

Casper Nykänen

YMPÄRISTÖSÄÄNTELYN VAIKUTUKSET ITÄMEREN MERENKULKUUN

Opinnäytetyö

Tekniikan ammattikorkeakoulututkinto

Ympäristöteknologian koulutus

2024



**Kaakkois-Suomen
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	Insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Casper Nykänen
Työn nimi	Ympäristösääntelyn vaikutukset Itämeren merenkulkuun
Toimeksiantaja	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu
Vuosi	2024
Sivut	41 sivua, liitteitä 3 sivua
Työn ohjaaja	Hanna Jylkkä

TIIVISTELMÄ

Merenkulun ympäristösääntely lähtee viemään merenkulkua kohti hiilineutraaliutta. Tavoitteena on vähentää merenkulun kasvihuonekaasupäästöjä asteittain ja lopulta saavuttaa vuoteen 2050 hiilineutraalius. Merenkulun polttoaineet ovat tällä hetkellä suureksi osaksi fossiilisia polttoaineita. Kuitenkaan fossiiliset polttoaineet eivät ole ratkaisu päästöjen vähentämisessä. Sen vuoksi vaihtoehtoiset polttoaineet nousevat nopeasti kiinnostuksen kohteeksi, kun aletaan pohtimaan ratkaisuja vähäpäästöisempään merenkulkuun.

Opinnäytetyön tutkimuskysymyksiä olivat seuraavat: ”mitä vaihtoehtoisia polttoaineita voitaisiin ottaa käyttöön merenkulussa” ja ”mitä vaikutuksia ympäristösääntelyllä on merenkululle”. Vastauksia näihin kysymyksiin lähdettiin työssä hakemaan kirjallisuuskatsauksen keinoin.

Työn teoriaosuudessa käytiin läpi kansainvälisen merenkulkujärjestön International Maritime Organization (IMO) ympäristösääntelyä ja EU:n ympäristösääntelyä koskien kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä. Lisäksi teoriaosuudessa käytiin läpi merenkulun päästöjä. Teoriaosuuden tieto koostettiin pääosin kirjallisuuskatsauksen keinoin. Opinnäytetyöhön haettiin tietoa myös kahden merenkulun parissa työskentelevän ammattilaisen haastatteluilla.

Opinnäytetyön toteutusvaiheessa huomattiin, että mahdollisuuksia päästöjen vähentämiselle ja vaihtoehtoisille polttoaineille on paljon. Työssä vaihtoehtoisia polttoaineita käytiin läpi onnistuneesti. Kuitenkin ympäristösääntelyn alkuvaiheissa voidaan todeta merenkulun alalla aistittavan epätietoisuutta siitä, mitkä ovat parhaat polttoaineratkaisut kenellekin.

Asiasanat: Vaihtoehtoiset polttoaineet, Kasvihuonekaasupäästöt, EU päästökauppajärjestelmä, FuelEU Maritime, IMO kasvihuonekaasustrategia 2023

Degree title	Bachelor of Engineering
Author (authors)	Casper Nykänen
Thesis title	Impact of environmental regulation on shipping in the Baltic Sea
Commissioned by	South-Eastern Finland University of Applied Sciences
Time	2024
Pages	41 pages, 3 pages of appendices
Supervisor	Hanna Jylkkä

ABSTRACT

Environmental regulation of maritime transport starts to push shipping towards carbon neutrality. The goal is to gradually reduce greenhouse gas emissions from shipping and eventually achieve carbon neutrality by 2050. Currently, marine fuels are largely fossil fuels. However, fossil fuels are not the solution to reducing emissions. When considering solutions for lower emission shipping, alternative fuels quickly become an area of interest.

The research questions of the thesis were as follows: What alternative fuels could be deployed in shipping and what impact does environmental regulation have on shipping. These were investigated by means of a literature review.

The theory part of the thesis covered the environmental regulation of the International Maritime Organisation (IMO) and EU environmental regulation regarding the reduction of greenhouse gas emissions. In addition, the theory section covered emissions from shipping. The theory section was mainly compiled by means of a literature review. Information was also collected through interviews with two professionals working in the maritime sector.

The implementation phase of the thesis showed that there are many opportunities for reducing emissions and alternative fuels. They were successfully reviewed in the thesis. However, in the early stages of environmental regulation, there is a sense of uncertainty in the shipping industry as to which are the best fuel solutions for each different use.

Keywords: Alternative fuels, Greenhouse gas emissions, EU emissions trading system, FuelEU Maritime, IMO greenhouse gas strategy 2023

SISÄLLYS

KESKEISET TERMIT JA LYHENTEET

1	JOHDANTO	6
2	MERENKULUN YMPÄRISTÖSÄÄNTELY	7
2.1	International Maritime Organization (IMO)	7
2.2	EU ympäristösäätely	9
2.2.1	EU:n päästökauppajärjestelmä	9
2.2.2	FuelEU Maritime	12
2.2.3	Energiaverodirektiivin uudistaminen	15
3	MERENKULUN PÄÄSTÖT	15
3.1	Kasvihuonekaasut	16
3.2	Rikkipäästöt	17
3.3	Hiukkaspäästöt	18
3.4	Elinkaariaikaiset kasvihuonekaasupäästöt	20
4	AINEISTO JA MENETELMÄT	22
5	TULOKSET	22
5.1	Vaihtoehtoiset polttoaineet	22
5.1.1	LNG	25
5.1.2	Vety	26
5.1.3	Ammoniakki	27
5.1.4	Metanoli	28
5.1.5	Biopolttoaineet	29
5.1.6	Polttoaineet merenkulun eri segmenteissä lyhyellä ja pitkällä aikavälillä	30
5.2	Ympäristösäätelyn vaikutus Suomen ja Itämeren merenkulkuun	31
6	JOHTOPÄÄTÖKSET	32
	LÄHTEET	35
	LIITTEET	

Keskeiset termit ja lyhenteet

IMO – International Maritime Organization (Kansainvälinen merenkulkujärjestö)

MEPC - Marine Environment Protection Committee (Meriympäristönsuojelukomitea)

EU – European Union (Euroopan unioni)

ETS – Emissions Trading System (Päästökauppajärjestelmä)

GWP – Global Warming Potential (Lämmityspotentiaali)

SECA-alue – Sulphur Emission Control Area (Itämeren rikkioksidien rajoitusalue)

Well to Wake ("WtW") – Päästöjen arviointi, joka ottaa huomioon polttoaineen koko elinkaariaikaiset päästöt

Well to Tank ("WtT") – Päästöjen arviointi, joka ottaa huomioon tuotantoaikaiset päästöt tuotantoineen ja kuljetuksineen laivan tankkiin (ei huomioi polttoaineen käytöstä aiheutuvia päästöjä)

Tank to Wake (TtW") – Päästöjen arviointi, joka huomioi polttoaineen käytöstä aiheutuvat päästöt (ei huomioi tuotanto aikaisia päästöjä)

IEA – International Energy Agency (Kansainvälinen energiavirasto)

Ro-ro alus – Tarkoittaa alusta, jossa kuormaaminen tapahtuu aluksen sivusta, perästä tai reunasta rullaamalla tyypillisesti ajoneuvoilla, jolloin ei tarvita nostureita kuormaamiseen

Ropax alus – Ro-ro alus tyyppinen alus, joka on matkustaja ja rahtilaivan yhdistelmä

1 JOHDANTO

Vuonna 2015 solmittiin Pariisin ilmastopimus, jonka tavoitteena on rajoittaa ilmastonlämpeneminen korkeintaan 1,5 °C:een. Pariisin ilmastopimuksen mukaisesti kaikki maailman maat ovat yhdessä sitoutuneet vähentämään ilmastonlämpenemistä. (Pariisin sopimus: EU:n... s.a.) Pariisin ilmastolain mukaisesti EU:ssa laadittiin niin kutsuttu fit for 55 -paketti, jonka tavoitteena on sitoa kaikki toimialat vähentämään kasvihuonekaasujen nettopäästöt 55 % vuoteen 2030. Euroopassa ilmastoneutraalius on tavoitteena saavuttaa vuoteen 2050. Täten myös merenkulku on mukana kuljettaessa kohti hiilineutraaliutta, kun fit for 55 -paketti asettaa myös merenkululle omat velvoitteensa. (Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen s.a.) Myös koko maailman kattavaa globaalia merenkulkua lähdetään viemään kohti hiilineutraaliutta, kun kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO asetti tavoitteensa vähäpäästöisemmälle merenkululle vuoden 2023 kasvihuonekaasustrategiassa. (IMO 2023.)

Vaihtoehtoisilla polttoaineilla potentiaali päästöjen vähentämiseen on valtava, jonka vuoksi ne kiinnostavat ja ovat seuraava askel puhtaampaan merenkulkuun. Kuitenkin vaihtoehtoisten polttoaineiden osalta eletään selkeää murrosvaihetta ja ei tiedetä, mitkä ovat parhaat vaihtoehdot meriteollisuuden eri segmenteille lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Vähäpäästöiset alukset, -teknologiat ja aluksien muokkaaminen niin, että ne kykenevät käyttämään jotain vähäpäästöisempää polttoainetta, on hyvin kallista. Lisäksi tällaisiin investointeihin liittyy suuri riski, kun tulevaisuuden kehityssuunta on avoin. Ei tiedetä, mitä vaihtoehtoisia polttoaineita tulevaisuudessa on missäkin tarjolla ja mikä polttoaine tulevaisuudessa olisi kustannustehokkain, kun kuljetaan kohti hiilineutraaliutta. (Hellström ym. 2024, 1.)

Työn teoriaosuudessa käydään läpi IMO:n ja EU ympäristösääntelyn tavoitteita ja toimenpiteitä tavoitellessa vähäpäästöisempää merenkulkua. Lisäksi teoriaosuudessa käydään läpi päästöjä, joita merenkulusta syntyy. Työn tarkoituksena oli lähteä selvittämään, mitä vaihtoehtoisia polttoaineita tulevaisuudessa voitaisiin käyttää merenkulussa fossiilisten polttoaineiden sijaan. Toisena opinnäytetyön tavoitteena oli selvittää, mitä vaikutuksia käsitellyllä ympäristölainsäädännöllä on Itämeren merenkululle.

2 MERENKULUN YMPÄRISTÖSÄÄNTELY

2.1 International Maritime Organization (IMO)

Merenkulkua ohjaa kansainvälinen merenkulkujärjestö International Maritime Organization (IMO), joka on yhdistyneiden kansakuntien erityisjärjestö. Siihen kuuluu 175 jäsenvaltiota. (Member States, IGOs... s.a.) Suomi valittiin merenkulkujärjestön IMO:n 40 jäsenmaan neuvostoon vuosille 2024–2025. Näin ollen Suomi on kansainvälisesti vahvasti mukana kehittämässä merenkulkua. (Valtioneuvosto 2023.) Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO:n tehtävä on luoda tasapuoliset ja oikeudenmukaiset toimintaedellytykset, jotka ovat tehokkaita, yleisesti hyväksytyt ja osapuolten toteuttamat. Merenkulkujärjestö IMO vastaa ja kehittää merenkulun turvallisuudesta ja ehkäisee merenkulusta aiheutuvaa ympäristön saastumista. IMO kannustaa maiden toimintaa kehittymään, tehostumaan ja kohti innovaatioita. (Introduction to IMO s.a.) IMO:n MARPOL 73/78-yleissopimus liitteineen muodostaa kulmakiven merenkulun ympäristönsuojelua koskevalle lainsäädännölle (Suomen Varustamot s.a.).

Vuonna 2018 merenkulkujärjestö IMO:n meriympäristön suojelukomitea hyväksyi suunnitelmat alustavista kasvihuonekaasustrategian päästövähennystavoitteista. Tällöin kansainvälisen merenkulun tavoitteeksi asetettiin hiilidioksidipäästöjen vähentäminen vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 2008 tasoon verrattuna. Vuoteen 2050 hiilidioksidipäästöjen vähennystavoite asetettiin 70 % vuoden 2008 tasoon verrattuna. Kansainvälisestä merenkulusta aiheutuvien kasvihuonekaasupäästöjen vähennystavoite kokonaisuudessaan asetettiin 50 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon. (2018 Initial IMO Strategy s.a.)

Vuonna 2023 IMO päivitti kasvihuonekaasustrategiaa merkittävästi kunnianhimoisemmaksi. Tavoitteeksi asetettiin kansainvälisesti kasvihuonekaasupäästötön merenkulku vuoteen 2050. (Väylävirasto 2023, 36–37.) Tämän lisäksi kasvihuonekaasustrategiassa tavoitellaan parantamaan alusten energiatehokkuutta koskevia suunnitteluvaatimuksia, jolloin alusten hiili-intensiteetti eli hiilidioksidipäästöjen määrä kuljetustyötä kohti laskee. Lisäksi kansainvälisen merenkulun liikenteen hiilidioksidipäästöjen määrän vähentämistavoite asetettiin vähintään 40 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 2008 tasoon verrattuna.

Myös kasvihuonekaasujen osalta nolla- tai lähes nollapäästöisten teknologioiden, polttoaineiden ja/tai energialähteiden käyttöönottoaminen merenkulussa asetettiin tavoitteeksi niin että näiden edustus olisi vähintään 5 % käytetystä energiasta merenkulun osalta vuoteen 2030 mennessä. Pyrkimys olisi päästä jopa 10 %:n luokkaan. (IMO 2023.)

Lisäksi IMO otti käyttöön vuoden 2023 kasvihuonekaasustrategiassa ohjeelliset tarkastuspisteet vuosille 2030 ja 2040, jotka viitoittavat kulkua kohti vuoden 2050 kasvihuonekaasujen nollapäästöisyyttä. Nämä ohjeelliset tarkastuspisteet näkyvät taulukossa 1. (IMO 2023.)

Taulukko 1. IMO:n kasvihuonekaasujen vähennystavoitteet vuoden 2008 tasoon verrattuna (IMO 2023; Väylävirasto 2023, 36)

Kasvihuonekaasujen vähentäminen	Vähintään	Pyrkimys
(Ohjeellinen tarkastuspiste) 2030	20 %	30 %
(Ohjeellinen tarkastuspiste) 2040	70 %	80 %
2050	100 %	100 %

On selvää, että IMO:n vuoden 2023 kasvihuonekaasustrategian tavoitteita ei saavuteta fossiilisten polttoaineiden avulla. Tämän vuoksi IMO:n on syytä lähteä ajamaan merenkulkua konkreettisin toimin kohti vähäpäästöisyyttä. Tarvitaan investointeja vaihtoehtoisiiin polttoaineisiin ja vähäpäästöisiin teknologioihin. Päästöttömistä aluksista on saatava merenkulussa halutumpia ja lainsäädännön on ohjattava niiden käyttöönottoon. (IMO 2023.) Keväällä 2024

IMO:ssa käydään parhaillaan neuvotteluita siitä, millä toimenpidemääräyksin kansainvälistä merenkulkua lähdetään viemään kohti IMO:n asettamia kasvihuonekaasustrategian 2023 tavoitteita. Neuvotteluissa on alustavasti puhuttu globaalista polttoainestandardista, mutta sen yksityiskohdista ei ole vielä päätetty. Myös jonkinlainen kasvihuonekaasuhinnoittelumekanismi eli taloudellinen ohjauskeino kasvihuonekaasuille merenkulussa on noussut neuvotteluissa esille mahdolliseksi toimenpiteeksi. Kuitenkaan konkreettisista toimista ei vielä ole päätetty. Keväällä 2025 MEPC 83 kokouksessa toimet virallisesti otetaan osaksi MARPOL 73/78-yleissopimusta. Näiden toimien on sitten määrä astua voimaan vuonna 2027. (Björkendahl 2024.)

2.2 EU ympäristösääntely

Vuonna 2019 Euroopan komissio aloitti Euroopan vihreän kehityksen ohjelman (Green Deal), jonka tavoite on Euroopan vihreä siirtymä (Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a.). Euroopan komissio esitti 14.7.2021 ehdotuksen fit for 55 -paketista (Aikajana – Euroopan... s.a.). Fit for 55 -paketti on laaja kokonaisuus lainsäädäntöehdotuksia, joiden tavoite on sitoa kaikki Euroopan taloudelliset toimialat kohti ilmastoneutraaliutta. Euroopan vihreän kehityksen ohjelman ja sen sisältämän fit for 55 -paketin tavoitteena on kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 päästöihin verrattuna ja hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. (Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen s.a.) Näin ollen fit for 55 -paketti koskettaa myös merenkulkua. Sen merkittävimmät vaikutukset ovat merenkulun liittymisen osaksi EU:n päästökauppajärjestelmää, Fuel Eu Maritime -asetus ja mahdollinen energiaverodirektiivin uudistaminen. (Björkendahl s.a.)

2.2.1 EU:n päästökauppajärjestelmä

EU:n päästökauppajärjestelmä (ETS) on toiminut vuodesta 2005 alkaen. Se on käytössä EU maissa sekä Norjassa, Islannissa ja Liechtensteinissa. (What is the EU... s.a.) Päästöjä EU ETS on vähentänyt sitä käyttävillä toimialoilla noin 41 % järjestelmän käyttöönoton jälkeen (55-valmiuspaketti: EU:n... s.a.). Sen toiminta on jaettu neljään vaiheeseen ja nyt on menossa EU ETS:n neljäs vaihe 2021–2030 (Development of... s.a.). Tällä hetkellä EU ETS sisältää noin 40 % EU:n kokonaispäästöistä (What is the EU... s.a.). Kuitenkin fit for 55 -paketin myötä EU päästökauppajärjestelmästä tehdään kunniahimoisempi ja myös meriliikenne liitetään osaksi sitä (55-valmiuspaketti s.a.). Euroopan parlamentti ja neuvosto antoi 10.5.2023 direktiivin (EU) 2023/959, joka määrää päästökauppaan liittyvien Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2003/87/EY ja Euroopan parlamentin ja neuvoston päätöksen (EU) 2015/1814 muuttamisesta. Direktiivin (EU) 2023/959 velvoitteet huomioitiin hyväksytyssä Suomen hallituksen esityksessä HE 71/2023. Nyt Suomen päästökauppaan liittyvästä lainsäädännöstä määrää ajantasaisen päästökauppadiirektiivin mukainen päästökauppalaki 1270/2023, joka annettiin Helsingissä 28.12.2023. (Traficom 2023.)

Tiivistettynä EU:n päästökauppajärjestelmän tarkoitus on vähentää kasvihuonepäästöjä, niin että päästön aiheuttaja on velvollinen maksamaan aiheuttamistaan päästöistä. Päästökauppajärjestelmä toimii cap and trade -periaatteen mukaisesti. Kasvihuonekaasuille asetetaan vuosittain päästökatto, jonka verran toimialat voivat kokonaisuudessaan aiheuttaa kasvihuonepäästöjä. Vuosittain päästökattoa alennetaan niin, että EU:n ilmastotavoitteet täyttyvät. Päästökatto kattaa siis tietynmäärän päästöoikeuksia. Yksi päästöoikeus tarkoittaa oikeutta yhden hiilidioksidiekvivalentitonin suuruiseen päästömäärään. (What is the EU... s.a.) Hiilidioksidiekvivalentti on suure, jonka yksikönä käytetään hiilidioksidiekvivalenttonnia. Hiilidioksidiekvivalentti on suurena hyvä, koska kaikki kasvihuonekaasupäästöt voidaan muuntaa lämmityspotentiaalikertoimen avulla ekvivalenttiseksi hiilidioksidiksi. (Ilmakehä ABC... s.a.)

EU:n päästökauppajärjestelmän neljännessä vaiheessa 2021–2030 päästöoikeudet lasketaan pääasiassa markkinoille huutokauppaamalla ne. Huutokauppa tapahtuu EU:n yhteisessä huutokauppapaikassa ja Suomen osuuden huutokauppaamisesta vastaa Energiavirasto. (Energiavirasto s.a.) Varsinaisen huutokaupan toteuttaa kolmesti viikossa Saksassa toimiva pörssi European Energy Exchange (Päästöoikeuksien huutokauppa. s.a.). Energiaviraston tehtävänä on vastata Suomelle kuuluvista huutokauppatuloista ja niiden tulouttamisesta valtiolle (Päästökauppalaki 28.12.2023/1270, 44. § mom. 2). Suomelle kuuluvia huutokauppatuloja vastaava summa tulee käyttää päästökauppalain 1270/2023 liitteen IV mukaisesti ja näistä tulee raportoida vuosittain Euroopan komissiolle (Päästökauppalaki 45. § mom. 1 & 2). Suomi sai vuoden 2023 päästökaupan huutokaupoista tuloja yhteensä 581,6 miljoonaa euroa (Energiavirasto 2023). Päästöoikeuksien markkinoille laskemisen jälkeen voidaan niistä käydä kauppaa koko Euroopan kattavilla markkinoilla. Kauppaa päästöoikeuksista voi käydä pörssissä sekä pörssin ulkopuolella. (Päästökauppa s.a.)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin (EU) 2023/959 mukaisesti meriliikenne liitettiin EU:n päästökauppaan 1.1.2024 alkaen (Traficom 2023). Merenkulun osalta muutos tapahtuu asteittain. Päästökaupan piiriin kuuluvat bruttovetoisuudeltaan vähintään 5 000 GT alukset, jotka kuljettavat rahtia tai

matkustajia kaupallisessa tarkoituksessa. Vuodesta 2024 alkaen meriliikenteen osalta päästökauppaan kuuluvat hiilidioksidipäästöt. Vuodesta 2026 alkaen mukana ovat myös metaani ja dityppioksidipäästöt. Lisäksi vuodesta 2027 alkaen bruttovetoisuudeltaan vähintään 5 000 GT:n offshore-alukset ovat mukana päästökaupassa. (Traficom 2023; Päästökauppalaki 8. § mom. 1 & 2.) Päästöoikeudet tulee palauttaa 50 % sellaisten matkojen päästöistä, jotka syntyvät jäsenvaltioiden lainkäyttövaltaan kuuluvien käyntisatamien ja maiden, jotka eivät jäseniä eli lainkäyttövaltaan kuulumattomien käyntisatamien välillä. Puolestaan päästöoikeudet tulee palauttaa 100 %, mikäli aluksen matka alkaa sekä päättyy Euroopan unionin jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvasta käyntisatamasta. Myös Euroopan unionin jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvassa käyntisatamassa syntyvien päästöjen päästöoikeudet tulee palauttaa 100 %. (Päästökauppalaki 8. §.) Näin ollen päästökattojärjestelmä kattaa kaikkien EU:n satamaan tulleiden yli 5 000 GT:n alusten päästöt vähintään 50 %:a riippumatta siitä, minkä lipun alla ne ovat (Reducing emissions... s.a.). Mikäli aluksen jääluokka on I A Super tai I A, tarvitsee päästöoikeuksia palauttaa 5 % vähemmän vuoteen 2030 mennessä Päästökauppalain 73. §:n palauttamisvelvollisuudesta poiketen. Laivayhtiön palautusvelvollisuutta koskevat muut poikkeukset koskien muun muassa syrjäisempiä alueita ja alle 200 000 asukkaan saaria on kerrottu Päästökauppalain 75. §:ssa. (Päästökauppalaki 75. §.) Päästökauppalain 73. §:n mukaan päästöjen päästöoikeuksia aloitetaan palauttamaan laivayhtiön alusten osalta taulukon 2 mukaisesti. Taulukossa 2 päästöoikeuksien palautus (%) tarkoitetaan sitä määrää päästöistä, joihin tarvitaan päästöoikeudet.

Taulukko 2. Päästöoikeuksien palautus (%) merenkulun siirryttäessä osaksi EU ETS:ää (Päästökauppalaki 73. §)

Vuosi	2024	2025	2026
Päästöoikeuksien palautus (%)	40	70	100

Laivayhtiöiden ja muiden päästökauppaan kuuluvien toiminnanharjoittajien tulee palauttaa joka vuosi syyskuun loppuun edellisen kalenterivuoden päästöjä vastaava määrä päästöoikeuksia (Päästökauppalaki 73. § mom. 1). Mikäli päästöoikeuksia ei palauteta syyskuun loppuun mennessä, on laivayhtiön maksettava valtiolle päästöoikeuden ylitysmaksu, joka on 100 euroa jokaista

palauttamatonta hiilidioksidiekvivalenttitonnia kohti. (Päästökauppalaki 92. § mom. 2 & 3.) Mikäli laivayhtiö ei täytä ilman pätevää syytä päästöoikeuksien palauttamisvelvoitteita kahdella tai useammalla perättäisellä raportointikaudella eli syyskuun viimeinen päivä, voi liikenne- ja väylävirasto antaa laivayhtiölle karkotusmääräyksen. Karkotusmääräys poistuu välittömästi, kun velvoitteet on täytetty. (Päästökauppalaki 98. § mom. 1.)

2.2.2 FuelEU Maritime

Euroopan parlamentti ja neuvosto antoi 13.9.2023 asetuksen (EU) 2023/1805, uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käytöstä meriliikenteessä sekä direktiivin 2009/16/EY muuttamisesta. Kun kyseessä on asetus, on laki voimassa kaikissa EU:n jäsenmaissa heti sen antamisen jälkeen (EU-lainsäädännön... s.a.). FuelEU Maritime asetuksen tavoitteena on lisätä uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käyttöä ja kysyntää. Toimilla tavoitellaan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä merenkulussa. FuelEU Maritime -asetuksen varsinainen uusi sääntely alkaa 1.1.2025. Kuitenkin FuelEU Maritime -asetuksen eli (EU) 2023/1805 asetuksen artikloja 8 ja 9, jotka koskevat aluksen seurantasuunnitelmaa sovelletaan jo 31.8.2024 alkaen (Eurooppa-neuvosto 2023). Laivayhtiön on toimitettava 31.8.2024 mennessä jokaisen aluksen seurantasuunnitelma, jonka sisällöstä on määrätty artiklassa 8 (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 8. §). Asetuksessa (EU) 2023/1805 vahvistetaan yhdenmukaiset säännöt, joilla säädetään seuraavista asioista. ”Jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvaan satamaan saapuvalla, siellä olevalla tai sieltä lähtevällä aluksella käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteetin enimmäisraja; ja velvoite käyttää maasähköä (OPS) tai päästötonnä teknologiaa jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvissa satamissa.” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 1. §.)

Asetusta sovelletaan lippuvaltiosta riippumatta kaikkiin matkustajia tai rahtia kaupallisesti kuljettaviin aluksiin, joiden bruttovetoisuus on yli 5 000 tonnia. Asetusta sovelletaan seuraavien kohtien 1–4 osalta. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 2. §.)

1. ”jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvassa käyntisatamassa aluksen käynnin aikana käytetty energia” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 2. §)

2. ”kaikki energia, joka käytetään matkalla jonkin jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvasta käyntisatamasta jonkin jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvaan käyntisatamaan” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 2. §)

3. ”sen estämättä, mitä kohdassa 2 säädetään, puolet energiasta, joka käytetään jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvalla syrjäisimmällä alueella sijaitsevaan käyntisatamaan saapuvilla tai sieltä lähtevillä matkoilla” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 2. §)

4. ”puolet energiasta, joka käytetään jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvaan käyntisatamaan saapuvilla tai sieltä lähtevillä matkoilla, jos edellinen tai seuraava käyntisatama kuuluu kolmannen maan lainkäyttövaltaan”. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 2. §)

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) 2023/1805 4 artiklan mukaan aluksissa käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteettiä tulee laskea seuraavasti. 2 prosenttia 1.1.2025 mennessä, 6 prosenttia 1.1.2030 mennessä, 14,5 prosenttia 1.1.2035 mennessä, 31 prosenttia 1.1.2040 mennessä, 62 prosenttia 1.1.2045 mennessä, 80 prosenttia 1.1.2050 mennessä. Taulukossa 3 esitetty kasvihuonekaasuintensiteettiraja saadaan vähentämällä vuotuinen prosenttiosuus vertailuarvosta 91,16 grammaa hiilidioksidiekvivalenttia megajoulea (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805 4. §).

Taulukko 3. Vuotuiset kasvihuonekaasuintensiteettirajat gCO₂e/M (DNV 2023; Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805 4. §)

Vuosi	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Vähennelmä (%)	2	6	14,5	31	62	80

Kasvihuonekaasuintensiteettiraja (gCO _{2e} /MJ)	89,3	85,7	77,9	62,9	34,6	18,2
---	------	------	------	------	------	------

Aluksella käytetty energian kasvihuonekaasuintensiteetti tarkoittaa kasvihuonepäästöjen määrää hiilidioksidiekvivalentti grammoina suhteessa aluksella käytettyyn energiamäärään, joka ilmoitettu megajouleissa (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 3. § 19. kohta). Laskentamenetelmä aluksella käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteetistä on esitetty asetuksen (EU) 2023/1805 liitteessä 1.

Velvoitteesta käyttää maasähköä tai päästötöntä teknologiaa on määrätty seuraavaa. "Asetuksen (EU) 2023/1804 9. §:n soveltamisalaan ja jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluvassa käyntisatamassa laituriin kiinnitettynä olevan aluksen on 1 päivästä tammikuuta 2030 lähtien kytkeydyttävä maasähköön ja käytettävä sitä kaikkeen sähkötehon tarpeeseensa kiinnityspaikassa." Lisäksi "Asetuksen (EU) 2023/1804 9. §:n soveltamisalaan kuulumattomassa käyntisatamassa, joka kuuluu jäsenvaltion lainkäyttövaltaan, laituriin kiinnitettynä olevan aluksen on 1 päivästä tammikuuta 2035 lähtien kytkeydyttävä maasähköön ja käytettävä sitä kaikkeen sähkötehon tarpeeseensa kiinnityspaikassa, jos laiturissa on käytettävissä oleva maasähkön syöttö." Mikäli satama ei kuulu asetuksen (EU) 2023/1804 9. §:n soveltamisalaan, mutta on jäsenvaltion lainkäyttövaltaan kuuluva satama, voi 1 päivän tammikuuta 2030 ja 31 päivän joulukuuta 2034 välisenä aikana jäsenvaltio asianomaisineen päättää, että sen käyntisatamassa tai tietyissä osissa tätä satamaa laituriin kiinnitetyn aluksen kytkeydyttävä maasähköön ja käytettävä sitä kaikkeen sähkötehon tarpeeseensa kiinnityspaikassa. Maasähkönkäyttö ei koske aluksia, jotka käyttävät päästötöntä teknologiaa. Asetuksen (EU) 2023/1805 6. §:ssa on säädetty tarkemmin edellä käsitellyn maasähkön käytön soveltamisaloista. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 6. §.)

"Jäsenvaltioiden on säädettävä tämän asetuksen säännösten rikkomiseen sovellettavista seuraamuksista ja toteutettava kaikki tarvittavat toimenpiteet niiden täytäntöönpanon varmistamiseksi". Näistä ja myöhemmin tulleista muutoksista tulee ilmoittaa Euroopan komissiolle. (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, 25. §.) Suomessa hallitus esittelee FuelEU Maritime -asetuksesta tulevat muutokset merenkulun ympäristösuojelulakiin

esityksessään syksyllä 2024. Tämän osalta sääntely olisi oltava valmis vuoden 2024 loppuun. (Merenkulun ympäristösuojelulain... s.a.)

2.2.3 Energiaverodirektiivin uudistaminen

Osana fit for 55 -pakettia tarkastellaan myös voimassa olevaa energiaverotusdirektiiviä ja sen muutostarvetta, jotta energiatuotteidenverotus on yhdenmukainen EU:n energia- ja ilmastopolitiikan kanssa. Energiaverotuksen muutoksen tarkoituksena olisi korottaa verotusta enemmän saastuttavien polttoaineiden osalta. Täten kaikkein eniten saastuttavia polttoaineita (hiili, kaasu ja öljy) verotettaisiin eniten. Meriliikenteen osalta polttoaineiden vähimmäisverokantoja kiristettäisiin asteittain kymmenen vuoden ajan. Kestävien polttoaineiden osalta vähimmäisverokanta olisi nolla. Vähimmäisverokanta päivittyisi vuosittain Eurostatin kuluttajahintojen perusteella. (55-valmiuspaketti: miten EU... s.a.) Verotusta olisi tarkoitus soveltaa EU:n sisäiseen rahti- ja matkustajaliikenteeseen (Björkendahl s.a.) Kuitenkin fit for 55 -paketin yhteydessä on yhä ehdotus uudistaa energiaverotusdirektiiviä ja asettaa merenkulun polttoaineet verotuksen alaiseksi. Jotta ehdotus tulisi voimaan se edellyttäisi kaikkien EU 27 jäsenmaiden täysmääräistä yhteisymmärrystä, jota ei ole ainakaan vielä saavutettu. (Björkendahl 2024.)

3 MERENKULUN PÄÄSTÖT

Merenkulusta aiheutuu monenlaisia päästöjä, jotka ovat eritavoin haitaksi ympäristölle. Kun puhutaan merenkulun päästöistä, tarkoitetaan usein pakokaasupäästöjä. Pakokaasupäästöillä tarkoitetaan päästöjä, jotka syntyvät laivojen moottoreiden polttoaineen polttamisesta. Merenkulusta aiheutuvia pakokaasupäästöjä ovat hiilidioksidi (CO₂), typen oksidit (NO₂ ja NO₃), rikkidioksidi (SO₂) ja pienhiukkaset. (Tapaninen 2019, luku 10.1: Logistiikka ja ympäristövaikutukset.) Lisäksi voimakkaana kasvihuonekaasuna tunnettu metaani pääsee vapautumaan ilmakehään pakokaasupäästöjen mukana (Altarriba ym. 2022, 31). Muita merenkulusta aiheutuvia ympäristövaikutuksia ovat päästöt sekä jätteet mereen, melu ja eliöiden leviäminen alusten mukana uusiin merialueisiin (Tapaninen 2019, luku 10.1: Logistiikka ja ympäristövaikutukset). Opin- näytetyön sisältö päästöjen osalta koskettaa pääasiassa kasvihuonekaasuja, sillä nykyinen uusi lainsäädäntö tavoittelee nimenomaan kasvihuonepäästöttö-

myyttä merenkulussa sekä muilla toimialoilla. Merenkulun päästöt kappaleessa kasvihuonekaasujen lisäksi kerrotaan rikkipäästöistä ja pienhiukkaspäästöistä.

3.1 Kasvihuonekaasut

Kaikki kasvihuonekaasut sitovat lämpöä ilmakehään, jonka vuoksi ne aiheuttavat ilmastonlämpenemistä (Overview of... s.a.). Kasvihuonekaasut siis absorboivat eli sitovat energiaa ja hidastavat energian siirtymistä pois ilmakehästä avaruuteen (Understanding Global... s.a.). Ilmaston lämpenemisen kannalta merkittävimpiä pitkäaikaisia kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO_2), metaani (CH_4) ja dityppioksidi (N_2O) (Kasvihuonekaasut. s.a.). Niistä kaikkia syntyy merenkulusta. Kuitenkin merkittävin osa merenkulun kasvihuonepäästöistä on hiilidioksidipäästöjä. (Väylävirasto 2023, 35.) Kasvihuonekaasujen vaikutuksia ilmastonlämpenemiseen voidaan vertailla GWP:n avulla. GWP ottaa huomioon kasvihuonekaasun kyvyn sitoa energiaa ja eliniän ilmakehässä. GWP-arvo kertoo, kuinka paljon kasvihuonekaasu voi sitoa energiaa tietyn ajanjakson aikana verrattuna hiilidioksidiin. Kasvihuonekaasuja vertaillessa GWP:ssä käytetty aika on usein 100 vuotta. Hiilidioksidin GWP-arvo on aina 1 ja sitä suuremmat arvot kertovat, kuinka moninkertainen vaikutus ilmastonlämpenemiseen toisella kasvihuonekaasulla on verrattuna hiilidioksidiin tarkastellun ajanjakson aikana. (Understanding Global... s.a.)

Hiilidioksidia on luonnostaan ilmakehässä ja se on osa luonnollista hiilen kiertokulkua. Kuitenkin ihminen toiminnallaan vaikuttaa hiilen kiertokulkuun lisäämällä hiilidioksidin määrää sekä vaikuttamalla luonnollisten hiilinielujen kykyyn varastoida ja poistaa hiilidioksidia pois ilmakehästä. Kun ilmakehään syntyy hiilidioksidia, voi sen elinikä ilmakehässä olla tuhansia vuosia. Osa hiilidioksidista sitoutuu taas nopeammin esimerkiksi valtameriin tai maaperään. Merenkulun osalta merkittävin syy hiilidioksidi ja muille kasvihuonekaasupäästöille on fossiilisten polttoaineiden käyttäminen meriliikenteen polttoaineena. Palaessaan fossiiliset polttoaineet, kuten kivihiili, maakaasu ja öljy vapauttavat ympäristöön hiilidioksidipäästöjä. (Overview of... s.a.)

Metaani on hajuton, ilmaa keveämpi ja hyvin voimakas kasvihuonekaasu. (Altarriba ym. 2022, 31). Metaanin GWP-arvo on 28, kun tarkasteltu ajanjakso on

100 vuotta. Näin ollen yhden tonnin metaani päästöjen vaikutus ilmastonlämpenemiseen on noin 28 kertaa suurempi kuin yhden tonnin hiilidioksidi päästöjen vaikutus sadan vuoden mittaisen ajanjakson aikana. (Understanding Global... s.a.) Metaanin elinikä ilmakehässä on noin 12 vuotta, joka on merkittävästi lyhyempi aika kuin hiilidioksidilla. Mitä lyhyempää ajanjaksoa tarkastellaan, sitä suurempi vaikutus metaanilla on hiilidioksidiin verrattuna ilmastonlämpenemisessä. Mikäli tarkastellaan noin 20 vuoden ajanjaksoa, on metaanin GWP noin 85 kertaa suurempi verrattuna hiilidioksidiin. (Altarriba ym. 2022, 31.) Ihmisen toiminnasta metaania vapautuu maataloudesta, kaatopaikoilta, jätevesien puhdistamoilta ja fossiilisten polttoaineiden valmistuksesta ja käytämisestä. Meriliikenteessä metaanipäästöt ovat kasvaneet, kun nesteytetty maakaasu (LNG) on yleistynyt laivojen polttoaineena. Metaania vapautuu, kun se palaa epätäydellisesti moottorissa. LNG-laivoissa juuri epätäydellisen palamisen seurauksena metaanipäästöjä pääsee vapautumaan pakokaasujen mukana ilmakehään. (Altarriba ym. 2022, 31.) Merenkulussa metaanivuotoa voi tapahtua polttoaineen käsittelyn, varastoinnin sekä käytön aikana.

Dityppioksidi eli typpioksiduuli on hiilidioksidin ja metaanin tapaan pitkäaikainen kasvihuonekaasu. Dityppioksidin elinikä ilmakehässä on noin 114 vuotta. (Overview of... s.a.) Dityppioksidin GWP arvo on 265, kun tarkasteltu ajanjakso on 100 vuotta. Näin ollen yhden tonnin dityppioksidi päästöjen vaikutus ilmastonlämpenemiseen on noin 265 kertaa suurempi kuin yhden tonnin hiilidioksidi päästöjen vaikutus sadan vuoden mittaisen ajanjakson aikana. Dityppioksidi on siis erittäin voimakas kasvihuonekaasu. (Understanding Global... s.a.) Hiilidioksidin tapaan dityppioksidia syntyy merenkulussa polttoaineena käytettyjen fossiilisten polttoaineiden palaessa. Päästöjen määrä riippuu useista tekijöistä kuten polttoaineesta, polttotekniikasta, huollosta ja toimintatavoista. (Overview of... s.a.)

3.2 Rikkipäästöt

Merenkulussa rikkiyhdiste (SO_x) päästöt ovat suurelta osin rikkidioksidi (SO_2) päästöjä. Rikkidioksidi on väritön voimakkaasti haiseva kaasu, joka ärsyttää ihmisen hengityselimiä sekä silmiä. (Altarriba ym. 2022, 27.) Rikkidioksidi on siis ilmanlaatua heikentävä tekijä ja haittaa ihmisen terveyttä. Se on veteen

helposti liukeneva ja aiheuttaa vesien ja maaperän happamoitumista. (Tapaninen 2019, luku 10.1: Logistiikka ja ympäristövaikutukset.) Kun ilmakehässä rikkidioksidi pääsee liukenemaan pilvissä vesipisaroihin, syntyy happosateita. Rikkiyhdisteistä syntyvät happosateet voivat ilmetä hyvin kaukana varsinaisesta päästölähteestä. Happosateista aiheutuva happamoituminen on haitaksi luonnon ekosysteemeille. Polttoaineen sisältämät rikkiyhdisteet aiheuttavat merenkulun rikkipäästöt, kun tällaisia rikkipitoisia polttoaineita poltetaan. (Altarriba ym. 2022, 27.) IMO määrää kansainvälisen yleissopimuksen liitteessä kuusi (Marpol Annex VI) rikin oksidien päästöistä (Marpol Annex VI s.a.). Rikkipäästöt tuli laskea aiemmin voimassa olleesta 1 %:n tasosta 0,1 %:n tasolle 1.1.2015 alkaen SECA-alueilla, johon Itämeri, Pohjanmeri ja Englannin kanali alueineen kuuluvat (DSV s.a.; Marpol Annex VI s.a.). Näiden alueiden ulkopuolella rikkipäästöjen enimmäistaso laskettiin aiemmasta 3,5 %:n tasosta 0,5 %:n tasolle 1.1.2020 alkaen (Marpol Annex VI s.a.).

Hiilidioksidin ja typen oksidien tavoin myös rikkidioksidi (SO_2) on pakokaasupäästö. Pakokaasupäästöille olennaisesti rikkipäästöjä voidaan vähentää polttoaineen kulutuksen vähentämisellä, katalysaattoreilla ja ympäristöystävällisemmällä polttoaineilla. Lisäksi merenkulun osalta rikkipesureita voidaan hyödyntää rikkipäästöjen vähentämiseksi. (Tapaninen 2019, luku 10.1: Logistiikka ja ympäristövaikutukset.) Rikkipesureiden avulla on ollut mahdollista käyttää yhä polttoaineita, jotka lähtökohtaisesti ylittävät enimmäisrajat rikkipitoisuudelle (Altarriba ym. 2022, 27). Kuitenkin rikkipitoisuusrajojen myötä alukset, joissa ei käytetä rikkipesureita ovat siirtyneet käyttämään mm. kevyitä tisle-polttoöljyjä MGO:ta (marine gas oil) tai MDO:ta (marine diesel oil). Myös vähärikkinen jäännöspolttoöljy ja Nesteytetty maakaasu (LNG) ovat olleet vaihtoehtoina rikkipitoisuusrajojen saavuttamiseksi. (Altarriba ym. 2022, 14.)

3.3 Hiukkaspäästöt

Hiukkasmaiset ilmansaasteet ovat äärimmäisen haitallisia ihmisten terveydelle. Kehittyneissä maissa hiukkasmaiset ilmansaasteet aiheuttavat vakavia terveyshaittoja ihmisille enemmän kuin muut ympäristötekijät yhteensä. (Ilmansaasteet s.a.) Vuonna 2020 pienhiukkasista, jotka ylittävät vuoden 2021 Maailman terveysjärjestön (WHO) ohjetason aiheutui ennenaikaisia kuolemia

238 000 EU:n 27 jäsenvaltiossa. Vuoteen 2030 mennessä tavoitteena on vähentää pienhiukkasista johtuvien ennenaikaisten kuolemien määrää 55 %:lla vuoden 2005 tasoon verrattuna. Vuoden 2020 taso (238 000) on onnistunut vähentämään kyseistä lukemaa jo 45 % vuoteen 2005 verrattuna. (European Environment Agency 2022.) Hiukkaspäästöt aiheuttavat haittaa hengityselimistölle sekä sydän- ja verenkiertoelimistölle. Näiden osalta erityisesti riskiryhmään kuuluville henkilöille hiukkaspäästöt voivat aiheuttaa merkittävää haittaa. Hiukkasille ei ole kyetty määrittämään alarajaa, jonka jälkeen terveyshaittaa ei enää aiheutuisi. Kuitenkin pitkäaikaisen altistuminen tiedetään lisäävän riskiä terveyshaittaan merkittävästi. (Pienhiukkasten vaikutusmekanismit s.a.)

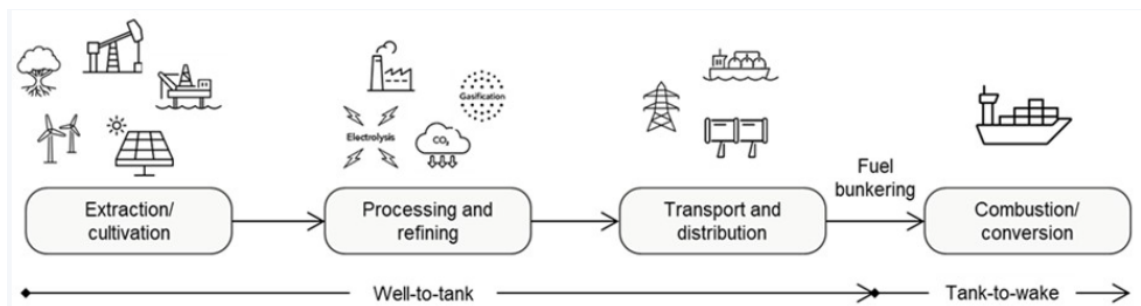
Hiukkaspäästöt luokitellaan usein niiden koko luokan mukaan. Hiukkaset luokitellaan hengitettäviin hiukkasiin (PM_{10}), pienhiukkasiin ($PM_{2,5}$) ja ultrapieniin hiukkasiin ($PM_{0,1}$). Hiukkasluokittelussa hiukkasen PM_x alaindeksi x kertoo hiukkasten koon ylärajan mikrometreinä (μm). (Altarriba ym. 2022, 28.) Lähtökohtaisesti pienempi hiukkaskoko on haitallisempi ihmisen terveydelle, sillä se pääsee tunkeutumaan syvemmälle ihmisen elimistöön (Safera s.a.). Merenkulussa syntyvistä pakokaasuista aiheutuu monen kokoisia hiukkaspäästöjä ympäristöön. Hiukkaspäästöt ovat sitä haitallisempia, mitä lähempänä ne syntyvät ihmistä. Näin ollen hiukkaspäästöt eivät ole niin haitallisia avomerellä syntyessään verrattuna, mikäli ne syntyisivät asutettujen paikkojen ja satamien läheisyydessä. Arvioitaessa hiukkaspäästöjen haitallisuutta tulee huomioda, että hiukkaset voivat kulkeutua pitkiäkin matkoja ilmajvirtausten mukana. Täten maantieteellinen sijainti ja liikenteen määrä ovat merkittäviä arvioitaessa hiukkasten haittaa, vaikka ne syntyisivät kauempana ihmisistä. (Altarriba ym. 2022, 29.)

Merenkulussa alusten moottoreista aiheutuvat hiukkaspäästöt syntyvät jo polttoaineen palamisprosessin aikana tai, kun pakokaasut pääsevät laimenemaan ilmakehään (Ilmatieteen laitos 2021). Kun palaminen on epätäydellistä, voi syntyä palamattomia polttoainejakeita, jotka voivat olla ominaisuuksiltaan hyvin erilaisia. Tällaiset niin kutsutut palamattomat hiilivedyt voivat olla haihtuvia VOC-yhdisteitä tai puolihaihtuvia SVOC-yhdisteitä. Ne voivat olla myös muita hiukasmaisia päästökomponentteja. (Altarriba ym. 2022, 28.) Yksi merkittävistä merenkulun pienhiukkaspäästöistä on musta hiili (epäorgaaninen hiili),

jota syntyy hiilivetyjen epätäydellisessä palamisessa. Musta hiili on lyhytaikainen kasvihuonekaasu, jolloin se sitoo muiden kasvihuonekaasujen tapaan lämpöä itseensä. Tämän lisäksi se vaikuttaa ilmastonlämpenemiseen maan pinnalla, erityisesti arktisilla alueilla. Arktisilla alueilla lumi ja jää heijastavat lähtökohtaisesti lämpöä pois. Kun mustan hiilen hiukkaset pääsevät maahan, ne sulattavat lumen ja jään, jolloin maan pinta imee itseensä auringonvaloa. Myös musta hiili on terveydelle haitaksi. (Altarriba ym. 2022, 29.) Tällä hetkellä merenkulun mustan hiilen päästöistä ei varsinaisesti säädellä ympäristölainsäädännössä. Kuitenkin vuonna 2021 MEPC hyväksyi päätöslauselman, jossa jäsenvaltioita kehoitetaan eri keinoin vähentämään mustan hiilen päästöjä arktisilla alueilla ja niiden läheisyydessä. (IMO 2021.) Joka tapauksessa musta hiili- ja muut hiukkaspäästöt vähenevät, kun muita merenkulun päästöjä koskeva ympäristölainsäädäntö ajaa kohti ympäristöystävällisempiä polttoaineita ja niiden käyttöä (Altarriba ym. 2022, 30).

3.4 Elinkaariaikaiset kasvihuonekaasupäästöt

Vaihtoehtoisia polttoaineita ja niiden vähäpäästöisyyttä tarkasteltaessa on tärkeää kiinnittää huomiota polttoaineen koko elinkaaren aikaisiin kasvihuonekaasupäästöihin. Puhutaan niin sanotusta well to wake -periaatteesta, jossa huomioidaan kasvihuonekaasupäästöt polttoaineen koko elinkaaren ajalta kuvan 1 mukaisesti sisältäen muun muassa alkutuotannon, kuljetukset ja käyttämisen aluksen polttoaineena. Mikäli huomioidaan vaan tank to wake -päästöt eli polttoaineen käyttämisestä aluksessa aiheutuvat päästöt, ei arvioida todellisia kasvihuonekaasupäästöjä, joita polttoaineen käyttäminen aiheuttaa. (Zamboni ym. 2024, 2.) Kuvassa 1 on havainnollistettuna mistä koostuu polttoaineen well to wake -päästöt.



Kuva 1. Polttoaineen elinkaariaikaiset päästöt (Guidelines on life cycle... s.a.)

IMO:n kaavailemassa uudessa polttoainestandardissa tarkoituksena olisi ottaa huomioon nimenomaan kasvihuonekaasupäästöt koko elinkaaren ajalta. (Intersessional Working... s.a.) Myös EU:n vuonna 2025 alkava polttoainestandardi FuelEU Maritime huomioi polttoaineen elinkaariaikaiset kasvihuonekaasupäästöt, kun tarkastellaan aluksen kasvihuonekaasuintensiteettiä tasoa. (DNV 2023.) Tarkoittaa käytännössä siis samaa kuin hiilijalanjälki, kun puhutaan koko elinkaaren aikaisista kasvihuonekaasupäästöistä hiilidioksidiekvivalenteissa (OpenCO2.net s.a.).

Kun tarkastellaan FuelEU Maritime -asetuksen eli Euroopan parlamentin ja neuvoston asetuksen (EU) 2023/1805 liitettä II, voidaan tehdä havaintoja polttoaineiden elinkaariaikaisista päästöistä oletuspäästökertoimien avulla. Myös tämän opinnäytetyön liitteistä löytyy liite 1, jossa näkyy suurin osa edellä mainitun FuelEU Maritime -asetuksen mukaisista polttoaineiden oletuspäästökertoimista. Kyseiset päästökertoimet ovat oleellinen osa, kun lasketaan FuelEU Maritime -asetuksen mukaista aluksella käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteettiä. Pienempi päästökerroin viittaa pienempiin päästöihin kasvihuonekaasujen osalta. Täten myös FuelEU Maritime -asetuksen mukainen kasvihuonekaasuintensiteetti taso on pienempi, kun polttoaineen päästökertoimet ovat pienemmät. Kyseisen FuelEU Maritime -asetuksen oletuspäästökertoimet ovat niin sanotusti kahdessa osassa. Alkutuotannon aikaiset well to tank (WtT) -päästökertoimet ovat yksikössä gCO₂eq/MJ ja polttoaineen varsinaisen käytön aikaiset tank to wake (TtW) -päästökertoimet ovat yksikössä gGHG/gFuel. Tank to wake -päästökertoimet ovat eriteltynä liitteen 1 taulukossa hiilidioksidi, metaani ja dityppioksidipäästöihin.

Liitteestä 1 voidaan havaita, että fossiilisin keinoin tuotettuna vedyn ja ammoniakkin well to tank -päästökertoimet ovat hyvin korkeat. Vedyn WtT lukeman ollessa 132 gCO₂eq/MJ ja ammoniakkin vastaavan lukeman ollessa 121 gCO₂eq/MJ. Fossiilinen tuotantotapa nostaa myös metanolin WtT aikaiset kasvihuonekaasupäästöt korkeaksi sen arvon ollessa 31,3 gCO₂eq/MJ. Liitteen 1 taulukon mukaisesti vastaava well to tank -oletuspäästökerroin lukema perinteisimpien fossiilisten polttoaineiden eli HFO:n, LFO:n, MGO:n ja MDO:n osalta on 13,2–14,4 gCO₂eq/MJ välillä. Mikäli tulevaisuuden polttoaineina pidetyt vety, ammoniakki ja metanoli on tuotettu harmaasti eli fossiilisin keinoin, eivät ne anna hyötyä vähentääkseen päästöjä. Ei siis riitä, että polttoaineen

tank to wake kasvihuonekaasupäästöt jäävät pieniksi tai jopa nollatasolle, mikäli niiden tuotantoaikaiset well to tank päästöt ovat korkeat. Näin ollen vaihtoehtoisten polttoaineratkaisujen osalta on äärimmäisen tärkeää kiinnittää huomio niiden koko elinkaariaikaisiin päästöihin eli toimia well to wake -periaatteen mukaisesti, jotta hiili-intensiteetti taso todellisuudessa laskee. Jotta säävutetaan pienemmät päästöt, polttoaineen tuotannon pitäisi olla siis vihreää.

4 AINEISTO JA MENETELMÄT

Tietoa vaihtoehtoisista polttoaineista selvitettiin opinnäytetyössä kirjallisuuskatsauksen keinoin. Aineistoa etsittiin Science Direct ja Google Scholar -tiedonhakupalveluiden avulla. Lisäksi opinnäytetyössä tulosten etsimiseen käytettiin Googlea. Hakuja tehtiin suomeksi ja englanniksi. Tietoa haettiin muun muassa seuraavin hauin: alternative fuels, alternative fuels and shipping, well to wake and shipping/fuel. Lisäksi tietoa haettiin vaihtoehtoisista polttoaineista käyttäen hakusanoina vaihtoehtoisen polttoaineiden nimiä suomeksi sekä englanniksi. Aineisto pyrittiin rajaamaan niin, että se on ajankohtaista. Opinnäytetyössä tieteellisten tekstien lähdeaineisto pyrittiin rajaamaan hauissa vuosille 2021–2024. Lisäksi työskentelyn aikana pyrittiin löytämään käytetyille lähteille tukevaa tietoa ja vertailemaan näitä keskenään.

Työn aikana haastateltiin kahta merenkulun parissa työskentelevää ammattilaista. Haastateltavina olivat Suomen varustamot RY:n merenkulun ympäristöasioiden ja alustekniikan erityisasiantuntija Mats Björkendahl ja Wasalinen brändi, viestintä ja kestävän kehityksen johtaja Catarina Fant. Haastatteluissa kysymykset eivät olleet samoja vaan ne olivat kohdennettu haastateltaville erikseen. Haastatteluiden tarkoitus oli olla osa tiedonhankintaa kirjallisuuskatsauksen rinnalla. Ympäristösääntelyn vaikutukset kappale on pääasiassa koottu Mats Björkendahlin kanssa käydyn haastattelun perusteella.

5 TULOKSET

5.1 Vaihtoehtoiset polttoaineet

Ympäristösääntely ajaa Euroopan osalta merenkulkua jo suht nopealla aikavälillä muuttumaan, sillä vuodesta 2025 alkaen alusten tulee EU:n FuelEU

Maritime -asetuksen myötä laskea kasvihuonekaasuintensiteettiä. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että enää ei voida toimia pelkkiä fossiilisia polttoaineita käyttäen. Näin ollen alusten on käytettävä myös puhtaampia energiamuotoja sen mukaan, miten FuelEu Maritime -asetus kiristää kasvihuonekaasuintensiteettiä. Näin ollen laivayhtiöt joutuvat käyttämään esimerkiksi osittain uusiutuvaa polttoainetta fossiilisen polttoaineen seassa tai rinnalla. Myös maasähkön käyttö satamissa alentaa aluksen kasvihuonekaasuintensiteettiä. (Björkendahl 2024). Lisäksi laivayhtiöiden tulee maksaa EU:ssa alustensa aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä, kun merenkulku liittyy osaksi päästökauppaa ETS vuodesta 2024 alkaen. Näiden toimenpiteiden myötä laivayhtiöiden tulee reagoida ja pohtia, mikä on heidän strategiansa tiukkenevan lainsäädännön kanssa. Taulukossa 4 on esitetty kansainvälisen energiaviraston IEA:n näkemys merenkulun polttoaineiden osuuksista tulevaisuuden merenkulussa.

Taulukko 4. IEA:n arvio energian osuuksista loppukulutuksessa tulevaisuuden merenkulussa (IEA 2023)

Merenkulku vuonna	2022	2030	2035	2050
Kansainvälisen merenkulun määrä (triljoonaa tonnakilometriä)	125	145	165	265
Osuus energian loppukulutuksesta:				
Biopolttoaineet	0 %	8 %	13 %	19 %
Vety	0 %	4 %	7 %	19 %
Ammoniakki	0 %	6 %	15 %	44 %
Metanoli	0 %	1 %	1 %	3 %

Kansainvälisen energiaviraston IEA:n analyysien ja selvitysten mukaan ammoniakilla olisi taulukon 4 mukaan vuoteen 2050 mennessä suht merkittävä noin 44 %:n markkinaosuus tulevaisuuden merenkulussa. IEA:n mukaan myös biopolttoaineet ja vety nähdään tulevaisuuden merenkulun energian käytössä merkittävinä lähteinä. Kansainvälisen energiaviraston näkemyksiä tarkasteltaessa, on erityisen tärkeä huomioida, että se kattaa koko globaalin meriliikenteen. (IEA 2023.) Joka tapauksessa on muistettava, että laivayhtiöiden kannalta polttoaineen toimivuuden lisäksi tärkeintä on polttoaineen saatavuus

ja sen hinta. Sen vuoksi maantieteellinen sijainti vaikuttaa merkittävästi tulevaisuuden polttoaineratkaisuihin. Eri puolilla maailmaa mahdollisuudet polttoaineiden tuottamiseen eivät ole samat. IEA:n arvion mukaan metanolin osuus tulevaisuudessa olisi melko marginaalinen. Mats Björkendahlin mukaan metanoli voisi kuitenkin olla hyvä vaihtoehto Itämeren lähimeriliikenteessä. Täällä metanoli voisi tulla olemaan jopa merkittävässä asemassa merenkulussa. Meillä pohjoismaissa on paljon biogeenistä hiilidioksidia, jota vapautuu esimerkiksi paperi ja selluloosa tehtaista. Tai sitten vihreällä vedyllä voitaisiin valmistaa sähköistä e-metanolia. (Björkendahl 2024.) Suomessa toimivaa Wasalinen alusta Aurora Botniaa voidaan pitää tämän hetken maailman ympäristöystävällisimpänä Ropax-aluksena. Se pystyy käyttämään käyttövoimanaan nesteytettyä maakasua LNG:tä, Biokaasua ja satamissa maasähköä. Lisäksi käyttövoimana voidaan käyttää perinteistä meridieselä. Haastattelussa Catarina Fantin kanssa kävi ilmi, että Wasalinen tavoitteena olisi saavuttaa hiili-neutraalius jo vuoteen 2030. Lisäksi Fant kertoi, että Wasaline on muutaman yhteistyökumppaninsa kanssa alkanut tutkimaan nimenomaan e-metanolia ja sen mahdollisuutta käyttövoimaksi Aurora Botnia aluksessa. (Fant 2024.)

Mahdollisuuksia polttoaineiden suhteen on paljon, kun lähdetään kulkemaan kohti vähäpäästöisempää merenkulkua. Taulukossa 5 on esitettyinä potentiaallisia vaihtoehtoja tulevaisuuden polttoaineiksi, joiden lisäksi taulukossa mukana mahdollistamaan vertailua fossiilinen ”perinteisempi meridiesel” MGO (marine gas oil).

Taulukko 5. Vaihtoehtoiset polttoaineet tulevaisuuden merenkulussa

Polttoaine	MGO	LNG	Nesteytetty vety	Nesteytetty ammoniakki	Metanoli	Biodiesel (HVO)
GHG päästövähennys potentiaali	-	max n. 20–30 % /8/.	mahdollisuus nollapäästöihin /4; 8/.	mahdollisuus nollapäästöihin /4; 8/.	Vähähiilisyys tai nettohiili-neutraalius /8; 9/.	n. 90 % /10/.
LHV (MJ/KG)	42,8 /2/.	48,6 /2/.	120 /1/.	19 /1/.	19,9 /2/.	44 /6; 7/.
Energiatiheys (MJ/l)	36,6 /1; 2/.	20,8 /2/.	8,5 /1/.	12,7 /1/.	15,8 /1; 2/.	34 /7/.
Varastointi lämpötila °C		-162 /4/.	-253 /5/.	-33,4 /4/.		

Säiliön koko (suh- teessa MGO)	1	n. 3–4 /3/.	7,6 /1/.	4,1 /1/.	2,3 /1/.	Hieman suurempi /10/.
Taulukon tiedot: 1. (Cames ym. 2021) 2. (The Engineering ToolBox s.a.) 3. (Harris ym. 2022) 4. (Popek 2024) 5. (Tukes. 2024) 6. (Hunicz ym. 2020) 7. ((EU) 2018/2001) 8. (Hellström 2024) 9. (IRENA 2021) 10. (Shell. s.a.)						

Seuraavissa luvuissa 5.1.1–5.1.6 kerrotaan taulukon 5 vaihtoehtoisista polttoaineista ja niiden soveltuvuudesta merenkäynnille.

5.1.1 LNG

Vaihtoehtoisista polttoaineista LNG eli nesteytetty maakaasu on noussut suosituksi polttoaineeksi merenkulussa, vaikka se onkin fossiilinen polttoaine (Väylävirasto 2023, 37). Polttoaineena LNG vähentää rikin oksidien (SOx) päästöt sekä hiukkaspäästöt nollaan. Lisäksi typpioksidipäästöt (NOx) vähenvät jopa 85 % ja hiilidioksidipäästöt reilut 20 % verrattuna perinteisiin merenkulun fossiilisiin polttoaineisiin. (Gasum 2021.) Kuitenkin LNG:n käytöstä aiheutuvat metaanivuodot eli metaanipäästöt voivat olla merkittäviä, mikä haittaa LNG:n kykyä vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Altarriba ym. 2022, 161). LNG:n suosion merenkulun polttoaineena voidaan sanoa nousseen, sen täyttäessä IMO:n Marpol Annex VI:n rajoitukset rikin oksidien sekä myös typpioksidien päästöistä (Popek 2024, 30–31). LNG säilötään noin -162 °C:ssa, jolloin se säilyttää nestemäisen olomuotonsa. Nesteytyksen avulla kaasun tilavuus saadaan pienennettyä noin 600 kertaisesti, mikä mahdollistaa sen kuljetukset, varastoinnin ja käytön laivojen polttoaineena. (Ignitis.fi 2023.)

Vaihtoehtoisia polttoaineita koskevia lähteitä tarkasteltaessa kävi selväksi, että LNG:tä pidetään niin sanottuna siirtymä polttoaineena, kun kuljetaan kohti hiilettömyyttä. Eli vaikka LNG mahdollistaa päästöjen vähentämisen tiettyyn pisteeseen saakka ja hyvän saatavuuden, ei sitä nähdä pitkän aikavälin ratkaisuna, sillä se ei mahdollista hiilestä irtautumista. (Popek 2024, 31–32.) Catarina Fant kertoi haastattelussaan, että aluksen käyttäessä pääasiassa polttoaineenaan LNG:tä, tulee tällaisten alusten osalta ostaa päästöoikeuksia jo vuo-

den 2024 aiheutettuihin päästöihin, vaikka vuodelta 2024 kasvihuonekaasupäästöistä merenkulun osalta ovat mukana vain 40 % hiilidioksidipäästöistä. (Fant 2024.) Näin ollen myös LNG polttoaineena kohtaa suht nopeasti paljon lisäkustannuksia päästökaupan ja polttoainestandardin FuelEU Maritimen kiristyksessä. Kuitenkin myös LNG:tä voidaan tuottaa ympäristöystävällisemmin. Tällöin tuotannon aikaiset päästöt jäävät jopa nollaan, mutta polttoaineena käytöstä aiheutuvat päästöt vastaavat fossiilisesti tuotetun LNG:n päästöjä (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805, liite 2). Uusiutuvalla sähköllä voidaan tuottaa e-LNG:tä (Lindstad ym. 2021, 1). Sen sijaan Bio-LNG:tä, joka tunnetaan myös nimellä LBG eli nesteytetty biokaasu voidaan tuottaa biokaasu -tuotantoprosessin avulla (Nordsol. 2023). Sekä e-LNG että bio-LNG toimivat perinteisen LNG:n kanssa sekoitettuna. Näin ollen valmis infrastruktuuri ja käyttöönotto olisi valmis näille yhä ympäristöystävällisemmille vaihtoehtojille, mikäli niiden tuotanto olisi mahdollista ja kannattavaa.

5.1.2 Vety

Vedyllä pystytään saavuttamaan polttoaineena nollapäästöt, kun se tuotetaan uusiutuvista lähteistä. Vety on väritön, hajuton, mauton, myrkytön ja suht reagoimaton kaasu. Kuitenkin vety on helposti syttyvää laajalla syttymisalueella. (Popek 2024, 27.) 1 bar paineessa (sama kuin ilmakehän paine) ja 25 °C:een lämpötilassa vedyn syttymisalue on 4–75 tilavuus-% (Tukes 2024, luku 5.2: Nestemäinen vety). Kuitenkin vety on ilmaa keveämpää, jolloin aluksen polttoainevuodon sattuessa kaasu nousee ja laimenee nopeasti ilmakehään, mikä vähentää syttymisen riskiä (Popek 2024, 27). Myöskään ilmaa kevyempänä ja suuren haihtuvuutensa takia vety ei aiheuta pilaantumista vesistöissä ja maaperässä. Kuitenkin suuri pitoisuus vetyä voi aiheuttaa hengittäessä tukehtumisen. (Tukes 2024, luku 1: Vety kemikaalina.)

Meriliikenteen polttoaineena nestemäinen vety voisi olla vaihtoehto ympäristöystävälliseksi polttoaineeksi. Vety olisi tuotettava elektrolyysin avulla uusiutuvasta energiasta, jotta sen elinkaariaikaiset päästöt jäisivät nollaan. (Popek 2024, 27.) Nestemäisen varastoinnin etuina ovat tilansäästö, vedyn korkea puhtausaste ja matalapaineisempi varastointi. Kuitenkin nestemäinen vety tulee säilyttää alle -253°C:n lämpötilassa, mikä tuottaa omat haasteensa. Kryo-geeniset olosuhteet (eli erittäin kylmät olosuhteet) vaativat paljon energiaa ja

erityisvaatimuksia säiliömateriaaleille. Materiaalien tulee kestää suurta lämpötilaeroa nestemäisen vedyn ollessa $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa ja ympäristön ollessa esimerkiksi jopa $+30\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Lisäksi nestemäisen vedyn varastoinnin riskinä on niin kutsuttu boil-off ilmiö eli nestemäisen vedyn höyrystyminen, jossa höyrystynyt vety pääsee ilmakehään ja energiaa menee hukkaan. Höyrystyminen voi tapahtua monien eri tekijöiden vuoksi eikä sitä pystytä kokonaan estämään. Kuitenkin se pystytään rajoittamaan 0,1 % toimivilla säiliöratkaisuilla. (Tukes 2024, luku 5.2: Nestemäinen vety.) Lisäksi vedyn yksi suurista haasteista on sen alhainen energiatiheys tilavuuteen nähden, jonka vuoksi se vaatii paljon varastointi ja tankkitilaa, mikä laivoissa vie tilaa pois muulta kuljetustilalta (Zamboni ym. 2024, 5–6). Vaikka vety on valtava mahdollisuus hiilineutraalille merenkäynnille, vaatii se yhä tarkempaa tutkimusta tuotannon, varastoinnin, kuljetusten ja aluksissa polttoaineena käyttämisen osalta (Rydman 2023).

5.1.3 Ammoniakki

Myös ammoniakki on potentiaalinen vaihtoehtoinen polttoaine, kun tavoitteinaan nollapäästöisyyttä (Popek 2024, 28). Ammoniakkia tuotetaan useimmiten HaberBosch -menetelmällä, jossa typpi ja vety reagoidessaan muodostavat ammoniakkia. Ammoniakkia tuottaessa nimenomaan vedyn tuottaminen vaikuttaa suuresti tuotantoaikaisiin hiilidioksidipäästöjen määrään. Ympäristöystävällinen tapa tuottaa vihreän ammoniakin vety on jo aiemmin mainittu veden elektrolyysi vihreällä eli uusiutuvalla sähköllä. (Zamboni ym. 2024, 5.) Mikäli ammoniakki tuotetaan kivihiilestä ja öljystä elinkaariaikaiset ympäristövaikutukset ovat jopa negatiivisia verrattuna perinteisempään meridieseliin kuten MGO:hon. Sen sijaan maakasulla tuotettu ammoniakki vastaa suurin piirtein perinteisen meridieselin MGO:on ympäristövaikutuksia. Toki tuotantoaikaisia kasvihuonekaasupäästöjä kyetään minimoimaan hiilen talteenottojärjestelmillä myös tuotannossa. (Altarriba ym. 2022, 90–91.)

Nestemäisen ammoniakin varastointi tapahtuu noin $-33,4\text{ }^{\circ}\text{C}$:een lämpötilassa, jonka vuoksi sen varastoiminen on teknisesti helpompaa ja halvempaa kuin nestemäisen vedyn $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Lisäksi nesteytetty ammoniakki sisältää enemmän energiaa tilavuutensa nähden kuin nesteytetty vety, jolloin se ei vaadi niin paljoa varastointitilaa. (Popek 2024, 28.) Näin ollen ammoniakki so-

veltuu hyvin vedyn kantajaksi (Arasto 2023). Ammoniakki ei ole myöskään kovin helposti syttyvää, sillä se omaa suht kapean syttyvyysrajan ja tiukat syttymisolosuhteet (Popek 2024, 28). Ammoniakin syttymisalue on ilmassa 16–25 tilavuus-% (Happo ym. 2018, 5.) Kuitenkin riskin ollessa nämä olosuhteet on tarkoin huomioitava myös ammoniakin osalta. Ammoniakin osalta merkittävä riski sekä haaste polttoaineeksi on sen myrkyllisyys ja syövyttävyys. (Popek 2024, 28). Näiden vuoksi ammoniakki on erityisen haitallista ihmisen terveydelle ja vesieliöstölle. Ammoniakki luokitellaankin ympäristölle vaaralliseksi aineeksi. (Happo ym. 2018, 5.) Syövyttävä luonne aiheuttaa haasteensa myös infrastruktuuriin. Materiaalien on oltava sopivat ammoniakille. Myös käsittelyn, kuljetusten ja varastoinnin on oltava turvallisia. (Arasto 2023.)

5.1.4 Metanoli

Mikäli metanoli valmistetaan fossiilisesta maakaasusta, on sen elinkaariaikaiset kasvihuonekaasupäästöt samaa luokkaa kuin perinteisillä meridieseleillä kuten MDO:lla (Ellis & Tanneberger 2016, 41). Vihreästi tuotetulla metanolilla voidaan saavuttaa vähähiilinen tai jopa nettohiilineutraali polttoaine (IRENA 2021, 34). Metanolia voidaan tuottaa vihreästi sekä biomassasta että uusiutuvasta sähköstä ja hiilidioksidista. Bio-metanolia voidaan tuottaa erilaisista biomassoista käyttämällä prosessien aikana uusiutuvaa energiaa. Biomassasta valmistetaan synteetikaasua, joka sitten syntetisoidaan metanoliksi. Puolestaan e-metanolia voidaan valmistaa vedystä ja hiilidioksidista. Jotta tuotanto on vihreää, vety tuotetaan veden elektrolyysillä vihreällä sähköllä ja hiilidioksidi otetaan talteen esimerkiksi teollisuuden prosesseista tai suoraan ilmakehästä. (IRENA 2021, 4; Zamboni ym. 2024, 5.) Tällöin käytetty hiilidioksidi ei ole peräisin fossiilisista lähteistä, jolloin hiilidioksidin määrä ei kasva ilmakehässä, vaikka sitä vapautuu metanolia käyttäessä polttoaineena, jolloin nettohiilipäästöt ovat käytännössä lähellä nollaa.

Ominaisuuksiltaan metanoli on väritön, kirkas neste, joka on helposti syttyvää. Sen syttymisraja on 5,5–36,5 tilavuus-% ja leimahduspiste hyvin matala 11 °C:tta. Sen haisee miedolle alkoholille. Reagoidessaan Metanoli ja voimakkaat hapettimet voivat aiheuttaa palo- ja räjähdysvaaran. Metanoli on myrkyllistä sekä ihmisen terveydelle hyvin vaarallinen aine. Vesieliöille metanoli on vain

lievästi myrkyllinen aine, eikä sen ole todettu kertyvän ravintoverkkoon. Ympäristön kannalta metanoli hajoaa hyvin aerobisissa sekä anaerobisissa olosuhteissa. Vesiympäristössä metanoli on myös biologisesti hajoavaa. (Työterveyslaitos s.a.) Metanoli on nestemäistä ympäristön lämpötilassa, jonka vuoksi sen varastointi ja käsittely on helpompaa kuin esimerkiksi nestemäisen vedyn tai LNG:n, jotka tulee pitää hyvin matalissa lämpötiloissa. Koska metanoli muistuttaa ominaisuuksiltaan suht paljon merenkulussa käytettyjä merenkulun polttoaineita (meridieseileitä), olisi varastointi-, jakelu- ja bunkrausinfrastruktuurit helpommin toteutettavissa. Parhaassa tapauksessa infrastruktuuri olisi pienin muokkauksin joiltain osin jopa valmista metanolille. Kuitenkin muiden vaihtoehtoisten polttoaineiden tapaan metanoli vaatii tiheämpää bunkrausta ja laajempaa varastointitilaa sen pienemmän energiatiheiden vuoksi verrattuna perinteisiin meridieseleihin. Myöskään jo käytössä olevien alusten retrofittaus eli jälkiasentaminen niin, että ne voisivat käyttää metanolia polttoaineena ei ole niin haasteellista ja kallista kuin esimerkiksi vedyn tai ammoniakin osalta. (Popek 2024, 29.)

5.1.5 Biopolttoaineet

Biopolttoaineita on monenlaisia ja ne voivat olla joko nestemäisiä tai kaasumaisia. Parhaillaan biopolttoaineilla pystytään saavuttamaan hiilineutraalius. Biopolttoaineita voidaan valmistaa monenlaisista biomassoista. Biopolttoaineita ovat esimerkiksi biokaasu, biobensiini, biodiesel ja jo aiemmin mainittu biometanoli. (Altarriba ym. 2022, 89.) Se millaisesta biomassasta biopolttoaine valmistetaan, on merkityksellinen ympäristöystävällisyyden kannalta. Biopolttoaineet voidaan jakaa sukupolvittain niiden valmistus raaka-aineiden perusteella. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet valmistetaan raaka-aineista, joita käytetään muun muassa myös ruuan tuotannossa. Tällaisia ovat sokeri- ja tärkkelyspitoiset kasvit sekä öljypitoiset kasvit ja bioraaka-aineet. Sen sijaan toisen sukupolven biopolttoaineiden käyttö on kestävämpää eikä se kilpaile ruuantuotannon kanssa. Lisäksi ne vähentävät tehokkaammin päästöjä ja ovat korkealaatuisempia verrattuna ensimmäisen sukupolven biopolttoaineisiin. Tällaisia raaka-aineita ovat kasvi- ja puupohjainen selluloosa sekä tähteet ja jätemassat. Myös kolmannen sukupolven biopolttoaineet ovat mahdollisuus ympäristöystävällisille vaihtoehdoille ja niiden valmistamista tutkitaan uusista massoista kuten levistä. (Motiva s.a.)

Monilla biopolttoaineilla ominaisuudet ovat samanlaiset kuin perinteisillä merenkulussa käytetyillä polttoaineilla, jolloin ne voidaan joko kokonaan korvata esimerkiksi uusiutuvalla dieselillä tai käyttää sekoitteina fossiilisten polttoaineiden kanssa. Biopolttoaineet eivät siis vaadi infrastruktuurin ja polttomootoreihin välttämättä kovinkaan suuria muutoksia, mikä tekee niistä hyvän vaihtoehdon päästöjen vähentämiseen. Kuitenkin saatavuus ja laajamittainen tuotanto biopolttoaineiden osalta voi koitua haasteeksi, mikäli nykyisiä polttoaineita korvataan esimerkiksi uusiutuvalla dieselillä suuremmissa määrin. (Zamboni ym. 2024, 4–5.) Esimerkki uusiutuvasta dieselistä on HVO eli Hydrotreated Vegetable Oil, joka on vetykäsitelty kasviöljy. Shell ja St1 tarjoavat sitä ja se valmistetaan korkealaatuisista jäte- sekä tähderaaka-aineista. Se pystyy vähentämään kasvihuonekaasupäästöjä noin 90 % ja sopii kaikkiin dieselmoottoreihin. Se on myös rikitön ja myrkytön polttoaine. Lisäksi HVO:n tiheys (MJ/l) ja lämpöarvo (MJ/kg) ovat melko vastaavat merenkulussa käytettyjen meridieseileiden kuten MGO:n kanssa, jolloin vaikutus polttoainekulutukseen ei ole merkittävä. (Shell s.a.) Näin ollen käytettäessä HVO:ta polttoaineena tankkitilan ja polttoaineen bunkrauksen välin muutos ei ole merkittävä, mikä on suuri etu verrattuna muihin vaihtoehtoisin polttoaineisiin.

5.1.6 Polttoaineet merenkulun eri segmenteissä lyhyellä ja pitkällä aikavälillä

Turun, Agderin ja Vaasan yliopistojen yhdessä toteuttamassa tutkimuksessa selvitettiin vaihtoehtoisten polttoaineiden osalta parhaita ratkaisuja merenkulun eri segmenteille lyhyellä ja pitkällä aikavälillä. Tutkimus toteutettiin ”Delphi study” -menetelmää käyttäen. Kyseisessä menetelmässä asiantuntijat vastaavat anonyymisti mielipiteensä asiaan useamman kierroksen ajan, kunnes tarvittava yhteisymmärrys asiasta saavutetaan. Asiantuntijoiden vastausten perusteella vaihtoehtoiset polttoaineet ovat paras ja tehokkain tapa vähentää merenkulun päästöjä, kun vertaillaan erilaisia teknologisia ja toiminnallisia tapoja vähentää päästöjä. Tutkimuksessa merenkulun segmentit jaoteltiin neljään osaan; lähimerenkulkuun, syvänmerenkulkuun, risteilylaivaliikenteeseen ja rahtilaivaliikenteen lähimerenkulkuun. (Hellström ym. 2024.)

Kaikkien näiden merenkulun segmenttien osalta asiantuntijoiden näkemyksen mukaan lyhyellä aikavälillä (vuoteen 2030 asti) parhaat ratkaisut ovat LNG, Biodiesel ja biokaasu, joita seurasi hieman perässä metanoli. Pitkällä aikavälillä tarkasteltuna (vuodesta 2030 eteenpäin) metanoli nousi kaikkien tarkasteltujen merenkulun eri segmenttien suosituimmaksi vaihtoehdoksi. Toki huomioitavaa on, että liuta muita vaihtoehtoisia polttoaineita nähtiin myös hyvinä vaihtoehtoina pitkällä aikavälillä merenkulun eri segmenteillä. Lähimerenkulussa metanolin lisäksi hyviä ratkaisuja ovat muun muassa vety, biodiesel, biokaasu ja ammoniakki. Syvänmerenkulun osalta parhaat ratkaisut metanolin lisäksi olivat ammoniakki, biokaasu ja biodiesel. Kuitenkin pitkän aikavälin vaihtoehtoisissa polttoaineratkaisuissa LNG oli pudonnut kaikissa merenkulun segmenteissä yhdeksi epäsuotuisimmaksi vaihtoehdoksi. Sen voidaan olettaa johtuvan sen fossiilisuudesta ja siksi koska LNG ei pärjää sääntelyn kiristytessä. Myös vedyn tulevaisuus syvämerenkulussa on merkittävästi epäsuotuisampi verrattuna lähimerenkulkuun. Tässä vedyn tilavuuden pieni energiatiheys verrattuna muihin vaihtoehtoisiin polttoaineisiin on haittaava tekijä. (Hellström ym. 2024.)

5.2 Ympäristösääntelyn vaikutus Suomen ja Itämeren merenkulkuun

Merenkulku on äärimmäisen tärkeää Suomen ulkomaankaupan kannalta. Lisäksi Venäjän hyökkäyssota Ukrainaan on lisännyt merenkulun osuutta entisestään tuonnin sekä viennin osalta. Tällä hetkellä ulkomaankaupan viennin sekä tuonnin osuus meritse on yli 90 %. (Väylävirasto 2023, 10.) 21.11.2023 järjestetyssä Meriakatemiassa kerrottiin merenkulun osuuden ulkomaankaupasta olevan jopa reilut 95 % (Suomen Varustamot Ry 2023). Vaikka Venäjän hyökkäyssota on nostanut merenkulun osuutta ulkomaankaupassa, on se joka tapauksessa äärimmäisen tärkeä osa Suomen ulkomaankauppaa Suomen maantieteellisen sijainnin vuoksi. Tämän vuoksi ympäristösääntelystä kohdistuva kustannus ja merkitys on Suomelle suuri. Tosiasia on kuitenkin se, että merenkulku on elinehto Suomelle, jonka vuoksi merenkulkua pitää viime kädessä tukea ja pyrkiä vaikka taloudellisin kannustimin viemään kohti hiilineutraaliutta.

Merenkulkua koskeva ajankohtainen ympäristölainsäädäntö EU ETS, FuelEU Maritime ja IMO:n tulevat toimenpiteet kiristyvin polttoainestandardeineen ja

päästömaksuineen vaikuttavat merikuljetuksien kustannusten nousuun, mikä taas nostaa merikuljetusten hintoja (Björkendahl 2024). Euroopan unionin päästöoikeuksien huutokaupan toteutuksesta vastaavan European Energy Exchange (EEX) energiapörssin vuoden 2024 päästöoikeus huutokaupparaportin mukaan yhden päästöoikeuden hinta on 2.5.2024 keskimäärin lähes 70 euroa / hiilidioksidiekvivalenttitonni. Edeltävänä vuonna 2023 yhden päästöoikeuden eli aluksella päästetyn hiilidioksidiekvivalenttitonnin hinta kävi jo 100 eurossa. (EEX. 2024.) EU ETS:n päästöoikeuksien hinnan voidaan odottaa nousevan tulevaisuudessa, eikä sen trendi tule olemaan laskeva. Kuitenkin päästöoikeuksien hinnan arviointi tulevaisuuden osalta on hyvin haastavaa. Kuinka paljon päälle 100 euron / tCO₂ on päästöoikeuden hinta muutaman vuoden päästä, sitä on vaikea sanoa. (Björkendahl 2024.)

Polttoainestandardi FuelEU Maritime edellyttää aluksia käyttämään puhtaampaa energiaa, mikä taas tulee nostamaan polttoainekustannuksia aluksissa. Kuitenkin mitä enemmän aluksen energiasta on puhtaampaa sitä vähemmän aluksen päästöjä, tarvitsee kuitata päästöoikeuksin. Joka tapauksessa ympäristösääntelyn kustannus Suomen ulkomaankaupalle tulee olemaan suuri pitkällä aikavälillä tarkasteltuna. (Björkendahl 2024.) Kun laivayhtiöt paikkaavat ympäristösääntelyn kustannuksia merikuljetusten hinnan nousulla. On odotettavissa, että yritykset puolestaan paikkaavat näitä kuljetusmaksujen hinnan nousuja tuontitavaroiden hintoja nostamalla. Toki elintarvikkeissa ja yksittäisissä tuotteissa tämä hinnan nousu voi olla hyvin marginaalinen, mutta pitkällä aikavälillä suuri Suomen taloudelle.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Vaikka vaihtoehtoiset polttoaineet ovat mahdollisuus saavuttaa nollapäästöt, on erityisesti alun ”murrosvaiheen” aikana hyvin tärkeää kiinnittää huomiota myös alusten energiatehokkuuteen ja operatiivisiin päästövähennyskeinoihin. Myös niiden avulla pystytään vähentämään merkittävästi alusten hiili-intensiteettiä tasoa ja kustannuksia merenkulun ympäristölainsäädännön tiukentumisessa. (Björkendahl 2024.) Merenkulussa polttoaineen kulutuksen vähentäminen on yksi keino vähentää kasvihuonekaasupäästöjä, minkä vuoksi hydrodynamiikkaan panostaminen on tärkeää. Tarkoittaa siis aluksen rungon ja sen muotoilun kehittämistä merenkäynnille edullisemmaksi niin, että aluksessa

käytetty energia hyödynnetään aikaisempaa tehokkaammin. Myös teknologia ja digitalisaatio mahdollistavat tehokkaampaa merenkulkua. Matkasuunnitelmien, aluksen nopeuden ja sääreitityksen optimoiminen mahdollistuvat yhä kehittyneempien data-analyysien avulla. Lisäksi ympäristötekijöiden kuten tuulen, virtausten ja aallonnopeuden huomioiminen mahdollistavat tehokkaampaa merenkulkua, mikä tarkoittaa päästöjen vähentymistä. (Zamboni ym. 2024, 3.)

Kuitenkin Suomessa suuri osa aluksista ovat ro-ro ja ro-pax aluksia, joiden matkat tapahtuvat tiukasti aikataulutetussa liikenteessä. Sen vuoksi edellä mainituin tavoin tapahtuvat operatiiviset päästöjä vähennyskeinot ovat mahdollisia vain tiettyyn pisteeseen saakka. (Väylävirasto 2023.) Täten vaihtoehtoiset polttoaineet nousevat jo suht nopeasti avainasemaan, kun kuljetaan kohti ympäristösääntelyn (IMO ja EU) tavoittelemaa kasvihuonekaasupäästötömyyttä (Zamboni ym. 2024, 2–3). Mats Björkendahlia haastateltaessa ja kirjallisuutta tutkiessa kävi selväksi, että mahdollisuuksia vaihtoehtoisille polttoaineille on paljon. Vielä ei kuitenkaan ole selkeää reittiä ja tarjontaa vaihtoehtoisten polttoaineiden suhteen, jolloin alun ”murrosvaiheen” aikana parhaiden polttoaineratkaisujen arvioiminen on erityisen haastavaa. Arvioitaessa näitä ratkaisuja laivayhtiöiden on ehdottoman tärkeää pohtia, mitä polttoaineita tulevaisuudessa on heille tarjolla ja mikä niiden kustannus voisi tulevaisuudessa olla. Kiristynvä ympäristösääntely asettaa suuren haasteen laivayhtiöille, kun vastuu on siirretty heille. Laivayhtiöiden on kuitenkin keksittävä keinot, miten onnistutaan laskemaan alusten hiili-intensiteettiä ja mitkä ovat omat suunnitelmat sääntelyn kiristyessä.

Vaihtoehtoisten polttoaineiden osalta lisäselvitys tulevaisuuden hintanäkymistä sekä mahdollisten polttoaineiden valmistajien kartoittaminen esimerkiksi Suomessa olisi hyödyksi arvioitaessa tulevaisuuden polttoainevaihtoehtoja. Tietenkin myös polttoaineen käyttöönoton kannalta on äärimmäiseen tärkeää, että se soveltuu laivapolttoaineeksi sen kemiallisten sekä fysikaalisten ominaisuuksien kannalta. Näiden osalta vaihtoehtoiset polttoaineet voivat erota hyvinkin paljon toisistaan, mikä tuottaa omat haasteensa. (Zamboni ym. 2024, 4.) Tarvitaan siis myös moottorivalmistajia sekä teknistä osaamista esimerkiksi bunkrauksen osalta, jotta vaihtoehtoiset polttoaineet löytävät tien laivojen tankkeihin. Laivayhtiöiden osalta muutoinkin yhteistyökumppanit kuten polttoainevalmistajat ja monet muut toimijat ovat äärimmäisen tärkeässä roolissa,

kun lähdetään ratkomaan, kuinka päästöjä aiotaan vähentää. Todennäköisesti tullaan näkemään paljon laivoja, jotka voivat käyttää useampaa eri polttoainetta esimerkiksi kaksoispolttoainemoottoreiden avulla, mikä tuo taas joustavuutta polttoainevaihtoehtojen suhteen. Joka tapauksessa on mielenkiintoista nähdä, mihin suuntaan merenkulku lähtee kulkemaan ja mitkä ovat tulevaisuuden ratkaisut polttoaineiden suhteen. Kuitenkin alueellisesti kustannustehokain ratkaisu on se, jonka voidaan odottaa nousevan parhaaksi vaihtoehdoksi.

LÄHTEET

Aikajana – Euroopan vihreän kehityksen ohjelma ja 55-valmiuspaketti s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 12.4.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/timeline-european-green-deal-and-fit-for-55/> [viitattu 2.3.2024].

Altarriba, E., Rahiala, S., Tanhuanpää, T. & Piispa, M. 2022. Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/788571> [viitattu 4.5.2024].

Arasto, A. 2023. Vihreä ammoniakki – kestävä ratkaisu ilmastokriisin hillitsemiseen. VTT. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vttresearch.com/fi/uutiset-ja-tarinat/vihrea-ammoniakki> [viitattu 4.5.2024].

Björkendahl, M. 2024. Erityisasiantuntija, Merenkulun ympäristöasiat ja alustekniikka. Haastattelu 28.3.2024. Suomen Varustamot Ry.

Björkendahl, M. s.a. Fit for 55 ilmastopaketti ja vaikutukset merenkulkuun. Suomen Varustamot Ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/ilmastosuojelu-ja-ilmastomuutos/merenkulun-hiilidioksidipaastot/fit-for-55-ilmastopaketti-ja-vaikutukset-merenkulkuun/> [viitattu 4.3.2024].

Cames, M., Wissner, N. & Sutter, J. 2021. Ammonia as a marine fuel. Öko-Institut e.V. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://en.nabu.de/imperia/md/content/nabude/verkehr/210622-nabu-study-ammonia-marine-fuel.pdf> [viitattu 28.4.2024].

Development of EU ETS (2005-2020) s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/development-eu-ets-2005-2020_en#first-steps [viitattu 4.3.2024].

DNV. 2023. The EU agrees on well-to-wake GHG limits to energy used on board ships from 2025. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/news/the-eu-agrees-on-well-to-wake-ghg-limits-to-energy-used-on-board-ships-from-2025-243501> [viitattu 18.3.2024].

DSV s.a. Maantiekuljetusten rahtilisät. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dsv.com/fi-fi/palvelumme/kuljetusmuodot/maantiekuljetukset/rahtilisat> [viitattu 25.4.2024].

EEX. 2024. Emission Spot Primary Market Auction Report 2024. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.eex.com/en/market-data/environmental-markets/eua-primary-auction-spot-download> [viitattu 2.5.2024].

Ellis, J. & Tanneberger, K. 2016. Study on the use of ethyl and methyl alcohol as alternative fuels in shipping. EMSA. PDF-dokumentti. Päivitetty 24.1.2017.

Saatavissa: <https://www.emsa.europa.eu/damage-stability-study/items.html?cid=77&id=2726> [viitattu 22.4.2024].

Energiavirasto. 2023. Päästökaupan huutokauppatulot kasvoivat 581,6 miljoonaan euroon. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/-/paasto-kaupan-huutokauppatulot-kasvoivat-581-6-miljoonaan-euroon> [viitattu 4.3.2024].

Energiavirasto s.a. Päästöoikeuksien huutokauppa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://energiavirasto.fi/huutokauppa> [viitattu 4.3.2024].

EU-lainsäädännön täytäntöönpano s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://commission.europa.eu/law/application-eu-law/implementing-eu-law_fi [viitattu 10.5.2024].

Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 21.3.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/> [viitattu 25.3.2024].

Euroopan vihreän kehityksen ohjelman toteuttaminen s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/delivering-european-green-deal_fi [viitattu 25.3.2024].

Eurooppa-neuvosto. 2023. FuelEU Maritime -aloite: neuvostolta uusi laki merenkulkualan vähähiilistymisestä. WWW-dokumentti. Päivitetty 14.1.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law> [viitattu 7.3.2024].

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2023/1805.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2023/959.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2018/2001.

European Environment Agency. 2022. Health impacts of air pollution in Europe, 2022. WWW-dokumentti. Päivitetty 20.11.2023. Saatavissa: <https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2022/health-impacts-of-air-pollution> [viitattu 26.3.2024].

Fant, C. 2024. Brändi-, viestintä- ja vastuullisuusjohtaja. Haastattelu 3.4.2024. Wasaline.

Gasum. 2021. Nesteytetty maakaasu (LNG) -joustavampi vaihtoehto teollisuuden prosesseihin. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gasum.com/fi/uutiset-ja-asiakastarinat/artikkelit/2021/nesteytetty-maakaasu-lng--joustavampi-vaihtoehto-teollisuuden-prosesseihin/> [viitattu 20.4.2024].

Guidelines on life cycle GHG intensity of marine fuels (LCA Guidelines) s.a. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Lifecycle-GHG---carbon-intensity-guidelines.aspx> [viitattu 25.3.2024].

Harris, R., Conlan, M. & Simon, J. 2022. Summary of LNG and Methanol Marine Fuel Options. IGP energy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://igpmet-hanol.com/igpmwp/wp-content/uploads/2022/03/Summary-of-LNG-and-Methanol-Marine-Fuel-Options-03-11-2022.pdf> [viitattu 28.4.2024].

Happo, M., Kiljunen, A. & Keskitalo, T. 2018. Ammoniakkisäiliön vuodon onnettomuuskuvaus ja leviämismalli. Terrafame Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/sites/default/files/documents/3_Terrafame_NH3onnettomuusmalli.pdf [viitattu 28.4.2024].

Hellström, M., Rabetino, R., Schwartz, H., Tsvetkova, A. & Hammad UI Haq, S. 2024. GHG emission reduction measures and alternative fuels in different shipping segments and time horizons – A Delphi study. Elsevier. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0308597X23005304?fr=RR-2&ref=pdf_download&rr=87e13ff9fd258daa [viitattu 28.4.2024].

HE 71/2023. Hallituksen esitys eduskunnalle päästökauppalaiksi sekä laiksi biopolttoaineista, bionesteistä ja biomassapolttoaineista annetun lain 2 ja 33 §:n muuttamisesta.

Hunicz, J., Matijosius, J., Rimkus, A., Kilikevicius, A., Kordos, P. & Mikulski, M. 2020. Efficient hydrotreated vegetable oil combustion under partially premixed conditions with heavy exhaust gas recirculation. Elsevier. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236120303458?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=87f7bae1e8ec8da5 [viitattu 28.4.2024].

IEA. 2023. Aviation and shipping. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.iea.org/reports/aviation-and-shipping> [viitattu 22.4.2024].

Ignitis.fi. 2023. Nesteytetyn maakaasun (LNG) ja nesteytetyn biokaasun mahdollisuudet Suomessa. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://ignitis.fi/uutiset/nesteytetyn-maakaasun-lng-ja-nesteytetyn-biokaasun-mahdollisuudet-suomessa> [viitattu 20.4.2024].

Ilmakehä ABC -hakusanoja selityksineen s.a. Ilmatieteen laitos. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-abc?term=Hiilidioksidiekvivalentti> [viitattu 4.3.2024].

Ilmansaasteet s.a. THL. Ilmansaasteet. WWW-dokumentti. Päivitetty 7.12.2023. Saatavissa: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ilmansaasteet> [viitattu 12.3.2024].

Ilmatieteen laitos. 2021. Tutkijat selvittivät, paljonko koko maailman laivaliikenteestä syntyy hiukkaspäästöjä. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/uutinen/5Zn8cZqT5ImTCFwdrvQ4NA> [viitattu 15.3.2024].

IMO. 2021. IMO moves ahead on GHG emissions, Black Carbon and marine litter. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC77.aspx> [viitattu 17.3.2024].

IMO. 2023. 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Päivitetty 30.11.2023. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/2023-IMO-Strategy-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships.aspx> [viitattu 4.2.2024].

2018 Initial IMO Strategy s.a. International Maritime Organization. WWW-dokumentti Saatavissa: <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Vision-and-level-of-ambition-of-the-Initial-IMO-Strategy.aspx> [viitattu 4.2.2024].

Intersessional Working Group on Reduction of GHG Emissions from Ships (ISWG-GHG 16), 11-15 March 2024 s.a. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.imo.org/en/MediaCentre/Meeting-Summaries/Pages/Intersessional-Working-Group-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships-\(ISWG-GHG-16\),-11-15-March-2024.aspx](https://www.imo.org/en/MediaCentre/Meeting-Summaries/Pages/Intersessional-Working-Group-on-Reduction-of-GHG-Emissions-from-Ships-(ISWG-GHG-16),-11-15-March-2024.aspx) [viitattu 17.3.2024].

Introduction to IMO s.a. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Päivitetty 23.1.2024. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/About/Pages/Default.aspx> [viitattu 29.1.2024].

IRENA. 2021. Renewable Methanol. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jan/IRENA_Innovation_Renewable_Methanol_2021.pdf?rev=ca7ec52e824041e8b20407ab2e6c7341 [viitattu 28.4.2024].

Kasvihuonekaasut s.a. Ilmatieteenlaitos. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/kasvihuonekaasujen-tutkimus> [viitattu 10.3.2024].

Lindstad, E., Lagemann, B., Riialand, A., Gamlem, G. & Valland, A. 2021. Reduction of maritime GHG emissions and the potential role of E-fuels. Elsevier. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921003722?ref=pdf_download&fr=RR-2&rr=8841ebf3dc2670ff [viitattu 25.4.2024].

Marpol Annex VI s.a. Sulphur oxides (Sox) – Regulation 14. WWW-dokumentti: Saatavissa: <https://www.marpol-annex-vi.com/emissions/sulphur-oxides-sox/> [viitattu 22.4.2024].

Member States, IGOs and NGOs s.a. International Maritime Organization. WWW-dokumentti. Päivitetty 2.11.2023. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/About/Membership/Pages/Default.aspx> [viitattu 29.1.2024].

Merenkulun ympäristösuojelulain muutokset s.a. Valtioneuvosto ja ministeriöt. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/hanke?tunnus=LVM056:00/2023> [viitattu 7.3.2024].

Motiva s.a. Nestemäiset biopolttoaineet. WWW-dokumentti. Päivitetty 3.5.2024. Saatavissa: https://www.motiva.fi/ratkaisut/uusiutuva_energia/bioenergia/nestemaiset_biopolttoaineet [viitattu 25.4.2024].

Nordsol. 2023. What is bio-LNG and how is it made?. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://nordsol.com/articles/what-is-bio-lng/> [viitattu 25.4.2024].

OpenCO2.net s.a. CO2-termit tutuiksi. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.openco2.net/fi/co2-tietoa> [viitattu 18.3.2024].

Overview of Greenhouse Gases s.a. EPA. WWW-dokumentti. Päivitetty 11.4.2024. Saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#overview> [viitattu 16.3.2024].

Pariisin sopimus: EU:n tie kohti ilmastoneutraaliutta s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 27.1.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/paris-agreement-eu/> [viitattu 7.5.2024].

Pienhiukkasten vaikutusmekanismit s.a. THL. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://thl.fi/aiheet/ymparistoterveys/ilmansaasteet/pienhiukkasten-vaikutusmekanismit> [viitattu 20.3.2024].

Popek, M. 2024. TransNav. Gdynia Maritime University. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.transnav.eu/files/Alternative_Fuels_%E2%80%93%20Prospects_for_the_Shipping_Industry,1371.pdf [viitattu 2.5.2024].

Päästökauppalaki 28.12.2023/1270.

Päästökauppa s.a. Valtioneuvosto ja ministeriöt. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/paastokauppa> [viitattu 4.3.2024].

Päästöoikeuksien huutokauppa s.a. Valtioneuvosto ja ministeriöt. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tem.fi/paastooikeuksien-huutokauppa-2013-2020> [viitattu 4.3.2024].

Reducing emissions from the shipping sector s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en [viitattu 7.3.2024].

Rydman, A. 2023. Miten vety oikeasti toimii polttoaineena? ”Suuri potentiaali merenkulussa”. *Verkkouutiset*. Päivitetty 10.3.2023. Saatavissa: <https://www.verkkouutiset.fi/a/miten-vety-oikeasti-toimii-polttoaineena-suuri-potentiaali-merenkulussa/#4da9382f> [viitattu 18.4.2023].

Safera s.a. Pienhiukkasilla PM2,5 on merkittävä vaikutus terveyteen – Saferan anturijärjestelmä mittaa pienhiukkaset luotettavasti. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.safera.com/fi/pienhiukkasilla-pm2-5-on-merkittava-vaikutus-terveyteen-saferan-anturijarjestelma-mittaa-pienhiukkaset-luotettavasti/> [viitattu 17.3.2024].

Shell s.a. HVO – uusiutuva diesel. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.shell.fi/motorists/shell-fuels/hvo-renewable-diesel.html> [viitattu 25.4.2024].

Suomen Varustamot Ry. 2023. Meriakatemia 21.11.2023. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://shipowners.fi/meriakatemia-21-11-2023/> [viitattu 28.4.2024].

Suomen Varustamot s.a. Merenkulun ympäristömääräykset. WWW-dokumentti. Päivitetty 4.10.2023. Saatavissa: <https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/merenkulun-ymparistomaaraykset/> [viitattu 5.2.2024].

Tapaninen, U. 2019. Merenkulun logistiikka. Helsinki: Otatieto. E-kirja.

The Engineering ToolBox s.a. Fuels – Higher and Lower Calorific Values. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://www.engineeringtoolbox.com/fuels-higher-calorific-values-d_169.html [viitattu 28.4.2024].

Traficom. 2023. Meriliikenne osaksi EU:n päästökauppajärjestelmää 1.1.2024 alkaen. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.traficom.fi/fi/ajankoh-taista/meriliikenne-osaksi-eun-paastokauppajarjestelmaa-112024-alkaen> [viitattu 4.3.2024].

Tukes. 2024. Vedyn käsittelyn ja varastoinnin turvallisuus. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://tukes.fi/vedyn-kasittelyn-ja-varastoinnin-turvallisuus#neste-mainen-vety> [viitattu 28.4.2024].

Työterveyslaitos s.a. Metanoli. WWW-dokumentti. Päivitetty 12.8.2022. Saatavissa: <https://ova.ttl.fi/metanoli> [viitattu 24.4.2024].

Understanding Global Warming Potentials s.a. EPA. WWW-dokumentti. Päivitetty 27.3.2024. Saatavissa: <https://www.epa.gov/ghgemissions/understanding-global-warming-potentials> [viitattu 10.3.2024].

55-valmiuspaketti: EU:n päästökauppajärjestelmän uudistus s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 27.1.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-eu-emissions-trading-system/> [viitattu 4.3.2024].

55-valmiuspaketti s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 12.4.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55/> [viitattu 4.3.2024].

55-valmiuspaketti: miten EU aikoo tarkistaa energiaverotusta s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Päivitetty 9.4.2024. Saatavissa: <https://www.consilium.europa.eu/fi/infographics/fit-for-55-energy-taxation/> [viitattu 7.3.2024].

Valtioneuvosto. 2023. 2023 Suomi valittiin merenkulkujärjestön IMO:n neuvostoon. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/-/1410829/suomi-valittiin-merenkulkujarjesto-imo-n-neuvostoon> [viitattu 29.1.2024].

Väylävirasto. 2023. Valtion vesiväyläverkon kokonaiskuva. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/188142/vj_2023-74_978-952-405-116-3.pdf?sequence=1 [viitattu 27.3.2024].

What is the EU ETS? s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/what-eu-ets_en [viitattu 4.3.2024].
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024020474> [viitattu 25.4.2024].

Zamboni, G., Scamardella, F., Gualeni, Paola. & Canepa, E. 2024. Comparative analysis among different alternative fuels for ship propulsion in a well-to-wake perspective. Heliyon. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024020474> [viitattu 25.4.2024].

		WtT	TtW	TtW	TtW
Polttoaine-luokka	Polttoaine	Kasvihuonekaasupäästö-kertoimet [gCO ₂ eq/MJ]	hiilidioksidin päästö-kerroin Cf [gCO ₂ /gfuel]	metaanin päästö-kerroin Cf [gCH ₄ /gfuel]	typpioksiduulin päästökerroin Cf [gN ₂ O/gfuel]
Fossiiliset polttoaineet	Raskas polttoöljy HFO (ISO 8217 Grades RME to RMK)	13,5	3,114	0,00005	0,00018
	Kevyt polttoöljy LFO (ISO 8217 Grades RMA to RMD)	13,2	0,00005	0,00005	0,00018
	Meriliikenteessä käytettävä dieselöljy MDO, Meriliikenteessä käytettävä kaasuöljy MGO (ISO 8217 Grades DMX to DMB)	14,4	3,206	0,00005	0,00018
	LNG	18,5	2,75	0	0,00011

	Metanoli (peräisin maa- kasusta)	31,3	1,375	TBM (To Be Measured)	TBM (To Be Measured)
	H2 / Vety (peräisin maa- kasusta)	132	0	0	TBM (To Be Measured)
	NH3 / Ammoni- akki (peräisin maa- kasusta)	121	0	N/A (Not Available)	TBM (To Be Measured)
Biopolttoai- neet	Etanoli (Direktiiv- in (EU) 2018/2001 tuo- tantoketjut)	$E - \frac{C_{fCO_2}}{LCV}$	1,913	TBM (To Be Measured)	TBM (To Be Measured)
	Bio-diesel (Di- rektiivin (EU) 2018/2001 tuotantoketjut)	$E - \frac{C_{fCO_2}}{LCV}$	2,834	TBM (To Be Measured)	TBM (To Be Measured)
	Hydrotreated Vegetable Oil (HVO) (Direktiiv- in (EU) 2018/2001 tuo- tantoketjut)	$E - \frac{C_{fCO_2}}{LCV}$	3,115	0,00005	0,00018
	Bio-LNG (Direk- tiivin (EU) 2018/2001 tuotantoketjut)	$E - \frac{C_{fCO_2}}{LCV}$	2,75	0	0,00011

	Bio-metanoli (Direktiivin (EU) 2018/2001 tuotantoketjut)	$E - \frac{C_{fCO_2}}{LCV}$	1,375	TBM (To Be Measured)	TBM (To Be Measured)
	Bio-H2 (Direktiiv- in (EU) 2018/2001 tuotantoketjut)	N/A (Not Available)	0	0	Fuel cells: 0 ICE: TBM
(RFNBO) muuta kuin biologista alkuperää olevat uusiutuvat polttoaineet "e-polttoai- neet"	e-diesel	Ref. to Directive (EU) 2018/2001)	3,206	0,00005	0,00018
	e-LNG	Ref. To Directive (EU) 2018/2001)	2,75	0	0,00011
	e-metanoli	Ref. to Directive (EU) 2018/2001)	1,375	TBM (To Be Measured)	TBM (To Be Measured)
	e-H2	Ref. to Directive (EU) 2018/2001)	0	0	Fuel cells: 0 ICE: TBM
	e-NH3	N/A	0	N/A (Not Available)	TBM (To Be Measured)