

Opinnäytetyö (AMK)

Konetekniikka

2023

Sohvi Turunen

# Matkustaja-aluksen vuotovakavuuden optimointi



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka

2023 | 32 sivua

Sohvi Turunen

## Matkustaja-aluksen vuotovakavuuden optimointi

Tässä opinnäytetyössä tutustutaan matkustaja-alusten vesitiiviiseen osastointiin ja vuotovakavuuslaskentaan sekä optimoidaan erään matkustaja-aluksen vuotovakavuutta. Työssä esitellään osastoinnin periaatteet ja vuotovakavuutta koskevien sääntöjen keskeinen sisältö. Tekstissä avataan monia aiheeseen liittyviä käsitteitä sekä esitellään tärkeimmät laskentakaavat. Lisäksi käydään läpi alusten vaurioitumisen syitä, seurauksia ja tekijöitä, jotka vaikuttavat vaurion laatuun ja vuodon laajuuteen.

Työssä lasketaan vuotovakavuus esimerkkinä toimivalle matkustaja-alukselle. Vuotovakavuuslaskentaan käytetään NAPA-ohjelmiston PROB Manageria eli probabilistista vuotovakavuuslaskentasovellusta. Lopuksi luodaan muutosehdotus matkustaja-alukselle tavoitteena optimoida sen vuotovakavuutta. Muutosehdotuksessa aluksen vesitiivistä osastointia muokataan sekä GM:ää nostetaan. Muutosten myötä aluksessa on yksi vesitiivis osasto vähemmän. Osastojen määrää minimoimalla saadaan muun muassa vähennettyä kustannuksia sekä aluksen painoa ja helpotetaan tarvittavien toimintojen sijoittelua. GM:ää nostamalla saadaan tarpeeksi suuri A-indeksi eli vuotovakavuutta koskevien sääntöjen mukainen vaatimus täyttyä. Muutosten kautta saavutettavien hyötyjen avulla voidaan perustella työssä tehdyn vuotovakavuuden optimoinnin kannattavuus.

Asiasanat:

matkustaja-alus, osastointi, vesitiivis osastointi, vuotovakavuus

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering

2023 | 32 pages

Sohvi Turunen

## Optimizing the damage stability of a passenger ship

In this bachelor's thesis, the watertight subdivision and damage stability calculation of passenger ships were studied. Also, the optimization of damage stability of a passenger ship is included in the thesis. The principles of watertight subdivision and the damage stability rules are presented. Many definitions related to the topic are explained in the text and also the most important formulas used in calculation are presented. In addition, the causes and consequences of damage, the factors affecting the quality of the damage and the extent of flooding, are covered.

The damage stability of a passenger ship is calculated. The application called PROB Manager, which is a part of NAPA software, was used when calculating the probabilistic damage stability. Lastly, a proposal was made to optimize the damage stability of the ship. The proposal includes some changes to the watertight subdivision and an increase to the ship's GM. After the changes are made, the ship has one less watertight compartment. By minimizing the number of compartments, costs and the weight of the ship can be reduced, and the layout of necessary functions becomes easier. The benefits achieved by making these changes are presented in order to show why optimizing the damage stability is reasonable to do.

Keywords:

passenger ship, subdivision, watertight subdivision, damage stability

# Sisältö

<b>Käytetyt lyhenteet</b>	<b>7</b>
<b>1 Johdanto</b>	<b>8</b>
<b>2 Osastointi</b>	<b>9</b>
2.1 Vesitiivis osasto	9
2.2 Eri osastointitavat	9
2.3 Aukot vesitiiviissä laipioissa	10
2.4 Vaurioituminen	12
<b>3 Vuotovakavuus</b>	<b>14</b>
3.1 Säännöt ja määräykset	14
3.2 Eri laskentamenetelmät	15
3.3 Vuotovakavuuden määrittäminen	16
3.3.1 Osastointipituus ja vaurioalueet	16
3.3.2 Permeabiliteetti	18
3.3.3 Indeksit	18
3.3.4 Semi-vesitiivis pinta	20
<b>4 Esimerkkilaiva</b>	<b>22</b>
4.1 NAPA	22
4.1.1 PROB Manager	22
4.1.2 Vertailu	24
4.2 Vuotovakavuuden optimointi	25
4.2.1 Muutosehdotus	26
4.2.2 Lopputulos	29
<b>5 Yhteenveto ja pohdinta</b>	<b>30</b>
<b>Lähteet</b>	<b>31</b>

## **Kaavat**

Kaava 1. Kaksoispohjan korkeus.	10
Kaava 2. Saavutettu indeksi A.	19
Kaava 3. Osittaiset indeksit.	19

## **Kuvat**

Kuva 1. Vesitiivis osastointi (Ruponen 2021, 113).	9
Kuva 2. Eri ovityyppejä (Luhmann 2013).	11
Kuva 3. Eri vauriotyyppejä (Ruponen 2021, 111).	12
Kuva 4. Poikittaisvirtauskanava (Ruponen ym. 2018).	13
Kuva 5. Suunnitteluspiraali (Ruponen 2021, 11).	16
Kuva 6. Osastointikolmio (SOLAS 2020, Resolution MSC.429(98)/Rev.1 Part B Regulation 7-1).	17
Kuva 7. Osastointiesimerkki (Ruponen 2021, 137).	20
Kuva 8. Svt-pinta ja aukot.	21
Kuva 9. PROB Manager (NAPA 2022.2-1)	23
Kuva 10. Vuotovakavuuslaskennan tulos (NAPA 2022.2-1).	24
Kuva 11. Vaurioesimerkki (Aarnio 2022, 85).	25
Kuva 12. Alkuperäinen osastointi (NAPA 2022.2-1).	26
Kuva 13. Muutettu osastointi (NAPA 2022.2-1).	27

## **Kuviot**

Kuvio 1. R-indeksin muutos (Aarnio 2022, 83).	15
Kuvio 2. GM-käyrät.	28

## **Taulukot**

Taulukko 1. Permeabiliteetit (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 7-3.1).	18
Taulukko 2. R-indeksi (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 6.2.3).	18

## Käytetyt lyhenteet

A	attained index, saavutettu indeksi probabilistisessa vuotovakavuuslaskennassa
GM	painopisteen G etäisyys vaihtokeskuksesta M
IMO	International Maritime Organization, kansainvälinen merenkulkujärjestö
LCB	longitudinal center of buoyancy, etäisyys peräperpendikkelistä aluksen vedenalaisen tilavuuden keskipisteeseen
MSC	Maritime Safety Committee, IMO:n komitea, joka vastaa merenkulun turvallisuudesta
NAPA	Naval Architectural Package, ohjelmisto, jota käytetään laivojen suunnittelussa ja operoinnissa
R	required subdivision index, vaadittu osastointi-indeksi probabilistisessa vuotovakavuuslaskennassa
SOLAS	Safety of Life at Sea, kansainvälinen yleissopimus koskien ihmishengen turvallisuutta merellä

# 1 Johdanto

Tässä opinnäytetyössä tutkitaan mahdollisuutta optimoida aluksen vuotovakavuutta eli sen kykyä säilyttää tasapainotila ja kelluvuus vauriotilanteessa. Työssä tarkastelu on rajattu ainoastaan matkustaja-aluksiin. Tavoitteena on parantaa valitun esimerkkilaivan vuotovakavuutta ensisijaisesti tekemällä muutoksia sen vesitiiviiseen osastointiin. Hyödynnetään tarvittaessa myös muita tapoja vuotovakavuuden parantamiseksi. Opinnäytetyön toimeksiantajana on Meyer Turku Oy.

Vuotovakavuuden määrittäminen on erittäin tärkeä osa laivasuunnittelua, sillä vuotovakavuus määrää laivan turvallisuuden onnettomuustilanteessa. Järkevällä osastoinnilla turvataan laivan selviytyminen onnettomuuden ja vuodon sattuessa. Osastoinnin optimoinnilla voidaan turvallisuuden lisäksi vaikuttaa myös esimerkiksi laivan painoon, kustannuksiin, tarvittavien erikoisrakenteiden ja pakoteiden määrään. Vuotovakavuuden optimointi on siis kannattavaa monesta eri näkökulmasta katsoen.

Työn alussa on teoriaosuus, jossa käsitellään osastointia ja vuotovakavuutta. Tekstissä käydään läpi osastoinnissa käytettäviä elementtejä, eri osastointitapoja sekä vaurioitumisen syitä ja seurauksia. Lisäksi tutustutaan vuotovakavuutta koskeviin sääntöihin sekä laskentamenetelmiin ja -kaavoihin. Sen jälkeen esitellään NAPA-ohjelmistoon kuuluva PROB Manager eli probabilistinen vuotovakavuuslaskentasovellus, jota halutaan testata vuotovakavuuslaskentaan Meyer Turku Oy:ssä. Lasketaan esimerkkilaivan vuotovakavuus käyttäen PROB Manageria tavoitteena saada vastaava tulos kuin tällä hetkellä käytössä olevalla vanhemmalla laskentatavalla. Tämän jälkeen luodaan muutosehdotus esimerkkilaivan vesitiiviiseen osastointiin sekä analysoidaan optimoimalla saatavia hyötyjä.



## 2 Osastointi

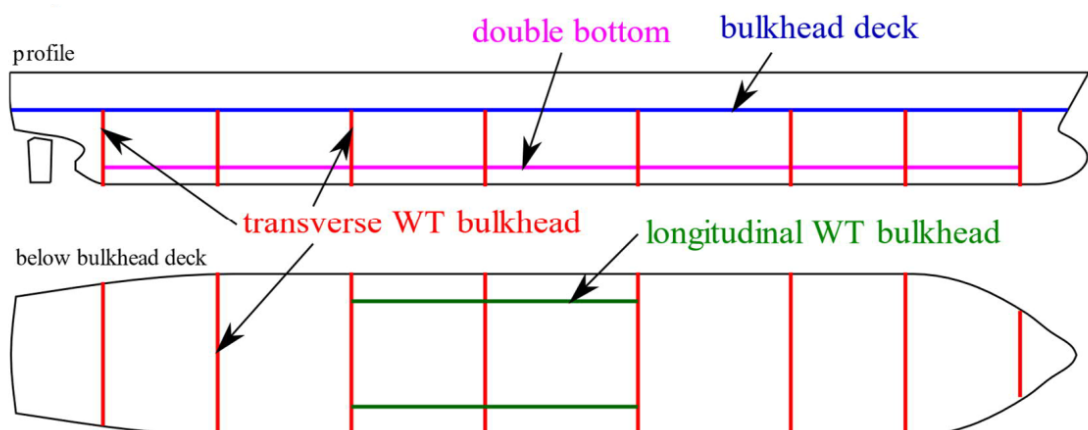
Osastointi tarkoittaa laivan rungon jakamista vesitiiviisiin osastoihin. Vesitiiviin määritelmä täyttyy, kun kaikki rakenteen osat kestävät veden aiheuttaman paineen eikä vettä pääse leviämään rakenteen lävitse kumpaankaan suuntaan (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 2.17). Osastoinnilla estetään veden hallitsematon tulviminen laivaan sen rungon rikkoutuessa sekä näin ollen parannetaan mahdollisuuksia selvitä onnettomuudesta. Osastoinnista pyritään luomaan mahdollisimman symmetrinen laivan keskiviivan suhteen.

### 2.1 Vesitiivis osasto

Vesitiivis osasto eli vt-osasto on vesitiiviiden laipioiden ja vesitiiviiden kansion rajaama tila tai alue. Vesitiivis osasto voi koostua useammista huoneista kuten hyteistä tai olla yksi suurempi alue kuten osa konehuoneesta. Jokaisesta vt-osastosta on oltava kaksi pakotietä. Vähintään toisen niistä on oltava suora pakotie ylöspäin pelastusvenekannelle, mikä tarkoittaa sitä, ettei reitti kulje yhdenkään vesitiiviin oven kautta. (SOLAS 2020 Chapter II-2 Regulation 13.3.2.1.1.)

### 2.2 Eri osastointitavat

Kuvassa 1 on esitetty yksinkertaistetusti laivan osastoinnissa käytettävät elementit. Vesitiiviit laipiot voivat kulkea laivassa sivusuunnassa, jolloin osastointi on poikittainen tai pituussuunnassa, jolloin osastointi on pitkittäinen. Poikittaislaipioita käytetään koko laivan pituudella osastojen muodostamiseen. Lisäksi ne tekevät laivan rungosta jäykemmän ja ehkäisevät liian suurten rasitusten syntymistä.



Kuva 1. Vesitiivis osastointi (Ruponen 2021, 113).

Usein poikittaiseen osastointiin lisätään myös pitkittäisiä laipioita, joiden avulla laiva saadaan jaettua entistä pienempiin osastoihin. Tällöin suurta vakavuutta huonontavia

vapaita nestepintoja ei pääse syntymään vuototilanteessa. Etenkin suurissa aluksissa pitkittäislaipioita käytetään myös rungon lujittamiseen. Vesitiiviit laipiot voidaan sijoittaa suoraan päällekkäin tai lomittain toisiinsa nähden. Jos vt-laipioissa on askelmia tai syvennyksiä, niiden täytyy olla yhtä lujia kuin laipiot, joihin ne ovat yhteydessä (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 10.2).

Osastointi voi olla myös horisontaalista, jolloin rajaavat elementit ovat vesitiiviitä kansia. Ylintä kantta, johon vesitiiviit laipiot ulottuvat, kutsutaan laipiokanneksi. Kaikki laipiokannen alle jäävät osastot ovat vesitiiviitä. Näiden osastojen sisällä voi kuitenkin olla tiloja, jotka eivät itsessään ole vesitiiviitä.

Kaksoispohjan tulee ulottua laivan törmäyslaipiosta peräpiikin laipioon asti sen ollessa sopivaa laivan suunnittelun sekä toiminnan kannalta. Kaksoispohjan korkeudelle  $h$  on asetettu vaatimus

$$h = \frac{B}{20}, \quad (1)$$

jossa

$B$  = laivan suurin leveys mitattuna sivulaipioiden sisäpinnalta toiselle.

Kaksoispohjan korkeus  $h$  ei saa olla alle 760 mm. Korkeuden ei kuitenkaan tarvitse ylittää 2000 mm. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 9.2.)

Laivan keskelle voidaan jättää kapea turva-alue, joka voi ulottua lähes koko laivan läpi perästä keulaan. Turva-alue alkaa useimmiten kaksoispohjan päältä ja ulottuu laipiokanteen asti. Aluetta hyödynnetään erilaisten putkien, kaapelien ja kanavien reitityksessä. Reititys yksinkertaistuu jonkin verran suhteessa laivaan, jossa turva-alueita ei ole. Vuotovakavuustarkastelussa oletetaan, että vaurio ulottuu turva-alueeseen asti kuitenkin rikkomatta sitä. Alue voi kuitenkin todellisuudessa täytyä vedellä, jolloin alueen sisällä kulkevien putkien ja kanavien on kestävä tulvineen veden aiheuttama paine. Turva-alue huonontaa A-indeksiä (katso kappale 3.3.3) jonkin verran, sillä silloin laiva ei kestä keskilaivaan asti ulottuvia vaurioita.

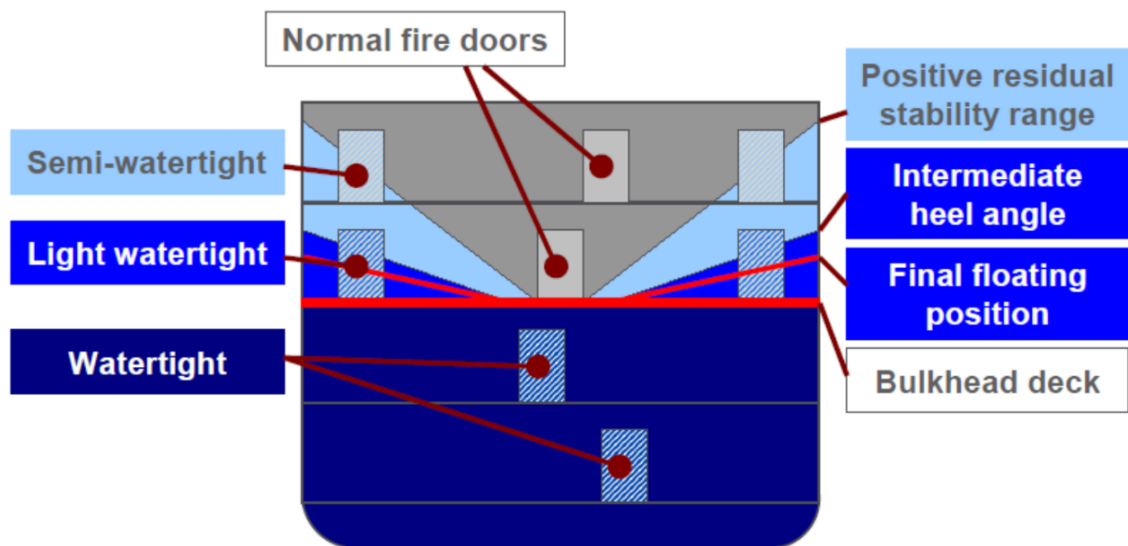
### 2.3 Aukot vesitiiviissä laipioissa

Normaalien toimintojen vuoksi vesitiiviit osastot eivät voi olla koko ajan täysin eristettyinä ja suljettuina toisistaan. Niin ihmisten kuin tavaroiden täytyy päästä kulkemaan osastojen välillä. Lisäksi vt-osastosta toiseen kulkee myös putkia, kanavia ja kaapeleita, joita varten vesitiiviisiin laipioihin on tehtävä aukkoja. SOLAS-säännöt asettavat vaatimuksia vt-laipioihin tehtäville aukkoille. Aukkojen määrä täytyy pitää niin vähäisenä kuin mahdollista sekä ne täytyy pystyä sulkemaan tarvittaessa. Läpiviennit on tehtävä niin, että laipio säilyy vesitiiviinä. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 13.1-2.1.)

Suurimmat aukot vt-laipioissa ovat vesitiiviitä ovia, joiden kautta mahdollistetaan kulku osastojen välillä. Pääasiassa vesitiiviiden ovien tulee olla sähköllä toimivia ja ne on pystyttävä sulkemaan samanaikaisesti komentosillalta käsin. Laivan ollessa pystyasennossa, ovien sulkeutuminen ei saa kestää yli 60 sekuntia. Kaikki vt-ovet on pystyttävä sulkemaan myös 15 asteen kallistumassa. (SOLAS 2020 Chapter II-1

Regulation 13.5.1-2.) Sähköllä toimivan vesitiiviin oven suurin sallittu leveys on 1,2 m. Leveämmät ovet voidaan kuitenkin hyväksyä poikkeustilanteessa tietyin ehdoin. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 13.7.1.2.)

Kuvassa 2 on esitetty erilaisia ovia laivassa. Kaikki laipiokannen alle jäävät, vesitiiviiden osastojen väliset ovet ovat vesitiiviitä. Vt-ovet on pidettävä merellä kiinni. Laipiokannen yläpuolella, todellisen kellunta-asennon alueella (kirkkaampi tummansininen alue kuvassa 2) voidaan käyttää ovia, joiden rakenteiden mitoitus on normaaleja vt-ovia heikompi (light watertight doors), sillä niiden ei tarvitse kestää niin suurta vedenpainetta. Näiden ovien käyttäminen tulee halvemmaksi kuin normaalien vt-ovien. Myös kevyet vt-ovet on pidettävä merellä kiinni.

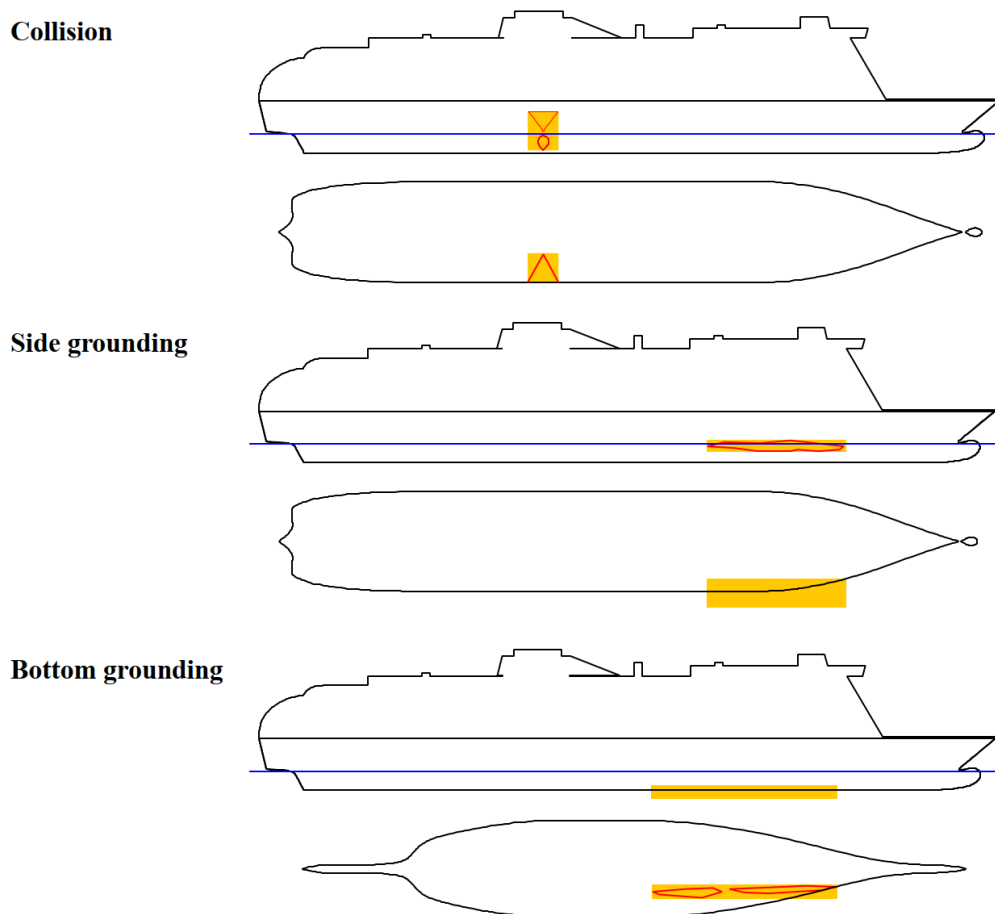


Kuva 2. Eri ovityyppejä (Luhmann 2013).

Lopullisen kellunta-asennon yläpuolelle jää semi-vesitiivis alue, joka on kuvassa 2 osoitettu vaaleansinisellä. Svt-alueella voidaan käyttää semi-vesitiiviitä ovia, joiden on kestävä veden paine tiettyyn korkeuteen saakka. Svt-ovet voidaan pitää merellä auki, mutta ne suljetaan vauriotilanteessa. Svt-pinnan yläpuolelle sijoittuvat ovet ovat normaaleja palo-ovia, eikä niille ole asetettu vaatimuksia vesitiiveyden suhteen.

## 2.4 Vaurioituminen

Laivan runkoon laipiokannen alapuolelle kohdistuva kolmiulotteinen vaurio aiheuttaa todennäköisesti veden tulvimisen laivaan. Vaurio syntyy, jos laiva ajaa karille, tapahtuu räjähdys, jokin rakenne rungossa pettää tai se törmää esimerkiksi toiseen alukseen. Vaurioituneista osastoista vesi voi tulla ehjiin osastoihin laivan sisäisten aukkojen tai putkien kautta. Tätä kutsutaan progressiiviseksi vuodoksi. Kuvassa 3 on esitetty laivan runkoon kohdistuvia erityyppisiä vaurioita.

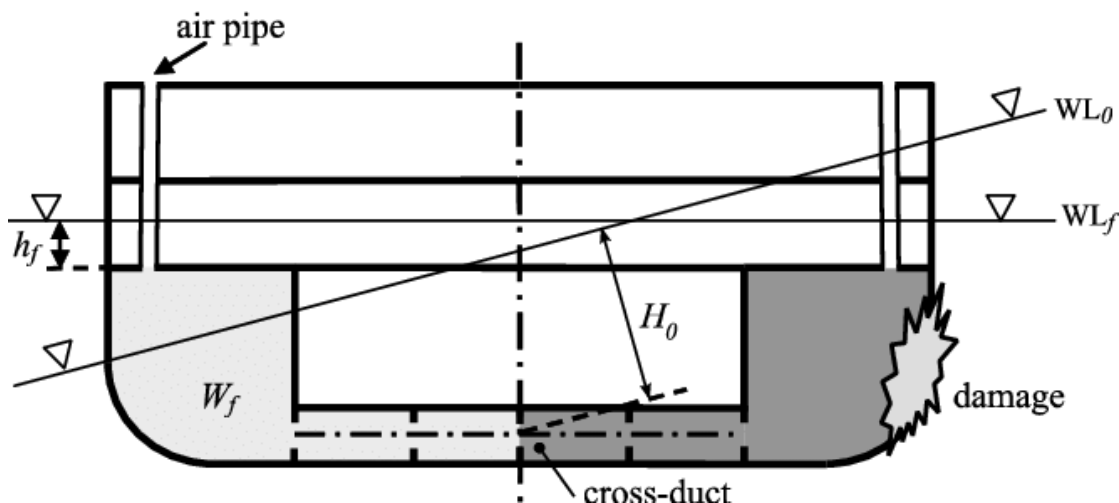


Kuva 3. Eri vauriotyyppejä (Ruponen 2021, 111).

Yhteentörmäys aiheuttaa usein kapean, mutta syvälle ulottuvan vaurion. Kun taas karilleajo aiheuttaa todennäköisesti pitkän vaurion laivan kylkeen tai pohjaan. Vaurio voi koostua monesta murtumakohtasta ja ne yhdessä muodostavat vaurion laajuuden. Rungon murtumien todellisella muodolla ei ole merkitystä vuotovakavuuslaskennassa, vaan vaurion oletetaan olevan laatikon mallinen. Laskennassa käytettävien vaurioiden koot määritetään laskentakaavoilla SOLAS-sääntöjen mukaan.

Monet tekijät vaikuttavat siihen millaisia seurauksia vauriosta on alukselle: mikä osasto tai vierekkäisten osastojen kokonaisuus vaurioituu, laivan syväys, trimmi ja GM vaurion syntyessä, niiden tilojen permeabiliteetti, joihin vaurio vaikuttaa sekä meren tila eli sääolosuhteet. Lisäksi voi olla myös muita vaikuttavia tekijöitä kuten kallistavat momentit. (SOLAS 2020, Resolution MSC.429(98)/Rev.1. Part A)

Vaurion ja siitä aiheutuneen tulvimisen seurauksena laivan syväys voi muuttua ja niin poikittaisessa kuin pitkittäisessä vakavuudessa voi tapahtua muutoksia eli laiva kallistuu tai viippaa. Esimerkiksi vuodosta seuranneeseen kallistumaan voidaan vaikuttaa poikittaisvirtauskanavalla, jolla luodaan yhteys kahden vastakkaisilla laidoilla sijaitsevan tankin välille. Vauriutilanteessa poikittaisvirtauskanavat auttavat laivan vakavuuden hallinnassa tekemällä vuodosta mahdollisimman symmetrisen. Kuvassa 4 on yhdistetty kaksi vastakkaisilla laidoilla olevaa tankkia poikittaisvirtauskanavalla. Jos toinen tankeista vaurioituu, vettä tulvii myös toisella laidalla sijaitsevaan tankkiin kanavan kautta.



Kuva 4. Poikittaisvirtauskanava (Ruponen ym. 2018).

Jos kanavaa ei olisi, vesi jäisi ainoastaan oikeanpuoleiseen tankkiin (tumman harmaa alue). Tällöin laiva kallistuu merkittävästi ja vesiviiva jää  $WL_0$  osoittamalle tasolle, mikä huonontaa vakavuutta ja näin ollen vaikeuttaa mahdollisia pelastustoimia. Kun taas symmetrisen vuodon tilanteessa vesiviiva asettuu  $WL_f$  osoittamalle tasolle eikä suuria kallistumia pääse syntymään. Vuodon seurauksena tankkeihin saattaa muodostua korkea ilmanpaine, minkä takia niihin täytyy asentaa tarpeeksi suuret ilmaputket.

Pahimmassa tapauksessa laiva uppoaa vuodon seurauksena. Uppoaminen voi tapahtua kolmella eri tavalla. Ensimmäisessä skenaariossa laiva uppoaa hiljalleen kelluvuuden menetyksen seurauksena eli laivan kokonaisuudessa nousee tulvineen veden takia suuremmaksi kuin sen uppouma. Toisessa skenaariossa laiva menettää poikittaisen vakavuutensa ja kaatuu kyljelleen. Kolmannessa skenaariossa laiva menettää pitkittäisen vakavuutensa ja uppoaa keula tai perä edellä. Vakavuus voidaan menettää jopa minuuteissa, joten sen säilyttäminen on tärkeää pelastustoimien kannalta.

## 3 Vuotovakavuus

Vaurioituneen aluksen vuotovakavuus kuvaa sen kykyä ottaa vastaan kallistavia momenteja ilman, että alus kaatuu. Vuotovakavuuslaskennassa tarkastellaan siis laivan kykyä säilyttää tasapainotila sekä kelluvuus vaurioitilanteessa.

### 3.1 Säännöt ja määräykset

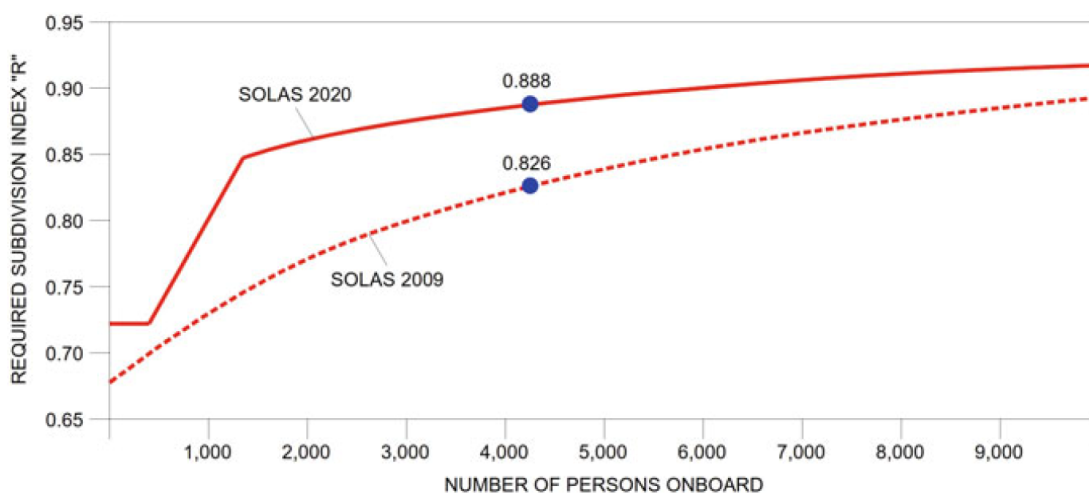
IMO (International Maritime Organization) eli kansainvälinen merenkulkujärjestö vastaa merenkulkualan turvallisuus- ja ympäristöasioiden säätelystä. Järjestön pääasiallisena tehtävänä on luoda alalle maailmanlaajuisesti käytössä oleva oikeudenmukainen sääntökehys. (IMO 2023.) IMO koostuu monista eri komiteoista, joissa järjestön ylläpito- ja kehitystyö varsinaisesti tapahtuu. Vuotovakavuussäännöistä vastaa MSC (Maritime Safety Committee), joka on merenkulun turvallisuudesta vastaava komitea.

Yksi tärkeimmistä IMO:n ylläpitämistä kansainvälisistä yleissopimuksista on SOLAS (Safety of Life at Sea), joka käsittelee ihmishengen turvallisuutta merellä. Ensimmäinen versio SOLAS yleissopimuksesta syntyi vuonna 1914. Sopimuksen syntymiseen vaikutti suuresti Titanicin uppoaminen vuonna 1912. Kuitenkin vasta SOLAS 1948 sisälsi ensimmäiset säännöt liittyen laivan osastointiin ja vuotovakavuuteen. (Francescutto ym. 2010.) Nykyiset vuotovakavuussäännöt pohjautuvat laivojen onnettomuustilastoon, mikä tarkoittaa, että suuret onnettomuudet ovat vaikuttaneet merkittävästi sääntöjen kehitykseen. Vuotovakavuutta ja osastointia koskevat säännöt löytyvät SOLAS Chapter II-1:stä.

Aiemmin matkustaja-alusten vuotovakavuus laskettiin käyttäen determinististä menetelmää. Sen nimi tulee englannin kielen sanasta ”determined”, jonka tarkoittaa määritettyä. Deterministisessä menetelmässä vaurion laajuus ja sijainti on ennalta määritetty. Alukset jaetaan kahteen kategoriaan: ns. yhden osaston tai kahden osaston aluksiin. Yhden osaston alusten on kestettävä yhden osaston vaurioituminen ja kahden osaston alusten kahden vierekkäisen osaston vaurioituminen.

Probabilistiseen menetelmään siirryttiin matkustaja-alusten vuotovakavuustarkastelun osalta, kun SOLAS 2009 astui voimaan. Vaurion laajuutta tai sijaintia ei ole ennalta määriteltä vaan probabilistinen menetelmä perustuu nimensä mukaisesti todennäköisyyksiin, ja aluksen turvallisuus vaurioituneena määräytyy sen mukaan miten suuri todennäköisyys sillä on selvitä onnettomuudesta. Probabilistisessä menetelmässä vuotovakavuus määritetään indeksien avulla.

Vuotovakavuutta koskeviin sääntöihin tuli pieniä muutoksia SOLAS 2020 myötä. Muutokset laskentakaavoissa aiheuttavat sen, että vaadittu indeksi R (katso kappale 3.3.3) on aiempaa tiukempi. Kuviossa 1 on esitetty ero SOLAS 2020 ja SOLAS 2009 välillä.



Kuvio 1. R-indeksin muutos (Aarnio 2022, 83).

SOLAS 2009 mukaan laskettuna vaadittu indeksi 4250 matkustajan alukselle on 0,826. Kun taas SOLAS 2020 mukaan indeksi on 0,888. Sääntöjen vaatimusten tiukentuminen tarkoittaa siis sitä, että laivan turvallisuusvaatimukset onnettomuustilanteessa nousivat.

Lisäksi laivan vuotovakavuuteen vaikuttavia tahoja ovat lippuviranomaiset sekä luokituslaitokset. Lippuviranomaiset eivät vaikuta niinkään vuotovakavuussääntöihin vaan asettavat vaatimuksia esimerkiksi rakenteisiin liittyen. Luokituslaitoksilla on tärkeä rooli, sillä ne tarkastavat sääntöjen toteutumisen laivan suunnittelu- ja rakennusvaiheessa.

### 3.2 Eri laskentamenetelmät

Vaurioitumisesta aiheutuvia muutoksia vakavuudessa voidaan tutkia hyödyntämällä kahta eri lähestymistapaa: menetetyyn uppoumaan menetelmää tai lisääntyneen painon menetelmää. Menetelmien antamat tulokset eroavat toisistaan GM:n, uppouman ja painopisteen suhteen. Yhtä suuret arvot saadaan kuitenkin oikeaiselle momentille, syväyksille ja kallistuskulmille, minkä takia molemmat menetelmät ovat yhtä luotettavia.

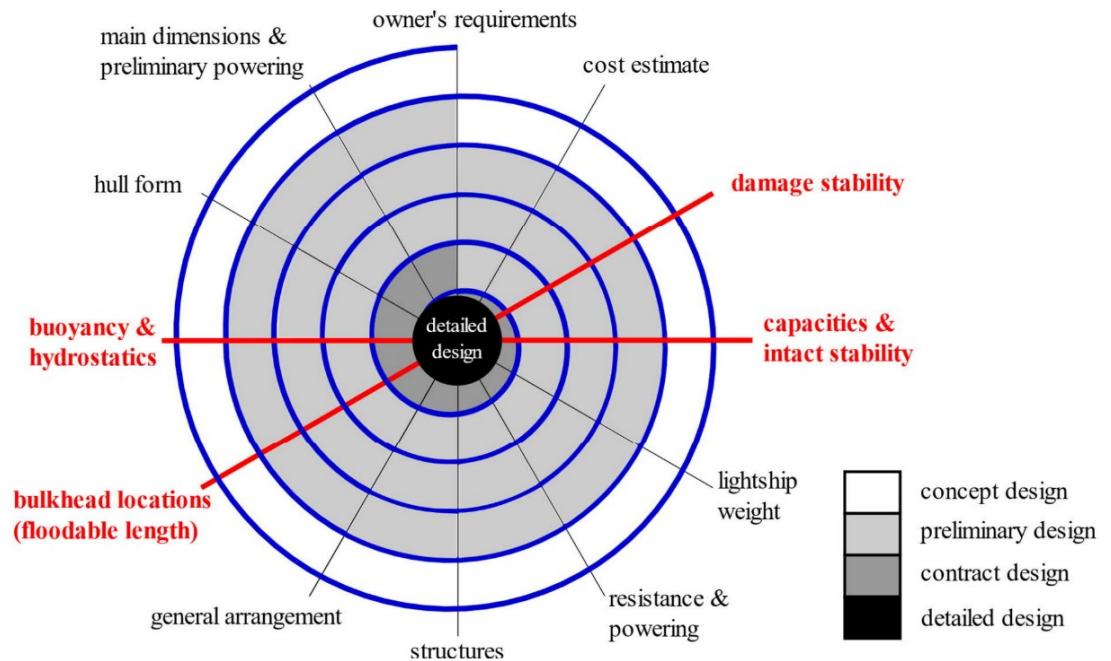
Menetetyyn uppoumaan menetelmä on yleisemmin käytetty, sillä SOLAS-säännöissä vuotovakavuuslaskenta perustuu menetettyyn uppoumaan. Menetelmässä vaurioituneen osaston tilavuus ei enää vaikuta laivan kelluvuuteen ja se hakeutuu uuteen tasapainotilaansa. Tämä tarkoittaa sitä, että laivan syväys kasvaa sekä uppouman tilavuuden painopisteen (LCB) muutoksen myötä laiva viippaa. Tätä menetelmää käytettäessä uppouma pysyy samana kuin lähtötilanteessa. Laivaan tulvineen veden aiheuttamaa painon ja painopisteen muutoksia ei huomioida menetetyyn uppoumaan menetelmässä.

Lisääntyneen painon menetelmässä laivan paino ja painopiste muuttuvat, sillä laivaan tulvineen veden katsotaan olevan nestemäistä lastia. Laiva saavuttaa uuden tasapainotilansa, kun vaurioitunut osasto on täynnä vettä tai kun tulvineen veden pinta

on samalla tasolla ympäröivän meriveden pinnan kanssa. Laivan syväys kasvaa sekä vuodon ollessa epäsymmetrinen laiva kallistuu ja viippaa.

### 3.3 Vuotovakavuuden määrittäminen

Ensimmäinen arvio laivan vuotovakavuudesta tehdään ensimmäisen suunnittelukierroksen loppupuolella. Suunnitteluspiraali (Kuva 5) kuvaa laivasuunnittelun prosessia. Koska prosessi on iteratiivinen, vuotovakavuus voidaan määrittää sitä tarkemmin mitä pidemmälle laivan suunnittelu on edennyt.



Kuva 5. Suunnitteluspiraali (Ruponen 2021, 11).

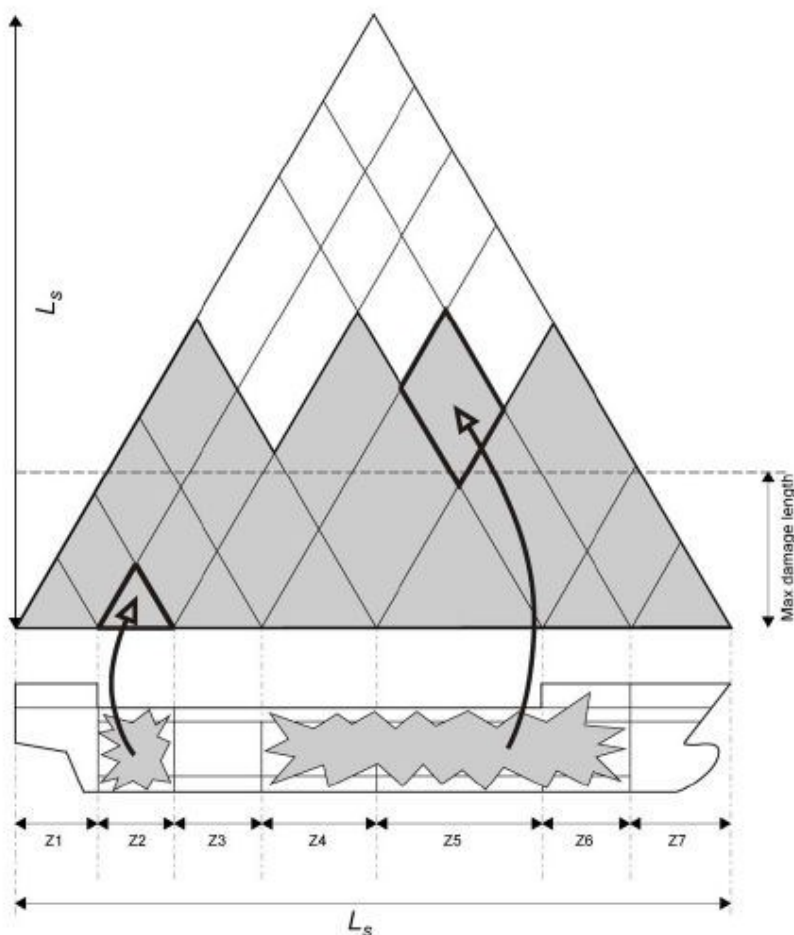
Probabilistisessa vuotovakavuuslaskennassa määritetään laivan osastointipituus ja vaurioalueet. Vuotovakavuusvaatimusten toteutumista arvioidaan indeksien avulla ja laskennassa otetaan huomioon eri tilojen permeabiliteetit. Laskennan tulosten perusteella voidaan luoda esimerkiksi poikkileikkauskuvat, joissa on esitettyä semi-vesitiiviit pinnat.

#### 3.3.1 Osastointipituus ja vaurioalueet

Osastointipituus  $L_s$  on sen laivan osan suurin pituus kannella/kansilla tai niiden alla, jotka rajoittavat vaurion laajuutta pystysuunnassa laivan syvimmällä osastointi syväyksellä.  $L_s$  mitataan levyjen sisäpinnoilta eli levyjen paksuuksia ei huomioida. Osastointipituus jaetaan vaurioalueisiin.



Osastointikolmion avulla kuvataan mahdollisia laivaan kohdistuvia yhden ja monen osaston vaurioita (Kuva 6). Kuvan laiva on jaettu seitsemään vaurioalueeseen. Periaatteessa mitä enemmän vaurioalueita on, sitä parempi A-indeksi saadaan. Liian tiheä osastointi tuo kuitenkin lisäkustannuksia, lisää painoa, haasteita kulkemiseen, logistiikkaan, pakotiejärjestelyihin sekä eri toimintojen sijoitteluun, joten on löydettävä sopiva ratkaisu, jossa edellä mainitut tekijät ja A-indeksi ovat tasapainossa.



Kuva 6. Osastointikolmio (SOLAS 2020, Resolution MSC.429(98)/Rev.1 Part B Regulation 7-1).

Harmaan väriset muodot kuvaavat vaurioita, joista selviämiseen laivan osastointi on riittävä. Kolmiot kuvaavat yhden vaurioalueen vaurioita ja suunnikkaat monen vaurioalueen vaurioita. Lihavoitu kolmio kuvaa vauriota alueella 2. Lihavoitu suunnikas kuvaa yhtäaikaista vauriota alueilla 4,5 ja 6. Katkoviiva osoittaa maksimivauriopituuden. Mikäli vauriota kuvaava muoto osastointikolmiossa jää kokonaan tai ulottuu osittain katkoviivan alle, tarkoittaa se, että vaurion pituus ei ylitä maksimivauriopituutta. Tällöin laivan katsotaan selviävän kyseisen vaurion sattuessa.

### 3.3.2 Permeabiliteetti

Tilan permeabiliteetti esitetään suhdelukuna, joka kuvaa kuinka paljon tilaan todellisuudessa mahtuu vettä suhteessa tilan tilavuuteen. Eri tilatyypeille on määritelty permeabiliteetit säännöissä (Taulukko 1).

Taulukko 1. Permeabiliteetit (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 7-3.1).

Spaces	Permeability
Appropriated to stores	0,60
Occupied by accommodation	0,95
Occupied by machinery	0,85
Void spaces	0,95
Intended for liquids	0 or 0,95

Varastotilojen permeabiliteetti on 0,60, sillä niissä säilytettävät tavarat vievät merkittävän osan tilan tilavuudesta. Jos tilassa oletetaan olevan vähän tilavuutta vieviä esineitä tai rakenteita, permeabiliteetti on korkea. Esimerkiksi kuivatankkien permeabiliteetti on 0,95.

### 3.3.3 Indeksit

Laivalle lasketaan vauriosta selviämisen todennäköisyys  $A$  eli saavutettu indeksi sekä vaadittu osastointi-indeksi  $R$ . Saavutetun indeksin täytyy olla suurempi tai yhtä suuri kuin vaaditun osastointi-indeksin eli  $A \geq R$ . Tällöin laivan osastointi on riittävä.

Kun lasketaan vaadittua osastointi-indeksiä matkustaja-aluksille, otetaan huomioon yhteenlaskettu henkilömäärä laivassa ( $N$ ). Henkilömäärä määrittää mitä kaavaa käytetään vaaditun osastointi-indeksin laskemiseen (Taulukko 2).

Taulukko 2. R-indeksi (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 6.2.3).

Persons on board	R
$N < 400$	$R = 0,722$
$400 \leq N \leq 1350$	$R = N / 7580 + 0,66923$
$1350 < N \leq 6000$	$R = 0,0369 \times \ln(N + 89,048) + 0,579$
$N > 6000$	$R = 1 - (852,5 + 0,03875 \times N) / (N + 5000)$

A-indeksin laskennassa otetaan huomioon kolme eri syvyyttä. Syvin osastointisyväys  $d_s$  on syväys kesälastiviivassa. Kevyt operointisyväys  $d_l$  on syväys kevyimmällä arvioidulla lasti- ja tankkitilanteella sisältäen kuitenkin tarvittavan määrän painolastivettä sekä matkustaja-aluksen tapauksessa maksimimäärän matkustajia ja miehistöä. Osittainen osastointisyväys  $d_p$  muodostuu, kun kevyeen operointisyväykseen  $d_l$  lisätään 60 % sen ja syvimmän osastointisyväyksen  $d_s$  välisestä erotuksesta. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 2.10-12.)

Saavutettu indeksi A lasketaan säännön mukaan (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 7.1) osittaisten indeksien  $A_s$ ,  $A_p$  ja  $A_l$  summana

$$A = 0,4A_s + 0,4A_p + 0,2A_l, \quad (2)$$

jossa

$A_s$  on saavutettu indeksi syväydellä  $d_s$

$A_p$  on saavutettu indeksi syväydellä  $d_p$

$A_l$  on saavutettu indeksi syväydellä  $d_l$ .

Osittaiset indeksit lasketaan seuraavalla kaavalla (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 7.1):

$$A = \sum p_i s_i, \quad (3)$$

jossa

$i$  on tarkasteltavan osaston tai osastoryhmän tunnus

$p_i$  on todennäköisyys, jolla osastoon tai osastoryhmään tulvii vettä, horisontaalista osastointia ei huomioida

$s_i$  on tulvineen osaston tai osastoryhmän selviämisen todennäköisyys, huomioidaan myös horisontaalinen osastointi.

Jos  $s_i = 0$ , kyseinen osasto ei selviä vauriosta. Ainoastaan ne vauriot, joissa  $s_i > 0$ , vaikuttavat A-indeksiin.  $S_i$  liittyen sääntöjä on tarkennettu, jotta esimerkiksi kuvan 7 mukainen osastointi ei pääse toteutumaan.



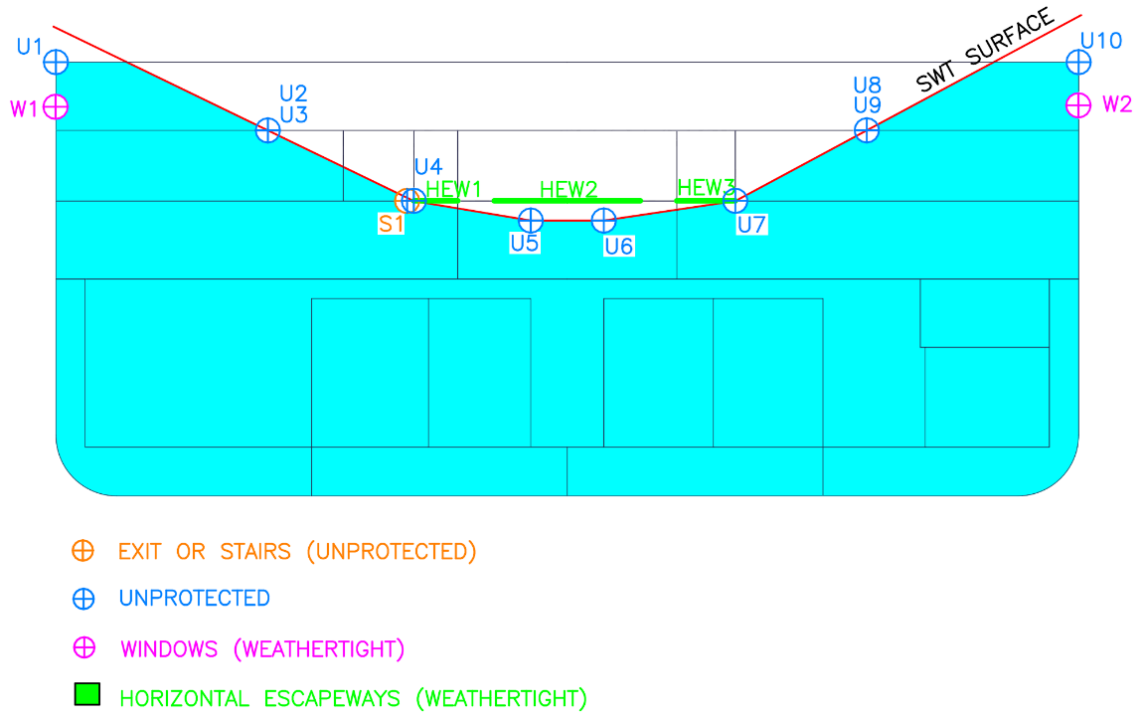
Kuva 7. Osastointiesimerkki (Ruponen 2021, 137).

Vaikka kyseinen osastointi täyttää vaatimuksen  $A \geq R$ , se ei ole sallittu. Vaurio x:llä merkittyihin poikittaisiin vt-laipioihin aiheuttaisi  $s = 0$ , mikä tarkoittaa siis sitä, ettei laiva selviä vauriosta. Selvästi pidempi osasto on siis liian kriittinen vuotovakavuuden kannalta eikä osastointi ole SOLAS 2020 Regulation 8.2-3 vaatimusten mukainen. Matkustaja-aluksen, jonka on tarkoitus kuljettaa vähintään 36 ihmistä, täytyy kestää tietyn laajuinen sivuvaurio. Vähintään 400 matkustajan aluksille vaurion pituus on  $0,03L$ , mutta kuitenkin vähintään 3 metriä. Vaurion syvyys on  $0,1B$ , mutta vähintään 0,75 m. Vaurio voi sijoittua mihin tahansa kohtaan sivulaidoituksessa ja sen oletetaan osuvan suorassa kulmassa laivan keskilinjaan nähden syvimmän osastointisyvyyksen tasolla. Näiden vaurioiden kohdalla täytyy toteutua  $s_i \geq 0,9$  kaikilla kolmella lastitilanteella. Jos laskennassa otetaan huomioon eri trimmit, vaatimuksen täytyy toteutua myös niiden osalta. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 8.2-3.)

Lisäksi regulation 8.1 määrittää vastaavanlaisen vaatimuksen vähintään 400 henkilöä kuljettavan matkustaja-aluksen keulavauriolle. Vauriossa, joka kattaa kaikki  $0,08L$  keulaperpendikkelistä perään päin ulottuvat osastot, täytyy toteutua  $s_i = 1$  kaikilla kolmella lastitilanteella. Vaatimuksen täytyy toteutua myös eri trimmien osalta. (SOLAS 2020 Chapter II-1 Regulation 8.1.)

### 3.3.4 Semi-vesitiivis pinta

Semi-vesitiivis pinta generoidaan probabilistisen vuotovakavuuslaskennan perusteella. Svt-pinta muodostuu sen vesiviivapinnan mukaan, joka aiheutuu pahimmasta mahdollisesta vauriosta, josta laiva vielä selviää. Kuvassa 8 svt-pinta on kuvattu punaisella viivalla. Pinta muodostuu vaurioiden, joiden  $s_i > 0$ , aiheuttamien kallistumien ja niistä seuranneiden vedenpintojen mukaan.



Kuva 8. Svt-pinta ja aukot.

Aukot määrittävät svt-pintaa rajoittamalla vuodon etenemistä laivassa. Aukot ovat pääasiassa laskennassa hyödynnettäviä pisteitä, joihin vuodon katsotaan pysähtyvän. Kuvassa 8 on esitetty erityyppisiä aukkoja. Oranssilla värillä viitataan portaikkoon tai poistumistiehen. Siniset aukot ovat suojaamattomia aukkoja. Magentalla merkityt aukot ovat säätiiviitä ikkunoita. Säätiiviit horisontaaliset pakotiet on esitetty kuvassa vihreällä.

Poikkileikkaukset, joissa svt-pinta ja aukot esitetään, otetaan jokaisen poikkittaisen vt-laipion molemmilta puolilta. Yksinkertaistamisen vuoksi näistä voidaan valita käytettäväksi vain toinen eli korkeamman svt-pinnan sisältävä poikkileikkaus. Lisäksi poikkileikkaus voidaan ottaa tarvittaessa muista kohdista, joissa svt-pinnan esittäminen on tarpeen.

Poikkileikkauksuvia ja svt-pintoja tarvitaan muun muassa ovien vesitiiveysvaatimuksia sekä tankkien ilmaputkia määritettäessä. Ilmaputkien päiden on jätävä lopullisen kellunta-asennon vesiviivapinnan yläpuolelle (katso 2.3 kuva 2), mutta putkien päät voivat kuitenkin ennen lopullista kellunta-asentoa jäädä vedenpinnan alle. Tämän vuoksi ilmaputkien päissä on oltava säätiiviit sulkulaitteet. Keskellä laivaa sijaitsevien tankkien ilmaputkien on käytävä ensin svt-pinnan yläpuolella, josta ne voidaan reitittää laitaan. Näin putkiin saadaan luotua ilmatasku, joka estää veden pääsyn tankkiin vauriotilanteessa.

## 4 Esimerkkilaiva

Meyer Turku Oy:ssä halutaan tutkia uusia mahdollisuuksia ja kehittää työtapoja jatkuvasti. Aiemmin vuotovakavuuslaskenta on suoritettu NAPA:ssa komentotasolla käyttämällä laskentaa varten luotuja makroja. Nyt laskentaan kokeillaan NAPA:n PROB Manageria. Valitaan tarkasteltavaksi matkustaja-alus, joka on suunniteltu viimeisimpien eli SOLAS 2020 sääntöjen mukaan.

Ensimmäinen työvaihe on tutustua PROB Managerin käyttöön. Esimerkkilaivalle on jo aiemmin laskettu vuotovakavuus käyttämällä makroja. Suoritetaan laskenta uudelleen PROB Managerissa tavoitteena saada yhteneväiset tulokset. Lopuksi tutkitaan mahdollisuutta optimoida vuotovakavuutta tekemällä muutosehdotus koskien vesitiivistä osastointia.

### 4.1 NAPA

NAPA Oy tarjoaa ohjelmisto- ja tietopalveluja, joita hyödynnetään laivojen suunnittelussa sekä operoinnissa. NAPA (Naval Architectural Package) on NAPA Oy:n tarjoama ohjelmisto, jonka kehittäminen aloitettiin jo 1970-luvulla. Ohjelmisto sisältää toimintoja muun muassa hydrostaatiikan ja vakavuuden analysointiin sekä rungon ja rakenteiden mallintamiseen. Lähes 95 % kaikista maailman uudisrakennetuista laivoista on NAPA-ohjelmistoa hyödyntävien tahojen suunnittelema ja rakentama. (NAPA 2023.) Lisäksi luokituslaitokset käyttävät sitä tarkistuslaskelmissa.

#### 4.1.1 PROB Manager

PROB Manager eli Probabilistic Manager on yksi NAPA Manager –käyttöliittymän sovelluksista. Nämä sovellukset koostuvat erilaisista makroista. Makrolla tarkoitetaan toimenpiteiden tai kommentojen sarjaa. Kun makro ajetaan se suorittaa kaikki siihen kerätyt komennot määrättyssä järjestyksessä. PROB Manager koostuu makroista, jotka suorittavat vuotovakavuuslaskennan eri vaiheita.

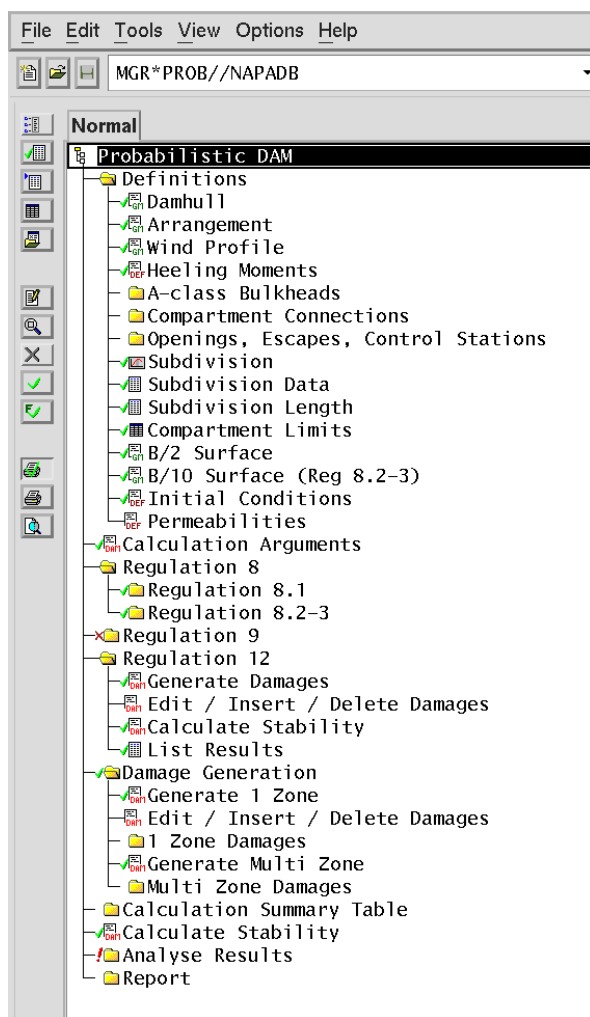
PROB Managerissa laskenta tapahtuu probabilistisella menetelmällä. Laskenta perustuu seuraaviin sääntöihin ja päätöslauseelmiin:

- SOLAS Chapter II-1, Part B-1, Regulations 6 and 7
- SOLAS Chapter II-1, Part B-2, Regulation 9
- MSC.216(82)
- MSC.281(85)
- MSC.421(98)

Lisäksi PROB Managerilla voidaan arvioida Tukholman sopimuksen (2003/25/EC) toteutumista kun tarkastellaan matkustaja-autolautojen vuotovakavuutta. (NAPA 2022.2-1 Manuals.)

Laskenta aloitetaan avaamalla haluttu projekti eli laivamalli PROB Managerissa. Vaadittuja tietoja aletaan syöttää etenemällä ylhäältä alaspäin (Kuva 9). Aluksi kohdassa "Probabilistic DAM" täytetään muun muassa seuraavat tiedot: laivatyyppi, matkustajamäärä, osastointisyvyys, käytettävä "setup" ja tilajärjestely. Seuraavaksi valitaan esimerkiksi laskennassa käytettävä tuuliprofiili, aukkotaulukot sekä kallistavat momentit. Jotkin tiedoista NAPA hakee tai laskee automaattisesti.

Regulation 8.1 –kansio on näkyvässä, kun kyseessä olevan laivan matkustajamäärä on yli 400 henkilöä. Laivalle lasketaan regulation 8.1 mukainen keulavaurio. Kohdassa Regulation 8.2-3 laivalle lasketaan pienet sivuvauriot (minor side damages). Regulation 8 sisältämät vaatimukset on avattu tarkemmin kappaleessa 3.3.3. Regulation 9 laskee kaksoispohjan vauriot. Törmäyslaipioon kohdistuvat vauriot lasketaan kohdassa regulation 12.



Kuva 9. PROB Manager (NAPA 2022.2-1)

Manager luo annettujen tietojen perusteella yhden osaston vauriot. Sen jälkeen niitä on mahdollista muokata ja poistaa tai lisätä uusia vaurioita. Yhden osaston vaurioiden perusteella luodaan monen osaston vauriot. Lopuksi lasketaan A-indeksi päivittämällä kohta "Calculate Stability". Kuvassa 10 näkyy laskennan tulos.

## List Summary of Calculated Results

=====

Required subdivision index R: 0.83XXX

TRIM=ALL

## PROBABILISTIC DAMAGE STABILITY

DAMAGES	W*P*V*S
1-ZONE DAMAGES	0.28XXX
2-ZONE DAMAGES	0.31XXX
3-ZONE DAMAGES	0.16XXX
4-ZONE DAMAGES	0.07XXX
5-ZONE DAMAGES	0.007XX
6-ZONE DAMAGES	0.001XX
A-INDEX TOTAL	0.83XXX

Kuva 10. Vuotovakavuuslaskennan tulos (NAPA 2022.2-1).

Tulosnäkyssä on ilmoitettu R-indeksi, kokonaisarvo A-indeksille sekä eritelty miten A-indeksi jakautuu riippuen vaurioalueiden määrästä. Kyseisen laivan vuotovakavuus on laskettu käyttäen enintään kuutta vaurioaluetta. Tarkat arvot ovat piilotettu kuvasta jälkepäin. PROB Managerissa on lisäksi tulosten analysointiin ja raportointiin liittyvät kansiot, joista saadaan laskennan jälkeen erilaisia listoja, taulukoita ja kaavioita tuloksista sekä laskennassa käytetyistä arvoista.

## 4.1.2 Vertailu

PROB Managerilla päästiin hyvin lähelle samaa tulosta kuin pelkästään makroilla laskemalla. Managerilla saatu A-indeksi esimerkkilaivalle on 0,013 % suurempi kuin makroilla saatu arvo.

Syitä tuloksien eroavuuteen tutkittiin. Yksi merkittävä ero on se, että Manager muodostaa vaurioita ainakin tämän laivan kohdalla hieman eri tavalla verrattuna toiseen laskentatapaan, minkä vuoksi vaurioita tuli muutama kymmen enemmän. Tämä teki vaurioiden vertailusta hankalaa, sillä niiden kuvakset eivät täysin täsmänneet makroilla muodostettujen vaurioiden kuvauksiin.

Pelkästään makroilla tapahtuva laskenta on melko vanha tapa laskea vuotovakavuutta ja huomattiin, että makrot sisältävät sellaisia elementtejä, joita PROB Manager ei pysty käyttämään. NAPA:n käyttäjätuesta saatiin hyvin apua tähän asiaan liittyen ja he osasivat kertoa mitä elementtejä Manager pystyy hyödyntämään sekä minkä nimisiä



elementtejä se pystyy luomaan vuotovakavuuslaskennassa. Esimerkiksi Manager ei luo erästä tietyn nimistä vaihetta, joka sisältyy vanhempaan laskentatapaan.

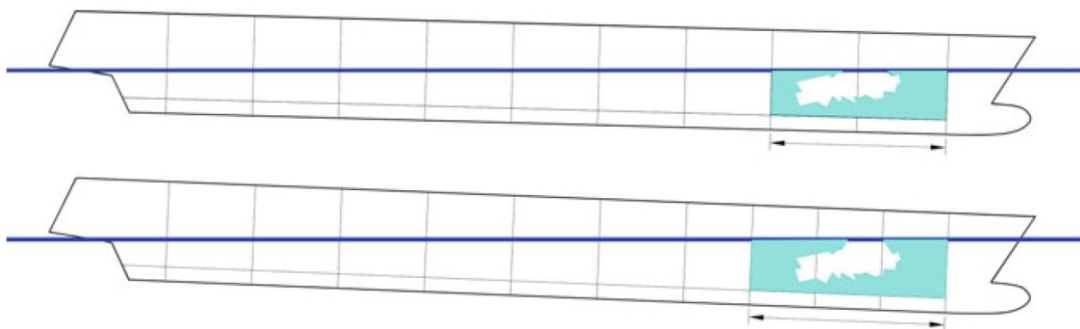
Manager helpottaa vuotovakavuuslaskentaa, sillä sitä käytettäessä makroja ei tarvitse ylläpitää tai päivittää itse. Tämä auttaa vähentämään myös käyttäjän tekemien virheiden määrää. Lisäksi NAPA kehittää jatkuvasti Manageria kuten muitakin sovelluksiaan ja käyttäjät voivat antaa palautetta Managerin kehittämiseksi. Jos Managerin käytössä ilmenee ongelmia, voidaan hyödyntää NAPA:n tukea.

#### 4.2 Vuotovakavuuden optimointi

Tutkitaan, onko esimerkkilaivan vuotovakavuutta mahdollista parantaa tekemällä muutoksia vesitiiviiseen osastointiin. Esitellään lyhyesti myös muita tapoja vaikuttaa A-indeksiin.

A-indeksi haetaan yleensä mahdollisimman lähelle R-indeksiä kustannustehokkuuden vuoksi. Jos A-indeksi on paljon korkeampi kuin R-indeksi, se tarkoittaa käytännössä sitä, että osastointi on tarpeettoman tiheä ja laiva on vaadittua turvallisempi. Osastoinnissa ja vuotovakavuustarkastelussa turvallisuus on erittäin tärkeä näkökulma, mutta tavoitteena on kuitenkin saada se järkevästi tasapainoon kustannusten kanssa niin, että laivan rakentaminen on yhä kannattavaa. Sen lisäksi, että A-indeksi haetaan lähelle R-indeksiä, optimoinnissa täytyy ottaa huomioon myös ehjän laivan vakavuudesta tulevat vaatimukset. Asia on havainnollistettu kappaleessa 4.2.1 (katso kuvio 2).

Vesitiiviiden osastojen määrän lisääminen ei aina paranna laivan turvallisuutta. Kuvassa 11 on esitetty kaksi samanlaista laivaa hieman toisistaan poikkeavilla osastoinneilla. Molempiin laivoihin on syntynyt samanlaiset vauriot, mutta osastointien takia vaurioilla on erilaiset seuraukset. Alemmassa laivassa osastointi on tiheämpi, mutta vaurion osuessa kolmeen osastoon, vuoto on suurempi kuin ylemmässä laivassa, jossa vain kaksi osastoa vaurioituu. Kuvan esimerkki osoittaa, että vt-osastoja vähentämällä on mahdollista joissain tilanteissa nostaa laivan turvallisuutta.



Kuva 11. Vaurioesimerkki (Aarnio 2022, 85).

Jos A-indeksi jää liian pieneksi, eikä haluta tai voida enää tehdä muutoksia osastointiin, indeksiä voidaan parantaa suurentamalla laivan GM:ää. Käytännössä se tapahtuu

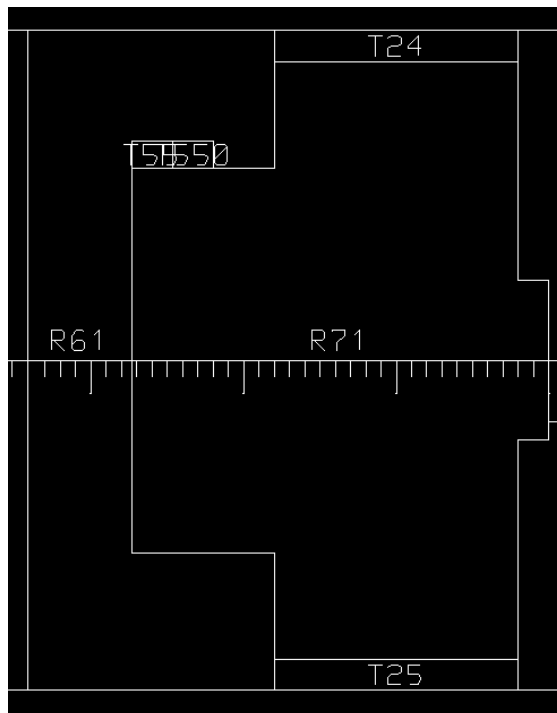
muokkaamalla NAPA:ssa GM-käyrää, johon voidaan tehdä muutoksia antamalla GM:lle uudet arvot syväyksillä  $d_s$ ,  $d_p$  tai  $d_l$ . GM:n suurentaminen ei välttämättä ole kannattavaa, sillä se kasvattaa laivan poikittaisliikkeitä. Matkustaja-aluksissa painopistettä G ei kuitenkaan käytännössä ole mahdollista saada niin alas, että poikittaisliikkeet kasvaisivat haitallisen suuriksi.

Toinen vaihtoehto A-indeksin parantamiseksi on nostaa laipiokantta ylemmäs. Tämä kuitenkin tuo lisää painoa sekä kustannuksia ja voi aiheuttaa haasteita laivan toiminnallisten vaatimusten suhteen. Lisäksi A-indeksiin voidaan vaikuttaa suunnittelemalla poikittaisvirtauskanavat niin, että vuodoista tulee onnettomuustilanteessa mahdollisimman symmetrisiä. Myös aukkojen sijoittelulla voidaan vaikuttaa laivan vuotovakavuuteen.

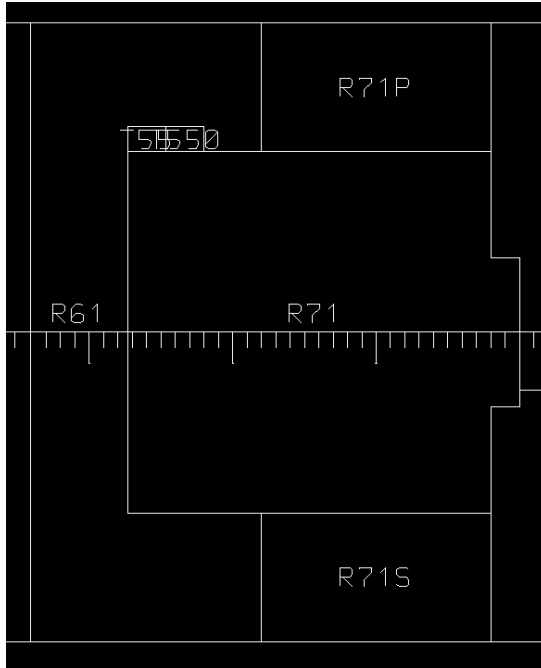
#### 4.2.1 Muutosehdotus

Tarkoituksena on luoda muutosehdotus esimerkkilaivan vesitiiviiseen osastointiin tietyllä rajatulla alueella. Muutosehdotuksen toimivuus yleisjärjestelyn suhteen tarkastetaan hyvin karkealla tasolla, mutta kuitenkin niin, että voidaan todeta muutoksien olevan mahdollisia toteuttaa. Ehdotuksen mukaiset muutokset tehdään NAPA:ssa ja suoritetaan vuotovakavuuslaskenta PROB Managerilla, jonka jälkeen tuloksia verrataan alkuperäisen osastoinnin kanssa.

Muutoksia tehdään kahden vesitiiviin osaston alueella konetiloissa (Kuva 12). Pääkone sijaitsee tilassa R71, jonka laidoilla ovat kallistustankit T24 sekä T25.



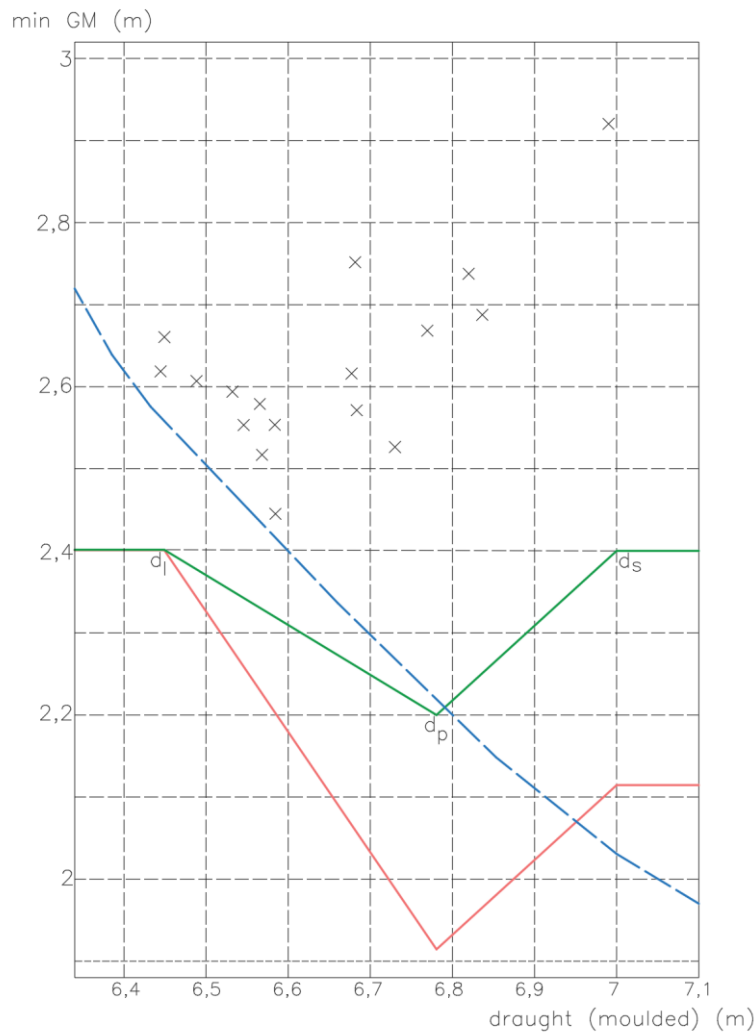
Kuva 12. Alkuperäinen osastointi (NAPA 2022.2-1).



Kuva 13. Muutettu osastointi (NAPA 2022.2-1).

Suljetaan pääkone neliön malliseen tilaan (Kuva 13). Luodaan konehuoneen laidoille tilat R71P sekä R71S. Yhdistetään luodut tilat NAPA:ssa R61:n kanssa, jolloin muodostuu U-mallinen vesitiivis osasto. U-mallinen osasto voi olla joskus ongelmallinen esimerkiksi vt-ovien sijoittelun kannalta. Tässä tapauksessa se ei kuitenkaan muodostu haasteeksi, sillä tilojen R61 ja R71 välillä ei ole vt-ovia vaan kulku tilaan R71 tapahtuu yllä olevan kannen kautta. Kallistustankit siirretään laivan peräosaan. Aukkoihin on tehtävä myös muutoksia. Muutosten seurauksena laipiokannen vesitiiviit alueet muuttuvat jonkin verran. Muutosten jälkeen vt-osastoja on tarkasteltavalla alueella kahden sijaan yksi.

Lasketaan vuotovakavuus PROB Managerilla. Muutosehdotuksen mukainen osastointi tuo 0,97 % huonomman A-indeksin verrattuna alkuperäiseen eli pelkästään näillä muutoksilla indeksiä ei saada paremmaksi. Osastoinnin muokkaaminen ei kuitenkaan ole ainoa keino optimoida vuotovakavuutta, joten tarkastellaan seuraavaksi GM-käyriä (kuvio 2). Eri lastitilanteita ja säätapauksia kuvataan x:llä. Sininen katkoviiva on tasaköyllillä olevan ehjän laivan GM-käyrä ja punainen viiva on vaurioituneen laivan GM-käyrä ennen optimointia. Huomataan, että käyrien välille on jäänyt paljon liikkumavaraa ja GM:n nostaminen on tässä tapauksessa järkevää.



Kuvio 2. GM-käyrät.

Optimaalisesti käyrät kulkisivat lähellä toisiaan, sillä vuotovakavuus kannattaa optimoida ehjän laivan vakavuusvaatimukset huomioon ottaen. Jos vaurioituneen laivan GM-käyrä kulkee paljon alempana verrattuna ehjän laivan käyrään, kertoo se siitä, että laivan osastoinnista on tehty ns. yliturvallinen. Vaikka turvallisuus onkin ehdottoman tärkeä asia, liian turvallisen laivan rakentaminen ei ole kannattavaa esimerkiksi kustannuksia ajatellen.

Muokataan PROB Managerissa GM:n arvoja eri syväyksillä. Vihreä viiva on vaurioituneen laivan GM-käyrä optimoinnin jälkeen (kuvio 2).  $D_1$  pysyy ennallaan, uusi  $d_p$  on 2,200 m ja uusi  $d_s$  on 2,400 m. GM:n nostamisen myötä A-indeksin pitäisi nousta. Suoritetaan vuotovakavuuslaskenta uudestaan ja A-indeksi on nyt 3,9 % suurempi kuin ennen GM:n nostamista saatu A-indeksi sekä 2,99 % suurempi kuin R-indeksi.  $A \geq R$  toteutuu ja tämä jää lopulliseksi tulokseksi muutosehdotukselle.

#### 4.2.2 Lopputulos

Muutosehdotuksen myötä laivassa on yksi vesitiivis osasto vähemmän. Vt-osastojen määrää vähentämällä saavutetaan erilaisia hyötyjä. Kun osastointi on väljempi, vesitiiviitä laipioita tarvitaan vähemmän. Tämä laskee aluksen painoa sekä kustannuksia. Myös vesitiiviit ovet ovat kalliita, joten niiden määrä on järkevää saada minimoitua. Lisäksi vt-osastoja vähentämällä, lasketaan myös tarvittavien pakoreittien määrää. Jokaisesta vt-osastosta on oltava yksi pakoreitti suoraan ylöspäin pelastusvenekannelle sekä lisäksi toinen pakoreitti. Yleisjärjestelyn luominen on helpompaa, kun pakoreittejä on vähemmän. Myös eri toimintojen sijoittelu laivaan on helpompaa, kun rajoittavia vt-laipioita on vähemmän. Lisäksi logistiikka ja kulkeminen laivassa yksinkertaistuvat harvemman osastoinnin myötä.

Vaikka ehdotetut muutokset vesitiiviiseen osastointiin laskevat A-indeksiä, ovat ne kannattavia tehdä GM:n nostamisen yhteydessä. Näin ollen A-indeksi saadaan tarpeeksi suureksi sekä lisäksi tehdään säästöjä poistamalla yksi vt-osasto. Jos GM:ää ei nostettaisi ehdotetulla tavalla, esitetyt muutokset osastointiin eivät tietenkään olisi järkeviä, sillä A-indeksi jäisi R-indeksiä pienemmäksi.

## 5 Yhteenveto ja pohdinta

Työn tavoitteena oli optimoida matkustaja-aluksen vuotovakavuutta. Esimerkkilaivalle luotiin muutosehdotus, johon sisältyy muutokset vesitiiviiseen osastointiin sekä GM:n kasvattaminen. Ehdotuksen mukaisilla muutoksilla saavutetaan riittävä A-indeksi sekä arvokkaita etuja yhden vesitiiviin osaston poistamisen myötä, minkä vuoksi optimointi voidaan katsoa onnistuneeksi ja kannattavaksi.

Työn aikana tekijä tutustui osastointiin, vuotovakavuutta määrittäviin sääntöihin ja laskennan eri vaiheisiin. Kerätyn tiedon pohjalta muodostui hyvä yleiskuva siitä, miten vuotovakavuuslaskenta etenee ja mitkä tekijät vaikuttavat laskentaan sekä miten tuloksia hyödynnetään. Oleellinen osa työtä oli perehtyä NAPA:n PROB Manageriin ja testata sitä vuotovakavuuden laskemiseen. Opinnäytetyön toteuttamisen aikana saadun kokemuksen perusteella, PROB Managerin voidaan todeta olevan hyvin käyttökelpoinen sovellus vuotovakavuuslaskentaan.

Vuotovakavuus on aiheena niin laaja, että aika opinnäytetyön tekemiseen tuntui rajalliselta. Aikaa kului paljon PROB Managerin käytön opetteluun sen ollessa tekijälle täysin ennalta tuntematon sovellus. Jos aikaa olisi ollut runsaammin, optimointimahdollisuuksien tutkimista olisi voinut ehdottomasti jatkaa ja luoda useampia muutosehdotuksia.

Opinnäytetyö lisäsi merkittävästi tekijän tietoutta vuotovakavuuslaskennasta sekä siitä, miten laaja vaikutus osastoinnilla ja vuotovakavuusvaatimuksilla on myös laivasuunnittelun muihin osa-alueisiin. Ennakkotiedot vuotovakavuudesta olivat melko vähäiset, joten opinnäytetyön tekeminen antoi hyvät valmiudet tuleviin työtehtäviin.

## Lähteet

Aarnio, M. 2022. Cruise Ship Handbook. E-kirja SpringerLink-sivustolla. Sveitsi: Springer International Publishing AG. Maksullinen tiedosto. Viitattu 24.04.2023.  
<https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-11629-2>

Francescutto, A & Papanikolaou, A. 2010. Buoyancy, stability, and subdivision: from Archimedes to SOLAS 2009 and the way ahead. Reasearchgate.net-sivustolla. Viitattu 03.04.2023.  
[https://www.researchgate.net/figure/Evolution-of-damage-stability-standards-for-passenger-ships-in-SOLAS-a-requirements\\_fig1\\_259976983](https://www.researchgate.net/figure/Evolution-of-damage-stability-standards-for-passenger-ships-in-SOLAS-a-requirements_fig1_259976983)

IMO 2023. Introduction to IMO. Viitattu 23.03.23.  
<https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>

Luhmann, H. 2013. Watertight Doors in Passenger ship design. Meyer Werft. Pdf-tiedosto. Viitattu 02.04.2023.  
[https://www.gard.no/webdocs/WTDoors/5.LUHMANN\\_WTD.pdf](https://www.gard.no/webdocs/WTDoors/5.LUHMANN_WTD.pdf)

NAPA 2022.2-1 Manuals. Manager Applications. Probabilistic Damage (PROB). Viitattu 06.02.2023.

NAPA 2023. Over 30 Years of Maritime Software Excellence. Viitattu 06.02.2023.  
<https://www.napa.fi/about-napa/>

Ruponen, P & Routi, A-L. 2018. Design method for efficient cross-flooding arrangements on passenger ships. Pdf-tiedosto saatu A-L Routilta. Viitattu 16.03.2023.

Ruponen, P. 2021. Principles of Ship Buoyancy and Stability. E-kirja Aalto University Learning Centre -sivustolla. Helsinki: Unigrafia Oy. Viitattu 05.04.2023.  
<https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/110873/isbn9789526405803.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 10.2. Construction of watertight bulkheads. Rulefinder. Viitattu 12.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 13.1-2.1. Openings in watertight bulkheads below the bulkhead deck in passenger ships. Rulefinder. Viitattu 14.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 13.5.1-2. Openings in watertight bulkheads below the bulkhead deck in passenger ships. Rulefinder. Viitattu 14.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 13.7.1.2. Openings in watertight bulkheads below the bulkhead deck in passenger ships. Rulefinder. Viitattu 14.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 2.10-12. Definitions. Rulefinder. Viitattu 23.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 2.17. Definitions. Rulefinder. Viitattu 14.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 6.2.3. Required subdivision index R. Rulefinder. Viitattu 23.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 7.1. Attained Subdivision Index A. Rulefinder. Viitattu 24.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 7-3.1. Permeability. Rulefinder. Viitattu 23.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 8.1. Special requirements concerning passenger ship stability. Rulefinder. Viitattu 20.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 8.2-3. Special requirements concerning passenger ship stability. Rulefinder. Viitattu 20.04.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-1. Regulation 9.2. Double bottoms in passenger ships and cargo ships other than tankers. Rulefinder. Viitattu 14.03.2023.

SOLAS 2020. Chapter II-2. Regulation 13.3.2.1.1. Means of escape. Rulefinder. Viitattu 16.03.2023.

SOLAS 2020. Resolution MSC.429(98)/Rev.1. Revised Explanatory Notes to the SOLAS Chapter II-1 Subdivision and Damage Stability Regulations. Part A. Introduction. Rulefinder. Viitattu 17.03.2023.

SOLAS 2020. Resolution MSC.429(98)/Rev.1. Revised Explanatory Notes to the SOLAS Chapter II-1 Subdivision and Damage Stability Regulations. Part B. Regulation 7-1. Calculation of the Factor  $\pi$ . Rulefinder. Viitattu 23.03.2023.