

Opinnäytetyö (AMK)

Tekniikka ja liikenne

Kone- ja tuotantotekniikka

2011

Antti Pösö

ERISTEIDEN VAIKUTUS LAIVAN TALOUDELLISEEN SUORITUSKYKYYN



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Kone- ja tuotantotekniikka | Laiva- ja venetekniikka

24.01.2011 | 45

Ohjaaja: Kai Saarinen

Antti Pösö

Eristeiden vaikutus laivan taloudelliseen suorituskykyyn

Tutkimuksen tavoitteena oli etsiä menetelmiä arvioida laivojen palo-, lämpö- ja äänieristeiden määriä, painoja ja painopisteitä, sekä niiden vaikutusta laivan ominaisuuksiin kuten uppoumaan, painopisteeseen ja tehontarpeeseen. Mahdollisiksi menetelmiksi valittiin laivan ulottuvuuksista ja muodoista tulevia kertoimia ja miten laivan kansien pinta-alan käyttö on jakautunut.

Lähtökohtana pidettiin, että menetelmän pitää olla yksinkertainen ja nopea, ja tarkkuuden pitää olla 20 % sisällä todellisista arvoista. Pelkkien kertoimien avulla päädyttiin liian suureen tuloksien vaihteluun ja pinta-alan kautta tehtävän arvioinnin todettiin olevan liian työläs menetelmä. Tästä syystä referenssi laivan käyttökertoimien yhteydessä todettiin tehokkaaksi tavaksi toteuttaa arvionti.

Tutkimus oli jatkotutkimus Elomatic Marinen Isoverille tekemälle tapaustutkimukselle.

ASIASANAT:

energiatehokkuus, eristeet, laivanrakennus, laivanvarustus, lämmöneristys, nopeus, palosuojaus, rakennuskulut, syväys, uppouma, vakavuus, ääneneristys

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mechanical engineering | Naval architecture

24.01.2011 | 45

Instructor: Kai Saarinen

Antti Pösö

The effect of insulation on the ship cost-effectiveness

The goal of the study was to determine methods for estimating the amount, weight and center of gravity for fire, thermal and sound insulations in the ship. The methods that were studied were the use of coefficients derived from ships dimensions, shape and the use of deck area.

The starting point of the study was to find simple and quick methods to estimate and to obtain the accuracy of 20 % from the values. The use of coefficients alone gave too much variance and the use of deck areas was too laborious. For this reason, reference ships were used along with coefficients and which proved to be a more effective estimation method.

The study was a further study to Elomatic Marines previous case study for Isover.

KEYWORDS:

building cost, displacement, draught, energy efficiency, fire insulation, insulation, ship building, ship outfitting, sound insulation, speed, stability, thermal insulation

SISÄLTÖ

LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	8
2 ERISTEET LAIVOISSA	5
2.1 Yleistä eristeistä	5
2.2 Eristeet laivoissa	5
2.2.1 Lämpöeristeet	6
2.2.2 Paloeristeet	7
2.2.3 Äänieristeet	12
3 LAIVOJEN ANALYSOINTI	12
3.1 Eristeiden mittaaminen	12
3.2 Kertoimien tutkiminen	14
3.2.1 Kertoimet laivan päämittojen suhteen	14
3.2.2 Kertoimet pinta-alojen suhteen	18
3.3 Referenssilaiava	19
4 PAINON VAIKUTUS LAIVAAN	20
4.1 Painon merkitys suunnittelussa	20
4.2 Painon vaikutus laivan talouteen	20
4.2.1 Kuollut paino	20
4.2.2 Tehon tarve	21
4.3 Painon vaikutus laivan vakavuuteen	22
4.4 Painon vaikutus rakenteisiin	25
5 TYÖKALU JA LASKUMENETELMÄT	27
5.1 Käyttötarkoitus	27
5.2 Työkalun toiminta	28
5.3 Raportti	31
5.3.1 Vakavuus	31
5.3.2 Polttoainetalous	32
5.3.3 Rakennekustannukset	35
5.3.4 Lisärakenteet	38
6 TULOKSIEN VERTAILU	39
6.1 Tapaustutkimuksen tiedot	39
6.2 Paino ja painopiste	39
6.3 Painon vaikutus	40
6.4 Väärin valittu referenssi	41

7 JOHTOPÄÄTÖKSET	43
LÄHTEET	45

KUVAT

Kuva 1. Lämmön liikkuminen rakenteissa.	7
Kuva 2. Laipion paloeristeet.	10
Kuva 3. Kannen paloluokan määrittäminen.	11
Kuva 4. Esimerkki äänieristyksestä.	12
Kuva 5. Laivan vakavuuden suuret.	23
Kuva 6. GZ-varsi.	24
Kuva 7. GZ-varsi kun painopiste on alempana.	25
Kuva 8. Käyttöliittymä.	27
Kuva 9. Projektin tiedot.	28
Kuva 10. Projektilaivan tiedot.	28
Kuva 11. Eristeiden valinta.	29
Kuva 12. Laskennan tulokset.	30
Kuva 13. Tulokset projektilaivaan.	30
Kuva 14. GM-rajakäyrät.	32
Kuva 15. Tehonmuutosesimerkki.	34
Kuva 16. Tehonmuutos nopeuden funktiona.	35
Kuva 17. Aluminiirakenteiden korvaaminen teräksellä.	37
Kuva 18. Painopisteen sijainti teräsrakenteen massan funktiona.	37
Kuva 19. Painon hyödyntäminen hytteihin.	38

TAULUKOT

Taulukko 1. A-luokka.	8
Taulukko 2. B-luokka.	8
Taulukko 3. Tilat erottavan laipion luokka (Solas consolidated edition 2001, 208).	9
Taulukko 4. Tilat erottavan kannen luokka (Solas consolidated edition 2001, 209).	11
Taulukko 5. Esimerkki laivan eristeiden pinta-aloista ja painopisteitä.	14
Taulukko 6. Kertoimien tarkkuus koelaivaan.	16
Taulukko 7. Kertoimien tarkkuus koelaivan kansirakenteisiin.	17
Taulukko 8. Kertoimien tarkkuus koelaivan runkoon.	18
Taulukko 9. Tehon muutos eri nopeuksilla.	33
Taulukko 10. Laskennan oikeellisuuden tarkastelu syväykselle.	40
Taulukko 11. Laskennan oikeellisuuden tarkastelu nopeudelle.	41
Taulukko 12. Väärin valitun referenssin syväyden arviointiin.	41
Taulukko 13. Väärin valitun referenssin vaikutus nopeuden arviointiin.	42
Taulukko 14. Eristeiden virhemarginaalin vaikutus.	43

KUVAAJAT

Kuvaaja 1. Risteilijän tehon tarpeen muutos syväyksen muutoksen funktiona.	21
Kuvaaja 2. RoPax:n tehon tarpeen muutos syväyksen muutoksen funktiona.	22

Lyhenteet

Eristeet laivoissa

H = lämpövirta

∂Q = lämpömäärä

∂t = aika

λ = lämpökerroin

A = pinta-ala,

ΔT = lämpötilaero

L = eristeen paksuus

R = eristeen paksuuden suhde lämpökertoimeen

Laivojen analysointi

cg = Painopiste

l_i = Viivan pituus

d_i = Viivan keskipisteen sijainti

L_{pp} = Perpendikkeli pituus

B = Leveys

H = Korkeus perusviivasta ylimpään kokonaiseen kanteen

H_{hull} = Rungon korkeus

H_{st} = Ylärakenteiden korkeus

St_{shape} = Ylärakenteiden muotokerroin

Painon vaikutus laivaan

M = Metasentri

G = Laivan painopiste

B = Uppouman painopiste

K = Kölipiste

Työkalu ja laskumenetelmät

C_b = Rungon täyteläisyys kerroin

∇ = Uppouma

L_{pp} = Perpendikkeli pituus

B = Leveys

T = Syväys

ΔT = Syvyyksen muutos

Δm = Massan muutos

ρ = Tiheys

C_{wp} = Vesiviivan täyteläisyys

CG = Painopiste

P_b = Koneteho

μ = Käyttöaste

d = Laivan merellä olo vuorokausia vuodessa

h = Monta tuntia laiva on vuorokaudessa käytössä

m_{kWh} = Polttoaineen kulutus kWh kohden

$P_{b\%}$ = Suhteellinen tehon muutos

AC = Amiraaliteettikerroin

V = Nopeus

Δ = Uppouma tonneina

m_{steel} = Teräksen massa

m_{alu} = Alumiinin massa

$m_{savings}$ = Säästetty massa

m_{add} = Teräkseen vaihdettavan alumiinin massa

m_{zsteel} = Teräksen korkeussuuntainen painopiste

VCG = Korkeussuuntainen painopiste

Tuloksien vertailu

L_{pp} = Perpendikkeli pituus

B = Laivan leveys

T = Syväys

Johtopäätökset

V = Nopeus

L = Pituus

D = Uppouma

P = Teho

x_i = Suhdeluku

1 Johdanto

Työssä tutkittiin matkustaja-autolauttojen sekä risteilijöiden eristeitä. Saatujen tuloksien avulla selvitettiin, miten erilaiset eristeratkaisut vaikuttaisivat laivan painoon. Tämän jälkeen tutkittiin, miten painon muutos vaikuttaisi laivan ominaisuuksiin, kuten syvyykseen ja vakavuuteen sekä miten tämä vaikuttaisi laivan tehontarpeeseen ja miten säästettyä painoa voitaisiin käyttää korvaamaan kalliimpia alumiinirakenteita teräsrakenteilla.

Saatujen tuloksien perusteella valmistettiin sovellus, jonka avulla suunnittelija voi arvioida tulevan laivan eristeiden määriä ja painoja, ennen kuin käytössä on tarkempaa materiaalia itse eristesuunnittelua varten, sekä eristevalmistaja markkinoida tuotteitaan telakoille ja varustamoille.

2 Eristeet laivoissa

2.1 Yleistä eristeistä

Eristeellä tarkoitetaan aineen tai energian liikkumista rajoittavaa rajapintaa. Eristeet voidaan jakaa kosteus-, lämpö-, palo-, sähkö- sekä äänieristeisiin. Myös värinävaimentimien voidaan katsoa kuuluvan eristeiden joukkoon värinäeristeinä. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan käsitellä muiden kuin rakenteissa olevien lämpö-, palo- sekä äänieristeiden painon vaikutusta laivan polttoainetalouteen, vakavuuteen sekä rakennuskustannuksiin.

Kaikkein yleisin käytetty eriste on mineraalivilla. Mineraalivillalla tarkoitetaan joko kivi- tai lasivillaa. Kivivilla valmistetaan pääasiassa emäksisistä kiviaineista, kun taas lasivilla valmistetaan jätelasista. Lasivillaa voidaan myös valmistaa suoraan lasin raaka-aineista. Molemmissa villoissa sideaineena käytetään bakeliittiliimaa.

2.2 Eristeet laivoissa

Laivoissa lämpö- ja paloeristeet ovat suurimmat eristeryhmät. Risteilyaluksissa lähes koko runko on lämpöeristetty. Palovyöhykkeiden laipiot saavat olla enintään 48 m päässä toisistaan. Nämä laipiot yltyvät pohjasta ylimpään kanteen ja ne on paloeristetty. (Lloyd register 2010.) Matkustaja-autolautoissa voidaan jättää autokansien laidat lämpöeristämättä, mutta kansien täytyy olla paloeristettyjä. Äänieristeitä käytetään pääasiassa eristämään laivan koneikkojen aiheuttamat äänet matkustaja- ja miehistötiloista sekä ravintolat, teatterit ja muut meteliä aiheuttavat alueet hyttialueista.

Laivoissa käytetään yleisesti kivivillaa eristeinä. Sillä on jo pitkään ollut luokituslaitoksen sertifikaatti. Myös lasivilla on saanut sertifioinnin. Lasivillan etuna on sen keveys verrattuna kivivillaan, kun taas kivivilla on edullisempaa.

Mainitsemisen arvoinen eriste tulevaisuutta silmällä pitäen on **AeroGeltm**, joka on silikaattivaahtoa eli piin ja hapen kemiallinen yhdiste. Materiaali on suurimmalta osalta ilmaa, mikä tekee siitä erittäin kevyen ja lämpöeristeenä loistavan, mutta samalla se on myös palonkestävää materiaalia (Aspen Aerogels 2010).

2.2.1 Lämpöeristeet

Lämpöeristeiden tarkoitus on nimensä mukaan eristää lämpöenergiaa joko karkaamasta tilasta tai pääsemään tilaan. Lämpöeristeet ovat yleensä tiheydeltään kevyitä. Niiden sisällä olevan ilman on tarkoitus estää lämpöenergiaa liikkumasta. Lämpöeristeiden määrään vaikuttavat laivan tyyppi ja laivan käyttöalue. Rahtialuksissa yleensä riittää pelkkä kansimökin lämpöeristäminen, kun taas risteilijöissä joudutaan lämpöeristämään lähes koko runko.

Koska laivojen sisätiloissa on yleensä eri lämpötila kuin laivan ulkopuolella, pyrkii lämpöenergia siirtymään kylmempää kohden termodynamiikan lakien mukaan. Laivan runkoa voidaan ajatella johteena lämpöenergialle, mistä syystä energian liikkumista runkoon tai rungosta pyritään estämään lämpöeristeillä. Tämä tarkoittaa käytännössä melkein koko laivan rungon eristämistä. Eristämättä voidaan jättää alueita, joissa lämmöllä ei ole suurta merkitystä kuten laivan pohja. Kaksoispohjan yläpuolella oleva kansi täytyy kuitenkin eristää, ettei meren lämpö pääse laivan sisään. Autolautoissa autokannet ja rahtilaivoissa ruumat voidaan jättää eristämättä, jos lasti sen sallii.

Ilman eristeitä lämpöenergia pääsee vapaasti siirtymään runkoon ja sitä kautta pois laivasta, tai toisin päin (kuva 1). Lämpöeristeen sisällä oleva ilma hidastaa energian siirtymistä. Lämpöenergian liikkumista kutsutaan lämpövirraksi ja se voidaan laskea yhtälöllä 1.1.

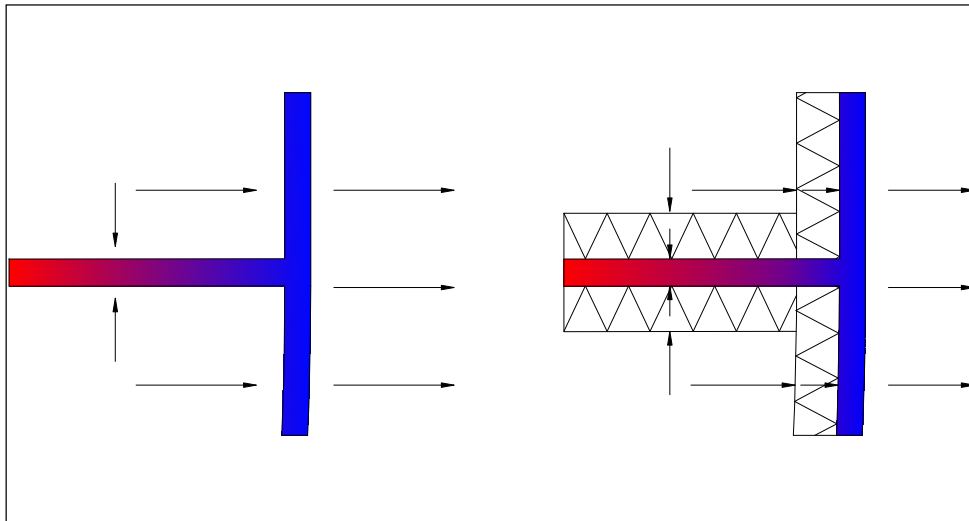
$$H = \frac{\partial Q}{\partial t} \tag{1.1}$$

Missä ∂Q tarkoittaa lämmön määrää ja ∂t aikaa, differentiomalla yhtälö 1.1 saadaan:

$$H = kA \frac{\Delta T}{L} \quad (1.2)$$

Kertoimen k sijasta yleensä käytetään λ -kerrointa, joka kertoo materiaalin kyvystä johtaa lämpöä. Mitä pienempi λ on, sitä paremmin materiaali estää lämmön liikkumista. A on eristetyn alueen pinta-ala, ΔT on lämpötilaero ja L eristeen paksuus. Useasti λ ja L on korvattu kertoimella R :

$$R = \frac{L}{\lambda} \rightarrow H = \frac{A\Delta T}{R} \quad (1.3)$$



Kuva 1. Lämmön liikkuminen rakenteissa.

Koska lämpövirran voimakkuus riippuu lämpötilojen erosta, tarkoittaa se, että mitä suurempi lämpötilaero laivan sisällä on verrattuna ulkoilmaan, sitä paksumpaa eristettä tai tehokkaampaa ilmastointia tarvitaan.

2.2.2 Paloeristeet

Paloa eristävät rakenteet laivoissa jaetaan A-, B- ja C-luokkiin. Näiden luokkien perusteella valitaan sopiva eriste rakenteeseen niin, että se täyttää

turvallisuussäännöt. A-luokan paloa eristävä rakenne tarkoittaa, ettei tulipalon sattuessa, tulipalon vastakkaisella puolella, rakenteen keskilämpö saa nousta yli 140 °C, eikä missään pisteessä yli 180 °C tietyn ajan sisällä. Lisäksi eristävän rakenteen täytyy olla tehty palamattomista materiaaleista eli teräksestä tai vastaavasta materiaalista. Aika, joka rakenteen täytyy lämpöä kestää, on riippuvainen rakenteen paloluokasta. Nämä ajat on listattu taulukkoon 1.

Taulukko 1. A-luokka.

Paloluokka	Kesto
A-60	60 <i>min</i>
A-30	30 <i>min</i>
A-15	15 <i>min</i>
A-0	0 <i>min</i>

B-luokan eristeissä keskilämpötila ei saa nousta yli 140 °C, eikä missään pisteessä yli 225 °C, ja kuten A-luokan laipion, sen täytyy olla valmistettu palamattomasta materiaalista. B-luokan rakenteiden lämmönkestoajat ovat taulukossa 2.

Taulukko 2. B-luokka.

Paloluokka	Kesto
B-15	15 <i>min</i>
B-0	0 <i>min</i>

Alumiinirakenteissa ei A-, eikä B-luokan kantavan rakenteen sisäosan lämpötila saa nousta yli 200 °C ympäristön lämpötilaa korkeammaksi. Tällä estetään materiaalien ominaisuuksien muuttuminen. Käytännössä tämä tarkoittaa, että alumiinirakenteet täytyy joko eristää molemmilta puolilta tai muulla tapaa estää palon suora kosketus rakenteeseen. C-luokka tarkoittaa, että rakenteen täytyy olla tehty palamattomista materiaaleista (SOLAS Consolidated edition 2001, 200).

2.2.2.1 Paloluokan määrittäminen

Laipion, kannen tai muun rakenteen paloluokituksen määrittäminen tapahtuu tutkimalla, mitä tiloja rakenne erottaa (kuvat 2, 3). Tilat on jaettu 14 osioon (taukko 3, 4) riippuen niiden käyttötarkoituksesta.

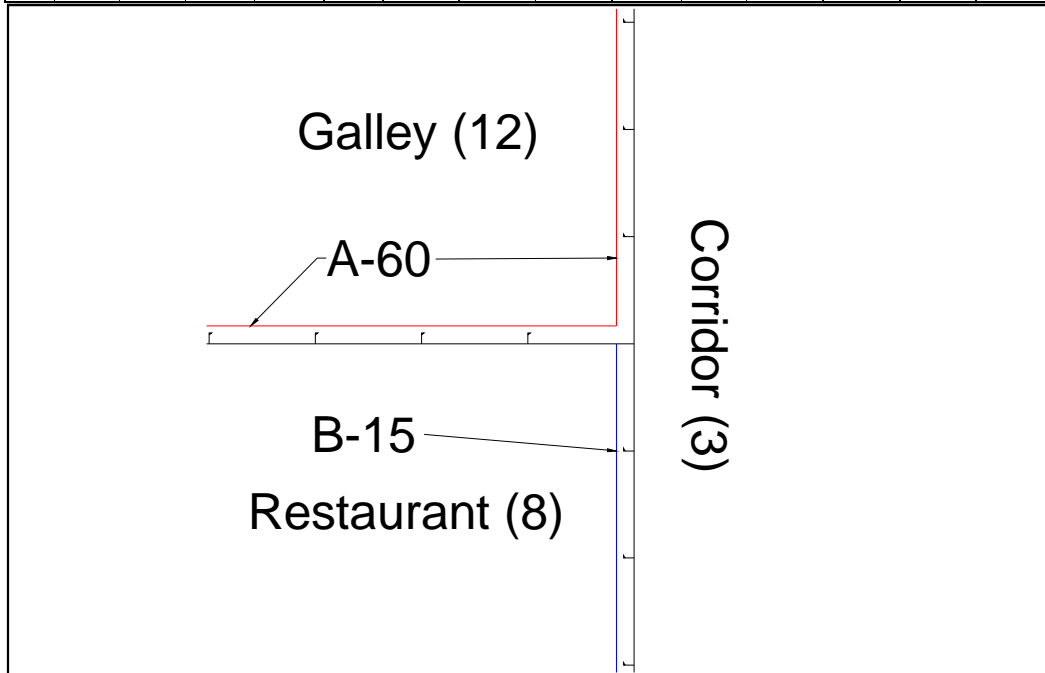
Taulukko 3. Tilat erottavan laipion luokka (Solas consolidated edition 2001, 208).

1.	Control station
2.	Stairways
3.	Corridors
4.	Evacuation stations and external escape routes
5.	Open deck spaces
6.	Accommodation spaces of minor fire risk
7.	Accommodation spaces of moderate fire risk
8.	Accommodation spaces of greater fire risk
9.	Sanitary and similar spaces
10.	Tanks, voids and auxiliary machinery spaces having little or no fire risk
11.	Auxiliary machinery spaces, cargo spaces, cargo and other oil tanks and other similar spaces of moderate fire risk
12.	Machinery spaces and main galleys
13.	Store-rooms, workshops, pantries, etc.
14.	Other spaces in which flammable liquids are stowed

(jatkuu)

Taulukko 3. Tilat erottavan laipion luokka (jatkuu)

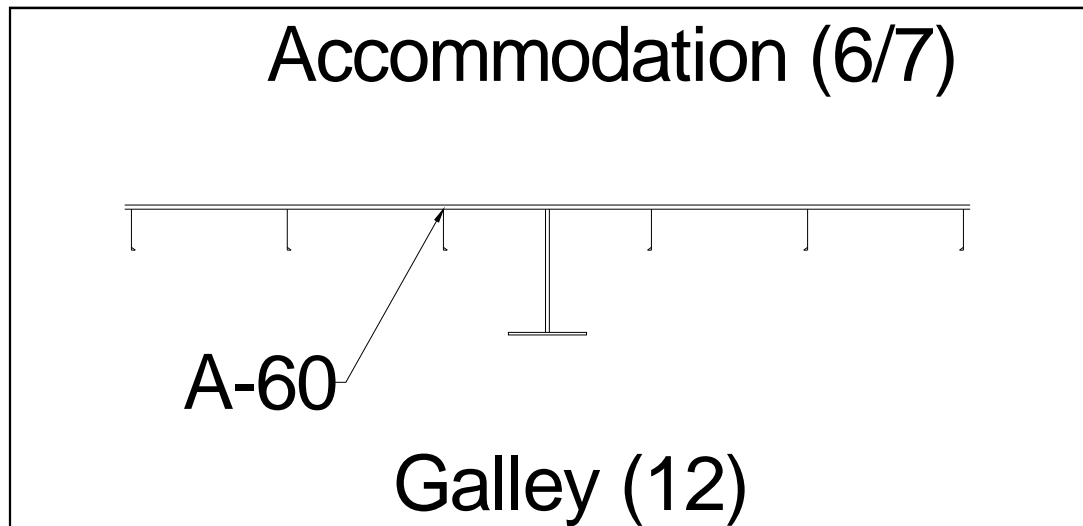
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	B-0 ^a	A-0	A-0	A-0	A-0	A-60	A-60	A-60	A-0	A-0	A-60	A-60	A-60	A-60
2		A-0 ^a	A-0	A-0	A-0	A-0	A-15	A-15	A-0 ^c	A-0	A-15	A-30	A-15	A-30
3			B-15	A-60	A-0	B-15	B-15	B-15	B-15	A-0	A-15	A-30	A-0	A-30
4					A-0	A-60 ^d	A-60 ^d	A-60 ^d	A-0 ^d	A-0	A-60 ^b	A-60 ^b	A-60 ^b	A-60 ^b
5					-	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
6						B-0	B-0	B-0	C	A-0	A-0	A-30	A-0	A-30
7							B-0	B-0	C	A-0	A-15	A-60	A-15	A-60
8								B-0	C	A-0	A-30	A-60	A-15	A-60
9									C	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
10										A-0 ^a	A-0	A-0	A-0	A-0
11											A-0 ^a	A-0	A-0	A-15
12												A-0 ^a	A-0	A-60
13													A-0 ^a	A-0
14														A-30



Kuva 2. Laipion paloeristeet.

Taulukko 4. Tilat erottavan kannen luokka (Solas consolidated edition 2001, 209).

Above → Below ↓	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	A-30	A-30	A-15	A-0	A-0	A-0	A-15	A-30	A-0	A-0	A-0	A-60	A-0	A-60
2	A-0	A-0	-	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-30	A-0	A-30
3	A-15	A-0	A-0 ^a	A-60	A-0	A-0	A-15	A-15	A-0	A-0	A-0	A-30	A-0	A-30
4	A-0	A-0	A-0	A-0	-	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
5	A-0	A-0	A-0	A-0	-	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
6	A-60	A-15	A-0	A-60	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
7	A-60	A-15	A-15	A-60	A-0	A-0	A-15	A-15	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
8	A-60	A-15	A-15	A-60	A-0	A-15	A-15	A-30	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
9	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
10	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0 ^a	A-0	A-0	A-0	A-0
11	A-60	A-60	A-60	A-60	A-0	A-0	A-15	A-30	A-0	A-0	A-0 ^a	A-0	A-0	A-30
12	A-60	A-60	A-60	A-60	A-0	A-60	A-60	A-60	A-0	A-0	A-30	A-30 ^a	A-0	A-60
13	A-60	A-30	A-15	A-60	A-0	A-15	A-30	A-30	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0
14	A-60	A-60	A-60	A-60	A-0	A-30	A-60	A-60	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0	A-0

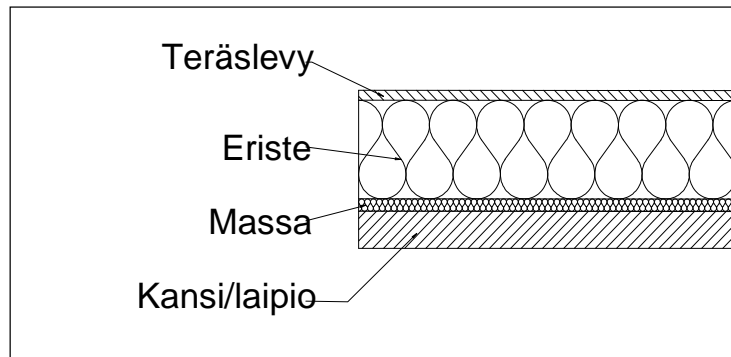


Kuva 3. Kannen paloluokan määrittäminen.

2.2.3 Äänieristeet

Äänieristeen tarkoituksena on estää melun leviäminen muihin tiloihin. Yleisesti ottaen laivassa äänieristetään konekuilut ja -huoneet, ilmastointitilat, ravintolat, teatterit ja vastaavat tilat.

Ääntä voidaan eristää kolmella tapaa: hajottamalla ääniaallot pintamateriaalien muodoilla, tuottamalla vastaääntä joka kumooa metelin tai estämällä ääniaaltojen eteneminen oikeanlaisella materiaalilla. Ääni pääsee liikkumaan hyvin laivan kovissa rakenteissa. Tätä estetään asettamalla rakenteen pintaan materiaaleja, joilla on eri tiheys, kuten massoja, villaa, lyijyä ja niin edelleen (kuva 4).



Kuva 4. Esimerkki äänieristyksestä.

3 Laivojen analysointi

3.1 Eristeiden mittaaminen

Eristeiden käyttämät pinta-alat mitattiin laivojen eristekaavioista AutoCAD-ohjelman avulla. Laipioiden eristeiden pinta-alat saatiin mittaamalla eristettävän alueen pituus ja kertomalla se kansivälin korkeudella. Korkeussuunnassa painopisteen oletettiin sijaitsevan kansivälin puolessavälissä. Pituussuuntainen painopiste saatiin laskemalla geometrinen painopiste momenttilauseella:

$$cg = \frac{\sum l_i \cdot d_i}{\sum l_i} \quad (3.1)$$

Jossa l_i on viivan pituus ja d_i on viivan keskipisteen etäisyys referenssistä esimerkiksi pituussuunnassa kaaresta 0, tai tekemällä pituudesta kapea alue (AutoCAD:ssä region) ja tarkistamalla ohjelmasta sen painopiste. Jälkimmäinen osoittautui erittäin hyödylliseksi erityisesti kaarevissa sekä monikulmaisissa alueissa. Kansien eristeet laskettiin mittaamalla eristetyn alueen pinta-ala ja painopisteeksi oletettiin kannen alapinta. Pituussuuntainen painopiste saatiin ottamalla alueen geometrinen painopiste.

Kun pinta-alat ovat tiedossa, pystytään eristeiden painot laskemaan kun tiedetään eristeiden tiheys sekä paksuus. Esimerkiksi erään kivivillaeristeen tiheys on 100 kg/m^3 ja sitä käytetään 40 mm paksuudella. Tästä saadaan laskettua:

$$100 \text{ kg/m}^3 \cdot 40 \text{ mm} = 4 \text{ kg/m}^2$$

Taulukossa 5 on eritelty yhden tutkimuslaivan eristeet, sekä niiden painopisteet. Taulukko on jaettu eristeiden käyttötarkoituksen mukaan, esimerkiksi A-60 paloeriste, siten että ensin on kerrottu eristeen määrä, tämän jälkeen pituussuuntainen painopiste ja lopuksi korkeussuuntainen painopiste. Ship-sarakkeessa on kokolaiva kun taas Hull- sarakkeessa laipiokannen alapuoliset eristeet ja Superstructure- sarakkeessa laipiokannesta ylöspäin. Sound on äänieristeet, thermal ja cold surface ovat lämpöeristeitä, cold surface:n erona on painavampi eristemateriaali verrattuna tavalliseen lämpöeristeeseen.

Taulukko 5. Esimerkki laivan eristeiden pinta-aloista ja painopisteistä.

	Ship	Hull	Superstructure
A60	9221,27 m ²	5160,59 m ²	4060,67 m ²
X	91,35 m	70,59 m	116,31 m
Z	16,44 m	10,98 m	23,12 m
A30	895,18 m ²	527,63 m ²	367,56 m ²
X	111,15 m	98,87 m	128,76 m
Z	15,55 m	10,96 m	22,14 m
A15	1392,96 m ²	10,58 m ²	1382,38 m ²
X	127,65 m	122,42 m	127,69 m
Z	28,47 m	14,51 m	28,58 m
SOUND	132,49 m ²	84,45 m ²	48,04 m ²
X	72,23 m	37,64 m	133,04 m
Z	14,85 m	7,65 m	27,50 m
THERMAL	3559,60 m ²	1421,99 m ²	2137,61 m ²
X	91,79 m	53,32 m	117,38 m
Z	16,18 m	8,67 m	21,17 m
Cold Surface	844,04 m ²		844,04 m ²
X	122,09 m		122,09 m
Z	30,54 m		30,54 m
Total	16045,54 m ²	7205,24 m ²	8840,30 m ²
X	97,16 m	68,94 m	119,51 m
Z	18,11 m	10,49 m	24,20 m

3.2 Kertoimien tutkiminen

Työkalua varten, laivoja analysoimalla, tavoitteena oli saada kehitettyä kertoimia, joiden avulla pystytään arvioimaan mahdollisimman tarkasti eristeiden määrä ja painopiste. Suurimmaksi sallituksi virheeksi asetettiin ± 20 %. Menetelmän piti olla myös mahdollisimman yksinkertainen lisälaivojen analysointia varten.

3.2.1 Kertoimet laivan päämittojen suhteen

Kun laivoista oli mitattu eristeet, etsittiin sopivia kertoimia, joiden avulla pystytään arvioimaan eristeiden määrät sekä painopisteet. Lähtökohdaksi valittiin, että kertoimien täytyy olla yleisesti tiedossa olevia arvoja, kuten perpendikkelipituus L_{pp} , leveys B . Näiden lisäksi valittiin myös laivan ylimmäisen

kannen korkeus H sekä uppouman täyteläisyys C_b . Näistä tehtiin alla listatut kertoimet:

- L_{pp}
- B
- $L_{pp}B$
- L/B
- H
- $L_{pp}BH$
- $L_{pp}/(BH)$
- $L_{pp}BHC_b$

Taulukon 6 tarkkuutta vääristää kuitenkin se, että kyseistä laivaa on käytetty myös analysoinnissa. Vertaamalla tutkittujen alusten kertoimia keskenään huomattiin niissä olevan suuria eroja toisiinsa nähden (taulukko 6). Suuret eroavaisuudet johtuivat laivojen eroista, kuten autokansien määrästä ja kansirakenteiden eroavaisuuksista.

Taulukko 6. Kertoimien tarkkuus koelaivaan $\left(\frac{\text{kertoimien keskiarvo}}{\text{koelaivan kerroin}} \cdot 100\% \right)$.

Coefficient		A60	A30/15	Sound	Thermal	Cold
L_{pp}	Area	80 %	106 %	42 %	91 %	127 %
	XCG	105 %	79 %	95 %	101 %	94 %
	ZCG	109 %	100 %	115 %	107 %	109 %
B	Area	77 %	102 %	39 %	86 %	122 %
	XCG	105 %	79 %	94 %	100 %	94 %
	ZCG	108 %	99 %	113 %	105 %	108 %
L_{pp}B	Area	82 %	108 %	44 %	93 %	129 %
	XCG	105 %	79 %	96 %	101 %	93 %
	ZCG	109 %	100 %	115 %	108 %	109 %
L_{pp}/B	Area	79 %	104 %	41 %	88 %	125 %
	XCG	105 %	79 %	95 %	101 %	94 %
	ZCG	108 %	100 %	114 %	106 %	109 %
H	Area	78 %	103 %	40 %	88 %	124 %
	XCG	107 %	80 %	96 %	102 %	96 %
	ZCG	110 %	101 %	115 %	107 %	110 %
L_{pp}BH	Area	62 %	88 %	42 %	83 %	108 %
	XCG	59 %	44 %	57 %	60 %	52 %
	ZCG	68 %	59 %	75 %	70 %	64 %
L_{pp}/(BH)	Area	75 %	100 %	38 %	85 %	120 %
	XCG	103 %	77 %	93 %	99 %	92 %
	ZCG	106 %	98 %	111 %	104 %	107 %
L_{pp}BHC_b	Area	110 %	143 %	81 %	139 %	166 %
	XCG	103 %	81 %	101 %	105 %	92 %
	ZCG	115 %	102 %	125 %	118 %	110 %

Tämän jälkeen selvitettiin kertoimet erikseen laivan rungolle ja kansirakenteille (taulukko 7, 8). Kansirakenteiden erilaisuuksien takia mukaan otettiin myös muotokerroin St_{shape} , joka ilmaisee, kuinka suuren osan pituudesta kansirakenteet vievät. Lisäksi korkeus H hajotettiin kahteen osaan. Rungon korkeus perusviivasta laipiokanteen H_{hull} ja laipiokannesta ylimpään ulkokanteen H_{st} .

Taulukko 7. Kertoimien tarkkuus koelaivan kansirakenteisiin.

Coefficient		A60	A30/15	Sound	Thermal	Cold
Lpp	Area	118 %	114 %	58 %	78 %	139 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	97 %	99 %	100 %	113 %	104 %
LppStshape	Area	89 %	90 %	55 %	71 %	111 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	57 %	55 %	56 %	68 %	59 %
B	Area	115 %	110 %	54 %	74 %	135 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	97 %	99 %	100 %	112 %	103 %
BStshape	Area	88 %	88 %	51 %	67 %	109 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	58 %	57 %	57 %	69 %	61 %
LppB	Area	120 %	116 %	60 %	81 %	141 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	98 %	99 %	100 %	113 %	104 %
LppBStshap	Area	89 %	90 %	56 %	72 %	111 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	56 %	54 %	55 %	67 %	59 %
H	Area	115 %	111 %	58 %	78 %	136 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	91 %	92 %	93 %	107 %	97 %
HstStshape	Area	83 %	85 %	54 %	69 %	105 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	51 %	49 %	50 %	61 %	53 %
LppBHst	Area	120 %	118 %	66 %	87 %	143 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	91 %	91 %	92 %	106 %	96 %
LppBHstSts	Area	83 %	86 %	60 %	75 %	105 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	48 %	46 %	46 %	58 %	50 %
Lpp/(BHst)	Area	112 %	107 %	54 %	73 %	132 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	91 %	92 %	93 %	106 %	97 %
LppStshape/	Area	58 %	61 %	43 %	54 %	77 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	31 %	30 %	30 %	39 %	33 %
LppBHstCb	Area	122 %	120 %	69 %	90 %	145 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	91 %	90 %	91 %	106 %	96 %
LppBHstCbS	Area	145 %	138 %	71 %	95 %	165 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	132 %	136 %	137 %	149 %	141 %

Taulukko 8. Kertoimien tarkkuus koelaivan runkoon.

Coefficient		A60	A30/15	Sound	Thermal	Cold
Lpp	Area	46 %	80 %	25 %	68 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	87 %	77 %	79 %	49 %	0 %
B	Area	44 %	76 %	23 %	64 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	85 %	75 %	77 %	47 %	0 %
LppB	Area	47 %	82 %	25 %	70 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	87 %	77 %	80 %	49 %	0 %
Lpp/B	Area	45 %	78 %	24 %	66 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	86 %	76 %	78 %	48 %	0 %
Hhull	Area	44 %	78 %	24 %	67 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	82 %	72 %	75 %	46 %	0 %
LppBHhull	Area	48 %	84 %	28 %	73 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	82 %	73 %	77 %	48 %	0 %
Lpp/(BHhull)	Area	42 %	73 %	21 %	61 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	88 %	77 %	78 %	47 %	0 %
LppBHhullCb	Area	49 %	86 %	29 %	75 %	0 %
	XCG	0 %	0 %	0 %	0 %	0 %
	ZCG	82 %	74 %	78 %	48 %	0 %

Vaikka tarkkuus parani hiukan kansirakenteiden kohdalla, heikkeni se huomattavasti rungon kohdalla. Sama ilmiö oli nähtävissä myös muiden laivojen kohdalla.

3.2.2 Kertoimet pinta-alojen suhteen

Koska eristeiden paloluokat perustuvat tilojen käyttötarkoitukseen eikä laivan perusmitoilla päästy riittävään tarkkuuteen, tutkittiin kertoimien hakemista tilan käyttötarkoituksen perusteella. Laivat jaettiin kahdeksaan eri käyttötarkoitukseenluokkaan:

- Majoitus
- Julkiset tilat
- Tekniset palvelut
- Miehistön yleiset tilat
- Tarjoilu- ja hotellipalvelut

- Tekniset- ja konetilat
- Ulkokannet
- Tehtävään perustuvat tilat (autokannet yms.)

Varsin nopeasti selvisi, että tämä menetelmä on liian vaivalloinen tavoitteisiin pääsemiseksi. Jos tällä tapaa lähtee analysoimaan, voi melkein samalla vaivalla tutkia laivan tarkemmin ja saada tarkemmat tulokset, sillä kertoimien avulla ei päästy juuri laivan perusmittoihin perustuvaa laskentaa parempaan tarkkuuteen.

3.3 Referenssilaiva

Koska kumpikaan menetelmistä ei osoittautunut suoraan tarpeeksi luotettavaksi, otettiin käyttöön referenssilaivat, joiden avulla korjataan päämittakertoimilla saadut tulokset vastaamaan haluttua laivaa. Toimiakseen tämä menetelmä vaatii sen, että valittu referenssilaiva on mahdollisimman samankaltainen kuin tutkittava kohde. Samankaltaisuudet riippuvat siitä minkälainen alus on kyseessä. Risteilyaluksissa tämä tarkoittaa samankaltaista jakaumaa sisustuspinta-alan käyttötarkoituksista, matkustaja-autolautoissa sekä sisustuspinta-alan käyttötarkoitus, sekä autokansien määrä sekä pituus suhteessa runkoon. Rahtialuksilla lastien pitäisi olla samankaltaisia sekä kansimökin pinta-alan käytön vastata toisiaan.

Tällä tavalla päästään eroon kansimökin muodon vaikutuksesta ja tilojen käyttötarkoituksen aiheuttamasta varianssistakin ja pystytään poistamaan laivan jako kahteen osaan laskennassa.

4 Painon vaikutus laivaan

4.1 Painon merkitys suunnittelussa

Telakan ja varustamon välisessä sopimuksessa on sovittu sopimussakot jos laiva ei täytä sovittuja arvoja. Sakkopykälät yleensä koskevat laivan kuollutta painoa, nopeutta ja polttoaineen kulutusta. Erityisesti tämä vaikuttaa sellaisiin laivoihin, kuten risteilijöihin ja matkustaja-autolaittoihin, joilla on pieni kuollut paino suhteessa laivan painoon.

Sopimussakkoon on määritelty tietty sakoton alue 1-8 % kuolleesta painosta, jonka jälkeen telakka joutuu maksamaan sakkoa ns. hylkäysrajaan saakka, joka on 3-15 %. Hylkäysrajan ylitys tarkoittaa, että varustamolla on oikeus jättää laiva telakalle. Tästä syystä painon arviointi ja tarkkailu on tärkeää telakoille ja suunnittelutoimistoille (Maasalo 2000, 1).

4.2 Painon vaikutus laivan talouteen

Painolla on erittäin suuri vaikutus laivan taloudelliseen suorituskykyyn. Se vaikuttaa suoraan kuolleen painon määrään sekä uppoumaan. Kuollut paino vaikuttaa suoraan laivan tuottavuuteen kuten matkustajien ja lastin määrään. Uppouma taas vaikuttaa laivan nopeuteen ja polttoaineen kulutukseen.

Oikeanlaisella lämpöeristyksellä on suora vaikutus ilmastointikoneiden tehontarpeeseen, tämä taas vaikuttaa polttoainetalouteen sekä koneiden hintaan.

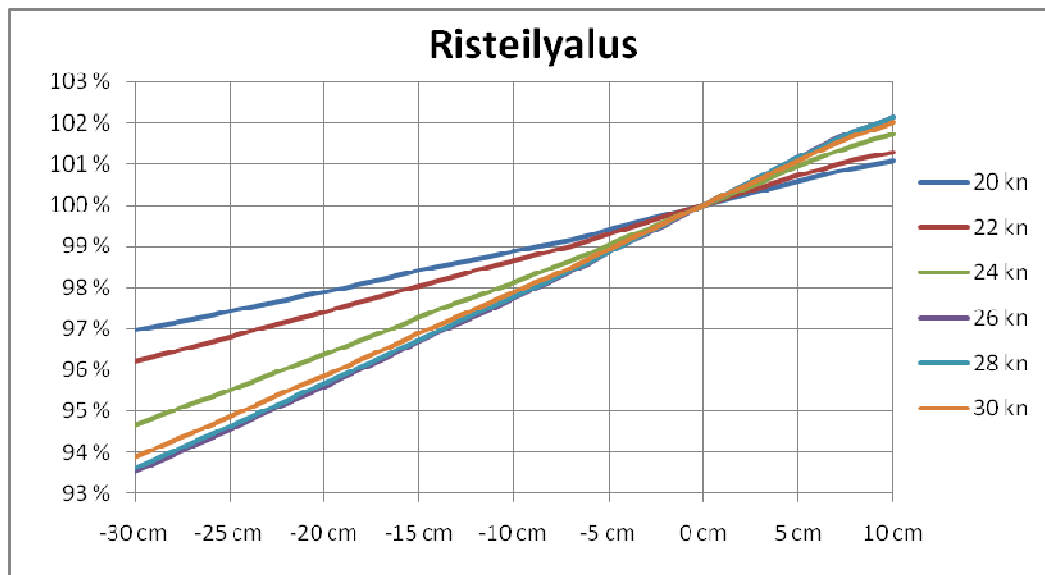
4.2.1 Kuollut paino

Kaikkein selkein vaikutus kohdistuu kuolleeseen painoon. Erityisesti matkustajalaivoissa jo pieni painonpudotus aiheuttaa prosentuaalisesti suuren kasvun kuolleen painon määrään.

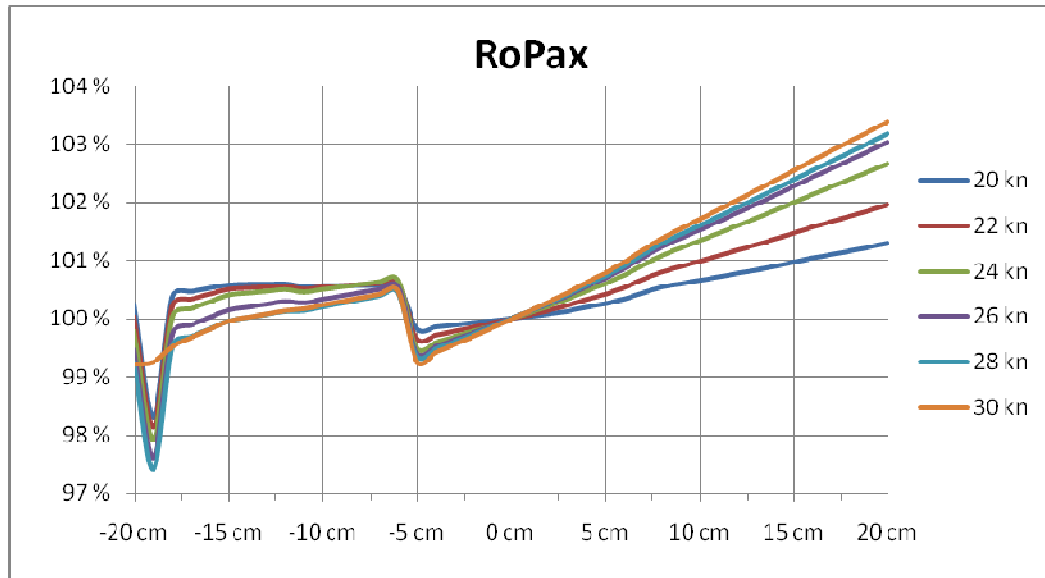
Risteilijöissä kuolleen painon suhde uppoumaan on likimain 0,2, autolautoissa 0,18-0,19 ja matkustaja-autolautoissa 0,3. Tämän takia risteilijöitä, autolauttoja ja matkustaja-autolauttoja suunniteltaessa painonlaskenta ja -seuranta on erittäin tärkeää (Maasalo 2001, 1).

4.2.2 Tehon tarve

Tehon tarvetta tutkittiin NAPA-suunnitteluohjelman SH-moduulissa (Ships Hydrodynamics), SSPP -menetelmällä (Standard Speed – Power Prediction). Tutkimus toteutettiin kahdella erilaisella laivalla, joista toinen oli iso risteilyalus ja toinen keskikokoinen matkustaja-autolautta, katsomalla 1 cm syvyyden muutoksen vaikutus tehon tarpeeseen 10–30 kn nopeuksilla (Kuvaaja 1, 2). Näistä tuloksista otettiin erikseen suunnittelusyvyydestä syvyyden pienenemisen ja kasvamisen aiheuttama tehon tarpeen keskiarvo. Koska vain kahta laivaa tutkittiin, on otos tieteellisesti liian pieni, mutta tämän tutkimuksen tarkoitus oli ainoastaan antaa suuntaa.



Kuvaaja 1. Risteilijän tehon tarpeen muutos syvyyksen muutoksen funktiona.



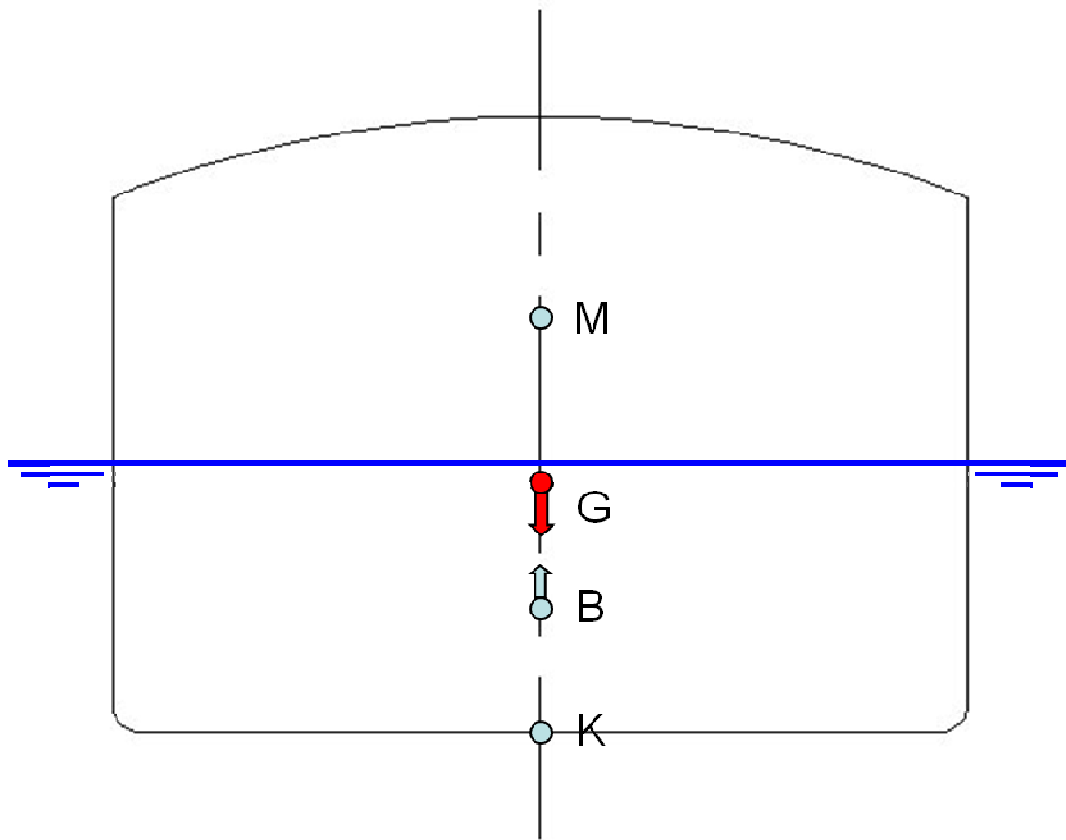
Kuvaaja 2. RoPax:n tehon tarpeen muutos syväyksen muutoksen funktiona.

4.3 Painon vaikutus laivan vakavuuteen

Painon voidaan sanoa olevan laivan tärkein suure, sillä kelluvana kappaleena siihen vaikuttaa suoraan Arkhimedeen laki. Laivan vakavuuden voidaan yksinkertaistetusti sanoa olevan riippuvainen kahdesta suureesta, rungon muodosta ja laivan kokonaispainosta. Todellisuudessa vakavuuteen vaikuttaa paljon muitakin suureita, mutta ne ovat edellä mainittujen johdannaisia kuten painopiste, uppoumanpainopiste, rungontäyteläisyyskertoimet ja niin edelleen.

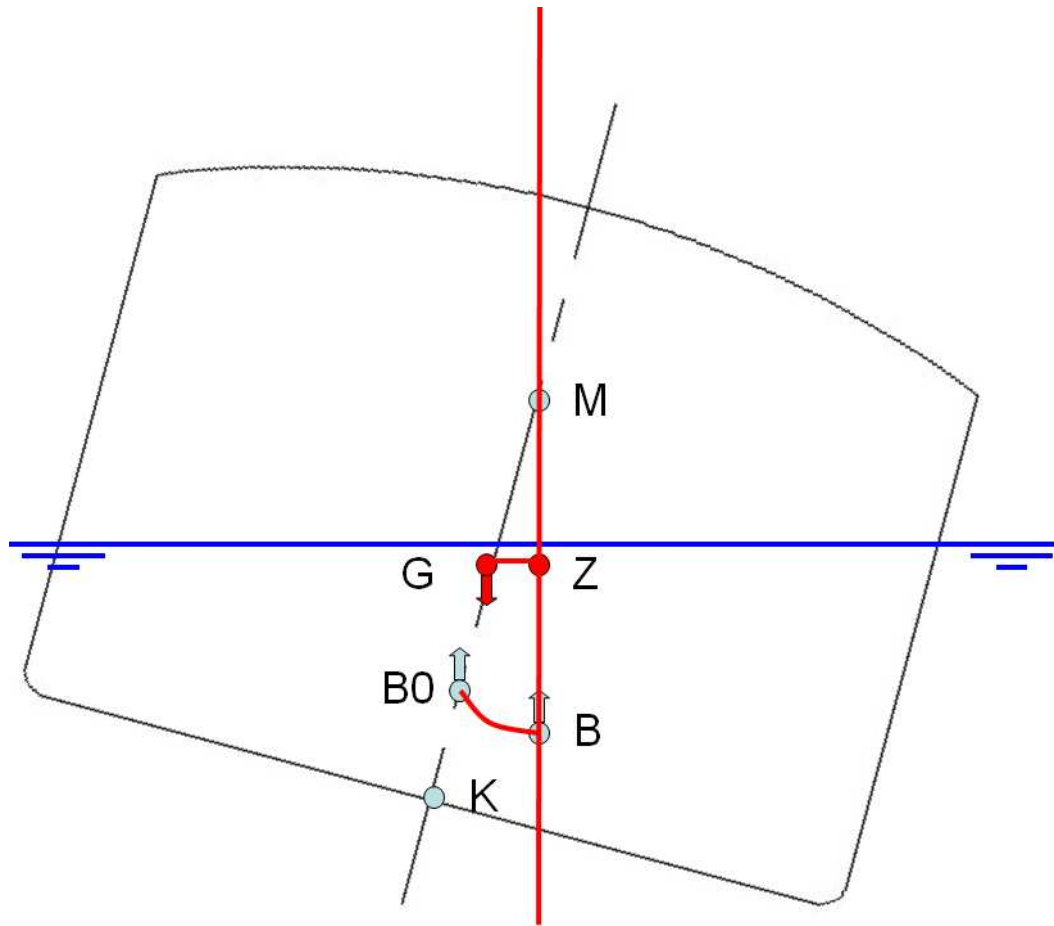
Laivan painopiste on vakavuuden kannalta tärkein asia. Mitä alempana painopiste on, sitä vakaampi laiva. Tietenkin liian alhaalla oleva painopiste tekee laivasta ylivakaan ja sen seurauksena laivan liikkeet ovat nopeampia, tehden sen epämukavaksi niin matkustajille kuin miehistölle ja mahdollisesti lastille.

Laivan vakavuutta lasketaan neljän pisteen avulla (kuva 5). K eli köli, tämä tarkoittaa laivan alinta pistettä. B eli uppouman tilavuuden painopiste, eli pistettä missä veden nostevoiman resultantti sijaitsee. G eli laivan massan painopiste ja M eli metasentri, piste minkä ympäri laiva kääntyy. Ainoa paikallaan pysyvä suure näistä on painopiste ja sekin ainoastaan kevyen laivan kohdalla.

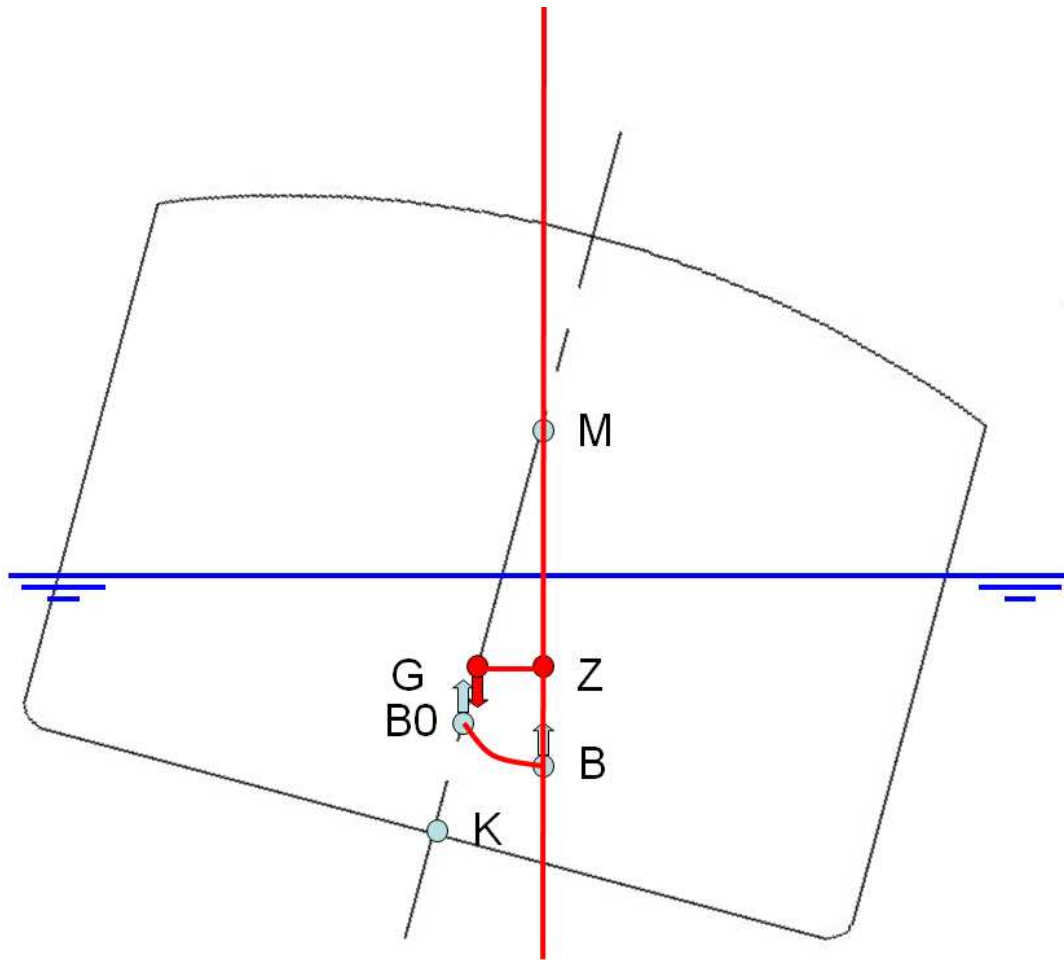


Kuva 5. Laivan vakavuuden suuret.

Laivan kallistuessa uppouman painopiste siirtyy samalla kallistuman suuntaan. Uppouman ja metasentrin välille voidaan piirtää suoraviiva, eli BM. BM:n etäisyys painopisteen korkeudessa määrittää laivan suoristavan momenttivarren GZ (kuva 6). Painopisteen ollessa lähempänä uppoumaa myös oikaiseva momentti kasvaa (Kuva 7).



Kuva 6. GZ-varsi.



Kuva 7. GZ-varsi kun painopiste on alempana.

Jos metasentri on alempana kuin laivan painopiste, tulee laivasta silloin labiili ja pieninkin voima kallistaa laivaa kunnes metasentri on nousut painopisteen yläpuolelle.

4.4 Painon vaikutus rakenteisiin

Säästettyä painoa voidaan siirtää suoraan laivan rakenteisiin korvaamalla kalliimpaa alumiinirakennetta teräsrakenteella. Alumiinirakenne painaa noin 60 % teräsrakenteesta, mutta maksaa helposti 4-5 kertaa enemmän. Hintaa kasvattavat niin alumiinin ja sen työstämisenkin kalliimpi hinta.

Säästettyä painoa voidaan myös käyttää lisäämällä rakenteita, jolloin saadaan laivaan lisää tuottavaa tilaa kuten hyttejä, ravintoloita, muita julkisia tiloja tai rahtitilaa.

5 Työkalu ja laskumenetelmät

5.1 Käyttötarkoitus

Tutkimuksen ohella oli tarkoitus luoda työkalu nopeaan ja kohtuullisen tarkkaan arviointiin eristeiden määrästä sekä pystyä vertailemaan erilaisten eristeiden vaikutuksia (kuva 8). Työkalua pitää pystyä myös soveltamaan tulevaisuudessa uusiin eristeisiin kuin laivoihinkin.

Työkalun on myös tarkoitus tuottaa valmis raportti, jota voidaan käyttää eristeiden markkinointiin tai laivan suunnitteluun oikeanlaisten eristeiden valintaan konsepti- tai perussuunnitteluvaiheessa.

The screenshot shows the 'insulation tool.xls' spreadsheet in Microsoft Excel. The interface includes the ribbon (Home, Insert, Page Layout, Formulas, Data, Review, View, Developer) and the spreadsheet grid. The data is organized into several sections:

- Project Information:** Project nro: 1234, Date: 30.09.2010, User: ANP, Currency: €, Ship: Matkustaja-autolaukka, Reference ship: Ropax 2800.
- Input vs. Estimates vs. Reference:** A table comparing input values (e.g., Length: 195.0 m, Displacement: 23870 m³) with estimates and reference values.
- NEW DATA FOR INSULATION:** A table showing area and center of gravity for different insulation types (A-60, A-30/15, Sound, Thermal, Cold, Total).
- Center of gravity and Weight Comparison:** A table comparing 'Ultimate' and 'Compared against' values for center of gravity and weight.
- NEW DATA FOR SHIP:** A table showing center of gravity and draught differences.
- Required power compared to original:** A green cell showing 99.8%.
- Compared against:** A table comparing 'Ultimate' and 'Compared against' values for weight and insulation types (A-60, A-30/15, Sound, Thermal, Cold).

Kuva 8. Käyttöliittymä.

5.2 Työkalun toiminta

Koska työkalu oli suunniteltu käytettäväksi myös henkilöille, joilla ei välttämättä ole tietoa laivojen suunnittelusta eikä ymmärrystä laivan kelluvuuteen ja vakavuuteen vaikuttavista voimista, käyttöliittymä ja tuloksien ulossaanti piti suunnitella mahdollisimman helpoksi.

Yksinkertaisimmillaan tämä tarkoittaa pelkästään referenssilaivan valitsemista (kuva 9). Pelkän referenssilaivan valitsemisella laskenta perustuu silloin referenssin dimensioihin. Referenssilaivan valinta tuo automaattisesti laivan tiedot käyttöön laskentaa varten (kuva 10).

Project nro:	1234	Date:	26.10.2009
User:	ANP	Currency:	€
Ship:	Matkustaja-autolautta	Reference ship:	Ropax 2800

Kuva 9. Projektin tiedot.

	Input:	Estimates:	Reference:
Length		195,0 m	195,0 m
Beam		29,0 m	29,0 m
Draught		6,3 m	6,3 m
Height		35,9 m	35,9 m
Block coefficient		0,67	0,67
Displacement		23870 m ³	23750 m ³
Superstructure		Full length	Full length
Water plane		0,8	0,8
Center of gravity		15,45 m	15,45 m
Water density		1,025 ton/m ³	1,025 ton/m ³
Service speed	24 kn		

Kuva 10. Projektilaivan tiedot.

Tietojen muuttaminen tapahtuu kirjoittamalla uudet tiedot **Input**-sarakkeisiin, jolloin työkalu hylkää referenssilaitan tiedot ja laskee täyteläisyyskertoimen, laitvan uppouman sekä painopisteen uudelleen.

Täyteläisyyskertoimen laskeminen (Karikoski 2000, 5):

$$C_b = \frac{\nabla}{L_{pp}BT} \quad (5.1)$$

Samasta yhtälöstä saadaan laskettua myös uppouma:

$$\nabla = C_b L_{pp} BT \quad (5.2)$$

Jos laitvan painopistettä ei ole määritelty mutta laitvan korkeutta muutetaan, uudeksi painopisteeksi arvioidaan 40 % laitvan korkeudesta. Tämä luku saatiin tutkimalla laivojen painopisteitä ja se on erittäin karkea arvio.

Eristeiden valinta tapahtuu valmiiksi määritellyistä eristepareista, eristettyjen laipoiden suhde kansiin. Tämä valinta tehdään A-60, A-30/15, ääni-, lämpö- sekä kylmäeristeille (kuva 11).

	Ultimate	Weight
A-60	Ultimate (50/50) Bulkhead 66kg/m ³ 70mm, Deck 36kg/m ³ 60mm	3,39 kg/m ²
A-30/15	Ultimate Bulkhead (70/30) 36kg/m ³ 60mm, Deck 36kg/m ³ 50mm	1,87 kg/m ²
Sound	Ultimate sound insulation 6.6kg/m ²	6,6 kg/m ²
Thermal	Ultimate Thermal insulation 1,6kg/m ²	1,6 kg/m ²
Cold	Ultimate cold surface insulation 1,6kg/m ²	1,6 kg/m ²
	Compared against	Weight
A-60	Stonewool (50/50) Bulkhead 100kg/m ³ 80mm, Deck 100kg/m ³ 40mm	6,0 kg/m ²
A-30/15	Stone Wool Bulkhead (70/30) 100kg/m ³ 40mm, Deck 80kg/m ³ 30mm	3,52 kg/m ²
Sound	Stone wool sound insulation 8kg/m ²	8,0 kg/m ²
Thermal	Stone wool thermal insulation (30/70)	3,72 kg/m ²
Cold	Stone wool cold surface insulation 2,625kg/m ²	2,63 kg/m ²

Kuva 11. Eristeiden valinta.

Paino ja sen vaikutus laivaan lasketaan kertomalla arvioidut pinta-alat eristeiden neliöpainoilla (kuva 12). Arvioitua painoa kasvatetaan 10 %. Tämä lisäpaino tulee jäykkääjiä kiertävistä eristeistä.

NEW DATA FOR INSULATION		
	Area	Center of gravity
A-60	36179 m ²	19,0 m
A-30/15	11044 m ²	22,0 m
Sound	2925 m ²	21,0 m
Thermal	34221 m ²	24,0 m
Cold	4131 m ²	27,0 m
Total	88500 m ²	
	Center of gravity	Weight
Ultimate	20,91 m	246 ton
Compared against	21,12 m	459 ton
Difference in insulation	-0,22 m	-213 ton

Kuva 12. Laskennan tulokset.

Näistä tuloksista pystytään laskemaan laivan uusi syväys sekä painopiste. Syväyksen muutos saadaan laskettua syväyksen tilavuuden muutoksesta.

$$\Delta T = \frac{\Delta m}{\rho C_{wp} L_{pp} B} \quad (5.3)$$

Uusi syväys saadaan vähentämällä syväyden muutos alkuperäisestä syväydestä.

$$T_{uusi} = T_{vanha} - \Delta T \quad (5.4)$$

Tämä laskenta vaatii, että oletetaan laivan kylkien olevan tasasivuiset. Virhe on kuitenkin riittävän pieni, jotta tulosta voidaan pitää riittävän tarkkana.

Uusi painopiste lasketaan momenttilauseella (kuva 13).

$$CG = \frac{\sum m_i d_i}{\sum m_i} \quad (5.5)$$

	NEW DATA FOR SHIP
Center of gravity	15,40 m
New draught	6,25 m
Difference in draught	-0,05 m
Required power compared to original	99,6 %

Kuva 13. Tulokset projektilaivaan.

5.3 Raportti

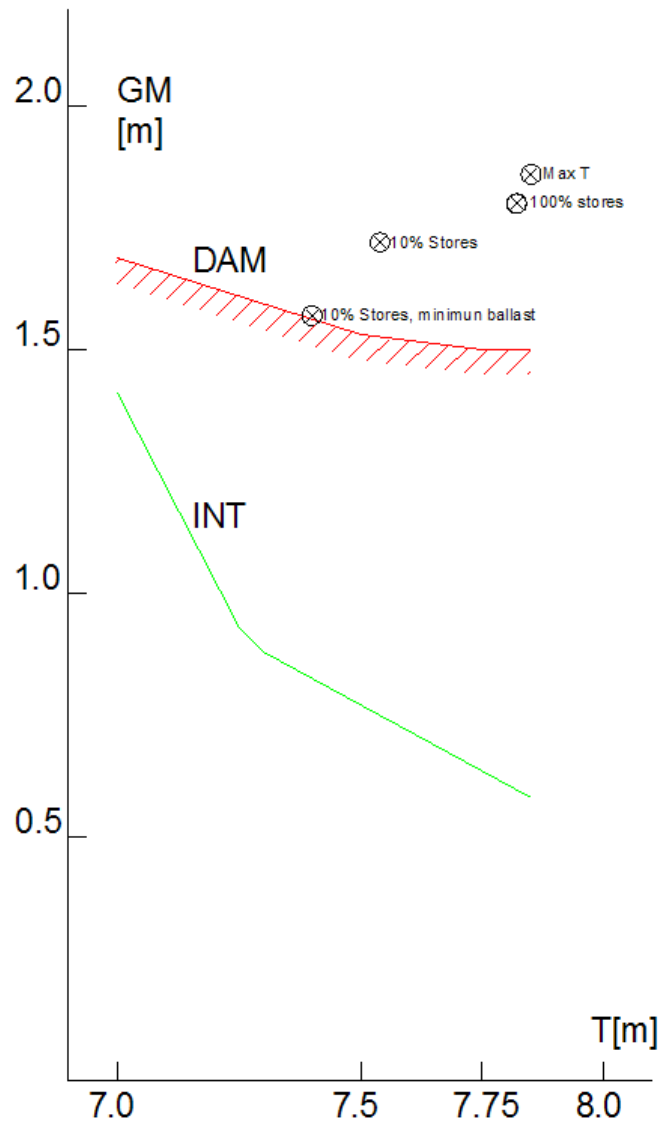
Työkalu luo automaattisesti raportin, jossa näkyy valittujen eristeiden vertailu. Raportti on jaettu viiteen osaan: painon säästö, vakavuus, polttoainetalous, rakennekustannukset sekä mahdolliset lisärakenteet. Painon säästö pitää sisällään samat tiedot kuin jotka on näytetty käyttöliittymän kohdalla.

5.3.1 Vakavuus

Vakavuusvaatimukset vaihtelivat ennen eri maissa ja luokituslaitoksissa. Nykyään IMO:n (international maritime organisation) vaatimukset ovat yleisesti hyväksytty käytäntö ja ne olisi tarkoitus ottaa maailmanlaajuisesti standardiksi. Matkustaja-aluksien GM-arvot ovat tyypillisesti 1,5-2,5 *m*. Marginaali on yleensä suunnittelun alkuvaiheessa 15 % vaadituista arvoista.

Syväyksen ja uuden painopisteen lisäksi raportissa lasketaan myös miten laivan painopiste muuttuu, jos säästetty paino sijoitetaan lisäpainona tai painolastina siten, että lisäpainon painopiste sijaitsee 30 *cm* korkeudessa. Tällä tavoin saadaan laivan painopistettä alennettua muiden vakavuuteen vaikuttavien arvojen pysyessä alkuperäisinä. Tämän ansiosta marginaalia saadaan kasvatettua.

Kuvassa 14 on näytetty esimerkki laivan GM-käyrästä. Koska vaurioituneen laivan vakavuus heikkenee, kaikissa lastitilanteissa metasentrisen korkeuden täytyy olla joko vauriovakavuusrajakäyrällä tai sen yläpuolella.



Kuva 14. GM-rajakäyrät.

5.3.2 Polttoainetalous

Edellisessä kappaleessa tehontarpeen tutkimuksesta saatuja lukuja käytettiin arvioitaessa laivan tehon tarvetta. Käyttäjän täytyy määrittää tutkittavan laivan konetehto P_b , käyttöaste μ , montako päivää vuodesta laiva on merellä d ,

montako tuntia päivässä h , polttoaineen hinta sekä polttoaineen kulutus m_{kWh} .
Polttoaineen kulutus laskettiin yhtälöllä:

$$Polttoaineen\ määrä = P_b \cdot \mu \cdot d \cdot h \cdot m_{kWh} \quad (5.6)$$

Laivan uusi tehon tarve laskettiin yhtälöllä:

$$P_{b\%} = 10\Delta P_b^{100|\Delta T|} \quad (5.7)$$

Jossa $P_{b\%}$ on painonmuutoksen jälkeen tarvittava tehomäärä suhteessa alkuperäiseen, $\Delta P_{b\%}$ on tehon muutos yhden cm:n muutosta kohden tietyllä nopeudella (taulukko 9), -T on tehon muutos kun uppouma vähenee ja +T on taas uppouman kasvua.

Taulukko 9. Tehon muutos eri nopeuksilla.

	-T	($\Delta P_{b\%}$)	+T	($\Delta P_{b\%}$)
16 kn		0,002 %		0,030 %
17 kn		-0,008 %		0,044 %
18 kn		-0,019 %		0,057 %
19 kn		-0,030 %		0,072 %
20 kn		-0,039 %		0,086 %
21 kn		-0,047 %		0,098 %
22 kn		-0,055 %		0,112 %
23 kn		-0,068 %		0,130 %
24 kn		-0,086 %		0,151 %
25 kn		-0,103 %		0,169 %
26 kn		-0,113 %		0,180 %
27 kn		-0,117 %		0,183 %
28 kn		-0,117 %		0,183 %
29 kn		-0,115 %		0,182 %
30 kn		-0,112 %		0,183 %

Kun uusi tehon kulutus tiedetään, saadaan laskettua polttoaineen määrä uudella syväyksellä yhtälöllä:

$$Uusi\ polttoaineen\ kulutus = P_b \cdot P_{b\%} \cdot \mu \cdot d \cdot h \cdot m_{kWh} \quad (5.8)$$

Tehon pienentämisen sijaan voidaan teho pitää samana ja kasvattaa laivan nopeutta. Nopeuden kasvun suuruutta arvioitiin amiraliiteetti-yhtälön avulla (Alanko 2007, IX-2).

$$AC = \frac{V^3 \sqrt{\Delta^2}}{P_b} \quad (5.9)$$

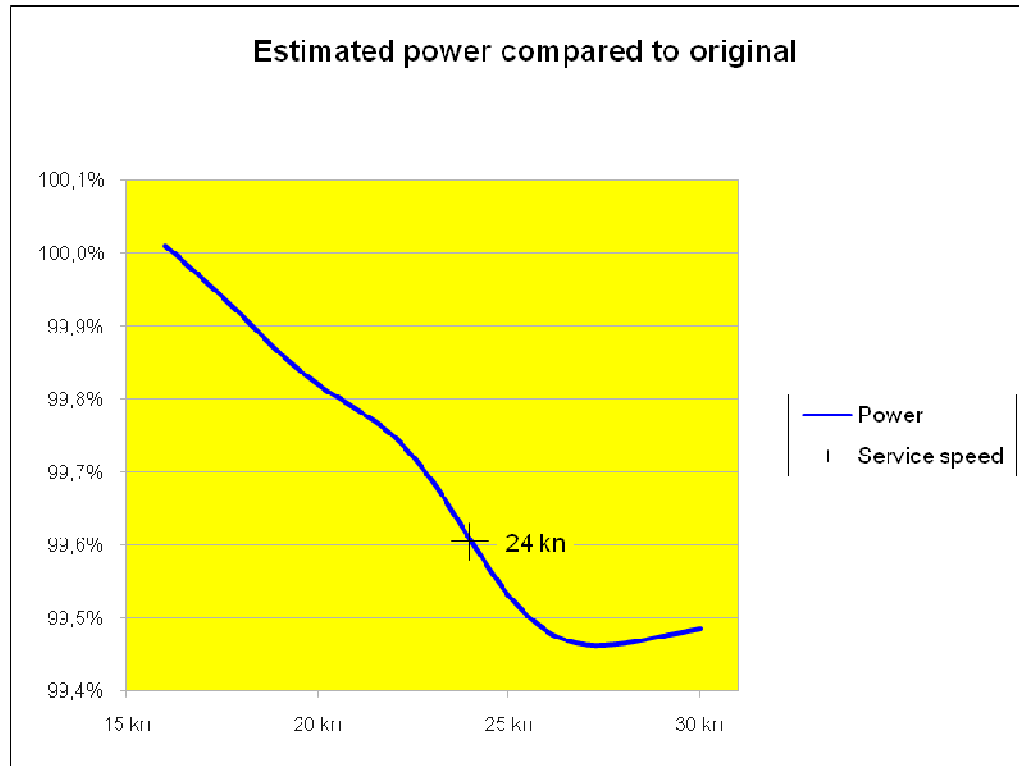
Yhtälöstä saadaan laskettua nopeuden muutos:

$$dV = \sqrt[3]{\frac{AC \cdot P_b}{\Delta_{uusi}^2}} - V_{vanha} \quad (5.10)$$

Kuvissa 15 ja 16 on näytetty esimerkki laivasta, minkä pääkoneiden kokonaisteho on 75 000 kW ja koneiden käyttöaste on 85 %. Laivan oletetaan olevan käytössä 340 päivää vuodessa ja 24 tuntia näinä päivinä.

Engine power kW	75 000	kW
Engine load %	85	%
Service days per year	340	d
Hours per day	24	h
Fuel price	160	€/ton
Specific fuel consumption	200	g/kwh
Original fuel consumption per year	104 040	ton
New fuel consumption per year	103 628	ton
Savings in fuel	412	ton
Original fuel cost per year	16 646 400	€/year
New fuel cost per year	16 580 480	€/year
Savings in fuel cost	65 920	€/year
or increased speed	0,05	kn

Kuva 15. Tehonmuutosesimerkki.



Kuva 16. Tehonmuutos nopeuden funktiona.

5.3.3 Rakennekustannukset

Rakennekustannusosiossa käyttäjä voi tarkistaa, kuinka monta tonnia alumiinirakenteita pystytään korvaamaan teräsrakenteilla ja millä korkeudella näiden rakenteiden painopiste pitää sijaita, jotta laivan syväys ja painopiste pysyvät alkuperäisinä. Työkalulla on myös mahdollista laskea halutun määrän alumiinirakenteen korvaaminen teräsrakenteella ja millä korkeudella teräsrakenteen painopisteen pitää sijaita, jotta koko laivan painopiste pysyy samana. Työkalu ei kuitenkaan laske mitä vaikutuksia jäljelle jäävällä painon säästöllä tai ylityksellä on.

Alumiinirakenteen voidaan olettaa painavan 60 % teräsrakenteesta. Korvaavan teräsrakenteen paino saadaan laskettua jakamalla korvattavien alumiinirakenteiden paino luvulla 0,6, jos poistettavien alumiinirakenteiden paino on tiedossa.

$$m_{steel} = \frac{m_{alu}}{0,6} \quad (5.11)$$

Jos koko painon säästö käytetään alumiinirakenteiden korvaamiseen, teräsrakenteiden paino saadaan laskettua yhtälöllä:

$$m_{steel} - m_{alu} = m_{savings} \therefore m_{alu} = 0,6 m_{steel} \quad (5.12)$$

$$0,4 m_{steel} = m_{savings} \leftrightarrow m_{steel} = \frac{m_{savings}}{0,4} \quad (5.13)$$

Tästä tuloksesta saadaan laskettua poistettavien alumiinirakenteiden paino:

$$m_{alu} = m_{steel} - m_{savings} \quad (5.14)$$

Painopiste teräkselle kun koko painosäästö käytetään alumiinirakenteiden korvaamiseen, saadaan laskettua momenttilauseella:

$$m_{zsteel} = \frac{\Delta_{original} VCG_{original} - \Delta_{new} VCG_{new}}{m_{savings}} \quad (5.15)$$

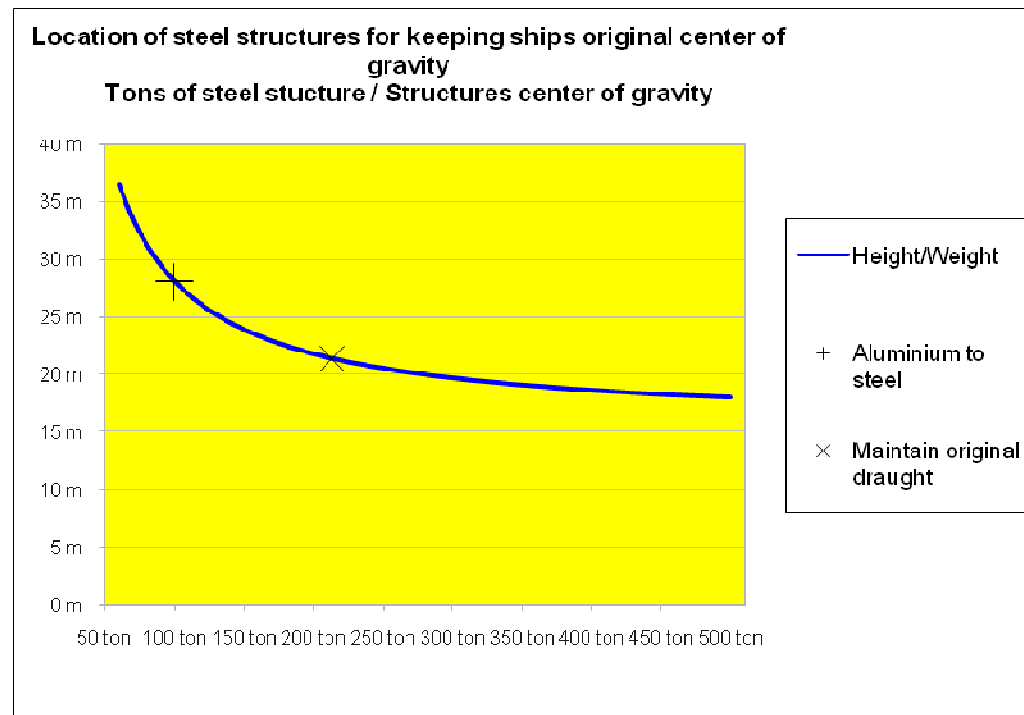
Jos vain osa alumiinirakenteista korvaaminen teräsrakenteilla, saadaan painopiste lasketua yhtälöllä:

$$m_{zsteel} = \frac{(\Delta_{new} + m_{add}) VCG_{original} - \Delta_{new} VCG_{new}}{m_{add}} \quad (5.16)$$

Alumiinirakenteen hinnaksi arvioidaan 20 000 €/ton ja teräsrakenteen 4 500 €/ton. Kuvan 17 esimerkin mukaan, jos koko painon säästö hyödynnetään rakenteissa, voidaan alumiinirakenteita jättää rakentamatta 6.4 M€ edestä ja korvata ne 2.4 M€ edestä teräsrakenteita. Säästöä siis saavutettaisiin tässä tapauksessa 4.0 M€. Säilyttääkseen alkuperäisen painopisteen, täytyisi korvaavien teräsrakenteiden painopisteen olla 21,4 m korkeudessa. Ohjelmalla pystyy myös tarkastelemaan mille korkeudelle korvattavan teräsrakenteen painopiste pitää tulla, jos vain osa alumiinin painosta korvataan teräksellä (kuvat 17, 18).

Tons of aluminium structure changed to steel structure	150 ton
Weight of new steel structures	250 ton
Added weight	100 ton
Center of gravity of new steel structures for maintaining ships original center of gravity	28,1 m
Aluminium structures changed to steel structures maintaining original	
Draught	319 ton
Weight of new steel structures	532 ton
Or additional structure	213 ton
Center of gravity for additional or aluminium changed to steel structures maintaining the original draught and center of gravity	21,4 m

Kuva 17. Alumiinirakenteiden korvaaminen teräksellä.



Kuva 18. Painopisteen sijainti teräsrakenteen massan funktiona.

5.3.4 Lisärakenteet

Säästetty paino voidaan käyttää myös lisäämällä rakenteita laivaan. Ohjelma laskee esimerkkinä kuinka monta tietyn kokoista hyttiä voidaan rakentaa lisää (additional cabin area) (kuva 19). Laskeminen tapahtuu tekemällä oletus, jossa 20 % pinta-alasta on käytäviä ja loppu pinta-ala on hyttejä. Yhden m² painoksi arvioitiin 330 kg, joka sisältää teräs- ja varustelupainot sekä 20 % käytäviä sekä muita huolto- ja yleisiä tiloja, joita hyttialueilla on. Alumiinirakenteilla saadaan 24 % enemmän pinta-alaa kuin teräsrakenteilla. Syy pienempään kasvuun johtuu siitä että varustelupainot pysyvät samana.

Standard cabin size	25 m ²
Additional cabin area (From additional structures of steel) Corresponding to 25 cabins of 25m ²	645 m ²
Additional cabin area (From additional structures of aluminium) Corresponding to 31 cabins of 25m ²	800 m ²

Kuva 19. Painon hyödyntäminen hytteihin.

6 Tuloksien vertailu

6.1 Tapaustutkimuksen tiedot

Aikaisemmin eristeiden vaikutuksesta oli tehty yksi tapaustutkimus Isoverin Ultimate-eristeryhmälle (Albrecht ym. 2007). Tutkimus kohdistui jo olemassa olevaan matkustaja-autolauttaan. Lautan päämitat ovat samat kuin edellisessä kappaleessa olevan esimerkkiraportin laivalla:

- $L_{pp} = 195$ m
- $B = 29$ m
- $T = 6,3$ m
- Matkustajia = 2800
- Hyttejä = 900
- Autokansia = 1

Tutkimus tehtiin paremmalla tarkkuudella kuin työkalua varten tehty tutkimus, tästä syystä tutkimuksen tuloksia käytettiin työkalun tuloksien tarkistamiseen. Tutkimuksessa otettiin myös huomioon hyttimoduulien eristeet, mitä työkalu ei ota huomioon. Tutkimuksessa verrattiin Isoverin Ultimate-lasivillaa raskaaseen vuorivillaan.

6.2 Paino ja painopiste

Tapaustutkimuksessa kokonaispainon säästöksi saatiin 287 tonnia. Tästä painosta 27 tonnia tuli hyttien eristeistä. Jos hyttien eristeet jätetään huomiotta, saadaan painonsäästöä 260 tonnia, mikä tarkoittaa työkalun arvioineen painon 18,1 % verran väärin. Tämä tarkoittaa kuitenkin arvioiden osuvan virhemarginaalin, 20 %, sisään.

Eristeiden painopisteen laskun muutos oli tutkimuksessa 40 cm kun taas työkalu arvioi painopisteen laskevan 22 cm. Virheen suuruudeksi saadaan tässä tapauksessa 45 %.

6.3 Painon vaikutus

Laskennan oikeellisuuden tarkistamiseksi muutettiin paino ja painopiste vastaamaan tapaustutkimuksen tuloksia (taulukko 10). Tämä aiheuttaa sen, että esimerkiksi kuollut paino pysyy vakiona, koska sen lisäys on täsmälleen sama kuin painon säästön.

Taulukko 10. Laskennan oikeellisuuden tarkastelu syväykselle.

	Alkuperäinen	Tapaustutkimus	Työkalu korjattuilla arvoilla	Työkalu alkuperäisillä arvoilla
Syväys	6,3 m	6,23 m	6,24 m	6,25 m
$\frac{T_{\text{tapaus}} - T_{\text{uus}}}{T_{\text{tapaus}}}$			-0,16 %	-0,32 %
Painopisteen muutos kun paino kaksoispohjaan		~ -0,20 m	-0,23 m	-0,18 m
$\frac{T_{\text{tapaus}} - T_{\text{uus}}}{T_{\text{tapaus}}}$			0,3 %	-0,6 %

Vaikka painon säästön ero oli satoja tonneja, ei sen vaikutus syväykseen ole prosenttiakaan, joten tuloksia voidaan pitää kohtuullisen luotettavina. Jos säästetty paino siirretään kaksoispohjaan, virheestä tulee huomattavasti suurempi, mutta ne pysyvät silti virhemarginaalin sisällä.

Tehon vaikutukset on laskettu eri tavoilla molemmissa. Tapaustutkimuksessa lähtökohtana on potkurin tuottama työntöteho, kun taas työkalussa tehon tarpeen arviointi kohdistuu moottorista tulevaan tehoon. Nopeudella 24 *kn*, tutkimuksessa saatiin polttoaineen kulutusta 80 *kg/h* pienemmäksi tai 0,08 *kn* solmua lisänopeutta. Tämä vastaa 544 tonnia polttoainetta vuodessa jos laivaa käytetään 340 päivää vuodesta sekä 20 tuntia vuorokaudessa. Työkalu arvioi säästöksi 376 tonnia tai 0,06 *kn* lisää nopeutta sekä alkuperäisillä arvoilla 343 tonnia tai 0,05 *kn* lisää nopeutta .

Taulukko 11. Laskennan oikeellisuuden tarkastelu nopeudelle.

	Polttoaine	$\frac{V_{tutkimus}}{Työkalu}$	Nopeuden lisäys	$\frac{V_{tutkimus} - V_{työ}}{V_{tutkimus}}$
Tutkimus	544 ton		0,08 kn	
Korjattu paino	376 ton	69 %	0,06 kn	0,08 %
Alkuperäinen	343 ton	63 %	0,05 kn	0,13 %

Tapaustutkimuksessa ei myöskään tarkasteltu, kuinka monta tonnia alumiinirakenteita pystytään muuttamaan teräsrakenteiksi. Siinä on oletettu, että 11 kannelta vaihdetaan 150 tonnia alumiinirakenteita, 250 tonniin teräsrakenteita. Työkalu antaa saman tuloksen. Lisärakenteiden vertaaminen on hankalaa, koska työkalu laskee koko painon käytön, ja jälleen tapaustutkimuksessa on laskettu vain osa painon säästöstä mukaan.

6.4 Väärin valittu referenssi

Väärän referenssilaivan valinta aiheuttaa virheen kasvua. Erityisesti verrattuna laivaan, jonka kansirakenteet ovat täysin erilaisia.

Taulukko 12. Väärin valitun referenssin syvyyden arviointiin.

	Alkuperäinen	Tapaustutkimus	Ropax 200	Cruise GT 150000
Syväys	6,30 m	6,23 m	6,29 m	6,28 m
$\frac{T_{ropax} - T_{uus}}{T_{ropax}}$			-1 %	-0,8 %
Painopisteen lisämuutos kun paino kaksoispohjaan		~-0,20 m	-0,07 m	-0,04 m
$\frac{T_{ropax} - T_{uus}}{T_{ropax}}$			-3,2 %	-3,5 %

Erotus syväydessä ei ole mitenkään merkittävä johtuen pienestä syväyksen muutoksesta, mutta painopisteen alentuminen aiheuttaa jo huomattavasti suuremman virheen.

Taulukko 13. Väärin valitun referenssin vaikutus nopeuden arviointiin.

	Polttoaine	$\frac{Työkuorma}{Tutkimus}$	Nopeuden muutos	$\frac{V_{tutkimus} - V_{työ}}{V_{tutkimus}}$
Tutkimus	544 ton		0,08 kn	
RoPax 200	104 ton	19,1 %	0,01 kn	0,29 %
Cruise GT 150000	168 ton	30,9 %	0,02 kn	0,25 %

7 Johtopäätökset

Eristeiden painon vaikutus on suurempi kuin nopeasti ajateltuna voisi kuvitella. Säästöt, joita telakka tai varustamo voi saavuttaa oikeanlaisella suunnittelulla, ovat merkittäviä jo rakennusvaiheessa kuten myös laivan kuluissa sen käytön aikana.

Eriolaisten kertoimien, kuten laivan ulottuvuuksien, uppouman, tehon ja niin edelleen, sekä referenssien käyttö on laivojen suunnittelussa arkipäivää, ja tutkimuksessa todettiin sen pitävän paikkaansa myös eristeiden suhteen. Tästä syystä niin suunnittelutoimistojen kuin telakoidenkin on tärkeää kerätä ja ylläpitää tilastoja menneistä projekteista. Tilastojen kasvaessa niiden merkitys suunnitteluprosessissa korostuu. Vaikka tämä tutkimus tehtiin pelkästään matkustaja-autolautoille ja risteilijöille, se voidaan helposti kuitenkin siirtää muillekin alustyypeille lisäämällä sovellukseen rahtialuksien tiedot.

Alkuperäisten eristeiden paino tutkituissa laivoissa oli 0,5...1,9 % laivan kokonaispainosta. Jos virhe on 20 %, tutkittujen laivojen eristeiden painon osuus olisi tällöin 0,4...2,3 %. Tämä tarkoittaa -0,4...0,4 % heittoa laivan kokonaispainoon (taulukko 14). Tämä on riittävä tarkkuus varsinkin, ennen kuin varsinaista suunnittelua on edes aloitettu tai siinä ollaan vielä aikaisessa vaiheessa.

Taulukko 14. Eristeiden virhemarginaalin vaikutus.

	Δ	Eristeiden osuus painosta		Eristeiden paino	
Alkuperäinen	500	0,5 %	1,9 %	2,5	9,5
	Virhe %				
Muutos	-20 %	0,4 %	1,5 %	2	7,6
Muutos	20 %	0,6 %	2,3 %	3	11,4
Virhemarginaali	%	-20 %	20 %		
Laivan uusi paino	0,5 %	499,5	500,5		
	1,9 %	498,1	501,9		
Erotus	0,5 %	99,9 %	100,1 %		
	1,9 %	99,6 %	100,4 %		

Kuvaajassa 2. näkyy hyvin, kuinka Holtrop 84 -menetelmä ei ota bulbin vaikutusta huomioon laskennassa. Kohdassa -5 cm bulbi nousee veden alta, mikä näkyy suurentuvana vesiviivapintana, joka taas nostaa laivan kulkuvastusta. -19 cm kohdalla tapahtuvaan piikkiin ei löytynyt syytä. Kyseessä on mahdollisesti rungon mallinnuksesta johtuva virhe. Kyseinen virhe voidaan korjata extrapoloimalla käyrästä askel pois.

7.1 Muita mahdollisia menetelmiä

Tehon tarpeen muutosta olisi voinut tutkia keskittyen myös perinteisempiin yhdenmukaisuustunnuslukuihin kuten (Skene 2001, 31):

- Nopeuden ja pituuden suhde V/\sqrt{L}
- Uppouman ja pituuden suhde $D/\left(\frac{L}{100}\right)^3$
- Tehon ja uppouman suhde $P/D^{7/6}$

Näistä uppouman muutoksella perusteella voidaan arvioida nopeus:

$$\frac{V}{D} = x_1 V = x_1 \sqrt{L} \quad (7.1)$$

$$\frac{D}{\left(\frac{L}{100}\right)^3} = x_2 \leftrightarrow L = 100^3 \sqrt{\frac{D}{x_2}} \quad (7.2)$$

$$V = x_1 \sqrt{100^3 \sqrt{\frac{D}{x_2}}} \quad (7.3)$$

Sievennettynä uuden nopeuden kaavasta tulee:

$$V = 10x_1^6 \sqrt{\frac{D}{x_2}} \quad (7.4)$$

Ja teho saadaan suoraan uudesta uppoumasta:

$$P_{uusi} = D_{uusi}^{7/6} \cdot \frac{P_{vanha}}{D_{vanha}} \quad (7.5)$$

LÄHTEET

Painetut lähteet

Alanko, Jussi 2007. Laivan yleissuunnittelu. Turku: Karhukopio.

Albrecht, Peter; Pösö, Antti & Soininen Mikko 2007. Ultimate insulation study 2007. Turku: Elomatic Marine Oy

International Maritime Organization 2001. SOLAS Consolidated edition 2001. United Kingdom: Bath Press

Karikoski, Aarno 2001. Laivatekniikan terminologiaa ja käsitteitä. Teoksessa Räisänen, Pekka (toim.) Laivatekniikka. Modernin laivanrakennuksen käsikirja. 2. korjattu painos. Jyväskylä.: Gummerrus kirjapaino Oy, 3-1 – 3-7

Maasalo, Esko 2001. Laivateorian perusteet – Paino ja painopiste. Teoksessa Räisänen, Pekka (toim.) Laivatekniikka. Modernin laivanrakennuksen käsikirja. 2. korjattu painos. Jyväskylä.: Gummerrus kirjapaino Oy, 5-1 – 5-8

Skene, Norman L. 2001. Elements of yacht design, The original edition of the classic book on yacht desing. New York: Sheridan house inc.

Sähköiset lähteet

Aspen Aerogels. Aerogel. Viitattu 27.10.2010. www.aerogel.com > Resources > What is aerogel

Lloyd register 2010, Rulefinder Versio 9.13. > 14B.2.3