
$L \geq 120m$	$3,6 + 2,20k^{0,5} + s$

$L = \text{laivan sääntöpituus, (Pt B, Ch 1, Sec 2, [3.1.1])}$

$k = \text{materiaalikerroin, (Taulukko 2)}$

Materiaalikerroin riippuu käytetyn teräksen myötörajasta R_{eH} (taulukko 2) (Bureau Veritas 2020).

Taulukko 2. Materiaalikerroin (Pt B, Ch 4, Sec 1, Table 2).

$R_{eH}, \text{ N/mm}^2$	k
235	1,00
355	0,72

Kun levynpaksuus on määritetty kaavalla (1) sekä taulukon (1) kaavoilla, valitaan minimipaksuudeksi suurempi tulos. Tähän laskettuun tulokseen pitää vielä lisätä levypaksuuteen korroosiolisäys. (Hansen, N. Haastattelu 5.2.2020.) Korroosiolisäys on 0,50 mm kummallekin puolelle eli yhteensä 1,0 mm. (Pt B, Ch 4, Sec 2, Table 2.)

Jäykkääjien minimitaivutusvastus (cm^3) saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$w = \gamma_R \gamma_m \beta_b \frac{\gamma_{S2} p_{SF} + \gamma_{W2} p_{WF}}{m(R_y - \gamma_R \gamma_m \sigma_{X1})} \left(1 - \frac{s}{2l}\right) sl^2 10^3, \quad (\text{Pt B, Ch 7, Sec 2 [3.8.3]}) \quad (2)$$

Jäykkääjien minimileikkautumisala (cm^2) saadaan laskettua kaavalla:

$$A_{Sh} = 10 \gamma_R \gamma_m \beta_s \frac{\gamma_{S2} p_{SF} + \gamma_{W2} p_{WF}}{R_y} \left(1 - \frac{s}{2l}\right) sl, \quad (\text{Pt B, Ch 7, Sec 2 [3.8.3]}) \quad (3)$$

missä

$\gamma_R, \gamma_m, \gamma_{S2}, \gamma_{W2} = \text{turvallisuuskertoimia}, \quad (\text{Pt B, Ch 7, Sec 2, Table 1})$

$\beta_b, \beta_s = \text{polviokertoimia}, (\text{Pt B, Ch 7, Sec 2, Table 5})$

$m(\text{jäykkääjän pään kiinnitys} - \text{kerroin}) = 8$

$p_{SF} = (\text{staattinen vedenpaine}) = \rho g d_F, (\text{kN/m}^2)$

$p_w = \text{aalto} - \text{tai dynaaminen paine}$

$R_y = \text{minimi myötöraja käytetyllä materiaalilla}$
 $= 235/k \text{ N/mm}^2, \text{ jos ei muuten määritetty}$

$\sigma_{X1} = \text{rungon palkin normaalirasitus}$

$l = \text{jäykkääjien pituus}, (m)$

$s = \text{jäykkääjien jako}, (m)$

Aalto- tai dynaamista painetta ei tarvitse huomioida kaavoissa 1 ja 2 minimilevynpaksuutta ja -taivutusvastusta laskettaessa VT-ovien tapauksessa. Telakan tilatessa VT-ovia ilmoittavat he painekorkeuden, jonka oven tulee kestää, ja tässä paineessa tulisi olla huomioon otettuna jo dynaaminen rasitus (Tebul Oy). Myöskään rungon palkin normaali-rasitusta ei tarvitse huomioida kaavoissa 1 ja 2, koska VT-ovet eivät osallistu laivan rungon globaaliin pituuslujuuteen (Hansen, N. Haastattelu 5.2.2020).

Jäykkääjän todellinen taivutusvastus (cm³) saadaan laskettua kaavalla:

$$w = \frac{h_w t_f b_f}{1000} + \frac{t_w h_w^2}{6000} \left(1 + \frac{A_a - t_f b_f}{A_a + \frac{t_w h_w}{2}} \right), \quad (Pt B, Ch 4, Sec 3 [3.4.1]) \quad (4)$$

Jäykkääjän todellinen leikkautumisala (cm²) lasketaan kaavalla:

$$A_{Sh} = \frac{h_w t_w}{100}, \quad (Pt B, Ch 4, Sec 3 [3.4.1]) \quad (5)$$

missä

h_w = jäykkääjän laipan ja levyn välinen etäisyys, (mm)

t_f = jäykkääjän laipan paksuus, (mm)

b_f = jäykkääjän laipan leveys, (mm)

t_w = jäykkääjän uuman paksuus, (mm)

A_a = yhteen jäykkääjään vaikuttavan levykentän ala, (mm²)

Jahdit

Bureau Veritaksen jahteja koskevat säännöt löytyvät nr. 500 -sääntökirjasta. Bureau Veritaksen määritelmän mukaan jahdin pituus on 24–100 metriä (lastiviivan pituus). Matkustajamäärä ei saa ylittää SOLAS-sopimuksessa määritettyä 12 matkustajan rajaa. (Bureau Veritas 2006.)

Minimilevynpaksuus (mm) saadaan laskettua seuraavalla kaavalla:

$$t = 22,4 \cdot coeff \cdot \mu \cdot s \cdot \sqrt{\frac{p}{\sigma_{locam}}}, \quad (Pt B, Ch 6, Sec 3, [2.2.1]) \quad (6)$$

missä

$coeff$ = kerroin, joka laipiossa on 1

$$\mu(\text{levyn pituus} - \text{leveyssuhde kerroin}) = \sqrt{1,1 - \left(0,5 \cdot \frac{s^2}{l^2}\right)} \leq 1,$$

(Pt B, Ch 6, Sec 3, s. 162)

s = jäykkääjien jako, (m)

p = suunnittelupaine korkeus, (kN/m²)

σ_{locam} (sallittu taivutusjännitys, N/mm²) = 0,80 · 235/k

k = materiaalikerroin

l = jäykkääjän pituus, (m)

Jäykkääjien minimitaivutusvastus (cm³) saadaan laskettua kaavalla:

$$Z = 1000 \cdot \text{coef}f \cdot \frac{(3p_{\text{slower}} + 2p_{\text{supper}}) \cdot s \cdot l^2}{60 \cdot \sigma_{locam}}, \quad (\text{Pt B, Ch 6, Sec 3, [3.2.1]}) \quad (7)$$

Jäykkääjien minimileikkautumisala (cm²) saadaan kaavalla:

$$A_{sh} = 5 \cdot \text{coef}t \cdot \frac{(0,7p_{\text{slower}} + 0,3p_{\text{supper}}) \cdot s \cdot l}{\tau_{locam}},$$

(Pt B, Ch 6, Sec 3, [3.2.1]) (8)

missä

$\text{coef}t$ (vähennyskerroin) = $(1 - s/2l) \geq 0$, (Pt B, Ch 6, Sec 3, [3.2.1])

p_{slower} = paine jäykkääjän alapäässä, (kN/m²)

p_{supper} = paine jäykkääjän yläpäässä, (kN/m²)

τ_{locam} (sallittu taivutusjännitys, N/mm²)
= 0,45 · 235/k, (Pt B, Ch 6, Sec 1, Table 1)

Todellisen taivutusvastuksen ja leikkautumisalan laskemiseen voidaan käyttää kaavoja 4 ja 5.

2.6 Lloyd's Register

Matkustaja-alukset

Lloyd's Registerin matkustaja-aluksia koskevat säännöt löytyvät sääntökirjoista: ”Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3, Ship Structures” ja ”Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 4, Ship Structures”. Vesitiiviin laipion minimilevynpaksuus (mm) lasketaan kaavalla:

$$t = 0,004sf\sqrt{h_4k}, \text{ min: } 5,5\text{mm}, \text{ (Pt 4, Ch 1, Sec 9, Table 1.9.1)} \quad (9)$$

missä

s = apujäykkääjien väli, (mm)

$$f = 1,1 - \frac{s}{2500S}$$

S = pää – ja apujäykkääjien välien keskiarvo, (mm)

h_4 = painekorkeus (m)

k = materiaalikerroin, (taulukko 2), (Pt 3, Ch 2, Table 2.1.1)

Jäykkääjille vaadittu minimitaivutusvastus (cm³) saadaan laskettua kaavalla:

$$Z_1 = \frac{skh_4l_e^2}{71\gamma(\omega_1 + \omega_2 + 2)}, \text{ (Pt 4, Ch 1, Sec 9, Table 1.9.1)} \quad (10)$$

Jäykkääjille vaadittu minimileikkautumisala (cm³) saadaan kaavalla:

$$A_w = \frac{0,18Z_1}{l_e}, \text{ (Pt 4, Ch 1, Sec 9, Table 1.9.2)} \quad (11)$$

missä,

l_e = jäykkääjän pituus, (m)

γ = jäykkääjän muotokerroin, 1,4

ω_1, ω_2 = jäykkääjän päiden kiinnityskerroin = 0

Jäykkääjän todellinen taivutusvastus (cm³) lasketaan kaavalla:

$$Z_2 = \frac{ad_w}{10} + \frac{t_w d_w^2}{6000} \times \left(1 + \frac{200(A - a)}{200A + t_w d_w}\right), \quad (\text{Pt 3, Ch 3, Sec 3.2.6}) \quad (12)$$

missä

a = jäykkääjän laipan poikkipinta – ala, (cm^2)

d_w = jäykkääjän laipan ja levyn välinen etäisyys, (mm)

t_w = jäykkääjän uuman paksuus, (mm)

A = yhteen jäykkääjään vaikuttavan levykentän ala = $10fbt_p, \geq a$ (cm^2),
(Pt 3, Ch 3, Sec 3.2.7)

f = kantavan levykentän kerroin = $0,3\left(\frac{l}{b}\right)^{2/3} \leq 1$

b = levykentän leveys, (m)

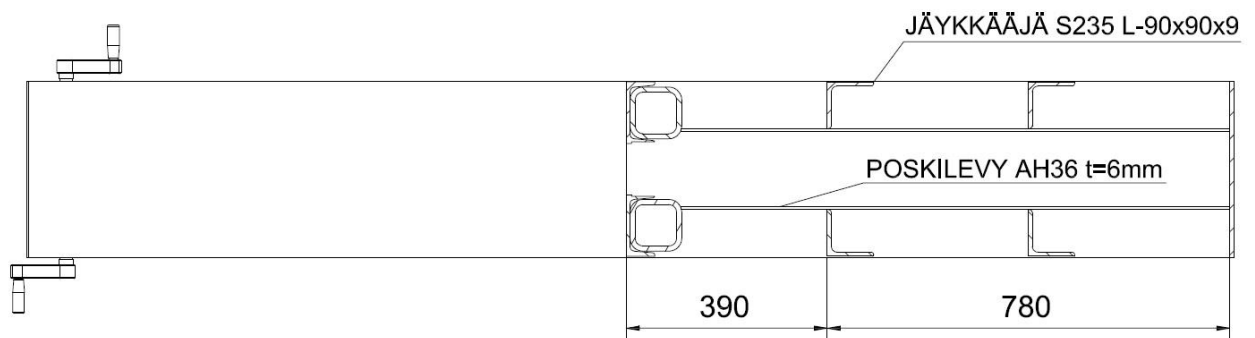
t_p = valittu, todellinen levynpaksuus, (mm)

Jäykkääjän todellinen leikkautusmisala saadaan kaavalla 5.

3 SÄÄNTÖJEN VERTAILU

Seuraavaksi tehdään vertailulaskelmat luokituslaitosten kaavojen välillä. Tarkoituksena on selvittää, kumman säännöt ovat tiukemmat lujuuden suhteen, ja käyttää näitä sääntöjä laskentaohjelman tekemiseen sekä mahdolliseen rakenteen keventämiseen. Tuotannollisista syistä ei ole järkevää suunnitella rakenteita useampien sääntöjen pohjalta. Tebul Oy:ssä halutaan, että sama rakenne läpäisee varmasti myös muiden luokituslaitosten vaatimukset.

Lujuuslaskelmat suoritettiin SLIM-tyyppisen oven ovirungolle, joka on jo valmistettu ja saanut luokituslaitoksen hyväksynnän. Jäykkääjien materiaali on S235-terästä eli myötölujuus on 235 N/mm^2 . Poskilevyn materiaali on 6 mm paksua AH36-terästä ja sen myötölujuus on 355 N/mm^2 . Jäykkääjien jako on 390 mm, pituus 2234 mm ja pinta-ala uumassa $7,3 \text{ cm}^2$ (kaava 5). Oven suunnittelupainekorkeus on $6 \text{ m} \approx 0,6 \text{ bar}$.



Kuva 1: Ovirungon rakenne (SLIM)

Edellisen luvun kaavoja käyttäen suoritettiin laskelmat kyseiselle ovelle. Tulokset on esitetty taulukossa 3.

Taulukko 3. Vertailulaskelmat

Bureau Veritas	Vaadittu taivutusvastus cm ³	Vaadittu leikkautumisala cm ²	Laskettu, todellinen taivutusvastus cm ³	Vaadittu levynpaksuus mm
Matkustaja-alukset	59,0	2,1	81,0	3,7
Jahdit	51,8	1,6	81,0	4,2
Lloyd's Register				
Matkustaja-alukset	58,7	4,7	91,6	5,5

Vertailulaskelmien tuloksista huomataan, että esimerkioven tapauksessa jäykkääjien todellinen taivutusvastus oli huomattavasti suurempi kuin mitä olisi vaadittu. Voidaan siis todeta, että rakennetta on mahdollista keventää.

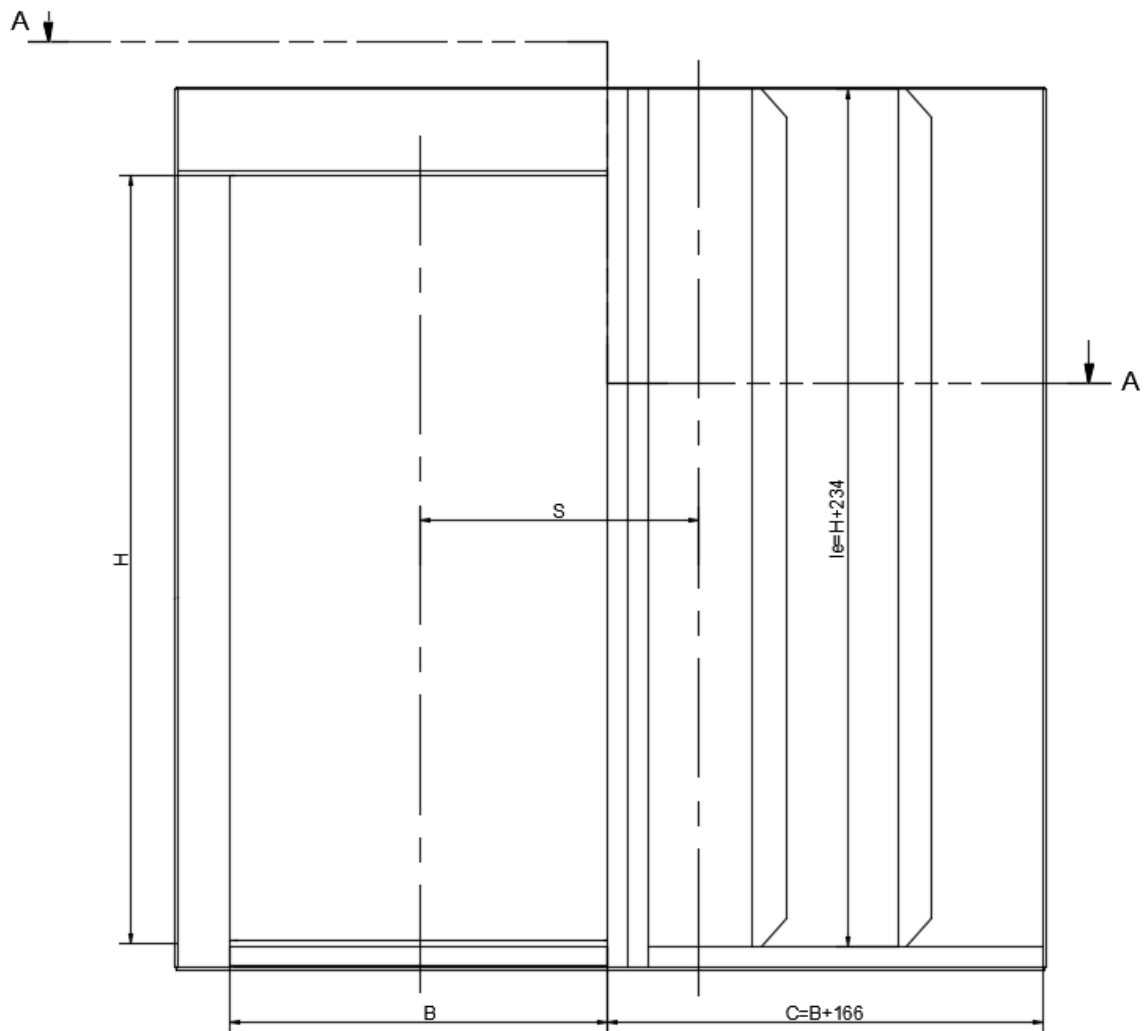
Bureau Veritaksen matkustaja-aluksia koskevilla säännöillä laskettaessa todellinen taivutusvastus oli 27 % suurempi kuin vaadittu taivutusvastus. Lloyd's Registerillä todellinen taivutusvastus oli 36 % suurempi kuin vaadittu taivutusvastus. Voidaan siis todeta, että Bureau Veritaksen säännöt ovat tiukemmat matkustaja-aluksien osalta ja niiden sääntöjä tullaan käyttämään laskentaohjelman teossa. Vaadittu leikkautumisalan laskemiseen on puolestaan syytä käyttää Lloyd's Registerin sääntöä, sillä se antoi suuremman arvon. Lloyd's Registerin säännöissä määritetään minimilevynpaksuudeksi 5,5 mm, joka on huomioitava, vaikka laskentakaavana käytettäisiinkin Bureau Veritaksen sääntöä.

Tuloksista huomataan, että Bureau Veritaksen jahteja koskevat säännöt vaativat pienemmän taivutusvastuksen, kuin matkustaja-aluksia koskevat säännöt. Tämä tarkoittaa sitä, että jahteihin valmistettavia VT-ovia on mahdollista keventää vielä enemmän, kuin matkustaja-aluksiin valmistettavia.

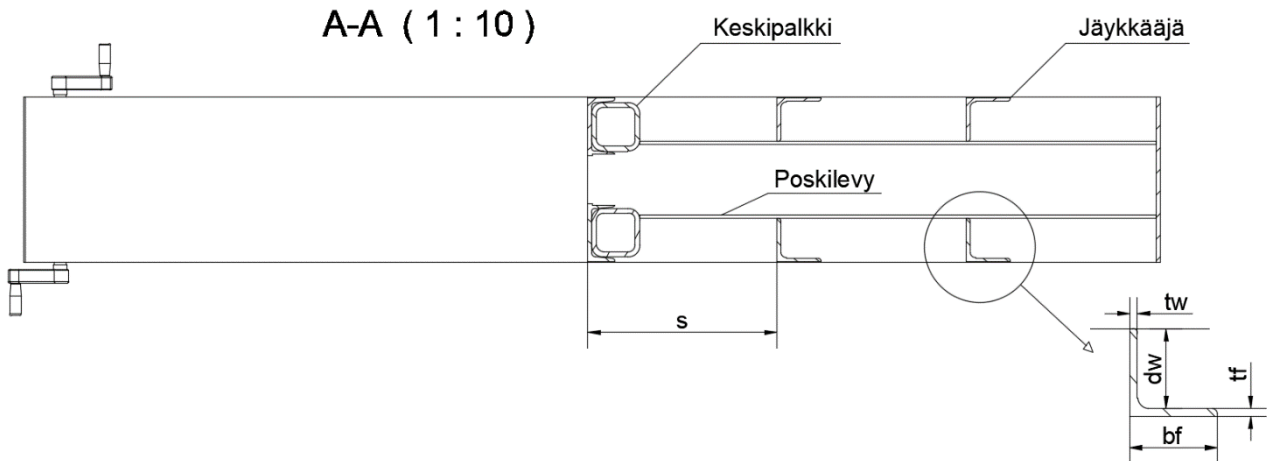
4 OVEN RAKENNE

Ovirunkoja on kolmea erilaista tyyppiä, joiden rakenne eroaa toisistaan jonkin verran joten tämä on otettava lujuuslaskelmissa huomioon. Ovilehdet ovat kaikissa ovirungoissa lujuuden näkökulmasta samanlaisia. Seuraavaksi tarkastellaan SLIM-tyyppisen oven lujuuden kannalta kriittisiä rakenteita ja pohditaan mahdollisia kehityskohteita.

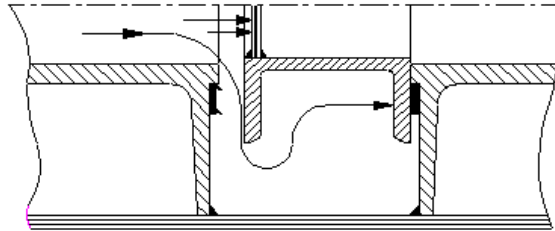
4.1 Ovirunko



Kuva 2. Ovirunko SLIM



Kuva 3. Ovirungon leikkauskuva SLIM



Kuva 4. Oven tiivistymisperiaate

Kaikissa kolmessa ovityypissä on samanlainen toimintaperiaate vesitiiveyden saamiseksi. Ovirunko koostuu kahdesta laipiosta, joiden välissä kulkee ovilehti. Riippuen siitä kummalta puolelta vesi kohtaa oven, tiivistyy ovilehti vastakkaisen puolen ovikarmia vasten (kuva 4). Mitä kovempi vedenpaine, sitä kovemmin ovilehti puristuu karmia vasten. Ovirunko täyttyy siis vedestä ja siksi on oltava kaksi vesitiivistä laipiota, jotka näkyvät kuvassa 3. Toimintaperiaate on hyvä tiiveyden kannalta, koska vedenpaine hoitaa itsensä tarvittavan voiman tiivistymiseen. Toimintaperiaatteen heikkous on kahden laipion aiheuttama lisäpaino. Tämän vuoksi lujuuden ja sitä kautta painon optimointi on erityisen tärkeää.

Lujuuden kannalta kriittisiä kohtia ovat keskipalkki sekä jäykkääjien ja poskilevyn muodostama laipio (Hansen, N. Haastattelu 5.2.2020). Keskipalkkiin vaikuttava voima aiheutuu pinta-alasta, jonka suuruus on $S \times l_e$ (kuva 2). Keskipalkki kantaa siis puolet ovilehteen kohdistuvasta voimasta sekä puolet keskipalkin ja ensimmäisen jäykkääjän välisestä etäisyydestä s . Ovilehden karmin jäykkyyttä lisäävää vaikutusta ei oteta huomioon keskipalkin lujuutta tarkasteltaessa (Hansen, N. Haastattelu 5.2.2020). SLIM -ovessa

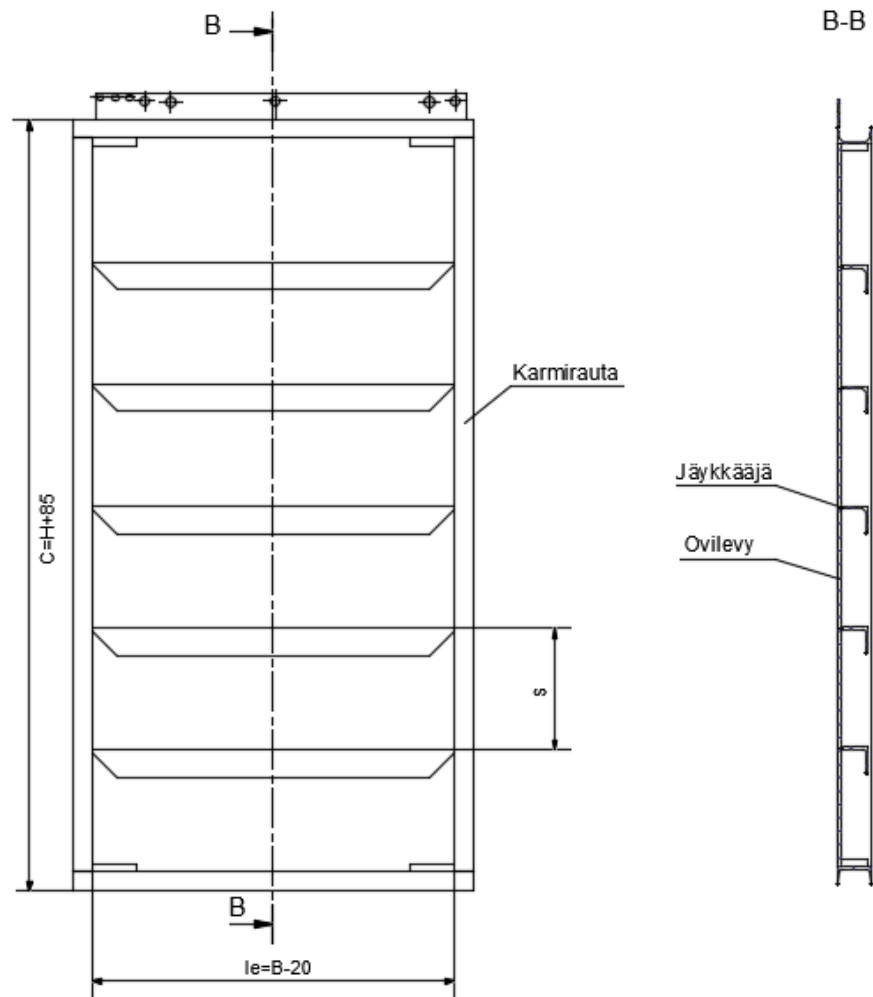
keskipalkki koostuu RHS 100x100 ja UNP-120 -palkeista (S355J2), jotka ovat hitsattuna yhteen. Yhdistelmäpalkki on painava ja sen valmistaminen on suhteellisen kallista hitsaamisen takia. Siksi tälle rakenteelle haluttaisiin korvaavia vaihtoehtoja. Keskipalkin rakenne on samanlainen riippumatta oven koosta tai painekorkeudesta ja se on mitoitettu kestäämään tiettyyn ovikokoon ja paineeseen asti. Voidaan siis olettaa, että pienissä ovissa ja painekorkeuksissa keskipalkin rakennetta olisi mahdollista keventää huomattavasti.

Laipiorakenteen jäykkääjät ovat L-90x90x9 S235JR -kulmaterästä, jotka ovat kiinnitetty hitsaamalla poskilevyyn. Myös jäykkääjien päät on hitsattu kiinni. Poskilevy on 6 mm paksua AH36-terästä, jonka myötöraja on 355 N/mm^2 . Jäykkääjät voisivat olla lujempaa S355J2-terästä, jolloin vaadittu taivutusvastus jäykkääjille pienenee. Tapauksissa, jolloin esimerkiksi yksi jäykkääjä ei riitä ja kaksi jäykkääjää on turhan paljon, voitaisiin käyttää kevyempää profiilia, kuten L-90x60x8-kulmaterästä. Poskilevyn ja jäykkääjien muodostaman laipion mitoituksessa tulee ottaa, että valmistusteknisistä syistä jäykkääjien etäisyys ei saisi ylittää 600 mm.



Kuva 5. Asennettu STANDARD -tyyppinen VT-ovi (Tebul Oy)

4.2 Ovilehti



Kuva 6. Ovilehti

Ovilehden rakenne on hyvin yksinkertainen. Karmirautana käytetään UNP-100 S235JR -palkkia, johon jäykkääjien päät on hitsattu kiinni. Ovilevy on 6 mm paksua AH36-terästä. Jäykkääjinä käytetään L-75x75x8 S235JR -kulmaterästä. Jäykkääjät on hitsattu myös poskilevyyn kiinni. Vaihtoehtoisia jäykkääjäprofiileja halutaan tutkia.

5 EXCEL-LASKENTAOHJELMA

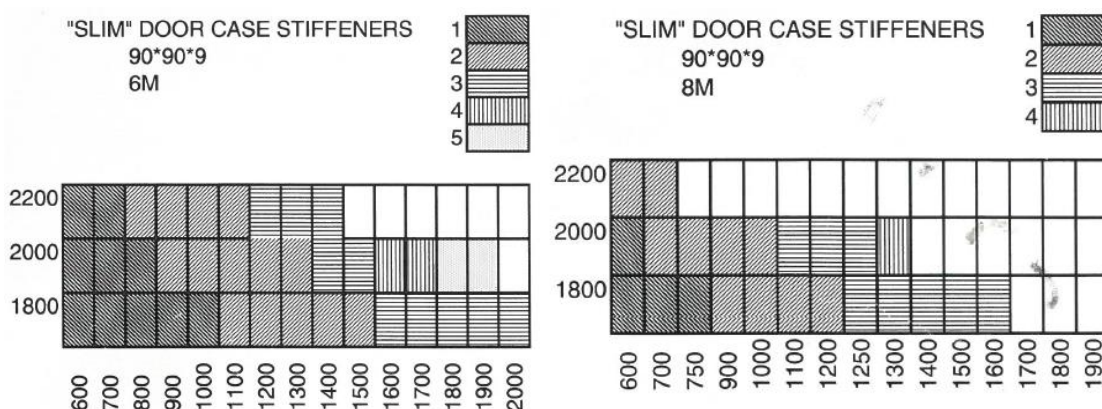
Excel-laskentaohjelmia tehtiin kaksi kappaletta, toinen matkustaja-aluksia ja toinen jah-teja koskevien sääntöjen pohjalta. Laskentaohjelmiston tarkoituksena on toimia työka-luna suunnitteluvaiheessa, jotta oven jäykkyys ja paino saadaan optimoitua.

Laskentaohjelmaan syötetään oven leveys, korkeus ja suunnittelupainekorkeus. Oh-jelma laskee kaikille kolmelle eri ovityypille ja ovilehdelle todellisen ja vaaditun taivutus-vastuksen jäykkäjäille. Ohjelma laskee myös todellisen ja vaaditun leikkautumisalan jäykkäjäille sekä vaaditun levynpaksuuden. Jäykkäjäien määrää voidaan muuttaa manu-aalisesti siten, että vaadittu taivutusvastus on pienempi kuin todellinen taivutusvastus. Ohjelma laskee automaattisesti jäykkäjäien jaon, mikä helpottaa suunnittelutyötä. Jäyk-käjäien muotoa ja materiaalia on myös mahdollista muuttaa, mikä tekee vaihtoehtoisten jäykkäjäiamateriaalien vertailusta helppoa.

Ohjelmassa on helppo vertailla eri ovityyppejä keskenään ja valita parhaiten sopiva ky-seiselle ovikoolle ja painekorkeudelle. Kuva laskentaohjelmasta on esitettyä liitteessä 1.

5.1 Vertailulaskelmat

Tähän asti jäykkäjäien määrää on laskettu kuvan 7 laskentakaaviolla. Ideana on, että joka ovityypille on omat kaaviot eri painekorkeuksille 2 metrin välein. Myös ovilehdelle on vastaavanlaiset omat kaavionsa.



Kuva 7: Ote vanhasta laskentakaaviosta (Tebul Oy).

Oven korkeus on kaavion vasemmassa laidassa pystyssä ja oven leveys vaaka-askelilla. Ovikoon jäykkääjien määrä katsotaan kuviosta, joka on korkeuden ja leveyden risteämiskohdassa. Kuvassa 6 näkyvät SLIM-tyyppisen ovirungon jäykkääjien laskentakaaviot 6 ja 8 m painekorkeuksille. Esimerkiksi 6 metrin painekorkeudella 1000x2000 kokoiselle ovelle vaaditaan kaavion mukaan kaksi jäykkääjää per puoli. Yksi vanhan kaavion heikkous on, ettei se ota keskipalkin lujuuteen kantaa muutoin, kuin rajoittamalla ovikokoa tiettyyn pisteeseen asti tietyllä paineella. Kuvassa 6 valkoiset ruudut tarkoittavat sitä, että keskipalkki ei enää kestä kyseisellä painekorkeudella ja ovikoolla. Toinen ongelma on, että jäykkääjien materiaalia ja profiilia ei voi muuttaa vaan kaavio pätee vain yhdentyyppiselle jäykkääjälle. Myöskään levynpaksuutta ei voi vaihtaa. Kaavio on tehty Lloyd's Registerin matkustaja-aluksia koskevien sääntöjen pohjalta, mutta käytetyt kaavat ja laskelmat ovat epäselvästi dokumentoitu. Jahteja koskevien sääntöjen pohjalta ei ole tehty lainkaan kaaviota. Vanha kaavio ei ota myöskään kantaa jäykkääjien vaadittuun leikkautumisalaan.

Vertailulaskelmien tarkoituksena oli selvittää, kuinka paljon uudella laskentaohjelmalla laskettaessa saavutetaan kustannussäästöjä ja rakenteen kevenemistä verrattuna vanhan laskentakaavion käyttöön. Vertailulaskelmat suoritettiin sekä matkustaja-aluksien että jahtien laskentaohjelmilla. Matkustaja-aluksien laskentaohjelmaan valittiin jo valmistettuja ovia kaikista eri ovityypeistä yhteensä 17 kappaletta ja jahtien laskentaohjelmaan 14. Ovityyppejä on valittu siinä suhteessa kuin niitä vuositasolla valmistetaan. Eniten tehdään MINI-tyyppisiä, toiseksi eniten SLIM-tyyppisiä ja vähiten STANDARD-tyyppisiä ovia. Jahtien laskentaohjelmasta jätettiin STANDARD-tyyppiset ovet pois, koska niitä ei valmisteta jahteihin. Ovikokoja ja painekorkeuksia on valittu mahdollisimman laaja kirjo. Näin vertailulaskelmista saadaan melko tarkka tulos, kun ne suhteutetaan vuositasolle.

Vertailulaskelmissa käytettiin kahta erilaista jäykkääjäprofiilia MINI ja SLIM-tyyppisten ovien ovirungolle, jotka olivat L-90x90x9 ja L-90x60x8 S355J2 -kulmaterästä. Ovilehdellä käytettiin Lx60x60x6 S355J2 -kulmaterästä. Laskelmissa huomattiin, että ovilehdissä aikaisemmin käytetty L-75x75x8-kulmateräs oli tarpeettoman lujaa. Laskelmissa huomattiin myös, että pienissä MINI- ja SLIM-tyyppisissä ovissa keskipalkin rakennetta on mahdollista muuttaa niin, että yhdistelmäpalkin sijasta keskipalkkina riittää UNP-120 S355J2-palkki. Tämä säästää paljon työkuukustannuksissa ja keventää rakennetta huomattavasti. Usein jahdeissa käytetään pieniä ovikokoja pienillä painekorkeuksilla, jolloin keskipalkin kevyempi rakenne on mahdollista toteuttaa. Tämä on erityisen hyvä asia, koska juuri jahdeissa painokriittisyys korostuu.

Tuloksissa esitetään kuinka monta jäykkääjää on käytetty valmistetuissa ovissa ja vertaillaan niitä ohjelman laskemaan määrään. Tuloksissa on laskettuna säästetyn hitsaus- sauman pituus, rakenteen keveneminen ja kustannussäästö. Jäykkääjien painojen laskemiseen on käytetty Oy Kontino AB:n varastoluetteloa. Kustannusarviot perustuvat Tebul Oy:n sisäiseen laskentaan. Matkustaja-aluksien tulokset ovat esitettynä liitteessä 2 ja jahtien liitteessä 3.

Taulukko 4. Laskentaohjelman tulosten yhteenveto

	Kevenemi- nen/ovi kg	Kevenemi- nen %	Kustannus- säästö/ovi €	Kustannus- säästö/ovi %
Matkustaja-alukset	92,4	7,3	193	1,2
Jahdit	126,1	9,9	246	1,7
Vuodessa yhteensä:	16 388		32919	1,46

Taulukossa 4 on esitettynä laskentaohjelmalla saavutetut keskeisimmät tulokset. Vuositasolla tulokset perustuvat arvioon, jossa puolet vuodessa valmistetuista ovista menevät alle 100 m pituisiin jahteihin, jolloin on mahdollista käyttää jahtien laskentaohjelmaa. Yhteensä ovia valmistetaan vuodessa keskimäärin 150 kpl.

5.2 Kehitysideat ja huomiot

Edellä esitettyjen laskelmien jälkeen voitiin todeta, että rakennetta olisi mahdollista keventää melko paljon jo pelkästään esitetyillä vaihtoehtoilla. Rakenteen keventämiseen on paljon muitakin vaihtoehtoja, joita kannattaa tutkia tarkemmin. Esimerkiksi keskipalkiksi olisi hyvä saada vielä kolmas vaihtoehto pelkän UNP-120-palkin ja yhdistelmäpalkin lisäksi. RHS-neliöpalkkia ei ole mahdollista käyttää yksinään, vaikka sen taivutusvastus olisikin suurempi kuin UNP-120-palkilla. RHS-palkin suuri pyöristyssäde nurkissa estää tiivistymispinnan koneistamisen. Paras rakenne keskipalkissa olisi sellainen, joka ei tarvitsisi yhteen hitsaamista ja jonka profiilin mittoja vaihtamalla saataisiin muutettua taivutusvastusta tarpeen mukaan.

Yksi merkittävä tekijä jäykkääjien määrän vähenemisessä laskentaohjelman avulla oli jäykkääjien materiaalin muuttaminen S235JR-teräksestä S355J2-teräkseen. Ilmeisesti jäykkääjien materiaalia ei ole vaihdettu S355J2-teräkseen, koska sitä ei ole ollut

saatavilla ja vanhassa laskentakaaviossa materiaaliolietuksena on jäykkääjille ollut pelkästään S235JR-teräs. Tällä hetkellä MINI ja SLIM-tyyppisissä käytettävää L-90x90x9-kulmaterästä on kuitenkin saatavilla myös S355J2-materiaalina. Myös laskentaohjelmassa käytettyä L-90-60x8-kulmaterästä on saatavilla S355J2-materiaalina. STANDARD-tyyppisessä ovesa käytetään L-130x65x10-terästä, jota on saatavilla ainoastaan S235JR-materiaalina tämänhetkiselä tavarantoimittajalta.

Erilaisia vaihtoehtoja jäykkääjiksi on runsaasti. Yksi vaihtoehto valmiiden kulmaterästen sijasta olisi käyttää itse taivutettua teräslevyä, jolloin jäykkääjän geometriaa olisi helppo optimoida tarpeen mukaan. Vähimmäislevynpaksuus Lloyd's Registerin sääntöjen mukaan matkustaja-aluksilla on 5,5 mm, joten jo käytettyä 6 mm levyä ei voi pienentää. Jahdeissa puolestaan olisi mahdollista käyttää esimerkiksi 5 mm levynpaksuutta mahdollisuuksien mukaan. Ovillehdessä olisi mahdollista käyttää jopa vielä ohuempaa levyä, sillä useimmissa tapauksissa ovilehden taivutusvastus oli runsaasti vaadittua suurempi, vaikka käytettiin L60x60x6-jäykkääjää ja maksimijäykkääjäjakoa.

Jäykkääjien ja keskipalkin optimoinnissa laskentaohjelman avulla tulee muistaa että, vaikka laajentamalla käytettävien jäykkääjien erilaisten profiilien määrää saataisiinkin vielä optimoitua lujuutta ja painoa paremmin, monimutkaistaa se raaka-aineen tilausprosessia sekä ovien valmistusprosessia. Tällä hetkellä, kun on käytetty vain yhdenlaista jäykkääjää ja keskipalkkia yhtä ovityyppiä kohden, on ollut helppo tilata tavaraa ja valmistaminen on ollut yksinkertaista. Siksi en suosittelekaan siirtymistä suoraan maksimaaliseen optimointiin, vaan vähitellen esimerkiksi aluksi vain pienten alusten projekteihin, jonka kaikkiin oviin voidaan käyttää kevyempää keskipalkin rakennetta ja kevyempää jäykkääjien profiilia. Näin saadaan testattua hallitusti tuotannon toimivuutta.

Laskentaohjelman käytössä tulee myös muistaa tarkkailla vaadittua levynpaksuutta sekä vaadittua leikkautumisalaa. Kun jäykkääjien määrää vähennetään, kasvavat vaatimukset levynpaksuudelle ja leikkautumisalalle.

Laskentaohjelman tulokset suhteutettuna vuositasolle ovat suuntaa antavia. Vertailulaskelmiin valittiin laaja kirjo erikokoisia ovia ja painekorkeuksia. Todellisuudessa vuodessa valmistetut ovikoot eivät jakaudu näin tasaisesti. Lisäksi tulee ottaa huomioon, että ovikoot ovat suurenemaan päin, koska asiakkaat haluavat yhä suurempia ovia aluksiinsa. Kuten edellä todettiin, suurissa ovissa ei saavuteta yhtä paljon rakenteen kevenemistä ja kustannussäästöjä, kuin pienissä ovissa, joissa keskipalkin rakennetta voitiin keventää huomattavasti.

6 YHTEENVETO

Työn tavoitteena oli selvittää, onko oven rakennetta mahdollista keventää. Lisäksi lujuuslaskelmat haluttiin päivittää ja saada selkeä käsitys siitä, mitä vaatimuksia ovien lujuudelle on. Lujuuslaskelmiin pohjautuen haluttiin laskentaohjelma, jolla oven jäykkyyttä olisi helppo tarkastella ja optimoida. Luokituslaitosten sääntöjen tarkastelu osoittautui työn hankalimmaksi osaksi. Oikeiden laskukaavojen löytäminen ja niiden oikeanlainen käyttö olisi ollut lähes mahdotonta ilman asiantuntijan apua. Haluankin antaa erityiskirjeen Bureau Veritaksen asiantuntijalle Nis Hansenille avusta sääntöihin perehdyttämiseen. Bureau Veritaksen sääntöjen ymmärtäminen auttoi myös Lloyd's Registerin oikeiden sääntökohtien löytämisessä.

Työn tärkein havainto oli, että oven rakennetta on mahdollista keventää jopa odotettua enemmän. Jahteja koskevien sääntöjen tarkastelu oli tärkeää, koska niihin ei oltu koskaan perehdytty Tebul Oy:ssä. Omat laskentaohjelmat matkustaja-aluksille ja jahdeille varmistavat sen, että paino ja lujuus saadaan optimoitua myös painokriittisiin jahtiprojekteihin mahdollisimman pieneksi. Jotta jahtien laskentaohjelmaa uskaltaa käyttää, on oltava täysin varma aluksen sertifiointiluokasta. Kaikissa alle 100 m aluksissa ei voida käyttää jahteja koskevia sääntöjä, mikäli aluksen matkustajamäärä ylittää sallitun rajan.

Työn tavoitteisiin päästiin hyvin. Toivottavasti Tebul Oy:ssä tullaan hyödyntämään tätä opinnäytetyötä, jotta VT-ovista saataisiin entistä kilpailukykyisempiä.

LÄHTEET

Bureau Veritas. 2006. New BV rules for Mega Yachts. Viitattu 7.2.2020. Saatavilla: <https://marine-offshore.bureauveritas.com/sites/g/files/zypfnx136/files/media/document/2977.1.ISMD2006-Thiberge.pdf>

Bureau Veritas. 2020. NR. 467: Rules for the Classification of Steel Ships. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla: http://erules.veristar.com/dy/data/bv/pdf/467-NR_PartB_2020-01.pdf

Bureau Veritas. 2012. NR. 500: Rules for the Classification and the Certification of Yachts. Viitattu 7.2.2020. Saatavilla: https://marine-offshore.bureauveritas.com/sites/g/files/zypfnx136/files/media/document/500-NR_2012-03.pdf

Davies, E.A.J. 2007. International Conventions. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla maksullisena osoitteessa: <https://www.britannica.com/technology/ship/Regulation>.

Hansen, N. Hull & Marine Surveyor. Bureau Veritas. Haastattelu 5.2.2020.

IMO. 2019a. International Convention for the Safety of Life at Sea (SOLAS), 1974. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla: [http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-\(SOLAS\),-1974.aspx](http://www.imo.org/en/About/Conventions/ListOfConventions/Pages/International-Convention-for-the-Safety-of-Life-at-Sea-(SOLAS),-1974.aspx).

IMO. 2019b. Passenger ships. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla: <http://www.imo.org/en/Our-Work/Safety/Regulations/Pages/PassengerShips.aspx>.

Lloyd's Register. 2011. Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 3: Ship Structures (General).

Lloyd's Register. 2011. Rules and Regulations for the Classification of Ships, Part 4: Ship Structures (Ship type).

Maritime Connector. 2019. Classification society & IACS. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla: <http://maritime-connector.com/wiki/classification-society/>.

Red Ensign Group. 2019. Red Ensign Group Yacht Code. Viitattu 11.2.2020. Saatavilla: <https://www.redensigngroup.org/media/1094/reg-yacht-code-january-2019-edition-part-a.pdf>

Räisänen, P.1997. Laivatekniikka, Modernin laivanrakennuksen käsikirja. Jyväskylä: Gummerus kirjapaino Oy.

Ship Structure Committee. 2005. Viitattu 12.2.2020. Saatavilla: <http://www.shipstructure.org/pdf/439.pdf>.

SOLAS. 2019. Annex- 8 SOLAS chapter II-1, parts B-2- Subdivision, watertight and weathertight integrity- and B-4- Stability management- Doors in Watertight Bulkheads of Passenger Ships and Cargo Ships. Viitattu 4.2.2020. Saatavilla: TurkuAMK, rulefinder.

Laskentaohjelma Matkustaja-alukset

Ovimuuttujat:		
B	900	mm
H	2100	mm
h	6	m
p	60	kN/m ²
Materiaalikerroin:		
Reh	k	Ry
235	1	235
355	0,72	326,389
Vaadittu levynpaksuus, min 5,5mm		
t	4,52384	
Valittu levynpaksuus:		
tp	6	mm

SLIM									
C	1066	mm	n (jäykkärien määrä)	1	S	770,000	mm		
I	2334	mm	s (jako)	533,000		0,770	m		
	2,334	m		0,533					
Jäykkääjän mitat:									
Materiaalivaihtoehdot									
Materiaali:	S 355	Ry	326,389	L90x90x9	L90x60x8	L80x80x8			
hw (laipan ja levyn välinen etäisyys)			81	mm	81	82	72		
tf (jäykkääjän laipan paksuus)			9	mm	9	8	8		
bf (jäykkääjän laipan leveys)			90	mm	90	60	80		
tw (jäykkääjän uuman paksuus)			9	mm	9	8	8		
Aa (yhteen jäykkääjään vaikuttavan levykentän ala)			3198	mm ²					
Jäykkääjän todellinen taivutusvastus:					Jäykkääjän vaadittu taivutusvastus:				
w1	82,048				w2	61,489			
Jäykkääjän todellinen leikkautumisala					Jäykkääjän vaadittu leikkautumisala				
Aw1	7,29				Aw2	4,742			
Keskipalkki todellinen taivutusvastus:					Keskipalkin vaadittu taivutusvastus:				
U-120	60,7				Ry	326,389			
RHS 100x100	82,2								
Z1	142,9				Z2	83,739			

MINI									
C	1274	mm	n (jäykkärien määrä)		1		S	822,000	mm
I	2248	mm	s (jako)		637,000	mm		0,822	m
	2,248	m			0,637	m	Aa	3822	mm^2
Jäykkääjän todellinen taivutusvastus:			Jäykkääjän vaadittu taivutusvastus:						
w1	82,532		w2		66,055				
Jäykkääjän todellinen leikkautumisala:			Jäykkääjän vaadittu leikkautumisala:						
Aw1	7,29		Aw2		5,289				
Keskipalkki todellinen taivutusvastus:			Keskipalkin vaadittu taivutusvastus:						
U-120	60,7		Ry		326,389				
RHS 100x100	82,2								
Z1	142,9		Z2		81,153				
STANDARDI									
C	1066	mm	n (jäykkärien määrä)		1		S	716,500	mm
I	2329	mm	s (jako)		533,000	mm		0,717	m
	2,329	m			0,533	m			
Jäykkääjän mitat:									
Materiaali:	S 235	Ry	235						
hw (laipan ja levyn välinen etäisyys)			120		mm				
tf (jäykkääjän laipan paksuus)			10		mm				
bf (jäykkääjän laipan leveys)			65		mm				
tw (jäykkääjän uuman paksuus)			10		mm				
Aa (yhteen jäykkääjään vaikuttavan levykentän ala)			3198		mm				
Jäykkääjän todellinen taivutusvastus:			Jäykkääjän vaadittu taivutusvastus:						
w1	118,101		w2		85,013				
Jäykkääjän todellinen leikkautumisala:			Jäykkääjän vaadittu leikkautumisala:						
Aw1	12		Aw2		6,570				
Keskipalkki todellinen taivutusvastus:			Keskipalkin vaadittu taivutusvastus:						
			Ry		326,389				
U-200	191								
Z1	191		Z2		78,622				

OVILEHTI									
C	2185	mm	n (jäykkärien määrä)		3				
l	880	mm	s (jako)		533,750	mm			
	0,88	m			0,534	m			
Jäykkääjän mitat:									
						Materiaalivaihtoehtoja:			
Materiaali:		S 235	Ry	326		L60x60x6	L70x70x7	L75x75x8	
hw (laipan ja levyn välinen etäisyys)				54	mm	54	63	67	
tf (jäykkääjän laipan paksuus)				6	mm	6	7	8	
bf (jäykkääjän laipan leveys)				60	mm	60	70	75	
tw (jäykkääjän uuman paksuus)				6	mm	6	7	8	
Aa (yhteen jäykkääjään vaikuttavan levykentän ala)					3202,5	mm			
Jäykkääjän todellinen taivutusvastus:					Jäykkääjän vaadittu taivutusvastus:				
w1	24,820		w2		6,893				

Vertailulaskelmat Matkustaja-alukset

	Ovityyppi	Ovikoko	Paine m	Ovirungon jäykkääjät kpl/puoli		Ovilehden jäykkääjät kpl		Keskipalkin rakenne		Säästetty hitsaus m	Vanha paino kg	Kevenemi- nen kg	Kevenemi- nen %	Arvioitu kustannussäästö €
				Tehty	Ohjelma	Tehty	Ohjelma	Tehty	Ohjelma					
1	MN	700x1800	6	1	1	3	2	RHS+UNP	UNP	9,2	970	123,4	12,7	207,7
2	MN	780x1930	6	2	1	4	3	RHS+UNP	UNP	18,1	1095	185,7	17,0	346,8
3	MN	800x1900	6	2	1	3	3	RHS+UNP	UNP	17,9	1095	176,5	16,1	334,9
4	MN	900x2100	6	2	1	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,8	1230	72,3	5,9	164,0
5	MN	1000x2000	6	2	1	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,6	1240	71,9	5,8	162,0
6	MN	1050x2100	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	11,1	1380	75,3	5,5	169,7
7	MN	1100x2300	6	3	2	5	3	RHS+UNP	RHS+UNP	14,1	1460	90,9	6,2	210,9
8	MN	1200x2250	6	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	12,0	1500	81,9	5,5	184,0
9	SL	800x1900	6	2	1	3	3	RHS+UNP	RHS+UNP	8,5	1140	74,3	6,5	148,8
10	SL	900x2000	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,7	1230	100,9	8,2	195,1
11	SL	950x1900	10	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,4	1230	70,5	5,7	159,3
12	SL	1000x1750	6	2	1	3	2	RHS+UNP	RHS+UNP	9,9	1200	77,2	6,4	162,7
13	SL	1200x2100	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	11,7	1510	73,4	4,9	172,7
14	SL	1700x2280	6	5	3	6	4	RHS+UNP	RHS+UNP	26,8	2020	164,1	8,1	391,3
15	ST	800x2200	8	2	1	4	3	UNP-200	UNP-200	11,3	1410	86,4	6,1	183,7
16	ST	900x1800	13	2	2	4	3	UNP-200	UNP-200	1,8	1320	17,5	1,3	33,1
17	ST	1000x2200	8	2	2	5	3	UNP-200	UNP-200	3,9	1560	28,3	1,8	61,9
									Yhteensä:	198,6		1570,8		3288,5
									Keskiarvo:	11,7		92,4	7,3	193,4

Vertailulaskelmat Jahdit

	Ovityyppi	Ovikoko	Paine m	Ovirungon jäykkääjät kpl/puoli		Ovilehden jäykkääjät kpl		Keskipalkin rakenne		Säästetty hitsaus m	Vanha paino kg	Kevenemi- nen kg	Kevenemi- nen %	Arvioitu kustannussäästö €
				Tehty	Ohjelma	Tehty	Ohjelma	Tehty	Ohjelma					
1	MN	700x1800	6	1	1	3	2	RHS+UNP	UNP	9,2	970	123,4	12,7	207,7
2	MN	780x1930	6	2	1	4	3	RHS+UNP	UNP	18,1	1095	185,7	17,0	346,8
3	MN	800x1900	6	2	1	3	3	RHS+UNP	UNP	17,9	1095	176,5	16,1	334,9
4	MN	900x2100	6	2	1	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,8	1230	72,3	5,9	164,0
5	MN	1000x2000	6	2	1	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,6	1240	71,9	5,8	162,0
6	MN	1050x2100	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	11,1	1380	75,3	5,5	169,7
7	MN	1100x2300	6	3	2	5	3	RHS+UNP	RHS+UNP	14,1	1460	122,7	8,4	245,8
8	MN	1200x2250	6	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	12,0	1500	113,0	7,5	218,2
9	SL	800x1900	6	2	1	3	3	RHS+UNP	UNP	17,1	1140	183,6	16,1	336,1
10	SL	900x2000	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,7	1230	100,9	8,2	195,1
11	SL	950x1900	10	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	10,4	1230	98,2	8,0	189,7
12	SL	1000x1750	6	2	2	3	2	RHS+UNP	UNP	9,9	1200	143,2	11,9	235,3
13	SL	1200x2100	8	3	2	4	3	RHS+UNP	RHS+UNP	11,7	1510	73,4	4,9	172,7
14	SL	1700x2280	6	5	2	6	4	RHS+UNP	RHS+UNP	26,8	2020	225,5	11,2	458,8
									Yhteensä:	190,2		1765,7		3436,7
									Keskiarvo:	13,6		126,1	9,9	245,5