

Opinnäytetyö AMK

Konetekniikka

2023

Henri Reivolahti

Painolastijärjestelmän suunnittelu matkustaja-aluksissa



Opinnäytetyö (AMK) | Tiivistelmä

Turun ammattikorkeakoulu

Konetekniikka | Meritekniikka

2023 | 89

Henri Reivolahti

Painolastijärjestelmän suunnittelu matkustaja- aluksissa

Painolastijärjestelmän suunnittelu on tärkeä osa aluksen suunnitteluprosessia. Siitä ei kuitenkaan ole olemassa kattavaa yleisohjetta. Opinnäytetyön toimeksiantajan kanssa on yhdessä todettu, että asiaa olisi syytä tarkastella tarkemmin. Myöskään eri järjestelmätyyppien vertailua, josta selviäisi niiden ominaisuudet, ei ollut olemassa. Työn tavoitteeksi muodostuikin tällaisen yhteenvedon tekeminen tulevien laivasuunnittelijoiden avuksi, niin yrityksen sisällä, kuin sen ulkopuolellakin.

Painolastijärjestelmät suunnitellaan luokituslaitosten ja merenkulun kattojärjestöjen sääntöjen mukaan. Prosessiin liittyy myös paljon kokemusperäistä tietoa, jota ei aina ole viety kirjalliseen muotoon muiden luettavaksi. Insinööriyön tavoitteena oli saada tähän muutos ja tuoda tietoa helposti saavutettavaksi. Työ tehtiin kirjallisuuskatsauksena, jossa tutkittiin luokituslaitosten sääntöjä ja vaatimuksia sekä laitevalmistajien puhdistuslaitteistojen ominaisuuksia.

Kerätyn aineiston avulla voidaan koostaa laajempi työohje järjestelmän suunnittelua varten. Aineistoa voidaan käyttää myös koulutusmateriaalina. Työn tekemisen aikana on kerätty lisää tietoa eri järjestelmistä ja niiden ominaisuuksista. Tietoja hyödyntämällä voidaan tulevaisuudessa tehdä parempia suunnitteluratkaisuja.

Asiasanat:

Painolastijärjestelmä, SRtP, matkustaja-alue, painolastiveden käsittely

Bachelor's Thesis | Abstract

Turku University of Applied Sciences

Mechanical Engineering | Naval Architecture and Marine Engineering

2023 | 89

Henri Reivolahti

Ballast water system design in passenger ships

Designing of the ballast system is an important part of the ship design process, for which there is no comprehensive general guideline. It has been recognized in collaboration with the thesis commissioning party that further examination of the matter is warranted. There was also no existing comparison of different system types to determine their characteristics. Therefore, the objective of the study was to create such a summary to assist future naval architects both within and outside the company.

Ballast systems are designed according to the regulations of the classification societies and maritime governing bodies. The process also involves a significant amount of experiential knowledge that is not always documented for others to read. The aim of the thesis was to bring about a change by making this information easily accessible. The work was conducted as a literature review, examining the regulations and requirements of the classification societies as well as the characteristics of purification systems provided by equipment manufacturers.

By utilizing the collected material, more comprehensive work instructions can be compiled for the design of the system. The material can also be used as training material. Additional information about different systems and their characteristics was gathered during the study. By utilizing this knowledge, better design solutions can be achieved in the future.

Keywords:

Ballast water system, SRtP, passenger ship, ballast water management

Sisältö

Käytetyt lyhenteet tai sanasto	8
1 Johdanto	9
1.1 Työn aihe ja tavoitteet	9
1.2 Sisällön rajaukset	10
2 Sääntövaatimukset	12
2.1 IMO – International Maritime Organization	12
2.2 Luokituslaitokset	13
2.3 Safe Return to Port -vaatimukset	13
3 Järjestelmän suunnittelu	18
3.1 Tyypillinen järjestelmä	18
3.2 Rengas- vai yksittäislinja	20
3.2.1 Rengaslinja	21
3.2.2 Yksittäislinja	24
3.2.3 SRtP:n huomioiminen yksittäislinjan suunnittelussa	29
3.3 Painehäviöt	38
3.4 Pumput	41
3.5 Putket	43
3.6 Venttiilit	46
3.7 Paino	48
3.8 Hinta-arvio	52
4 Painolastiveden käsittely	54
4.1 Sääntövaatimukset	55
4.2 Painolastiveden käsittelytavat	58
4.3 Laittevalmistajien vertailu	59
4.3.1 Laitteiston energiankulutus	65
4.3.2 Laitteiston koko	68
4.3.3 Käyttökustannukset	72

5 Tulokset ja niiden arviointi	75
5.1 Painolastijärjestelmät	75
5.2 Käsittelyjärjestelmät	77
5.3 Tulosten luotettavuus ja käyttökelpoisuus	79
6 Yhteenveto ja päätelmät	80
Lähteet	83

Liitteet

Liite 1. Rengaslinja

Liite 2. Yksittäislinja

Liite 3. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa

Liite 4. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna

Kaavat

Kaava 1. Darcy-Weishbach (EngineerExcel 2023).	39
Kaava 2. Keskimääräinen virtausnopeus.	40
Kaava 3. Reynoldsin luku.	40
Kaava 4. Kinemaattinen viskositeetti.	41
Kaava 5. Pumpun tehontarve.	42

Kuvat

Kuva 1. Yksinkertainen painolastijärjestelmä.	19
Kuva 2. Rengaslinja.	22
Kuva 3. Rengaslinjan pumppukaavio.	23
Kuva 4. Rengaslinjan pumppukaavion virtaussuunnat.	24
Kuva 5. Yksittäislinja.	25
Kuva 6. Yksittäislinjan pumppukaavio	26

Kuva 7. Yksittäislinjan pumppukaavion virtaussuunnat.	27
Kuva 8. Yksittäislinja, pääpumput konehuoneessa.	28
Kuva 9. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.	31
Kuva 10. Vaurio pääpumppujen ja perätankkien välillä.	33
Kuva 11. Vaurio pääkonehuoneessa.	34
Kuva 12. Vaurio kolmannessa pääpalovyöhykkeessä.	35
Kuva 13. Vaurio varapumppuhuoneessa.	36
Kuva 14. Vaurio keulapiikissä.	37
Kuva 15. Ballast water treatment two stages (Ship Business 2015).	54
Kuva 16. Complying with the ballast water management convention (IMO 2023).	56
Kuva 17. Alfa Laval PureBallast 3 (Alfa Laval 2023).	60
Kuva 18. Optimarin painolastiveden puhdistusjärjestelmä (Optimarin 2023).	61
Kuva 19. Wärtsilä Aquarius UV (Wärtsilä 2023).	62
Kuva 20. Evoqua SeaCure (Evoqua 2023).	62
Kuva 21. Hyde Marine laitteisto (De Nora 2023).	63
Kuva 22. LanghBW (Langh Tech 2022).	64
Kuva 23. Wärtsilä Aquarius EC järjestelmä (Wärtsilä 2023).	70
Kuva 24. Rengaslinja.	86
Kuva 25. Yksittäislinja.	87
Kuva 26. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa.	88
Kuva 27. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.	89

Taulukot

Taulukko 1. Rengaslinjan putket.	44
Taulukko 2. Yksittäislinjan putket.	44
Taulukko 3. Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa.	45
Taulukko 4. Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.	45
Taulukko 5. Rengaslinjan venttiilit.	47
Taulukko 6. Yksittäislinjan venttiilit.	47

Taulukko 7. Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa.	48
Taulukko 8. Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa SRtP huomioituna.	48
Taulukko 9. Putkien ja venttiilien yksikköpainot.	50
Taulukko 10. Rengaslinjan paino.	50
Taulukko 11. Yksittäislinjan paino.	50
Taulukko 12. Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa.	51
Taulukko 13. Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa SRtP huomioituna.	51
Taulukko 14. Materiaalimäärät.	53
Taulukko 15. Alfa Laval PureBallast 3 energian kulutus (Alfa Laval 2023).	65
Taulukko 16. Wärtsilä Aquarius UV Energian Kulutus. (Wärtsilä 2023).	66
Taulukko 17. Wärtsilä Aquarius EC energian kulutus (Wärtsilä 2023).	66
Taulukko 18. Hyde Marine Guardian energian kulutus (Hyde Marine 2023).	67
Taulukko 19. Langh Tech LanghBW energian kulutus (Langh Tech 2023).	67
Taulukko 20. Wärtsilä Aquarius UV kokotaulukko (Wärtsilä 2018).	69
Taulukko 21. Wärtsilä Aquarius UV tunnusluvut.	69
Taulukko 22. Wärtsilä Aquarius EC tunnusluvut.	70
Taulukko 23. Alfa Laval PureBallast 3 kokotaulukko (Alfa Laval 2023).	71
Taulukko 24. Alfa Laval PureBallast 3 tunnusluvut.	71
Taulukko 25. Hyde Marine GUARDIAN kokotaulukko (Hyde Marine 2023).	72
Taulukko 26. Hyde Marine GUARDIAN tunnusluvut.	72
Taulukko 27. Käsittelyjärjestelmien käyttökustannuksia.	73
Taulukko 28. Järjestelmien putkimetrit.	76
Taulukko 29. Järjestelmien venttiilimäärät.	76
Taulukko 30. Järjestelmien painot.	77
Taulukko 31. Käsittelyjärjestelmien teho suhteessa kapasiteettiin.	78
Taulukko 32. Käsittelyjärjestelmien fyysiset mitat suhteessa kapasiteettiin.	79

Käytetyt lyhenteet tai sanasto

ANEP	Allied Naval Engineering Publication
BV	Bureau Veritas
BWMS	Ballast water management system
CCS	China Classification Society
DNV	Det Norske Veritas
IMO	International Maritime Organization
LR	Lloyd's Register
MARPOL	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships
MVZ	Main Vertical Zone
RINA	Registro Italiano Navale
RO-PAX	Roll-on/roll-off passenger, matkustaja- ja autonkuljetuslaivan yhdistelmä
SOLAS	Safety of Life at Sea
SPS	Special Purpose Ship
SRtP	Safe Return to Port
USCG	United States Coast Guard
VT	Vesitiivis

1 Johdanto

Painolastivesijärjestelmää käytetään yleisesti aluksen vakavuuden ja tasapainon hallitsemiseen. Painolastivesi on aluksen painolastisäiliöihin pumpattavaa merivettä, jonka avulla voidaan säätää aluksen trimmiä ja vakavuutta.

Matkustaja-alukset tarvitsevat painolastia kompensoimaan matkustajien, lastin ja polttoaineen aiheuttamia muutoksia aluksen painojakaumassa. Painolastivesi pumpataan sisään tai ulos laivan pohjassa tai sivuissa olevista painolastitankeista ja tällä saadaan aikaiseksi muutoksia aluksen asentoon. Painolastivettä voidaan siirtää myös tankista tankkiin. Tämä on erityisen tärkeää silloin, kun alus kohtaa kovaa merenkäyntiä, kovaa tuulta tai lastaus- ja purkuoperaatioiden aikana.

Painolastivesi voi sisältää monenlaisia organismeja, kuten bakteereja, viruksia ja jopa pieniä kaloja ja muita vesieläimiä. Jos tämä vesi päästetään uuteen ympäristöön, voivat nämä organismit kulkeutua ja aiheuttaa merkittäviä ympäristöhaittoja. Haittojen estämiseksi Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on laatinut määräykset, jotka edellyttävät alusten painolastivesien hallintaa haitallisten organismien leviämisen rajoittamiseksi. Haittoja voidaan minimoida eri menetelmillä, kuten painolastiveden puhdistusjärjestelmillä, veden vaihdolla tai muilla puhdistuskeinoilla.

1.1 Työn aihe ja tavoitteet

Painolastijärjestelmiin kohdistuvat säännöt muuttuvat jatkuvasti uusien ympäristö- ja turvallisuussääntöjen myötä. Näitä ovat esimerkiksi IMO:n (International Maritime Organization) asettamat tavoitteet käsittelyjärjestelmille sekä luokituslaitosten SRtP (Safe Return to Port) säännöt, jotka käsittelevät osaltaan myös painolastijärjestelmän toimintaa vauriutilanteessa. SRtP on aiheena varsin uusi, sillä se on tullut vaatimukseksi vasta vuonna 2010. Tämän takia aiheesta on rajallisesti tietoa tarjolla virallisten lähteiden, kuten

luokituslaitosten- tai merenkulun kattojärjestöjen sääntöjen ulkopuolella. Painolastijärjestelmien suunnittelun yhteydessä on huomattu, että aiheesta pitäisi olla laajemmin tietoa yhteen paikkaan koottuna.

Työn tarkoituksena oli tuottaa toimeksiantajalle ajantasainen kirjallisuuskatsaus, jossa huomioidaan tämän päivän luokituslaitosten ja lakisääteisten dokumenttien tuomat rajoitteet ja vaatimukset järjestelmää suunniteltaessa. Tarkoituksena oli myös selvittää vaihtoehtoisten järjestelmämallien (rengas- ja yksittäislinja) hyödyt ja kustannustehokkuus. Puhdistusjärjestelmien osalta toivottu tavoite oli selvittää paras menetelmä painolastiveden puhdistamiseksi.

Tavoitteeksi työlle asetettiin laadukas ja kaikkia osapuolia hyvin palveleva kokonaisuus, jota voidaan tulevaisuudessa käyttää uusien suunnitteluinsinöörien apuna. Työtä voitaisiin käyttää myös jo yrityksen nykyisten suunnitteluohjeiden apuna painolastijärjestelmää suunniteltaessa. Tavoitteet olivat mielestäni hyvin saavutettavissa.

Insinööritö tehtiin Deltamarin Ltd:lle. Deltamarin on meritekniikan alan yritys, joka tarjoaa suunnittelu- ja konsultointipalveluita.

1.2 Sisällön rajaukset

Opinnäytetyön tarkoituksena oli kirjallisuuskatsauksen avulla käsitellä painolastijärjestelmän suunnittelua ja siihen liittyviä sääntöjä. Järjestelmän suunnittelun konsepti- ja myöhempiin suunnitteluvaiheisiin kuuluu merkittävä määrä laivateoriaa, mutta tämän sisällyttäminen työhön olisi tehnyt sisällöstä liian laajan. Siksi laivateoria rajattiin pois aihepiiristä ja keskityttiin pelkästään putkiston suunnitteluun.

Sisällöltään työ koostuu kolmesta suunnitteluprosessin kannalta tärkeimmiksi koetusta pääkohdasta, jotka ovat järjestelmän sääntövaatimukset ja sen suunnittelu sekä painolastiveden käsittely. Yhdessä ne muodostavat laajan, mutta helposti rajattavan kokonaisuuden.

Työssä käytetään esimerkkinä ROPAX-alusta, jonka painolastivesijärjestelmän pohjalta on suunniteltu vertailua varten kolme muuta vaihtoehtoista ratkaisua. Alkuperäinen järjestelmä ja sen pohjalta tehty yksittäislinjajärjestelmä toimivat vertailukohtina rengas- ja yksittäislinjojen vertailussa. Yksittäislinjaa ja sen SRtP-suunnittelua varten on vielä esitelty kaksi eri vaihtoehtoa, joissa pumput on siirretty pääkonehuoneeseen. Näin saatiin kattava aineisto, jota tulkitsemalla selvitettiin järjestelmien eroavaisuudet.

2 Sääntövaatimukset

Kuten laivan kaikkien järjestelmien suunnittelua, myös painolastijärjestelmää koskee useat luokituslaitosten tai lakisääteisten asiakirjojen määrittelemät pykälät. Nämä säännöt varsinkin SRtP:n osalta vaihtelevat luokituslaitosten välillä, mutta pääosin suunnittelukriteerit ovat samat. Perussäännöt järjestelmäsuunnitteluun tulevat IMO:n eli International Maritime Organization alaisuudessa toimivien laitosten kuten SOLAS:n ja MARPOL:n säännöistä. SOLAS eli Safety of Life at Sea ottaa kantaa merenkulun turvallisuuteen ja MARPOL eli International Convention for the Prevention of Pollution from Ships määrää laivojen päästöistä. Näistä varsinkin ensimmäinen ottaa kantaa SRtP-sääntöihin, painolastiveden puhdistusjärjestelmiin ja niiden vaatimuksiin. Luokituslaitokset toimivat IMO:n alaisuudessa ja omilla säännöillään täydentävät IMO:n säännöstöä. Työssä perehdyttiin pääosin DNV:n (Det Norske Veritas) sääntöihin, koska esimerkkialus on luokitettu sen alaisuuteen. On olemassa myös muita laajasti käytössä olevia luokituslaitoksia kuten LR (Lloyds Register), RINA (Registro Italiano Navale), BV (Bureau Veritas) ja CCS (China Classification Society).

2.1 IMO – International Maritime Organization

Kaksi tärkeintä IMO:n alaista asiakirjaa, jotka koskevat painolastiveden hallintaa ja turvallista paluuta satamaan, ovat kansainvälinen yleissopimus alusten painolastiveden ja sedimenttien valvonnasta ja hallinnasta (BWM-yleissopimus) sekä kansainvälinen yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä (SOLAS).

Vuonna 2017 voimaan tulleen BWM-yleissopimuksen tavoitteena on estää haitallisten vesieliöiden leviäminen alueelta toiselle alusten painolastiveden ja sedimentin kautta. Yleissopimus edellyttää, että aluksilla on painolastiveden hallintasuunnitelma ja niiden on täytettävä tietyt painolastiveden päästöstandardit. IMO on asettanut aikarajan kaikille aluksille, johon mennessä

uudisrakenteiden ja vanhojen alusten tulee täyttää painolastiveden käsittelymääräykset. (IMO 2023.)

SOLAS puolestaan on kattava kansainvälinen sopimus, joka asettaa alusten turvallisuuden vähimmäisstandardit, mukaan lukien vaatimukset turvalliselle paluulle satamaan. SOLAS-yleissopimus edellyttää, että aluksilla on tehokkaat ja toimivat järjestelmät painolastiveden hallintaan sekä menettelyt hätätilanteiden käsittelemiseksi, mukaan lukien sellaiset, jotka saattavat edellyttää turvallista paluuta satamaan.

2.2 Luokituslaitokset

Luokituslaitosten antamia ohjeita ja määräyksiä on noudatettava alusten suunnittelu- ja rakennusvaiheessa. Painolastijärjestelmien osalta luokituslaitokset ottavat kantaa muun muassa järjestelmän komponentteihin, niiden materiaaleihin, sijoitteluun ja redundanttisuuteen. Painolastijärjestelmän perussuunnittelun osalta eri luokituslaitosten määräykset ovat hyvin samankaltaiset. Käytetyt säännöt riippuvat siitä, minkä luokituslaitoksen alaisuuteen alus luokitetaan.

Esimerkiksi DNV:n sääntö RU-SHIP Part. 4 CH.6 Piping systems ottaa kantaa laivan putkistojärjestelmiin, joihin myös painolastijärjestelmä kuuluu. Dokumentissa määritellään vaatimukset mm. putkien materiaaleille ja eristykselle sekä pumppujen määrälle ja mitoitukselle. (DNV 2022.)

2.3 Safe Return to Port -vaatimukset

Safe Return to Port eli SRtP on suunnittelusääntö, joka koskee uusia matkustajalaivoja, jotka ovat pituudeltaan vähintään 120 m tai niissä on kolme tai useampia pääpalovyöhykettä (MVZ). Sääntö koskee myös yli 240 hengen SPS-aluksia sekä ANEP 77-säännön täyttäviä sota-aluksia. Pehdyimme opinnäytetyössä sääntöön ainoastaan matkustaja-aluksien osalta. Säännön mukaan aluksen on kyettävä omin voimin palaamaan satamaan yhden A-luokan

tilan palovaurion tai yhden vesitiiviin osaston vuodon sattuessa. SRtP on käytäntönä vielä verrattain uusi, sillä se on otettu käyttöön vasta vuonna 2010. Itse painolastijärjestelmää koskevat SRtP-säännökset vaihtelevat tällä hetkellä luokituslaitosten välillä, mutta tulevaisuudessa säännöt tulevat todennäköisesti olemaan keskenään saman kaltaiset. Työn tekemisen aikana käytettiin uusimpia saatavilla olevia säädöksiä. (SOLAS 2023.)

SOLAS II-2, Reg.21 ja 22 sekä SOLAS II-1 Reg.8–1 määrittelevät laivan järjestelmät, joiden täytyy pysyä toiminnassa vaurioituneen alueen ulkopuolella. SRtP-säännöistä on myös oma IMO:n julkaisema kiertokirje, MSC.1/Circular.1369. Kiertokirjeet ovat sääntöjen tulkintaa tarkentavia dokumentteja.

Painolastijärjestelmä on mainittu kohdissa SOLAS II-2 Reg.21 ja SOLAS II-1 Reg.8–1 sekä MSC.1/Circular.1369 Interpretation 38. Näiden perusteella järjestelmän täytyy toimia turvallisen satamaan paluun aikana, mutta ei evakuointitilanteessa. Evakuointitilanteeseen viitataan kohdassa SOLAS II-2 Reg.22.

Joissain tapauksissa painolastijärjestelmä on voitu sulkea SRtP-vaatimusten ulkopuolelle, mikäli aluksen turvallisuus ei vaarannu. Tämä on todennettu vuotovakavuusvauriolaskentaa avuksi käyttäen. Luokituslaitokset voivat sallia tämän omien sääntöjensä sekä tulkintojensa puitteissa. SRtP-säännöt ovat tämän kohdalla löyhemmät kuin vuotovakavuusvauriosäännöt, koska SRtP-säännöt koskevat vain tilanteita, joissa yksi A-luokan tila tai VT-osasto on menetetty. SOLAS II-1 Part B-1 – Stability Reg.8 ottaa kantaa vähintään 36 henkilöä kuljettaviin matkustaja-aluksiin. Säännön kohdan 3.2 mainitsema pahin tilanne vuotovakavuuden kannalta on vaurio, jonka pituus on 0.03 L missä tahansa laitalevyjen kohdalla tai mikäli vaurio on kahden VT-laipion välissä ja aiheuttaa kahden osaston tulvimisen. Kohta 3.2 koskee vain yli 400 hengen matkustaja-aluksia.

Vuotovakavuuslaskennalla pyritään suunnittelemaan laiva siten, että kahden osaston tulviminen ei aiheuttaisi merkittävää kallistumaa, jota pitäisi pystyä painolastivesijärjestelmällä kompensoimaan.

Edellä mainitut SOLAS säännöt määrittävät sen, mitä luokituslaitokset säännöissään edellyttävät. Luokituslaitokset eivät voi omissa säännöissään kumota katto-organisaation asettamia määräyksiä. Ne voivat ainoastaan täydentää niitä tai viitata niihin omissa teksteissään.

DNV on ottanut käyttöön pakollisen SRtP-luokkamerkin, jonka vaatimukset on esitetty dokumentissa DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Sec.11 Safe Return to port, orderly evacuation and abandonment. Se perustuu SOLAS-sääntöihin, joita DNV tarkentaa omalla alusten suunnitteluun ja SRtP-sääntöjen toimenpanoon liittyvällä tulkinnallaan. Sen kohdassa 4.12 on DNV:n tulkinnat SRtP:n osalta painolastijärjestelmään liittyen. Painolastijärjestelmän edellytetään pysyvän toimintakuntoisena muilla pääpalovyöhykkeillä (MVZ), kuin missä vaurio on sattunut. Kohdassa mainitaan myös, että painolastijärjestelmän ei tarvitse toimia SRtP-tilanteessa, mikäli päätöksen pystyy asianmukaisesti perustelemaan. Muutokset tähän sääntöön täytyy hyväksyttää tilaajalla ja lippuvaltion viranomaisilla. Mikäli muutosta ei haeta, pätevät kohdan 4.12 säännöt järjestelmän suunnittelun osalta.

DNV:n Class Guidelines (CG) dokumentti "0004 Safe return to port" on ohjeistusasiakirja, joka määrittelee vaatimukset varmistaakseen, että alus voi palata turvallisesti satamaan SRtP-vaurio-tilanteessa. Dokumentti on tarkoitettu RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Sec.11 tueksi. Vaikka asiakirja ei käsittele erityisesti painolastivesijärjestelmää, se sisältää joitakin yleisiä järjestelmän suunnitteluun liittyviä ohjeita. Kohdassa 5.3 "Category 2 – systems with a general service across the vessel" otetaan kantaa koko laivaa koskeviin järjestelmiin, joiden kahdentaminen ei ole helposti tehtävissä. Dokumentin mukaan painolastijärjestelmä kuuluu näihin. (DNV 2021.)

LR mainitsee painolastijärjestelmän SRtP-tilanteessa dokumentissa "Rules and Regulations for the Classification of Ships. July 2021 Part 5. Chapter 23.

section 2 Safe Return to Port”. Säännöt ovat kuitenkin huomattavasti niukemmat, kuin DNV:n vaatimukset. Lloyds Registerin ainut vaatimus painolasti- ja pilssivesijärjestelmän toiminnasta SRtP-tilanteessa on se, että järjestelmän on toimittava niissä osin laivaa, jotka eivät ole vaurioituneet. Tämä tulee MSC.1/Circular.1369-dokumentista, jossa painolastijärjestelmän edellytetään toimivan muissa, kuin vaurioituneessa osastossa. (LR 2023.)

BV kertoo omat luokkakohtaiset SRtP-vaatimukset dokumentissa ”NR 598 Implementation of Safe Return to Port and Orderly Evacuation”. Dokumentin kohdassa 2.4 Ballast pumping system otetaan lyhyesti kantaa painolastijärjestelmän toimintavaatimukseen. Säännöt määrittelevät, että tulipalon tai vuodon sattuessa kaksoispohjan yläpuolisessa tilassa, ainoastaan vaurioituneen tilan suoraan alapuolella oleva tankki voidaan menettää. Järjestelmän täytyy säännön mukaan olla toimintakuntoinen kaikkialla muualla laivassa. Säännöt ovat tiukemmat kuin DNV:n eikä BV anna suoraan mahdollisuutta perustella järjestelmän pois jättämistä SRtP:n ulkopuolelle. (BV 2016)

CCS ei varsinaisesti ota kantaa painolastijärjestelmän toimintaan palo- tai vuototilanteessa. CCS:n säännöt mukailevat muiden luokituslaitosten sääntökirjoja ja ovat tästä syystä paikoitellen hyvin tulkinnanvaraisia. CCS viittaa putkijärjestelmien kohdalla suoraan SOLAS II-2 Reg.21.4-dokumenttiin. (CCS 2022.)

Puhdistuslaitteiston toimintaan SRtP-tilanteessa ei oteta suoraan kantaa, mutta sen voi tulkita olevan osa kokonaisuutta sekä SOLAS- että luokituslaitosten säännöissä. SOLAS II-2 Part G Reg. 21.4 kertoo järjestelmät, joiden tulee toimia SRtP-tilanteessa. Säännössä on mainittu yleisesti painolastivesijärjestelmä, joten on tulkinnanvaraista, kuuluuko myös käsittelyjärjestelmä tämän alle. Luokituslaitokset ottavat kantaa puhdistuslaitteiston toimintaan SRtP -tilanteessa. Esimerkiksi DNV säännöissään DNV RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Sec. 11 kertoo, että mikäli aluksen turvallisuus on siitä riippuvainen, voidaan käsittelemätön vesi pumpata tankeista puhdistuslaitteiston ohi suoraan mereen. Tämä perustuu BWM sopimuksen

Regulation A-3 – Exceptions-kohtaan. Kyseisessä kohdassa avataan tarkemmin poikkeustapauksia, joissa painolastivettä voidaan pumpata suoraan mereen tai tankkeihin puhdistuslaitteiston ohi. BV toteaa säännöissään 598-NR_2016 4.4.2, ettei puhdistuslaitteiston tarvitse toimia SRtP-tilanteessa.

Sääntöjen ollessa hyvinkin erilaisia luokituslaitosten välillä, voi niiden tulkitseminen olla vaikeaa. Lisäksi samojen luokituslaitosten tulkinnat ovat voineet vaihdella eri projektien välillä. Jotta oikeat suunnitteluvälittimet voidaan tehdä, täytyy tulkinnoista keskustella luokituslaitosten kanssa. Järjestelmän täydellinen toimivuus SRtP-vauriotilanteessa saattaa tarkoittaa merkittävää määrää kahdennettuja putkia, isoja varapumppuja tai putkien palosuojausta. Kaikki tämä lisäisi merkittävästi laivan rakennuskustannuksia. Tämä tulisi myös lisäämään järjestelmän painoa, ellei putkien materiaalia vaihdettaisi esimerkiksi lasikuitukomposiitiksi. Säännöt ja tulkinnat tulevat todennäköisesti tulevaisuudessa tarkentumaan, kun luokituslaitokset päivittävät omia sääntöjään.

3 Järjestelmän suunnittelu

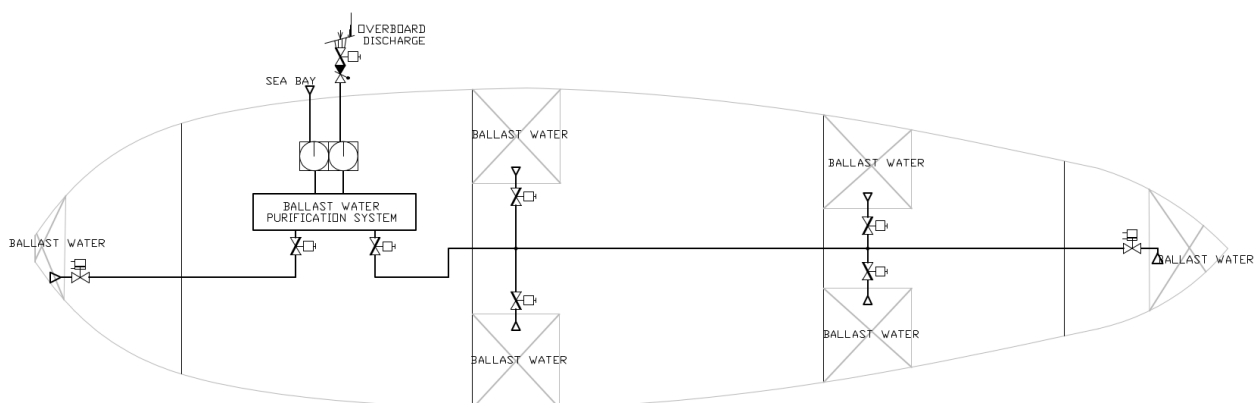
Painolastijärjestelmän suunnittelua aloitettaessa tarvitaan useita laivan muita dokumentteja. Tarvittavat suunnitelmat ovat yleisjärjestelypiirustus (GA), koneistojärjestely (MA), tankkijärjestely, laivan erittely, luokan vaatimat säännöt sekä järjestelmään liittyvät piirustukset. Laivan erittely kertoo tilaajan vaatimukset, joiden mukaan järjestelmien tulee toimia. Suunnittelijan on otettava nämä huomioon, kun järjestelmän suunnittelu alkaa. Muita suunnittelussa tarvittavia kaavioita ovat esimerkiksi pilssivesikaavio sekä harmaa- ja mustavesitankkien huuhtelu tai merivesijäähdytyskaavio. Painolastiveden puhdistuskaavio voidaan esittää erillisenä dokumenttina tai sisällyttää järjestelmäkaavioon. Suunnittelussa tulee myös huomioida tankkien lämmitys, mikäli alus liikkuu esimerkiksi arktisilla alueilla. Valmiissa suunnitelmassa esitetään painolastipumput ja niiden sijainnit, siirtolinjat tankeille, venttiilit, laitteiden numerot, putkikokotaulukko, liittyvien piirustusten luettelo, laiteluettelo, symbolikartat (legends), suunnittelu- ja testipaineet, putkiliitostyypit sekä lämpötila- ja painemittarit. Suunniteltu lämpötila voidaan myös mainita suunnitelmassa, mutta se tulee suoraan laivan erittelystä. Perussuunnitelmassa ei yleensä esitetä liittyvien järjestelmien venttiilejä tai putkistojen kannakointia. Liittyvät järjestelmät kuitenkin merkitään suunnitelmaan siihen kohtaan, missä niiden liitos tapahtuu. Laivan erittelyssä on mainittu järjestelmän erikoiskohdat, esimerkiksi lastitilan käyttö painolastitankkina.

3.1 Tyypillinen järjestelmä

Tyypillinen järjestelmä matkustaja-aluksessa sisältää kaksi painolastivesipumppua, vettä kuljettavan putkiston, venttiilit vesivirtauksen ohjaamiseksi, painolastiveden puhdistusjärjestelmän ja itse painolastivesitankit. Painolastivesitankkien sijainnit ja koot määritellään jo osittain konseptivaiheessa, aluksen vakautta tarkasteltaessa. Tankit sijaitsevat yleensä aluksen pohjassa molemmin puolin kölilinjaa. Rahtialuksissa tankit voivat sijaita

myös ruuman molemmin puolin aluksen sivuilla ja ylettyä laipiokanteen asti. Tankit sijaitsevat yleensä symmetrisesti, jotta eri määrä vettä eri puolilla alusta ei aiheuttaisi ei-toivottua kallistumista. Järjestelmän pumpput on sijoitettu pumppuhuoneeseen, joka yleensä sijaitsee konehuoneen tai sähköpäätaulun lähellä. Pumppuhuone voi kuitenkin aluksesta ja sen suunnittelukriteereistä riippuen sijaita myös muualla. Pumppujen sijoittelulla lähelle konehuonetta pyritään minimoimaan kaapeloinnin pituus, sillä painolastijärjestelmän pumpput ovat tehokkaita ja kuluttavat suhteellisen paljon energiaa siirtääkseen vettä tankkeihin toivotulla nopeudella. Yleensä käytettävät pumpput ovat keskipakopumppuja. Putkiston koko, sijainti sekä järjestelmätyypin valinta rengas- tai yksittäislinjan välillä vaihtelee merkittävästi aluksen koon, käyttötarkoituksen ja liikennöintialueen mukaan. Venttiilien tyypit, määrä ja sijainnit päätetään myös jo perussuunnitteluvaiheessa. Lähtökohtaisesti kaikki painolastijärjestelmän venttiilit ovat etäohjattuja, ja niitä voidaan käyttää konevalvomosta tai erikseen määritellyistä pisteistä. Viimeinen ja usein järjestelmään tullut komponentti on puhdistuslaitteisto. Ne ovat olleet laajasti käytössä jo aikaisemmin, mutta uusien IMO:n asettamien sääntöjen mukaan (BWM Convention, 2004) jokaisessa uudisrakennelaivassa, jossa on painolastivesijärjestelmä, tulee olla myös puhdistusjärjestelmä 2017 vuodesta alkaen. Vanhoihin laivoihin järjestelmät pitää asentaa vuoteen 2024 mennessä.

Kuvassa 1 on yksinkertaistettu painolastivesijärjestelmäkaavio. Kaikki tankit ovat yhdistetty putkien ja venttiilien avulla pumppuihin, joilla vettä pystytään siirtämään paikasta toiseen.



Kuva 1. Yksinkertainen painolastijärjestelmä.

3.2 Rengas- vai yksittäislinja

Ensimmäinen kohta järjestelmää suunniteltaessa on lukea aluksen erittelystä tilaajan asettamat kriteerit järjestelmän toiminnalle. Kriteerit määrittelevät sen, suunnitellaanko laivaan rengas- vai yksittäislinja. Työssä vertailtiin näiden kahden järjestelmämuodon etuja ja haittoja. Referenssinä järjestelmälle käytettiin rengaslinjalla varustettua alusta. Kyseinen alus on luokiteltu DNV:n sääntöjen mukaan ja se täyttää SRtP-vaatimukset painolastijärjestelmän osalta. Tulee kuitenkin huomioida, että SRtP:tä koskevien ratkaisuiden osalta on käytetty luokituslaitoksen projektikohtaisia tulkintoja. Tulkinat voivat olla projektien välillä erilaisia, eivätkä siten ole täysin vertailukelpoisia eri laivojen välillä. Vertailun vuoksi tehtiin saman aluksen pohjalta luokituslaitoksen säännöt täyttävä järjestelmä yhdellä runkolinjalla ja tutkittiin, miten se vaikuttaa järjestelmän käytettävyyteen ja materiaalmääriin.

Referenssilaiiva on noin 210 m pitkä, 30 m leveä ja syväkseltään 6 m oleva ROPAX-alus. Kokonaisbruttovetoisuus, eli GT on noin 38 000 tonnia. Oleellinen lähtötieto aluksen painolastijärjestelmän osalta on, että se on suunniteltu toimimaan kahdella pääpumpulla samanaikaisesti. Pääpumput ovat sijoitettu keulan konetilaan ja yhden pumpun kapasiteetti on 250 m³/h. Aluksessa on myös yksi SRtP-pumppu, joka on tarkoitettu vauriotilanteessa vain tankkien tyhjentämiseen. Hätäpumpun kapasiteetti on 150 m³/h ja se on sijoitettu aluksen perään.

Yleisesti ottaen painolastivesijärjestelmän tyyppin valinta riippuu monista tekijöistä, kuten aluksen koosta ja tyypistä sekä eri luokituslaitosten ja järjestöjen ilmoittamista vaatimuksista. Nykyään selvästi yleisin valinta varsinkin matkustaja-alusten kohdalla on rengaslinja sen tuomien etujen takia, mutta kuvan 1 mukaista yksittäislinjaa käytetään myös esimerkiksi pienemmissä aluksissa, joissa tilaa on vähemmän ja usean tankin samanaikainen täyttö tai tyhjennys ei ole operaation kannalta kriittistä. Yksittäislinjalla on myös mahdollista joidenkin alusten kohdalla toteuttaa usean tankin samanaikainen käyttö konehuoneessa olevan venttiilikeskuksen avulla. Tämä ei kuitenkaan

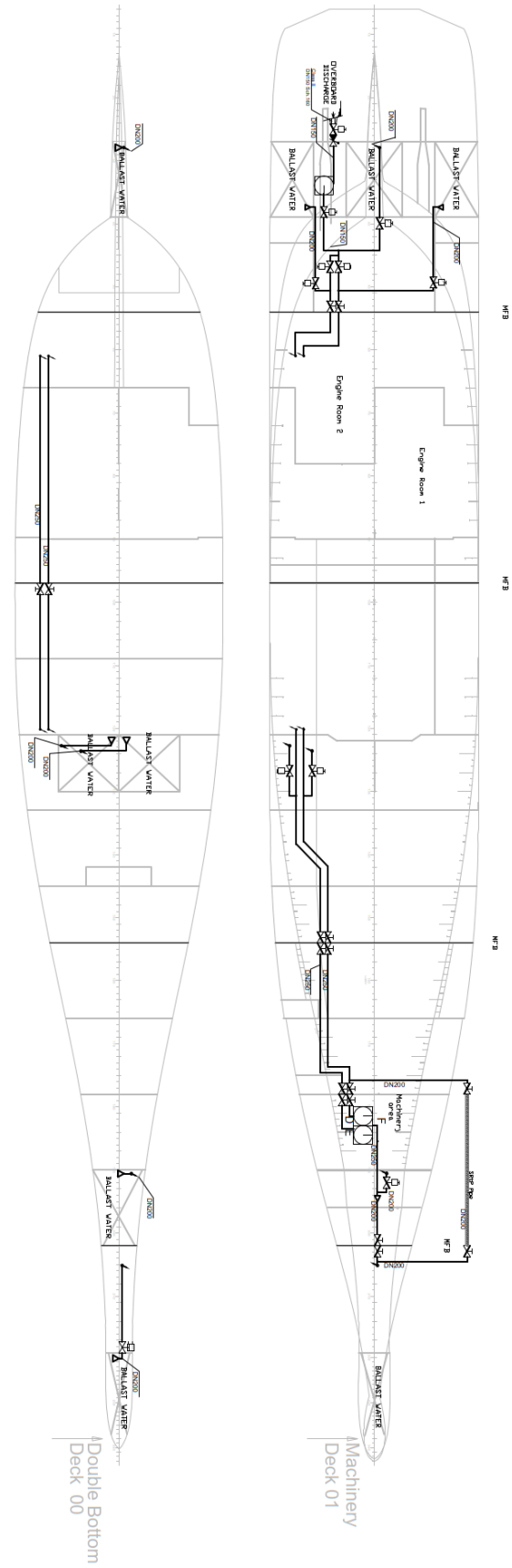
referenssialuksen kohdalla ole järkevää, koska jokainen tankki vaatisi oman yhteen venttiilikeskukseen ja tämä lisäisi merkittävästi putkien määrää.

Kappaleissa 3.2.1–3.2.3 käytetyt kaaviokuvat löytyvät A3 kokoisina liitesivuilta. Kyseiset kuvat ovat liitteissä 1–4.

3.2.1 Rengaslinja

Rengaslinjalla tarkoitetaan painolastilinjaa, joka kulkee kahdennettuna aluksen tankkien välillä. Tähän kahdennettuun linjaan on kytketty laivan painolastitankit sekä muut järjestelmään liittyvät koneistot ja putkistot. Näin ollen painolastitankkeja voidaan saman aikaisesti tyhjentää ja täyttää käyttäen samaa putkiverkostoa. Lisäksi rengaslinjaa voidaan käyttää tankkien huuhtelemiseen tyhjennysoperaatioiden aikana, mikä auttaa estämään sedimenttien ja muiden epäpuhtauksien kertymistä. Haittapuolena yksittäislinjaan verrattuna rengaslinja on yleensä monimutkaisempi, painavampi ja vie enemmän tilaa.

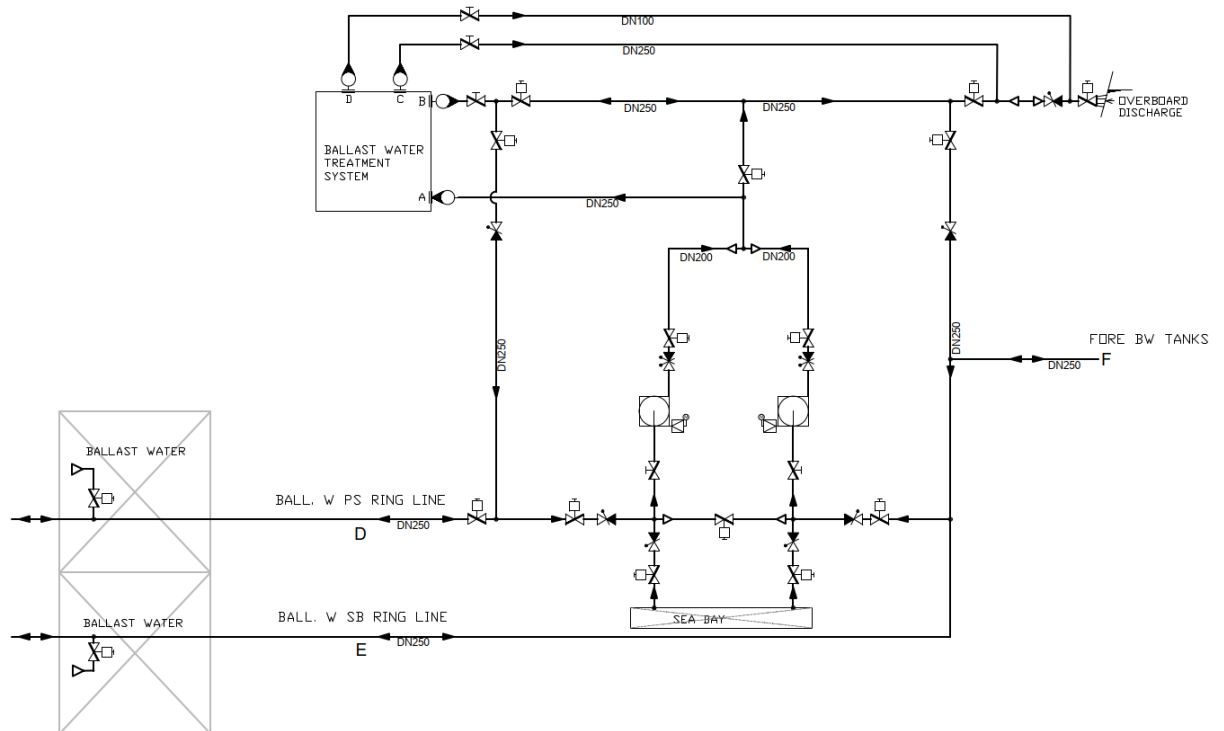
Kuvassa 2 on referenssialukseen suunniteltu rengaslinjalla toteutettu painolastijärjestelmä. Se täyttää luokituslaitoksen sääntömääräykset ja noudattaa aluksen suunnittelussa käytettyjä SRtP-sääntöjä ja tulkintoja. Kyseisen aluksen kohdalla painolastivesijärjestelmän täytyy vaurioituneessa toimia kaikkialla muualla laivassa, paitsi vaurioituneen pääpalovyöhykkeen sisällä. Vauriotapaukset on kuvailtu tarkemmin dokumenteissa SOLAS II-2/21 ja SOLAS II-1/8–1. SOLAS II-2/22, joiden mukaan järjestelmän ei kuitenkaan tarvitse toimia, mikäli yksi kokonainen pääpalovyöhyke (MVZ) menetettäisiin. Aluksen pääpumput sijaitsevat keulan konetilassa. Mikäli tämä konetila vaurioituisi, on pumppujen korvaamiseksi suunniteltu pienempi varapumppu laivan perään. Tämä pumppu on tarkoitettu ainoastaan painovesitankkien tyhjentämiseen. Varapumppu on mitoitettu siten, että se riittää koko järjestelmän tankkien tyhjentämiseen. Pumpun kokoa oli ehdotettu luokituslaitokselle, joka totesivat sen olevan riittävä. Pumppuhuoneen vaurioitilannetta varten on sen ohi suunniteltu myös palosuojattu SRtP-putki, jota voidaan käyttää keulatankkien tyhjentämiseen.



Kuva 2. Rengaslinja.

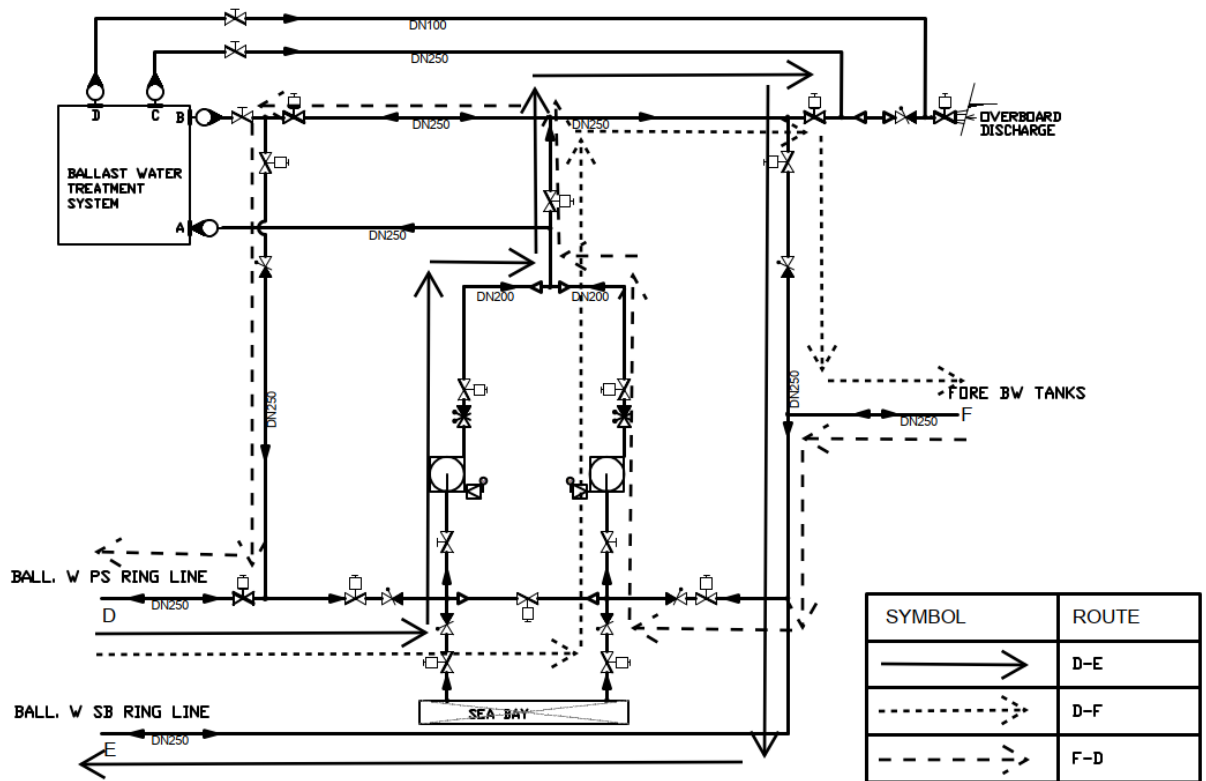
Huomioitavaa tässä aluksessa on, että kaikki tankkiparit sijaitsevat pumppuhuoneen peräpuolella. Näin ollen rengaslinjan täytyy kulkea vain pumpuilta taaksepäin, eikä molempiin suuntiin. Eteenpäin mentäessä on vain kaksi keulatankkia. Näitä voidaan samanaikaisesti tyhjentää tai täyttää käyttäen yhtä runkolinjaa, johon molemmat tankit ovat liitetty.

Kuvassa 3 on pumppukaavio, johon on havainnollistettu yksi painolastivesitankkipari. kirjaimet D, E ja F kuvaavat paikkoja, joissa pumppukaavio liittyy runkolinjoihin. Rengaslinja liittyy kaaviossa kohtiin D ja E, kun taas eteenpäin lähtee vain yksi runkolinja F keulan tankkeihin.



Kuva 3. Rengaslinjan pumppukaavio.

Kuvassa 4 on havainnollistettu veden virtaussuunnat järjestelmässä. Veden virtaamista puhdistusjärjestelmän kautta ei huomioitu, sillä vettä puhdistettaisiin vain sitä alukseen tai aluksesta ulos pumppaamisen yhteydessä. Kaaviosta voidaan nähdä, että vettä voidaan pumpata perästä takaisin perään kokomustan nuolen osoittamaa reittiä pitkin. Tämä mahdollistaa kahden tankin samanaikaisen käytön, esimerkiksi toista tyhjentämällä ja toista täyttämällä.



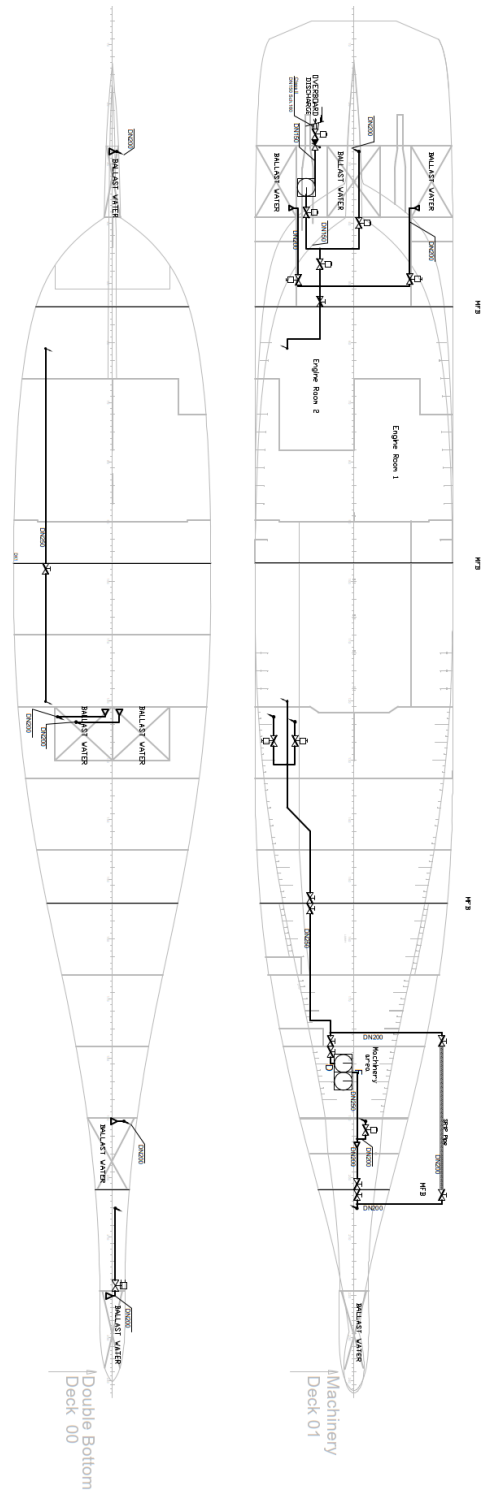
Kuva 4. Rengaslinjan pumpputaavien virtaussuunnat.

3.2.2 Yksittäislinja

Toinen, nykyisin uusissa laivoissa vähemmän käytetty järjestelmä on yksittäislinja. Yksittäislinja painolastivesijärjestelmässä tarkoittaa yhtä runkolinjaa aluksen päästä päähän. Yksittäislinja on yleensä yksinkertaisempi kuin rengaslinja ja tästä syystä kevyempi ja vie vähemmän tilaa.

Yksittäislinjajärjestelmillä on kuitenkin rajoituksia, kuten veden mahdollinen juuttuminen vesitaskuihin, sekä tarve puhdistaa ja ylläpitää putkistoa riittävästi, jotta estetään sedimentin ja muiden epäpuhtauksien kertyminen putkistoon. Toinen merkittävä rajoitus yksittäislinjassa on, ettei sitä voi käyttää usean tankin samanaikaiseen täyttöön tai tyhjennykseen. Yksittäislinja vaatii myös usein ylimääräisiä putkivetoja täyttääkseen SRtP-vaatimukset.

Kuvassa 5 on sama alus, joka tässä on varustettu yhdellä runkolinjalla kahden runkolinjan sijaan. Seuraavassa esitetään, mitä yhden runkolinjan poistaminen tekee järjestelmän käytettävyydelle ja sääntöjenmukaisuudelle.

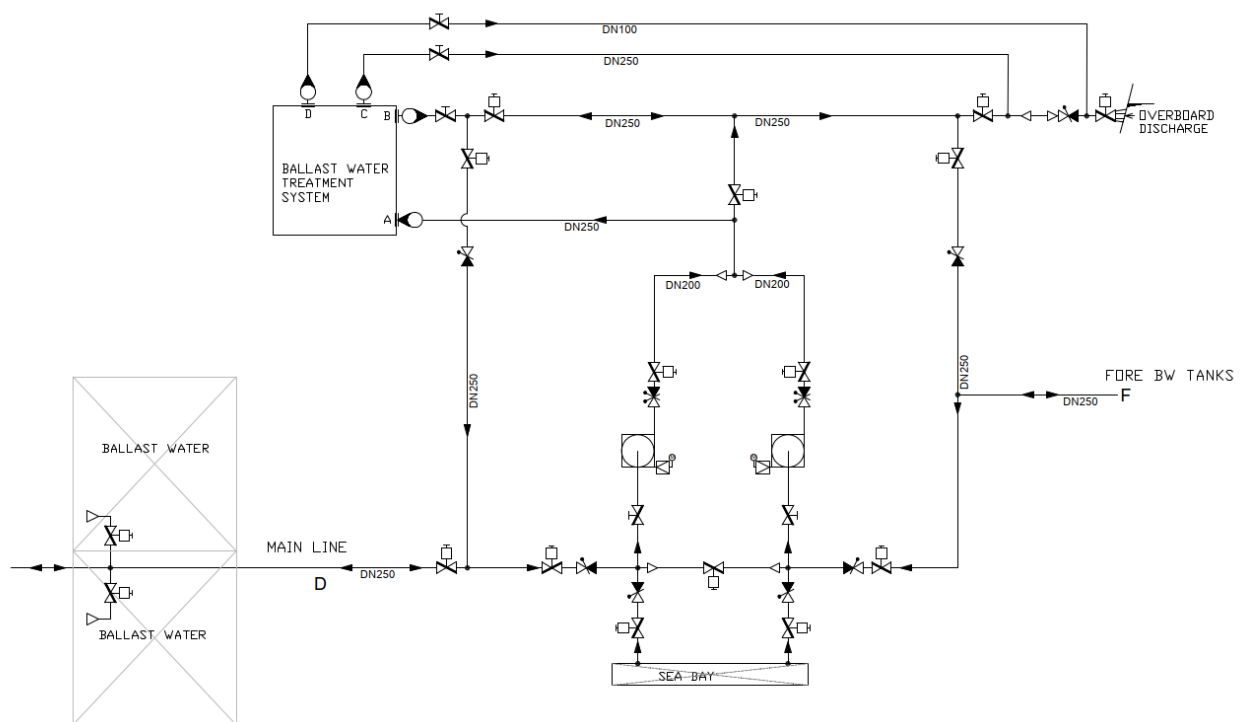


Kuva 5. Yksittäislinja.

Toisen runkolinjan poistaminen ei suoranaisesti tässä tapauksessa vaikuta SRtP-sääntöjen täyttymiseen. Käytettäessä samoja tulkintoja ja sääntöjä kuin alkuperäisen järjestelmän kanssa, voitiin todeta sen olevan toimintakuntoinen palo- tai vuotovauriutilanteissa, jotka SOLAS on määrittänyt. Sama sääntö yhden kokonaisen pääpalovyöhykkeen (MVZ) menettämisestä koskee tätäkin järjestelmää.

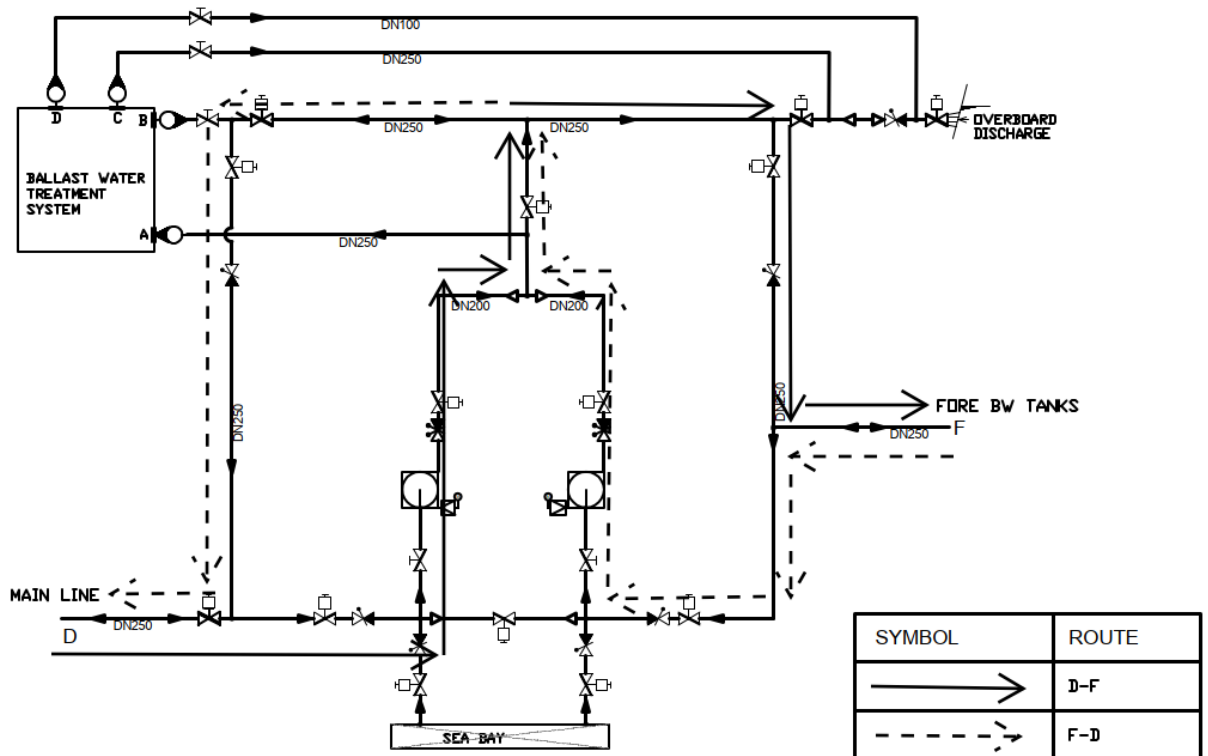
Yksittäislinjan suurin haittapuoli rengaslinjaan verrattuna on se, että painolastivettä voidaan siirtää tankista tankkiin ainoastaan keula-peräsuunnassa. Yksittäislinjaa käytettäessä vettä ei voi siirtää oikeanpuoleisesta tankista vasemmanpuoleiseen, ellei vettä pumpata siinä välissä ulos aluksesta. Käytössä olevan puhdistuslaitteiston mukaan painolastivesivesi on myös puhdistettava pumpattaessa sitä ulos, sisään tai molempiin suuntiin. Tämä taas kuluttaa lisää aikaa ja energiaa.

Kuva 6 on muuten sama pumppukaavio kuin aikaisemmin, mutta siitä puuttuu toinen runkolinja. Kaavioon on myös havainnollistettu yksi tankkipari.



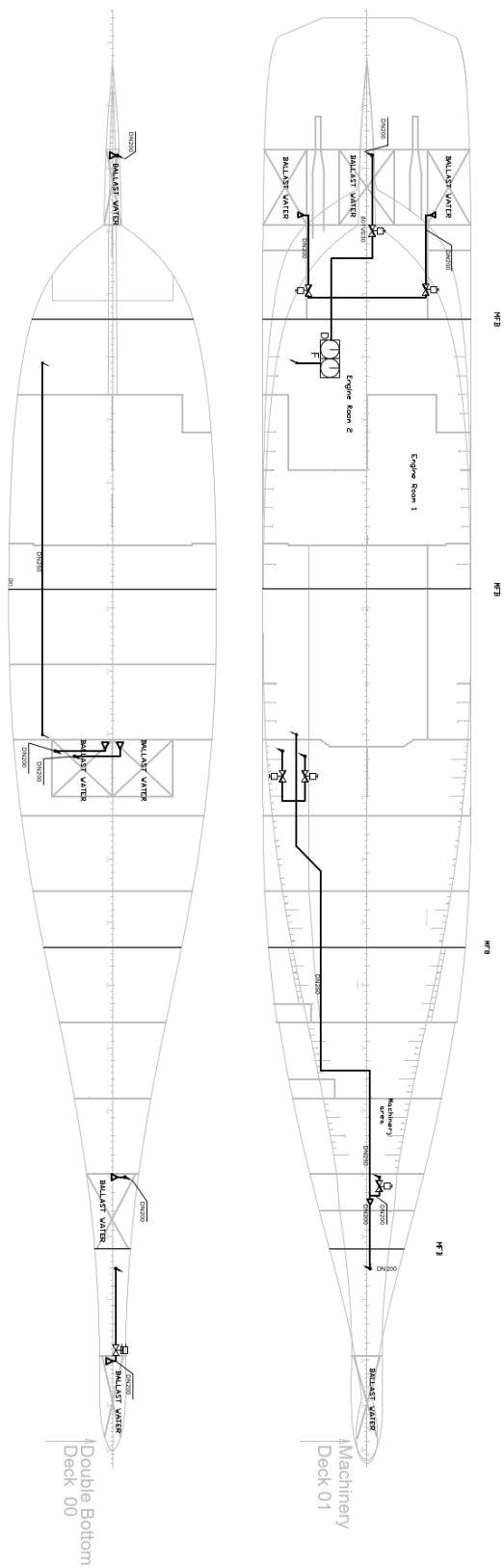
Kuva 6. Yksittäislinjan pumppukaavio

Kuvassa 7 on sama kaavio kuin kuvassa 6, mutta tähän on hahmoteltu veden virtaussuunnat nuolten avulla. Kaaviosta nähdään, ettei vettä ole mahdollista siirtää samaa putkea takaisin, kuin mistä se on tullut. Tällä järjestelmällä vettä pystyy siirtämään ainoastaan pumppujen läpi eteenpäin. Katkoviivalla piirretty nuoli taas kuvaa veden siirtämistä pumppujen läpi keulatankeista perään.



Kuva 7. Yksittäislinjan pumppukaavion virtaussuunnat.

Vertailun laajentamiseksi pohdittiin sitä, miten pumppujen siirtäminen keulan koneistohuoneesta pääkonehuoneeseen vaikuttaisi järjestelmän käytettävyyteen. Kuva 8 on sama kuin kuva 5, mutta pumput on tässä uudessa versiossa siirretty pääkonehuoneeseen ja runkolinja piirretty suoraan keulatankkien yhteille. Kuvasta on myös poistettu perässä sijaitseva hätäpumppu. Tässä käytettiin samaa pumppukaaviota kuin edellisessä yksittäislinjakaaviossa. Järjestelmä ei näin piirrettynä täytä alukselle asetettuja SRtP-vaatimuksia.



Kuva 8. Yksittäislinja, pääpumput konehuoneessa.

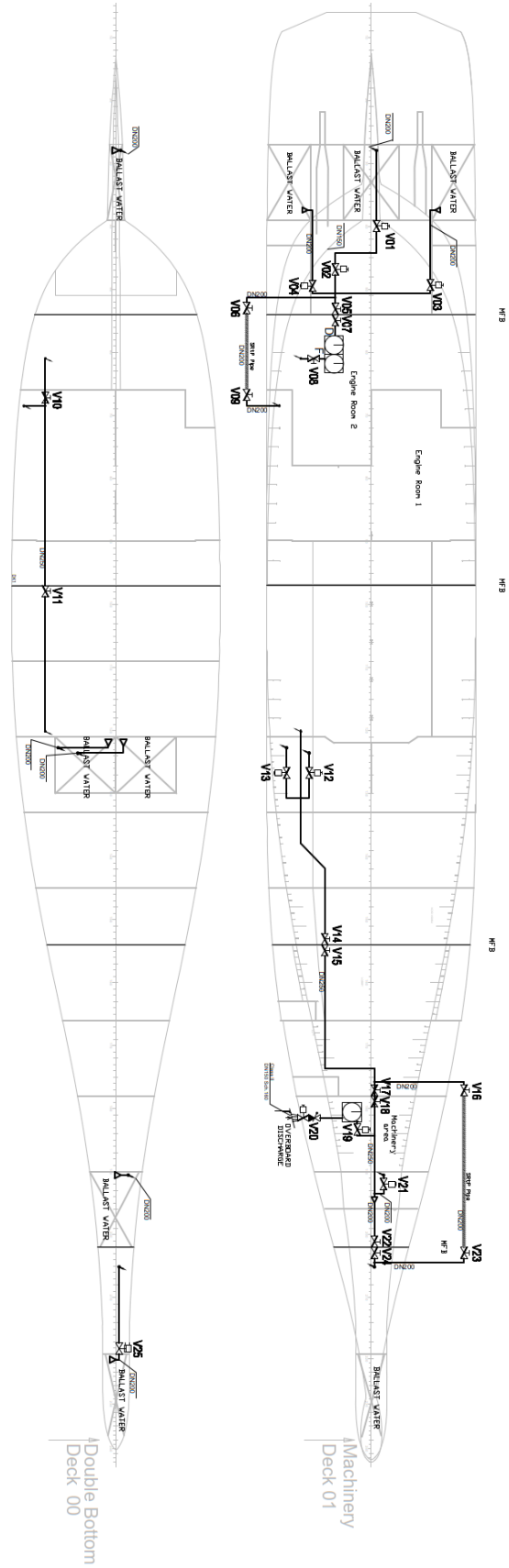
Järjestelmän toimintaperiaate ei merkittävästi muutu aikaisemmasta tämän muutoksen seurauksena. Painolastivettä pystytään edelleen siirtämään ainoastaan aluksen pituussuunnassa tankista toiseen. Pumppujen ollessa takana, on järjestelmä kuitenkin mahdollista suunnitella siten, että pumpuilla voitaisiin siirtää perän sivusäiliöistä vettä sivulta toiselle. Tämä vaatisi kuitenkin lisää putkia ja venttiileitä, mutta toisi mahdollisuuden säätää aluksen sivusuuntaista kallistumaa ainakin jossakin määrin. Ratkaisu on kuitenkin kalliimpi kuin pelkkä yksi runkolinja, eikä todennäköisesti suunnittelu- ja rakennuskustannukset huomioiden olisi kannattava saatuun hyötyyn nähden.

3.2.3 SRtP:n huomioiminen yksittäislinjan suunnittelussa

Työssä perehdyimme muutoksiin, joita järjestelmä vaatisi, jotta se täyttäisi SRtP:n painolastijärjestelmää koskevat vaatimukset. Sääntöjä tulkittaessa voimme käytettiin rengaslinja-alusta, koska se on luokiteltu myös DNV:n sääntöjen mukaan. Saimme tämän aluksen SRtP-suunnittelusta luokan tekemät tulkinnat järjestelmän toimintavaatimusten osalta. Myös sähkösuunnittelulla on oma osansa järjestelmien SRtP-suunnittelussa. Tässä tapauksessa kuitenkin oletettiin, että pumpuille on järjestetty redundanttinen sähkönsyöttö.

Kuten aikaisemmin on todettu, tulee järjestelmän toimia vaurion sisältävän pääpalovyöhykkeen (MVZ) ulkopuolella SOLAS II-2/21-palovauriotilanteessa, missä yksi osasto tuhoutuu palon seurauksena. Sama pätee myös SOLAS II-1/8–1-vuototilanteessa, jossa yksi osasto on vuodon seurauksena pois käytöstä. Mikäli yksi pääpalovyöhyke (MVZ) tuhoutuu täysin, ei järjestelmän tarvitse toimia missään osissa alusta SOLAS II-2/22:n mukaan. Järjestelmän toiminta muun kuin vaurioituneen pääpalovyöhykkeen ulkopuolella tulee DNV RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Section 11. 4.12.2-säännöstä. DNV:n kanssa käytyjen projektikohtaisten keskustelujen mukaan ja heidän oman tulkintansa perusteella täytyy järjestelmän tankkeja kyetä tyhjentämään vauriotilanteessa. Tankkien täyttäminen ei tulkinnan mukaan kuulu järjestelmän toimintavaatimukseen vauriotilanteessa.

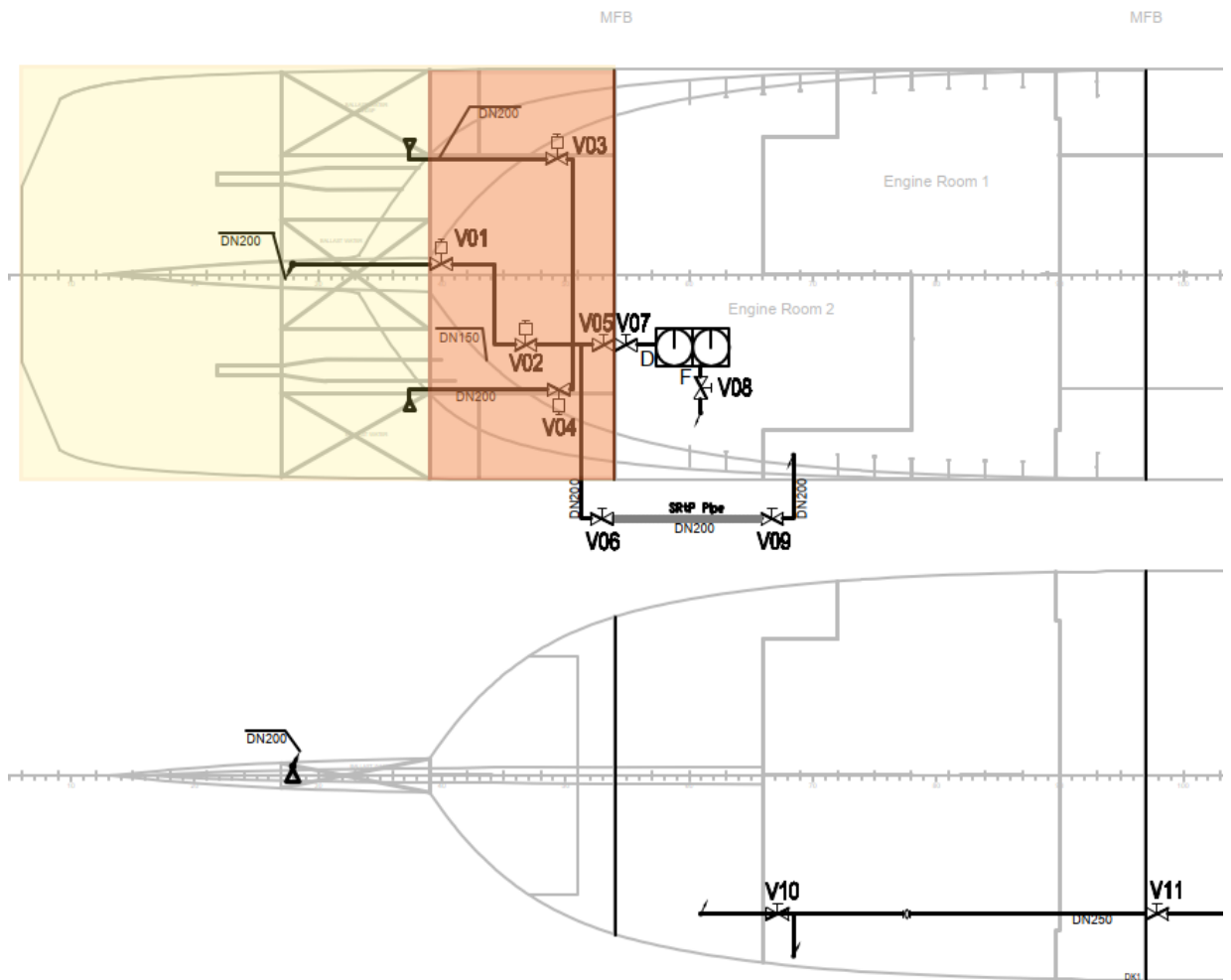
Kahden yksittäislinjalla suunnitellun järjestelmän suurin ero on se, että pääpumput on siirretty keulan konetilasta pääkonehuoneeseen. Tämä pumppujen siirto edellyttää muutoksia järjestelmään, jotta se toimisi määrätyllä tavalla SRtP-vaurioilanteessa. Kuvaan 9 on tehty tarvittavat muutokset, jotta järjestelmä täyttäisi SRtP-toimintavaatimukset. Merkittävimmät näistä ovat palonkestävä linja konehuone 2:n ohi ja varapumppu keulassa. Järjestelmään on myös lisätty venttiileitä, joilla voidaan sulkea vaurioitunut järjestelmän osa pois. Pumppukaavio on tässä versiossa samanlainen kuin kuvassa 6.



Kuva 9. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.

Tehtyjen muutosten vaikutusta arvioitiin pääpalovyöhykkeittäin. Kyseisen aluksen tapauksessa pääpalovyöhyke (MVZ) 1 on aluksen keulassa ja perän puoleisin pääpalovyöhyke on MVZ 5.

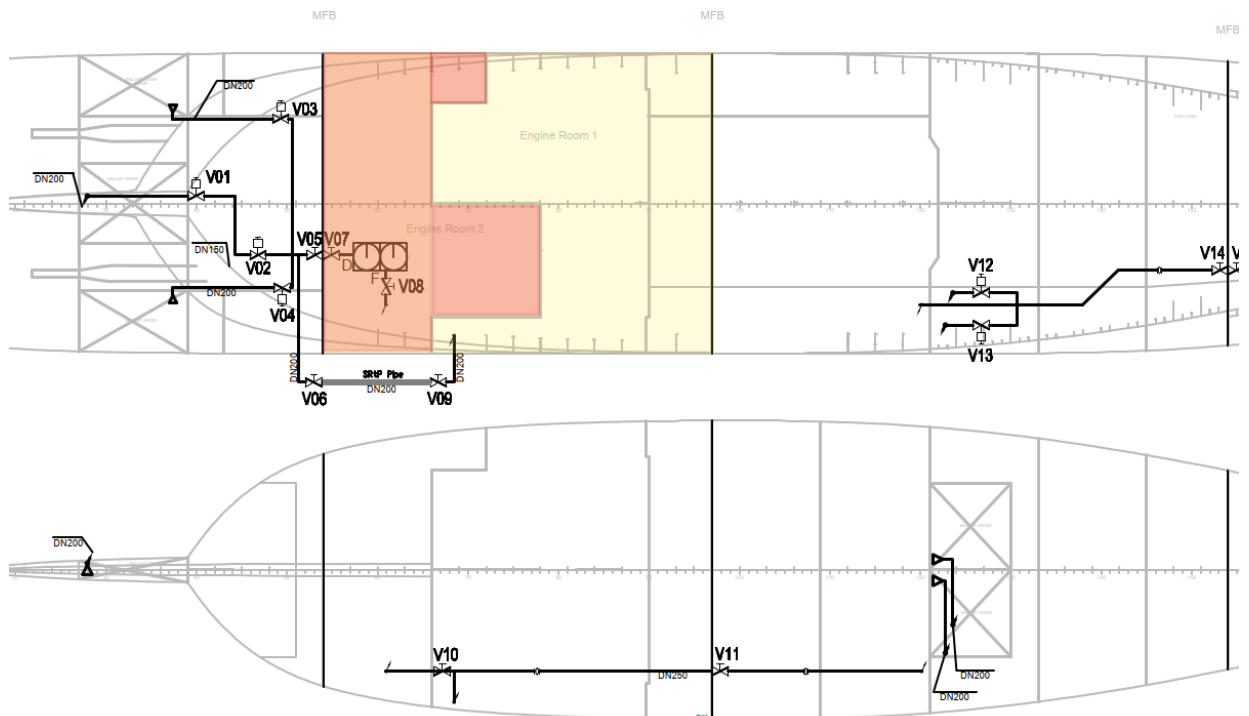
Kaavioita tulkittiin laivan peräpäästä alkaen. Ensimmäinen huomio oli se, että pumppujen ja perän painolastitankkien välissä on yksi osasto. Tämän osaston vaurioituminen tarkoittaisi sitä, ettei perän tankkeja pystyttäisi käyttämään nykyisessä paikassa sijaitsevilla pääpumpuilla. Vaurioitunut osasto on merkitty punaisella ja keltaisella on merkitty pääpalovyöhyke, jota vaurio koskee. Sääntöjen mukaan vaurio pääpalovyöhykkeen sisällä tarkoittaa sitä, ettei järjestelmän tarvitse kyseisessä vyöhykkeessä toimia. Tässä tapauksessa vaurio ei edellyttäisi palosuojattujen putkien rakentamista perän tankeille. Konehuoneen perän puoleiseen laipioon on asennettu lisäventtiili V07, jolla MVZ 5 voidaan sulkea ulos järjestelmästä. Näin laivan muuta painolastijärjestelmää voidaan käyttää pelkkien pääpumppujen kanssa.



Kuva 10. Vaurio pääpumpujen ja perätankkien välillä.

Seuraava vauriotilanne on vaurio konehuoneessa 2. Tässä tapauksessa pääpumput menetettäisiin ja joudutaan tekemään pääkonehuoneelle palonkestävän SRtP-ohituslinjan. Ohituslinja kulkee konehuoneen 1 perän puoleisesta tilasta konehuone 2:n tilaan, jossa se vie kannen läpi kaksoispohjassa kulkevaan runkolinjaan. Runkolinjaan on lisätty yksi venttiili V10, jotta pumpuilta tuleva runkolinja voidaan sulkea SRtP-putken liitoksen perän puolelta. Mikäli konehuone 1 menetettäisiin, voidaan järjestelmä sulkea V08-venttiilistä. Toinen sulkuventtiili V11 on kaksoispohjassa pääpalovyöhykkeen keulan puolella. Kaksoispohjaan sijoitettujen venttiilien tulee olla paikassa, missä niihin pääsee nopeasti käsiksi. Tämä ei

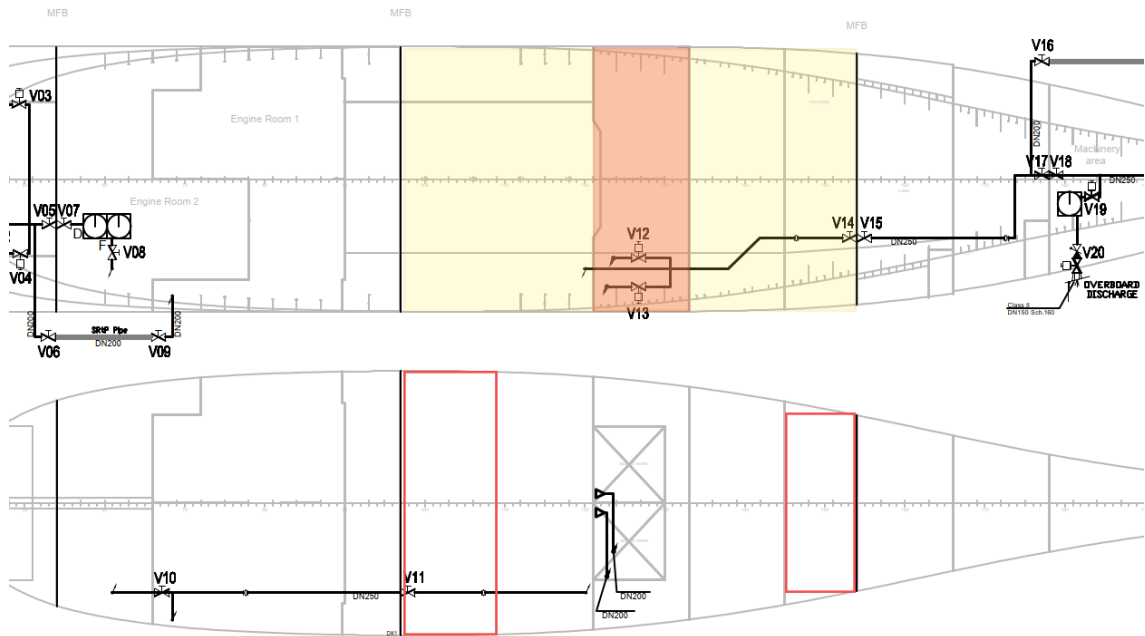
lähtökohtaisesti ole mahdollista luokituslaitoksen sääntöjen puitteissa, mutta aluksen kohdalla tähän oli tehty poikkeus. Samaa tapausta käytettiin perusteena myös toisen venttiilin asentamiseen kaksoispohjan sisään. Kaikissa kannen 1 tiloissa on kiinteä palontorjuntalaitteisto, joten tulipalo ei leviäisi viereisiin tai yläpuolisiin tiloihin DNV RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Section 11. 3.2.2-sääntöjen mukaan. Myös kaksoispohjan sisäiset tilat tässä osastossa on luokiteltu matalan paloriskin tiloiksi, joten tulipalon alkua ei todennäköisesti voi olla siellä.



Kuva 11. Vaurio pääkonehuoneessa.

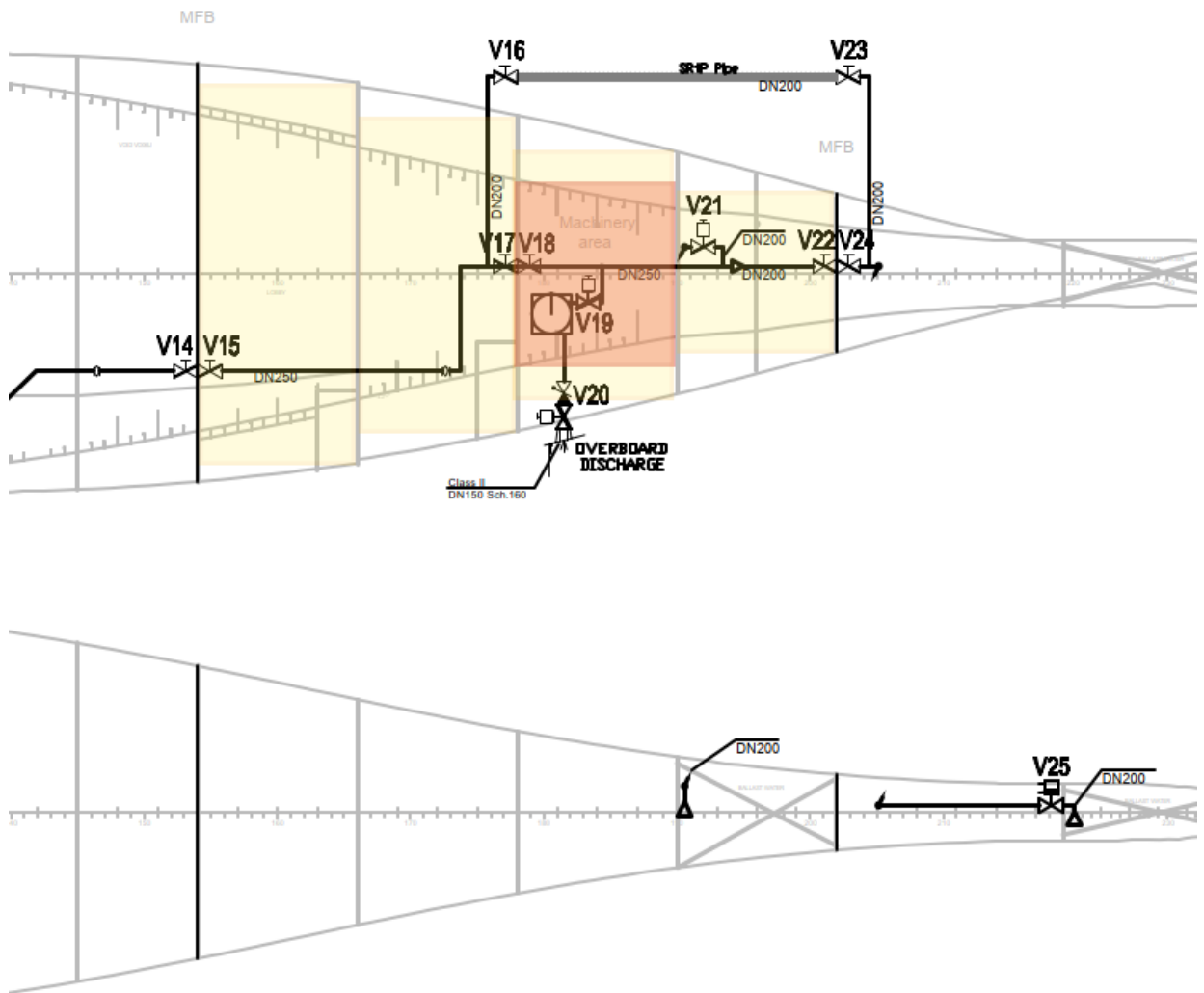
Vaurio kolmannessa pääpalovyöhykkeessä ei aiheuttaisi merkittävää muutosta järjestelmään. Pääpalovyöhyke voidaan sulkea erilleen järjestelmästä konehuoneessa olevasta V08-venttiilistä tai sen alla olevasta runkoventtiilistä V10 sekä palovyöhykkeen etulaipion keulan puolella olevasta runkoventtiilistä V11. Punaisella rajauksella merkityt kaksoispohjan sisäiset tilat ovat tiloja, joista tulipalo voi saada alkunsa. Tämä ei kuitenkaan vaikuta suunnitteluun, koska

tulipalo ei voi levitä pääpalovyöhykkeen ulkopuolelle. (DNV RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Section 11 3.2.3) mikäli vaurio ulottuisi kannen 1 tiloihin, pätee aiemmin mainittujen runkoventtiilien sulkeminen.



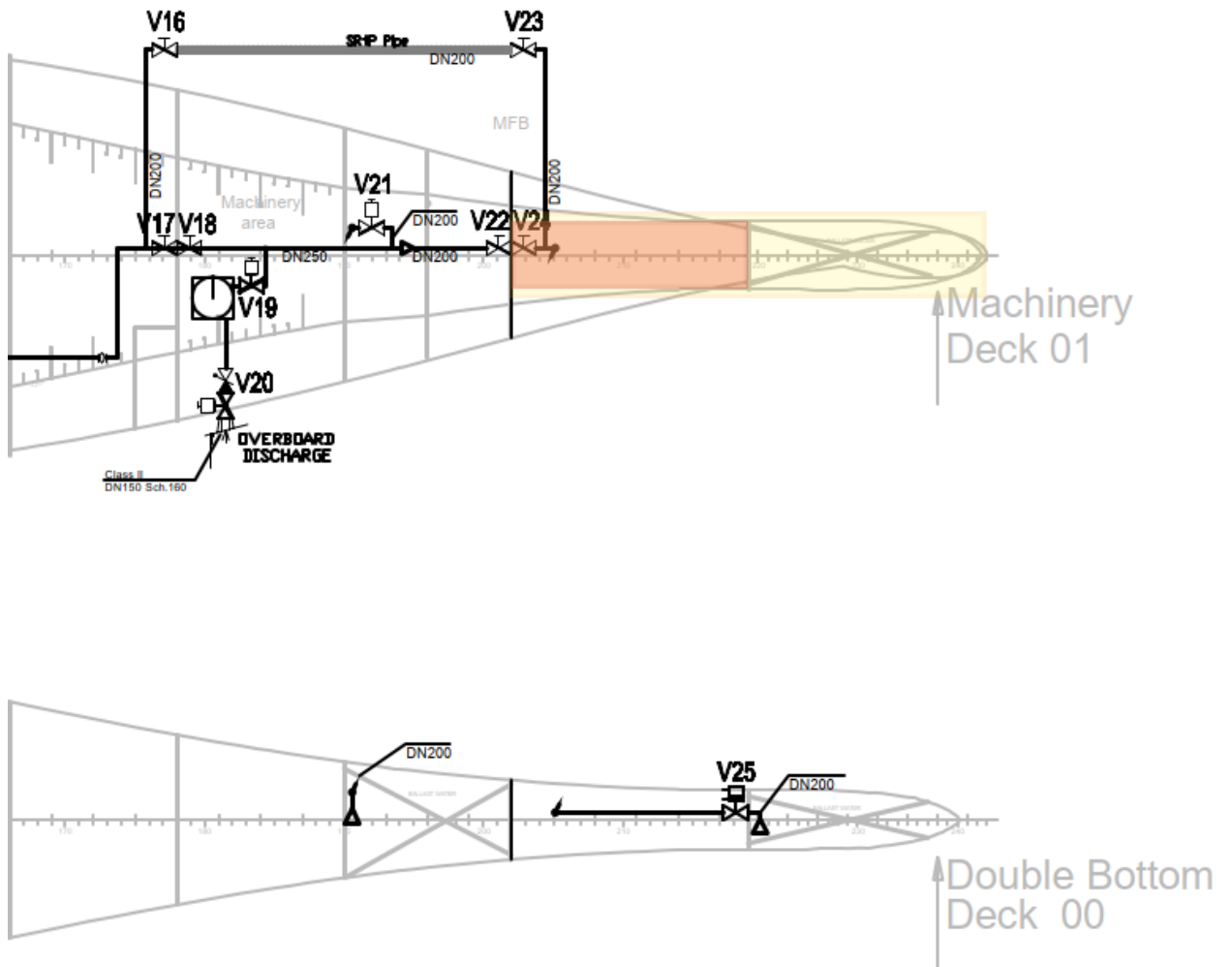
Kuva 12. Vaurio kolmannessa pääpalovyöhykkeessä.

Mikäli vaurio tapahtuisi samassa tilassa missä järjestelmän varapumppu sijaitsee, voidaan se sulkea runkolinjassa olevilla venttiileillä V17 ja V24. Tässä tapauksessa huone voidaan myös ohittaa palosuojatulla putkella. Mikäli vaurio tapahtuisi missä tahansa muussa tilassa kyseisen pääpalovyöhykkeen sisällä, voidaan tila aina sulkea kaaviossa näkyvien runkoventtiilien avulla. Esimerkkinä vaurio pääpalovyöhykkeen takimmaisessa tilassa. Tila voidaan sulkea käyttäen pääpalovyöhykkeen- sekä pumppuhuoneen laipioissa sijaitsevia venttiilejä V14 ja V18. Tässä tapauksessa keulan tankkeja pystytään tyhjentämään käyttämällä varapumppua ja muu järjestelmä toimii pääpumppujen varassa.



Kuva 13. Vaurio varapumppuhuoneessa.

Viimeisen pääpalovyöhykkeen menettäminen ei vaikuttaisi painolastijärjestelmän toimintaan, paitsi keulatankin menettämisen muodossa. Keulan putket voidaan sulkea venttiilillä V22 ulos järjestelmästä ja tässä tapauksessa muu järjestelmä toimisi pelkkien pääpumppujen avulla.



Kuva 14. Vaurio keulapiikissä.

Yhteenvedona yllä olevista kuvista voitiin päätellä, että tässä tapauksessa pumppujen siirtäminen konehuoneeseen tekisi yksittäislinjajärjestelmästä monimutkaisemman kuin alkuperäinen suunnitelma. SRtP-säännöt täyttääkseen siihen pitää lisätä yksi kokonaan uusi palosuojattu DN200-putki, kaksi DN200-venttiiliä sekä kolme DN250-venttiiliä runkolinjaan. Näiden venttiilien koot valitaan käytetyn putkikoon mukaan. Tässä tapauksessa runkolinja on DN250-putkea ja SRtP-linja DN200-putkea. Kaikki tämä lisää laivan painoa ja telakalle rakentamiskustannuksia. Ylimääräiset putkivedot

myös vievät tilaa. On huomioitava, että yllä oleva esimerkki on vain yksi mahdollinen tapa suunnitella järjestelmä siten, että se täyttää SRtP-säännöt.

Riippumatta järjestelmätyypistä, pystytään hyvällä suunnittelulla helpottamaan merkittävästi SRtP-vaatimusten täyttymistä. Aikaisempien esimerkkien perusteella suurin merkittävä tekijä on pumppujen sijoittelu. Pelkästään pumppujen siirtäminen toiseen tilaan vaatii suuren määrän ylimääräisiä komponentteja, joilta olisi voitu välttyä. Tässä tapauksessa rengaslinjakaan ei olisi tuonut mitään etua, vaan samat komponentit olisi tarvittu siinäkin tapauksessa. Keulan varapumpun voisi mahdollisesti myös jättää pois, mikäli järjestelmän vesi saadaan toisella tavalla pumpattua ulos. Tähän voisi esimerkiksi käyttää jonkun muun järjestelmän pumppua, esimerkiksi merivesijäähdytyspumppuja. Nämä muutokset vaativat kuitenkin aina keskustelua omistajan ja luokituslaitoksen kanssa sekä myös tarkkaa laskemista tai testaamista sen varmistamiseksi, että kyseinen järjestelmä on riittävä veden pumppaamiseksi pois kaikista tankeista. Keulan pumpun voisi myös siirtää keulapotkurihuoneeseen, jolloin se olisi MVZ 1:n sisällä. Pumpun siirtäminen laivan ääripäähän mahdollistaisi keulan palosuojatun putken poisjättämisen ja tekisi järjestelmästä yksinkertaisemman. Kyseisen aluksen kohdalla keulapotkurihuone on kuitenkin ahdas, joten pumppujen ja vaadittavien putkien asentaminen sinne olisi ollut vaikeaa. Näin ollen pumppu piti jättää keulan konetilaan MVZ 2-osastoon. Esimerkkialuksen tapauksessa pilssipumppuja ehdotettiin painolastivesijärjestelmän varapumpuiksi, mutta luokituslaitos ei tähän suostunut.

3.3 Painehäviöt

Painehäviöt painolastijärjestelmässä voivat johtua useista syistä, kuten putkiston kitkasta, korkeuserojen muutoksista sekä putkien halkaisijan muutoksista. Nämä tekijät voivat johtaa virtausnopeuden pienenemiseen, paineen nousuun ja siten energian tarpeen kasvuun siirrettäessä vettä painolastivesijärjestelmän läpi.

Kitkaa aiheuttavat esimerkiksi putkien seinämät, venttiilit ja muut komponentit. Kitkan määrä riippuu veden virtausnopeudesta, putken pinnan karheudesta sekä putken halkaisijasta.

Korkeuserot aiheuttavat painehäviöitä painolastivesijärjestelmässä. Kun painolastivesi liikkuu ylös tai alas putkien läpi, veteen vaikuttava hydrostaattinen paine kasvaa tai pienenee, mikä aiheuttaa vastusta.

Myös putken halkaisijan muutokset aiheuttavat painehäviöitä. Kun putken halkaisija pienenee, veden nopeus kasvaa, mistä seuraa turbulenttista virtausta ja painehäviöitä. Toisaalta, kun putken halkaisija kasvaa, veden nopeus hidastuu, mikä myös aiheuttaa paineen muutoksen.

Painehäviöiden minimoimiseksi painolastivesijärjestelmässä voidaan käyttää suurempia putkia, minimoida korkeuseroja putkistossa ja valita materiaaleja, joilla on alhaisempi kitkakerroin. Tästä hyviä esimerkkejä ovat lasikuitu, GRE tai CuNiFe, joiden pinta on huomattavasti sileämpi esimerkiksi galvanoituun teräsputkeen verrattuna. Oikeaoppinen huolto, mukaan lukien putkien säännöllinen puhdistus ja tarkastus, auttaa vähentämään painehäviöitä ja varmistamaan järjestelmän tehokkaan toiminnan.

Painehäviön voi laskea suoralle, täysin kehittyneelle laminaariselle virtaukselle painolastivesijärjestelmässä käyttämällä Darcy-Weisbach-yhtälöä, jossa virtauksen virtauskitkasta aiheutuva painehäviö h_f on esitetty muodossa

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g}$$

Kaava 1. Darcy-Weisbach (EngineerExcel 2023).

missä f on putken kitkakerroin, L putken pituus (m), d putken halkaisija (m), V virtauksen keskinopeus (m/s) ja g maan vetovoiman kiihtyvyys (9.81 m/s^2). On kuitenkin huomioitava, että koko järjestelmän painehäviötä laskettaessa täytyy ottaa huomioon myös venttiilien, mutkien ja putken korkeuserojen aiheuttamat häviöt.

Painolastivesijärjestelmässä on erilaisia komponentteja, kuten putkia, venttiilejä, pumppuja ja suodattimia. Jokainen näistä komponenteista aiheuttaa painehäviöitä. Järjestelmän kokonaispainehäviö muodostuu näiden osien summana.

Painehäviö voi vaihdella myös veden ominaispainon ja viskositeetin muuttuessa. Nämä voivat muuttua veden lämpötilan tai painolastiveden pumppauspaikan mukaan. Esimerkiksi viileä vesi on tiheämpää kuin lämmin. Veden suolapitoisuus taas vaikuttaa veden ominaispainoon. Suolapitoisuuden kasvaessa myös veden ominaispaino kasvaa. Tästä johtuen painolastiveden tiheys ja viskositeetti on tiedettävä, jotta painehäviö voidaan laskea tarkasti.

Painolastiveden painehäviö myös riippuu veden virtausnopeudesta, mikä vaihtelee pumpun tehon, putken koon ja muiden tekijöiden mukaan. Siksi on tiedettävä veden virtausnopeus, jotta painehäviö voidaan laskea tarkasti. Lähtökohtaisesti virtausnopeus painolastivesiputkissa on 2–2,5 m/s teräsputkilla ja 4,5 m/s lasikuituputkilla. Nämä arvot ovat saatu käyttökokemusten perusteella.

Putken virtausnopeus voidaan myös laskea käyttäen kaavaa 2, mikäli putkelle ei ole olemassa ohjearvoa virtausnopeudelle.

$$w = \frac{V}{A}$$

Kaava 2. Keskimääräinen virtausnopeus.

Jossa w on keskimääräinen virtausnopeus (m/s), V tilavuusvirta (m³/s) ja A putken virtauspoikkipinta-ala.

Arvojen ylittyttyä laminaarinen virtaus voi muuttua turbulenttiseksi. Tämä johtuu Reynoldsin luvun kasvamisesta. Turbulenttiselle virtaukselle $Re > 2300$. Reynoldsin luku saadaan laskettua käyttäen kaavaa 3.

$$Re = \frac{wd}{\nu}$$

Kaava 3. Reynoldsin luku.

Jossa Re on Reynoldsin luku, w keskimääräinen virtausnopeus (m/s), d putken halkaisija (m) ja ν virtausaineen kinemaattinen viskositeetti (m²/s).

Kinemaattinen viskositeetti saadaan laskettua käyttämällä kaavaa 4.

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}$$

Kaava 4. Kinemaattinen viskositeetti.

Jossa η on virtausaineen dynaaminen viskositeetti (Pas) ja ρ virtausaineen tiheys.

Ero virtausnopeudessa johtuu lasikuituputken sileämmästä pinnasta, joka aiheuttaa vähemmän vastusta. Lasikuituputket ovat kuitenkin merkittävästi teräsputkia kalliimpia ja tästä syystä niitä käytetään vähemmän.

3.4 Pumput

Matkustaja-aluksen painolastivesipumppujen koko on ratkaiseva tekijä aluksen painolastijärjestelmän tehokkaan toiminnan varmistamiseksi. Tietyille alukselle vaadittavien pumppujen koko riippuu useista tekijöistä, kuten aluksen koosta, kapasiteetista ja käyttövaatimuksista. Luokituslaitokset edellyttävät aluksilta kahta painolastivesipumppua, jotka ovat putkiston kautta kytkettyinä jokaiseen painolastitankkiin. (DNV 2022.)

Pumppujen kokoa määriteltäessä on laskettava pumpattavan painolastiveden kokonaismäärä. Tämä voidaan tehdä laskemalla yhteen kaikkien aluksen painolastitankkien tilavuus. Nämä tiedot ovat saatavilla tankkisuunnitelmasta. Tässä dokumentissa kerrotaan tankkien koot ja sijainnit aluksessa. Tankkien koot määritetään jo konseptivaiheessa.

Kun painolastiveden kokonaistilavuus on määritetty, päätetään haluttu painolastiveden ulos- tai sisään pumppaamiseen käytettävä aika. Tämä tulee yleensä omistajan vaatimuksena ja on kerrottu aluksen erittelyssä. Kun

pumppaukseen käytettävä aika on tiedossa, voidaan laskea pumppausteho, eli painolastiveden määrä, jonka pumppu voi siirtää tietyn ajan kuluessa. Tämä ilmoitetaan yleensä kuutioina tunnissa (m^3/h). Pumput mitoitetaan redundanttisuusmääräysten mukaan kaksi kertaa 100 %, eli toinen käytössä ja toinen varalla. Pumppujen koko suunnitellaan yleensä näiden kahden lähtötiedon avulla. Valinta perustuu käytännössä usein kokemuseräiseen tietoon. Pumppujen tarkemmat tekniset ominaisuudet löytyvät valmistajien taulukoista, joita apuna käyttäen voidaan valita oikean kokoinen pumppu. Näitä ovat esimerkiksi pumpun kapasiteetti, paine ja nostokorkeus.

Optimaalinen pumpun tehontarve voidaan valita käyttämällä pumpun tehontarpeen yhtälöä, joka on kaavassa 5.

$$P_e = \frac{V\rho gH}{\eta}$$

Kaava 5. Pumpun tehontarve.

Jossa P_e on pumpun akseliteho (W), V pumpun tuotto (tilavuusvirta), ρ virtausaineen tiheys, g maan vetovoiman kiihtyvyys (9.81 m/s^2), H pumpun nostokorkeus (m) ja η pumpun hyötysuhde (%).

Edellä mainittujen vaiheiden lisäksi painolastivesipumpun kokoa valittaessa on otettava huomioon myös muut tekijät, esimerkiksi putkien koko, kitkahäviöt sekä nostokorkeus. Nämä tekijät voivat vaikuttaa painolastijärjestelmän yleishyötysuhteeseen ja saattavat edellyttää tehokkaamman pumpun valitsemista. Lisäksi on huomioitava sähkön jakelu- ja redundanttisuusvaatimukset.

Pääpumppuja valittaessa täytyy myös valita pumppujen tyyppi ja valmistaja. Yleisin käytössä oleva tyyppi on keskipakopumppu sen yksinkertaisuuden, tehokkuuden ja hinnan takia. Painolastipumput ovat yleensä kooltaan suuria ja myös hintavia. Joissain tapauksissa voidaan järjestelmään joutua asentamaan varapumppuja erillisiin tiloihin, jotta SRtP-säännöt täyttyvät. Yleisesti käytetty veden siirtonopeus teräsputkille on 2–2,5 m/s.

3.5 Putket

Painolastijärjestelmän putkiston tarvittava pituus riippuu aluksen koosta ja muodosta, painolastivesitankkien sijainnista sekä järjestelmän virtausnopeus- ja painevaatimuksista. Lisäksi on otettava huomioon putken halkaisija, reitti ja mahdolliset esteet. Seuraavana on laskettu ja vertailtu esimerkkitapausten putkimetrejä.

Painolastivesijärjestelmän putkille on annettu vaatimuksia luokituslaitosten toimesta. Näitä ovat esimerkiksi minimi seinämäpaksuus tai materiaali. Yleisiä käytössä olevia materiaaleja putkille on esimerkiksi galvanoitu- tai CuNiFe seosmetalliputki. Järjestelmässä voidaan käyttää myös epoksimaalattuja, kumipinnoitettuja tai komposiittiputkia luokituslaitosten sääntöjen puitteissa. Painolastijärjestelmän putkien tulee olla saumattomia ja teräsputkien kohdalla koko matkalta hitsattuja.

Ensimmäinen vaihe putkiston pituuden laskemisessa on aluksen koon ja muodon sekä painolastisäiliöiden sijainnin määrittäminen. Tämä tieto on tärkeää putkien reitin ja matkan arvioimiseksi. Seuraavaksi tulee tarkistaa painolastivesijärjestelmän tekniset tiedot, jotta virtausnopeus ja painevaatimukset voidaan määrittää.

Kun painolastijärjestelmän perussuunnitelma on tehty, voidaan tämän perusteella laskea putkien pituudet laskemalla kaikkien linjojen pituudet yhteen, mukaan lukien haaralinjat, nousuputket ja muut yhteydet. On tärkeää huomioida putkiston reitti ja mahdolliset mutkat sekä esteet ja laskea näiden vaikutukset kokonaispituuteen.

Muita suunnittelussa huomioitavia tekijöitä ovat esimerkiksi eristystarve, tukikannattimet, laipat sekä laajennusliitokset. Näillä tekijöillä voi myös olla vaikutus tarvittavien putkien kokonaispituuteen ja niiden vaikutukset on otettava huomioon lopullisessa suunnitelmassa. Näihin asioihin emme perehtyneet tässä työssä, koska ne eivät ole osa perussuunnittelua eivätkä vaikuta merkittävästi tuloksiin.

Referenssialuksen kohdalla kaikki putket ovat saumattomia, kuumasinkittyjä teräsputkia. Samat putkimateriaalit pätevät myös referenssialuksen pohjalta tehtyihin vaihtoehtoisiiin suunnitelmiin.

Taulukossa 1 on esimerkkilaivan painolastivesikaavion yhteydessä olevasta putkilistasta kirjattu eri putkikoot ja niiden pituudet. Runkolinjat eli linjat, jotka kulkevat koko laivan pituudelta ovat pääosin DN250-kokoisia putkia. Suurella runkolinjalla saadaan siirrettyä suuri määrä vettä tankkien välillä. DN200-putket ovat taas pääosin runkolinjan ja tankkien välisissä yhteissä käytettyä putkea. Näistä pienempiä putkikokoja DN100 sekä DN150 on käytetty pääosin puhdistusjärjestelmän sekä SRtP-varapumpun putkissa.

Taulukko 1. Rengaslinjan putket.

Rengaslinjan putket				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	26	129	350
Yhteensä (m)	515			

Taulukossa 2 on saman aluksen, mutta yksittäislinjalla varustetun painolastijärjestelmän putkikoot ja määrät metreinä. Suurin muutos putkimetreissä on runkolinjan DN250-putkien kohdalla. Niiden määrä väheni alle puoleen alkuperäisestä. Pieni muutos DN200-putkien määrässä johtui siitä, että haaralinjoja piti jatkaa, jotta niiden pituus riitti uuteen runkolinjaan asti. Putkien määrän ero on kuitenkin merkittävä näiden kahden tyyppin välillä.

Taulukko 2. Yksittäislinjan putket.

Yksittäislinjan putket				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	26	131	172
Yhteensä (m)	339			

Taulukossa 3 on listattuna yksittäislinjan putket järjestelmässä, jossa pääpumput on siirretty konehuoneeseen. Järjestelmä ei täytä SRtP-vaatimuksia ja kaikki siihen liittyvät putket ovat riisuttu järjestelmästä. Muutoin putkimetrit vastaavat lähes täysin aiemmin listattuja yksittäislinjan putkia.

Taulukko 3. Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa.

Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	0	112	165
Yhteensä (m)	287			

Taulukossa 4 on sama linja kuin taulukossa 3, mutta tähän on lisätty järjestelmän vaatimat SRtP-putket. Tässä havaittiin, että SRtP:n mukaan ottaminen lisäsi järjestelmään kymmeniä metrejä DN200-putkea. Putki on tässä tapauksessa lisäksi palonkestävää putkea, joka on hinnaltaan kalliimpaa kuin normaali teräsputki. Muissa putkimäärissä ei ole merkittävää muutosta.

Taulukko 4. Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.

Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa, SRtP				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	10	153	170
Yhteensä (m)	343			

Tuloksia tulkitsemalla todettiin, että yksittäislinja vaatii vähemmän putkea metrimääräisesti kuin rengaslinja. Kahden SRtP-vaatimukset täyttävän yksittäislinjan putkimetreissä ei havaittu merkittävä eroa. Tehtyjen laskelmien mukaan ero on vain noin 4 metriä. Vaikka ero ei putkimetreissä näy, edellyttää pumppujen siirtäminen pääkonehuoneeseen lisää palosuojattua putkea.

3.6 Venttiilit

Venttiilit ovat painolastivesijärjestelmän kriittisiä osia ja niitä käytetään ohjaamaan veden virtausta painolastisäiliöihin ja niistä ulos. Venttiileillä voidaan myös hätätapauksessa tai huollon aikana sulkea järjestelmän osia pois käytöstä. Painolastivesijärjestelmään tarvittavien venttiilien määrän, koon ja mallin valitseminen edellyttää useiden tekijöiden huolellista harkintaa. Tässä kappaleessa käsitellään tärkeimpiä näkökohtia määrittäessä laivan painolastivesijärjestelmän venttiilien määrää, kokoa ja mallia.

Ensimmäinen huomioon otettava seikka määrittäessä tarvittavien venttiilien määrää on aluksen koko ja painolastisäiliöiden lukumäärä. Suurempi alus, jossa on useita painolastitankkeja, vaatii enemmän ja isompia venttiileitä kuin pienempi alus, jossa on vähemmän tankkeja. Tarvittavien venttiilien määrään vaikuttaa myös laivaan asennetun painolastivesijärjestelmän tyyppi, eli yksittäis- vai rengaslinja. Kumpikin järjestelmä vaatii eri määrän erityyppisiä ja kokoisia venttiileitä. Jokaisella tankilla tulee olla venttiilit, joilla tankin täyttö tai tyhjennys voidaan sulkea. Venttiilit voivat sijaita myös runkolinjoissa. Näitä voidaan käyttää vauriotapauksessa sulkemaan vaurioitunut järjestelmän osa pois.

Venttiileitä valittaessa pitää valita myös venttiilien materiaali ja tyyppi. Venttiileitä valmistetaan useista eri materiaaleista, kuten pronssista tai valuraudasta. Valurautaiset venttiilit on käsiteltävä siten, etteivät ne ruostu. Jokaisella materiaalilla on ominaisuuksia, jotka määrittävät sen soveltuvuuden painolastivesijärjestelmiin. Venttiilit eroavat toisistaan myös mekaanisesti. Saatavilla on mm. luisti-, pallo- ja läppäventtiilejä, joilla jokaisella on omat käyttökohteensa. Venttiilien materiaalivalinnat ja tyyppi riippuvat monista asioista, kuten luokituslaitoksen säännöistä. DNV:n säännöissä RU-SHIP Pt.4 Ch.6 Section 3 Design Principles, määritellään venttiileiltä vaaditut tyypit, sijainnit ja muut ominaisuudet. Esimerkiksi törmäyslaipion venttiilin kaukokäyttö tapahtuu varalaitakannelta ja venttiili on tyypiltään kiilaluistiventtiili. Kaikkien asennettujen venttiilien on oltava luokituslaitosten hyväksymää tyyppiä.

Taulukkoon 5 on merkitty rengaslinjalla suunnitellun esimerkkialuksen venttiilien koot ja lukumäärät. DN250-venttiilit ovat runkolinjan venttiileitä ja DN200 haaralinjojen. DN150-venttiilit liittyvät SRtP-hätäpumppuun ja DN100-venttiili painolastiveden puhdistusjärjestelmään.

Taulukko 5. Rengaslinjan venttiilit.

Rengaslinjan venttiilit				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (kpl)	1	3	19	33
Yhteensä (kpl)	56			

Taulukkoon 6 on merkitty vastaavan yksittäislinjajärjestelmän venttiilimäärät. Kyseisen järjestelmän kohdalla muutos näkyy vain runkolinjan kohdalla. Toisen runkolinjan poistaminen vähensi rengaslinjaan verrattuna DN250-venttiilien määrää vain seitsemällä.

Taulukko 6. Yksittäislinjan venttiilit.

Yksittäislinjan venttiilit				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (kpl)	1	3	19	26
Yhteensä (kpl)	49			

Pumppujen siirtäminen konehuoneeseen ja SRtP-vaatimuksien huomiotta jättäminen vaikuttivat merkittävästi järjestelmän venttiilien määrään. Verrattuna järjestelmään ennen kaikkien SRtP-venttiilien poistamista ja pumppujen siirtämistä, on venttiileitä 14 kappaletta vähemmän. Näistä suurin osa on runkolinjan venttiileitä, jotka ovat DN250-kokoisia ja näin myös kustannuksiltaan suurimpia. DN200-venttiilien määrän väheneminen johtuu poistetuista palosuojatuista SRtP-putkista.

Taulukko 7. Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa.

Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (kpl)	1	0	15	19
Yhteensä (kpl)	35			

Taulukossa 8 on sama järjestelmä kuin taulukossa 7, mutta nyt se on muutettu täyttämään SRtP:n toiminnalliset vaatimukset. Lisäys venttiilien määrässä on merkittävä, varsinkin runkolinjan venttiilien kohdalla. Lisätyt DN200-venttiilit ovat palosuojattujen ohitusputkien venttiileitä. DN250-venttiileitä jouduttiin myös lisäämään entisestään runkolinjaan, jotta pumppujen siirtäminen pääkonehuoneeseen saatiin täyttämään SRtP-vaatimukset.

Taulukko 8. Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa SRtP huomioituna.

Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa, SRtP				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (kpl)	1	3	21	29
Yhteensä (kpl)	54			

Taulukon tietojen perusteella päästiin samaan lopputulokseen kuin putkimetriensä kanssa. Rengaslinja tarvitsee suuremman määrän venttiileitä saman asian saavuttamiseksi, kuin yksittäislinja. Useassa tapauksessa rengaslinjan tuomat edut kuitenkin ovat suuremmat kuin mitä kyseinen järjestely tuo lisää materiaalien vaatimassa tilassa.

3.7 Paino

Painolastivesijärjestelmän arvioidun painon laskemiseksi on ensin määritettävä järjestelmän koko ja tyyppi. Tämä edellyttää suunnitteludokumenttien tarkastelua, joista tärkein on komponenttilista ja painolastivesikaavio -

dokumentti. Tärkeimpiä huomioon otettavia asioita ovat putkien, venttiilien ja pumppujen koko. Tässä yhteydessä ei otettu kantaa tankkien tuomaan painoon tai käsittelyjärjestelmiin, vaan käsiteltiin ainoastaan järjestelmän putkistoa, venttiilejä ja pumppuja. Näin järjestelmän painon laskemista saatiin yksinkertaistettua ja pystyttiin helpommin vertailemaan kahden eri järjestelmätyypin mahdollista painoeroa. Käsittelyjärjestelmiin perehdyttiin tarkemmin opinnäytetyön lopussa, missä vertailtiin niiden kokoja ja painoja yksittäisinä osina.

Kun järjestelmän perussuunnittelu on tehty, on seuraava askel tunnistaa kunkin yksittäisen järjestelmän osan paino. Normaalisti järjestelmän kokonaispainoon sisältyy pumppujen, suodattimien, käsittelyjärjestelmien ja kaikkien niihin liittyvien putkien, venttiilien tai ohjauslaitteiden paino, mutta tässä keskityttiin nyt vain putkiin, venttiileihin ja pumppuihin. Tarkan tiedon painoista saa komponenttilistasta tai suoraan valmistajalta, mikäli painoja ei ole spesifioitu komponenttilistassa.

Kun kunkin yksittäisen komponentin paino on saatu selville, ne voidaan laskea yhteen, jotta saadaan järjestelmän kokonaispaino. On tärkeää huomata, että järjestelmän painoon voi vaikuttaa myös lisätekiöitä, kuten eristys tai suojaavat pinnoitteet, jotka on otettava huomioon kokonaispainoa laskettaessa. Nämä jätettiin kuitenkin huomioimatta, koska eristykset kahden keskenään samasta materiaalista rakennetun järjestelmän välillä ovat hyvin lähellä toisiaan. Hypoteesina voitiin todeta, että rengaslinja on painavampi kahdesta vaihtoehdosta sen isomman materiaalmäärän takia. Seuraavissa taulukoissa painot on pyöristetty lähimpään kilogrammaan. Taulukossa 9 on otettu aluksen painolastivesikaavion erittelystä putkien ja venttiilien yksikköpainot. Putkien painot on ilmoitettu muodossa kg/m ja venttiilit kg/kappale.

Taulukko 9. Putkien ja venttiilien yksikköpainot.

Putkien ja venttiilien yksikköpainot			
Putket	kg/m	Venttiilit	kg/kpl
DN100	23,3	DN100	10
DN150	43,9	DN150	16
DN200	59,6	DN200	20
DN250	83,7	DN250	27

Taulukosta 10 saamme rengaslinjan putkien ja venttiileiden yhteenlasketun painon.

Taulukko 10. Rengaslinjan paino.

Rengaslinjan paino	
Venttiilit (kg)	1329
Putket (kg)	38356
Yhteensä (kg)	39685

Taulukossa 11 on listattuna yksittäislinjan komponenttien yhteenlasketut painot. Järjestelmän painossa voitiin havaita merkittävä muutos, koska tästä järjestelmästä puuttuu kokonaan toinen runkolinja. Tämän poistaminen oli suurin syy painon muutokseen. Vaikka noin 15 tonnin muutos painossa vaikuttaa yksinään suurelta, on huomattava, että alus johon järjestelmä on asennettu, on kevytpainoltaan noin 15 600 tonnia. Tämä muutos kevytpainoon suhteutettuna on noin 0,1 %.

Taulukko 11. Yksittäislinjan paino.

Yksittäislinjan paino	
Venttiilit (kg)	1140
Putket (kg)	23575
yhteensä (kg)	24715

Taulukossa 12 on listattuna yksittäislinjan painot järjestelmässä, jossa pumput ovat siirretty konehuoneeseen. Tämä järjestelmä ei täytä SRtP-vaatimuksia. Muutos yksittäislinjaan, joka täyttää vaatimukset, on noin 3 tonnia, mikä on lähes merkityksetön ero aluksen kokonaispainossa.

Taulukko 12. Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa.

Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa	
Venttiilit (kg)	823
Putket (kg)	20716
yhteensä (kg)	21539

Taulukossa 13 on laskettu SRtP-vaatimukset täyttävän yksittäislinjajärjestelmän venttiilien ja putkien kokonaispaino. Pumppuja taakse siirtämällä järjestelmän paino kasvaa noin 1000 kilogrammaa alkuperäiseen yksittäislinjajärjestelyyn verrattuna. Painon lisäys johtuu lisätyistä venttiileistä ja palosuojatuista putkista.

Taulukko 13. Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa SRtP huomioituna.

Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa, SRtP	
Venttiilit (kg)	1261
Putket (kg)	24016
yhteensä (kg)	25277

Vaikka yksittäin tarkasteltuna painojen vaihtelu eri järjestelmämuotojen välillä vaikuttaa suurelta, on muistettava, että se on vain pieni osa aluksen kokonaispainoa. Pienemmissä laivoissa järjestelmän painolla voi olla enemmän merkitystä, mutta näin isossa ROPAX-aluksessa ei niinkään. Esimerkiksi rengaslinjalla varustetun referenssialuksen kohdalla on painolastijärjestelmän putkiston ja venttiilien osuus laivan kevytpainosta 0,26 %.

3.8 Hinta-arvio

Laivojen hinnoitteluissa voi olla merkittäviä eroja telakoiden ja järjestelmätoimittajien välillä. Edellisten kappaleiden tietojen perusteella voitiin arvioida järjestelmien materiaalmääristä johtuva hintaero. Emme ota tässä kappaleessa kantaa käsittelyjärjestelmän vaikutukseen kokonaishintaan, koska laitteistot ovat merkittävästi eri hintaisia riippuen valmistajasta ja puhdistusmenetelmästä. Ne huomioitiin kuitenkin osana kokonaisuutta.

Painolastivesijärjestelmän kokonaishinta riippuu useista tekijöistä, esimerkiksi aluksen koosta, asennetun järjestelmän tyypistä, käsittelyssä käytetystä tekniikasta ja sertifiointivaatimuksista. Yleensä suuret alukset tarvitsevat kehittyneempiä ja kalliimpia järjestelmiä painolastiveden hallintaan.

Myös asennetun puhdistusjärjestelmän tyyppi vaikuttaa kustannuksiin. Markkinoilla on useita puhdistusteknologioita, kuten fyysinen suodatus, UV-säteilytys, sähköklooraus ja kemialliset käsittelyjärjestelmät. Jokaisella järjestelmällä on omat etunsa. Esimerkkialuksissa on käytössä UV-säteilyyn ja suodatukseen perustuvat laitteistot, joten niiden oletettiin olevan samassa hintaluokassa keskenään.

Sertifiointivaatimukset vaikuttavat myös painolastivesijärjestelmän kustannuksiin. Aluksen toiminta-alueen mukaan voidaan vaatia tiettyjä sertifikaatteja kansainvälisten määräysten noudattamisen varmistamiseksi. Nämä sertifiointit voivat lisätä järjestelmien kustannuksia merkittävästi, koska ne edellyttävät testausta ja hyväksyntää kolmansilta osapuolilta.

Hintavertailussa olevat painolastijärjestelmät ovat referenssialuksen alkuperäinen rengaslinja sekä sen pohjalta tehty yksittäislinja. Tässä yhteydessä ei perehdytty tarkemmin järjestelyyn, jossa erona oli pumppujen siirtäminen pääkonehuoneeseen.

Taulukon 14 materiaalmäärien perusteella voitiin olettaa rengaslinjan olevan kalliimpi ratkaisu. Mikäli yksikköhintojen oletettiin olevan samat kaikkien

järjestelmien kohdalla ja hinta-arvio perustettiin järjestelmän painoon, oli rengaslinja noin 60 % kalliimpi kuin yksittäislinja. Molemmat järjestelmät käyttävät samoja putkia ja venttiileitä, joten niiden metri- tai kappalehinnat voitiin olettaa olevan samat järjestelmien välillä.

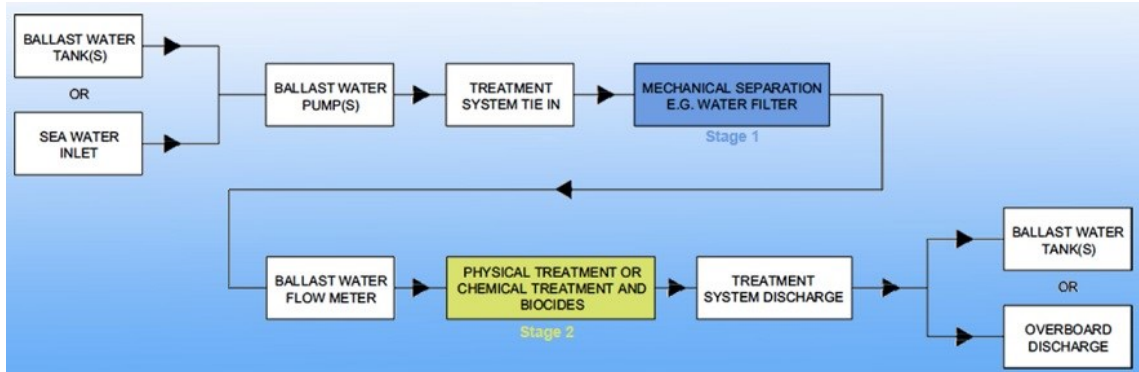
Taulukko 14. Materiaalimäärät.

Rengaslinjan putket					Rengaslinjan venttiilit				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	26	204	350	Määrä (kpl)	1	3	19	33
Yhteensä (m)	590				Yhteensä (kpl)	56			
Yksittäislinjan putket					Yksittäislinjan venttiilit				
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	Koko	DN100	DN150	DN200	DN250
Määrä (m)	10	26	206	172	Määrä (kpl)	1	3	19	26
Yhteensä (m)	414				Yhteensä (kpl)	49			

4 Painolastiveden käsittely

Painolastiveden käsittelyllä tarkoitetaan menettelyä, jonka tehtävänä on puhdistaa aluksesta pois pumpattavaa vettä. Käsittelyllä pyritään poistamaan vedestä haitalliset taudinaiheuttajat ja vesieliöt, jotta vesi voidaan pumpata pois aluksesta. Tällä pyritään vähentämään vierasperäisten lajien tai bakteerien siirtymistä vaarantuneille vesialueille, kuten Itämerelle.

Matkustaja-alusten painolastiveden hallintaa säätelevät kansainväliset lait ja määräykset, kuten alusten painolastiveden ja sedimenttien valvontaa ja hallintaa koskeva kansainvälinen yleissopimus (BWM-sopimus), jonka Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) hyväksyi vuonna 2004. BWM-yleissopimus sisältää säännöt ja suuntaviivat alusten painolastiveden hallintaan, jotta haitallisten organismien pääsy uusiin ympäristöihin voidaan minimoida. Yleissopimuksen on allekirjoittanut 86 maata ja näiden maiden lippujen alla liikkuvien alusten tulee täyttää sen asettamat vaatimukset.



Kuva 15. Ballast water treatment two stages (Ship Business 2015).

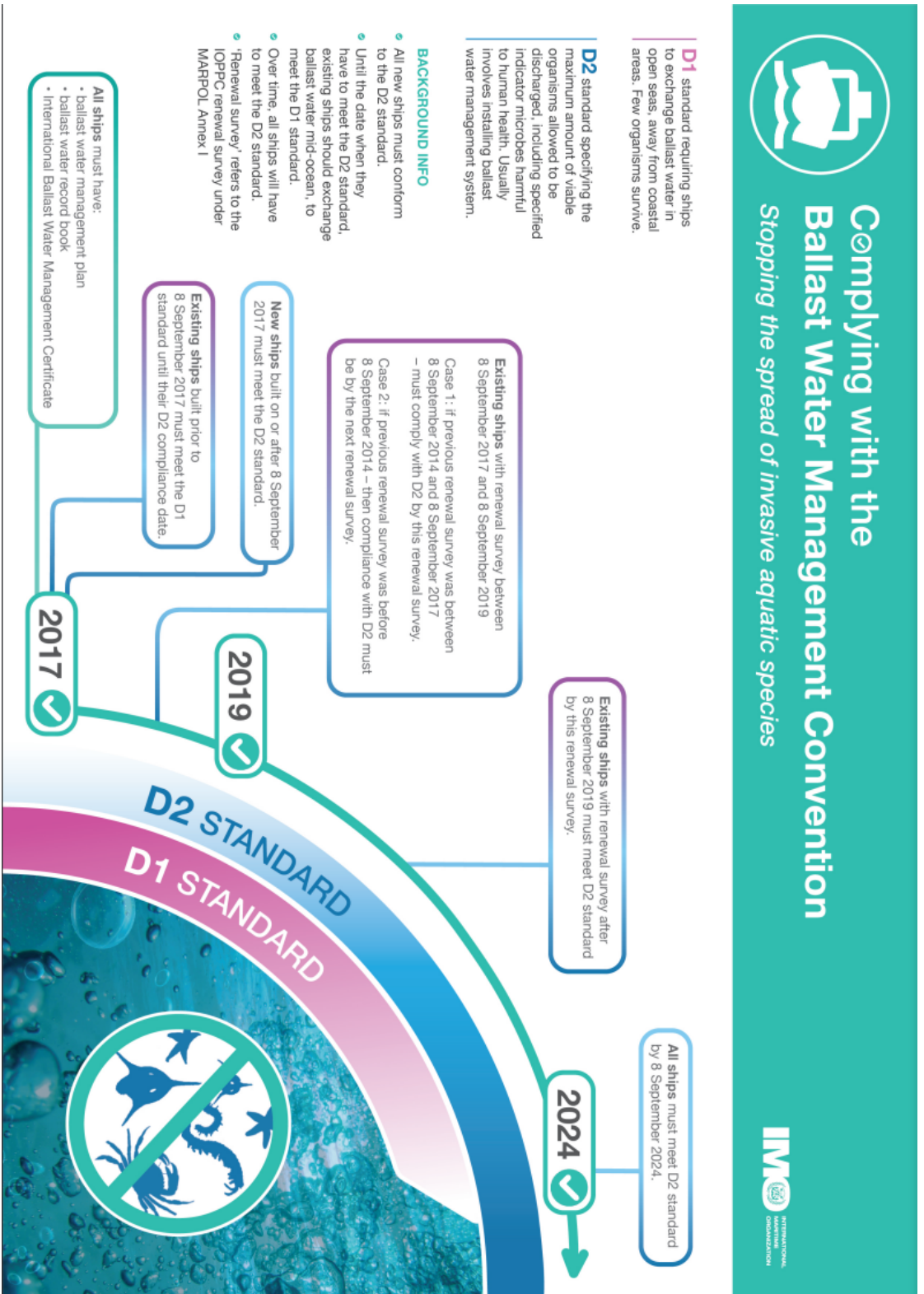
Käsittelyvaiheessa käytetään erilaisia tekniikoita painolastivedessä olevien organismien poistamiseksi tai inaktivoimiseksi. Yleisimmin käytettyjä käsittelymenetelmiä ovat UV-, suodatus-, ja kemialliset menetelmät, kuten klooraus tai otsonointi. Käytettävän käsittelymenetelmän tyyppi riippuu aluksen koosta, painolastiveden määrästä, aluksen liikennealueelta ja määräysten erityisvaatimuksista. (Ship Business 2015.)

Kun painolastivesi on käsitelty, se voidaan laskea tankeista ulos mereen. Purkausprosessia on tarkkailtava ja valvottava huolellisesti sen varmistamiseksi, että käsitelty vesi ei sisällä haitallisia organismeja. Käsittelymenetelmiin perehdyttiin tarkemmin kappaleessa 4.2. Aluksen miehistön on myös noudatettava tiukkoja raportointivaatimuksia, kuten yksityiskohtaiset tiedot painolastiveden hallintatoimista, mukaan lukien alukselle otetun veden määrä, käytetty käsittelyprosessi sekä purkamispaikka ja -aika.

BWM-yleissopimuksen ja muiden kansainvälisten määräysten toimeenpano on auttanut lisäämään tietoisuutta painolastiveden käsittelyn tärkeydestä ja parantamaan käsittelyprosessin tehokkuutta matkustaja-aluksissa. (Marine Insight 2021.)

4.1 Sääntövaatimukset

IMO:n hyväksymä ja vuonna 2004 allekirjoitettu BWM eli Ballast Water Management Convention astui voimaan 8.9.2017. Sen mukaan kaikkien kansainvälisillä vesillä liikkuvissa laivoissa on oltava painolastiveden käsittelyjärjestelmä. Dokumentti määrittelee ennen julkaisupäivää valmistettujen laivojen ja uudisrakenteiden standardit laitteiston suhteen. Ennen julkaisua rakennettujen laivojen on täytettävä D1-määräykset ja uudisrakenteiden D2-määräykset. Pitkän aikavälin tarkoituksena on saada kaikki alukset täyttämään D2-luokan määräyksen 8.9.2024 mennessä. D1-luokassa alusten on vaihdettava painolastivettä kaukana rannikoista siten, että vähintään 95 % veden tilavuudesta vaihtuu. D2-standardin mukaisissa aluksissa on oltava painolastiveden käsittelyjärjestelmä ja siinä määritellään mikro-organismien enimmäismäärä kuutiometriä vettä kohden. Nämä raja-arvot ovat enintään 10 kappaletta >50 µm mikro-organismeja yhdessä kuutiometrissä vettä ja/tai enintään 10 kappaletta <50 µm mikro-organismeja yhdessä millilitrassa vettä sekä 10 mikro-organismeja kooltaan enintään 50 µm yhtä millilitraa vettä kohden. (IMO 2023.)



Kuva 16. Complying with the ballast water management convention (IMO 2023).

Matkustaja-aluksiin on asennettava painolastiveden käsittelyjärjestelmä, joka täyttää edellä mainitut IMO:n D2-standardit. Järjestelmien tulee olla hyväksytyt organisaation sertifioimia ja niiden on täytettävä IMO:n asettamat suorituskystandardit. Määräykset edellyttävät, että painolastiveden hallintasuunnitelmaan tulee sisältyä menettelyt puhdistusjärjestelmien tehokkuuden seuranta, testausta ja kirjaamista varten. Suunnitelman tulee sisältää myös menettelyt käsitellyn painolastiveden poistamiseksi ympäristön kannalta turvallisella tavalla.

IMO:n asettamien määräysten lisäksi jotkin maat ovat ottaneet käyttöön omia sääntöjä ja määräyksiä painolastiveden hallintajärjestelmille. Esimerkiksi Yhdysvaltain rannikkovartiosto edellyttää, että kaikilla aluksilla on painolastiveden hallintajärjestelmä, joka täyttää USCG:n erityismääräykset.

USCG:n määräykset painolastiveden puhdistusjärjestelmää koskien mukailevat IMO:n asettamia määräyksiä pienin poikkeuksin. USCG:n säännöt eriävät näistä säännöistä lähinnä laitteiston testauksen osalta. (USCG 2021.)

Luokituslaitokset edellyttävät laivojen täyttävän BWM:n säännökset käsittelyjärjestelmien asentamisen ja tehon osalta. DNV jakaa alukset kahteen osaan säännössään RU-SHIP Part 6. Ch.7 kohdassa 1.4, sen mukaan, kumpia BWM sääntöjä niiden tulee noudattaa. BWM(E[m]) on D1-luokan aluksille, jotka saavat vaihtaa painolastivettä ulkona merellä. BWM(T) on taas aluksille, joiden tulee täyttää D2-luokan vaatimukset. (DNV 2022.)

Muutkin luokittelulaitokset edellyttävät painolastiveden käsittelylaitteistojen asentamista. Laitteistojen tulee täyttää samat BWM-säännökset. Pääosin käsittelylaitteiston toimintaperiaatteella ei ole väliä, kunhan lopputulos täyttää vaadittavat kriteerit. Lähtökohtaisesti painolastivettä ei tarvitse kuitenkaan puhdistaa kansallisessa liikennöinnissä.

4.2 Painolastiveden käsittelytavat

Painolastiveden puhdistamista varten on kehitetty useita menetelmiä. Käytetty menetelmä valitaan aluksen käyttötarkoituksen, painolastiveden määrän ja liikennöintialueen perusteella. Tyypillisimpiä puhdistusmenetelmiä ovat UV-säteily, suodatus, kemiallinen puhdistus, lämpö- ja ultraäänikäsittely. Jokaisella järjestelmällä on omat etunsa. Järjestelmiä voidaan käyttää vain yhtä tai useampaa laitteistoa kerralla. Useita eri laitteita käytettäessä puhutaan hybridilaitteistosta. Asennettu laitteisto voi myös vaikuttaa siihen, täytyykö painolastivesi puhdistaa vain sisään- vai molempiin suuntiin pumpattaessa.

Mekaanisessa käsittelyssä käytetään erilaisia laitteita, kuten suodattimia ja UV-valoa, poistamaan haitallisia mikro-organismeja vedestä. Suodattimet poistavat suuremmat hiukkaset vedestä, kun taas UV-valo tappaa pienemmät mikrobit. Mekaaninen käsittely on ympäristöystävällisempi kuin kemiallinen käsittely, koska se ei käytä kemikaaleja, mutta on kalliimpi ja vaatii enemmän energiaa.

Kemiallisessa puhdistuksessa käytetään esimerkiksi klooria tai natriumhypokloriittia tappamaan haitalliset mikro-organismit vedessä. Kemikaalit lisätään painolastiveteen, jonka jälkeen vesi pumpataan laivasta takaisin mereen. On myös laitteistoja, jotka perustuvat elektroklooraukseen. Tässä menetelmässä kemikaali erotellaan vedestä ja käytetään sen puhdistamiseen. Perinteisiä kemiallisen puhdistuksen menetelmiä käytetään vähemmän, koska kemikaalit vaativat säilytykseen erilaisia säiliöitä ja ne ovat kalliita. Kemikaaleilla puhdistettu vesi pitää neutralisoida ennen meriveteen päästämistä, mistä syntyy yksi vaihe lisää puhdistusprosessiin. Ulkoisiin kemikaaleihin, kuten erikseen lisättyyn klooriin perustuvia järjestelmiä ei tästä syystä käytetä kovin yleisesti. Kemikaalien käytössä painolastiveden puhdistuksessa on lisäksi riskinä esimerkiksi kemikaalien joutuminen ympäristöön.

Lämpökäsittely käyttää korkeaa lämpötilaa tappamaan haitallisia mikro-organismeja vedessä. Vesi lämmitetään korkeaan lämpötilaan ja pidetään siinä tietyn ajan, jonka jälkeen se pumpataan takaisin mereen. Vesi voidaan

lämmittää joko tankeissa tai kierrättää moottorin vedenkierron kautta. Lämmitetty vesi voi kuitenkin nopeuttaa korroosiota putkistoissa ja tankeissa. Menetelmä vaatii lisäksi paljon energiaa ja tilaa, on kallis toteuttaa ja hidas muihin vaihtoehtoihin verrattuna.

Kaasutuksessa käytetään inerttiä kaasua, kuten otsonia tai typpeä tappamaan haitallisia mikro-organismeja vedessä. Kaasu lisätään painolastiveteen, jonka jälkeen vesi pumpataan takaisin mereen. Tämä menetelmä on tehokas, mutta se on suhteellisen kallis ja vaatii erikoislaitteita. Kaasuttaminen vaatii myös toimiakseen ilmativiit tankit ja veden puhdistumiseen kuluu painolastiveden määrästä riippuen useita päiviä. Tämän takia laitteisto on harvinainen käytännön sovelluksissa.

Markkinoilla olevista painolastiveden käsittelyjärjestelmistä suosituimmat niiden edullisuudesta ja tehokkuudesta johtuen ovat UV-tekнологiaan ja suodatukseen perustuvat järjestelmät. Niiden osuus puhdistusjärjestelmien markkinoista on noin 50 prosenttia. (Spyros S. Michalatos 2017.)

4.3 Laittevalmistajien vertailu

Painolastiveden puhdistusjärjestelmiä valmistaa ja myy usea toimija. Näistä tunnetuimpia ovat Alfa Laval, Wärtsilä ja Optimarin. Näiden lisäksi on myös monia muita järjestelmävalmistajia, jotka ovat saaneet IMO:n ja USCG:n hyväksynyt laitteistoilleen. Laitteistojen ostohinnat vaihtelevat merkittävästi riippuen valmistajasta, käsittelymenetelmästä ja järjestelmän koosta. Arviot järjestelmien hinnoista vaihtelevat 500 000 dollarista 3 000 000 dollariin. Laitteistot ovat joko yhteen- tai kahteen suuntaan toimivia. Yhteen suuntaan, eli (one way) järjestelmät käsittelevät veden ainoastaan tankkeihin pumpattaessa ja kahdensuuntaiset, eli (two way) järjestelmät käsittelevät veden sekä sisään, että ulos pumpattaessa.

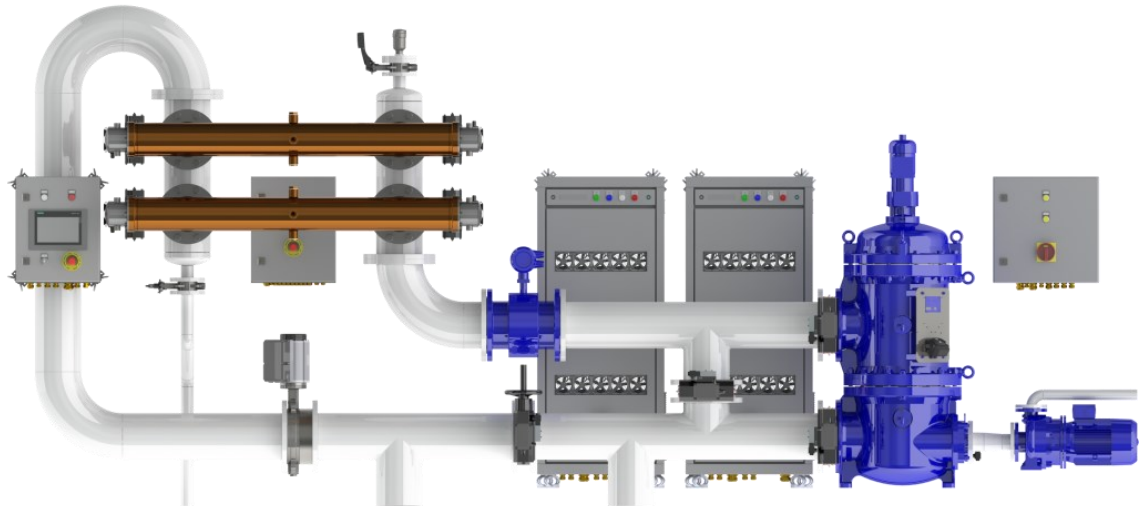
Alfa Laval on markkinaosuudeltaan suurimpia painolastiveden käsittelyjärjestelmien valmistajia. Alfa Lavalin PureBallast-järjestelmä käyttää UV-tekнологiaa painolastiveden puhdistukseen ja se on hyväksytty sekä

Yhdysvaltain rannikkovartioston että IMO:n toimesta. PureBallast 3 on täysin automaattinen UV-suodatukseen perustuva järjestelmä. Laitteistosta on myös olevassa Ex-versio, joka on tarkoitettu räjähdysvaarallisiksi luokiteltuihin tiloihin. Valmistajan mukaan uusia laitteistoja on myyty yli 4000 kappaletta ympäri maailmaa ja satoja jälkiasennuksena. (Alfa Laval 2023.)



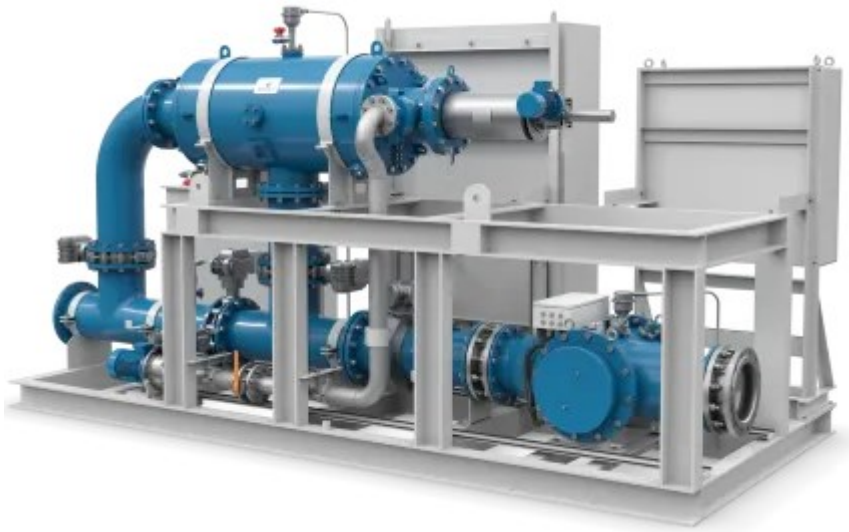
Kuva 17. Alfa Laval PureBallast 3 (Alfa Laval 2023).

Optimarin on toinen merkittävä toimija painolastiveden käsittelyjärjestelmien markkinoilla. Optimarin järjestelmä käyttää myös suodatusta ja UV-tekniologiaa painolastiveden puhdistukseen ja se on myös hyväksytty sekä Yhdysvaltain rannikkovartioston että IMO:n toimesta. (Optimarin 2023.)



Kuva 18. Optimarin painolastiveden puhdistusjärjestelmä (Optimarin 2023).

Wärtsilä on yksi johtavista meriteknologian toimittajista ja tarjoaa valikoiman painolastiveden käsittelyjärjestelmiä. Wärtsilän Aquarius-järjestelmästä on olemassa kaksi eri versiota: UV-suodatukseen perustuva Aquarius UV ja elektroklooraukseen perustuva Aquarius EC. Laitteistoista on olemassa myös UVX ja ECX versiot, jotka ovat suunniteltu asennettavaksi räjähdysvaarallisiksi luokiteltuihin tiloihin. (Zone 1 IIC T4.) Tämä tarkoittaa aluetta, jossa ilmassa voi olla vetyä ja alueen maksimilämpötila on 135°C. Laitteistot on hyväksytty sekä Yhdysvaltain rannikkovartioston että IMO:n toimesta. Järjestelmä soveltuu kaikille maapallon vesialueille. (Wärtsilä 2018.)



Kuva 19. Wärtsilä Aquarius UV (Wärtsilä 2023).

Evoqua on johtava vesikäsitteilyratkaisujen tarjoaja. Evoqua on kehittänyt elektroklooraukseen perustuvia puhdistusjärjestelmiä jo yli 40 vuoden ajan. Evoquan SeaCURE-järjestelmä käyttää useita suodattimia ja elektrokloorausteknologiaa painolastiveden puhdistukseen. Laitteisto käyttää 0.5–1 % painolastivedestä natriumhypokloriitin tekemiseen, jota käytetään veden puhdistukseen. Järjestelmää voi käyttää suolaisen- tai makeanveden alueilla. Se on hyväksytty sekä Yhdysvaltain rannikkovartioston että IMO:n toimesta. (Evoqua 2023.)



Kuva 20. Evoqua SeaCure (Evoqua 2023).

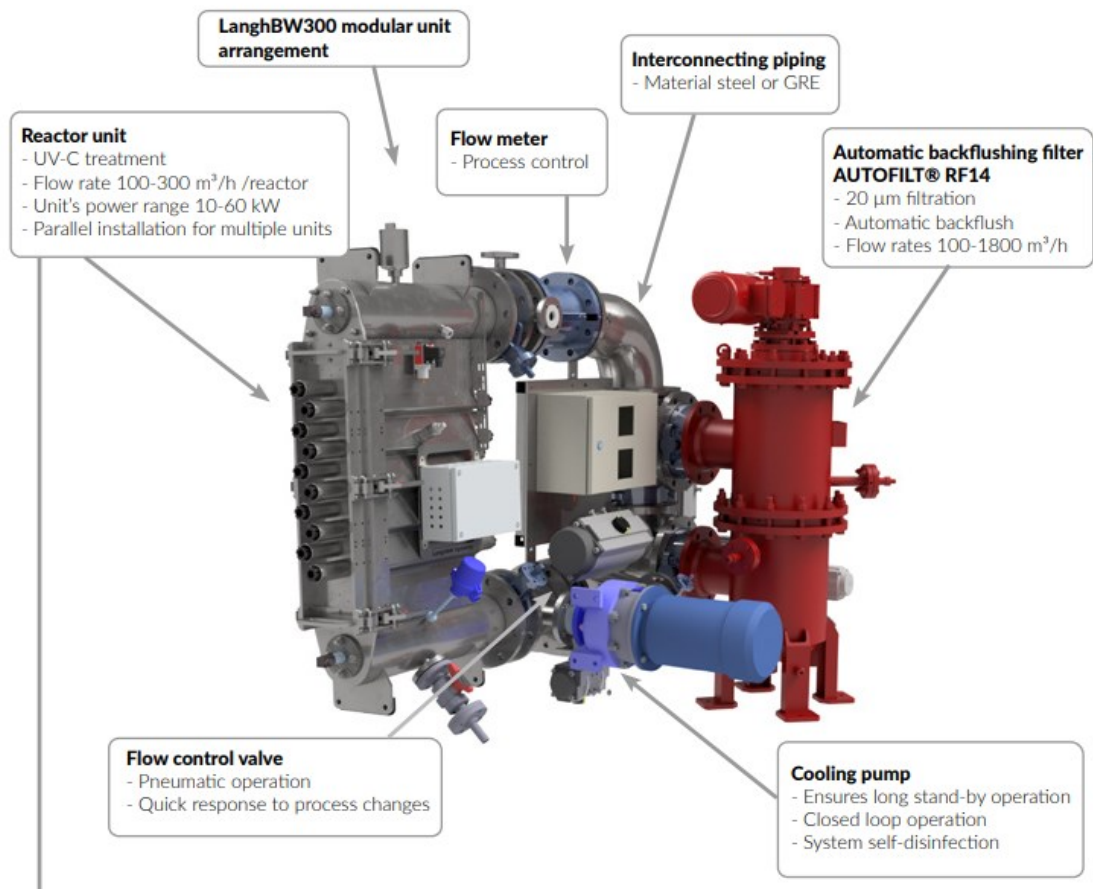
Hyde Marine on Calgon Carbon Corporationin tytäryhtiö ja tarjoaa valikoiman painolastiveden käsittelyjärjestelmiä. Hyde Marinen Hyde GUARDIAN-järjestelmä käyttää suodatusta ja UV-teknologiaa painolastiveden puhdistamiseen. Se on tilantarpeeltaan markkinoiden pienimpiä ja tästä syystä erittäin suosittu erityisesti jälkiasennusprojekteissa. Laitteisto on hyväksytty sekä Yhdysvaltain rannikkovartioston että IMO:n toimesta. (Hyde Marine 2023.)



Kuva 21. Hyde Marine laitteisto (De Nora 2023).

Myös kotimainen Lanh Tech valmistaa painolastiveden käsittelyjärjestelmiä. Lanh Tech julkaisi oman LanhBW UV-suodatukseen perustuvan laitteistonsa vuonna 2020. Laitteisto on pienikokoinen ja tehokas. Lanh Techin valikoimasta löytyy useita versioita 300 m³/h kapasiteetista aina 1500 m³/h kapasiteettiin asti. Laitteisto on tarkoitettu erityisesti aluksiin, joissa tilaa on käytössä rajoitetusti. Valmistuksessa on myös otettu huomioon käyttäjäystävällisyys ja laitteisto on

suunniteltu mahdollisimman helposti ja nopeasti huollettavaksi. Laitteisto on saanut nopeasti itselleen IMO:n sekä USCG:n tyyppihyväksynät. Se oli myös maailman ensimmäinen UV-suodatukseen perustuva yksisuuntainen puhdistusjärjestelmä, joka on saanut USCG-hyväksynnän. Näitä on asennettu jo ainakin kuuteen alukseen. (Langh Tech 2023.)



Kuva 22. LanghBW (Langh Tech 2022).

Jokaisella järjestelmällä ja toimittajalla on omat vahvuutensa. Paras valinta riippuukin yleensä aluksen omistajan tai operaattorin erityisistä tarpeista ja vaatimuksista. Näitä ovat esimerkiksi liikennöintialue, painolastiveden puhdistusjärjestelmän nopeus tai automaation määrä. Selvityksessä havaittiin, että UV-käsittely yhdistettynä erilaisiin suodattimiin on ehdottomasti suosituin järjestelmämuoto. Tähän on syynä laitteiston koko, kustannukset ja helppo

jälkiasennus vanhempiin aluksiin. Kaikki edellä mainitut järjestelmät täyttävät IMO:n ja USCG:n vaatimusten lisäksi yleisimpien luokituslaitosten säännöt. Näitä ovat muun muassa DNV GL, LR, BV, CCS ja RINA.

4.3.1 Laitteiston energiankulutus

Painolastiveden käsittelyjärjestelmien energiankulutuksissa on merkittäviä eroja valmistajien, käsittelymenetelmien ja laitteistojen koon mukaan. Pienimmät laitteistot ovat kytkentäteholtaan vain joitakin kymmeniä kilowatteja, kun taas isoimmat laitteistot voivat olla teholtaan satoja kilowatteja. Suurin sisäinen tekijä laitteiston energiankulutuksessa on veden likaisuus. Mitä likaisempaa vesi on, sitä enemmän sen puhdistaminen vaatii energiaa. Tässä kappaleessa tarkastellaan tarkemmin aikaisemmin mainittujen valmistajien ja heidän laitteistoidensa energiankulutuksia. Arvot ovat muutettu muotoon wattia per kuutiometri (W/m^3), jotta eroja voitiin vertailla paremmin. Energiankulutus laskettiin käyttämällä laitteistojen nominaalikytkentätehoa.

Alfa Laval PureBallast 3 laitteiston nominaalienergiankulutus on vertailussa olevien laitteistojen pienin. Syy tähän on Alfa Lavalin laitteiston optimointiin liittyvä kehitystyö. Automaattinen energiankulutuksen ohjausjärjestelmä tuo myös merkittäviä säästöjä. Valmistajan mukaan laitteisto käy suurimman osan ajasta vain puolella teholla. (Alfa Laval 2023.)

Taulukko 15. Alfa Laval PureBallast 3 energian kulutus (Alfa Laval 2023).

Alfa Laval PureBallast 3	
Capacity (m^3/h)	W/m^3
170	65
300	57
600	55
1000	52
1500	54

Wärtsilän Aquarius sarjasta on olemassa UV- ja EC-versiot. UV-säteilyyn perustuva versio on tarkoitettu pienemmille painolastivesimäärille ja sen energiankulutus on myös huomattavasti pienempi kuin elektroklooraukseen perustuvassa EC-versiossa. On kuitenkin huomattavaa, että pienimmät EC-versiot vievät vähemmän sähköä kuin vastaavan kokoinen UV-versio. (Wärtsilä 2023.)

Taulukko 16. Wärtsilä Aquarius UV Energian Kulutus. (Wärtsilä 2023).

Wärtsilä Aquarius UV	
System	W/m ³
AQ-125-UV	152
AQ-300-UV	159
AQ-500-UV	125
AQ-750-UV	123
AQ-1000-UV	100

Taulukko 17. Wärtsilä Aquarius EC energian kulutus (Wärtsilä 2023).

Wärtsilä Aquarius EC	
System	W/m ³
AQ-550-EC	69
AQ-1200-EC	63
AQ-1650-EC	63
AQ-2500-EC	64
AQ-3300-EC	61
AQ4000-EC	61

Hyde Guardian laitteisto vie selvästi eniten energiaa kaikista UV-säteilyyn perustuvista laitteistoista. Laitteiston pieni koko saattaa olla osatekijä energiankulutuksen suuruuteen. (Hyde Marine 2023.)

Taulukko 18. Hyde Marine Guardian energian kulutus (Hyde Marine 2023).

Hyde Marine Guardian	
System	W/m ³
HG150U	200
HG250U	148
HG500U	144
HG1000U	110

Kotimaisen Langh Techin LanghBW tarjoaa kattavimman valikoiman UV-säteilyyn perustuvia laitteistoja. Energian kulutus on samalla tasolla Wärtsilän ja Alfa Lavalin laitteistojen kanssa. Täytyy kuitenkin huomioida, että Langh Techin laitteisto perustuu yhdensuuntaiseen suodatukseen, mikä vie enemmän energiaa. (Langh Tech 2023.)

Taulukko 19. Langh Tech LanghBW energian kulutus (Langh Tech 2023).

Langh Tech LanghBW	
System	W/m ³
LanghBW300	117
LanghBW600	108
LanghBW900	106
LanghBW1200	117
LanghBW1500	117
LanghBW1800	140

Evoquan SeaCURE tai Optimarin laitteistoista ei löytynyt tarvittavia tietoja, jotta ne olisi voitu ottaa vertailuun mukaan. Saatavissa olevien tietojen mukaan SeaCURE vastaa kapasiteetiltaan Wärtsilän Aquarius EC-laitteistoa. USCG-dokumenteista löytyi tieto, jonka mukaan laitteistoa valmistetaan 500–6000 m³/h kapasiteeteille. Optimarin UV-säteilyyn perustuva laitteisto on myös kapasiteettien puolesta vastaava kuin kilpailijat. Tehon kulutuksia ei siitäkään löytynyt valmistajan nettisivuilta.

4.3.2 Laitteiston koko

Painolastiveden puhdistusjärjestelmien koko riippuu merkittävästi vaadittavasta veden puhdistusmäärästä. Pienimmät markkinoilla olevista laitteistoista vievät vain muutaman neliömetrin lattiapinta-alaa, kun taas suurimmat voivat vaatia moninkertaisen tilan. Kokoon vaikuttaa myös, miten laitevalmistaja on laitteiston suunnitellut. Osa laitteistoista on omia moduuleitaan ja osa taas rakennetaan yksittäisistä osakokonaisuuksista. Laitteistojen mitoista on vähän tietoa saatavilla, koska useimmat ovat järjestelmäkohtaisia. Ainoastaan reaktorien tai suodattimien kokotietoja on saatavilla, mutta niistä on vaikea arvioida laitteistojen vaatimaa kokonaispinta-alaa laivassa.

Laitevalmistajista ainoastaan Wärtsilältä, Alfa Lavalilta ja Hyde Marinelta löytyy tarkat kokotaulukot laitteistoista. Langh Techiltä löytyy referenssimitat ainoastaan LanghBW600 -laitteistosta. Saatavilla olevien tietojen perusteella voitiin kuitenkin laskea laitteistojen vaatimat pinta-alat ja tilavuudet sekä verrata näitä kapasiteetteihin. Tästä saatiin tunnusluvut $\frac{kg}{m^3/h}$, $\frac{m^2}{m^3/h}$ ja $\frac{m^3}{m^3/h}$.

Taulukossa 20 ja 21 on Wärtsilän Aquarius UV laitteiston ilmoitetut mittatiedot ja näiden perusteella lasketut tunnusluvut.

Taulukko 20. Wärtsilä Aquarius UV kokotaulukko (Wärtsilä 2018).

WEIGHTS & DIMENSIONS

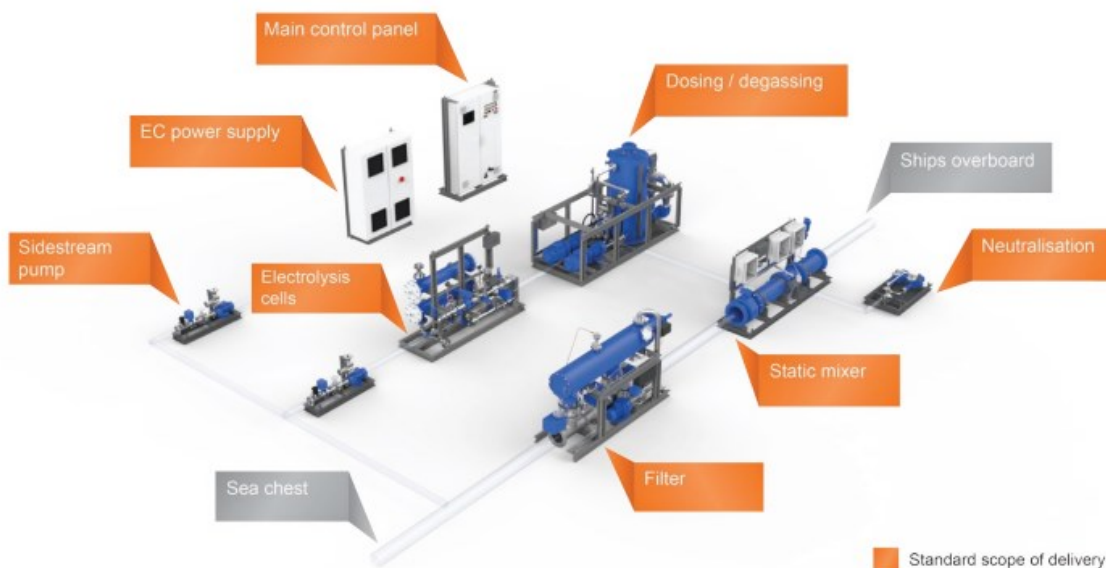
Aquarius® UV System	Capacity Range (m ³ /h)	Filter Loose				UV - Loose (vertical)				Power Panel					Total Weight (kg)	Power (kW)	Total Footprint (m ²)
		Dimensions (m)			Weight (kg)	Dimensions (m)			Weight (kg)	Dimensions (m)			QTY	Weight (kg)			
		L	W	H		L	W	H		L	W	H					
AQ-125-UV	12.5 – 125	0.8	0.5	2.3	330	0.8	0.5	0.9	125	1.2	0.5	1.4	1	200	865	19	1.7
AQ-300-UV	30 – 300	1.0	0.7	2.3	510	1.0	0.7	1.3	285	1.2	0.5	1.8	1	350	1,405	48	2.3
AQ-500-UV	50 – 500	1.0	0.7	3.0	885	1.0	0.7	1.3	320	1.2	0.5	2.0	1	450	1,765	63	2.3
AQ-750-UV	75 – 750	1.3	1.1	3.3	1,460	1.2	0.7	1.3	490	1.2	0.5	2.0	2	400+350	2,860	93	3.8
AQ-1000-UV	100 – 1000	1.3	1.1	3.3	1,600	1.2	0.7	1.3	490	1.2	0.5	2.0	3	450	3,550	100	4.4

NOTE: for single systems with capacity above 1000m³/h, see Aquarius® EC

Taulukko 21. Wärtsilä Aquarius UV tunnusluvut.

Wärtsilä Aquarius UV			
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h
AQ-125-UV	6,9	0,014	0,017
AQ-300-UV	4,7	0,008	0,012
AQ-500-UV	3,5	0,005	0,008
AQ-750-UV	3,8	0,005	0,011
AQ-1000-UV	3,6	0,004	0,009

Wärtsilän Aquarius EC järjestelmä on kaikista vertailussa olevista järjestelmistä suurin. Toimintaperiaatteeltaan se on ainut elektrokloorausjärjestelmä ja poikkeaa siten muista järjestelmistä. Havainnekuvan ja valmistajan tietojen mukaan järjestelmä vaatii paljon pinta-alaa asennukseen, sillä se koostuu useasta isosta komponentista. Koska valmistajan tiedoista ei löytynyt laitteiston vaatimaa tilavuutta, ei kaikkia kolmea tunnuslukua voitu laskea. (Wärtsilä 2018.)



KEY PARAMETERS

Aquarius® EC System	Maximum Capacity (m ³ /h)	Total Footprint (m ²)	Installed Power (kW)	Nominal Power (kW)	Total Weight (kg)
AQ-550-EC	55 – 550	11.4	38	33	4,695
AQ-1200-EC	120 – 1200	14.5	75	65	6,445
AQ-1650-EC	165 – 1650	15.8	104	90	8,523
AQ-2500-EC	250 – 2500	16.5	161	140	10,115
AQ-3300-EC	330 – 3300	16.5	202	174	10,585
AQ-4000-EC	400 – 4000	16.7	245	211	11,905

NOTE 1: Assumed operating conditions: Installed Power at 15°C & 15PSU Nominal Power at 25°C & 30PSU

NOTE 2: Power panel size to be advised on enquiry

Kuva 23. Wärtsilä Aquarius EC järjestelmä (Wärtsilä 2023).

Taulukko 22. Wärtsilä Aquarius EC tunnusluvut.

Wärtsilä Aquarius EC		
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h
AQ-550-EC	8,5	0,021
AQ-1200-EC	5,4	0,012
AQ-1650-EC	5,2	0,010
AQ-2500-EC	4,0	0,007
AQ-3300-EC	3,2	0,005
AQ4000-EC	3,0	0,004

Myös Alfa Laval PureBallast 3 on useista osista koottava järjestelmä. Sen osien koot löytyvät yllä olevasta taulukosta. Suurimman tilan kaikista osista vaatii itse

UV-reaktori ja suodatin. Ohjainlaitteiden ei tarvitse olla koneiston välittömässä läheisyydessä, vaan ne voidaan tilan rajoitteiden mukaan asentaa kauemmas. (Alfa Laval 2023.)

Taulukko 23. Alfa Laval PureBallast 3 kokotaulukko (Alfa Laval 2023).

	Size (mm) (W x D x H)	Net/dry weight (kg)	Volume (L)	
Reactor, 300 m ³ /h	700 x 650 x 1310	250	80	Reactor, 150 m ³ /h
Reactor, 600 m ³ /h	855 x 765 x 1400	320	100	Reactor, 300 m ³ /h
Reactor, 1000 m ³ /h	1030 x 950 x 1500	400	190	Reactor, 500 m ³ /h
Reactor, 1500 m ³ /h	1120 x 1110 x 1480	650	205	Reactor, 750 m ³ /h
Lamp drive cabinet for 300 m ³ /h reactor	900 x 480 x 2000	250		
Lamp drive cabinet for 600 m ³ /h reactor	1350 x 610 x 2000	370		Lamp drive cabinet for 300 m ³ /h reactor
Lamp drive cabinet for 1000 m ³ /h reactor	1350 x 610 x 2000	400		Lamp drive cabinet for 500 m ³ /h reactor
Lamp drive cabinet for 1500 m ³ /h reactor	1350 x 610 x 2000	400		Lamp drive cabinet for 750 m ³ /h reactor
Lamp drive cabinet slave for 1500 m ³ /h reactor	1040 x 610 x 2000	360		Lamp drive cabinet slave for 750 m ³ /h reactor
CIP unit	740 x 870 x 1800	155	Max 250	CIP unit
Control cabinet	650 x 310 x 1100	50		Control cabinet
Basket filter, 250 m ³ /h	460 x 498 x 1146	360	61	Basket filter, 250 m ³ /h
Basket filter, 300 m ³ /h	490 x 503 x 1201	400	82	Basket filter, 300 m ³ /h
Basket filter, 500 m ³ /h	610 x 637 x 1296	620	146	Basket filter, 500 m ³ /h
Basket filter, 750 m ³ /h	730 x 715 x 1579	860	241	Basket filter, 750 m ³ /h
Basket filter, 1000 m ³ /h	765 x 786 x 1753	1020	370	Basket filter, 1000 m ³ /h
Basket filter, 1500 m ³ /h	775 x 794 x 2248	1150	480	Basket filter, 1500 m ³ /h
Basket filter, 2000 m ³ /h	1000 x 1008 x 2367	1780	890	Basket filter, 2000 m ³ /h
Basket filter, 3000 m ³ /h	1300 x 1288 x 2476	2595	1700	Basket filter, 3000 m ³ /h

Taulukko 24. Alfa Laval PureBallast 3 tunnusluvut.

Alfa Laval PureBallast 3				
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h	
300	3,7	0,007	0,010	
600	2,7	0,005	0,008	
1000	2,0	0,003	0,006	
1500	1,8	0,003	0,005	

Hyde Marinen GUARDIAN on kasettimallinen järjestelmä, jossa kaikki tarvittava on pakattu yhteen moduuliin. Tämän moduulin voi rakennusvaiheessa nostaa

paikalleen ja kytkeä kiinni. Kasettien koot ja soveltuvat hyvin esimerkiksi jälkiasennuksiin. Yllä olevassa taulukossa ”Skid” viittaa kasetin kokoon ja alla olevat muut osat ovat erittely komponenteista ja niiden yksittäisistä mitoista. Ainoastaan päävirtataulu asennetaan kasetin ulkopuolelle. (Hyde Marine 2023.)

Taulukko 25. Hyde Marine GUARDIAN kokotaulukko (Hyde Marine 2023).

Hyde Marine GUARDIAN

HG150U

Component	Size (L*W*H) (mm)	Weight (kg)
Skid	1617*1028*2164	960
Filter	413*456*1100	192
UV chamber	1186*949*587	165
Control panel	600*210*760	35
Power panel	1206*406*1803	375

HG500U

Component	Size (L*W*H) (mm)	Weight (kg)
Skid	1945*1299*2530	TBD
Filter	610*612*1390	527
UV chamber	1207*1112*630	167
Control panel	600*210*760	35
Power panel	1206*800*1803	1190

HG250U

Component	Size (L*W*H) (mm)	Weight (kg)
Skid	1617*1063-2241	1275
Filter	464*493*1250	288
UV chamber	1075*949*587	165
Control panel	600*210*760	35
Power panel	1800*406*1803	865

HG1000U

Component	Size (L*W*H) (mm)	Weight (kg)
Skid	2780*1500*2623	TBD
Filter	765*767*1820	900
UV chamber	956*1112*630	172
Control panel	600*210*760	35
Power panel	1800*700*1800	1790

Taulukko 26. Hyde Marine GUARDIAN tunnusluvut.

Hyde Marine Guardian			
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h
HG150U	11,5	0,024	0,036
HG250U	10,5	0,014	0,025
HG500U	6,8	0,011	0,019
HG1000U	4,6	0,007	0,015

4.3.3 Käyttökustannukset

Painolastiveden käsittelyjärjestelmässä käytetyllä tekniikalla on suuri osuus loppukustannuksiin. Uudemmat tekniikat, kuten UV-säteilytys ja sähköklooraus, ovat yleensä kalliimpia laitteistoja hankittaessa, mutta voivat säästää rahaa pitkällä aikavälillä alhaisempien ylläpitokustannusten ja paremman tehokkuuden ansiosta. Järjestelmien käyttökustannuksista on saatavilla erittäin vähän dataa.

Varustamot tai laitevalmistajat eivät julkaise yksittäisten järjestelmien osalta ylläpitokustannuksia. Laitteistojen energiankulutuksesta, huoltokohteiden määrästä, tai elinkaarikustannuksista voitiin tehdä vain oletuksia laitteiston koon perusteella.

Laitteiston kustannuksia voi arvioida teoreettisesti myös laskemalla. Aiheesta löytyi artikkeli, jossa on vertailtu suoria käyttökustannuksia laskemalla UV-säteilyyn ja elektroklooraukseen perustuvien IMO:n D2-sääntöjen täyttävien laitteistoiden yhden pumppauskerran hinta. Tutkimuksessa esimerkkinä olevan aluksen painolastiveden kokonaismäärä on 17 741 m³. (Vorkapić 2018.)

Taulukkoon 27 on tutkimuksesta kerätty tärkeimmät tiedot. Käyttäen kapasiteettia, energiankulutusta ja polttoöljyn käyttöä on voitu laskea yhden ulos- tai sisäänpumppauksen hinta. Näiden lisäksi tutkimuksen arvoja käyttäen on myös laskettu hinta yhtä puhdistettua kuutiometriä vettä kohden. Tutkimuksessa käytetty polttoaine on ISO-standardin mukainen RMG 380 raskaspolttoöljy, jonka hinta oli tuolloin 307,5 US\$/mT. Vertailun vuoksi työn tekemisen aikana HSFO-380 keskihinta oli noin 510 US\$/mT. (PBT International 2023.)

Taulukko 27. Käsittelyjärjestelmien käyttökustannuksia.

UV system			
Ballast water capacity (m ³)	Average unit consumption (kWh/m ³)	Total energy consumption (kWh)	Fuel oil consumption for one operation (mT)
17741	0,11433463	2028,41	0,391
Total cost for one operation (US\$)			
122,3			
Cost per 1 cubic meter of ballast water (US\$/m ³)			
0,0069			

EC system			
Ballast water capacity (m ³)	Average unit consumption (kWh/m ³)	Total energy consumption (kWh)	Fuel oil consumption for one operation (mT)
17741	0,0494873	877,95	0,169
Total cost for one operation (US\$)			
51,9			
Cost per 1 cubic meter of ballast water (US\$/m ³)			
0,0029			

Laitteiston hintaan vaikuttaa muutkin kustannukset, kuten huollot ja varaosat. Varaosille ei ole olemassa suoraa hintaluetteloa, mutta isompien laitteistojen oletettiin vaativan kalliimpia varaosia. UV-säteilyyn perustuvien laitteistojen kohdalla huollettavia kohteita on vähän. Niissä kuluvia osia ovat pääosin itse UV-valoputket sekä suodattimet. EC-laitteistoissa taas on ainoastaan suodattimia vedelle, eikä varsinaisia kuluvia osia. Molemmat laitteistot kuitenkin vaativat säännöllistä puhdistusta toimiakseen oikealla tavalla.

5 Tulokset ja niiden arviointi

Työn tuloksena tuotettiin toimeksiantajalle materiaalia eri järjestelmämuotojen putkimetreistä, venttiilimääristä ja painoista. Näiden lisäksi saatiin koottua kattavasti tietoa käsittelyjärjestelmien energiankulutuksista ja laitteistojen fyysisistä mitoista suhteessa puhdistuskapasiteettiin. Tietoa voidaan tulevaisuudessa käyttää alussuunnittelun tukena ja perusteluina suunnitteluvalinoille. Vaikka kaikista järjestelmistä ja laitteistoista ei ollut dataa käytettävissä voidaan tuloksia ja päätelmiä soveltaa insinööriyön ulkopuolisiin järjestelmiin. Tähän osioon on koostettu tiedot edellisten kappaleiden taulukoista ja esitetty niitä koskevaa pohdintaa ja päättelyä.

5.1 Painolastijärjestelmät

Painolastijärjestelmien osalta tuloksia saatiin neljän eri järjestelmän vertailulla. Kaikki järjestelmäkaaviot on tehty yhden referenssialuksen painolastikaavion pohjalta.

Taulukossa 28 on esitetty kaikkien järjestelmävaihtoehtojen putkimetrit. Taulukoita katsomalla voitiin todeta rengaslinjan vaativan suurimman määrän putkea. Kaikki yksittäislinjoilla varustetut järjestelmät ovat putkimetreiltään verrattain lähellä toisiaan. Näistä vertailukelpoisimman tuloksen antaa kaksi yksittäislinjajärjestelmää, joissa SRtP-vaatimukset on huomioituna. Vain muutaman metrin ero laskelmissa voi johtua jo pelkästään mittausvirheestä. Suurin ero näiden järjestelmien välillä on kuitenkin DN200-putkessa, joka toimii yhteenä runkolinjan ja tankkien välillä.

Taulukko 28. Järjestelmien putkimetrit.

Rengaslinjan putket					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (m)	10	26	129	350	
Yhteensä (m)	515				

Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (m)	10	0	112	165	
Yhteensä (m)	287				

Yksittäislinjan putket					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (m)	10	26	131	172	
Yhteensä (m)	339				

Yksittäislinjan putket, pumput konehuoneessa, SRtP					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (m)	10	10	153	170	
Yhteensä (m)	343				

Venttiilimääriä tutkimalla voitiin todeta sama asia kuin aikaisemminkin.

Rengaslinjalla toteutetussa järjestelmässä venttiilejä on eniten. SRtP-vaatimukset täyttävät järjestelmät vastaavat osien suhteen kappalemääräisesti toisiaan. Venttiilien määrää arvioitaessa lopputulos on tarkempi kuin putkimetrien kohdalla, sillä venttiilien määrä perustuu järjestelmän suunnitteluvaatimuksiin, jotka tulevat eri laitosten säännöistä.

Taulukko 29. Järjestelmien venttiilimäärät.

Rengaslinjan venttiilit					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (kpl)	1	3	19	33	
Yhteensä (kpl)	56				

Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (kpl)	1	0	15	19	
Yhteensä (kpl)	35				

Yksittäislinjan venttiilit					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (kpl)	1	3	19	26	
Yhteensä (kpl)	49				

Yksittäislinjan venttiilit, pumput konehuoneessa, SRtP					
Koko	DN100	DN150	DN200	DN250	
Määrä (kpl)	1	3	21	29	
Yhteensä (kpl)	54				

Järjestelmien painoja vertailtaessa voitiin todeta, että rengaslinja on painavin vaihtoehto. Tässäkin kohtaa SRtP-vaatimukset täyttävät järjestelmät ovat hyvin lähellä toisiaan vain noin 500 kg erolla. Tämä ero voi johtua laskuvirheestä painoja laskettaessa. Painot perustuvat aluksen painolastijärjestelmäkaavion yhteydessä olevaan materiaalistaan. Kaikkia venttiilien painoja siinä ei kuitenkaan ollut eritelty, joten niiden kohdalla arvot katsottiin valmistajan internet-sivuilta, lähimmän vastaavan venttiilin painotaulukosta.

Taulukko 30. Järjestelmien painot.

Rengaslinjan paino	
Venttiilit (kg)	1329
Putket (kg)	38356
Yhteensä (kg)	39685

Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa	
Venttiilit (kg)	823
Putket (kg)	20716
yhteensä (kg)	21539

Yksittäislinjan paino	
Venttiilit (kg)	1140
Putket (kg)	23575
yhteensä (kg)	24715

Yksittäislinjan paino, pumput konehuoneessa, SRtP	
Venttiilit (kg)	1261
Putket (kg)	24016
yhteensä (kg)	25277

5.2 Käsittelyjärjestelmät

Käsittelyjärjestelmien osalta vertailtiin eri laitevalmistajien laitteistojen ominaisuuksia. Vertailtavat suureet olivat teho, paino, pinta-ala ja tilavuus suhteessa laitteiston kapasiteettiin. Käyttämällä näitä suureita ja vertaamalla niitä kapasiteettiin saatiin jokaiselle laitteistolle helposti vertailtavissa oleva luku.

Käsittelylaitteistojen valmistajat olivat ilmoittaneet laitteistoista nominaalikytkentätehon, ja osa valmistajista ilmoitti myös maksimitehon. W/m^3 on laskettu käyttämällä nominaalitehoa ja ilmoitettua maksimikapasiteettia. Tuloksia vertaamalla huomattiin, että Alfa Lavalin PureBallast 3 laitteisto on ehdottomasti tehokkain laitteisto. Sen tehonkulutus on noin puolet vastaavan kokoiseen toisen valmistajan laitteistoon verrattuna. Esimerkiksi PureBallast 3 1000 m^3/h laitteisto kuluttaa 52 Wattia tehoa jokaista käsiteltäviä kuutiometriä kohden, kun taas vastaavan kokoinen Aquarius UV kuluttaa 100 wattia yhden kuutiometrin käsittelyyn. Syynä tähän voi olla Alfa Lavalin ilmoittama tieto, jonka mukaan järjestelmän kerrotaan käyvän normaalisti vain puolella teholla. Täten valmistaja on voinut ilmoittaa matalammat nominaalitehot eikä tulokset ole täysin vertailukelpoisia. Muiden UV-käsittelyyn perustuvien laitteistojen osalta lasketut W/m^3 ovat lähellä toisiaan.

EC-menetelmään perustuvista laitteistoista pystytty tekemään vertailua, koska vain Wärtsilän Aquarius EC -järjestelmästä löytyi riittävät tekniset tiedot.

Huomioitava asia sen tehotaulukkoa tutkiessa on, että laitteistojen välillä ei ole

suurta eroa W/m^3 osalta. Tutkimusdatan vähyyden takia emme voineet päätellä, päteekö sama tulos myös muihin EC-laitteistoihin.

Taulukko 31. Käsittelyjärjestelmien teho suhteessa kapasiteettiin.

Wärtsilä Aquarius UV	
System	W/m^3
AQ-125-UV	152
AQ-300-UV	159
AQ-500-UV	125
AQ-750-UV	123
AQ-1000-UV	100

Alfa Laval PureBallast 3	
Capacity (m^3/h)	W/m^3
170	65
300	57
600	55
1000	52
1500	54

Hyde Marine Guardian	
System	W/m^3
HG150U	200
HG250U	148
HG500U	144
HG1000U	110

Wärtsilä Aquarius EC	
System	W/m^3
AQ-550-EC	69
AQ-1200-EC	63
AQ-1650-EC	63
AQ-2500-EC	64
AQ-3300-EC	61
AQ4000-EC	61

Langh Tech LanghBW	
System	W/m^3
LanghBW300	117
LanghBW600	108
LanghBW900	106
LanghBW1200	117
LanghBW1500	117
LanghBW1800	140

Laitteistojen tehoa tutkittiin myös niiden koon suhteen. Tätä varten laskettiin jokaiselle laitteistolle, josta fyysiset mittatiedot olivat saatavilla, suureet $kg / m^3/h$, $m^2 / m^3/h$ ja $m^3 / m^3/h$. Näiden avulla voitiin paremmin hahmottaa painon, pinta-alan ja tilavuuden suhde kapasiteettiin. Langh Techin järjestelmistä ei ollut mittatietoja saatavilla, joten ne jouduttiin jättämään vertailun ulkopuolelle.

Laitteistojen kokonaispainot, pinta-alat ja tilavuudet saatiin suoraan valmistajan tiedoista, mikäli ne oli ilmoitettu tai vaihtoehtoisesti laskemalla eri komponenttien mittatiedot yhteen. EC-järjestelmästä ei myöskään ollut saatavilla tilavuustietoja, mutta koska se oli vertailun ainoa elektroklooraukseen perustuva laitteisto ilman verrokkia, ei tämä ole tulosten kannalta merkittävää. UV-käsittelyyn perustuvien järjestelmien osalta saatavilla oleva tieto vaihteli eri järjestelmien välillä. Tietojen perusteella voitiin kuitenkin päätellä laitteiston koon kasvaessa painon, pinta-alan tai tilavuuden pienentyvän suhteessa kapasiteettiin.

Taulukko 32. Käsittelyjärjestelmien fyysiset mitat suhteessa kapasiteettiin.

Wärtsilä Aquarius EC		
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h
AQ-550-EC	8,5	0,021
AQ-1200-EC	5,4	0,012
AQ-1650-EC	5,2	0,010
AQ-2500-EC	4,0	0,007
AQ-3300-EC	3,2	0,005
AQ4000-EC	3,0	0,004

Wärtsilä Aquarius UV			
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h
AQ-125-UV	6,9	0,014	0,017
AQ-300-UV	4,7	0,008	0,012
AQ-500-UV	3,5	0,005	0,008
AQ-750-UV	3,8	0,005	0,011
AQ-1000-UV	3,6	0,004	0,009

Alfa Laval PureBallast 3			
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h
300	3,7	0,007	0,010
600	2,7	0,005	0,008
1000	2,0	0,003	0,006
1500	1,8	0,003	0,005

Hyde Marine Guardian			
System	kg / m ³ /h	m ² / m ³ /h	m ³ / m ³ /h
HG150U	11,5	0,024	0,036
HG250U	10,5	0,014	0,025
HG500U	6,8	0,011	0,019
HG1000U	4,6	0,007	0,015

5.3 Tulosten luotettavuus ja käyttökelpoisuus

Tehdyn vertailun etuna on se, että käytetty referenssialus on oikeasti suunniteltu ja se täyttää luokituslaitosten säännöt. Tätä avuksi käyttäen saatiin tulkinat, joiden perusteella vaihtoehtoiset järjestelmät voitiin suunnitella. Mikäli työ olisi tehty täysin teoreettisen järjestelmän pohjalta, olisi sääntöjen tulkitseminen tuottanut vaikeuksia ja siten vertailun tulokset olisivat voineet olla erilaisia.

Tulosten luotettavuutta arvioitaessa täytyy huomioida vertailukohteiden määrä. Työssä tutkittiin vain neljää eri painolastijärjestelmää ja viittä painolastiveden puhdistusjärjestelmää. Painolastijärjestelmien osalta tutkimus ei näin tehtynä tarjoa vastauksia siihen, miten järjestelmän suunnittelu muuttuu aluksen koon muuttuessa. Vastauksia ei myöskään saatu siihen, miten järjestelmä muuttuu alustyyppin mukaan. Työtä voidaan kuitenkin soveltaa muihin alustyyppeihin tekemällä niistä vastaavat vertailut.

Työn tuloksia voidaan käyttää painolastijärjestelmän perussuunnittelun tukena. Näin suunnittelija pystyy tekemään järjestelmän suunnitteluun ja komponenttien valintaan liittyviä ratkaisuja.

6 Yhteenveto ja päätelmät

Insinööriyön ensisijaisena tarkoituksena ja tavoitteena oli toimia kirjallisuuskatsauksena nykyaikaisiin painolastivesijärjestelmiin ja niitä koskeviin sääntövaatimuksiin. Ennen työn aloittamista koettiin tämän kaltaisen läpileikkauksen olevan tarpeellinen lisä yrityksen suunnitteluohjeiden kokoelmaan. Työssä käsiteltiin SRtP- ja sääntövaatimukset, järjestelmän suunnittelu yleisellä tasolla sekä esiteltiin esimerkkejä eri valmistajien painolastiveden käsittelylaitteistoista.

Työn keskeisenä aiheena oli erilaisten painolastijärjestelmien vertailu. Tehdyn vertailun pohjalta voitiin tehdä päätelmiä järjestelmien hyvistä ja huonoista puolista. Tällä hetkellä suosituin järjestelmämuoto sen suuremmista kustannuksista huolimatta on rengaslinja. Se tarjoaa etuja, joita yksittäislinja ei pysty tarjoamaan. Näistä merkittävin on usean tankin samanaikainen käyttö, esimerkiksi toisen tankkiparin täyttäminen ja toisen tyhjennys. Yksittäislinjalla on kuitenkin vielä paikkansa nykyaikaisissakin laivoissa. Se on huomattavasti rengaslinjaa kevyempi ja myös edullisempi toteuttaa. Mikäli painolastiveden vaihtamiseen on riittävästi aikaa ja energiaa käytettävänä, toimii yksittäislinja järjestelmämuotona hyvin.

Edellisessä kahdessa kappaleessa mainittuihin tavoitteisiin on työn osalta päästy. Toimeksiantajalla oli toiveena saada kattava vertailu järjestelmämuodoista ja näiden ominaisuuksista ja tämä työ toimii siinä erinomaisesti.

Työn tarkoituksena ei ollut perehtyä jokaiseen kohtaan äärimmäisellä tarkkuudella, vaan tuoda esille asiakokonaisuus. Tätä kokonaisuutta apuna käyttäen voidaan yksityiskohtiin perehtyä myöhemmin muiden artikkelien pohjalta tai työtä jatkojalostamalla. Tätä tietoa voidaan myös päivittää tulevaisuudessa, mikäli jotkin oleelliset kohdat muuttuvat. Näitä ovat todennäköisimmin sääntövaatimukset ja laitteistojen tai muiden materiaalien merkittävät kustannusmuutokset. On myös todennäköistä, että jatkossa

markkinoille tulee uusia tulokkaita niin valmistajien kuin itse käsittelymenetelmienkin osalta.

Työn tekemisen jälkeen nousi esiin asioita, joita olisi voinut tehdä toisin. Järjestelmämuotoja verrattaessa olisi voitu käsitellä useampia erilaisia laivoja ja tehdä niiden pohjalta samat järjestelmäkaaviot ja vertailut. Näin olisi saatu laajemmin käytettävää dataa järjestelmämuodoista ja aluksen koon, operoinnin tai tyyppin vaikutuksesta vertailtaviin ominaisuuksiin. Puhdistusjärjestelmien osalta olisi voitu olla suoraan yhteydessä laitetoimittajiin, jotta olisi saatu tarkempia tietoja laitteistoista. Tässä toki saattaa olla ongelmana se, että osa tiedoista ei välttämättä ole tarkoitettu yleiseen jakeluun. Laitetoimittajilta olisi kuitenkin varmasti saanut puuttuvia mittatietoja niistä laitteistoista, jotka eivät olleet mukana teho- tai kokovertailussa.

Työtä jatkojalostamalla voitaisiin tehdä edellisessä kappaleessa mainittuja lisäyksiä järjestelmien vertailujen laajentamiseksi. Laitteistojen operoinnista voitaisiin myös olla yhteydessä varustamoihin tai alusten miehistöihin, jotta saataisiin käyttäjäkokemusta aiheesta. Tätä voitaisiin suoraan soveltaa työn aiheeseen ja tehdä siten laajempia vertailuja tai tutkimuksia.

Voimme olettaa kuitenkin itse järjestelmän suunnittelun pysyvät periaatteiltaan samana vielä pitkään. Painolastijärjestelmä ei itsessään tule poistumaan laivoista eikä sitä todennäköisesti myöskään korvata vaihtoehtoisella järjestelmällä. Merkittävimmät muutokset tulevat liittymään järjestelmän aluskohtaiseen optimointiin. Uudet materiaalit, kuten erilaiset komposiitit tarjoavat etuja teräspankkiin verrattuna esimerkiksi siirtonopeuksissa ja putkiston kestävydessä, mutta ovat vielä toistaiseksi paljon terästä kalliimpi vaihtoehto. Uusia materiaaleja tai tapoja hyödyntäen kyetään järjestelmästä tekemään tehokkaampi ja turvallisempi. Nämä laskevat järjestelmän operointi- ja huoltokustannuksia niin rahallisesti kuin ajallisestikin.

Muutokset säännöissä tulevat todennäköisesti jatkossa koskemaan turvallisuus- ja ympäristömääräyksiä. Näiden muuttumista tulevaisuudessa on kuitenkin äärimmäisen vaikea arvioida, koska niihin vaikuttavia tekijöitä on useita. SRtP-

vaatimukset järjestelmäsuunnittelussa tulevat suurella todennäköisyydellä tarkentumaan ja mahdollisesti vaatimaan järjestelmän täyttä toimintaa myös vauriotilanteessa. Tämä tuo mukanaan haasteita, mutta tarkalla suunnittelulla järjestelmät saadaan jatkossakin täyttämään kiristyvät määräykset.

Lähteet

Alfa Laval. 2023. PureBallast 3 Std & Ex.

<https://www.alfalaval.com/globalassets/documents/microsites/pureballast/pdf/alfa-laval-pureballast-3-1.pdf>

BV. 2023. NR467 Rules for the classification of steel ships – edition, Jul 2022

BV. 2023. NR 598 Implementation of Safe Return to Port and Orderly Evacuation – edition, Jan 2016

CCS. 2022. Rules for classification of sea-going steel ships – edition 2022.

DNV. 2023. DNV-CG-004 Safe return to port – edition Jul 2021.

DNV. 2023. DNV-RU-SHIP Pt.4 Ch.6 Piping Systems – edition Jul 2022.

DNV. 2023. DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Propulsion, power generation and auxiliary systems – edition, Jul 2022.

DNV. 2023. DNV-RU-SHIP Pt.6 Ch.2 Propulsion, power generation and auxiliary systems – edition, Jul 2022.

Engineer Excel. 2023. Darcy-Weisbach Equation for Calculating Pressure Losses. Viitattu 4.1.2023. <https://engineerexcel.com/darcy-weisbach-equation-for-calculating-pressure-losses/>

Evoqua. 2023. SeaCURE Ballast Water Management System. Viitattu 14.4.2023. <https://www.evoqua.com/en/evoqua/products--services/electrochemical-products/electrochlorination-systems/seacure-ballast-water-management-system/>

Hyde Marine. 2023. Hyde GUARDIAN-US Product Data Sheet 2

IMO. 2023. Ballast Water Management Viitattu 28.4.2023
<https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/ballastwatermanagement.aspx>

IMO. 2022. Introduction to IMO. Viitattu 17.11.2022.
<https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx>

Langh Tech. 2023. Ballast Water Management System brochure.

Marine Insight. 2021. How Ballast Water Treatment System Works? Viitattu 21.2.2023 <https://www.marineinsight.com/tech/how-ballast-water-treatment-system-works/>

Optimarin. 2023. Ballast Water Treatment System. Viitattu 12.4.2023. <https://optimarin.com/system/>

PBT International. 2023. Price information. Viitattu 28.4.2023. <https://pbt-international.com/price-information/>

Ship Business. 2023. Most common ballast water systems used for Ballast Water Management. Viitattu 12.4.2023. <http://shipsbusiness.com/ballast-water-treatment-system.html>

SOLAS. 2023. Chapter II-1 – Construction – Structure, subdivision and stability, machinery and electrical installations Part B-1 – Stability, Regulation 8

SOLAS. 2023. Chapter II-1 – Construction – Structure, subdivision and stability, machinery and electrical installations Part B-1 – Stability, Regulation 8-1

SOLAS. 2023. Chapter II-2 – Construction – Fire protection, fire detection and fire extinction. Part G – Special requirements, Regulation 21

SOLAS. 2023. MSC.1/Circ.1369 Interim Explanatory Notes for the Assessment of Passenger Ship Systems' Capabilities After a Fire or Flooding Casualty 2010.

Spyros S. Michalatos. 2017. Ballast Water Treatment Systems at a glance. Viitattu 13.3.2023. <https://www.linkedin.com/pulse/ballast-water-treatment-systems-glance-capt-spyros-michalatos/>

Steering Oar. 2023. Ballast System 2017. Viitattu 2.2.2023. <https://steeringoar.wordpress.com/2017/02/28/ballast-system/>

USCG. 2021. Ballast water frequently asked questions. Rev. Nov 2021.

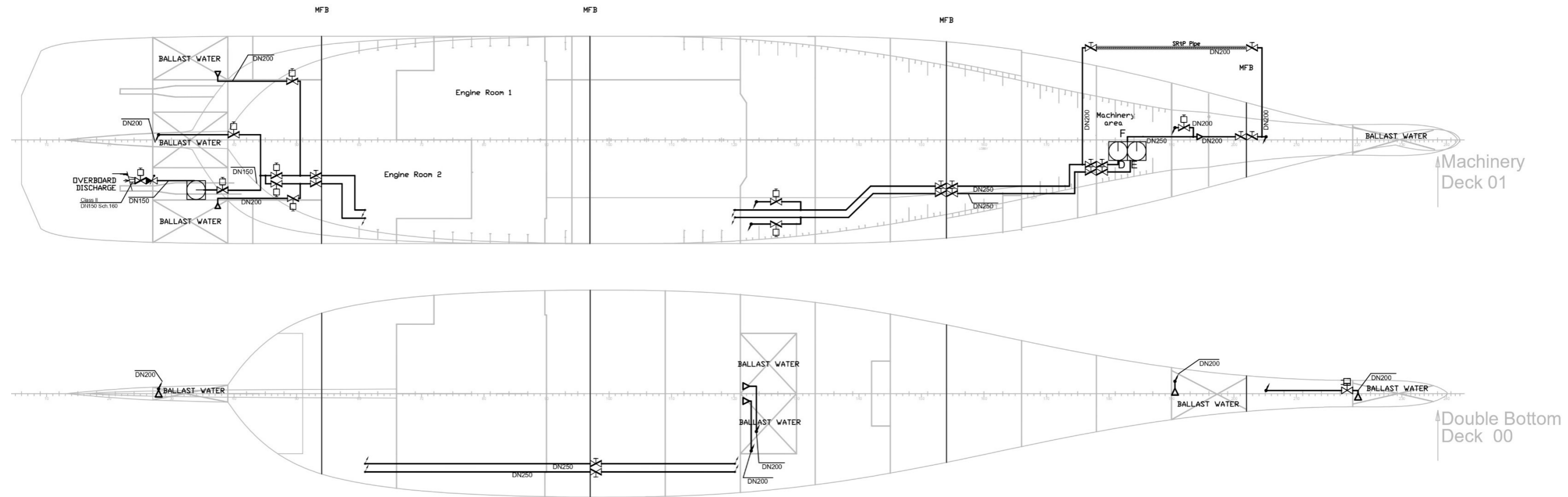
Vorkapić, A., Radonja, R., & Zec, D. 2018. Cost efficiency of ballast water treatment systems based on ultraviolet irradiation and electrochlorination. Viitattu 2.2.2023. <https://doi.org/10.7307/PTT.V30I3.2564>

Wärtsilä. 2023. Aquarius Ballast Water Management Systems. Viitattu 14.4.2023. <https://www.wartsila.com/waw/ballast-water>

Wärtsilä. 2023. Aquarius EC Ballast water treatment system. Viitattu 14.4.2023.
<https://www.wartsila.com/waw/ballast-water/electro-chlorination>

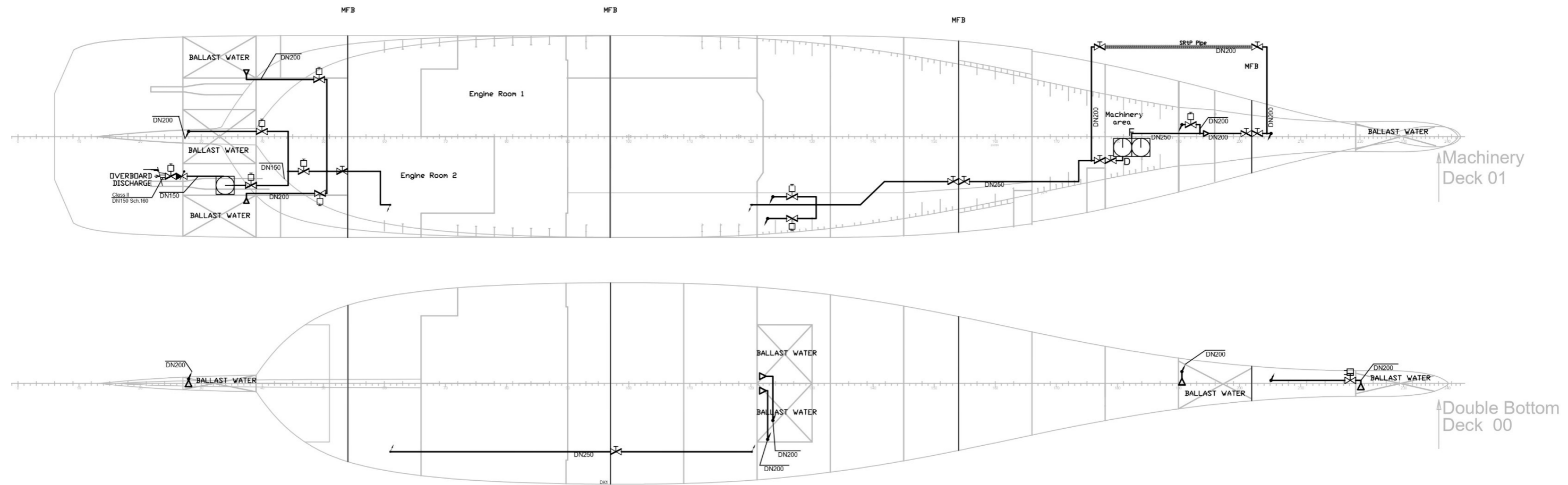
Wärtsilä. 2023. Aquarius UV Ballast water management system. Viitattu
14.4.2023. <https://www.wartsila.com/waw/ballast-water/uv-treatment/aquarius>

Liite 1. Rengaslinja



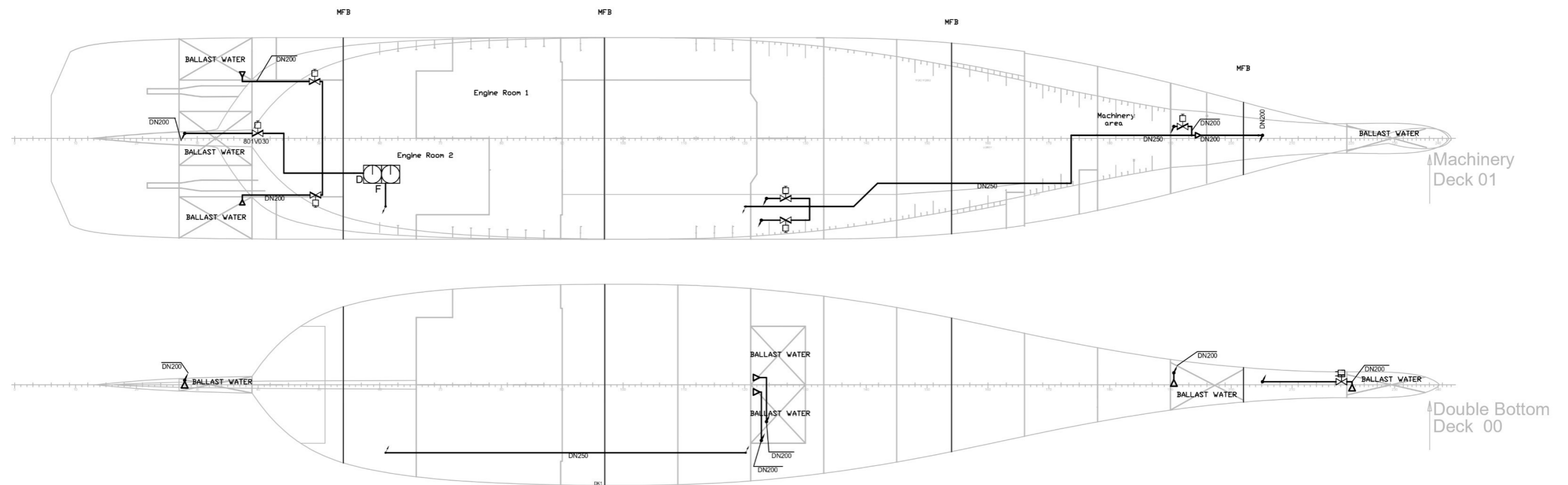
Kuva 24. Rengaslinja.

Liite 2. Yksittäislinja.



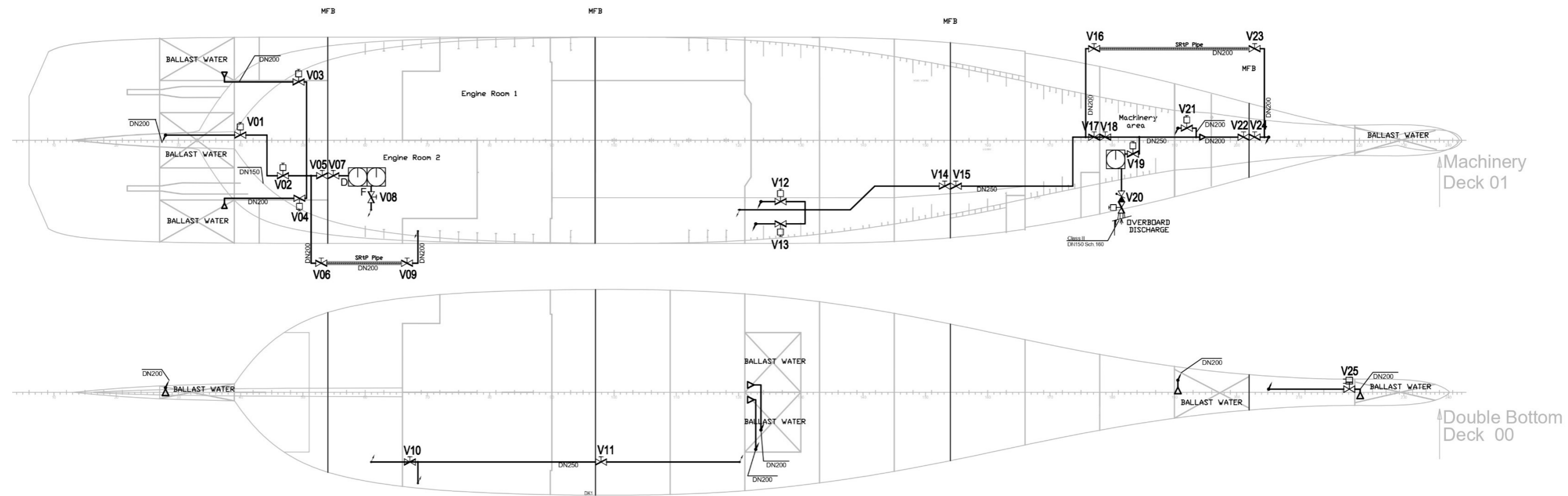
Kuva 25. Yksittäislinja.

Liite 3. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa



Kuva 26. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa.

Liite 4. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna



Kuva 27. Yksittäislinja, pumput konehuoneessa, SRtP huomioituna.