

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2022

Otto Hiltunen

# Risteilylaivan konseptisuunnittelu- vaiheen painolaskenta

– työkalu painon arviointiin

Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka | Meritekniikka

2022 | 45 sivua

Otto Hiltunen

# Risteilylaivan konseptisuunnitteluvaiheen painolaskenta

– työkalu painon arviointiin

Laivan painolaskenta, -hallinta ja painojen arviointi ovat yksiä tärkeimpiä toimintoja laivan suunnittelu- ja rakennusprosessin aikana. Laivan aikaisessa suunnitteluvaiheessa tarkan ja yksityiskohtaisen tiedon puuttuminen hankaloittaa painolaskennan suorittamista. Perinteisten painolaskumenetelmien sijasta aluksen painoa täytyy arvioida. Mikäli painotilastoja jo rakennetuista laivoista on käytettävissä, voidaan niitä hyödyntää tarkan ja luotettavan arvion saamiseksi jo laivan konseptisuunnitteluvaiheessa. Painotilastojen rakentaminen ja ylläpito vaativat kuitenkin paljon resursseja.

Tämän työn tavoitteena oli tutkia painonarviointimenetelmiä, tunnistaa niistä hyödyllisimmät ja rakentaa niiden perusteella risteilylaivan painon ja painopisteiden arviointiin työkalu, jota sen käyttäjä pystyy hyödyntämään suunnittelussa. Tämän mahdollistamiseksi oli perinpohjaisesti tutustuttava työn toimeksiantajan, Meyer Turku Oy:n, painolaskentaprosessiin ja aiheesta julkaistuun kirjallisuuteen.

Työkalun paino- ja painopistearviot sekä muiden suureiden arviointi toteutettiin regressio- ja kerroinmenetelmien avulla. Näiden lisäksi työkalun geometrisen menetelmän avulla pystytään arvioimaan aluksen tilavuuksia ja pinta-aloja. Työkalua testattiin tapaustutkimuksella, jossa kolmen jo rakennetun laivan arvojen avulla tutkittiin työkalun tarkkuutta. Regressiomenetelmän kaavat optimoitiin luotettavuuden parantamiseksi. Tulosten tarkkuus ylitti odotukset ja asetui selkeästi asetetulle vaihteluvälille.

Asiasanat:

Konetekniikka, meritekniikka, laivanrakennus, painolaskenta

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering | Marine Technology

2022 | 45 pages

Otto Hiltunen

## Weight Calculation of a Cruise Ship's Concept design

– A weight estimation tool

Weight calculation, control and estimation are among the most important procedures and functions in designing and building a ship. In the early phase of the ship design process, the lack of information prevents the conventional calculating of weight. Instead, in the concept phase, the weight has to be estimated. To obtain a valid estimate of a ship's weight as early as possible, it is beneficial to be able to use statistical data. This naturally requires thorough collection and maintenance of weight data from already-built ships.

This thesis aimed to investigate the possibilities to estimate a ship's weight in an early stage of design and build an instrument with which an end-user can easily and quickly run an estimation of the ship's weight. To achieve this, comprehensive research into the current weight calculation process of the work's client, Meyer Turku Oy, was needed. In addition, fundamental studies of the literature of the field were necessary.

Regression and coefficient methods were used in the tool to estimate weight and other values. Additionally, a geometric definition method was provided to help in defining volumes and areas. The built estimation tool was tested with the data from three existing ships and some reliability factors were accounted for in the used formulas. The accuracy of the results was better than expected and landed distinctly in the assigned range.

Keywords:

Mechanical engineering, marine technology, naval architecture, weight calculation, weight estimation

# Sisältö

<b>Lyhenteet ja sanasto</b>	<b>7</b>
<b>Symbolit</b>	<b>8</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>9</b>
<b>2 Painolaskenta</b>	<b>11</b>
2.1 Paino	13
2.2 Painopisteet	20
2.3 Kevytpainon arviointi	23
2.4 Painopisteiden arviointi	24
2.5 Kuollutpainon arviointi	26
2.6 Painotilastot	27
<b>3 Painolaskutyökalu</b>	<b>29</b>
3.1 Syöte	29
3.2 Kerroinmenetelmä	30
3.3 Regressiomenetelmä	31
3.4 Geometrinen määrittäminen	32
3.5 Tuloste	33
3.6 Luotettavuus	34
<b>4 Tapaustutkimukset</b>	<b>37</b>
4.1 Esimerkkialukset	37
4.2 Lähtötiedot	37
4.3 Tulokset	38
4.4 Tarkkuus	41
<b>5 Yhteenveto ja päätelmät</b>	<b>42</b>
<b>Lähteet</b>	<b>44</b>

## Kaavat

Kaava 1. Arkhimedeen laki.	13
Kaava 2. Uppouman jakautuminen.	13
Kaava 3. Kuollutpainon jakautuminen (Parsons 2003, 11-23).	14
Kaava 4. Kevytpainon jakautuminen (Papanikolaou 2014, 175)	16
Kaava 5. Kevytpainon jakautuminen (Schneekluth & Bertram 1998, 149).	16
Kaava 6. Koordinaattiakselikohtaisen painopisteen laskenta.	21
Kaava 7. KG:n laskukaava (Papanikolaou 2014, 177–178).	25
Kaava 8. Laitakorkeus DS (Papanikolaou 2014, 177–178).	25

## Kuvat

Kuva 1. Laivan koordinaattijärjestelmä, jossa origo on sijoitettuna peräperpendikkelin ja kölilinjan leikkauspisteeseen (Ban & Basic 2015, 16).	21
Kuva 2. $GM > 0$ , positiivinen vakavuus. Aluksen kallistuessa <i>oikaiseva</i> momentti. (Alanko 2011a, XI-2.)	23
Kuva 3. $GM < 0$ , negatiivinen vakavuus. Aluksen kallistuessa <i>kallistava</i> momentti. (Alanko 2011a, XI-2.)	23
Kuva 4. Esimerkki geometrisen määrityksen mukaisesta laivan poikkileikkauksesta ja pisteistä B, G ja M (Meyer Turku Oy 2022).	33
Kuva 5. Erään litteran pituussuuntaisen painopisteen painotilastojen pisteisiin sovitettut eri funktiotyypit, niiden ennusteet ja sovitettujen kuvaajien $R^2$ -arvot.	35

## Kuviot

Kuvio 1. Keskiwertoinen 2010-luvulla tai sen jälkeen valmistuneen suuren risteilylaivan ( $L_{pp} > 250 m$ ) kevytpainon jakautuminen (Meyer Turku Oy 2022).	19
Kuvio 2. Keskiwertoinen 2010-luvulla tai sen jälkeen valmistuneen suuren risteilylaivan ( $L_{pp} > 250 m$ ) uppouman jakautuminen (Meyer Turku Oy 2022).	19

## Taulukot

Taulukko 1. Arvoja kertoimelle C eri laivatyypin mukaan. (Dudszus and Danckwardt 1982, 243.)	26
Taulukko 2. Tapaustutkimuksissa käytettyjen esimerkkialusten päämitat dimensionaalittomina arvoina.	38
Taulukko 3. Tapaustutkimuksen alusten tulosten tarkkuus. Työkalun tulokset verrattuna alusten todellisiin arvoihin.	39

## Lyhenteet ja sanasto

Lyhenne	Lyhenteen selitys (Lähdeviite)
COG	Center of gravity, painopiste
LCG (XCG)	Longitudinal center of gravity, pitkittäissuuntainen painopiste
VCG (ZCG)	Vertical center of gravity, korkeussuuntainen painopiste
TCG (YCG)	Transversal center of gravity, poikittaissuuntainen painopiste
SAWE	Society of Allied Weight Engineers
SNAME	Society of Naval Architects and Marine Engineers
A.P.	Aft(er) perpendicular, peräperpendikkeli
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships. Kansainvälinen yleissopimus alusten aiheuttaman saastuttamisen ehkäisemisestä. (IMO 2022.)
IMO	International Maritime Organization
LCB	Longitudinal Center of Buoyancy
3D	3-dimensional, kolmiulotteinen

## Symbolit

Symboli	Symbolin selitys (Lähdeviite)
$\Delta$	Uppouma [ton]
$\nabla$	Uppouman tilavuus [m <sup>3</sup> ]
$\rho_{sw}$	Meriveden tiheys [kg/m <sup>3</sup> ]
$L_{pp}$	Perpendikkeliin välinen etäisyys (engl. length between perpendiculars) [m]
$g$	Maan vetovoiman kiihtyvyys (9,81 [m/s <sup>2</sup> ])
$W$	Paino (engl. weight) [ton]
$LW$	Kevytpaino, ts. omapaino (engl. lightweight, myös light ship) [ton]
$DWT$	Kuollutpaino, ts. kantavuus (engl. deadweight) [ton]
$KG$	Aluksen painopisteen etäisyys kölipisteestä [m]
$GM$	Vaihtokeskuksen etäisyys painopisteestä [m]
$KM$	Vaihtokeskuksen etäisyys kölipisteestä [m]
$KB$	Uppouman tilavuuden keskipisteen etäisyys kölipisteestä [m]
$M$	Alkuvaihtokeskus (ts. metasentri, engl. initial metacenter)
$G$	Laivan painopiste
$K$	Laivan kölipiste
$B$	Laivan uppouman tilavuuden keskipiste
$V_{tot}$	Kokonaistilavuus (engl. total volume) [m <sup>3</sup> ]



# 1 Johdanto

Laivan painolaskenta pyrkii määrittämään laivan painon ja painopisteen laivanrakennusprosessin jokaisessa vaiheessa. Tarkoituksena on varmistaa, että laiva kelluu, kellumisasento on halutunlainen ja laiva on vakaa. Aluksen paino on tiedettävä, jotta pystytään arvioimaan kellumisasentoa, vakautta, ohjailtavuutta, merikelpoisuutta ja tehontarvetta.

Perinteisesti telakoilla ensimmäinen arvio laivan painosta perustuu tilastoista saatuihin suhteutettuihin kertoimiin tai parametriin menetelmiin. Suunnittelun edetessä tehdään välikalkyylija 3D-mallin ja muiden suunnittelupiirustusten avulla. Tarkka arvio aluksen painosta saadaan vasta suunnittelun myöhemmässä vaiheessa, kun työkuvia ja piirustuksia syntyy käytettäväksi.

Työn tavoitteena on kartoittaa nykyistä painolaskuprosessia ja tutkia, kuinka tarkasti painoa voidaan arvioida laivaprojektin alkuvaiheessa. Tämän lisäksi tarkoituksena on kehittää menetelmä ja työkalu risteilylaivan konseptisuunnitteluvaiheen painonarvioinnin avuksi tämän työn toimeksiantajan, Meyer Turku Oy:n, painolaskentaprosessiin. Työ käsittelee erityisesti menetelmiä suuren risteilylaivan painolaskennassa. Painolaskennan teoria pätee yleisesti laivanrakennuksessa, mutta risteilylaivan painonhallinta on monijakoisempaa muihin yleisempiin ja yksinkertaisempiin laivatyyppeihin verrattaessa.

Puhekielessä usein käytetään sanoja *paino* ja *massa* kuin ne tarkoittaisivat samaa asiaa, mutta näin ei kuitenkaan ole. Paino on voima, jonka maan vetovoima kohdistaa kappaleeseen. Painoa kuvataan tavanomaisesti kirjaimella  $W$  [N]. Massa puolestaan on mitta materian määrästä kappaleessa, ja sitä tavallisesti merkitään kirjaimella  $m$  [kg]. Laivanrakennuksessa on kuitenkin yleistynyt käytäntö, että muun muassa uppouma käsitellään metrisissä tonneissa. Tässä työssä käsiteltävissä kaavoissa  $W = [t]$ .

Tämänhetkisessä painolaskentaprosessissa on suuri harppaus ensimmäisen painoarvion ja ensimmäisen NAPA-mallista laskettavan välikalkyylin välillä. Nimenomaan tästä harppauksesta aiheutuva työmäärä on valtava. 3D-mallin on

oltava yksityiskohtainen ja tarkka, jotta sitä voidaan hyödyntää. Todenmukaisen ja yksityiskohtaisen mallin rakentaminen ja ylläpitäminen vievät runsaasti aikaa. Laivaprojektin alkuvaiheessa halutaan priorisoida työtunnit ajankohtaisempiin aiheisiin. Organisaatiossa on ilmennyt tarve täyttää tämä painolaskennan aukko siitä koituvan työmäärän takia.

Ongelmana on tietojen puutteellisuus laivaprojektin alkuvaiheessa, johon tämä painonarviointityökalu pyrkii tuomaan ratkaisuja. Laivan suunnitteluprosessin alussa tietoa, johon perustaa painolaskentaa, ei ole vielä olemassa. Tästä syystä tarkan painoarvion antaminen on haastavaa. Arviointimenetelmän täytyy olla yksinkertaistettu, sillä informaation puutteen takia tarkan yksityiskohtaisen menetelmän rakentaminen ei ole mahdollista. Tilastotietoja jo rakennetuista laivoista voidaan kuitenkin käyttää apuna sivistyneiden arvioiden tekemiseen. Tavoiteltava tarkkuus painoarvioissa on 5 %. Tämä tarkoittaa sitä, että työkalun laskevien arvojen tulisi olla  $\pm 5\%$ :n sisällä.

Laivan painolaskennasta on saatavilla hyvin kirjallisuutta. Vaikka suuri osa aiheen kirjallisuudesta on kymmeniä vuosia vanhaa, on asiasisältö edelleen oleellista ja paikkansapitävää. Vanhemman kirjallisuuden luettavaksi hankkiminen saattaa olla työlästä, sillä kirjoja ja julkaisuja ei välttämättä ole julkaistu sähköisenä. Aiheesta on tehty myös opinnäytetöitä, kandidaatin tutkielmia ja pro gradu -tutkielmia (ks. esim. Valenius 2017, Särkkä 2011, Kahva 2017).

Aluksi esitellään painolaskennan teoriaa, taustaa sekä tämänhetkisiä menetelmiä. Sen jälkeen selvitetään painolaskutyökalulle ominaisuuksia ja parhaita mahdollisia syöttötietoja unohtamatta työkalun luotettavuuden arvioimista. Työkalua testataan todellisten laivojen painodataa hyväksi käyttäen, jolloin voidaan arvioida menetelmän toimivuutta. Tämän jälkeen analysoidaan tapaustutkimuksen tulokset ja arvioidaan menetelmän toimivuutta ja luotettavuutta. Painolaskennan menetelmät saattavat olla erilaisia laivatyyppin mukaan. Tässä työssä käsitellään lähinnä matkustajalaivan, tarkemmin risteilylaivan, painolaskentaa, ellei toisin mainita.

## 2 Painolaskenta

Mahdollisimman tarkka laivan uppouman, painojen ja painopisteiden arviointi on olennainen osa laivan suunnitteluprosessia laivaprojektin konseptisuunnittelu- ja loppuvaiheessa (Papanikolaou 2014, 175). Varsinkin projektin alkuvaiheessa suhteellisen tarkka painoarvio on ehdottoman tärkeää. Monen laivanosan ja järjestelmän rakennuskustannukset ovat riippuvuussuhteessa sen painoon. Laivanrakennusprosessin alkuvaiheessa painoarvioita voidaan käyttää näiden rakennuskustannusten laskemiseen. Usein sekä materiaali- että työkustannusten arvioinnin perusteena käytetään painotietoja (Schneekluth & Bertram 1998, 149).

Mahdolliset virheet tai epätarkkuudet painoarvioissa vaikuttavat rakennuskustannusten lisäksi useisiin saavutettuihin laivan ominaisuuksiin kuten vakavuuteen, suorituskykyyn ja kantavuuteen. Erityisen herkkiä painolaskuvirheille ovat laivat, joilla suhde kuollutpainon ja uppouman välillä on pieni (esimerkiksi jäänmurtaajat) ja laivat, joilla suhde varustelupainon ja kevytpainon välillä on suuri (esimerkiksi risteilylaivat, lautat) (Cheirdaris 2019, 18). Laivasopimuksessa yleensä määritellään painotavoitteet ja painotavoitteiden rikkomisesta koituvat sakot alukselle. Tämä tukee telakkaa onnistumaan painonarvioinnissa, jolloin ylimääräisiä sakkokustannuksia ei pääse syntymään.

Sakkorajan lisäksi alukselle määritetään yleensä myös hylkäysraja. Jos laivan toteutunut paino on selvästi painotavoitteiden yläpuolella, saatetaan laivaprojekti joutua hylkäämään tai tilaaja ei suostu ottamaan laivaa enää vastaan. Vaikka suunnittelun edetessä huomattaisiin, että laivan paino näyttää kehittyvän turhan suureksi, voidaan aloittaa painonsäästöprosessi rakenteiden ja yleisesti laivan omapainon keventämiseksi. Painoa voidaan säästää useilla eri tavoilla. Rakenteellisilla muutoksilla tai rakennusmateriaalien muutoksilla voidaan saada mittaviakin painonsäästöjä. Kun paino poikkeaa merkittävästi suunnitellusta, saattaa olla tarpeellista myös tarkastella aluksen vakavuutta uusien painotietojen pohjalta. Painonsäästöprosessilla saatetaan säästyä projektin hylkäämiseltä ja sakoiltakin, mutta painon säästely saattaa luoda lisäkustannuksia.

Painolaskenta on iteratiivinen prosessi, jonka tarkkuus paranee laivaprojektin edetessä arvioiden vaihtuessa todelliseksi tiedoksi (Särkkä 2011, 1). Telakan painolaskennan ja painon seurannan tulisi olla pitkäjänteistä ja systemaattista. Suuri painoarvo painolaskennan haastavuudesta on organisaation sisäisellä toiminnalla. On pystyttävä havaitsemaan muutoksia, tekemään muutosehdotuksia ja kuluttamaan painoreservejä hallitusti. (Räisänen 2000, 5-2.)

Suurten laivojen painolaskenta on erityisen haastavaa ihan vain valtavan osamäärän takia. Siksi varsinkin suuren risteilylaivan painohallinnassa painojen erittelyn täytyy olla hienojakoista, jotta kokonaisuus pysyy käsiteltävänä. Sisustuksen osuus risteilylaivan kevytpainosta on selvästi suurempi verrattuna muihin laivatyyppeihin.

## 2.1 Paino

Arkhimedeen lain mukaan nesteessä olevaan kappaleeseen kohdistuva ylöspäin työntävä voima on yhtä suuri kuin kappaleen syrjäyttämän nesteen paino (kaava 1). Ottamalla huomioon kappaleen paino, kokonaisvoiman yhtälöstä voidaan todeta, että kappaleen syrjäyttämän nesteen massa on siis yhtäsuuri kuin kappaleen massa.

$$F_N = m_{neste} \cdot g = \rho_{neste} \cdot V \cdot g,$$

Kaava 1. Arkhimedeen laki.

jossa  $F_N$  on nostovoima (ts. *noste*),  $m_{neste}$  on nesteen massa,  $g$  on putoamiskiihtyvyyden vakio,  $\rho_{neste}$  on nesteen tiheys ja  $V$  on kappaleen syrjäyttämän veden tilavuus.

Laivanrakennuksessa (*engl. Naval Architecture*) on yleistynyt käytäntö, että maan vetovoiman kiihtyvyyden vakio,  $g$  [ $\text{m/s}^2$ ], supistetaan painoyhtälöistä. Vaikka laivanrakennuksessa puhutaankin painoista, vakioyksikkönä käytetään kilogrammaa tai tonnia. Arkhimedeen lakia voidaan näin soveltaa laivan uppouman laskemiseen. Laivan syrjäyttämän nesteen paino eli uppouma määrittyy seuraavasti:

$$\Delta = (\rho_{sw} \cdot \nabla) = LW + DWT,$$

Kaava 2. Uppouman jakautuminen.

jossa

$\Delta$	uppouma,
$\rho_{sw}$	meriveden tiheys,
$\nabla$	uppouman tilavuus,
$LW$	kevytpaino (lightweight),
$DWT$	kantavuus (deadweight).

## Kuollutpaino

Kantavuus tai toisin sanoen kuollutpaino (*engl. deadweight, DWT*) on erotus upouman (suunnittelusyväydellä ja nollatrimmissä) ja sopimuksen mukaisen kevytpainon välillä. Laivan kantavuus kattaa lastista, polttoaineista, voiteluaineista, vedestä, muonituksista, tarvikkeista, matkustajista, matkatavaroista, miehistöstä ja liikuteltavasta painolastista koituvat painot. Kokonaiskuollutpaino voidaan jakaa edelleen seuraavasti (Parsons 2003, 11-23):

$$DWT = DWT_C + W_{FO} + W_{LO} + W_{FW} + W_{P\&E} + W_{PR} + W_{BW} + W_{GW} + W_{OT},^1$$

Kaava 3. Kuollutpainon jakautuminen (Parsons 2003, 11-23).

jossa

$DWT_C$	lastin kuollutpaino, lastikapasiteetti,
$W_{FO}$	polttoaineiden paino,
$W_{LO}$	voiteluöljyjen paino,
$W_{FW}$	juomavesien paino,
$W_{P\&E}$	ihmisten ja niiden omaisuuksien paino,
$W_{PR}$	muonitusten, tarvikkeiden paino,
$W_{BW}$	painolastivesien paino,
$W_{GW}$	jätevesien paino, ml. puhdistettu jätevesi
$W_{OT}$	muut painot.

---

<sup>1</sup>  $W_{BW}$ ,  $W_{GW}$ ,  $W_{OT}$  lisätty kaavaan kirjoittajan toimesta. Parsons (2003, 11-23) kaavassa painolastivettä, likavesiä ja muita nesteitä ei ole merkitty erikseen. Risteilylaivan painolaskennassa voidaan eritellä nämä omiksi ryhmikseen.

Kaavaan lisätty  $W_{GW}$  pitää sisällään jätevedet, puhdistetut jätevedet ja jätevesilaitoksien ja bioreaktorien sisältämät nesteet.  $W_{OT}$  puolestaan sisältää erikoistankkien nesteet, muut tilavuudeltaan vähäisemmät nesteet ja toiminnallisen korjauksen.

Varsinkin rahtilaivojen kohdalla usein kantavuudesta puhuttaessa tarkoitetaan aluksen lastikapasiteettia (*cargo deadweight*,  $DWT_C$ ), jolla kuvataan aluksen kykyä kantaa lastia. Matkustaja-alus poikkeaa  $DWT$ :n osalta rahti- tai tankkilavasta, sillä matkustajalaivaan pyritään saamaan vain riittävä kantavuus. Riittävä kantavuus tässä yhteydessä tarkoittaa halutun mittaisen merimatkan vaatimien tarpeiden painojen kattamista. Itse lastia tai rahtia ei risteilylaivassa juurikaan ole.

Rahti- ja tankkilaivojen kohdalla kantavuus pyritään maksimoimaan, jotta saadaan kuljetettua mahdollisimman paljon lastia. Rahtilaivojen ja tankkereiden tuotavuus perustuu lastinkuljetuskykyyn, jonka takia lastikapasiteetti pyritään maksimoimaan. Usein näiden laivatyyppien kohdalla laivan kokoa kuvataankin kantavuuden suuruudella. Matkustaja-aluksissa ansaintakyky syntyy matkustajista ja matkustajien viihtyvyydestä, jolloin matkustajien alueita laivassa halutaan priorisoida. Räisäsen (2000, 5-1) mukaan rahti- ja tankkilaivojen kuollutpainon keskiarvoinen osuus uppoumasta on noin 60–80 %. Tavanomaisesti suuren risteilylaivan kuollutpaino on vain 10–20 % aluksen uppoumasta.

## **Kevytpaino**

Aluksen kevytpaino (myös omapaino) määritellään laivan ja siihen kaiken asennetun varustelun painona ilman lastia ja muuta liikuteltavissa olevaa kuormaa. Rajaus lastin ja muun painon kesken voi olla toisinaan haastavaa. Koska esimerkiksi varaosat, inventaarit, jätevesitankkien sisällöt ja systeemi-putkistojen nesteet on vaikeita kohdentaa, ne sisällytetään tavallisesti kevytpainoon. Pohjakaivojen kanssa on erilaisia toimintatapoja. Yksi tapa on mallintaa pohjakaivojen tilavuudet erillisinä, laivan ulkopuolisina tilavuuksina.

Kirjallisuudessa esiintyy useita tapoja jakaa kevytpainoa osiin. Valtaosa tavoista on toteutettu samoilla perusteilla, ja ryhmittelyt eroavat toisistaan vain vähän. Papanikolaou (2014, 175) esittelee karkean tavan jaotella kevytpainoa:

$$LW = W_H + W_{Ma} + R,$$

Kaava 4. Kevytpainon jakautuminen (Papanikolaou 2014, 175)

jossa

$W_H$	rungon ja kansirakenteiden paino,
$W_{Ma}$	koneiston paino,
$R$	painoreservit (painomarginaalit / arvioiden toleranssit).

Schneekluth & Bertram (1998, 149) esittävät oman näkemyksensä jaosta seuraavanlaisena:

$$LW = W_{StH} + W_{StS} + W_O + W_M + R,$$

Kaava 5. Kevytpainon jakautuminen (Schneekluth & Bertram 1998, 149).

jossa

$W_{StH}$	rungon paino,
$W_{StS}$	kansirakenteiden paino,
$W_O$	varustelun, laitteiden ja varusteiden paino,
$W_M$	kuljetuskoneiston paino,
$R$	painoreservit (painomarginaalit / arvioiden toleranssit).

Yllä esitetyt kevytpainon jaottelut ovat kuitenkin risteilylaivan painolaskentaan turhan karkeita. Jotta painojen hallinta pysyisi käsiteltävällä tasolla, täytyy jaon olla tarkempaa. Oikealla jaottelulla painotietoja pystytään myös käyttämään kustannusten arvioimiseen.



Kevytpaino voidaan jakaa niin sanottuihin litteroihin painolaskentaprosessin tarkentamiseksi ja painotietojen tarkastelun helpottamiseksi. Suomalaisilla telakoilla ja laivanrakennuksen alan yrityksissä käytetään laajalti systeemiperusteista litterakategoriointia. Toimijakohtaisesti tarkka systeemijako saattaa vaihdella. Yritysten välisiä systeemitietoja tulisi käsitellä varoen. Vaikka systeemien nimeämistapa olisi sama tai samankaltainen, sisältö saattaa poiketa merkittävästi. Tehtyä jakoa voidaan edelleen tarkentaa halutuilla alajaoilla. (Räisänen 2000, 5-3–5-4.) Jako systeemien perusteella on yksinkertainen tapa ottaa huomioon kaikki laivan osa-alueet ja samalla kustannusten arviointi ja seuranta on helppo kohdentaa asianmukaisille systeemeille. Räisäsen (2000, 5-2) mukaan ryhmittelyn on oltava tarkkaa ja niin hienojakoista, että painolaskenta voidaan suorittaa yhtä joustavasti eri laivatyypeillekin. Tässä työssä käytetään seuraavanlaista systeemiperusteista litterajärjestelmää:

- L1 Tilaajan toimitukset, tms.
- L2 Painomarginaalit, reservit
- L3 Runko, kansirakenteet, maali
- L4 Sisustus
- L5 LVI, palontorjunta
- L6 Kuljetuskoneisto
- L7 Koneistovarustelu
- L8 Laivan käsittely ja hallinta
- L9 Sähkö, automaatio, merenkulku

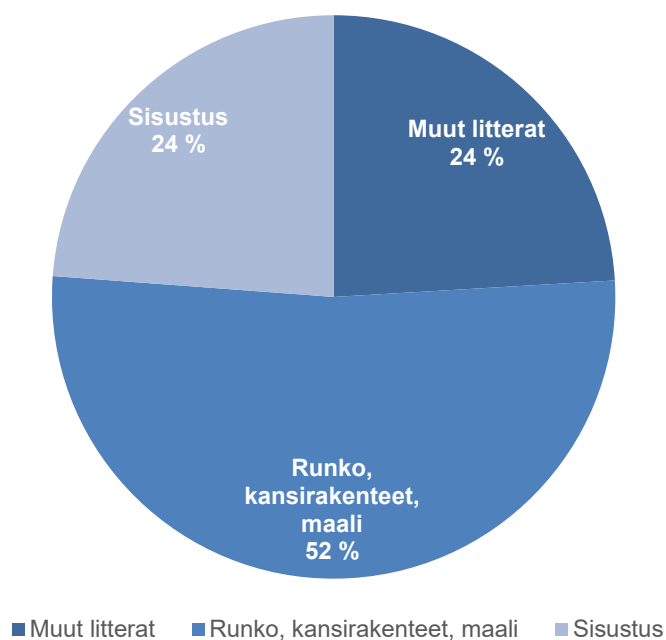
Tässä kategorioinnissa laivan kevytpaino on jaettu yhdeksään eri systeemiin. Systeemeistä ensimmäinen, tilaajan toimitukset, sisältää laivaerittelyssä sovittujen toimituksien painot. Ensimmäinen littera saattaa sisältää myös esimerkiksi painovaroja muutosia varten. Tämän litteran sisältö vaihtelee laivaprojektin tarpeiden mukaan. Laivaerittelyssä tavallisesti esitetään tilaajan omille toimituksille paino sekä näiden painojen muodostama painopiste. Painomarginaalit -systeemin alle voidaan tarvittaessa sijoittaa painoreservejä tai tiedossa olevien muu-

tostöiden painoja. Systeemeistä selvästi merkittävin on L3, sillä risteilylaivan rungon ja kansirakenteiden terästen massa kattaa tyypillisesti noin puolet aluksen kevytpainosta.

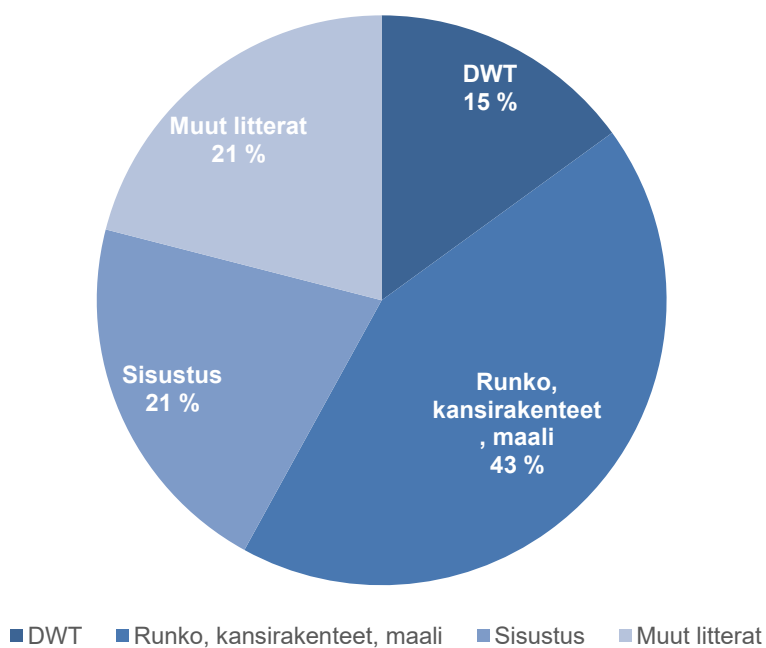
Laivatyyppistä riippumatta rungon ja kansirakenteiden systeemillä on suurin yksittäinen osuus laivan kevytpainosta. Risteilylaivan sisustuksen osuus kevytpainosta on selvästi suurempi muihin laivatyyppisiin verrattaessa. Sisustussysteemi sisältää suurimman osan, ellei kaikkea risteilijän tuottavista elementeistä. Tilaaja haluaa panostaa sisutukseen ja sen laatuun, mikä tarkoittaa, että sisustuksen osuus kokonaiskevytpainosta määrittyy merkittäväksi.

Kuviosta 1 ilmenee suuntaa antava keskiarvoistus risteilylaivan kevytpainon jakautumisesta systeemeittäin. Kuviosta ilmenee rungon, kansirakenteiden ja maalin merkittävä osuus risteilylaivan kevytpainosta. Sisustus kattaa noin neljänneksen kevytpainosta. Muut litterat -osio käsittää kaikki muut aiemmin eriteltyt litterajon ryhmät, sisustusta ja runkoa, kansirakenteita ja maalia lukuun ottamatta. Muut litterat -ryhmittelyyn kuuluvat litterat 1, 2 ja 5–9 kattavat yhteensä karkeasti toisen neljänneksen aluksen kevytpainosta.

Kuviossa 2 laivan kevytpainon jakauman lisäksi samaan kuvioon on lisätty kantavuuden (*DWT*) osuus uppoumasta. Viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana valmistuneiden risteilijöiden keskivertoinen kantavuus on noin 15 % alusten uppoumasta. Risteilylaivan kohdalla kantavuus ei suoranaisesti ole yhteydessä tuottavuuteen, vaan kantavuutta tarvitsee olla luvun 2.1 mukaisesti vain tarvittavasti.



Kuvio 1. Keskiwertoinen 2010-luvulla tai sen jälkeen valmistuneen suuren risteilylaivan ( $L_{pp} > 250 m$ ) kevytpainon jakautuminen (Meyer Turku Oy 2022).



Kuvio 2. Keskiwertoinen 2010-luvulla tai sen jälkeen valmistuneen suuren risteilylaivan ( $L_{pp} > 250 m$ ) uppouman jakautuminen (Meyer Turku Oy 2022).

## 2.2 Painopisteet

Paino ja painopisteet on käsiteltävä yhdessä, jotta pystytään laskemaan yhteenlaskettujen painojen painopisteitä (Räisänen 2000, 5-2). Rakennetun laivan painopisteen (COG) sijainti on ensisijaisen tärkeää saavutettujen ominaisuuksien, kuten vakavuuden ja hydrodynamiikan, kannalta. Painopiste voidaan jakaa edelleen pitkittäis-, poikittais- ja vertikaalisuuntaiseen painopisteeseen.

Mikäli pitkittäissuuntaisen painopisteen, LCG:n, sijainti poikkeaa merkittävästi suunnitellusta, aluksen kellumisasento ei ole tasaköyllä vaan alus viippaa. Viippaus (engl. trim) lisää kulkuvastuksen määrää, jolloin alus tarvitsee lisää konetehoa. (Alanko 2011a, X-2.) Risteilylaivan LCG sijoittuu tavallisesti vähän keskiläivästä ( $L_{pp}/2$ ) perään päin.

Vertikaalisuuntaisen painopisteen (VCG) sijainti vaikuttaa aluksen vakavuuteen. Liian korkea painopiste tekee laivasta epävakaan ja turhan matala painopiste saattaa johtaa liian suureen oikaisevaan momenttiin, joka korkeiden oikaisevien kiihtyvyyksien kautta tarkoittaa ylivakavuutta. Liian matala painopiste tosin harvoin on ongelma varsinkaan risteilylaivan kohdalla, sillä painavia elementtejä, kuten uima-altaita tai vastaavia, halutaan sijoittaa aluksen yläkansille, mikä saattaa nostaa painopisteen korkeutta huomattavastikin.

Poikittainen painopiste vaikuttaa myös valmiin laivan ominaisuuksiin, mutta aikaisessa suunnitteluvaiheessa voidaan olettaa, että painopiste sijoittuu x-akselille laivan symmetrisyyden johdosta. TCG sijoittuu käytännössä aina lähelle x-akselia. Tästä syystä suunnittelun alussa sitä ei tarvitse suuremmin huomioida. Tämä on yleistynyt käytäntö, sillä sivuttaissuuntaista painopistettä pystytään tarkemmin arvioimaan vasta rakennettavan laivan lähestyessä toimitustaan, kun yksityiskohdata tietoa laivan systeemeistä on saatavilla.

Painopisteiden laskemisen perusteoria on kertoa kunkin ryhmän tai objektin laskettu paino sen koordinaatilla, jolloin saadaan momentti. Kun momentti jaetaan yhteenlasketulla painolla, saadaan kaikkien laskettujen objektien yhteinen painopiste. Kaava 6 esittää tätä laskumenetelmää:

$$x_{w,i} = \frac{W_1 \cdot x_1 + W_2 \cdot x_2 + \dots + W_n \cdot x_n}{W_1 + W_2 + \dots + W_n}, i = 1, 2, 3, \dots, n,$$

Kaava 6. Koordinaattiakselikohtaisen painopisteen laskenta.

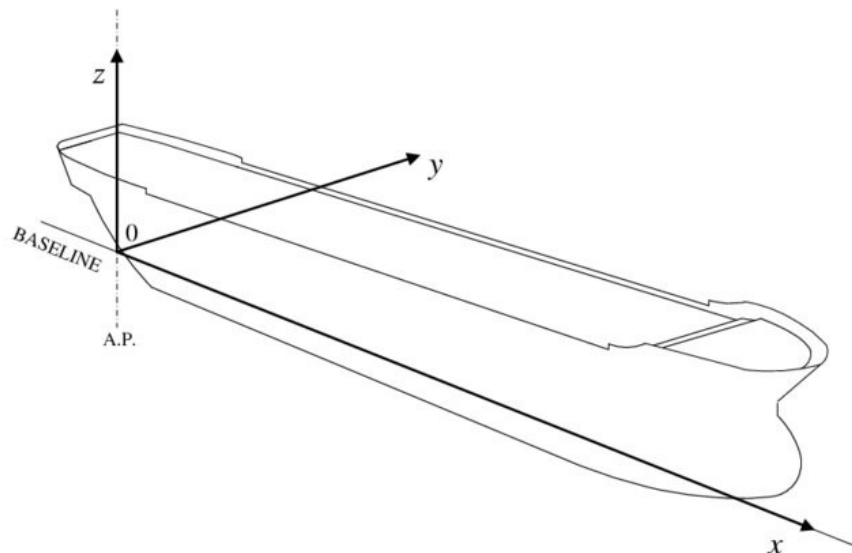
jossa

$x_{w,i}$  painoryhmän painopiste valitulla koordinaattiakselilla,

$W_n$  objektin paino,

$x_n$  objektin painopiste valitulla koordinaattiakselilla.

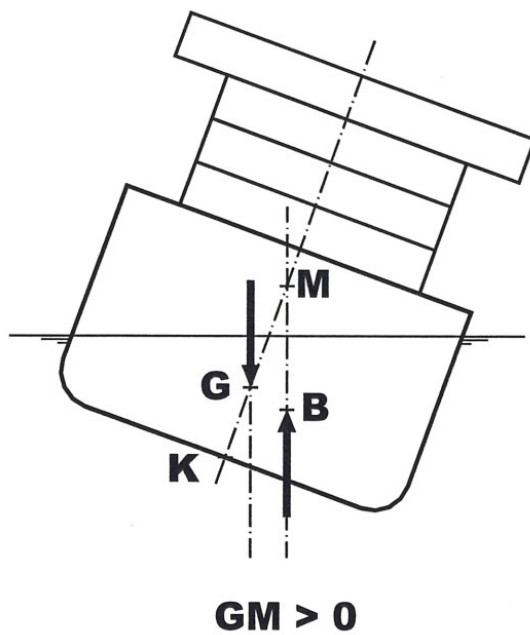
Tässä kaavassa on valittu x-koordinaattiakseli laskettavaksi. Sama laskusuoritus voidaan suorittaa y- ja z-koordinaattiakseleille vaihtamalla x:n tilalle haluttu koordinaatti. Tämä laskusuoritus täytyy suorittaa erikseen jokaiselle koordinaattiakselille, jotta saadaan kolmiulotteinen painopiste. Ainakin eurooppalaisessa laivatekniikan paino- ja vakavuuslaskuissa nollapisteenä eli origona käytetään peräperpendikkelin (A.P.) ja köliinjan (baseline) välistä leikkauspistettä (kuva 1). Peräperpendikkeli on peräsinakselin suuntaisesti kulkeva pystysuora, joka on kohtisuorassa vesilinjaan nähden.



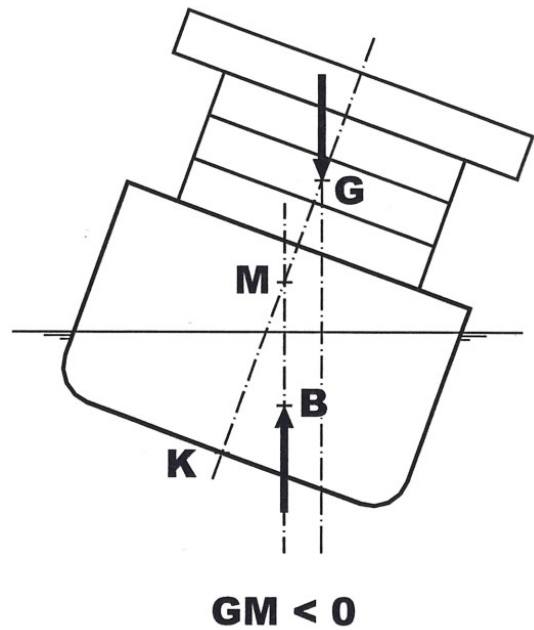
Kuva 1. Laivan koordinaattijärjestelmä, jossa origo on sijoitettuna peräperpendikkelin ja köliinjan leikkauspisteeseen (Ban & Basic 2015, 16).

Kuten aiemmin mainittiin, painopiste vaikuttaa laivan vakavuuteen. ”Laivan vakavuus tarkoittaa pitkittäisen akselin ympäri tapahtuvan kallistuman tarkastelua, viippaus puolestaan poikittaisen akselin suhteen tapahtuvaa pitkittäistä vakavuutta” (Alanko 2011a, XI-2). Laivan alkuvakavuudella tarkoitetaan tarkastelutiannetta, jossa kallistuskulma on maksimissaan noin viisi astetta. Peruseriaate on, että kaikissa laivan operoinnin tilanteissa laivalla on kuvan 2 mukainen positiivinen vakavuus. Positiivinen vakavuus tarkoittaa, että aluksen GM on positiivinen ( $KM > KG$ ) ja uppouman nosteen aiheuttama momentti on suurempi kuin alusta kallistava momentti. Laiva siis pysyy pystyssä. (Alanko 2011a, XI-2.)

Kuvissa 2 ja 3 on esitetty aluksen vakavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä. G on laivan korkeussuuntainen painopiste, M vaihtokeskus, B uppouman tilavuuden keskipiste, K kölipiste (perusviivan ja symmetriatason leikkauspiste) ja GM etäisyys painopisteestä vaihtokeskukseen. Usein käytetään myös termiä KG, kun kuvataan painopisteen korkeutta eli etäisyyttä kölipisteestä painopisteeseen. Kuvassa 1 aluksella on niin sanotusti positiivinen vakavuus eli aluksen kallistuessa syntyvä momentti pyrkii oikaisemaan laivan kallistusta. Toinen ääripää on esitetty kuvassa 2, jossa aluksella on negatiivinen vakavuus. Tällöin uppouman nosteen aiheuttama momentti ei riitä kumoamaan laivaa kallistavaa momenttia. Toisin sanoen aluksen kallistuessa syntyvä momentti pyrkii kallistamaan laivaa entistä enemmän.



Kuva 2.  $GM > 0$ , positiivinen vakavuus. Aluksen kallistuessa *oikaiseva* momentti. (Alanko 2011a, XI-2.)



Kuva 3.  $GM < 0$ , negatiivinen vakavuus. Aluksen kallistuessa *kallistava* momentti. (Alanko 2011a, XI-2.)

### 2.3 Kevytpainon arviointi

Painoarvio on ensimmäinen askel painohallintaprosessissa laivaprojektin lopullisen painon määrittämiseksi (Schuster 2001, 4-1). Kuten johdannossa todettiin, ensimmäinen arvio konseptivaiheessa laivan painosta perustuu telakan tai yrityksen omista tilastoista saataviin suhteutettuihin kertoimiin tai parametriin menetelmiin. Tämä yhdessä ammattilaisen suorittaman loogisen päättelyn ja rationalisoinnin kanssa tulisi johtaa noin  $\pm 5\%$ :n tarkkuuteen (Schuster 2001, 4-2).

Painohallintaprosessin tarkoitus on varmistaa, että alus toimitetaan laivanrakennuksen runkosuunnittelun rajoissa. Painohallintaprosessi kuvaa, miten painoja hallitaan ja kuinka tarkkoja kunkin vaiheen painoarviot ovat. Painoarvioita ei tule antaa, ellei sen tarkkuutta ole tutkittu. (Schuster 2001, 4-1–4-2.)

Kirjallisuudessa esiintyy lukuisia painoarviointimenetelmiä. Näitä ovat muun muassa yksikköpainoihin, suhteisiin, algoritmeihin, perustietoihin, rationalisointiin,

statistiikkoihin, tilavuustiheyteen ja kansipinta-aloihin perustuvat yhtälöt. Perinteinen yksikköpainoihin perustuva painoarvioyhtälö on yksinkertaisesti paino yksikköä kohden kerrottuna yksiköiden lukumäärällä, mihin lisätään epävarmuustekijä. Tässä menetelmässä hankaluus tulee siitä, että arvioijan täytyy tietää valmiin aluksen yksikkömäärät ennen kuin järjestelmävastaavat ovat viimeistelleet kunkin järjestelmän suunnitelmat. Esimerkiksi sisustussuunnittelun painoa voidaan arvioida kertomalla sisustusalueiden pinta-ala aluekohtaisella painokertoimella.

Tässä työssä kevytpainon arviointi tapahtuu sekä yksikköpainoihin perustuvien kertoimien avulla että regressiomenetelmällä. Kevytpaino jaetaan luvun 2.1 mukaisesti. Kevytpainoa arvioidaan systeemeittäin, jolloin kertoimet ja regressioyhtälöt voidaan yksilöidä systeemin tarpeiden mukaan. Yksittäinen systeemi voidaan tarpeen vaatiessa jakaa osiin. Esimerkiksi 5:n litteran (L5) kohdalla voidaan arvioida LVI:n ja palontorjunnan painot erikseen. Jokaisella systeemillä on oma referenssimääre, joka voidaan arvioida tai se voidaan laskea tilastoitujen, jo rakennettujen laivojen perusteella.

## 2.4 Painopisteiden arviointi

Suunnittelun aikaisessa vaiheessa epävarmuustekijät painoarviossa ovat lähes aina vakavampia kuin aluksen hydrostatiikkaan tai hydrodynamiikkaan liittyvät. Huomattavasti enemmän laivan suunnitteellisia ongelmia syntyy huonoista painoarvioista kuin muiden paljon monimutkaisempien laskelmien virheistä. Epävarmuuksien minimoimiseksi on kaksi tapaa: ensimmäinen on kerätä hyvää ja luotettavaa painotietoa sekä käyttää sitä järkevästi, toinen on painoarvion jatkuva iterointi sitä mukaa kun luotettavampaa tietoa tulee saataville. (Watson 1998, 32.)

Mitä aikaisemmassa vaiheessa saadaan todenmukainen ja luotettava arvio sekä pitkittäiselle että korkeussuuntaiselle painopisteelle, sitä enemmän saadaan ”pelivaraa” muuhun suunnitteluun. Esimerkiksi runkomuotoja voidaan vielä muuttaa ensimmäisten arvioiden jälkeen. Painopisteen avulla päästään myös käsiksi run-



gon tilavuuden keskipisteeseen, kun LCB asetetaan samaksi kuin pitkittäissuuntainen painopiste. Kun painopiste ja uppouman tilavuuden keskipiste ovat samalla vertikaalisella vektorilla, laiva kelluu tasakölillä.

Papanikolaou (2014, 177–178) ehdottaa työssään KG:n arviointiin käytettäväksi seuraavaa kaavaa:

$$KG = C \cdot D_S,$$

Kaava 7. KG:n laskukaava (Papanikolaou 2014, 177–178).

jossa muokattu laidan korkeus  $D_S$  määritellään seuraavasti:

$$D_S = D + \frac{\nabla_{SS}}{L_{pp} \cdot B},$$

Kaava 8. Laitakorkeus  $D_S$  (Papanikolaou 2014, 177–178).

ja  $\nabla_{SS}$ : kansirakenteiden ja –rakennusten tilavuus.  $C$ :n arvot voidaan pitää taulukon 1 mukaisina. Taulukosta voidaan todeta kertoimen  $C$  arvon osuvan matkustajalaivan kohdalla välille 0,67–0,72.

Tavallisesti, laivan koon kasvaessa painokertoimet pienenevät. Tämä johtuu lähinnä seuraavista syistä:

1. Paikallisia kuormituksia tukevat rakenneosat pysyvät samanlaisina, jolloin pienemmille laivoille koituu suhteellisesti enemmän teräspainoa.
2. Yleensä alueet ja pinnat kasvavat tekijän  $\Delta^{2/3}$  mukaan.
3. Miehistön ja heidän majoitustensa laajuus kasvaa vain vähän tai ei ollenkaan, kun laivan kokoa kasvatetaan.
4. Propulsioteho kasvaa  $\Delta^{2/3}$  suhteen.

Taulukko 1. Arvoja kertoimelle C eri laivatyyppien mukaan. (Dudszus and Danckwardt 1982, 243.)

Laivatyyppi	C
Matkustajalaivat	0,67–0,72
Suuret rahtilaivat	0,58–0,64
Pienet rahtilaivat	0,60–0,80
Irtolastilaivat	0,55–0,58
Tankkilaivat	0,52–0,54
Kalastusalukset	0,66–0,75
Hinaajat	0,65–0,75

Kirjallisuudessa esitettyjen menetelmien lisäksi painopisteitä voidaan arvioida hyvän ja luotettavan painotiedon avulla. Jos laadukkaita painotilastoja on käytettävissä, niiden käyttö johtaa parempaan arvioon. Niitä voidaan käyttää irrallaan tai yhdistämällä tunnettujen laskukaavojen kanssa. Tämä tietenkin pätee muihinkin arvioitaviin suureisiin painopisteiden lisäksi.

Pitkittäisen painopisteen sijainti tulisi saada mahdollisimman lähelle LCB:tä, jolloin laiva kelluu tasakölillä. Tähänkin otetaan yleensä kantaa laivaerittelyssä. Erittelyssä usein annetaan etäisyys tai prosentti, jonka sisällä pitkittäisen painopisteen ja tilavuuden keskipisteen välisen etäisyyden tulisi olla. Suhteellisen tarkan LCG:n arvion saamiseksi on hyödyllistä, mikäli käytettävissä on tilastoitua tietoa jo rakennetuista laivoista. Painotilastoista voidaan laskea halutun parametrin mukaan arvio uudelle laivaprojektille.

## 2.5 Kuollutpainon arviointi

Kantavuuden arviointi on suoraviivaisempaa kuin esimerkiksi kevytpainon tai painopisteiden arviointi. Aluksen matkustajakapasiteetin, reitin, polttoaine- ja voiteluöljykulutuksen ja muiden luvussa 2.1 esiteltyjen kantavuutta muodostavien te-

kijöiden perusteella voidaan hyvin tarkasti arvioida tarvittavaa kuollutpainokapasiteettia. Samoin kuin kevytpainoon, myös kuollutpainoon on hyvä jättää jonkin suuruinen marginaali tai reservi. Laivanrakennusprosessin aikana tilaaja usein haluaa muutoksia tehtävän alkuperäiseen suunnitelmaan. Jos muutos on esimerkiksi lisätä uima-altaiden määrää, on tärkeää, että alkuperäiseen painolaskelmaan on jätetty varaa näille mahdollisille muutoksille.

## 2.6 Painotilastot

Tietokanta laivaprojekteista, rakennetuista laivoista, komponenteista ja materiaaleista on korvaamattoman tärkeä painoarviota tehtäessä. Tilastoitujen laivojen arvoja ja dataa voidaan käyttää referenssinä uudelle laivaprojektille. Tilastoja voidaan hyödyntää muun muassa regressioanalyyseissä ja kertoimien määrittämisessä.

Hyödynnettäessä painotilastoja laivasuunnittelun painolaskennassa on otettava huomioon, että tavallisesti modernit laivaprojektit ovat rakenteelliselta painoltaan kevyempiä kuin vastaavat vanhemmat laivanrakennukset, joiden kapasiteetit ja/tai spesifikaatiot ovat vertailukelpoisia. Tämä johtuu lähinnä tekniikan kehityksestä ja laskennallisten menetelmien ja optimointimenetelmien hyödyntämisestä laivan rakennussuunnittelussa. Tässä on hyvä ottaa huomioon, että joidenkin laivatyyppien kohdalla, kuten tankkereilla, turvallisuussäädösten jatkuva kehitys asettaa tiukempia sääntöjä laivoille. MARPOLin meriympäristön suojelumääräykset ja erityisesti sen esittämä kaksoisrunko-konsepti johtivat kasvaviin teräspainovaatimukseen säiliöaluksilla. (Papanikolaou 2014, 179.)

Risteilylaivojen kohdalla pätee, että modernit laivarakennukset ovat teräspainoltaan kevyempiä kuin vanhemmat laivat. Uusilla laskentaohjelmilla voidaan optimoida rakenteita, jolloin säästetään teräksen painossa. Myös erityisen lujien terästen hyödyntäminen paikoissa, joissa kuormat ovat suuria saattaa säästää teräspainossa huomattavasti. Painotilastoja rakennettaessa olisi täten hyvä ottaa laivaprojektin rakennusvuosi huomioon.

Myös varustamokohtaisia eroja esiintyy laivojen väliltä. Joillakin varustamoilla laivat ovat ylellisempiä ja avaratyylisiä ja joillakin tiheämmin pakattuja ja yksinkertaisemmin varusteltuja. Painotilastoista on nähtävissä erot kevytpainossa varustamoittain. Varustamokohtaisia eroja tulisi huomioida risteilylaivan painoarvioita tehdessä.

### 3 Painolaskutyökalu

Työkalu toteutetaan Microsoft Excel -taulukkolaskentaohjelmassa. Tavoitteena oli luoda työkalu, joka arvioi laivan painoja ja painopisteitä käyttäjän syöttämien arvojen pohjalta. Tämä yksinkertaistaisi myyntiprojektin tai aikaisen suunnittelun prosessia, jolloin teoriainsinöörien työkuormitus aikaisiin suunnittelutehtäviin liittyen pienenee ja työpanos voidaan suunnata muualle. Arviointi perustetaan pitkälti luvussa 2.5 esitetystä tilastoidusta datasta muodostettaviin yhtälöihin.

Työkalu tarjoaa kaksi eri menetelmää painoarviointiin. Ensimmäinen menetelmä perustuu yksikkökertoimiin. Toinen menetelmä perustuu tilastoidusta painotiedoista luotuihin regressioyhtälöihin. Näiden kahden päämenetelmän lisäksi tilavuutta voidaan arvioida geometrisesti. Tavoitteena oli luoda mahdollisimman yksinkertainen työkalu, jolla päästään alkusuunnitteluvaiheen tarpeisiin nähden riittävän tarkkoihin tuloksiin. Tässä luvussa myös arvioidaan työkalun herkkyyttä ja luotettavuutta tilastotieteellisestä näkökulmasta.

#### 3.1 Syöte

Syötettävien suureiden valinnassa on otettava huomioon, että risteilylaivan konseptisuunnitteluvaiheessa tiedettyjä parametrejä on käytettävissä hyvin vähän. Työkalun on näiden syötettävien arvojen pohjalta pystyttävä tarjoamaan järkevä arvio useista eri laivan parametreista. Syötettävät suureet voidaan jakaa kolmeen ryhmään: päämittoihin, kuormaan ja koneistoon ja suorituskykyyn.

Käyttäjä syöttää työkaluun suunniteltavan laivan päämitat, kuten pituudet, leveydet, syväydet. Näiden lisäksi kantavuuden laskemiseksi tarvitaan tietoja laivan matkustaja- ja miehistökapasiteetista, koneistosta ja suorituskyvystä. Näihin syötettyihin arvoihin perustuu sekä kerroinmenetelmän että regressiomenetelmän laskukaavat. Pääsyötetietojen lisäksi käyttäjä pystyy muokkaamaan tiettyjä kertoimia kyseessä olevan laivaprojektin tarpeiden mukaan. Tämän lisäksi reservin tai toisin sanoen painomarginaalin määrän pystyy määrittämään halutuksi. Pai-

noreservillä voidaan jättää ”pelivaraa” kevytpainoon tai kantavuuteen tulevaisuudessa syntyvien muutoksien varalle. Mikäli käyttäjä haluaa hyödyntää geometrista menetelmää, täytyy hänen täyttää kansikorkeudet ja kansirakenteen leveydet kansittain.

### 3.2 Kerroinmenetelmä

Kerroinmenetelmä laskee arviot kevytpainolle, kantavuudelle, korkeussuuntaiselle painopisteelle, uppoumalle ja uppouman tilavuudelle. Kerroinmenetelmä alkaa arvioiduista yksikkömääristä. Laivan kevytpainoa kerryttävät tekijät on jaettu helpoiten eroteltaviin systeemeihin. Kevytpainon systeemit on määriteltä siten, että ne skaalaavat joko tilavuuden, alan tai konetehon mukaan. Kantavuus on jaettu suurimpien tekijöiden mukaan. Kantavuuden systeemeihin vaikuttaa henkilömäärä, merimatkan ja risteilyn pituus, koneistokonfiguraatio ja nopeus. Yksikkömäärät voidaan arvioida käyttäjän syöttämien arvojen perusteella käyttäen apuna laivatilastoja. Työkalu kertoo yksikkömäärät käyttäjän määrittämällä yksikkökohtaisilla painokertoimilla. Näin voidaan arvioida sekä kevytpainoa että kantavuutta.

Korkeussuuntaisen painopisteen arvioimiseksi täten saadut painoarvot kerrotaan painopistekertoimilla. Painopistekertoimet esitetään painopisteen suhteena laita- korkeuteen. Suurten systeemien painopisteiden suhteellinen korkeus pysyy risteilylaivasta riippumatta suhteellisen samana, jolloin arvoja ei välttämättä tarvitse muuttaa laivasta toiseen. Käyttäjä pystyy kuitenkin muuttamaan painopistekertoimia, mikäli tähän on tarve. Kaavan 6 mukaisesti päästään käsiksi painopisteisiin. Systeemikohtaisen painon ja painopisteen avulla lasketaan systeemin aiheuttama momentti. Momenttien summa jaetaan systeemikohtaisten painojen summalla, jolloin saadaan systeemien yhteinen painopiste.

### 3.3 Regressiomenetelmä

Regressiomenetelmä on jaettu edelleen kahteen erilliseen arviointityyliin – systeemi- tai litterakohtaiseen ja kolmijakotyylisiin. Regressiomenetelmän avulla arvioidaan kevytpainoa, kantavuutta, tilavuuksia, pitkittäis- ja korkeussuuntaista painopistettä ja vakavuutta. Lähes kaikissa regressiomenetelmän funktioissa syötettävänä muuttujana on bruttotilavuus. Valtaosa arvioitavista suureista kasvaa suhteessa bruttotilavuuteen ja tilastoidun tiedon perusteella voidaan sovittaa tarkka kuvaaja kullekin suureelle.

Litterakohtainen jako laskee luvussa 2.1 esitetyn litterajaon mukaisesti jokaiselle systeemille painot, momentit ja painopisteet. Regressiomenetelmän laskukaavat perustuvat täysin tilastoituihin tietoihin. Litterakohtaisesti lasketuista arvoista voidaan johtaa kokonaisuuden parametrit (*kevytpaino*, *KG*, *LCG*). Kerroinmenetelmästä poiketen, regressiomenetelmillä pystytään helposti käsittelemään myös pituussuuntaisia painopisteitä.

Kolmijakomenetelmä perustuu aikaisemmin rakennettujen laivojen teräsrakenteiden kolmeen osaan jakoon. Teräsrakenteet on jaettu runkoon, kansirakenteeseen ja allaskannen yläpuoliseen osaan. Rungon ja kansirakenteen jako on hyvin suoraviivainen ja tehdään tavallisesti venekannen tasolta. Rungon ja kansirakenteen painoarvio tällä menetelmällä on suhteellisen tarkka. Allaskannen yläpuolisen osan koko ja laajuus vaihtelevat laivojen välillä. Tämä vaikeuttaa vartenotettavan arvion tekemistä. Allaskannen yläpuolisen osan vaikutus koko laivan painoon on kuitenkin suhteellisen pieni. Tällä menetelmällä saadaan rungon ja kansirakenteen tilavuudesta ja painosta tarkka arvio ja vaikka allaskannen yläpuolisen osan painon ja tilavuuden määrittäminen ei olekaan yhtä tarkka, on lopputulos kuitenkin hyvä.

Tätä jakoa käyttäen saadaan laivakohtaisesti tilastoidusta datasta muodostettua regressioyhtälöt näille kolmelle laivan teräsrakenteen osalle erikseen. Joissakin tapauksissa tulokset tarkentuvat, kun hyödynnetään tätä kolmijakoa. Kolmijaon

regressioyhtälöistä saadaan eriteltyä tilavuudet, kuutiopainot ja painot osakohtaisesti. Kolmijaon perusteella saatu painoarvio lasketaan yhteen muiden systeemi-kohtaisten painojen kanssa, jolloin saadaan toinen arvio laivan kevytpainosta.

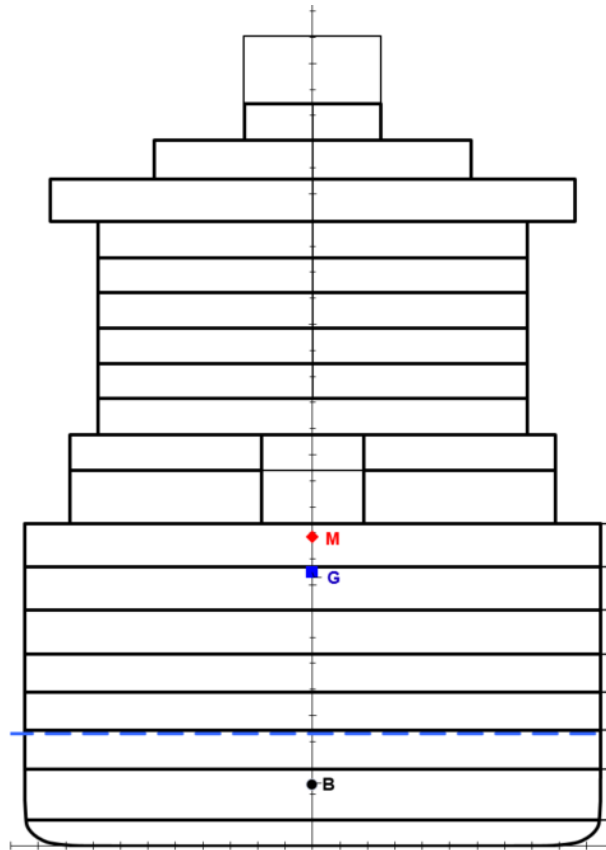
### 3.4 Geometrinen määrittäminen

Edellä mainittujen menetelmien lisäksi arvio laivan systeempinta-alasta ja tilavuudesta voidaan tehdä geometrisesti. Työkalun käyttäjä voi määrittää kansien määrän, kansikorkeudet, kansirakenteen leveydet, aukot ja korjauskertoimet, jolloin työkalu laskee pinta-alat ja tilavuudet kansittain kokonaisuuden määrittämiseksi. Kansirakenne on jaettu tässä kolmeen osaan, jotta tämän leveyden voi syöttää kansittain mahdollisimman tarkasti.

Käyttäjällä voi määrittää aukkoja laivaan, jotta atriumien, promenadien tai vastaavien tilojen määrittäminen onnistuu. Aukkojen avulla mahdollistetaan atriumien kaltaisten usean kannen korkeisten tilojen huomioiminen pinta-alalaskuissa. Aukot voidaan asettaa joko sisältyviksi tilavuuslaskentaan tai jättää siitä pois. Tämä mahdollistaa myös avointen rakenteiden huomioimisen tilavuuslaskelmissa.

Käyttäjän määrittelemän geometrian mukaan työkalu piirtää laivalle kuvan 4 mukaisen poikkileikkauksen, jolla voidaan havainnollistaa laivan muotoa. Tähän samaan poikkileikkaukseen piiryy uppouman painopiste, kevytpainon korkeussuuntainen painopiste ja vaihtokeskus. Näiden pisteiden avulla voidaan alustavasti arvioida aluksen vakavuutta.





Kuva 4. Esimerkki geometrisen määrittämisen mukaisesta laivan poikkileikkauksesta ja pisteistä B, G ja M (Meyer Turku Oy 2022).

Kuvan 4 kuvio piirretty automaattisesti työkalun käyttäjän syöttämien tietojen mukaan. Rungon leveys skaalautuu vesiviivan leveyden mukaan ja korkeus käyttäjän syöttämien kansien ja kansikorkeuksien mukaan. Myös aiemmin mainitut aukot piirtyvät kuvioon. Tästä esimerkki on nähtävissä yllä olevan kuvion keskellä, M-pisteen yläpuolella. Kuvio auttaa myös syötevirheiden tunnistamisessa, sillä käyttäjä voi visuaalisesti tarkastaa suunniteltavan laivan poikkileikkauksen.

### 3.5 Tuloste

Tulosteena työkalu antaa arvot kevytpainolle, kantavuudelle, painopisteille ( $LCG$ ,  $VCG$ ), tilavuuksille (kokonaistilavuus, bruttotilavuus, rungon tilavuus, kansirakenteen tilavuus), uppoumalle, uppouman tilavuudelle ja kuvan 4 vakavuuspisteille.

Koska yhden absoluuttisen arvion antaminen on oletetusti mahdotonta tai vähintäänkin haastavaa, työkalu tarjoaa jokaiselle arvioitavalle suurelle vaihteluvälin. Vaihteluvälien suuruus on noin  $\pm 1$  %. Tarkoituksena on, että toteutunut arvo sijoittuisi johonkin annetulle välille. Tämän todennäköisyyttä käsitellään lisää luvussa 3.6. Poikkeuksena tähän on kantavuuden arvio. Kantavuus vaihtelee laivojen välillä paljon ja sitä on siten hankala arvioida regressiomenetelmällä yhtä tarkasti. Tarkempaan tulokseen päästään luvun 2.5 mukaisesti tai tämän työkalun kohdalla kerroinmenetelmällä, jolloin käyttäjä pystyy itse hyvin vapaasti syöttämään kantavuuteen huomioitavat painot. Regressiomenetelmä on selkeästi automaattisempi, eikä käyttäjä pysty yhtä vapaasti – ainakaan ilman mittavia muutoksia – muuttamaan regressiokaavoja.

Kun työkalun avulla on tuotettu luotettava painoarvio, voidaan lasketun painon avulla jalostaa muitakin hyödyllisiä suureita. Uppouma on laskettavissa, kun tiedetään sekä kevyt- että kuollutpaino. Uppouman kautta päästään käsiksi uppouman tilavuuteen. Regressioyhtälöitä voidaan muodostaa myös kuvaamaan laivan tilavuuksia. Arvioituja painopisteitä voidaan hyödyntää vakavuuden tarkastelussa. Kun rakennetaan tämänkaltaista arviointityökalua, on helppo ottaa mukaan tulosteeseen myös muita parametreja, kuten tämän luvun alussa kuvaillaan.

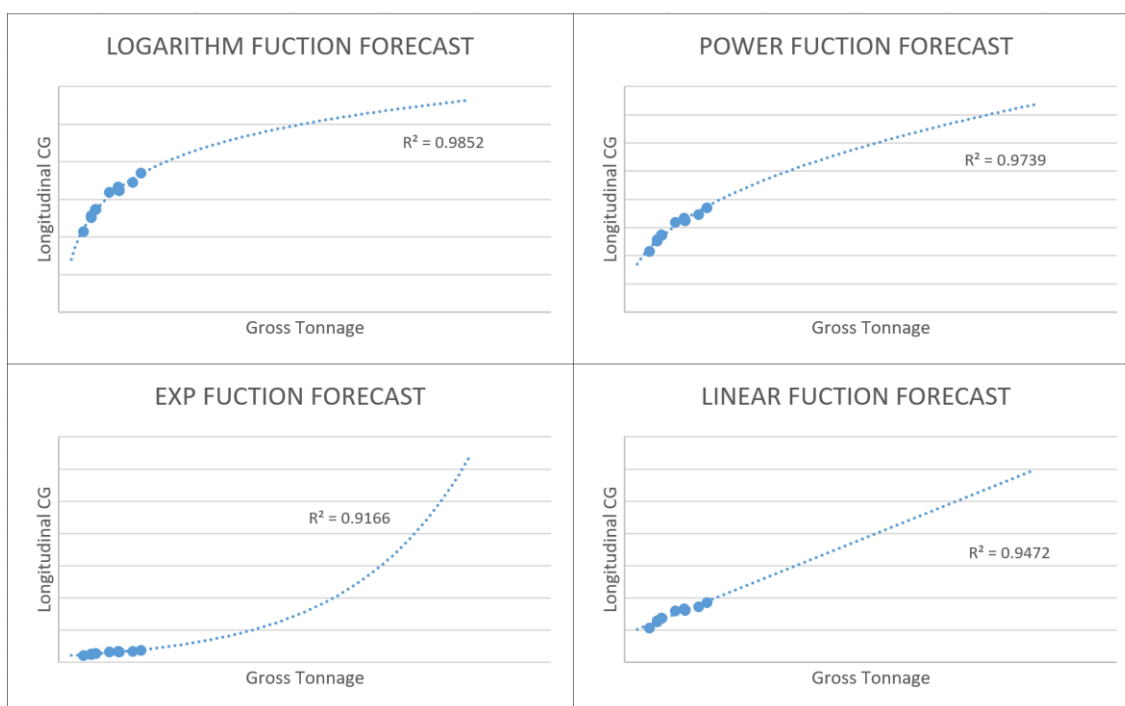
### 3.6 Luotettavuus

Kaikki laivan suureet eivät kasva samassa suhteessa valittuun muuttujaan vaan on varmistuttava siitä että, kasvaako suure lainkaan, kasvaako suure lineaarisesti vai jollain muulla tavalla. Siksi on analysoitava arvojen käyttäytymistä suurekohtaisesti. Tällä tavalla voidaan varmistua annetun arvion tarkkuudesta.

Jokainen työkalussa käytetty regressiofunktio on analysoitu käyttäen pienimmän neliösumman menetelmää. Pienimmän neliösumman menetelmän (*PNS-menetelmä, engl. least squares method*) avulla pyritään optimoimaan annetulle pisteistölle paras sovite (Kenton 2022). Menetelmän avulla voidaan siis tunnistaa parhaiten sopiva suora tai käyrä kuvaamaan annettuja pisteitä. Tämän suoran tai käyrän avulla voidaan siten arvioida laivan arvoja syötetyn muuttujan perusteella.

PNS-menetelmän tulosta kuvataan tunnuksella  $R^2$ . Mikäli tämän arvo on 1, kuvaaja vastaa täydellisesti annettuja pisteitä. Mitä lähempänä  $R^2$ :n arvo on yhtä, sitä parempi vastaavuus sovitetulla suoralla tai käyrällä on annettuihin pisteisiin. Tässä työssä regressioyhtälöihin sovitettuja funktioita on neljää eri tyyppiä. Potenssi-, eksponentiaali-, logaritmi-, ja lineaarifunktioita. Kuvan 5 kuvaajissa on esitetty erään litteran pituussuuntainen painopiste bruttotilavuuden funktiona. Kuvasta nähdään eri funktiotyyppien käyttäytyminen ja annetulle pistejoukolle sovitettun kuvaajan  $R^2$ -arvo. Tästä voidaan todeta, että juuri tälle kyseiselle pistejoukolle paras sovite saadaan logaritmisella funktiolla ( $R^2 = 0,9852$ ).

Kuvan 5 kuvaajia tarkastellessa on huomioitava, että arvojen käyttäytymisestä kuvaajien alkupäiden pisteiden ulkopuolella ei ole tutkimustietoja. Sovitteen avulla lasketut arvot pätevät tämänhetkisen tiedon mukaan vain tunnettujen pisteiden alueella. Kuvan 5 tarkoituksena on esitellä eri sovitettujen funktiotyyppien käyttäytymistä, jotta voidaan tunnistaa paras käytettävä sovite.



Kuva 5. Erään litteran pituussuuntaisen painopisteen painotilastojen pisteisiin sovitetut eri funktiotyypit, niiden ennusteet ja sovitettujen kuvaajien  $R^2$ -arvot.

Edellä esitetty analyysi on toistettu jokaiselle käytetylle regressiofunktiolle eli jokaiselle pistejoukolle on etsitty paras sovite. Tämä johtaa regressioyhtälöitä käyttäen parhaaseen mahdolliseen tulokseen eli työkalu tarjoaa mahdollisimman tarkan arvion perustuen tilastoituuun painotietoon. Useamman asteen funktiot on karistettu pois tutkimuksesta funktioiden tekijöiden määrän minimoimiseksi.

## 4 Tapaustutkimukset

Työkalun testaamiseksi suoritetaan tapaustutkimuksia kolmen esimerkkialuksen avulla. Nämä alukset ovat jo rakennettuja tai rakenteilla olevia suuria risteilylaivoja, joista on olemassa luotettavaa painotietoa. Luotettava painotieto aluksista mahdollistaa työkalun laskemien painoarvioiden analysoinnin ja tarkkuuden tutkimisen. Näistä kolmesta aluksesta käytettävä painotieto on tiukasti luottamuksellista, mistä syystä syötetyt arvot ja tulokset tässä työssä ilmoitetaan dimensionaalittomina arvoina. Vaikka arvot ovat esitettynä dimensionaalittomassa muodossa, ovat alusten arvot keskenään oikeassa suhteessa suurekohtaisesti.

### 4.1 Esimerkkialukset

Käytettäviksi esimerkkialuksiksi valittiin mahdollisimman eri kokoisia risteilyaluksia, joista kaikista on saatavilla luotettavaa ja todenmukaista painotietoa. Jotta voidaan todeta, että työkalu tuottaa uskottavia arvioita eri kokoisille risteilyaluksille, on valittu tapaustutkimuksiin kolme eri suuruista alusta: yksi pienehkö, yksi keskisuuri ja yksi erittäin suuri risteilylaiva. Näitä aluksia tutkimalla pyritään saamaan mahdollisimman laaja ymmärrys eri kokoisten alusten tuloksista mahdollisimman pienellä otannalla.

### 4.2 Lähtötiedot

Taulukossa 2 on esitettynä kolmen esimerkkialuksen päämittoja. Arvot on esitetty dimensionaalittomassa muodossa siten, että ensimmäisen esimerkkialuksen arvo on muutettu helposti vertailtavaan suuruuteen. Kuitenkin niin, että arvojen suuruusluokka on jokseenkin lähellä todellisuutta. Esimerkkialusten päämittojen suhteet ovat todenmukaiset jokaista esitettyä suuretta kohden laivojen välillä. Taulukosta on todettavissa, että esimerkkialukset ovat kaikki selvästi eri kokoisia ja valitut laivat täten edustavat mahdollisimman kattavasti suurten risteilylaivojen spektriä. Tapaustutkimuksen alusten täytyy olla eri kokoluokan laivoja, jotta voidaan testata työkalun toimivuutta mahdollisimman laajalla alueella.

Taulukko 2. Tapaustutkimuksissa käytettyjen esimerkkialusten päämitat dimensioaalittomina arvoina.

	<b>Laiva 1</b>	<b>Laiva 2</b>	<b>Laiva 3</b>
<b>Pituus</b>	100,00	111,20	120,25
<b>Leveys</b>	40,00	46,90	54,25
<b>Suunn. syväys</b>	10,00	10,90	11,50
<b>Bruttotilavuus</b>	100 000	165 000	225 000

Kaikki valitut alukset voidaan lukea suuriksi risteilijöiksi. Tämä tarkoittaa sitä, että perpendikkeliä välinen etäisyys on näillä laivoilla suurempi kuin 250 metriä. Esimerkkilaivoiksi on valittu vain suuria risteilijöitä, koska Meyer Turun telakalla rakennettavat alukset kuuluvat pääsääntöisesti tähän kategoriaan.

Taulukon 2 suureiden lisäksi esimerkkilaivoista syötetään lastin ja henkilökapasiteettien arvot sekä koneisto- ja suorituskykytiedot. Koska bruttotilavuuden kasvu kuvastaa suhteellisen hyvin arvioitavien suureiden kasvua, riittää vain sen täyttäminen jo monen suureen arvion saamiseen.

#### 4.3 Tulokset

Taulukossa 3 on esitettyä tapaustutkimuksen esimerkkialusten tulosten tarkkuuksia suure- ja laivakohtaisesti. Työkalun laskemia arvoja verrataan esimerkkilaivojen todellisiin arvoihin, jolloin voidaan analysoida arvioiden tarkkuutta. Taulukon alla käsitellään tuloksia ja niiden tarkkuuksia vielä yksityiskohtaisemmin. Työkalun laskemat vakavuuspisteet ovat suuntaa antavia, mistä syystä vakavuustietoja ei ole otettu tähän vertailuun mukaan. Vakavuuden arviointi ei ole konseptisuunnitteluvaiheessa vielä yhtä ajankohtaista painolaskentaprosessin kannalta kuin muut tämän työkalun tarjoamat arviot. Taulukossa 3 on osa luvuista

alleiviivattu. Tämä korostaa niitä arvoja, jotka eivät ole  $\pm 1$  %:n tarkkuuden mukaisia. Näiden tulosten tarkentamiseksi voidaan vielä tulevaisuudessa tehdä tutkimusta. Tämän työn puitteissa ei näihin arvoihin pystytty perehtymään tarkemmin.

Taulukko 3. Tapaustutkimuksen alusten tulosten tarkkuus. Työkalun tulokset verrattuna alusten todellisiin arvoihin.

	Laiva 1	Laiva 2	Laiva 3
<b>Kevytpaino</b>	-0,199 %	+0,734 %	+0,936 %
<b>XCG</b>	-0,771 %	+0,685 %	+0,124 %
<b>ZCG</b>	+0,672 %	-0,746 %	+0,799 %
<b>Kokonaistilavuus</b>	-0,818 %	+0,671 %	+0,666 %
<b>Bruttotilavuus</b>	+0,833 %	+0,310 %	-0,407 %
<b>Rungon tilavuus</b>	-0.388 %	<u>-3.135 %</u>	<u>+2,149 %</u>
<b>Kansirak. tilavuus</b>	+0,931 %	<u>+5,868 %</u>	<u>-2,591 %</u>
<b>Uppouma</b>	-0,010 %	-0,680 %	+0,489 %
<b>Uppouman tilavuus</b>	-0,006 %	-0,678 %	+0,490 %
<b>Teräspaino</b>	<u>-3,904 %</u>	<u>+4,481 %</u>	+0,900 %

Geometrisen määrittelyn tulokset on jätetty taulukon 3 vertailusta pois. Jotta geometrisen määrittelyn perusteella voi saada järkeviä tuloksia, täytyy työkalun käyttäjän itse syöttää kansikorkeudet, kansirakenteen leveydet ja muut luvussa 3.4 määritellyt tiedot. Koska jokainen käyttäjä voi itse vapaasti vaikuttaa geometrisen määrittelyn tuloksiin, on tuloksia haastavaa ennakoita. Jotta tulosten tulkinta pysyy selkeänä, voidaan vertailuun ottaa mukaan vain helposti vertailtavat

tulokset. Geometrisen määrittelyn avulla saadaan arviot kokonaistilavuudesta, rungon tilavuudesta sekä kansirakenteen tilavuudesta.

Kuten luvussa 3.5 on todettu, tarkkaa kantavuuden arviota on hankala saada regressiomenetelmällä ja tarkempaan tulokseen päästään kerroinmenetelmän avulla. Samoin kuin geometrisen määrittelyn kohdalla, myös kerroinmenetelmän kohdalla pätee, että käyttäjä pystyy hyvin vapaasti vaikuttamaan kantavuuden arvion tulokseen. Siksi myös kantavuuden tuloksia on hankala asettaa samaan vertailuun regressiomenetelmän avulla laskettujen tulosten kanssa, vaikka kantavuus onkin painolaskennallisesta näkökulmasta yksi laivan tärkeimmistä arvoista. Kantavuudesta voidaan kuitenkin todeta, että kerroinmenetelmällä päästään hyvin lähelle tarvittavaa suuruutta. Tarvittava suuruus tarkoittaa, että suunniteltu kantavuus kattaa kaikki siihen lukeutuvat painot.

Rungon ja kansirakenteen tilavuuksissa on epätarkkuutta, kun niitä tarkastellaan itsenäisesti sekä laivan 2 että laivan 3 kohdalla. Tilastoista päätellen rungon ja kansirakenteen tilavuuksien väliset suhteet vaihtelevat laivoittain. Joidenkin laivojen kohdalla runko on tilavuudeltaan kansirakennetta suurempi, toisten laivojen kohdalla toisin päin. Vaikka rungon ja kansirakenteen tilavuuksien tulokset eivät olekaan  $\pm 1\%$ :n sisällä, niiden summalla (*kokonaistilavuus*,  $V_{tot}$ ) päästään kuitenkin edellä mainittuun tarkkuuteen. Rungon ja kansirakenteen tilavuuksia käytettäessä on otettava huomioon, että vain näiden arvojen summa on todellisesti tarkka.

Uppouman ja uppouman tilavuuksien tarkkuuksien väliset erot selittyvät laskennoissa käytettyjen meriveden tiheyksien avulla. Kun laivalle suoritetaan käytännössä kallistuskoe, meriveden tiheys usein mitataan laboratorio-olosuhteissa tarkan lukeman saamiseksi. Jälkikäteen painotilastoja hyödyntäen on lähes mahdollista tietää, mitä rhoon arvoa on käytetty. Työkalun käyttäjä pystyy itse vaikuttamaan rhoon arvoon, mutta lähtökohtaisesti työkalun käyttämä arvo on  $1,025 \text{ kg/m}^3$ . Tämä samainen luku on yleisestikin laivanrakennuksessa käytetty arvo.



Teräspainon arvion tuloksissa on nähtävissä epätarkkuutta laivojen 1 ja 2 kohdalla. Laivan 3 kohdalla arvio on halutun tarkkuuden mukainen. Nämä teräspainon epätarkkuudet johtuvat laivakohtaisista eroista. Epätarkkuuksien syitä tutkittiin ja ainakin osittain tunnistettiin kyseessä olevat syyt. Vaikka syitä tunnistettiin, ei voida varmistua siitä, että kaikki syyt olisivat löydetty. Osa tunnistetuista syistä on laivakohtaisia ja siten niitä ei pystytä ottamaan tämän työkalun laskukaavoissa huomioon. Työkalun käyttäjän täytyy tämänkaltaisissa tapauksissa käyttää henkilökohtaista arviointikykyä ja huomioida muutokset muulla tavalla. Varustamo-kohtaisia syitä pystytään työkalussa huomioimaan.

#### 4.4 Tarkkuus

Työn alkuperäisenä tavoitteena oli rakentaa työkalu, jonka arvioiden tarkkuus olisi  $\pm 5$  %:n sisällä. Tapaustutkimuksen myötä on selvinnyt, että suurin osa arvioidavista suureista asettuu  $\pm 1$  %:n tarkkuuden sisään. Näihin suureisiin kuuluu painolaskennan prosessin kannalta tärkeimmät arvot. Tärkeimpiä arvoja ovat kevytpaino ja pituus- sekä korkeussuuntaiset painopisteet.

Teräspainon arvio ei kaikkien tapaustutkimuksen esimerkkilaivojen kohdalla ole yhtä tarkka kuin toivottiin. Koska kevytpainon arvio on halutun tarkkuuden sisällä ja teräspainon arvio ei, on pääteltävissä, että varustelun paino kumoaa teräspainossa näkyvän epätarkkuuden. Laivan 1 kohdalla teräspainon arvio on miinusmerkkinen, ja koska kevytpainon arvio on hyvin lähellä todellista arvoa, täytyy varustelupainon olla lähes saman verran plusmerkkinen.

## 5 Yhteenveto ja päätelmät

Risteilylaivan painolaskenta ja painonhallinta ovat elintärkeitä osia laivan suunnitteluprosessia. Painon laskentaan esitetään alan kirjallisuudessa useita tapoja, jotka sopivat eri käyttötarkoituksiin ja erilaisille laivaprojekteille. Painolaskennan perusteet ovat helposti käsitettäviä eivätkä vaadi varsinaista erityisosaamista, mutta painolaskenta kuitenkin vaatii laajaa ymmärrystä koko laivanrakennusprosessista ja sen eri suunnittelu- ja työvaiheista. Vaikka painolaskennan teoria on yksinkertainen, se ei aikaisessa projektin vaiheessa ole yhtä helppoa. Painolaskennan epävarmuuksilla ja painonhallinta- ja painolaskuprosessien virheillä ja epätarkkuuksilla on erityisen suuri vaikutus laivaprojektin onnistumiseen. Sekä laivan painojen että painopisteiden määrittäminen on tärkeää projektin jokaisessa vaiheessa. Laivaprojektin alkuvaiheessa joudutaan paino arvioimaan tiedon puutteellisuudesta johtuen. Mitä tarkempi arvio laivan tulevasta painosta saadaan, sitä parempi.

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli kartoittaa nykyistä painolaskentamenetelmää ja tuottaa työkalu, jonka avulla voidaan tehdä arvioita painoista ja painopisteistä jo hyvin aikaisessa vaiheessa laivan suunnitteluprosessia. Näiden arvioiden tuli asettua  $\pm 5$  %:n tarkkuuteen. Työkalu hyödyntää arvioinnissa kahta eri päämenetelmää; regressio- ja kerroinmenetelmää. Näiden lisäksi käyttäjä voi syöttää geometrisen määrittelyn vaatimat syötetiedot, jolloin työkalu laskee arvion tilavuuksista ja pinta-aloista syötetietojen perusteella. Geometrisen määrittelyn avulla saadaan piirrettyä syötetietojen mukainen poikkileikkaus suunniteltavasta risteilylaivasta.

Regressiomenetelmän kaavojen luotettavuuden määrittämiseksi on tehtävä lisätutkimuksia, vaikka parhaan soviteen tunnistamiseksi käytettiin tunnettua ja laajalti käytettyä pienimmän neliösumman menetelmää. Työkalun avulla voidaan arvioida painojen ja painopisteiden lisäksi myös muita suureita. Samaan työkaluun voidaan helposti sijoittaa laskukaavoja myös muiden suureiden laske- miseksi, mistä saattaa olla aikaisessa suunnitteluvaiheessa apua laivakonseptin kehittäjälle.

Rakennettu työkalu täytti sille asetetut tavoitteet. Painoarviot olivat odotettua tarkempia, muutamilla poikkeuksilla. Työkalun käyttäjä pystyy itse vaikuttamaan tuloksiin syöttämiensä päätietojen lisäksi muun muassa kertoimilla. Tämän takia tulosten vertailusta täytyy jättää joitain arvioituja arvoja pois. Tapaustutkimuksen tulosten perusteella viiden prosentin tarkkuuden sijasta päästiin lähes jokaisen arvioitavan suureen kohdalla yhden prosentin tarkkuuteen. Vaikka tapaustutkimusten perusteella tulokset ovat tarkkoja, lisätutkimuksia voisi suorittaa työkalun luotettavuuden parantamiseksi ja tulosten tarkentamiseksi edelleen.

## Lähteet

- Aasen, R., & Bjørhovde, S. 2010. *Early Stage Weight and COG Estimation Using Parametric Formulas and Regression on Historical Data*. Los Angeles: 69th Annual Conference Of Society of Allied Weight Engineers.
- Alanko, J. 2011a. *Laivan yleissuunnittelu*. Kolmas painos. Turku: Multiprint Oy.
- Alanko, J. 2011b. *Johdatus kauppalaivan suunnitteluun*. Kolmas painos. Turku: Multiprint Oy.
- Ban, D. & Basic, J. 2015. *Analytical Solution of Basic Ship Hydrostatics Integrals Using Polynomial Radial Basis Functions*. Brodogradnja / Shipbuilding. Vol. 66, No 3.
- Cheirdaris, S. 2019. *Aalto-yliopiston kurssin MEC-E1004 Principles of Naval Architecture kurssimateriaali: Lecture 9 – Weight and stability*. Espoo: Aalto-yliopisto.
- Dudszus, A. & Danckwardt, E. (1982). *Schiffstechnik: Einführung und Grundbegriffe*. Berlin: Verlag-Technik.
- IMO 2022. *MARPOL*. Viitattu 28.02.2022. [www.imo.org](http://www.imo.org) > Knowledge Centre > Conferences and Meetings > MARPOL 1973.
- Kahva, E. 2017. *Weight estimator tool with uncertainty analysis for ship concept design*. Diplomityö. Konetekniikan koulutusohjelma. Espoo: Aalto-yliopisto.
- Kenton, W. 2022. *Least Squares Method*. Investopedia. Viitattu 28.04.2022. <https://www.investopedia.com/terms/l/least-squares-method.asp>
- Lamb, T. 2003. (toim.) *Ship Design and Construction*. Jersey City, NJ: Society of Allied Marine Engineers (SNAME).
- Meyer Turku Oy 2022. *Cruise Ship Comparison*. Yrityksen sisäinen tietokanta. Turku: Turun telakka. Viitattu 4.3.2022.
- Papanikolaou, A. 2014. *Ship Design – Methodologies of Preliminary Design*. Ateena: Springer.

Parsons, M. 2003. *Parametric Design*. Teoksessa Lamb, T. (toim.) *Ship Design and Construction*. Jersey City, NJ: Society of Naval Architects and Marine Engineers (SNAME).

Räisänen, P. (toim.) 2000. *Laivatekniikka – Modernin laivanrakennuksen käsikirja*. Jyväskylä: Gummerus Kirjapaino Oy.

Särkkä, T. 2011. *Laivan painolaskenta*. Kandidaatintyö. Konetekniikan koulutusohjelma. Espoo: Aalto-yliopisto. Viitattu 10.2.2022.

<http://urn.fi/URN:NBN:fi:aalto-201305162656>

Schneekluth, H & Bertram, V. 1998. *Ship Design for Efficiency and Economy*. Second edition. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Schuster, A. 2001. *Weight and CG Estimating Methods and Procedures*.

Teoksessa Society of Allied Weight engineers Marine Systems Government - Industry Workshop. *Weight Estimating and Margin Manual for Marine Vehicles*. Los Angeles: Society of Allied Weight Engineers (SAWE), sec. 4, 4-1–4-7.

Valenius, E. 2017. *Erittely laivan painonhallinnan tietokantaa varten*. Opinnäytetyö. Kone- ja tuotantotekniikan koulutusohjelma. Turku: Turun Ammattikorkeakoulu.

Watson, D. 1998. *Practical Ship Design*. Volume 1, First edition. Oxford: Elsevier Science Ltd.