



**TURUN  
YLIOPISTO**

# **Rannikkorahtilaivojen sääreitys Itämerellä**

Tapaustudkimus Prima Queen -aluksella

Lauri Aakko

Maantiede

Ohjaaja:

Harri Tolvanen

24.03.2023

Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -järjestelmällä.

Pro gradu -tutkielma

**Pääaine:** Maantiede

**Tekijä:** Lauri Aakko

**Otsikko:** Rannikkorahtilaivojen sääreititys Itämerellä. Tapaustutkimus Prima Queen -aluksella

**Ohjaaja:** Harri Tolvanen

**Sivumäärä:** 47 sivua

**Päivämäärä:** 24.3.2023

---

Tämän tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää rannikkorahtialusten sääreititysmahdollisuuksia Itämerellä. Tutkimuksen tavoitteena oli tunnistaa keskeisiä haasteita ja mahdollisuuksia, joita rannikkorahtilait kokevat sääolosuhteiden muuttuessa, sekä analysoida sääreitien optimointiin käytettävissä olevia menetelmiä. Tavoitteena on myös tarkastella reittivaihtoehtoja Bornholmin ja Pietarin välillä, ja niiden kannattavuutta eri olosuhteissa. Tutkimus toteutettiin tilastollista mallinnusta kattavaa olosuhteaineistoa, sekä Prima Queen -aluksella kerättyä liiketila tietoa hyödyntäen.

Tutkimustulosten perusteella voidaan todeta, että pienikokoisten rahtialusten reittien sääoptimointi on haastavaa Suomenlahden muuttuvien sääolosuhteiden takia. Reittisuunnitteluun vaikuttaa paitsi sää, myös aluksen koko ja kuljetettavan lastin määrä. Kattavan mallin luominen vaatii käytettävään menetelmään soveltuvan riittävän lähtöaineiston. Tämän tutkimuksen menetelmillä voidaan kuitenkin luoda hyvä aluskohtainen arvio aluksen käyttäytymisestä erilaisissa olosuhteissa reittisuunnittelun tueksi, ja vastaavan aineiston kerääminen aluksella on mahdollista normaalin merenkulun ohessa. Tuloksista havaitaan, että tietyissä olosuhteissa suojaisten reittien valitseminen voi vähentää matka-aikaa sekä polttoaineenkulutusta parhaimmillaan jopa 4.7 %. Tutkimuksen tuloksia voidaan hyödyntää päätöksenteon tukena reittisuunnitelmia tehtäessä tutkimuskohteen kaltaisissa aluksissa. Lisäksi käytettyjä menetelmiä voidaan tehokkaasti soveltaa muihin aluksiin.

---

**Avainsanat:** Itämeri, Merenkulku, Reittisuunnittelu, Sääreititys

Master's thesis

**Subject:** Geography

**Author:** Lauri Aakko

**Title:** Weather routing of coastal cargo vessels in Baltic Sea. Case study on Prima Queen -vessel.

**Supervisor:** Harri Tolvanen

**Number of pages:** 47 pages

**Date:** 24.3.2023

---

The purpose of this study was to investigate the possibilities for weather routing optimization of coastal cargo vessels in the Baltic Sea. The study aimed to identify key challenges and opportunities faced by coastal cargo vessels in changing weather conditions, and to analyze the methods available for weather routing optimization. In addition, this study aims to evaluate the possible route alternatives on the passage between Bornholm and St. Petersburg and the efficiency of different options depending on the weather conditions. The study employed statistical modeling using data collected onboard MV Prima Queen and big weather data.

The results of the study indicate that weather routing optimization of coastal cargo vessels is challenging due to the changing weather conditions in the Baltic Sea. Route planning is influenced not only by the weather, but also by the size of the vessel and the quantity of the cargo being transported. Creating a comprehensive model requires data from various weather and loading conditions. Using the methodology of this study, it is possible to create a sufficient model for estimating vessel speed in different weather conditions based on data that can be collected onboard in routine traffic. The results show a possible reduction in travel time and fuel consumption of up to 4.7 % when selecting a more sheltered route instead of the shortest one in specific conditions. The findings of this study can be used to assist in decision making onboard in similar vessels as the study subject. In addition, the methodology can be applied efficiently to other vessels.

---

**Key words:** Baltic Sea, Route planning, Shipping, Weather routing

# Sisällysluettelo

<b>Käsitteet</b>	<b>5</b>
<b>1. Johdanto</b>	<b>7</b>
<b>2. Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys</b>	<b>9</b>
<b>2.1 Merenkulun reittisuunnittelu</b>	<b>9</b>
2.1.1 Turvallinen merenkulku ja reittisuunnittelu	9
2.1.2 Säätö- ja sääreititys	11
<b>2.2 Sään vaikutukset merenkulkuun</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Itämeri merenkulun näkökulmasta</b>	<b>15</b>
2.3.1 Satamat ja alusliikenne	15
2.3.2 Olosuhteet	19
<b>3. Aineistot ja menetelmät</b>	<b>22</b>
<b>3.1 Tutkimusalue</b>	<b>22</b>
<b>3.2 Aineistot</b>	<b>23</b>
3.2.1 Merenkulun julkaisut	23
3.2.2 Aineiston keräys aluksella	23
3.2.3 Copernicus-aineistot	26
<b>3.3 Analyysimenetelmät</b>	<b>27</b>
3.3.1 Reittisuunnittelu	27
3.3.2 Menetelmät	28
<b>4. Tulokset</b>	<b>32</b>
<b>4.1 Reittivaihtoehdot</b>	<b>32</b>
<b>4.2 Sään vaikutukset alukseen</b>	<b>33</b>
<b>4.3 Suotuisimmat reitit eri olosuhteissa</b>	<b>38</b>
<b>5. Keskustelu</b>	<b>43</b>
<b>6. Johtopäätökset</b>	<b>47</b>
<b>Lähteet</b>	<b>48</b>
<b>Kirjallisuus</b>	<b>48</b>
<b>Asiakirja- ja aineistolähteet</b>	<b>51</b>

## Käsitteet

- GT** Bruttovetoisuus on aluksen tilavuutta kuvaava suure, jota käytetään yleisesti merenkulun lainsäädännössä. Suure on logaritminen ja kuvaa aluksen suljettujen tilojen tilavuutta. Se lasketaan kaavalla  $GT = K1V$  jossa  $V$  = aluksen kaikkien suljettujen tilojen suuruus, ja  $K1 = 0,2 + 0,02 \log_{10} V$  (Asetus kansainvälisistä säännöistä yhteentörmäämisen ehkäisemiseksi merellä vuonna 1972 tehdyn yleissopimuksen voimaansaattamisesta 1982).
- ECDIS** Electronical Chart Display Information System on merenkulussa käytetty IMO:n hyväksymä navigointijärjestelmä. Mikäli alus on varustettu kahdennetulla hyväksytyllä ECDIS järjestelmällä voidaan paperikarttojen käytöstä aluksella luopua, jos ECDIS käyttää ajantasaisia virallisia sähköisiä karttoja (Alusten navigointilaitteet ja -järjestelmät 2022).
- IMO:** International Maritime Organization, Yhdistyneiden Kansakuntien toimielin, joka toimii kansainvälisenä merenkulun kattojärjestönä. IMO koostuu 175 valtiosta ja on julkaissut 50 merenkulkua ohjaavaa teosta (International Maritime Organization 2022).
- Lippuvaltio** Lippuvaltio tarkoittaa valtiota, johon alus on rekisteröity, riippumatta aluksen miehistön tai sen omistavan yrityksen kansallisuudesta. Alusten rekisteröiminen ulkomaille on yleistä kustannusvähennyksiä tavoiteltaessa. (Helsinki Commission 2018).
- LPP** Aluksen luotiviivojen välinen pituus on merenkulun asetuksissa käytetty mitta, joka mitataan aluksen peräsinakselin keskikohdasta aluksen keulan vesilinjaan aluksen ollessa lastattuna (Aluksen vakavuus 2019).
- SECA** SO<sub>x</sub> Emission Control Area on alue, jossa alusten rikkioksidipäästöjä on rajoitettu. IMO on asettanut koko Itämeren, Pohjanmeren sekä Englannin kanaalin SECA-alueiksi. Näillä alueilla vuodesta 2015 alkaen alusten pakokaasujen rikkipitoisuus on saanut enimmillään vastata normaalikäytössä 0.1 % rikkisestä polttoaineesta syntyviä rikkioksidipäästöjä (Helsinki Commission 2018).

STCW

*The International Convention on Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers* on yksi merkittävimmistä IMO:n julkaisemista teoksista. Se sisältää kansainväliset vaatimukset merenkulun koulutukselle, pätevyyskirjoille sekä aluksella tapahtuvalle vahdinpidolle (Wei 2013).

## 1. Johdanto

Itämeri on yksi vilkkaimmin liikennöidyistä merialueista, ja rahtimäärät ovat kasvaneet koko 2000-luvun ajan. Alueen meriliikenne koostuu kattavasti sekä rahti- että matkustaja-aluksista. Alueella on myös paljon säännöllistä reittiliikennettä (Helsinki Commission 2018).

Ympäröivissä valtioissa on merkittävää teollisuutta, joka on keskittynyt rannikkokaupunkeihin hyvien liikenneyhteyksien äärelle.

Merenkulun ympäristöpäästöjä pyritään vähentämään niin päästörajoituksilla, logistiikan tehostamisella ja uudella teknologialla kuin optimaalisella kulkunopeudella ja parhaalla mahdollisella reitillä. Sääolosuhteet vaikuttavat alusten nopeuteen ja polttoaineenkulutukseen. Usein onkin kannattavaa säätää nopeutta ja poiketa lyhimmältä reitiltä esimerkiksi suojaisemmalle merialueelle, jossa aallokko on pienempää (Bowditch 2002). Optimaalisen reitin ja nopeuden valitseminen voi kuitenkin osoittautua haastavaksi, sillä kokonaisuuteen vaikuttavat lukuiset tekijät sääolosuhteista rahtihintoihin ja satamien ruuhkaisuuteen.

Merialueena Itämeri on varsin matala ja karikkoinen. Liikenne on hyvin säännöstelltyä kansainvälisellä tasolla, ja suurin osa reiteistä ovat hyvin vakiintuneita. Kapeat kulkuväylät sekä suuret liikennemäärät aiheuttavat kuitenkin haasteita alusturvallisuudelle. Alueen sääolosuhteet ovat merenkululle varsin ainutlaatuiset. Osa Itämerestä jäätyy talvisin, mikä vaatii aluksilta erityisominaisuuksia, kuten ylimääräistä konetehoa ja vahvistettuja rakenteita. Säätilaa alueella hallitsevat tyypillisesti lounaasta saapuvat matalapaineet, jotka aiheuttavat kovia tuulia ja nostavat aallokkoa. Merialue on matala, ja monet alueet ovat niin kapeita, että aallokon muodostuminen on rajallista (Tuomi 2011). Toisaalta aallokko on usein terävää, joka tekee siitä pienemmille aluksille erittäin väkivaltaista ja haastavaa. Alueella liikkuu myös paljon pienempiä rannikkorahtilaivoja sekä huvialuksia, jotka ovat huomattavasti herkempiä sääolosuhteille.

Tässä tutkielmassa tarkastellaan rannikkorahtilaivojen mahdollisuuksia parantaa merenkulun taloudellisuutta ja ekologisuutta sääreitityksen avulla. Tätä tarkastellaan kolmen tutkimuskysymyksen avulla.

1. Mitä reittivaihtoehtoja rannikkorahtialuksilla on Pietari-Bornholm välillä?
2. Miten sääolosuhteet vaikuttavat rannikkorahtialusten nopeuteen?

3. Minkälaisissa olosuhteissa on kannattavaa suosia suojaisempia reittivalintoja Pietari-Bornholm välillä?

Tavoitteena on luoda mahdollisimman tarkka malli aluksen käyttäytymisestä erilaisissa olosuhteissa. Tätä lähestytään tapaustutkimuksella Prima Queen -rannikkorahtilaivalla tehdyillä liiketilamittauksilla. Lisäksi pyritään tarkastelemaan mahdollisia reittivaihtoehtoja alueella ja selvittämään voidaanko sääreitityksellä saavuttaa todellisia säästöjä alueen rannikkorahtilaivojen merenkulussa.



## 2. Tutkimuksen tausta ja teoreettinen viitekehys

### 2.1 Merenkulun reittisuunnittelu

#### 2.1.1 Turvallinen merenkulku ja reittisuunnittelu

Merenkulun koulutusta säätelee IMO:n kansainvälinen STCW-säännöstö (*The International Convention on Standards of Training, Certification and Watch keeping for Seafarers*). Yli 500 GT kansainvälisen liikenteen alukset kuuluvat tyypillisesti IMO:n asetusten piiriin (Laki aluksen teknisestä turvallisuudesta ja turvallisesta käytöstä annetun lain muuttamisesta). Tämä sisältää lähes kaiken kansainvälisen kauppamerenkulun, osaa kalastusaluksia, charter aluksia ja muita pienimpiä aluksia lukuun ottamatta. Yhteiset kansainväliset koulutusvaatimukset mahdollistavat turvallisen työskentelyn haastavissa kansainvälisissä olosuhteissa.

Kansainväliset pätevyyskirjat mahdollistavat miehistön työskentelyn aluksilla miehistön kotimaasta ja aluksen lippuvaltiosta riippumatta. Uusin voimassa oleva STCW-konvention muutos on tullut voimaan 2012, jossa uusina muutoksina turvallisen navigoinnin osalta on painotettu erityisesti ihmisen aiheuttamia vaaratilanteita, sekä uusia koulutusvaatimuksia liittyen sähköisiin navigointijärjestelmiin (Wei 2013). Aluksille on määritelty minimimiehitys, josta ilmenee myös vaadittavat STCW-asetuksen mukaiset pätevyyskirjat. Pätevyyskirjojen saamiseksi tarvitaan hyväksytty STCW-koulutus sekä vaadittu määrä meripalvelua soveltuvassa tehtävässä. Näin pyritään varmistamaan miehistön kyvykkyys tehtäviinsä. Aluksen vahdinpitojärjestely tulee järjestää niin, että turvallista vahtia pystytään pitämään vallitseviin olosuhteisiin ja reittiin nähden niin, että väsymys ei heikennä vahtihenkilöstön suorituskykyä (Laki laivaväestä ja aluksen turvallisuusjohtamisesta).

Turvallisen merenkulun edellytyksenä on hyvin suunniteltu reitti. Yleisesti aluksen perämiehen tehtäviin kuuluu reitin valmistelu ennen merimatkaa, sekä tarvittavien julkaisujen hankkiminen. IMO on antanut päätöslauselmallaan ohjeet aluksen reittisuunnitteluun ”893(21) *Guidelines for voyage planning*” (Voyage planning 1999). Suomessa Traficom on antanut määräyksen aluksen reittisuunnittelusta perustuen lakiin laivaväestä ja aluksen turvallisuusjohtamisesta (Aluksen reittisuunnittelu). Sisällöltään Traficomien määräys ja IMO:n määräykset reittisuunnittelusta ovat hyvin yhdenmukaisia.

Olenneimpia kohtia niin IMO:n kuin Traficomien määräyksissä ovat reittisuunnittelun välttämättömyys. Reittisuunnitelman tulee olla tehtynä lähtösatamasta ensimmäiseen käyntisatamaan. Sen perustana tulee käyttää ajantasaisia merikarttoja tai sähköistä ECDIS-

navigointijärjestelmää. Lisäinformaatiota tulee hakea ajantasaisista julkaisuista, kuten British Admiraltyn purjehdusoppaat, loistoluetelot, reititysjärjestelmäoppaat ja reittisuunnitelmaoppaat. Nämä julkaisut tulee olla aluksella ajantasaisena painoksena. Reittiä suunnitellessa tulee ottaa huomioon aluksen keskeiset ominaisuudet ja rajoitukset. Näistä keskeisimmät ovat aluksen varustelutaso sekä katsastusluokka, jotka määrittelevät sallitut liikennealueet. Myös esimerkiksi vaarallisen lastin kuljettaminen voi aiheuttaa rajoituksia aluksen liikkumiseen. Toinen kriittinen asia on aluksen mitat, erityisesti turvallinen kulkusyvyyden, mikä tulee varmistaa koko reitin osalta, huomioon ottaen mahdolliset vuorovedet ja vallitsevan vedenkoreuden.

Reittijakojärjestelmät ovat alusliikenteen ohjailuun käytettäviä alueita, joille on tyypillisesti määrätty yhdensuuntainen liikenne tietyille vesialueelle. Erityisesti vilkkaasti liikennöidyillä alueilla reittijakojärjestelmillä pyritään optimoimaan meriliikenteen turvallisuus ja sujuvuus. Reittijakojärjestelmiä koskee tietyt erityissäännöt. Reittijakojärjestelmiä koskevat säädökset perustuvat IMO:n COLREGs (*Convention on the International Regulations for Preventing Collisions at Sea*) yleissopimukseen, joka on osana Suomen lainsäädäntöä sellaisenaan (Asetus kansainvälisistä säännöistä yhteen törmäämisen ehkäisemiseksi merellä vuonna 1972 tehdyn yleissopimuksen voimaansaattamisesta; VesiliikenneL). Tietyn kokoisten alusten tulee suosia reittijakojärjestelmien käyttöä, ja niiden on kiellettyä ylittää reittijakojärjestelmän ja tyypillisesti rannikon välissä olevia sisävesialueita. Reittijakojärjestelmässä pienempien alusten ei tule estää muiden alueella liikkuvien alusten kulkua. Vaikka reittijakojärjestelmien käyttö ei ole pakollista, ne ohjaavat suurimman osan liikenteestä, ja ovat olennainen osa reittisuunnitelmaa tehtäessä.

Olennainen osa reittisuunnitelmaa on myös sää- ja jääolosuhteiden huomiointi.

Reittisuunnitelmassa tulee huomioida ennustetut sääolosuhteet käyttäen sääennusteita sekä historiallista tietoa alueella kyseiseen vuodenaikaan tyypillisistä olosuhteista (Liikenne- ja viestintävirasto 2011 a). Erityisesti jääolosuhteet aiheuttavat aluksille haasteita Itämerellä, kuten lisävaatimuksia alusten suorituskykyyn ja rakenteisiin liittyen, ja alueella liikkuvien alusten tulee huomioida vaatimukset alusten jääluokituksista sekä mahdollinen jäänmurtoavustuksen tarve. Reittisuunnitelma tulee tehdä niin kartalle tai ECDIS-järjestelmään kuin paperille. Myös luotsattava matka tulee olla suunniteltuna, jotta luotsin ohjailua on mahdollista monitoroida. Reittisuunnitelman tulee olla päällikön hyväksymä, ja enne matkaa vahtipäällystön tulee olla perehtynyt suunniteltuun reittiin (Voyage planning 1999). Mikäli reittisuunnitelmasta joudutaan merkittävästi poikkeamaan, esimerkiksi

sääolosuhteiden tai muuttuneen määränpään takia, tulee välittömästi laatia uusi reittisuunnitelma.

Aluksen liikkuesa komentosillalla pidetään vahtia jatkuvasti. Normaalisti komentosillalla on vähintään vahtipäällikkö ja tähystäjä. Vatipäällikkö vastaa aluksen turvallisesta navigoinnista sekä meriteiden sääntöjen noudattamisesta vahtinsa aikana (Vahdinpito aluksella).

Vahtipäällikkö huolehtii, että alus on oikealla kurssilla navigointilaitteet toimivat asianmukaisella tavalla. Aluksen sijainti määritetään mahdollisuuksien mukaan useammalla menetelmällä. Lähtökohtaisesti noudatetaan ennalta sovittua reittisuunnitelmaa, mutta esimerkiksi liikennetilanteen tai sääolosuhteiden vaatiessa siitä voidaan poiketa. Ympäröivää liikennettä on monitoroitava kattavasti, jotta mahdollinen yhteen törmäämisen vaara voidaan havaita ajoissa.

### 2.1.2 Sääreititys

Reittisuunnittelun tavoitteena on tyypillisesti luoda mahdollisimman lyhyt reitti lähtösataman ja käyntisataman välille. Sääolosuhteet vaikuttavat kuitenkin merenkulkuun voimakkaasti, riippuen mm. aluksen tyypistä, koosta ja konetehosta eriävissä määrin (Bowditch 2002). Säätilan huomiointi onkin olennainen osa reittisuunnittelua. Usein on kannattavaa poiketa lyhimmältä reitiltä, sillä suotuisissa olosuhteissa navigointi säästää niin aikaa kuin polttoainetta sekä lisää turvallisuutta. Kun reittisuunnittelua tehdään sääolosuhteiden mukaan, usein lyhimmältä reitiltä poiketen, puhutaan sääreitityksestä. Sitä tehdään niin ennen liikkeelle lähtöä, kuin myös merimatkan aikana. Tavoitteena on minimoida alukseen ulkoisesti vaikuttavat kitkaa lisäävät tekijät (Perera ym. 2017). Sääreitityksellä voidaan valtameriliikenteessä saavuttaa jopa 3 % kustannus säästöt, huomioimatta sen mahdollistamaa matka-ajan lyhentämistä (Armstrong 2013).

Yleisesti voidaan ajatella, että mahdollisuus sääreititykselle syntyy, kun aluksen reitti on kohtuullisen pitkä, noin 1500 mpk tai enemmän, navigoitavat vedet ovat avoimia, jolloin reittivaihtoehtoja on enemmän, ja säätä pidetään reittiä määrittävänä tekijänä (Bowditch 2002). Sääreitityksen lähtökohtana pidetään yleisesti British Admiraltyn julkaisemia ”*Pilot Chart Atlases*” sekä ”*Sailing Directions (Planning Guides)*” dokumentteja. Nämä julkaisut sisältävät tietoa yleisesti käytetyistä reiteistä, sekä reiteillä vuodenaikaan nähden tyypillisistä olosuhteista. Merenkulun valtamerireitit ovat hyvin vakiintuneita. Erityisesti pohjoisilla reiteillä on yleistä poiketa lyhimmältä reitiltä jo suunnitteluvaiheessa sääolosuhteiden takia.

Toinen yleinen sääreitityksen syy ovat merivirrat, joita hyödyntämällä voidaan tietyillä reiteillä saada merkittäviä säästöjä. Kuljetusalan tutkijat Lo ja McCord (1995) ovat havainneet jopa 4,5–7,5 % keskimääräisiä polttoainesäästöjä Golf-virran alueella yksinomaan reittioptimoinnilla virtauksien mukaan.

Sääreititystä tehdään niin alukselta käsin kuin ulkoisena palveluna tilattuna. Useat valtiot tarjoavat myös sääreitityspalveluita. Useissa aluksilla käytetyissä navigointiohjelmissa on mahdollisuus tarkastella myös säätietoja, joita pystytään useilla aluksilla vastaanottamaan myös matkan aikana. Aluksilla tulee olla vähintään radioyhteys maihin, joten ainakin yksinkertaiset säätiedot ovat kaikkien alusten saatavilla. Tämä mahdollistaa sääreitityksen myös matkan aikana. Sääreititys aloitetaan päättämällä haluttu lopputulos: lyhin matka-aika, turvallisin reitti vai pienin polttoaineen kulutus, käytännössä näiden kompromissi. Seuraavana tulee määritellä raja-arvot hyväksyttävälle olosuhteille, aluksen parametrit ja nopeus sekä polttoaineen kulutus eri olosuhteissa (Bowditch 2002). Nykyiset järjestelmät pystyvät analysoimaan lukuisia reittivaihtoehtoja sääkarttojen perusteella. Osa järjestelmistä toimii aluksella käsin, jolloin sääkartat toimitetaan alukselle ja suotuisat reittivaihtoehdot lasketaan aluksella. Toisissa järjestelmissä aluksen reitti, sijainti ja parametrit toimitetaan palveluntarjoajalle, ja asiantuntija laskee reittisuosituksen alukselle.

Suojaisilla alueilla, kuten Itämerellä sääreititys eroaa merkittävästi normaalista sääreitityksestä. Usein kulkuväylät ovat kapeita, eikä vaihtoehtoja juuri ole. Toisaalta myös olosuhteet ovat usein helpommat. Suuremmille aluksille ei juurikaan ole vaihtoehtoisia reittejä, ja haastavissa olosuhteissa vaihtoehdoiksi jäävää lähinnä paremman sääikkunan odottaminen. Pienemmille aluksille alueen mukaan on kuitenkin mahdollista valita suojaisempia reittejä (Grifoll ym. 2022). Aallonkorkeus alueella voi vaihdella suuresti, esimerkiksi saaristossa ja sen ulkopuolisella avomerellä, tai suuren lahden eri puolilla.

Säännöllisen linjaliikenteen sääreititys eroaa osin muusta liikenteestä. Reitit on yleensä optimoitu niin, että odotusaikoja ei tule. Suurin aluksen polttoaineen kulutukseen vaikuttava tekijä on aluksen nopeus (Lee ym. 2018; Kim ym. 2020). Valtamerilinjoilla onkin siirrytty suurelta osin ”slow steaming”-metodiin, eli aikataulut on optimoitu kustannustehokkaimman nopeuden mukaan. Reittien aikatauluissa on yleensä pientä kelivaraa, joten myös sovituilla reiteillä pystytään optimoimaan aluksen nopeutta. Sään huomiointi on tärkeää, sillä mikäli säädetään nopeus vain saapumisajan mukaan, yllättävä vastatuuli pakottaa alusta nostamaan

konetehoja merkittävästi pysyäkseen aikataulussa. Tällöin kuluu usein merkittävästi enemmän polttoainetta, kun nopeuden säätelyllä muuten saataisiin säästettyä. Villin linjan liikenteessä, missä aikataulut eivät ole niin sidottuja kuin linjaliikenteessä, on usein enemmän mahdollisuuksia säätää reittiä ja aikataulua sääolojen mukaan. Toisaalta on myös yleistä joutua odottamaan satamaan pääsyä. Yleinen taloudellista ajoa haittaava ongelma on satamien periaate ottaa ensimmäisenä saapuneet alukset satamaan, jolloin myöhemmin saapuvat alukset joutuvat odottamaan (Adland ym. 2016). Usein onkin tapana ajaa jopa sovittua aikataulua nopeammin satamaan siinä toivossa, että satamapaikka vapautuisi.

Lähestyminen sääreititykseen on aina aluskohtaista, ja alkaa lähes poikkeuksetta määrittelemällä ulkoisten tekijöiden vaikutukset aluksen nopeuteen ja polttoaineen kulutukseen. Tähän on olemassa useita metodeja. Aluksen suunnitteluvaiheessa pyritään arvioimaan ulkoisten tekijöiden vaikutusta niin aerodynamiikan kuin hydrodynamiikan näkökulmasta. Aluksen todellista käyttäytymistä aallokossa on kuitenkin hyvin vaikeaa mallintaa, ja kaikille aluksille tehdään koeajoja ennen aluksen käyttöönottoa (Kim ym. 2020; Moreira ym. 2021). Koeajoilla testataan aluksen todellista käyttäytymistä eri tehoalueilla ja mahdollisuuksien mukaan eri olosuhteissa. Normaaleissa koeajoissa tehtävät kokeet eivät kuitenkaan riitä luotettavan sääreitityksen perustaksi. ISO 15016 standardi määrittelee ohjeet aluksen nopeusteho suhteen analysointiin nopeus testien perusteella. Koe tehdään yleensä kuitenkin staattisissa olosuhteissa, joten se ei itsessään vielä kerro sääolosuhteiden vaikutuksista. Näiden testien tuloksia voidaan kuitenkin hyödyntää esimerkiksi mitattaessa aluksen nopeusteho suhdetta merenkäynnissä.

Aluksen käyttäytymistä eri sääolosuhteissa lähestytään usein tilastollisen tarkastelun kautta (Lee ym. 2018; Kim ym. 2020). Tilastoista voidaan tehdä mahdollisimman kuvaava regressiomalli eri sääparametrien vaikutuksista aluksen nopeuteen. Mallien luomiseen on käytetty erilaisia metodeja. Perinteisten tilastollisten regressiotyökalujen lisäksi neuroverkoilla on päästy erittäin tarkkoihin mallinnustuloksiin (Moreira ym. 2021).

Haasteena on usein kuitenkin tarpeeksi kattavan aineiston saaminen, sillä vaikuttavia tekijöitä on useita. Sääolosuhteiden vaikutuksiin vaikuttavia muuttujia aluksella ovat staattisten muuttujien, kuten rungon muodon lisäksi aluksen lastitilanne ja uppoama (etenkin aluksilla, joilla on kansilastia), aluksen trimmi, eli perän ja keulan syvyyden ero ja kulkunopeus. Säätilaan liittyviä muuttujia puolestaan ovat tuulen, aallokon sekä virtauksen suhteellinen suunta ja nopeus, aallonkorkeus, pituus ja taajuus. Jälkimallinnettua sääaineistoa on hyvin

saatavilla, mistä saadaan hyvällä spatiaalisella ja temporaarisella resoluutiolla olevaa tietoa, esimerkiksi havaintojen perusteella jälkikäteen lasketusta Copernicus aineistosta (Tuomi 2011; Lee ym. 2018). Aluksella tehtävät aaltohavainnot perustuvat lähtökohtaisesti kokeneiden merenkulkijoiden visuaaliseen arvioon tilanteesta, jolloin aineisto on usein epätarkkaa ja huonosti vertailtavissa. Aluksen liikkumiseen liittyvää aineistoa voidaan joko kerätä aluksella, tai hakea AIS järjestelmästä, jolla alukset lähettävät tietoa mm. sijainnista, nopeudesta, suunnasta sekä syvyydestä. AIS tiedoista puuttuu kuitenkin tieto aluksen hetkellisestä kulutuksesta ja konetehosta mikä tekee siitä usein hyödytöntä sääolosuhteiden vaikutuksia arvioitaessa.

## 2.2 Sään vaikutukset merenkulkuun

Tuuliolosuhteet ovat merkittävä kitkaa lisäävä tekijä aluksen liikuessa, noin 2–10 % aluksen kokonaisvastuksesta (Perera 2017). Sen vaikutuksen määrä riippuu aluksen nopeudesta sekä rungon ja etenkin kansirakenteiden muodoista. Alle 20 solmun tuulennopeuksissa myötätuuleen kuljettaessa tuulella on pieni positiivinen vaikutus aluksen nopeuteen, ja vastatuuleen kuljettaessa tämä vaikutus on negatiivinen. Tätä voimakkaammilla tuulennopeuksilla vaikutus on negatiivinen myös myötätuuleen kuljettaessa johtuen ohjailuun tarvittavien korjausliikkeiden aiheuttamasta lisäkitkasta (Bowditch 2002). Etenkin kansilasti vaikuttaa merkittävästi aluksen käyttäytymiseen tuulen suhteen.

Aallonkorkeus on merkittävin sään aiheuttama vaikutus aluksen suoriutumiseen. Sen vaikutukset aluksiin vaihtelee mm. aluksen koon, konetehon ja rungon muodon mukaan. Aallokon vaikutus on suurimmillaan aallokon tullessa suoraan edestä, ja pienimmillään sen tullessa aluksen takaa. Pienessä myötääallokossa vaikutus voi olla jopa kokonaiskitkaa vähentävä (Bowditch 2002). Aallokon kasvaessa sen kulkunopeutta hidastava vaikutus voi olla jopa yli kymmenen solmua alukselle, joka muutoin kulkisi 18 solmun nopeutta. Vaikutukset ovat kuitenkin hyvin aluskohtaisia. Yleisin tarkasteltava suure on merkitsevä aallonkorkeus, joka tarkoittaa syvässä avovedessä suurimman kolmasosan aalloista keskikorkeutta. Aallon korkeuden lisäksi merkittäviä suureita ovat aallon pituus, periodi sekä suunta alukseen nähden. Aallokon vaikutusta alukseen on pyritty mallintamaan matemaattisilla malleilla, ja on todettu, että aallonpituuden ollessa lähellä aluksen pituutta merenkäynnin kitkaa lisäävä vaikutus on suurimmillaan (Matulja ym. 2011). Lisääntyvän

kitkan lisäksi aallokko aiheuttaa ylimääräistä stressiä aluksen rakenteille ja koneistolle. Usein aluksen nopeutta joudutaan hidastamaan entisestään lastin, aluksen ja miehistön turvallisuuden varmistamiseksi. Tietyissä olosuhteissa aluksen suuntaa joudutaan myös muuttamaan. Mikäli aallokon ja aluksen luonnollisen rullaamisen taajuus on sama, tai aallokon taajuus on kaksinkertainen, tiettyihin suuntiin kuljettaessa voi ilmetä aluksen kallistumisen voimakasta kasvua muutamasta asteesta jopa 30 asteeseen (Perera 2017). Kova myötääallokko voi puolestaan aiheuttaa aluksen surffaamista, joka voi johtaa ohjailukyvyyn menetykseen ja vauhdin hetkelliseen kasvuun. Aluksen stabiliteetti voi myös hetkellisesti heikentyä aallokossa, kun aallon harja on aluksen keskellä. Tämä heikentää voimakkaasti rungon oikaisumomenttia. Aluksen käyttäytymistä merenkäynnissä mallinnetaan niin suunnitteluvaiheessa kuin koeajoilla. On ensiarvoisen tärkeää, että aluksen miehistö tuntee kyseisen aluksen ominaisuudet ja rajoitukset navigoitaessa haastavissa olosuhteissa.

Lähtökohtaisesti suuremmat alukset pystyvät navigoimaan turvallisesti kovemmassa merenkäynnissä. Myös nopeammat alukset selviävät haastavissa olosuhteissa paremmin. Suuri koneteho mahdollistaa myös nopeamman siirtymisen pois suotuisammalle alueelle. Varsinaisia yhtälöitä sään vaikutuksesta eri alustyyppeihin ei kuitenkaan ole juuri julkaistu (MAN 2012).

Rannikkorahtilaivat ovat Itämerellä hyvin yleinen alustyyppi. Alukset liikennöivät tyypillisesti lyhyitä matkoja, kuten Pohjois-Euroopan alueella. Aluksilla ei ole kannattavaa liikennöidä pidemmällä reiteillä. Rannikkorahtilaivoille ei ole sinänsä kokoluokitusta, mutta yleisesti tähän luokkaan katsotaan 1000–3000 bruttovetoisuuden alukset. Tällaiset alukset ovat yleensä noin 60–100 m kokonaispituudeltaan. Tämän kokoluokan aluksista löytyy niin säiliö-, roro-, irtolasti- ja bulkkialuksia. Alusten matkanopeus on noin 8–12 solmua ja syväys noin 3–6 m. Aluksia liikennöi niin säännöllisillä reiteillä kuin villin linjan liikenteessä, jossa jokainen lasti sovitaan erikseen, ja reitit vaihtuvat jatkuvasti.

## **2.3 Itämeri merenkulun näkökulmasta**

### **2.3.1 Satamat ja alusliikenne**

Itämerellä on pitkä historia merenkulussa. Merialuetta ympäröivät valtiot ovat usein parhaiten saavutettavissa vesiteitse rahtiliikenteen näkökulmasta. Alueella on myös merkittävää teollisuutta, suosittuja risteilysatamia sekä huomattavaa vapaa-ajan veneilytoimintaa. Lisäksi merialueilla harjoitetaan mm. kalastusta sekä energiantuotantoa tuulivoimapuistoissa.

Alueella myös harjoitetaan kalankasvatusta, öljynporausta sekä maakaasun tuotantoa. Itämerta erottaa monista muista merialueista rannikkojen matalat vedet, tiheä meriliikenne sekä erittäin saastunut ja haavoittuva ympäristö.

Aluskäynneissä laskettuna alueen suurimpia satamia ovat Helsinki, Tallinna, Swinoujscie, Rostock, Göteborg, Trelleborg ja Puttgarden (Helsinki Commission 2018). Ylivoimaisesti eniten satamakäyntejä syntyy matkustaja-aluksista, vuonna 2012 yhteensä lähes 140 000, kun esimerkiksi rahtialuksilla käyntejä oli runsaat 40 000 (Helsinki Commission 2018). Tilastoon vaikuttaa kuitenkin merkittävästi satamien säännöllinen lauttaliikenne. Toisaalta tarkasteltaessa alustyyppikohtaisesti, merkittävimmät satamat sijoittuvat varsin eri tavoin. Itämeren etelärannikon valtiot Saksa, Puola ja Baltian maat ovat keskittäneet satamatoiminnan muutamaaan suureen satamakeskittymään. Näistä vuosittaisissa tonnimäärissä suurimpia ovat Klaipeda, Rostock, Lubeck, Gdynia, Swinoujscie sekä Szczecin (Komornicki 2018). Suomen, Ruotsin ja tanskan rannikolla sijaitsee tiheämpi verkosto pienempiä satamia. Alueen suurimmat satamat sijoittuvat Venäjälle. Pietarin edustalla sijaitsevat kolme suurta satamaa: Ust Luga, Primorsk sekä Pietarin satama (Cargo 2021).

Vaikka satamakäyntejä Itämerellä onkin ylivoimaisesti eniten matkustaja-aluksilla, Itämerelle saapuvassa ja poistuvassa liikenteessä rahtilaivat ovat merkittävästi suurempi ryhmä. Tarkasteltaessa Tanskan salmien läpi kulkevaa liikennettä (Taulukko 1) havaitaan, että matkustaja-alukset muodostavat alusliikenteestä vain noin viidenneksen. Alusten kokoluokka vaihtelee merkittävästi, rajoittuen kuitenkin Baltimax kokoluokkaan, mikä on suurin Iso-Beltin kautta mahtuva alus, rajoittaen syväyden 15.4 metriin ja korkeuden 65 metriin. Tämä estää suurten konttialusten, sekä suurimpien tankkereiden ja kuivarahtialusten navigoinnin alueella. Euroopan suuret konttisatamat sijaitsevat Saksassa, Belgiassa ja Alankomaissa, joista pienemmät alukset kuljettavat tavaraa Itämerelle. Itämeren suurimmat konttisatamat konttimäärissä tarkasteltuna ovat Gdansk ja St. Petersburg (Cargo 2021). Satamakäynneissä tarkasteltuna suurin osa merimatkoista on Itämeren sisäistä liikennettä. Vain noin kolmasosa rahtilaivoista suuntaa Itämeren ulkopuolelle (Helsinki Commission 2018). Tankkeri liikenteestä hieman suurempi osa suuntautuu Itämeren ulkopuolelle. Merkittävä osa satamakäynneistä on Göteborgissa sekä Venäjän suurissa öljyterminaaleissa. Matkustaja-alusten liikennöinti jakautuu säännöllisen linjaliikenteen satamien kesken (Helsinki Commission 2018). Vaikka risteilyalusten määrä Itämerellä on kasvanut viime vuosina, sen osuus matkustajaliikenteen satamakäynneistä on pieni. Matkustaja-alusten, rahtilaivojen sekä kalastusalusten liikennöinnissä on merkittävää vuodenaajoista johtuvaa vaihtelua.



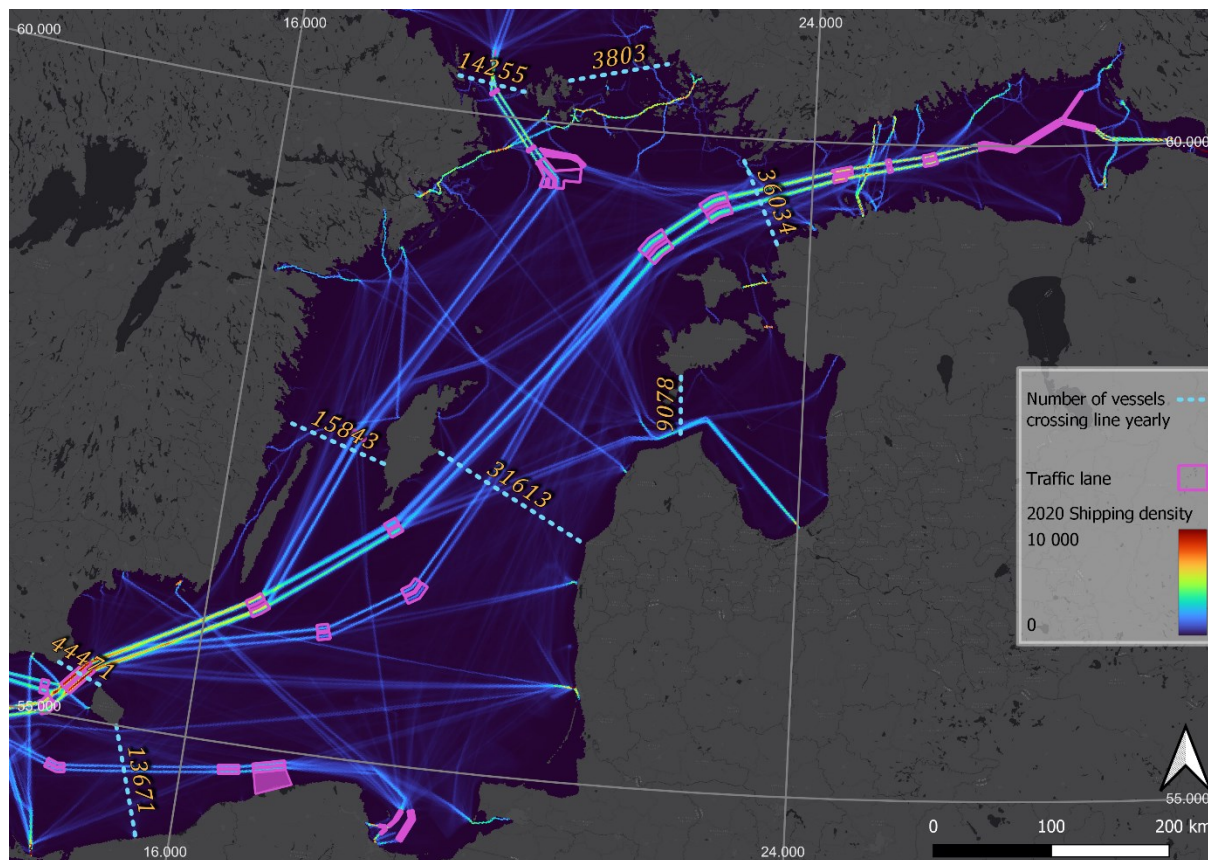
Taulukko 1, Itämerelle saapuvat ja poistuvat alukset 2017. Yhteenlaskettu määrä Tanskan salmien suulta (AIS passage line crossings by ship type 2017).

Rahtialus	35821
Matkustaja-alus	19739
Tankkeri	14967
Muu	22214
Yhteensä	92741

Itämerelle pääsee meriteitse neljää kulkureittiä. Tanskan Skagenin alue on pääreitti Itämerelle. Se jakautuu edelleen kahteen vaihtoehtoiseen reittiin, Juutinraumaan tai Drogdenin kanaavaan ja Iso-Beltiin. Juutinraumassa sekä Drogdenissa on 8 metrin suurin sallittu syväys, joka rajoittaa suurta osaa laivoista käyttämään pidempää reittiä, Iso-Beltiä. Lyhin reitti Euroopasta Itämerelle kulkee Kielin kanavan kautta. Lisäksi Itämerelle pääsee myös Saimaan kanavaa pitkin sekä Neva-joelta (Helsinki Commission 2018).

Itämerellä sijaitsee lukuisia reittijakojärjestelmiä, jotka ohjaavat alusten kulkua (Kuva 1). Säännöllistä reittiliikennettä lukuun ottamatta merkittävä osa Itämeren liikenteestä suuntautuu Tanskan salmista kohti Pietarin lähialueiden satamia. Lyhin reitti kulkee pitkälti reittijakojärjestelmiä pitkin, ja suurin osa aluksista käyttääkin tätä vaihtoehtoa (Kuva 1). Syvävesiväylä suurimmille aluksille kiertää Gotlannin hieman kauempaa. Voidaan myös havaita suuria liikennemääriä Puolan suurten satamien ja Tanskan salmien välillä. Suomenlahdella lukuisat reittijakojärjestelmät ohjaavat suurta liikennevirtaa. Voidaan kuitenkin havaita myös liikennettä rannikon lähellä reittijakojärjestelmän ulkopuolella. Vastaavaa ilmiötä ei ole esimerkiksi Öölannin eteläkärjessä, johon on sijoitettu sisävesialue,

joka kieltää suurten aluksen kulkemisen alueella, ohjaten vielä voimakkaammin reittijakojärjestelmän käyttöön (IMO ship routing guide 2017).



Kuva 1. AIS järjestelmään perustuva alusliikenteen tiheys ja ylitys määrät sekä alueen reittijakojärjestelmät vuonna 2020 (AIS passage line crossings by ship type 2017, Traffic intensity 2020, IMO ship routing guide 2017), (Taustakartta: Esri 2023)

Itämerellä liikkuu paljon säälle herkempiä rannikkorahtilaivoja. Vaikka yleisesti merenkäynti alueella on varsin kohtuullista, niin pienempien aluksien merenkulkua haittaavia olosuhteita esiintyy säännöllisesti. Toisaalta Itämerellä on pienemmille aluksille tarjolla lukuisia suojaisempia reittivaihtoehtoja. Etenkin Gotlannin länsipuolelta kiertäminen tarjoaa usein suojaisamman vaihtoehdon niin matkalla pohjoisen satamiin kuin Suomenlahdellekin. Pienemmät alukset voivat myös kulkea Öölannin länsipuolta aluksen syvyyden ollessa alle 6.8 m, joskin tällöin lisäkustannuksia voi aiheutua luotsauksesta (Baltic Pilot 2 2022). Pienimmille aluksille, tai alusten ollessa tyhjiä myös Riianlahden ja Väinämeren kautta Suomenlahdelle navigointi voi olla järkevää. Väylän syvyys on kuitenkin vain 4.7 m ja luotsaus on monille aluksille pakollista (Baltic Pilot 2 2022). Muita suojaisia reittivaihtoehtoja alueelta löytyy mm. Suomenlahden rannikkoväyliltä sekä Ahvenanmaan että

Ruotsin saaristosta. Suojaiset reitit lisäävät usein matkaa, mutta toisaalta niiden käytöstä voidaan saada todellisuudessa niin polttoainetaloudellista kuin ajallistakin hyötyä.

Vilkas alusliikenne pienellä merialueella on osaltaan vaikuttanut alueen ympäristön tilaan. Alueen matala keskisyvyys, vain 54 m, ja pieni veden vaihtuvuus, vaihtumisaika 50 vuotta, hankaloittavat vesistön tilan parantamista (Myrberg ym. 2006). Lukuisat tekijät kuormittavat alueen vesistöä. Ravinnepäästöjä syntyy etenkin laajan valuma-alueen maataloussektorista, jonka asukasluku on noin 85 miljoonaa. Jätevedet puhdistetaan alueella lähtökohtaisesti tehokkaasti. Alusliikenne käyttää lähes poikkeuksetta fossiilisia polttoaineita, josta syntyy merkittäviä hiilidioksidipäästöjä. Lisäksi polttomoottorit tuottavat merkittäviä määriä mm. rikin sekä typen oksideja (Olaniyi ym. 2019). Alusliikenteestä mereen kulkeutuu myös jätevesiä. IMO:n MARPOL yleissopimuksen mukaan jätevesiä saa päästää mereen yli 12 mpk päässä rannikosta. Alusliikenne on ollut kasvussa koko 2000-luvun (Helsinki Commission 2018). Kuitenkin uudet teknologiat ovat osaltaan mahdollistaneet merenkulun ympäristökuormituksen vähenemistä. Rikki- ja hiukkaspäästöt vähenivät merkittävästi, kun koko Itämeri määriteltiin IMO:n asetuksessa SECA (Sulphur Emission Control Area) alueeksi, jossa päästöjen suurin sallittu rikkipitoisuus vastaa polttoaineen päästöjä, joka sisältäisi 0.1 % rikkiä (Olaniyi ym. 2019). Rikkipäästöt putosivatkin murto-osaan välittömästi, ja hiukkaspäästöt putosivat samalla noin puoleen (Helsinki Commission 2018). Maakaasukäyttöiset järjestelmät ovat olleet suosiossa uudisrakenteissa pienten päästöjen ja edullisen polttoaineen takia. Pakokaasun seassa oleva voimakas kasvihuonekaasu metaani aiheuttaa kuitenkin ongelmia. Myös typen oksideja koskevat rajoitukset astuivat voimaan 2021, koskien kuitenkin vain uudisrakenteita. Maaliikenteen typpioksidipäästöt ovat laskeneet merkittävästi, noin 60 % 1990-luvulta lähtien, kun taas merenkulun typpipäästöt ovat pysyneet hyvin tasaisina (Helsinki Commission 2018). Syynä on maaliikenteessä käytetyt katalysaattorit, jotka ovat vasta tulossa merenkulkuun. Uusi typpioksidi rajoitus kiihdyttäneen vastaavan teknologian asentamista myös meriliikenteen uudisrakenteisiin.

### 2.3.2 Olosuhteet

Itämeri sijaitsee länsituulivyöhykkeen subarktisella reunalla, jossa ilmastoa säätelee Pohjois-Atlantin länsivirtaus, Venäjän mannerilmasto sekä pohjoinen polaarinen vyöhyke.

Vuodenaikojen vaihtelu on suurta. Kesäisin pintavesi saattaa lämmitä yli 20 °C tuntumaan, kun taas talvisin osa alueesta jäätyy. Länsivirtaus on yleensä voimakkaimmillaan keväisin ja syksyisin. Kesällä, ja kylminä talvina saattaa esiintyä lukkiintuneita korkeapainetiloja, jolloin

tuulet ovat heikompia (Myrberg ym. 2006). Paikallisia sääilmiöitä säätelee alueen ylittävät matalapaineet. Talvisin matalapainetoiminta on voimakasta, ja matalapaineet liikkuvat tyypillisesti lännestä itään. Vallitsevat tuulet ovat koko vuoden etelän ja lännen väliltä. Talvi on tuulisin vuodenaika, jolloin koko alueen keskituuli on jopa 8–10 m/s, tosin tällöin myös alueellinen vaihtelu on suurimmillaan. Keväällä ja kesällä syklonitoiminta on heikompaa, heikentyen kesää kohti. Keskituuli on tällöin 6–8 m/s. Syksyllä syklonitoiminta voimistuu, ja keskituuli palaa 8–10 m/s tuntumaan. Keskituuli antaa yleiskuvan kuulien voimakkuuksista. Alueelliset erot ovat kuitenkin suuria, ja avomerialueilla, missä kitka on vähäisintä, tuulennopeudet kasvavat jopa 30 m/s lukemiin. Yli 17 m/s voimakkuuksisten tuulten osuus on kuitenkin vain 5 % ja 11–17 m/s osuus 20–25 %.

Alueella ei ole merkittäviä virtauksia. Itämerellä on kuitenkin vastapäivään suuntautuva virtaus, joka kiertää rannikkoa pitkin. Sen nopeus on vain noin 5 cm/s (Myrberg ym. 2006). Itämerellä virtauksia ei huomioida yleisesti merenkulussa. Pohjavirtaukset ovat alueella usein pintavirtauksia voimakkaampi, paikoin jopa 20 cm/s. Pintavirtaukset ovat voimakkaimmillaan sysyisin ja talvisin (Jeđrasik ym. 2019). Ne johtuvat lähinnä vallitsevista tuulista. Voimakkaimmat virtaukset esiintyvät salmipaikoissa, ja merenkulun kannalta huomattavia virtauksia esiintyy vain Tanskan salmissa.

Aallot ovat Itämerellä jäätä lukuun ottamatta merkittävin merenkulkuun vaikuttava sääilmiö. Suurimmat mitatut merkitsevät aallonkorkeudet ovat yli 7 m, mutta tällaisia tilanteita on harvoin. Yli 50 % päivistä aallonkorkeus on esimerkiksi pohjoisen Gotlannin aaltopoijulla alle 1 m, ja yli 2 m aaltoja on vain runsas 10 % ajasta (Myrberg ym. 2006). Itämerellä monin paikoin aallokon korkeutta rajoittaa pyyhkäisymatkan pituus. Jälkikäteen luoduista aallonkorkeusmalleista voidaan havaita, että korkeimmat 0.1 % merkitsevät aallonkorkeudet ylittävät 6 m vain Itäisellä- ja Pohjoisella Gotlannin altaalla sekä Gdanskinlahdella (Tuomi 2011). Suomenlahdella, Riianlahdella ja Perämerellä arvo on alle 4.5 m ja Selkämerellä sekä Belttien merellä alle 6 m. Suurimmat jälkikäteen lasketut merkitsevät aallonkorkeudet ylittävät 9 m vain Gotlannin koillispuolella 2001–2007 ajanjaksolla.

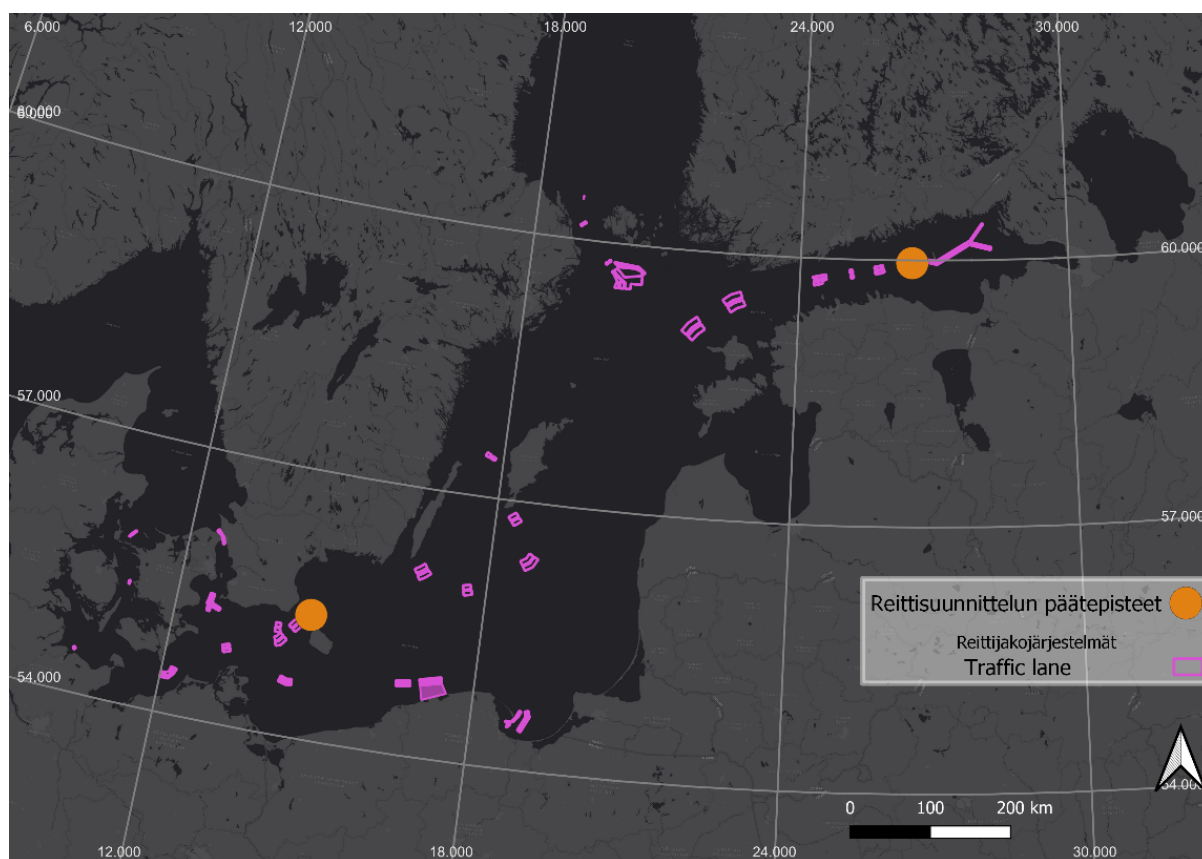
Monelle Itämeren satamalle on poikkeuksellista talven jääolosuhteet. Talviaikaan satamiin navigointia rajoitetaan jääolosuhteisiin perustuen, ja usein aluksilta vaaditaan jääluokitus. Alueen valtiot tarjoavat jäänmurtopalveluita, ohjeistusta ja valvovat talvinavigointia tarkasti. Osa Itämerestä jäätyy vuosittain. Jäätyminen alkaa tyypillisesti lokakuun lopulla Perämeren pohjoisosista. Perämeri jäätyy kokonaan useimmiten tammikuussa (Myrberg ym. 2006).

Suomenlahti ja Selkämeri jäätyvät myös usein osittain tai kokonaan. Jäätilanne on laajimmillaan helmikuun puolenvälin ja maaliskuun puolenvälin aikaan peittäen keskimäärin 45 % Itämerestä. Kiintojään reuna asettuu yleensä 10 m syvyyskäyrän tuntumaan, ja sen paksuus on Kemissä ollut keskimäärin 50–110 cm. Kiintojään ulkopuolella on ajojäättä, mikä liikkuu tuulen ja virtausten vaikutuksesta. Liikkuva jää rikkoutuu ja aiheuttaa avovesialueita sekä erilaisten jäätyyppien muodostumista.

### 3. Aineistot ja menetelmät

#### 3.1 Tutkimusalue

Tutkielman alueeksi on rajattu Ahvenanmaan eteläpuolinen Itämeri, missä rannikkorahtilaivoja liikennöi vilkkaasti ja reittivalintoja voidaan tehdä saaristoa ja rannikon muotoja hyödyntäen. Alueen ja reitin valinta perustuu yleisesti käytettyihin reitteihin ja vilkkaasti liikennöityihin kulkuväyliin. Alueen virtaukset ovat heikkoja eikä niitä tarvitse lähtökohtaisesti huomioida reittejä suunniteltaessa. Reittisuunnitteluun on valittu Bornholmin pohjoispuolella sijaitsevan reittijakojärjestelmän ja Venäjän aluevesillä sijaitsevan läntisimmän reittijakojärjestelmän väli (Kuva 2). Kyseisellä reitillä liikenne on vilkasta, ja alueen saaret tarjoavat mahdollisuuksia sääreititykseen. Myös aineisto on kerätty Itämerellä.



Kuva 2. Reittisuunnittelun päätepisteet. (IMO ship routeing guide 2017), (Taustakartta: Esri 2023)

## 3.2 Aineistot

### 3.2.1 Merenkulun julkaisut

Reittisuunnittelun pohjalla käytetään yleisiä kauppamerenkulun reittisuunnittelun käytäntöjä ja julkaisuja. Kartta-aineistona käytetään UK Hydrographic Officen, The British Admiraltyn tuottamia virallisia sähköisiä merikarttoja, joita operoidaan Furuno Electric Co.:n ECDIS järjestelmässä. Ajantasaiset (25.3.2022) vektorikartat antavat luotettavan lähtökohdan reittisuunnittelulle. Merikarttojen lisäksi reittisuunnittelussa hyödynnetään Admiraltyn julkaisemaa Baltic Pilot 2 kirjaa, joka sisältää merenkulun kannalta olennaista yksityiskohtaisempaa informaatiota alueen yleisesti käytössä olevista reiteistä.

### 3.2.2 Aineiston keräys aluksella

Tutkielma perustuu Prima Queen aluksella kerätyn aineiston ja spatiotemporaalisen säädatan analysointiin. Tutkittaessa sään vaikutuksia aluksen nopeuteen ja polttoaineen kulutukseen on saatava tietää alukseen liittyvät parametrit sekä ulkoiset muuttujat. Prima Queen on Itämeren liikenteeseen hyvin tyypillinen rannikkorahtilaiva (Kuva 2). Alus soveltuu itämerenliikenteeseen hyvin, sillä se mahtuu myös moniin pienempiin satamiin sekä esimerkiksi Trollhättanin kanavaan. Aluksessa on yksi ruuma, jonka pituus on 58.8 m. Alus pystyy lastaamaan kesällä noin 3600 t tai 4877 m<sup>3</sup> (Taulukko 2). Lisäksi alus pystyy ottamaan kansilastia. Tekniseltä toteutukseltaan alus on hyvin perinteinen kuivalastialus. Cat 3516 B pääkone pyörittää vaihdelaatikon välityksellä kiinteälapaista potkuria. Aluksessa on myös 350 kW tehoinen keulapotkuri. Täydessä lastissa alus kulkee noin 10 solmun nopeutta. Aluksen ollessa tyhjä matkanopeus on noin 11 solmua.



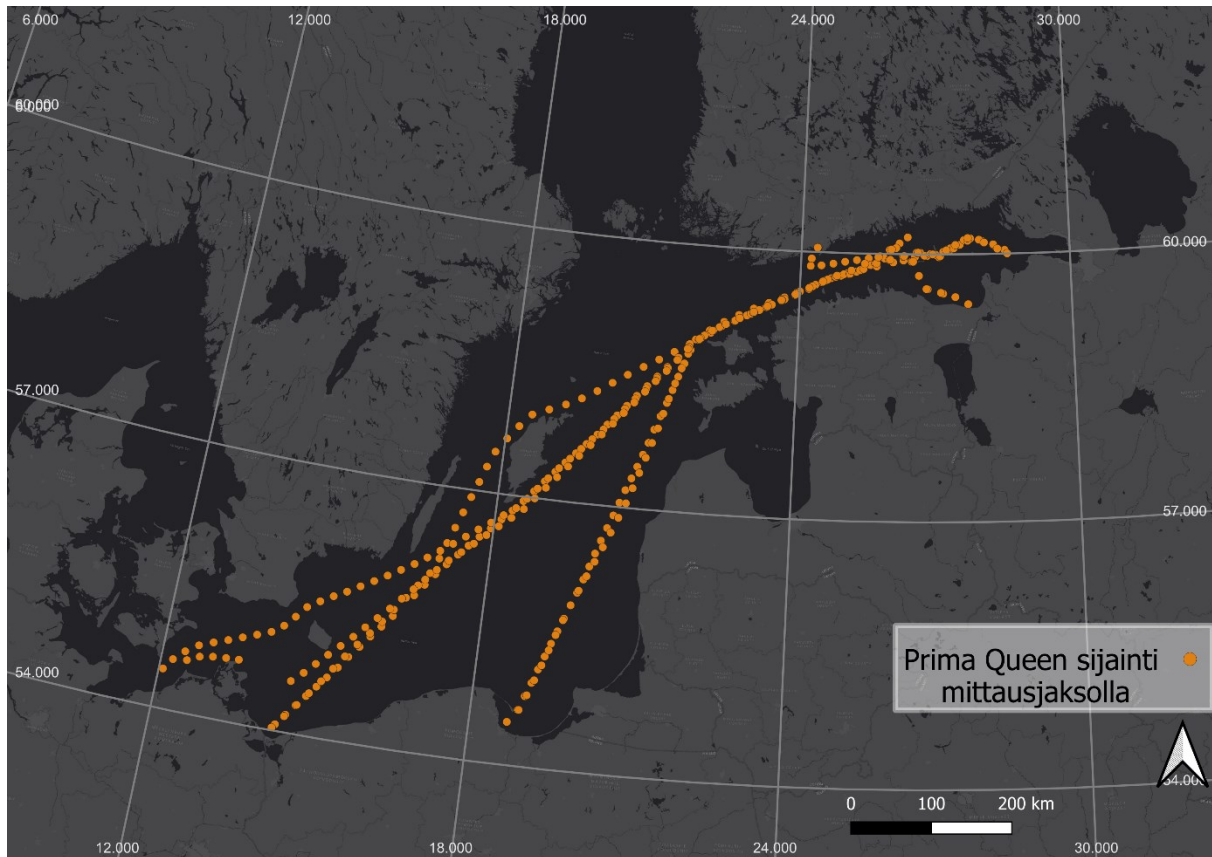
Kuva 3. Prima Queen (kuva: Lauri Aakko)

Taulukko 2. Prima Queen -aluksen tiedot (MV Prima Queen 2020)

Nimi	Prima Queen	DWCC talvi	3500 t
Rakennusvuosi	2000	Kokonaispituus	87.93 m
Lippuvaltio	Suomi	LPP	84.93 m
Jääluokka	Suomi/Ruotsi 1B	Leveys	12.3 m
GT	2450	Syväys	5.6 m
NT	1293	Ruuman tilavuus	4877 m <sup>3</sup>
DWCC kesä	3600 t	IMO numero	9194282
Pääkone	Cat 3516 B	Pääkoneen teho	1492 kW

Aluksen nopeuteen liittyviä parametrejä tallennettiin aluksen ollessa kulussa virtaamattomassa vedessä meren ollessa sulaa keväällä 2022. Mittaukset sijoittuvat välille 17.2.-25.3.2022. Mittaukset keskeytettiin aluksen lähestyessä luotsipaikkaa, jolloin aluksen nopeutta joudutaan säätämään useammin. Mittaus keskeytettiin myös, mikäli alueella havaittiin jäätä. Mittausjaksolla alus liikennöi Itämerellä monipuolisissa olosuhteissa Suomen, Venäjän, Puolan ja Saksan satamissa (Kuva 4). Reitillä oli sekä suojaisia- että avomeriesuuksia, joten sään vaikutusten analysointiin tarvittavaa aineistoa saatiin tuotettua. Alus oli osan matkoista täydessä lastissa ja osan tyhjänä.





Kuva 4. Prima Queen -aluksen sijainti mittausjaksolla tunnin välein. (Taustakartta: Esri 2023)

Aluksen sijaintia, nopeutta ja suuntaa pohjan suhteen tallennettiin Furunon FMD-3100 ECDIS -järjestelmällä, jossa sijaintitieto tallennettiin kahdenmetrillä Furuno GNSS Navigator GP-17 -satelliittipaikantimella. Järjestelmä asetettiin tallentamaan tunnin välein, ja ajanjaksolla tallennettiin yhteensä 346 mittausta.

Lisäksi aluksella tallennettiin muuttujia, jotka vaikuttavat matkakohtaisesti aluksen polttoainekulutukseen, nopeuteen ja herkkyteen olosuhteiden muutoksille. Aluksen syväys luettiin lastimerkeistä ennen aluksen lähtöä satamasta. Keskisyväys kuvaa aluksen ja lastin kokonaismassaa. Lisäksi aluksen keulan ja perän syväyksistä laskettiin aluksen trimmi, millä tiedetään myös olevan vaikutusta aluksen käyttäytymiseen. Pääkoneen ohjainyksiköstä tallennettiin tunnin välein käytössä ollut suhteellinen koneteho, joka ilmaisee prosenttiyksikköinä käytössä olleen kuormituksen. Suhteellinen koneteho kirjattiin muistiin aina kun sitä muutettiin.

Aluksella tallennettiin myös erillinen tilasto, jossa verrattiin suhteellista konetehoa polttoainekulutukseen. Tähän käytettiin polttoainejärjestelmän virtausmittaria sekä pääkoneen ohjausyksikön ilmoittamaa suhteellista kuormitusta. Tähän taulukkoon pyrittiin

keräämään mittaustuloksia mahdollisimman laajalta tehoalueelta, jolloin mittauksia tehtiin myös esimerkiksi luotsimatkan aikana, sillä pieniä konetehoja ei juuri käytetä matka-ajossa. Ennen mittausten lukemista kulutuksen annettiin tasaantua noin 10 minuuttia käytetyn tehon muutoksen jälkeen.

### 3.2.3 Copernicus-aineistot

Tarkkojen olosuhdetietojen mittaaminen alukselta on haastavaa. Prima Queenilla ei ole tarkkaa tuulimittaria, ja aallon korkeuden määrittäminen aluksella perustuu kokeneiden merenkulkijoiden näkemykseen, jolloin suuriakin poikkeamia todelliseen aallonkorkeuteen voi syntyä. Sääaineistona käytetään jälkianalysoituja säätietoja, joissa säämalli on jälkikäteen yhdistetty toteutuneisiin havaintoihin.

Tutkielmassa käytetään merkitsevää aallonkorkeutta ja aallokon suuntaa analysoitaessa aallokon vaikutuksia aluksen kulkuun. Aineistona käytetään Copernicus Marine Servicen tuottamaa Baltic Sea Wave Analysis and Forecast dataa. Aineisto on grid muotoista 1 merimailin spatiaalisella resoluutiolla (Baltic sea wave analysis and forecast 2012). Temporaalinen resoluutio on yksi tunti. Aineisto perustuu WAM 4.6.2 malliin, joka käyttää 10 m tuulitietoa NEMO-ERGOM-PDAF järjestelmästä. Malli on validoitu vertaamalla tuloksia kiinteisiin aaltopojuihin, ja merkitsevän aallonkorkeuden osalta mallin ja mitattujen tulosten korrelaatiokerroin on kaikkien mittauspisteiden osalta vähintään 0.96. Parhaiten malli toimii avoimemmilla vesialueilla (Kanarik & Tuomi 2022).

Tuulen nopeus tietona käytetään Copernicus Climate Change Servicen tuottamaa ERA 5 jälkimallinnettua aineistoa. Aineistosta käytetään tuulen pohjois- ja itäsuuntaista nopeutta 10 m korkeudella merenpinnasta. Grid muotoisella aineistolla on 31 km spatiaalinen resoluutio, ja temporaalinen resoluutio on yksi tunti (Hersbach ym. 2020). ERA 5 malli yhdistää lukuisista lähteistä mitattua tietoa, johon sisältyy mm. satelliitti aineistoa sekä kiinteiltä mittausasemilta tuotettua dataa, ja yhdistää niistä spatiaalisesti kattavan kokonaisuuden. Tuulitietoa malliin tuottaa esimerkiksi kiinteät mittausasemat, säöpallot, kiinteät ja ajelehtivat poijut sekä lentokoneiden mittalaitteet. Lisäksi tuulitietoa saadaan spatiaalisesti hyvin kattavasti satelliittien backscatter aineistoista. Malli hyödyntää QuickSCAT satelliittia sekä Oceansat-2 ja Meteop-A/-B satelliitteja, joiden avulla tuotetaan merialueille tuulennopeustietoa merenpinnan tasolla. Tuulennopeus mallinnetaan backscatter datasta CMOD5.n geofysikaalisella mallilla. Verrattaessa mallia havaintoihin havaitaan 10 m korkeudessa tuulennopeuden osalta noin 1.75 m/s keskihajontaa 360 päivän tarkastelujaksossa

vuoden 2019 jälkeisissä malleissa. 30 päivän tarkastelussa keskihajonta vaihtelee noin 1.6–1.8 m/s välillä. ERA 5 mallin tuulennopeutta on tarkasteltu vertaamalla Ruotsissa ERA 5 mallin mukaista energiantuotantoa 1051 tuulivoimalassa toteutuneeseen (Olauson 2017).

Keskiarvojen Spearmanin korrelaatiokertoimeksi saatiin 0.868 ja mediaanin kertoimeksi saatiin 0.876. Kuukauden keskiarvojen korrelaatiot olivat vastaavasti 0.964 ja 0.973. Erot johtuivat lähtökohtaisesti mallin riittämättömästä resoluutiosta tiettyjen tuulivoimaloiden sijainnissa. Malli toimii parhaiten avomeriolosuhteissa.

Pintaveden virtausnopeutena käytettiin Copernicus marine servicen NEMOv4.0 mallilla tuottamaa *Baltic Sea physics analysis and forecast* aineistoa. Aineistosta käytetään pintavirtauksen pohjois- ja itäsuuntaista virtausnopeutta tunnin intervalleissa. Grid muotoisen aineiston resoluutio on 2 km (Jandt-Scheelke ym. 2022). Virtausmalli on validoitu käyttämällä seitsemällä mittauspisteellä kerättyä virtausprofiilidataa kahden vuoden ajalta. Harhan keskihajonta pintavirtauksissa vaihteli mittauspisteillä välillä 0.04–0.08 m/s ja virtauksen suunnan osalta 77° to 147°. Suurimmat virtauksen aluksen suuntaiset nopeudet vaihtelivat välillä -0.3–0.3 solmua.

### 3.3 Analyysimenetelmät

#### 3.3.1 Reittisuunnittelu

Reittisuunnittelu on toteutettu yleisten reittisuunnittelujen käytäntöjen mukaisesti. Reitit on suunniteltu Bornholmin pohjoispuolella sijaitsevan reittijakojärjestelmän ja Venäjän aluevesillä sijaitsevan läntisimmän reittijakojärjestelmän välille. Suunnitelma on tehty Furuno FMD-3100 ECDIS järjestelmällä, ja suunnitelmat noudattavat traficomin määräystä alusten reittisuunnittelusta (Aluksen reittisuunnittelu 2022). Käytännössä suunniteltaessa yleisiä mahdollisia reittejä yksittäisen matkan sijaan, huomiota kiinnitettiin erityisesti määräyksen kohtiin 1. alukset varustetaso, 2. aluksen ohjailuominaisuudet, 5. aluksen syväys, 18. lossit, sillat, kanavat ja sulut ja 21. muut alueelliset erityisvaatimukset. Mikäli reittisuunnitelmat kulkevat väyläalueiden ulkopuolella lähimpään merenkulun kannalta vaaralliseen kohteeseen on pidetty vähintään 0.5 M turvallinen ohitusetäisyys (Admiralty 2020). Reittipisteiden välillä reitit on suunniteltu käyttäen loksodromia, sillä pisimmät yksittäisten reittipisteiden välit alueella ovat merkittävästi alle 600M, jota pidetään rajana isoympyräreitityksen käyttämiseen siirtymiselle.

### 3.3.2 Menetelmät

Tutkielmassa käytetään lukuisia aineistoja vaihtelevilta alustoilta (Taulukko 3).

Paikkatietoanalyysit tehtiin käyttäen Qgis 3.18.3 avoimeen lähdekoodiin perustuvaa paikkatieto-ohjelmistoa. Lisäksi työssä käytettiin Microsoft Excel taulukkolaskenta- ja IBM SPSS tilastoanalyysiohjelmistoa.

Taulukko 3. Analyysien lähtöaineistot

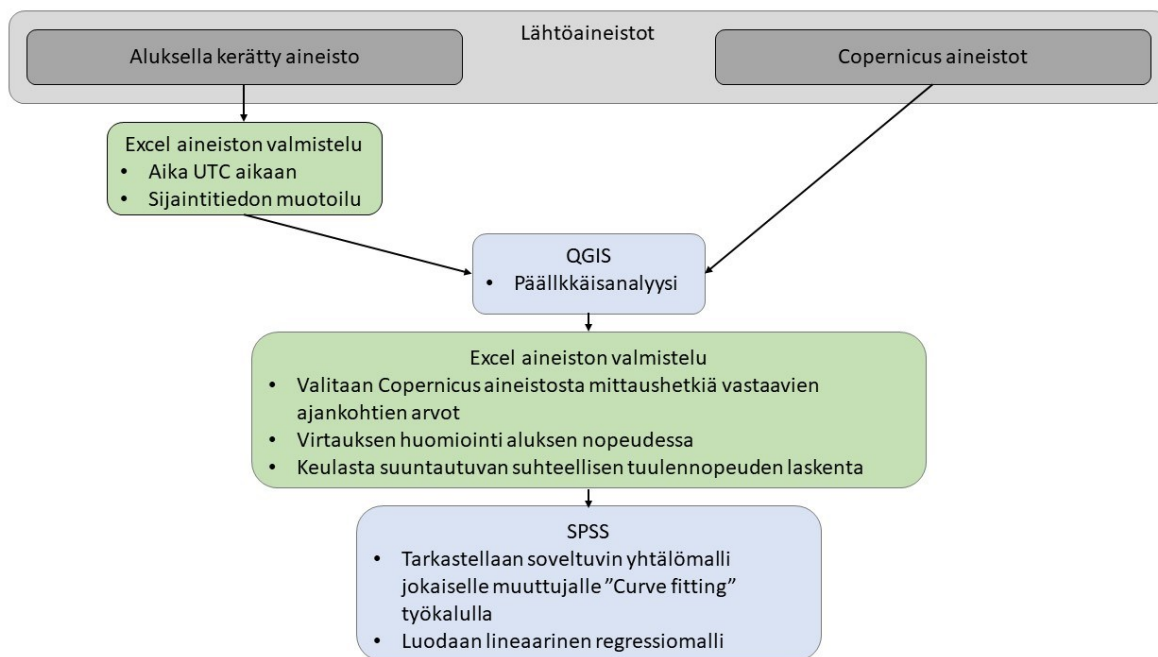
Aineiston lähde	Aineisto	Muoto	Attribuutit	Yksiköt
Aluksella kerätty aineisto	Aluksen liiketila	Excel-taulukko	Nopeus	solmua
			Keskisyväys	m
			Trimmi	m
			Aika	
			Suhteellinen konetehto	%
	Polttoaineen kulutus	Excel-taulukko	Suhteellinen konetehto	%
			Kulutus	litraa tunnissa
Copernicus-aineistot	Tuulen nopeus	GRIB	Pohjoissuuntainen tuulennopeus	m/s
			Itäsuuntainen tuulennopeus	m/s
			Aika	
	Merkitsevä aallonkorkeus	GRIB	Merkitsevä aallonkorkeus	m
			Aika	
			Aallokon suunta	Aste
Pintavirtauksen nopeus	GRIB	Pohjoissuuntainen virtausnopeus	m/s	
		Itäsuuntainen virtausnopeus	m/s	
		Aika		

Lähtöaineistoista aluksella tuotetut mittausaineistot valmisteltiin ensin Excel ohjelmistolla (Kuva 5) Qgis yhteensopivaan muotoon ja UTC aikaan. Tämän jälkeen aineistot avattiin Qgis ohjelmistolla, ja Copernicus-aineistojen GRIB-tiedostojen arvot yhdistettiin mittauspisteiden arvoihin sijainnin perusteella ”Sample raster values” työkalulla. Saatu vektoriaineisto tuotiin edelleen Exceliin, ja oikeat arvot valittiin pisteisiin liitettyistä Copernicus-aineistoista aikaleiman perusteella. Aluksen nopeuteen huomioitiin mittaushetken virtaus vähentämällä

aluksen suuntainen pintavirtausnopeuden osa aluksen nopeudesta. Myös tuulennopeuden ja aallokon osalta laskettiin trigonometrisesti aluksen suuntainen tuulennopeus komponentti.

Tiedot tuotiin SPSS ohjelmistoon, jossa jokaista muuttujaa tarkasteltiin ”Curve Estimation” työkalulla, jolla pyrittiin löytämään kutakin muuttujaa parhaiten kuvaava yhtälö. Lineaarinen regressiomalli pyrkii löytämään yhtälön, joka kuvaa mahdollisimman hyvin muuttujien välistä suhdetta (Wackernagel 2010). Yhtä muuttujaa käsiteltäessä saadaan käytännössä yhtälö muodossa  $A = x(B) + C$ , jossa  $A$  = selitettävä muuttuja,  $x$  = kerroin muuttujalle  $B$ ,  $B$  on selittävä muuttuja ja  $C$  = vakio. Aluksen nopeutta ja sen muuttujia tarkasteltaessa muuttujia on kuitenkin useita, joten käyttämällä monen muuttujan regressiomallia päädytään muotoon  $A = x_1(B_1) + \dots + x_n(B_n)$ . Lisäksi yhtälössä ei käytetä vakiota, sillä muuttujien vaikutuksen nopeuteen oletetaan olevan 0 niiden arvojen ollessa 0. Monet muuttujista ovat luonteeltaan epälineaarisia, mutta niiden oletetaan riittävällä tarkkuudella noudattavan yksinkertaista yhtälöä. Yhtälön valitsemiseen käytettiin ”Curve estimation” työkalua, jolla voidaan tarkastella hajontakuvion asettumista graafisessa näkymässä eri yhtälötyyppien mukaan (Curve estimation 2022). Lisäksi ohjelma tarjoaa numeerisen arvon eri yhtälöiden toimivuudella mallin selittämisessä, sekä yhtälön numeeriset kertoimet muuttujalle. Mikäli lukuisat yhtälöt tarjosivat yhtä toimivan tuloksen, valittiin muodoltaan yksinkertaisempi, tai teoreettisesti mitta-arvojen ulkopuolella paremmin toimiva yhtälö. Tarkastelu aloitettiin oletetusta merkittävimmistä muuttujista, suhteellisesta konetehosta ja aluksen syväydestä.

Jotta kaikkia muuttujia pystytään tarkastelemaan ”Linear regression” työkalulla, epälineaariset muuttujat muutettiin lineaariseen muotoon (Nonlinear regression 2022). Mikäli muuttuja oli esimerkiksi muotoa  $A = x(B^2) + y(B)$ , luotiin erikseen muuttuja  $B^2$ , jolloin sitä voidaan käsitellä yhtenä lineaarisen mallin muuttujana. Kun kaikki muuttujat oli muutettu lineaarista regressiomallia varten soveltuvaan muotoon, tehtiin ensimmäinen malli. Tämän mallin perusteella tehtiin uusi Curve estimation tarkastelu niin, että selitettävästä muuttujasta, aluksen nopeudesta oli poistettu muut muuttujat regressiomallin mukaisesti, ja pystyttiin paremmalla tarkkuudella tarkastelemaan yhtälötyypin soveltuvuutta. Lopuksi toistettiin regressiomalli valittujen yhtälötyyppien mukaisesti. Vastaavaa lähestymistapaa sääparametrien vaikutukseen käytetään yleisesti arvioitaessa alusten nopeutta eri olosuhteissa (Bialystocki ym. 2016; Mao ym. 2016)

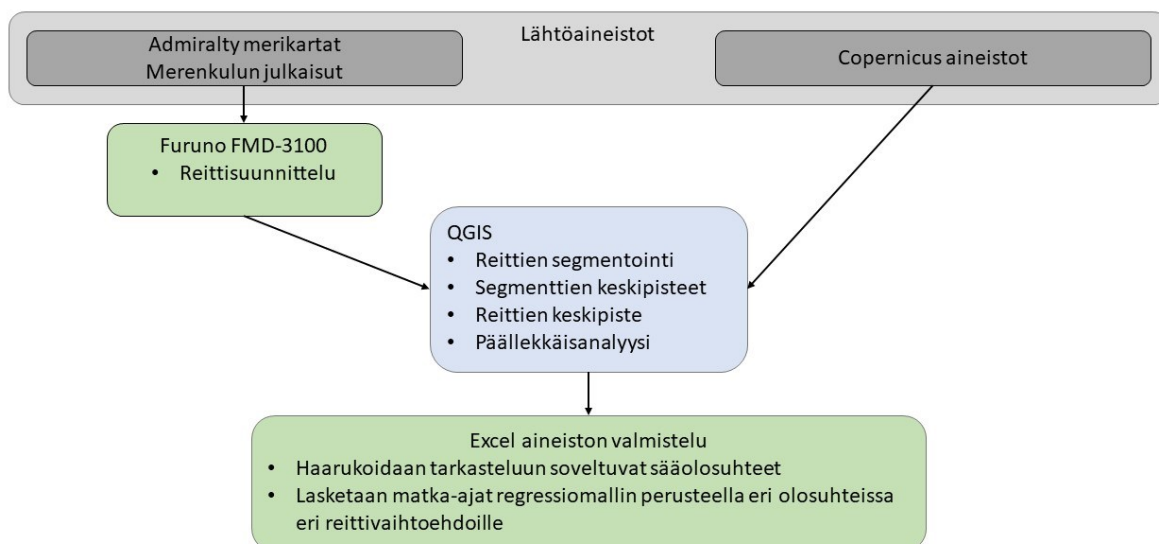


Kuva 5. Työjärjestys

Valmiit reitit jaettiin segmentteihin reittipisteiden välin mukaan. Lisäksi segmentit ryhmiteltiin merialueen mukaan (Kuva 6). Segmenttejä oli viidellä Pietarista Bornholmiin suuntautuvalla reitillä yhteensä 82 kappaletta, ja niiden pituudet vaihtelivat välillä 0.2–202 M. Jokaiselle segmentille haettiin tutkimusajanjaksolta sääaineistosta segmentin keskipisteen tuuli- ja aallonkorkeus tiedot. Lisäksi haettiin vertailukohdaksi samat tiedot kaikkien reittipisteiden yhteiselle keskipisteelle. Näiden avulla tarkasteltiin eri sääolosuhteiden toteutumista alueellisesti verrattuna Gotlannin koillispuolella avomerellä sijaitsevaan reittien keskipisteeseen.

Reittivalintojen kannattavuutta arvioitiin tarkastelemalla tiettyjä alueelle tyypillisiä olosuhteita valitsemalla olosuhteet reittien keskipisteellä Varsinaisella Itämerellä toteutuneet etelän ja lännen väliset aalto-olosuhteet haarukoituna 0.5 m merkitsevän aallonkorkeuden muutoksen välein. Tarkastelussa huomioitiin koko vuosi 2021. Aineistosta koottiin kaikkien reitin segmenttien (kahden reittipisteen väli) keskipisteen kohdalla toteutuneet olosuhteet tunnin välein, ja valituista tilanteista lasketettiin keskiarvot eri reittien merialueille. Näin saatiin tuotettua tietoa aallonkorkeuksista ja suunnista eri merialueilla verrattuna saman hetken tilanteisiin muilla reitin osuuksilla. Tarkastelussa käytettiin Pietarista Bornholmiin suuntautuvia reittejä. Aalto-olosuhteiden haarukointi perustuu alueen vallitseviin tuulensuuntiin (Myrberg ym. 2006). Merialueiden jaotteluun käytettiin HELCOM ”Subbasins

of Baltic Sea aineistoa (Subbasins of Baltic Sea 2013). Lisäksi Kalmarsund ja Väinämeri eroteltiin erikseen suojaisina vesialueina luotsimatkan osalta omiksi alueikseen. Reittien toimivuutta analysoitiin käyttämällä regressiomallin funktiota yhdessä eri merialueille laskettujen keskiarvo-olosuhteiden kanssa haarukoituna referenssipisteen aallonkorkeuden mukaan. Jokaiselle segmentille laskettiin tuulen ja aallokon keulansuuntainen momentti ja regressiomallin avulla edelleen kyseisen osuuden matka-aika. Tuloksista tehtiin kaksi mallia. Yksi, joka hyödyntää suoraan regressiomallia, ja toinen, joka ottaa huomioon aluksen suhteellisen konetehon pakollisen laskemisen kovassa aallokossa. Prima Queenillä suhteellista konetehoa joudutaan laskemaan noin 20 % keulasta suuntautuvan merkitsevän aallonkorkeuden ylittäessä noin 2,7 m (Rautiainen 2022).

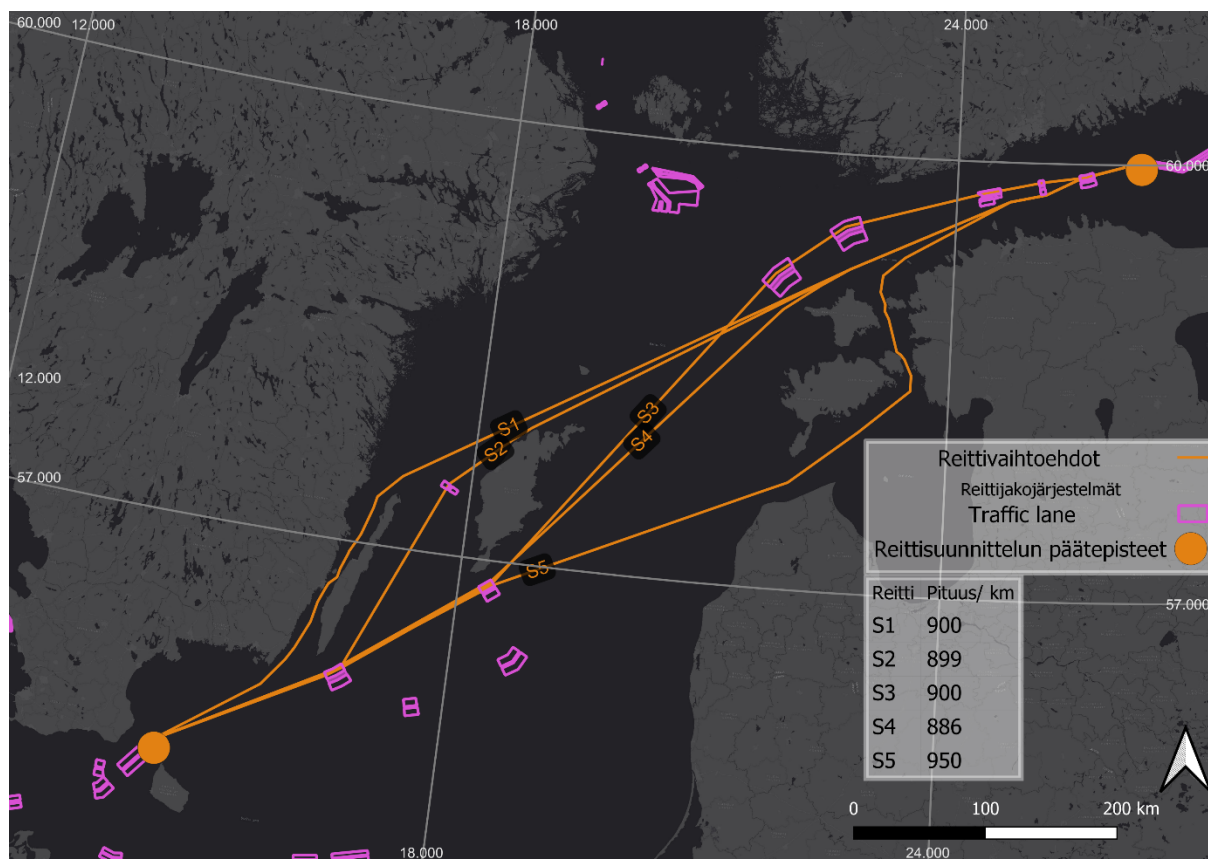


Kuva 6. Työjärjestys, reittien analysointi

## 4. Tulokset

### 4.1 Reittivaihtoehdot

Molempiin suuntiin Bornholm-Pietarin luotsipaikka välille suunniteltiin viisi reittiä (Kuva 7). Reitit ovat muuten identtisiä mutta reittijakojärjestelmissä Bornholmia kohti suuntautuvat reitit käyttävät pohjoisen puoleista liikennealuetta, kun taas Pietaria kohti suuntaavat reitit käyttävät eteläistä. Mahdollisia muita rannikkoväyliä ei ole otettu huomioon, sillä ne ovat merkittävästi pidempiä eikä niitä käytännön merenkulussa valita.



Kuva 7. Reittivaihtoehdot Pietarista Bornholmin suuntaan. (Taustakartta: Esri 2023)

Reittien pituudet vaihtelevat välillä 886–950 km, mikä tarkoittaa matka-ajassa noin kolmen tunnin eroa hyvissä olosuhteissa. Reittien suojaisuudessa on kuitenkin merkittäviä eroja. Suojaisimmat ja samalla pisimmät reitit kulkevat rannikkoa pitkin. Reitti S1 kulkee Viron rannikkoa ja suorinta reittiä kohti Öölannin pohjoiskärkeä. Öölannin länsipuolella kulkeva väylä on erittäin hyvin suojassa aallokolta. Alueella on kuitenkin suurin sallittu syväys 6.8 m, ja lisäksi alueella tarvitaan luotsi tai luotsivapautus mikä lisää kustannuksia. S2 on pienten rahtilaivojen keskuudessa hyvin yleinen reitti. Reitti kulkee viron rannikkoa ja jatkaa



Gotlannin länsipuolella sijaitsevaan reittijakojärjestelmään. Gotlannin länsipuolella olosuhteet ovat usein Varsinaista Itämerta suotuisimmat, eikä reitti juuri lisää matkaan pituutta. S3 reitti on suurempien alusten normaali reitti ja alueen vilkkaimmin liikennöity väylä, joka kulkee reittijakojärjestelmiä pitkin Suomenlahden keskiosassa ja jatkaa Gotlannin itäpuolelta kääntyen aina reittijakojärjestelmien mukaan. S3 vastaa pituudeltaan reittiä S2, mutta on huomattavasti avoimempi aallokelle. S4 on puolestaan lyhin reittivaihtoehto, mutta se kulkee suuren osuuden matkasta Varsinaisen Itämeren läpi, ja kuten S3, on hyvin avoin aallokelle. S5 on pisin reittivaihtoehto, joka kulkee Viron rannikolta Väinämerelle ja Riianlahdelle. Reitti on merkittävästi muita vaihtoehtoja pidempi. Väinämerellä suurin sallittu kulkusyvyys on 4.7 m, eli Prima Queenin kokoinen alus voi käyttää tätä reittiä vain tyhjänä. Lisäksi Väinämerellä tarvitaan luotsi.

## 4.2 Sään vaikutukset alukseen

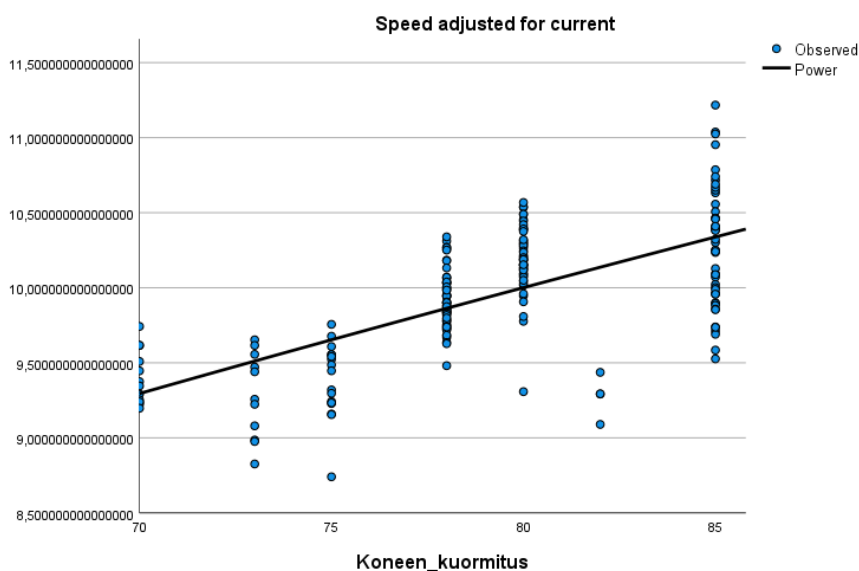
Tilastanalyysissä havaittiin, että kyseinen aineisto ei ole kaikissa tilanteissa tarpeeksi kattavaa kuvaamaan kaikkia tavoiteltuja ilmiöitä. Aluksen syvyyden havaittiin vaikuttavan niin merkittävästi aluksen käyttäytymiseen aallokossa, että tilastollinen analyysi tehtiin erikseen tilanteissa, joissa alus oli painolastissa eli tyhjä, ja niissä missä alus oli lastattu. Mittauksia aluksen ollessa tyhjänä oli vain 133 kappaletta, ja tälle ajanjaksolle osui vain tilanteita, joissa aallokon aluksen suuntainen momentti jäi välille 2.9 m perästä ja 1.1 m keulasta. Pienestä aineistosta ei pystytty muodostamaan tilastollisesti merkitsevää mallia aluksen käyttäytymisestä eri olosuhteissa.

Mittaustilanteita, joissa alus oli lastattu, oli yhteensä 212 kappaletta. Aallokon keulansuuntainen momentti vaihteli välillä 2.3 m keulasta ja 1.3 m perästä. Aluksen syväys eri lasteissa vaihteli välillä 5,3 ja 6,6, suhteellisen konetehon vaihdellessa välillä 70 % - 85 %. Tuulen aluksensuuntaisen momentin vaihteluväli oli 6,6 m/s perästä – 11,5 m/s keulasta. Aluksen nopeus veden suhteen oli mittauksissa 8.7–11.2 solmua.

Suhteellisen konetehon havaittiin noudattavan yhtälöä  $V=P^{0.525}$  jossa  $V$ = aluksen nopeus ja  $P$  = suhteellinen konetehto (Taulukko 3, Kuva 8). Konetehto huomioituna tarkasteltiin soveltuvinta yhtälöä aallokon vaikutuksen huomiointiin. Aluksen trimmillä ei havaittu olevan tilastollista vaikutusta. Aluksen ollessa lastattuna trimmi on vähäistä, mittaustilanteissa välillä 0.03 m – 0.38 m, verrattuna trimmiin aluksen ollessa tyhjä, jolloin se on yleensä noin 0.75 m. Keskisyvyyden ja tuulen keulansuuntaisen momentin havaittiin noudattavan lineaarista funktiota.

Taulukko 3. Aluksen suhteellisen konetehon ja nopeuden funktio

Model Summary and Parameter Estimates						
Dependent Variable: Aluksen nopeus veden suhteen						
Equation	Model Summary					Parameter Estimates
	R Square	F	df1	df2	Sig.	b1
Power	1,000	1056164,319	1	211	,000	,525
The independent variable is Suhteellinen_koneteho.						



Kuva 8. Aluksen nopeuden veden suhteen ja suhteellisen konetehon suhde.

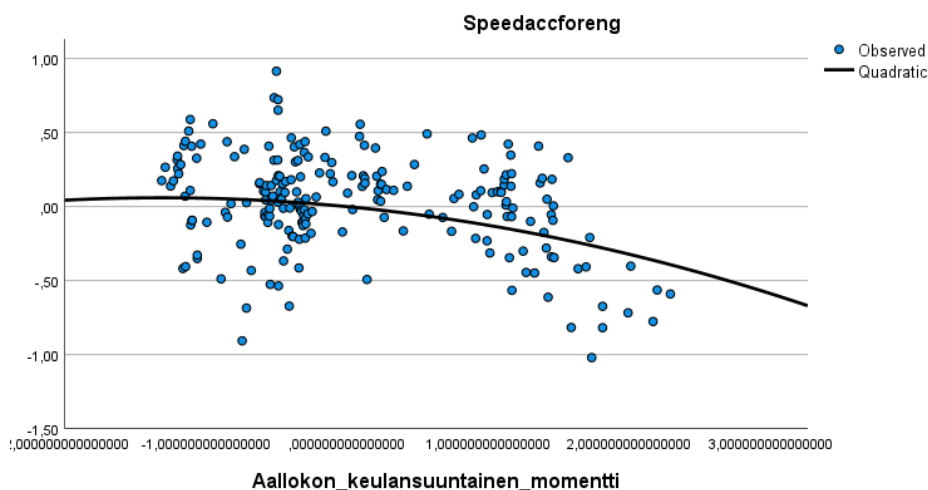
Aallokon vaikutuksia analysoidessa vähennettiin nopeudesta veden suhteen suhteellisen konetehon vaikutus. Curve estimation työkalulla pyrittiin löytämään parhaiten sopiva yhtälö kuvaamaan jäljellejäänyttä nopeuden vaihtelua. Tarkastelussa havaittiin, että sekä toisen- että kolmannen asteen yhtälöt kuvaavat muuttujaa kohtuullisen hyvin käytetyssä aineistossa. Toisen asteen yhtälö valittiin käyttöön, sillä vaikka pieni myötääallokko saattaakin lisätä aluksen nopeutta, suuremman myötääallokon tiedetään hidastavan aluksen kulkua mm.

lisääntyneiden suunnan korjaamiseen tarvittavien peräsimen liikkeiden takia (Taulukko 4, Kuva 8), (Bowditch 2002).

Taulukko 4. Aallokon keulan suuntaisen momentin funktio aluksen nopeuden suhteen

Model Summary and Parameter Estimates							
Dependent Variable: Jäljellejäävä nopeuden vaihtelu suhteellinen konetehto huomioituna							
Equation	Model Summary					Parameter Estimates	
	R Square	F	df1	df2	Sig.	b1	b2
Quadratic	,118	14,014	2	210	,000	-,091	-,035

The independent variable is Aallokon\_keulansuuntainen\_momentti.



Kuva 9. Aluksen nopeuden (suhteellinen konetehto huomioituna) ja aallokon aluksensuuntaisen momentin suhde.

Regressiomalliin valittiin mukaan ensin seuraavat muuttujat: aluksen nopeus veden suhteen (selitettävä muuttuja), trimmi, keskisyväys, merkitsevän aallonkorkeuden keulansuuntainen momentti, merkitsevän aallonkorkeuden keulansuuntaisen momentin neliö, tuulen nopeuden keulansuuntaisen momentti ja suhteellisen konetehon funktio. Ensimmäisessä tarkastelussa käytettiin stepwise metodia, joka huomioi niistä vain tilastollisesti merkittävät muuttujat. Vakiota ei käytetty funktiossa, sillä kaikkien muuttujien vaikutuksen nopeuteen oletetaan olevan 0 muuttujan arvon ollessa 0.

Lopullisessa regressiomallin yhtälössä oli mukana tilastollisesti merkitsevät muuttujat, ja alkuperäisistä muuttujista jätettiin pois vain trimmi (Taulukko 5). Tuloksena saatiin seuraava funktio kuvaamaan aluksen nopeutta veden suhteen:

$$V=1.121 P^{0.525}-0.087 H-0.107 H^2-0.013 W-0.187 D, \text{ jossa}$$

V= Aluksen nopeus veden suhteen

P= Suhteellinen koneteho

D = Keskisyväys

W=Tuulen keulansuuntainen momentti

H=Aallokon keulansuuntainen momentti

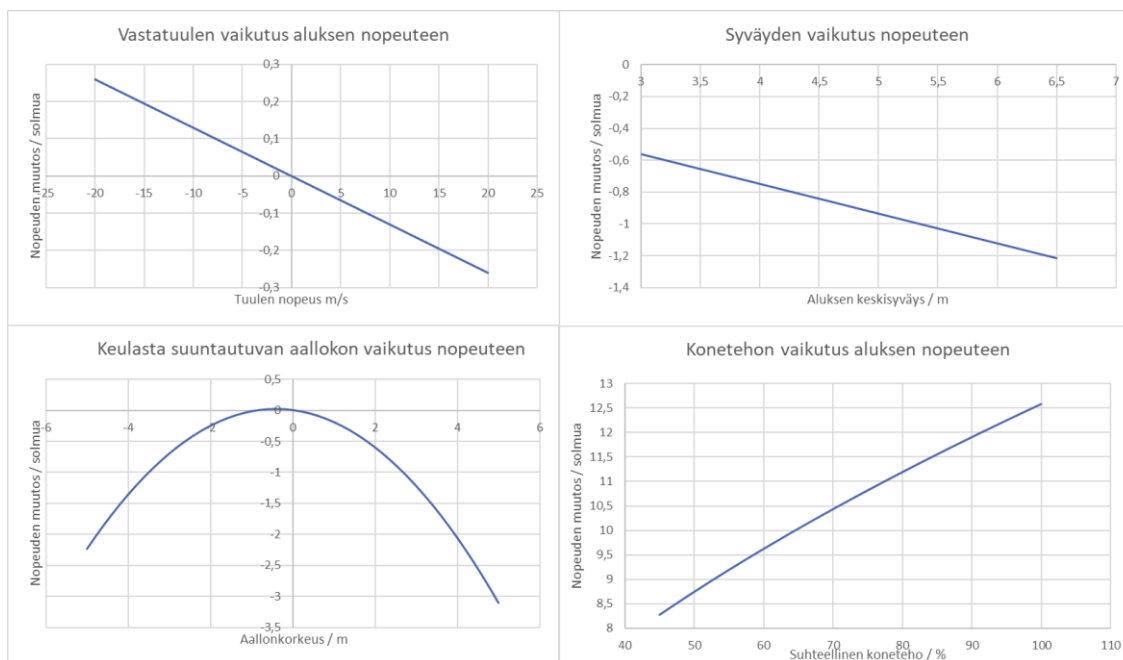
Malli pystyy selittämään halutun muuttujan kiitettävällä tarkkuudella  $R^2$  arvon ollessa 0.651 ja estimaatin keskivirheen ollessa 0.258 solmua. Verrattaessa mallin tuottamia nopeuksia mitattuihin nopeuksiin, havaitaan tulosten eron minimin ja maksimin olevan -0.76 ja 0.65 solmua, keskiarvon ollessa -0.0023.

Taulukko 5. Aluksen nopeuden regressiomalli

Coefficients <sup>a,b</sup>						
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.
		B	Std. Error	Beta		
1	Suhteelisen_konetehon_funktio	1,121	,028	1,117	40,274	,000
	Aallokon keulansuuntaisen momentin neliö	-,107	,024	-,013	-4,538	,000
	Aallokon keulansuuntainen momentti	-,087	,028	-,008	-3,066	,002
	Tuulen keulansuuntainen momentti	-,013	,006	-,006	-2,179	,030
	Keskisyväys	-,187	,046	-,110	-4,086	,000
a. Dependent Variable: Aluksen nopeus						
b. Linear Regression through the Origin						

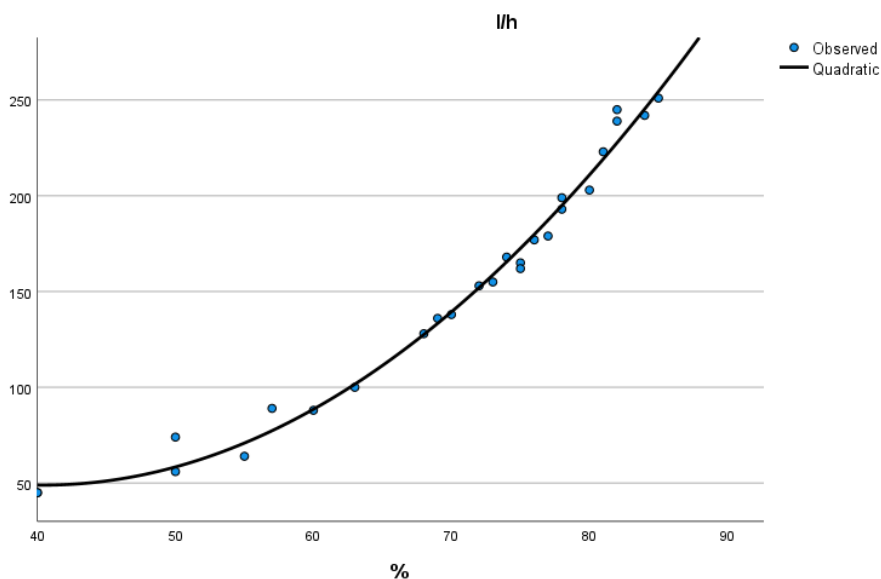
Normaaleissa olosuhteissa merkittävin yksittäinen muuttuja aluksen nopeuteen oli aluksen suhteellinen koneteho, jonka arvot voivat olla välillä 45–100 % (Kuva 10). Myös aluksen keskisyväydellä on suuri vaikutus. Aallokon vaikutusta kuvaa toisen asteen funktio, ja sen

vaikutukset muuttuvat nopeasti aallokon kasvaessa. Vasta-aallokon vaikutus on myötääallokkoa suurempi. Tuulen nopeuden vaikutukset puolestaan ovat suhteellisen vähäisiä.



Kuva 10. Yksittäisten muuttujien vaikutus aluksen nopeuteen.

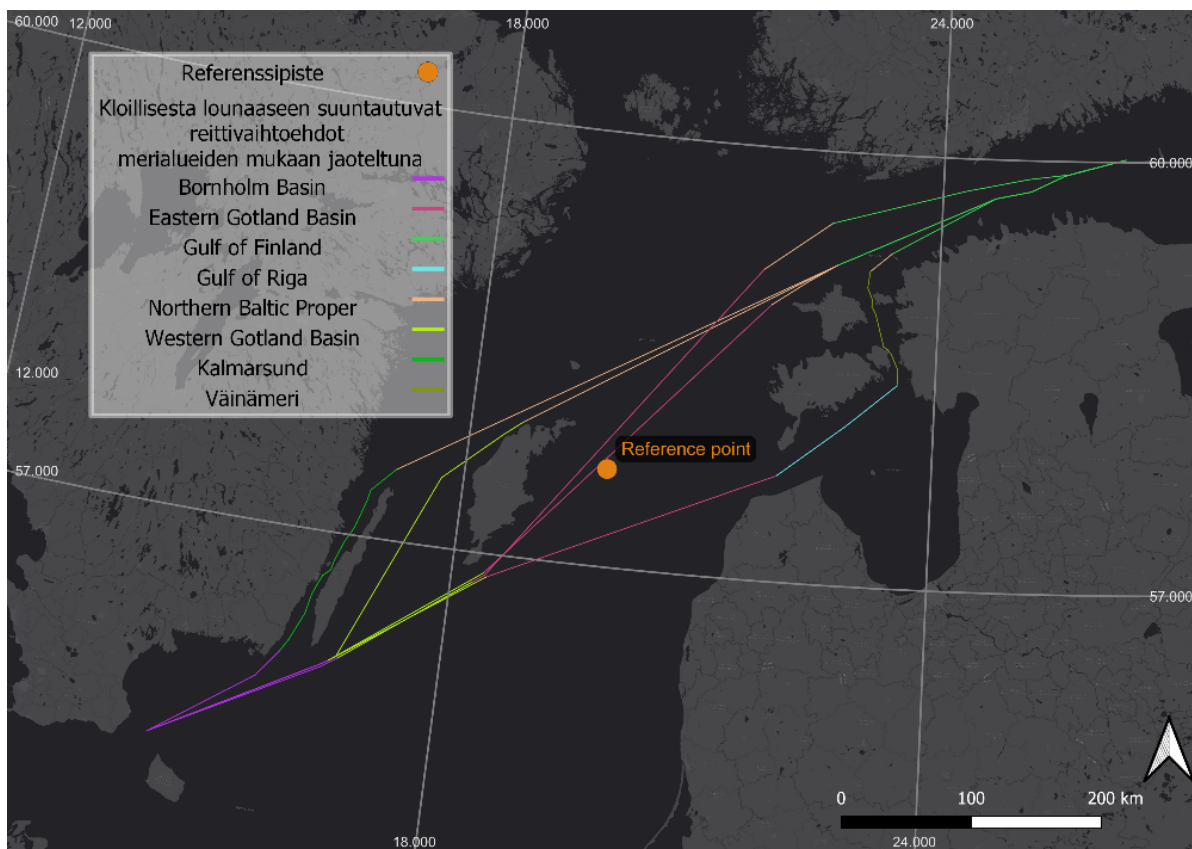
Polttoainenkulutuksen ja suhteellisen konetehon suhdetta tarkasteltiin erillisessä mallissa. Polttoainenkulutuksen havaitaan kasvavan eksponentiaalisesti konetehon funktiona seuraten yhtälöä  $L=218.005-8.364P+0.103P^2$ , jossa  $L$ =Polttoaineen kulutus litraa tunnissa ja  $P$ =suhteellinen koneteho (Kuva 11). Yhtälö kuvaa selitettävää muuttujaa tarkasti,  $R^2$  arvon ollessa 0.988. Polttoainenkulutuksen ja suhteellisen konetehon sekä nopeuden yhtälöistä voidaan todeta, että Prima Queenin, kuten tyypillisesti kaikkien kuivarahtialusten kohdalla matalampi matkanopeus on polttoainetaloudellisin vaihtoehto. Etenkin pienten rahtialusten kohdalla todellisuudessa lisääntyneestä matka-ajasta aiheutuneet lisäkustannukset ovat kuitenkin tyypillisesti suuremmat kuin mahdolliset polttoainesäästöistä saavutetut voitot. Prima Queen operoi yleisimmin noin 80 % suhteellisella koneteholla.



Kuva 11. Polttoaineen kulutus suhteellisen konetehon funktiona

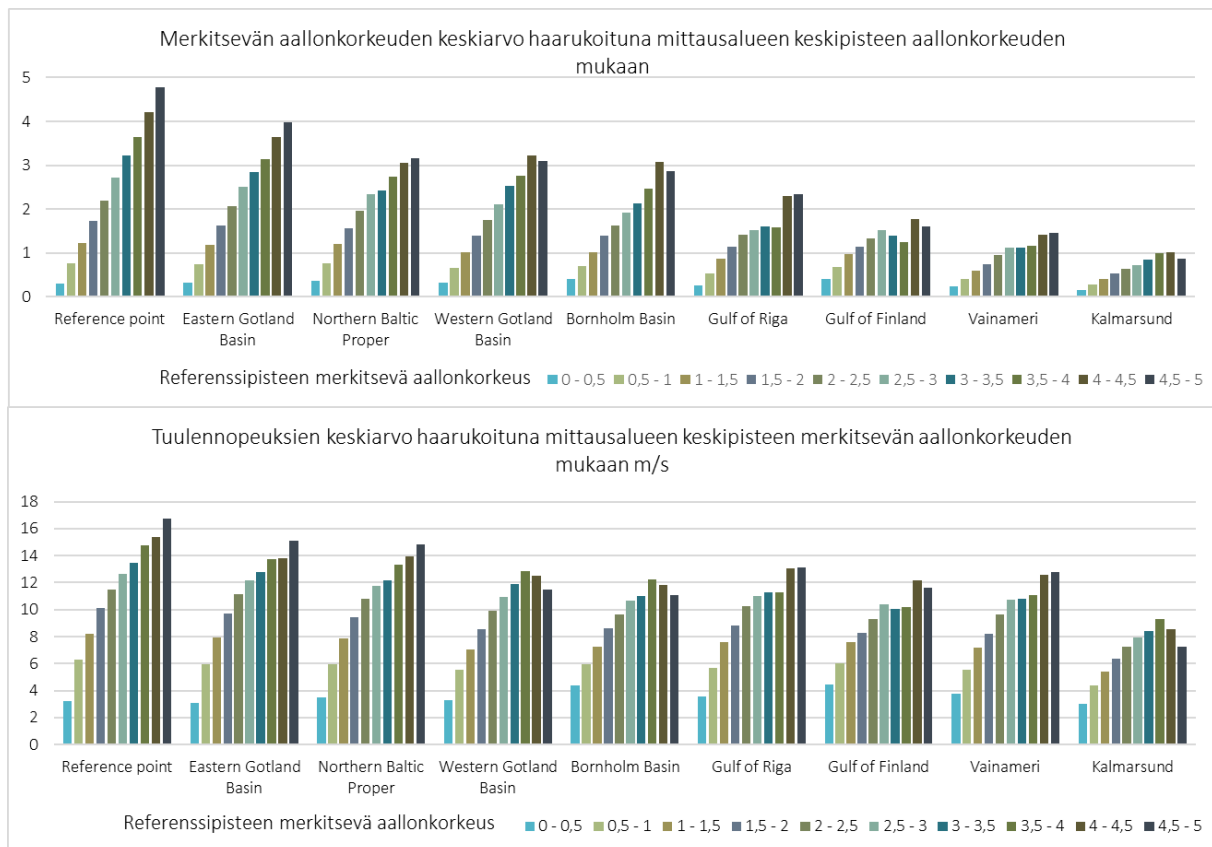
### 4.3 Suotuisimmat reitit eri olosuhteissa

Tarkasteltaessa reittivaihtoehtoja ja reittien varrella olevia merialueita (Kuva 12) havaitaan hajontaa tyypillisissä sääolosuhteissa. Referenssipisteen sääolojen mukaan haarukoiduista tilanteista havaitaan selviä eroja, miten olosuhteet muuttuvat etenkin suojaisammilla reittien osuuksilla. Kaikki reitit joutuvat ylittämään Varsinaisen Itämeren joko Gotlannin pohjois- tai eteläpuolelta. Avointen alueiden pituudessa eri reiteillä on kuitenkin merkittäviä eroja ja reittien suunta vaihtelee ylityksen osalta merkittävästi, mikä osaltaan vaikuttaa suotuisimman reitin valitsemiseen.



Kuva 12. Merialueiden mukaan jaotellut reittiosuudet. (Taustakartta: Esri 2023)

Kuten voitiin olettaa, Gotlannin itäpuolella olosuhteet olivat haastavimpia niin tuulen kuin aallonkorkeuden suhteen, vaikka Gotlanti voikin antaa suojaa etenkin länsituulilla (Kuva 13). Suomenlahti, Väinämeri ja Kalmar Sund olivat puolestaan suojaisimpia, eikä keskimääräinen aallonkorkeus reitillä ylittänyt juuri 1.5 m aallonkorkeuden ollessa Gotlannin itäpuoleisilla osuuksilla yli 4 m. Vaikka tuulennopeuksissakin havaittiin eroja, suojaisten merialueiden vaikutus niihin oli huomattavasti vähäisempää kuin aallonkorkeuteen.



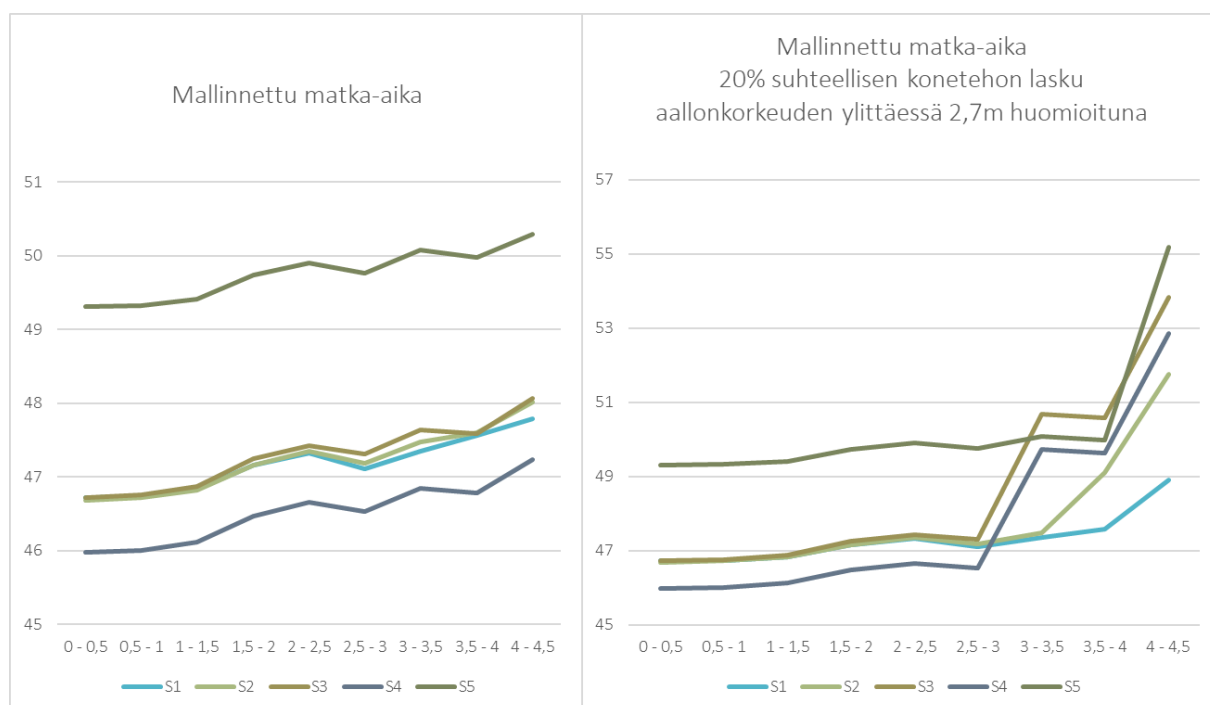
Kuva 13. Merkitsevä aallonkorkeus ja tuulennopeus reittien osuuksilla merialueen mukaan.

Matka-aikojen tarkastelussa havaitaan, että kyseisillä reiteillä ei saavuteta merkittäviä eroja sääolosuhteiden huomioidulla reitityksessä, mikäli käytetään yksinomaan regressiomallia (Kuva 14). Toisaalta havaitaan, että lyhyemmillä reittivalinnoilla voidaan saavuttaa merkittäviä säästöjä. Väinämeren kautta kulkeva reitti S5 on merkittävästi muita pidempi eikä sitä käytetä yleisesti kuin erikoistapauksissa, joissa voidaan esimerkiksi kiertää paikallisia voimakkaita matalapaineita. S4 puolestaan on lyhin reitti, ja sillä voidaan saavuttaa tyynessä säässä jopa 1,6 % ajallinen säästö verrattuna normaaliin reittijakojärjestelmien kautta kulkevaan reittiin S3. Pelkän regressiomallin mukaan lasketuissa matka-ajoissa ei juuri havaita suhteellista muutosta aallokon kasvaessa, joskin suojaisemmat reitit muuttuvat suhteessa hieman nopeammiksi. Erot ovat kuitenkin tässä mallissa hyvin pieniä.

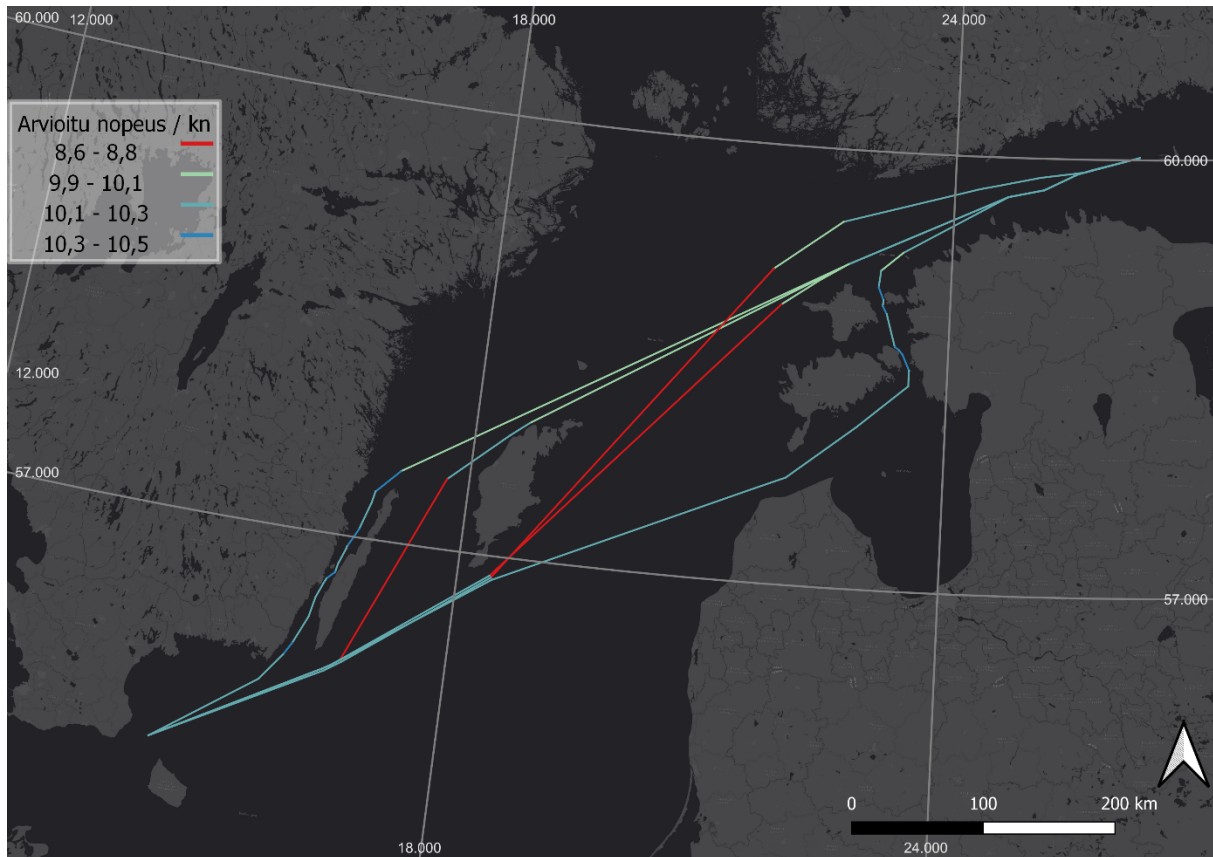
Todellisuutta kuvaa paremmin malli, jossa huomioidaan sään aiheuttamat käytännön vaikutukset. Vasta-aallokossa vauhtia joudutaan hidastamaan aluksen väkivaltaisen liikehdinnän vuoksi. Syitä ovat tyypillisesti pääkoneen kuumentuminen, etenkin täydessä lastissa, sekä potkurin nouseminen pintaan. Konetehoa lasketaan noin 20–25 % olosuhteista ja lastista riippuen. Matka-aikojen laskemiseen on käytetty rajana 2,7 m keulasta suuntautuvaa aallonkorkeuden momenttia ja 20 % suhteellisen konetehon laskemista. Tulokset antavat



realistisemmän kuvan matka-ajoista. Havaitaan, että kun aallonkorkeus referenssipisteellä ylittää 2.5 m, suojaisemmat reittivalinnat muuttuvat edullisemmiksi (Kuva 15). 3 m aallokossa Kalmar Sundin ja Gotlannin itäpuolen reitit S1 ja S2 ovat noin kaksi tuntia lyhyintä reittiä nopeampia. Käytännössä Kalmar Sundia käytetään vain pakottavassa tarpeessa luotsausmaksujen takia. Gotlannin itäpuolen reitti on Prima Queenilla reittivaihtoehdoista käytetyin. Laskennallisesti valinta on järkevä jo kohtuullisessa aallokossa. Erot ovat suurimmillaan 3 metrin aallokossa, jolloin Gotlannin itäpuoleinen reitti on jopa 4,7 % nopeampi. Erot kuitenkin tasaantuvat kovemmassa aallokossa, kun aallonkorkeus nousee myös Gotlannin ja mantereen välissä.



Kuva 14. Mallinnetut matka-ajat tunneissa aallonkorkeuden suhteen. Pelkkää regressiomallia hyödyntäen, vasen. Käytännön syistä johtuva hidastaminen kovassa aallokossa huomioituna, oikea.



Kuva 15. Aluksen arvioitu nopeus reittien eri osuuksilla aallokon ollessa referenssipisteellä 3–3.5 m. Nopeuden arvioimisessa on huomioitu suhteellisen konetehon laskeminen. (Taustakartta: Esri 2023)

## 5. Keskustelu

Tutkielman menetelmillä ja aineistoilla pystyttiin luomaan regressiomalli, joka kuvaa kiitettävästi aluksen nopeuden muutosta eri sääolosuhteissa. Aineiston rajallinen koko, ja etenkin myötääallokkotilanteiden puuttuminen rajoittaa kuitenkin merkittävästi mallin luotettavuutta sekä tarkkuutta. Mallin voidaan olettaa toimivan hyvin, mikäli aallokon suunta on aluksen keulan ja noin 90° sivulta väliltä. Myötääallokon vaikutukset nykyisessä mallissa perustuvat mahdollisimman hyvin kuvaavan funktion valintaan aiemman tutkimustiedon perusteella. Käytetyllä aineistolla ei pystytty myöskään luomaan mallia aluksen ollessa painolastissa, sillä kyseisistä tilanteista ei ollut dataa riittävän monipuolisista oloista. Yhden mallin tekeminen niin, että se kuvaisi kaikkia lastitilanteita ei myöskään ollut mahdollista, sillä olosuhteiden vaikutus eri muuttujiin vaihtelee aluksen syvyyden suhteen.

Mallin jäännöstä tarkasteltaessa havaitaan arvojen olevan välillä -0.75–0.62 solmua. Vaikka arvot ovatkin pieniä, on todennäköistä, että pienemmälläkin mittausajanjaksolla pystyttäisiin tuottamaan paremmin kuvaava malli. Käytetyssä aineistossa nopeuden mittaukset ovat pistemittauksia. Mikäli hetkellisen nopeuden sijaan käytettäisiin vastaavasti keskiarvoistettua nopeutta, pienemmästäkin aineistosta saataisiin poistettua hetkellisten nopeuden muutosten aiheuttamat erot. Etenkin kovassa aallokossa yksittäinen aalto voi vaikuttaa merkittävästi olosuhteille tyypillistä vaikutusta enemmän aluksen nopeuteen.

Eri alueiden sääolosuhteita tarkasteltiin tässä tutkielmassa vuoden aikajaksolla. Joskaan vuoden ajanjakso ei riitä antamaan todellista kuvaa alueen ilmastosta ja ääri-ilmiöistä, sen voidaan olettaa kuvaavan riittävällä tarkkuudella eri merialueille tyypillisiä sääolosuhteita verrattuna vastaavan hetken olosuhteita muissa tutkimusalueen osissa. Alueellisen tarkastelun tulokset ovat hyvin linjassa ilmatieteenlaitoksen vastaavalla metodologialla toteutettuun pidemmän aikajakson tarkasteluun (Tuomi 2011). Ilmatieteenlaitoksen tutkimus keskittyi talviajan olosuhteiden tarkasteluun, mutta antaa hyvän kuvan olosuhteiden alueellisesta jakaumasta tämän tutkielman alueella.

Polttoaineen kulutuksen ja nopeuden yhtälö on hyvin tyypillinen, ja samankaltaisen kuvaajan on todettu toimivan aluksen nopeuden ja kulutuksen yhtälönä aikaisemmin (Bialystocki 2016). Bialystockin artikkelissa ”On the estimation of ship’s fuel consumption and speed curve: A statistical approach” tarkastellaan hyvin vastaavilla menetelmillä suuremman, noin

200 m pitkän, autonkuljetus aluksen polttoaineenkulutusta. Tulokset ovat luonnollisesti eri skaalassa aluksen koon takia, mutta muuten yhtälöt ovat hyvin samankaltaisia.

Sääolosuhteiden vaikutusta alukseen tarkastellaan useimmiten joko aallonpituuden tai merkitsevän aallonkorkeuden näkökulmasta. Usein tarkastellaan keulasta ja perästä tulevaa aallokkoa, jolloin vaikutukset ovat mahdollisimman selkeät. Tutkielman mallin voidaan olettaa toimivan parhaiten 0–3 m vasta-aallokossa. Tällöin mallinnettu aluksen kulkunopeutta hidastava vaikutus olisi -1.2 solmua. Yhdessä vastaavien olosuhteiden tyypillisen tuulen vaikutuksen kanssa nopeus hidastuisi noin 1.4 solmua. Kim ym. (2017) vertailee artikkelissa ”Estimation of added resistance and ship speed loss in a seaway” tuulen ja aallokon vaikutuksia 175 m pitkään S175 konttialukseen. Artikkelissa verrataan laskennallisia 2-D ja 3-D nestedynaamisia menetelmiä aluksen kulkunopeuden muutokseen. Vastaavassa 3 m vasta-aallokossa konttialuksen nopeus hidastui noin 0.8 solmun, ja yhdessä tuulen kanssa nopeus hidastui noin 1.25 solmua. 175 m pitkän valtameriliikenteeseen suunnitellun aluksen voidaan olettaa suoriutuvan aallokossa pieniä rannikkorahtilaivoja paremmin, ja havaitaankin, että aallokon vaikutukset kyseisessä mallinnuksessa olivat hieman pienemmät. Muuten aallokon vaikutusten kuvaajat olivat kuitenkin hyvin vastaavia.

Prpić-Oršić ym. (2016) tarkastelevat myös sään vaikutuksia S175 konttialukselle, ja ottavat huomioon myös käytännötekijöihin perustuvan aluksen nopeuden hidastamisen. Myös S175 aluksella nopeuden hidastaminen aloitetaan hieman alle 3 m merkitsevässä aallonkorkeudessa. Vaikka S175 aluksen nopeus alkaa merkittävästi hidastua vasta yli 2 m aallonkorkeudessa, vastaa kuvaaja hyvin myös Prima Queenin käyttäytymistä. Vaikka Prima Queenin nopeus alkaa laskemaan jo aikaisemmin, nopeuden prosentuaaliset muutokset aallokon kasvaessa seuraavat samanlaista kaavaa. Sekä tämän tutkielman että Prpić-Oršić ym. käyttämä malli arvioi sivuaallokon vaikutuksen nopeuteen hyvin pieneksi. Tämä onkin hyvin todenmukainen tulos, mutta etenkin rannikkorahtilaivoissa kova sivuaallokko voi vaatia merkittävää aluksen suunnan muutosta, mikäli aallokko aiheuttaa alusturvallisuuden vaarantavaa rullausliikettä. Mikäli odotettavissa on kovaa sivuaallokkoa, tämä otetaan yleensä huomioon jo reittisuunnittelussa.

Sääolosuhteita arvioivan mallin tulokset ovat aina aluskohtaisia. Ei voida yksiselitteisesti arvioida mallin toimivuutta vertaamalla sitä erityyppisillä aluksilla tehtyihin malleihin. Mallin kokeileminen kenttäolosuhteissa olisi tärkeää tulosten validoinnin ja jatkokäsittelyn kannalta. Mallia voitaisiin myös edelleen tarkentaa, mikäli käytössä olisi laajempi aineisto erilaisista

olosuhteista. Tällöin voitaisiin myös tarkastella sääolosuhteiden vaikutusten eroja aluksen ollessa lastissa verrattuna tyhjän aluksen käyttäytymiseen.

Aikaisempi kirjallisuus perustuu tyypillisesti joko merkitsevän aallonkorkeuden, tai aallonpituuden analysointiin aluksen kulkua hidastavana tekijänä. Usein päädytään käyttämään analysoinnissa merkitsevää aallonkorkeutta, kuten tässä tutkielmassa. Myös aallonpituudella on kuitenkin suuri merkitys arvioitaessa aallokon todellista vaikutusta aluksen nopeuteen. Etenkin vasta-aallokossa noin aluksen mittainen aallokko hidastaa eniten aluksen nopeutta (Kim ym. 2017). Reittisuunnittelua tehtäessä käytetään tyypillisesti aallonkorkeutta, sillä aallonpituus ennuste ei ole yhtä yleisesti käytössä. Aallonpituus ennusteita on nykyään kuitenkin saatavilla kattavasti, ja mikäli sääreititys malli ottaisi sen huomioon, pystyttäisiin aluksen nopeuden arviointia tarkentamaan.

Tutkielman malli on tehty Prima Queen -alukselle, ja kuten todettu, sään vaikutukset aluksen kulkuun ovat hyvin aluskohtaisia. Tässä tutkielmassa tehdyn mallin aluksen kulkunopeudesta voidaan olettaa toimivan nimenomaan Prima Queenilla. Alus on kuitenkin tyypillinen rannikkorahtilaiva, ja voidaan olettaa, että kyseinen malli toimii kiitettävästi myös muilla vastaavan kokoluokan kuivarahtialuksilla sellaisenaan. Lisäksi tutkielmassa käytettyä metodologiaa voidaan suoraan soveltaa eri konealustyyppisiin lähes aluksesta riippumatta. Kaikki tutkielmassa käytetyt sääaineistot ovat vapaasti saatavilla, ja aluskohtaista liiketilatieta voidaan kerätä normaalin aluksen operoinnin yhteydessä, eikä se juuri aiheuta ylimääräistä työtä. Tämän tutkielman metodeilla voidaan siis tuottaa yksinkertainen sääreititykseen soveltuva malli aluksen kulusta eri olosuhteissa hyvin kustannustehokkaasti, jota käyttämällä voidaan saavuttaa merkittäviä ajallisia sekä polttoainetaloudellisia säästöjä.

Tutkielman mallin perusteella arvioitu polttoainesäästö oli parhaimmillaan noin 4.7 %. Armstrong (2013) arvioi sääreitityksen kokonaissäästöjen valtameriliikenteessä olevan noin 3 % pitkällä aikavälillä. Itämerenliikenteessä vastaaviin kokonaissäästöihin tuskin kuitenkaan päästään, sillä toisin kuin valtameriliikenteessä, Itämerellä matalapaineiden kiertäminen ei ole mahdollinen lähestymistapa, vaan sääreititys perustuu rannikon olosuhteita helpottavan vaikutuksen sekä paikallisten pienimuotoisten sääjärjestelmien hyödyntämiseen. Haastavissa olosuhteissa sääreitityksen vaikutukset ovat kuitenkin merkittäviä. Tutkielmassa tarkasteltiin yhtä Itämeren vilkkaimmista reiteistä Pietarin ja Bornholmin välillä. Itämerellä vastaavan sääreitityksen hyödyntäminen on usein mahdollista myös muilla reiteillä. Perämerellä ja Selkämerellä on esimerkiksi usein mahdollista valita suojanpuoleinen rannikko ja

Ahvenanmaan saaristossa saadaan lähes täydellinen suoja aallokolta. Myös Itämeren ulkopuolella vastaavaa lähestymistapaa voidaan hyödyntää etenkin kapeilla merialueilla ja saaristossa. Sääreitityksen merkitys tulee myös kasvamaan erityisesti Itämeren pohjoisosissa. Ilmaston lämpenemisestä johtuva merijään väheneminen mahdollistaa vapaamman navigoinnin alueilla (Meier ym. 2022). Lisäksi voidaan olettaa sään ääri-ilmiöiden, erityisesti tuulen ja aallokon osalta, yleistyvän alueella.

## 6. Johtopäätökset

Sääreititys on olennainen menetelmä merenkulun päästöjen ja kustannusten vähentämiseen myös Itämerellä. Toisin kuin monet muut päästövähennysmenetelmät, sääreititys ei vaadi uusia investointeja, vaan pätevän miehistön ja hyvät pohjatiedot aluksen käyttäytymisestä eri olosuhteissa. Itämeren sääreitityksessä reittivalintojen edullisuus perustuu reitin suojaisuuden ja pituuden suhteen arviointiin. Hyvien sääennusteiden avulla voidaan valita olosuhteiden mukaan nopein, turvallisin ja polttoainetaloudellisin vaihtoehto. Rannikkorahtilaivat ovat suurempia aluksia herkempiä sääolosuhteiden muutoksille, mutta Itämerellä pienempi syväys avaa myös mahdollisuuksia suojaisten reittien käyttöön.

Prima Queenilla aallokko on avovedessä eniten aluksen nopeuteen vaikuttava olosuhdetekijä. Vasta-aallokko hidastaa aluksen nopeutta eksponentiaalisesti. Kovan vasta-aallokon välttäminen on usein taloudellista, ja kovassa merenkäynnissä jopa välttämätöntä. Aluksen nopeutta joudutaan hidastamaan kovassa merenkäynnissä myös vapaaehtoisesti aluksen väkivaltaisen liikehdinnän ja koneteknisten syiden takia. Suojaiset reitit ovat kovassa vasta-aallokossa nopeampia. Prima Queenilla polttoaineen kulutus kasvaa myös aluksen suhteellista konetehoa nostettaessa, ja hitaammat matkanopeudet ovat polttoainetaloudellisimpia.

Aluksen liiketilaa ja sääolosuhteita tilastoimalla voidaan tuottaa aluskohtainen malli sääolosuhteiden vaikutuksista. Regressiomalli soveltuu sääreititykseen perustaksi.

## Lähteet

### Kirjallisuus

- Adland, R. & Jia, H. (2018) Dynamic speed choice in bulk shipping. *Maritime Economics & Logistics* 20 253–266. <https://doi.org/10.1057/s41278-016-0002-3>
- Admiralty = United Kingdom hydrographic office (2020) *The mariner's handbook*. United Kingdom hydrographic office, London
- Armstrong, V. (2013) Vessel optimisation for low carbon shipping. *Ocean Engineering* 73 195–207. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2013.06.018>
- Baltic Pilot* 2. 18. p. (2022) UK Hydrographical office, London
- Bialystocki, N. & Konovessis, D. (2016) On the estimation of ship's fuel consumption and speed curve: A statistical approach. *Journal of ocean engineering and science* 2 157-166. <https://doi.org/10.1016/j.joes.2016.02.001>
- Bowditch, N. (2002) *The American practical navigator*. 9. p. National imagery and mapping agency. Springfield.
- Cargo 2021 = Cargo throughput in Top 10 Baltic ports in 2021 – rebound after tough 2020 (2021) Port monitor. Gdynia
- Curve estimation (2022) IBM statistics 22.1.2023. < <https://www.ibm.com/docs/en/spss-statistics/29.0.0?topic=features-curve-estimation>>
- Grifoll, M., Boren, C. & Castells-Sanabra, M. (2022) A comprehensive ship weather routing system using CMEMS products and A\* algorithm. *Ocean Engineering* 255. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111427>
- Helsinki Commission (2018) *Maritime activities in the Baltic Sea*. Helsinki.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, B., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. & Thépaut J. (2020) The ERA5 global reanalysis. *Quarterly journal of the royal meteorological society* 146 1999-2049. <https://doi.org/10.1002/qj.3803>



International Maritime Organization (2022) IMO. 28.10.2022.

<<https://www.imo.org/en> >

*IMO ship routeing guide* (2017) HELCOM. 28.10.2022

<<https://metadata.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/60712fe9-ce1b-4fc6-b0b6-46e44f9bf134>>

Jandt-Scheelke, S., Panteleit, T., Verjovkina, S., Lagemaa, P., Spruch, L.,

Huess, V. & Hartman A. (2022) Baltic Sea physical analysis and forecasting product

balticsea\_analysisforecast\_PHY\_003\_006. Copernicus marine service. 11.1.2023

<<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-BAL-QUID-003-006.pdf>>

Jędrasik, J. & Kowalewski, M. (2019) Mean annual and seasonal circulation patterns and

long-term variability of currents in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems* 193 1-

26. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2018.12.011>

Kanarik, H. & Tuomi, L. (2022) Baltic Sea wave analysis and forecasting product

balticsea\_analysisforecast\_WAV\_003\_010. Copernicus marine service. 19.12.2022 <

<https://catalogue.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-BAL-QUID-003-010.pdf>>

Kim, K. & Roh, M. (2020) ISO 15016:2015-Based method for estimating the fuel oil

consumption of a ship. *Journal of Marine Science and Engineering* 10.

<https://doi.org/10.3390/jmse8100791>

Kim, M., Hizir, O., Turan, O., Day, S. & Incecik, A. (2017) Estimation of added resistance

and ship speed loss in a seaway. *Ocean engineering*. 141. 465-476.

<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.06.051>

Komornicki, T. & Spiekermann, K. (2018) Accessibility of the Baltic Sea region past and

future dynamics. VASAB. Dortmund

Lee, H., Aydin, N., Choi, Y., Lekhavat, S. & Irani, Z. (2018) A decision support system for

vessel speed decision in maritime logistics using weather archive big data. *Computers*

*& Operations Research* 98. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2017.06.005>.

Lo, H. & McCord, M. (1995) Routing through dynamic ocean currents: General heuristics

and empirical results in the Gulf Stream region. *Transportation research* 29(2) 109–

124. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(94\)00029-Y](https://doi.org/10.1016/0191-2615(94)00029-Y)

MAN Diesel & Turbo (2012) *Basic principles of ship propulsion*. Copenhagen

- Mao, W., Rychlik, I., Wallin, J. & Storhaug, G. (2016) Statistical models for the speed prediction of a container ship. *Ocean engineering* 126 152-162.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.08.033>
- Matulja, D., Sporelli, M., Guedes Soares, C. & Prpic-Orsic, J. (2011) Estimation of Added Resistance of a Ship in Regular Waves. *Brodogradnja* 62(3) 259–264.
- Meier, H. E. M., Kniebusch, M., Dieterich, C., Gröger, M., Zorita, E., Elmgren, R., Myrberg, K., Ahola, M. P., Bartosova, A., Bonsdorff, E., Börgel, F., Capell, R., Carlén, I., Carlund, T., Carstensen, J., Christensen, O. B., Dierschke, V., Frauen, C., Frederiksen, M., Gaget, E., Galatius, A., Haapala, J. J., Halkka, A., Hugelius, G., Hünicke, B., Jaagus, J., Jüssi, M., Käyhkö, J., Kirchner, N., Kjellström, E., Kulinski, K., Lehmann, A., Lindström, G., May, W., Miller, P. A., Mohrholz, V., Müller-Karulis, B., Pavón-Jordán, D., Quante, M., Reckermann, M., Rutgersson, A., Savchuk, O. P., Stendel, M., Tuomi, L., Viitasalo, M., Weisse, R. & Zhang, W. (2022) Climate change in the Baltic Sea region: a summary, *Earth System Dynamics* 13 457–593,  
<https://doi.org/10.5194/esd-13-457-2022>.
- Moreira, L., Vettor, R. & Guedes Soares, C. (2021) Neural Network Approach for Predicting Ship Speed and Fuel Consumption. *Journal of Marine Science and Engineering* 119.  
<https://doi.org/10.3390/jmse9020119>
- Myrberg, K., Leppäranta M. & Kuosa H. (2006) *Itäneren fysiikka, tila ja tulevaisuus*.  
 Yliopistopaino, Helsinki.
- Nonlinear Regression (2022) IBM statistics 22.1.2023. < <https://www.ibm.com/docs/bg/spss-statistics/25.0.0?topic=regression-nonlinear>>
- Olaniyi, E. & Prause, G. (2019) A Compliance cost analysis of the SECA regulation in the Baltic Sea. *Entrepreneurship and sustainability issues* 6.4.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.007>
- Olauson J. (2017) ERA5: The new champion of wind power modelling? *Renewable energy*. 126. 322-331. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.03.056>
- Perera L. & Soares C. (2017) Weather routing and safe ship handling in the future of shipping. *Ocean Engineering* 130. 684–695.  
<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2016.09.007>
- Prpić-Oršić, J., Vettor, R., Faltinsen, O.M. & Soares, C.O. (2016) The influence of route choice and operating conditions on fuel consumption and CO2 emission of ships. *Journal of Marine Science and Technology* 21, 434–457 (2016).  
<https://doi.org/10.1007/s00773-015-0367-5>

- Rautiainen, P (2023) Päällikkö, Prima Queen. Haastattelu Espoossa 5.2.2023 (L. Aakko).
- Tuomi, L., Kahma, K. & Petterson, H. (2011) Wave hindcast statistics in the seasonally ice-covered Baltic Sea. *Boreal Environment Research* 16. 451–472.  
<http://hdl.handle.net/10138/232826>
- Wackernagel, W. (2010) *Multivariate geostatistics*. 15-23. Springer. Berlin.
- Wei, R (2013) Views from Maritime Education and Training on the Full Implementation of 2010 STCW Amendments. *Journal of Shipping and Ocean Engineering* 3. 40-46.  
 <[https://www.researchgate.net/profile/Shigalla-Mahongo/publication/259865499\\_Investigating\\_the\\_effect\\_of\\_winds\\_and\\_storms\\_on\\_shoreline\\_erosion\\_along\\_the\\_coast\\_of\\_Tanzania/links/5c5bfdc045851582c3d4647f/Investigating-the-effect-of-winds-and-storms-on-shoreline-erosion-along-the-coast-of-Tanzania.pdf#page=45](https://www.researchgate.net/profile/Shigalla-Mahongo/publication/259865499_Investigating_the_effect_of_winds_and_storms_on_shoreline_erosion_along_the_coast_of_Tanzania/links/5c5bfdc045851582c3d4647f/Investigating-the-effect-of-winds-and-storms-on-shoreline-erosion-along-the-coast-of-Tanzania.pdf#page=45)>

### Asiakirja- ja aineistolähteet

- AIS passage line crossings by ship type* (2017) HELCOM, Helsinki. 25.11.2022  
 <<https://metadata.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/4987669b-262e-46ef-8800-3ccfb3b93313>>
- Aluksen reittisuunnittelu (26.09.2011 TRAFI/12134). 28.10.2022. <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>
- Aluksen vakavuus (21.12.2019 TRAFI/34001). 18.12.2022. <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>
- Alusten navigointilaitteet ja -järjestelmät (22.11.2012 TRAFI/16915). 1.11.2022.  
 <[www.traficom.fi](http://www.traficom.fi)>
- Asetus kansainvälisistä säännöistä yhteentörmäämisen ehkäisemiseksi merellä vuonna 1972 tehdyn yleissopimuksen voimaansaattamisesta. (18.7.1982/31) <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>
- Baltic Sea wave analysis and forecast (2012) Copernicus marine service, Finland. 19.12.2022  
<https://doi.org/10.48670/moi-00011>
- Esri (2023) Esri dark grey (base). 24.3.2023.  
 <<https://www.arcgis.com/home/item.html?id=a284a9b99b3446a3910d4144a50990f6>>
- Laki aluksen teknisestä turvallisuudesta ja turvallisesta käytöstä annetun lain muuttamisesta (29.12.2009/1686) <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>
- Laki laivaväestä ja aluksen turvallisuusjohtamisesta (29.12.2009/1687) <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>
- MV Prima Queen (2020) Prima Shipping, Porvoo. 18.12.2022 <<https://www.primas.fi/mv-prima-queen-3697/>>

*Subbasins of Baltic Sea* (2013) HELCOM, Helsinki. 4.2.2023

<<https://gis.ices.dk/geonetwork/srv/api/records/225df9db-bfdf-4388-8ccb-fa4b99053a36>>

*Traffic intensity* (2020) HELCOM, Helsinki. 25.10.2022.

<<https://metadata.helcom.fi/geonetwork/srv/eng/catalog.search#/metadata/2558244b-0cea-46e9-8053-af6ef5d01853>>

Vahdinpito aluksella (26.09.2011 TRAFI/16654). 1.11.2022. <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>

Voyage planning 1999 = International Maritime Organization (1999) Resolution A.893(21)  
Guidelines for voyage planning, London. 4.11.2022

<[https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893\(21\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.893(21).pdf)>

VesiliikenneL = Vesiliikennelaki (19.7.2019/782). 4.11.2013. <[www.finlex.fi](http://www.finlex.fi)>