

Jimi Koivuniemi

# ITÄMERELLÄ KÄYTETTÄVIEN LAIVA- POLTTOAINEIDEN VERTAILU

Opinnäytetyö

Energia- ja ympäristötekniikka

Insinööri (AMK)

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

<b>Tekijä/Tekijät</b>	<b>Tutkintonimike</b>	<b>Aika</b>
Jimi Koivuniemi	Insinööri (AMK)	Syyskuu 2020
<b>Opinnäytetyön nimi</b>		46 sivua 1 liitesivua
Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu		
<b>Toimeksiantaja</b>		
Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (XAMK)		
<b>Ohjaaja</b>		
Jyri Mulari		
<b>Tiivistelmä</b>		
<p>Tämän opinnäytetyön aiheena on Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu. Työ on tehty yhteistyössä Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun (Xamk) kanssa, osana Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu (MEPTEK) -hanketta. Hankkeen tavoitteena on meriliikenteen taloudellisen kilpailukyvyyn ja päästöttömyyskehityksen parantaminen. Opinnäytetyön tavoitteena on vertailla Itämerellä käytettyjen polttoaineiden hintoja, päästöjä, saatavuutta, laatuja, sekä vaikutusta ihmisiin, laivoihin ja ympäristöön. Työn tekemisessä on käytetty kirjallista materiaalia sekä alan ammattilaisten haastatteluja.</p> <p>Työssä vertaillaan pääosin kolmea Itämerellä käytettävää polttoainetta. Niiden heikkoudet ja vahvuudet tuodaan esille ja niitä verrataan viime vuosien polttoainerajoitusten valossa. Opinnäytetyössä rakennetaan kokonaiskuva nykyisestä polttoainekäytöstä, hinnoista, päästöistä sekä tulevaisuuden näkymistä. Työssä pohditaan tulevaisuuden polttoaineratkaisuja ja niiden mahdollisia ongelmia. Ammattilaisten haastattelujen avulla saadaan tarkempi kuva alalla työskentelevien henkilöiden näkökulmasta. Alan ammattilaiset kertovat näkemyksiään tulevaisuuden polttoaineista, polttoaineiden hintakehityksestä, saatavuudesta, varustamoiden strategioista, sekä polttoaineiden ja niihin liittyvien teknologioiden ongelmista.</p> <p>Työssä selvisi, että nykyisistä polttoaineista nesteytetty maakaasu on monilta osin paras vaihtoehto. Se alittaa päästörajoitukset sekä rikkiyhdisteiden että typpiyhdisteiden osalta. Ongelmaksi kuitenkin muodostuvat metaanivuodot, sekä vielä hieman vajavainen bunkraus-infrastruktuuri. Tällä hetkellä öljy- ja tislepohjaisia polttoaineita pystytään vielä käyttämään hyvin skrubberien ja SCR-järjestelmien avulla, joilla typpi- ja rikkiyhdistepäästöjä voidaan hillitä. Työssä myös selvisi, että monilla tulevaisuuden polttoaineilla on omat ongelmansa, eikä juuri mikään nykyisistä vaihtoehtoista pysty yksinään korvaamaan nykyisiä polttoaineita, ainakaan lähivuosina. Haastatteluista selvisi, että monet asiat eivät ole aivan niin mustavalkoisia kuin monet kirjalliset lähteet antavat ymmärtää. Pohdintaosiossa vertaillaan kirjallista- ja haastatteluasiota, sekä pohditaan työssä tehtyjä johtopäätöksiä.</p>		
<b>Asiasanat</b>		
Itämeri, laivapolttoaine, ilmastonmuutos, haastattelututkimus, kvalitatiivinen tutkimus		

Author (authors)	Degree	Time
Jimi Koivuniemi	Bachelor of Engineering	September 2020
<b>Thesis title</b> Comparison of marine fuels used in the Baltic Sea		46 pages 1 page of appendices
<b>Commissioned by</b> South-Eastern Finland University of Applied Sciences (XAMK)		
<b>Supervisor</b> Jyri Mulari		
<p data-bbox="164 763 300 797"><b>Abstract</b></p> <p data-bbox="164 835 1458 1126">The topic of this thesis is a comparison of marine fuels used in the Baltic Sea. The thesis was done in collaboration with South-Eastern Finland University of Applied Sciences (XAMK) as a part of the project comparing pollution decreasing techniques in marine traffic (MEPTEK). The objective of the project is to improve the economic competitiveness of marine traffic and move towards of zero emissions. The objective of thesis is to compare prices, emissions, availability, and qualities of fuels used in the Baltic Sea, as well as their impact on people, ships, and the environment. Material from literature and interviews with professionals were used in the work.</p> <p data-bbox="164 1167 1458 1491">In the thesis the comparison is mainly made between three fuels used in the Baltic Sea. Their weaknesses and strengths are highlighted and compared for example, considering fuel restrictions in the recent years. The thesis builds a strong overall picture of current fuel consumption, prices, emissions, and visions of the future. The work considers future fuel solutions and the possible problems they include. The interviews with the professionals provide a more accurate picture of the views of people working in the industry. Professionals share their views about for example, future fuels, the price development of fuels, availability, ship owners' strategies, as well as problems with fuels and technologies related to them.</p> <p data-bbox="164 1532 1458 1859">The work revealed that liquified natural gas is the best option in many cases. It adheres to emission restrictions for both sulfur and nitrogen. However, the problems are methane slips and a slightly deficient bunkering infrastructure. Now oil and distillate fuels can be used as well with scrubbers and SCR technologies to control nitrogen and sulfur emissions. The work also revealed that many fuels of the future carry their own problems, and hardly any of the current options alone will be able to replace the existing fuels, at least not in the next few years. The interviews revealed that many things are not quite as black and white as many literary sources suggest. The reflective section compares literature and interview sections and reflects the conclusions made in the work.</p>		
<p data-bbox="164 1906 320 1939"><b>Keywords</b></p> <p data-bbox="164 1973 1230 2007">Baltic Sea, ship fuel, global warming, interview survey, qualitative research</p>		

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
1.1	Tavoitteet, aineisto ja menetelmät .....	8
1.2	Itämeren päästörajoitukset .....	8
1.2.1	Rikkidirektiivit .....	9
1.2.2	Typpioksidipäästörajoitukset .....	9
2	POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET .....	11
2.1	Itämerellä käytetyt polttoaineet .....	11
2.1.1	Raskas polttoöljy (HFO) .....	11
2.1.2	Kevyet polttoöljyt .....	13
2.1.3	Nesteytetty maakaasu (LNG) .....	14
2.2	Kokonaiskuva .....	16
2.2.1	Päästöt .....	16
2.2.2	Polttoainejakauma .....	18
2.3	Päästövertailu .....	20
2.3.1	Polttoaineiden hiilipitoisuudet .....	21
2.3.2	Elinkaarivertailu .....	21
2.4	Polttoaineiden hinnat .....	25
2.5	Tulevaisuuden polttoaineet .....	27
2.5.1	Metanoli .....	28
2.5.2	Biopolttoaineet .....	28
2.5.3	Sähkö .....	29
2.5.4	Tuuli- ja aurinkovoima .....	29
2.5.5	Synteettiset polttoaineet, vety ja ammoniakki .....	30
2.5.6	Nesteytetty biokaasu (LBG) .....	31
2.5.7	Ydinvoima .....	32
3	HAASTATTELUT .....	33
3.1	Toteutus .....	33

3.2	Haastattelujen sisältö ja tulokset.....	34
4	POHDINTA.....	39
	LÄHTEET.....	43

## LIITTEET

Liite 1. Haastattelupohja

## Lyhenteet

EEDI	Energy Efficiency Design Index	energiatehokkuusindeksi
EGR	Exhaust gas recirculation	pakokaasun takaisinkierrätys
ESN	European Shortsea Network	Euroopan lähimerenkulun verkosto
HFO	Heavy fuel oil	raskas polttoöljy
HSFO	High sulfur fuel oil	korkea rikkinen polttoöljy
IFO	Intermediate fuel oil	keskitason polttoöljy
IMO	International Maritime Organization	kansainvälinen merenkulkujärjestö
LBG	Liquefied biogas	nesteytetty biokaasu
LNG	Liquefied natural gas	nesteytetty maakaasu
LSFO	Low sulfur fuel oil	matala rikkinen polttoöljy
MDO	Marine diesel oil	aluksissa käytettävä dieselöljy
MEPTEK	Comparing pollution decreasing techniques in marine traffic	meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu
MGO	Marine gas oil	aluksissa käytettävä kaasuöljy
NECA	Nitrogen Emission Control Areas	typenoksidipäästöjen erityisalueet
NMVOG	Non-Methane Volatile Organic Compounds	haihtuvat orgaaniset yhdisteet
SCR	Selective catalytic reduction	katalysaattorijärjestelmät
SECA	Sulfur Emission Control Areas	rikkipäästöjen erityisalueet
SMR	Small modular reactor	pieni modulaarinen ydinreaktori
ULSFO	Ultra low sulfur fuel oil	erittäin matala rikkinen polttoöljy
Xamk	South-Eastern Finland University of Applied Sciences	Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

## 1 JOHDANTO

Koko merenkulkuala on murroksessa. Nykykeskustelun pyöriessä enemmän ja enemmän ympäristönsuojelun ja ilmastonmuutoksen ympärillä, on aiheellista tarkastella aihetta myös meriliikenteen näkökulmasta. Kun eri polttoaineiden terveyshaitat tulevat ilmi, on syytä pohtia polttoaineiden valintaa myös kansanterveyden kannalta. Tässä opinnäytetyössä vertaillaan Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden hintaa, päästöjä, laatuja ja niiden saatavuutta, sekä niiden vaikutusta ihmisiin, ympäristöön ja laivojenkoneistoihin. Opinnäytetyössä pyritään myös ennustamaan minkälaiselta näyttää Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden kokonaisuus tulevaisuudessa.

Opinnäytetyö tehdään osana Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu (Xamk) Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu (MEPTEK) -hanketta. Opinnäytetyön tekemiseen on käytetty tilastoja, tutkimuksia ja raportteja, jotka on saatu alan eri organisaatioilta sekä tietokannoista. Opinnäytetyötä varten on myös tehty haastatteluja alan ammattilaisten kanssa, joilta on saatu näkökulmaa aiheeseen liittyen. Opinnäytetyö toteutetaan kvalitatiivisilla menetelmillä.

MEPTEK-hankkeen tarkoituksena on tutkia meriliikenteen päästövähennystekniikoiden tehokkuutta, elinkaarta, kustannuksia ja ominaisuuksia suhteessa niistä saatuun hyötyyn. Hankkeen tavoitteena on meriliikenteen taloudellisen kilpailukyvyyn ja päästöttömyyskehityksen parantaminen. Hankkeen tavoitteena on, että varustamot ja muut merenkulun järjestöt voivat hyödyntää hankkeesta saatuja tietoja. Hankkeesta vastaa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Koko opinnäytetyöprosessin ajan opinnäytetyötä ohjaava opettaja sekä MEPTEK-hankkeen ohjaajat ovat olleet tavoitettavissa tarvittaessa. Prosessin aikana on ollut mahdollisuus saada ohjausta, vinkkejä ja parannusehdotuksia. Lisäksi tiedonhaussa on pystytty hyödyntämään alan ammattilaisten osamista ja ohjausta.

## 1.1 Tavoitteet, aineisto ja menetelmät

Opinnäytetyön tavoitteena on saada laaja käsitys, millaiselta nykyinen Itämeren laivapolttoaineiden käyttö ja sen tulevaisuus näyttää. Tavoitteena on nähdä polttoaineiden vaikutukset ilmastoon, ihmisiin ja laivoihin. On myös tärkeää seurata polttoaineiden hintakehitystä ja ymmärtää, mistä sen muutokset johtuvat. Tavoitteena on myös vertailla polttoaineiden laatuja ja saatavuutta, sekä nähdä polttoaineiden potentiaalit ja ongelmat. Lisäksi opinnäytetyössä pyritään rakentamaan kuvaa, millaiselta polttoainekirjo voisi näyttää tulevaisuudessa Itämerellä. Haastattelujen tavoitteena on saada tietoa, joita ei suoraan kirjallisuudesta saada. Myös alan ammattilaisten mielipiteet ovat tärkeitä.

Opinnäytetyön aineistona hyödynnetään sekä kirjallisuudesta saatavaa tietoa että ammattilaisten haastatteluja. Kirjallinen aineisto on saatu pääosin eri yrityksiltä ja järjestöiltä, kuten Gasum, Helcom (Helsingin komissio) ja IMO (Kansainvälinen merenkulkujärjestö, International Maritime Organization), mutta myös eri yliopistojen tekemiä tutkimuksia on pystytty hyödyntämään. Työssä on haastateltu kolmea alan ammattilaista. Jokainen haastateltava työskentelee merenkulkualalla, mutta he toimivat eri yrityksissä, erilaisissa tehtävissä. Tämä oli tärkeää, jotta saataisiin mahdollisimman laaja-alaisesti näkökulmia.

Opinnäytetyön kirjallinen osuus on toteutettu kirjallisuuskatsauksena, jonka tiedonhaussa on käytetty apuna tietokantoja. Kirjallisen tiedon avulla saadaan työhön kattava pohja, johon saadaan tarvittavaa näkökulmaa haastattelujen avulla. Haastattelut olivat tunnin mittaisia kvalitatiivisia videohaastatteluja. Niissä kaikissa käytettiin samaa kysymyspohjaa, mutta haastateltavalta kysyttiin tarkentavia kysymyksiä heidän osaamisalastansa riippuen.

## 1.2 Itämeren päästörajoitukset

Itämerellä ja maailmalla on voimassa erinäisiä polttoainerajoituksia, jotka vaikuttavat laivojen polttoaineiden käyttöön. Rajoitukset vaikuttavat polttoaineen rikki- tai typpipitoisuuksiin. Rajoituksilla pyritään vähentämään polttoaineiden aineita, joilla on negatiivinen vaikutus esim. terveyteen tai ympäristöön.



### 1.2.1 Rikkidirektiivit

Laivojen polttoaineiden päästöistä rikkiyhdisteet ovat ihmiselle hyvin vaarallisia. Rikki sisältää hiukkasia, jotka ovat niin pieniä, että hengittäessä ne päätyvät syvälle keuhkoihin ja tästä syystä ovat haitallisia ihmisen terveydelle. Tämän arvellaan aiheuttavan vuodessa 4 000 000 ennen aikaista kuolemaa ja maailmanlaajuisesti yli 14 miljoonaa lapsuusiän astmadiagnoosia. Rikkipäästöt voivat aiheuttaa myös sydän- ja verisuonitauteja sekä keuhkosityöpää. Näistä syistä polttoaineissa käytettävää rikin määrää on säännösteltävä. (Ilmatieteenlaitos 2018.)

Vuonna 2016 IMO asetti vuodelle 2020 maailmanlaajuisen rikkidirektiivin, jonka mukaan laivapolttoaineet saavat sisältää 0,5 % rikkiä entisen 3,5 % sijaan. Itämerellä, Pohjanmerellä ja Pohjois-Amerikassa rajat ovat olleet tiukemmat, 0,1 % jo vuodesta 2015 lähtien. Näitä alueita kutsutaan rikkipäästöjen erityisalueiksi (sulphur emission control area, SECA). Itämerellä rikkioksidipäästöt vähenivät 88 % ja pienhiukkapäästöt 36 % heti rajoitusten astuessa voimaan vuonna 2015. (Ilmatieteenlaitos 2016.) Puhtaampien polttoaineiden arvioidaan vähentävän kolmasosan rikkipäästöistä aiheutuvista kuolemista, sekä vähentävän maailmanlaajuisesti 3,6 % lapsuusajan astmaan sairastuvien määrää. Rikkirajoitukset tulevat myös parantamaan rannikkoalueiden ilmanlaatua. (Ilmatieteenlaitos 2018.)

Myös rikkidirektiiveistä koituvat kustannukset ovat aiheuttaneet huolta. Monet laivayhtiöt käyttävät edelleen raskasta polttoöljyä, joka on edullista, mutta sisältää 3,5 % rikkiä. Tähän ratkaisuna ovat rikkipesurit eli ”skrubberit”, jotka poistavat polttoaineen poltosta syntyvistä savukaasuista rikkiyhdisteet, eivätkä ne näin pääse ilmakehään. Rikkiyhdisteet hävitetään myöhemmin muilla keinoin. Toisena ratkaisuna ovat vähärikkiset polttoaineet, jotka ovat kuitenkin suuremmaksi osaksi kalliimpia kuin runsasrikkinen raskas polttoöljy.

### 1.2.2 Typpioksidipäästörajoitukset

Typpioksidipäästörajoitukset (NO<sub>x</sub>) ovat kiristyneet vuosi vuodelta typenoksidipäästöjen erityisalueilla (Nitrogen Emission Control Areas, NECA), joihin myös Itämeri kuuluu. Vuonna 2000 on astunut voimaan ensimmäinen Tier 1 -raja (kuva 1), jonka mukaan kaikkien vuoden 2000 jälkeen rakennettujen alusten,

joiden teho on yli 130 kW, tulee noudattaa Tier 1 -rajoituksia. Myös 1990-luvulla rakennetut alukset, joiden teho on yli 5 000 kW ja sylinterikoko on yli 90 litraa, joutuvat noudattamaan Tier 1 -rajoituksia. Tier 2 -rajoitukset tulivat voimaan vuonna 2011, mikä koski kaikkia vuoden 2011 jälkeen valmistuvia aluksia. Tier 2 -rajoitukset tulisivat vähentämään typpipäästöjä 20 % Tier 1 -rajoitukseen verrattuna. Tier 3 -rajoitusten, joiden piti alun perin tulla voimaan vuonna 2016, tulivat voimaan vuoden 2021 alussa. Tier 3 -rajoitusten typpirajat ovat jopa 80 % tiukemmat kuin Tier 1 -rajat. Esim. yli 130 kW moottorin, jonka moottorin pyörimisnopeus on 720 rpm, rikkiraja tulee olla 2,4 gNO<sub>x</sub>/kWh. Myös Tier 3 -raja koskee vain vuoden 2021 jälkeen rakennettuja aluksia. (Björkendale s.a.)

Tier	Laivan rakentamisen valmistus päivämäärästä alkaen	Painotetun syklin kokonaispäästöraja(g/kWh) n = moottorin nimellisaika (RPM)		
		n < 130	n = 130–1999	n ≥ 2000
I	1. tammikuuta 2000	17	45 * n <sup>(-0.2)</sup> esim. 720 RPM - 12,1	9,8
II	1 tammikuuta 2011	14,40	44 * n <sup>(-0.23)</sup> esim. 720 RPM - 9,7	7,7
III	1 tammikuuta 2016	3,40	9 * n <sup>(-0.2)</sup> esim. 720 RPM - 2,4	2

Kuva 1. Typen päästörajoitukset NECA-alueilla (IMO s.a)

Typen oksidit eli NO<sub>x</sub>-yhdisteet ovat hengittäessä vaarallisia. Pitkäaikainen altistuminen typen oksidien hengittämiseksi voi vahingoittaa keuhkoja, lisätä hengitysteiden sairauksia ja lisätä vastetta allergeeneille. Typpi myös edesauttaa pienhiukkasten muodostumista ja maanpinnan tason otsonin syntymistä, mitkä ovat myös terveydelle haitallisia. Liian korkealla määrällä typpeä on myös negatiivisia vaikutuksia luontoon ja sen kasvillisuuteen. Se voi esim. aiheuttaa kasvien hidastunutta kasvua ja lehtivahinkoja. (Icopal Noxite s.a.)

Liiallinen typpi ja fosfori ovat johtaneet Itämeren rehevöitymiseen. Typpi ja fosfori ovat ravinteita, jotka ovat aiheuttaneet levien ja vesikasvien liiallisen kasvun. Itämeri on myös hyvin herkkä rehevöitymään, sen mataluuden, hitaan veden vaihtumisen ja sitä ympäröivän asutuksen takia. Voimakas leväkasvu lisää pieniä planktonlevyjä, mikä heikentää veden näkyvyyttä ja vaikuttaa negatiivisesti kalastukseen.

tiivisesti monen meressä elävän lajin elämään ja koko ravinneketjuun. Lisääntynyt rehevöityminen voi myös aiheuttaa ns. happikadon, jonka vuoksi monet Itämeren pohja-alueet ovat nykyisin pysyvästi hapettomia. (Pohjola s.a.)

Kun vuonna 2011 Tier 2 -rajoitukset astuivat voimaan, pystyttiin ne saavuttamaan moottoriteknisin keinoin. Vuoden 2021 alussa Tier 3 -rajoituksiin asetetut rajat vaativat uusien teknologioiden käyttämistä, joita ovat esim. katalysaattorijärjestelmät (SCR), jotka puhdistavat pakokaasuja, tai pakokaasun takaisinkierrätys (EGR), jossa typpipäästöjä pienennetään ohjaamalla pakokaasut takaisin imusarjaan ja sylinteriin. Katalysaattorijärjestelmän yhdistäminen märkäskrubbereihin on tuonut haasteita. Vähätyppipäästöisten polttoaineiden käyttäminen on myös yksi ratkaisu typpipäästöjen vähentämiseen. (Björkendahl s.a.)

## **2 POLTTOAINEIDEN OMINAISUUDET**

Luvussa 2 käydään läpi Itämerellä käytettävät polttoaineet ja niiden ominaisuudet, käytön määrät, päästöt ja hintakehityksen. Lopussa listataan tulevaisuuden mahdollisia vaihtoehtoisia polttoaineita Itämerellä. Kappaleen tavoitteena on saada käsitys polttoaineiden hyvistä ja huonoista puolista, sekä niiden mahdollisesta potentiaalista tulevaisuudessa. Polttoaineita myös vertaillaan keskenään.

### **2.1 Itämerellä käytetyt polttoaineet**

Itämerellä käytetään pääasiassa kolmea eri polttoainetta. Nämä ovat raskas polttoöljy (heavy fuel oil, HFO), kevyet polttoöljyt ja nesteytetty maakaasu (liquefied natural gas, LNG). Kevyet polttoöljyt eli tislepolttoaineet jakautuvat vielä kahteen eri polttoaineeseen, jotka ovat aluksissa käytettävä kaasuöljy (marine gas oil, MGO) ja aluksissa käytettävä dieselöljy (marine diesel oil, MDO).

#### **2.1.1 Raskas polttoöljy (HFO)**

HFO on maailmanlaajuisesti yleisin aluksissa käytetty polttoaine. Lähes kaikki keskinopeat ja hitaat moottorit on suunniteltu raskaalle polttoöljylle. HFO:ta ei pystytä pumppaamaan 20°C:ssa, mistä johtuen HFO pitää esilämmittää n. 40

°C:een, jotta sen olomuoto muuttuu pumpattavaksi. Sillä on hyvin korkea viskositeetti. ISO 8217-standardin mukaan sen pienin viskositeetti on  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$   $50^\circ\text{C}$ :ssa ja pienin tiheys on  $900 \text{ kg}/\text{m}^3$   $15^\circ\text{C}$ :ssa. HFO tyypit nimetään niiden viskositeetin mukaan. Käytetyimmät tyypit ovat IFO 180 ja IFO 380, joiden viskositeetit ovat  $180 \text{ mm}^2/\text{s}$  ja  $380 \text{ mm}^2/\text{s}$ . HFO jaetaan myös sen rikkipitoisuuden mukaan kolmeen eri luokkaan: HSFO (high sulfur fuel oil), LSFO (low sulfur fuel oil) ja ULSFO (ultra low sulfur fuel oil). HSFO:n suurin rikkipitoisuus on 3,5 %, LSFO:n 1 % ja ULSFO:n 0,1 %. (Marquard & Bahls 2015a.)

HFO on hyvin rikkipitoista, mistä johtuen sen käyttöä pyritään vähentämään. Kuitenkin suurin osa aluksien moottoreista on suunniteltu HFO:lle, mikä vaikeuttaa siitä luopumista. Normaalisti HFO:n rikkipitoisuus on 3,5 %, joka oli maailmanlaajuinen rajoitus ennen 2020 toimeenpantua 0,5 % rajaa. Jos HFO halutaan saada tähän 0,5 % rikkipitoisuuteen, pitää sille tehdä ns. rikinpoisto. Rikinpoistossa rikkiyhdisteet muutetaan rikkivedyksi korkeassa paineessa, jonka jälkeen ne erotellaan öljystä. Tämä tehdään öljyjalostamalla osana polttoaineen jalostusprosessia. HFO:sta voidaan poistaa rikkiä niin, että sen rikkipitoisuus on 0,1 %. Tällöin sitä voitaisiin käyttää myös Itämerellä, jossa rikkirajoitus on 0,1 %. Tämä ei ole kuitenkaan taloudellisesti kannattavaa. Tästä syystä, jos HFO:ta halutaan käyttää Itämerellä, käytetään laivoissa rikkipesureita eli skrubbereita. Skrubberien avulla voidaan poistaa polttoaineen poltosta syntyvistä savukaasuista pienhiukkasia ja pakokaasuja ja estää niiden joutumista ilmaan. Skrubberien avulla merenkulkualan yritykset voivat säästää rahaa ostamalla skrubbereita kokonaan uusien moottorien sijaan. (Marquard & Bahls 2015a.)

Skrubbereita on kolmea eri tyyppiä: avoimia, suljettuja sekä hybridimalleja. Avoimen kierron skrubberit käyttävät merivettä pienentääkseen polttoaineen rikkipitoisuuden alle 0,1 %:iin. Merivettä suihkutetaan pakokaasuihin, josta rikki tarttuu vesipisaroihin tietyssä lämpötilassa, jonka jälkeen rikkipitoinen vesi poistetaan skrubberista meriveteen. Suljetun kierron skrubberit toimii muuten samalla periaatteella kuin avoin, mutta rikkipitoinen vesi ei poistuu mereen, vaan erilliseen säiliöön. Hybridimalleissa on sekä avoin että suljettu kierto. Ajotapa voidaan valita niin, että rikkipitoinen vesi menee suoraan mereen tai skrubberin säiliöön. (VDL AEC Maritime s.a.)

### **2.1.2 Kevyet polttoöljyt**

Kevyitä polttoöljyjä ovat aluksissa käytettävät kaasua- ja dieselöljyt (MGO ja MDO), jotka ovat tislepohjaisia polttoaineita. Kuten HFO:ta, myydään myös kevyitä polttoöljyjä eri rikkipitoisuuksissa. Kevyillä polttoöljyillä voidaan myös hyödyntää skrubbereita, kun rikkipitoisuudet ovat yli rajoituksien. Kevyet polttoöljyt ovat kuitenkin huomattavasti kalliimpia kuin raskaat ja siksi monet laivayhtiöt suosivat edelleen HFO:ta. Toisin kuin HFO, kevyitä polttoöljyjä ei tarvitse esilämmittää. (Marquard & Bahls 2015b.)

#### **Marine diesel oil (MDO)**

MDO on sekoitus tislettä ja HFO:ta. Tarkasti ottaen MDO on suurimmaksi osaksi tislettä, vain pienellä osalla HFO:ta. Jos HFO:ta on suurempi osa kuin tislettä, kutsutaan polttoainetta tarkalleen nimellä intermediate fuel oil (IFO). Tisleen määrällä pystytään kontrolloimaan polttoaineen rikkimäärää sekä polttoaineen käytettävyyttä. Eri tisesuhteilla voidaan MDO:ta käyttää eri moottoreissa, aina pienemmistä moottoreista suurien aluksien moottoreihin. MDO:lla on hyvin matala viskositeetti, korkeintaan 12 mm<sup>2</sup>/s. (Marquard & Bahls 2015b.)

#### **Marine gas oil (MGO)**

MGO on täysin tislepohjaista. Yleensä MGO on sekoitus monia tisleitä ja se on olomuodoltaan samankaltainen kuin diesel, mutta sakeampi ja väriltään se on hyvin vaalea. MGO:ta käytetään yleisimmin pienemmissä keski- ja korkean nopeuden moottoreissa. Näihin kuuluvat kalastuslaivat, pienet lautat ja hinaajat. Samoin kuin MDO:lla, myös MGO:lla on matala viskositeetti ja sitä pystytään pumppaamaan ilman esilämmitystä. (Marquard & Bahls 2015c.)

Myös MGO:ta tuotetaan eri rikkipitoisuuksissa, mutta se on vähemmän rikkistä kuin HFO. ISO 8217 mukaan suurin rikkipitoisuus MGO:lla on 1,5 %. Alle 0,1 % rikkipitoista MGO:ta kutsutaan nimellä low sulfur marine gasoil (LS-MGO), joka mahdollistaa siis sen käytön myös Itämeren alueella. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää myös skrubbereita. MGO:n pienhiukkas ja nokipäästöt ovat huomattavasti pienemmät kuin HFO:lla. (Marquard & Bahls 2015c.)

On mahdollista, että MGO:n suosio kasvaa tulevina vuosina, johtuen sen vähäisistä pienhiukkaspäästöistä ja sen rikkipitoisuuden hallinnan vuoksi. Myös moottoriteknologian uskotaan mukautuvan MGO:lle. Kuitenkin MGO on vielä huomattavasti kalliimpaa kuin HFO, esim. vielä 2016 MGO oli kaksi kertaa niin kallista kuin HFO. (Marquard & Bahls 2015c.)

### **2.1.3 Nesteytetty maakaasu (LNG)**

Nesteytetty maakaasu eli LNG on väritön, hajuton ja myrkytön, eikä se ole syövyttävä aine. LNG on normaaleissa lämpötiloissa kaasumuodossa. Se muuttuu nestemäiseen olomuotoonsa, lämpötilan laskiessa alle  $-163^{\circ}\text{C}$ :en. Tämä takia LNG:ta pitää kuljettaa lämpöeristetyissä säiliöissä. Se koostuu suurimmaksi osaksi metaanista, mutta voi sisältää muitakin kaasuja, kuten hiilidioksidia, etaania, eteeniä, typpeä, propaania, butaania ja pieniä määriä jalo-kaasuja. (Marquard & Bahls 2015d.) Maailman suurimmat LNG:n tuottajamaat ovat Qatar, Malesia ja Australia. Euroopan suurin tuottaja on Norja. (Gasum 2018, 9.)

LNG on nestemäisessä olomuodossaan n. 600 kertaa tiheämpää kuin kaasumaisessa olomuodossa. Kaasumuodossa tiheys on n.  $0,7 \text{ kg/m}^3$ , kun nestemäisenä LNG:n tiheys nousee yli  $420 \text{ kg/m}^3$ . Tämä helpottaa LNG:n kuljettamista, sillä 600 litraa kaasumaista LNG:ta saadaan tiivistettyä yhdeksi litraksi nestemäistä LNG:ta. Tämän siis mahdollistaa LNG:n kuljettamisen lämpöeristetyissä säiliöissä ja näin sitä saadaan satamiin, joihin ei ole kytketty omia kaasuputkilinjoja. (Marquard & Bahls 2015d.)

LNG on täysin rikkivapaa polttoaine, jonka takia sitä voidaan käyttää missä tahansa maailmalla ilman erillisiä puhdistusjärjestelmiä. Myös muut päästöt ovat pienempiä verrattuna raskaisiin polttoaineisiin: typenoksidipäästöt ovat 85 % pienemmät ja hiilidioksidipäästöt n. 20 % pienemmät. LNG:sta ei myöskään synny juuri lainkaan pienhiukkaspäästöjä. (Gasum 2018, 9.)

Vaikka LNG tuottaa muita polttoaineita vähemmän hiilidioksidipäästöjä, on LNG:n poltossa riskinä metaanivuodot. Metaanivuodossa maakaasusta vuotaa palamatonta metaania ilmaan. Metaani on hiilidioksidia paljon voimakkaampi kasvihuonekaasu. Metaanivuodon riskit vaihtelevat eri moottorityypeillä, joista suurimman vuotoriskin omaavat kahden polttoaineen moottorit.

Riskit metaanivuotoihin ovat myös suurempia, kun moottoria käytetään pienellä kuormalla. (Brynnolf ym. 2014, 9.)

LNG nähdään suurena lisäkustannuksena laivayhtiöissä. Vaikka LNG on itsessään halvempaa kuin muut polttoaineet, ovat LNG:lla toimivat moottorit hyvin kalliita. LNG-moottorit voivat olla 6–8 miljoonaa euroa kalliimpia kuin normaalit laivoissa käytettävät moottorit. Tämä on mittava investointi uusiin laivoihin, sekä jo olemassa oleviin aluksiin. Arvioiden mukaan LNG maksaisi itsensä takaisin muutamissa vuosissa, sen halvemman hinnan vuoksi. Kuitenkin niin kauan kun skrubberit ovat halvempia kuin LNG-moottorit, näkevät monet laivayhtiöt LNG-tekniikan ylimääräisenä kustannuksena. (Gasum 2018, 8.)

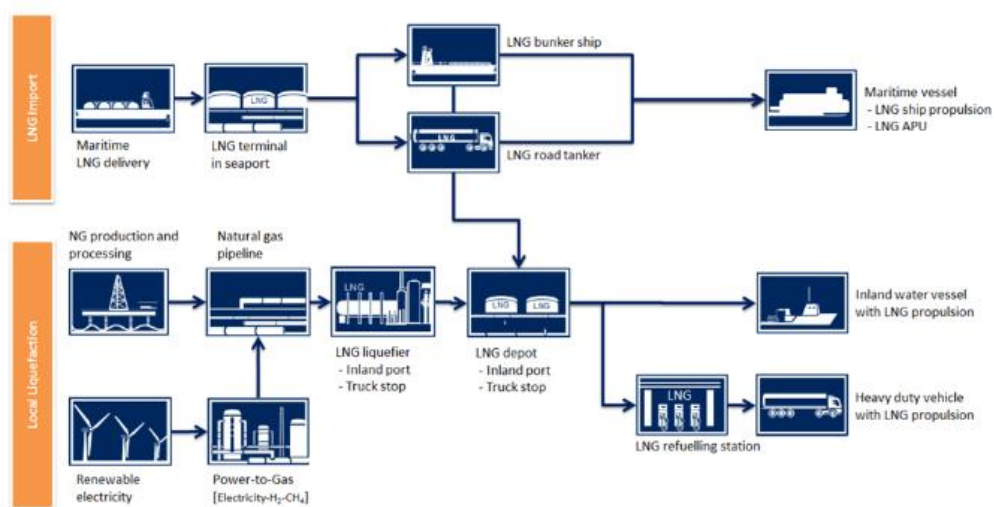
### **LNG infrastruktuuri ja kuljetus**

Yksi LNG:n tuomista haasteista on sen vaativa infrastruktuuri. LNG:ta pystytään kuljettamaan samaa verkostoa pitkin kuin normaalia maakaasua. Nämä verkostot eivät kuitenkaan yleensä yllä satamiin saakka ja usein sitä täytyykin kuljettaa lämpötiivissä säiliöissä joko maalla rekoilla tai meriteitse säiliöaluksilla. (Bakhtov 2019, 13.)

Suomessa on kaksi LNG-terminaalia. Suomen ensimmäinen LNG-terminaali valmistui vuonna 2016 Poriin. Terminaalin koko on 28 500 m<sup>3</sup> ja siellä pystytään tankkaamaan samanaikaisesti kolmea säiliöautoa sekä säiliöalusta. (Gasum LNG-terminaali Porissa s.a.) Torniossa sijaitsee Suomen toinen LNG-terminaali, jonka koko on 50 000 m<sup>3</sup>. Se on Pohjoismaiden suurin LNG-terminaali. Sen omistaa Manga LNG, joka on Manga Terminal Oy:n tytäryhtiö. (LNG terminal in Tornio s.a.) Myös Haminaan ollaan rakentamassa omaa LNG-terminaalia, jonka palvelut aukeavat 1.10.2021 (HaminaLNG 2021.)

Tuotanto- ja logistiikkaketjua havainnoidaan kuvassa 2. Koska kaasuputkilinjojen rakentaminen on kallista, vaikeaa ja joskus jopa mahdotonta, täytyy LNG:ta joskus kuljettaa laivoilla tai rekoilla. LNG:n tuotantoalueet sijaitsevat yleensä kaukana satamista. Ensisijaisesti maakaasua kuljetetaan kaasumaisessa muodossa putkiverkostoja pitkin, jonka jälkeen se tiivistetään neste-mäiseksi merikuljetuksia varten, kuljetuksien helpottamisen vuoksi. Meriteitse

LNG:ta kannattaa kuljettaa varsinkin silloin, kun matkat ovat pitkiä. (Kaasuyhdistys 2015.)



Kuva 2. LNG:n tuotanto- ja logistiikkaketju (Helcom 2021)

## 2.2 Kokonaiskuva

Vuonna 2015 Itämerellä liikkui 7 889 IMO rekisteröityä laivaa. Joka hetki siellä liikkuu yli 1 500 rekisteröityä laivaa. Näistä laivoista 48 % oli rahtilaivoja, 22 % säiliöaluksia, 5,4 % matkustajalaivoja, 5,2 % palvelulaivoja, 4,3 % konttilaivoja, 4,1 % kalastuslaivoja, 3,1 % ro-ro-aluksia ja 7,4 % muita aluksia. Laivat liikkuvat yli 60 miljoonaa meripeninkulmaa eli n. 111 miljoonaa kilometriä vuodessa. Liikkuvuus on pysynyt tasaisena vuodesta 2016 ja eniten kilometrejä tulee rahtilaivoille. Kuitenkin rahtilaivojen ja säiliöalusten kuljetut matkat ovat hieman lyhentyneet viime vuosina. Satamakäyntejä oli yhteensä 295 000. Näistä suurin osa, lähes puolet, olivat matkustajalaivojen toimesta. Luonnollisesti syynä on tiheät kaupunkien väliset matkustajalaivat, kuten Tukholma ja Turku. (Helcom 2018, 24.)

### 2.2.1 Päästöt

Itämerellä vuoden 2019 päästöt olivat nousseet verrattuna vuoden 2018 päästöihin. Vuonna 2019 Itämeren päästöt olivat IMO:lle rekisteröidyillä aluksilla seuraavat:

- tyyppi 286 tuhatta tonnia
- rikki yhdeksän tuhatta tonnia



- pienhiukkaset yhdeksän tuhatta tonnia
- hiilimonoksidi 20 tuhatta tonnia
- hiilidioksidi 13,7 miljoonaa tonnia
- haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Non-Methane Volatile Organic Compounds, NMVOC) kaksi tuhatta tonnia.

Nämä ovat kuitenkin vain IMO:lle rekisteröityjen aluksien päästöt. Päästöt kaikilta aluksilta olivat seuraavat:

- typpi 332 tuhatta tonnia
- rikki 11 tuhatta tonnia
- pienhiukkaset 11 tuhatta tonnia
- hiilimonoksidi 24 tuhatta tonnia
- hiilidioksidi 15,7 miljoonaa tonnia
- haihtuvat orgaaniset yhdisteet kolme tuhatta tonnia.

Kaikki päästöt ovat nousseet hieman vuodesta 2018. Rikkipäästöt ovat nousseet 0,6 %, typpipäästöt 0,2 %, pienhiukkaspäästöt 0,4 %, hiilimonoksidipäästöt 1 % ja hiilidioksidipäästöt 0,3 % vuodesta 2018. On kuitenkin huomioitava, että laivojen yhteenlaskettu ajomatka oli noussut 0,7 %. (Jalkanen 2020, 1.)

Taulukossa 1 on IMO rekisteröityjen sekä rekisteröimättömien alusten yhteenlasketut Itämerellä syntyneet päästöt. Ropax-alukset ovat tuottaneet eniten päästöjä. Tämän jälkeen päästöjä ovat tuottaneet eniten kontti-, säiliö- ja rahtilaivat sekä ajoneuvokuljetusalukset. Muut alustyytit olivat tuottaneet huomattavasti näitä vähemmän päästöjä. On kuitenkin huomioitavaa, että ropax-alusten kuljettu matka on huomattavasti pienempi kuin rahtilaivojen. (Jalkanen 2020, 4.)

Taulukko 1 Itämerellä laivakohtaiset ja alueittaiset päästöt (Jalkanen 2020)

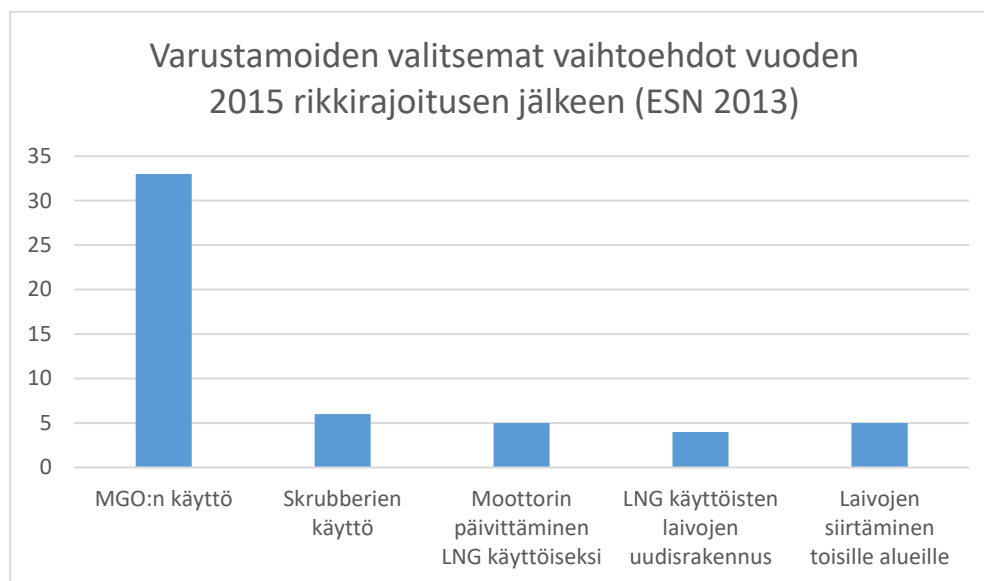
Itämeri 2019	Pääpoltto- aineet	Lisä- poltto- aineet	Typen oksidit (Nox)	Rikin ok- sidit (Sox)	Pien- hiukka- set (PM25)	Hiilimo- noksidi (Co)	Hiilidi- oksidit (Co <sub>2</sub> )	Matkus- tus	Kuljetus- työ	VOC pääs- töt	Laivo- jen määrä
	(10 <sup>3</sup> ton- nia)	(10 <sup>3</sup> tonnia)	(tonnia)	(tonnia)	(ton- nia)	(tonnia)	(10 <sup>3</sup> tonnia)	(10 <sup>3</sup> tonnia)	(tonnia)	(10 <sup>3</sup> t/ km)	
Kaikki	3 613	1 596	333 876	10 562	10 162	23 898	15 832	143 814	977 510	2 798	
IMO	3 315	1 214	287 929	9 157	8 824	20 190	13 766	107 356	861 600	2 454	
Varsinai- nen Itä- meri	2 180	697	189 129	5 824	5 548	13 096	8 746	82 717	570 825	1 558	
Kattegat	645	379	68 138	2 084	2 015	4 987	3 112	30 939	210 332	544	
Suomen- lahti	445	361	49 453	1 634	1 621	3 695	2 450	15 244	141 352	429	
Pohjan- lahti	3 030	133	23 105	887	847	1 802	1 326	12 470	44 896	232	
Riianlahti	38	27	4 052	133	131	317	198	2 445	10 104	35	
RoPax- alukset	1 070	181	75 303	2 514	2 272	4 427	3 804	15 915	32 364	686	211
Ajoneu- vonkulje- tusaluks- et	374	62	26 917	837	700	1 606	1 325	7 226	52 618	229	264
Rahtilai- vat	720	274	67 478	2 038	2 034	5 415	3 021	44 928	361 271	535	4 035
Kont- tialukset	420	247	46 136	1 363	1 408	3 385	2 027	10 789	143 385	269	492
Säiliö- alukset	649	363	71 314	2 065	2 133	4 574	3 074	19 760	387 871	552	1 981
Matkus- taja- alukset	46	25	4 758	146	132	316	217	5 234	0	37	465
Risteilijät	130	39	9 600	335	311	642	515	1 364	0	102	87
Kalastus- alukset	21	21	2 403	89	80	220	130	6 789	0	21	784
Palve- lualukset	36	41	4 257	158	155	365	23	3 370	0	43	388

Taulukossa 1 ei ole otettu huomioon ns. huviveneilyä, jolla on suuri vaikutus varsinkin typpimonoksidin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöihin. (Jalkanen 2020, 4.)

## 2.2.2 Polttoainejakauma

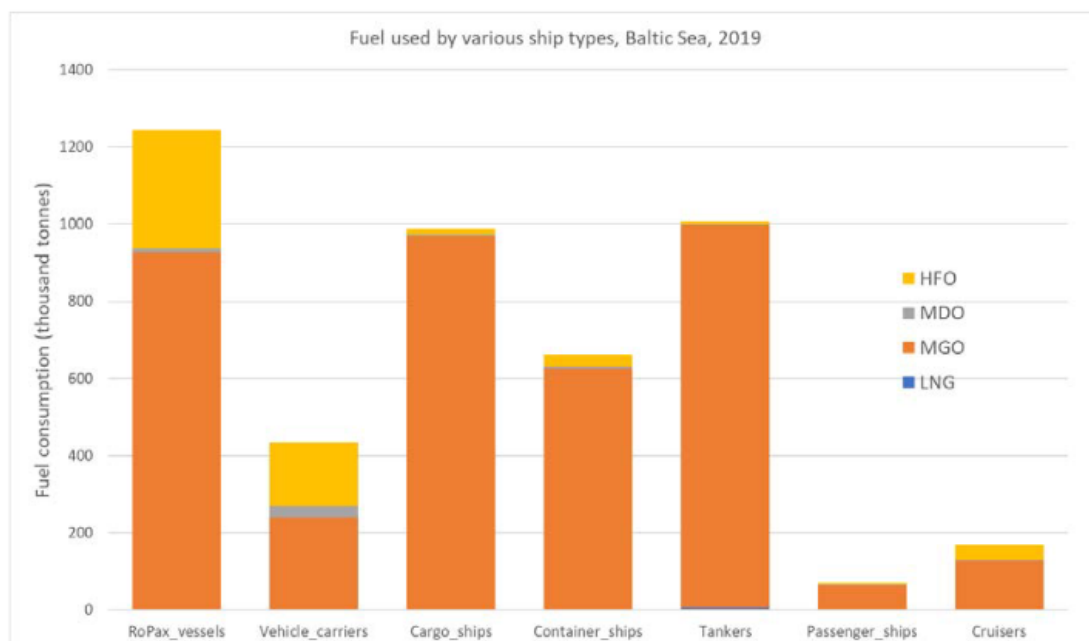
Vuonna 2013 Euroopan lähimerenkulun verkosto (European Shortsea Network, ESN) tuotti tutkimuksen, jossa 33 varustamolta kysyttiin, mihin vaihtoehtoon he päätyisivät vuoden 2015 rikkirajoitusten astuessa voimaan. Suurin osa valitsi MGO:n. Varustamot olivat suurimmaksi osaksi suomalaisia ja norjalaisia. Kaikki varustamoista olisivat valmiita valitsemaan vaihtoehtokseen MGO:n ja 70 % varustamoista piti tätä ainoana vaihtoehtonaan. Muita vaihtoehtoja olivat skrubberien käyttö, laivojen siirtäminen muille alueille, uusien aluksien tekeminen LNG käyttöiseksi tai vanhoihin aluksiin LNG-moottorien

jälkiasennus. Nämä kaikki vaihtoehdot olivat varteenotettavia 4–6 varustamon mielestä. Tarkemmat tulokset nähdään kuvasta 3. Vaikka MGO:n käyttökustannukset ovat kalliimmat, se nähdään kannattavana, sillä se ei vaadi suuria investointeja. MGO nähdään erityisen kannattavana yli 10 vuotta vanhoissa aluksissa, joihin ei kannata enää tehdä suuria investointeja. Myös MGO saata-  
vuuden uskottiin olevan riittävä. (Pöntynen & Lempiäinen 2015, 22.)



Kuva 3. Vuonna 2013 varustamoiden valitsemat ratkaisut vuoden 2015 rikkirajoituksille (ESN 2013)

Vuonna 2017 eli ennen typen Tier 3 -rajoituksia, mutta rikkirajan 0,1 % jälkeen, Itämerellä eniten käytetty polttoaine oli MGO. Sen osuus oli n. 88 %. LNG:n osuus oli vain 0,1 %. Loput 11,9 % olivat HFO:ta ja MDO:ta. 85 alusta oli varustettuna skrubbereilla, joista suurin osa oli avoimen kierron skrubbereita. Niistä vapautui n. 70 miljoonaa kuutiometriä vettä mereen. (Jalkanen & Johanson 2018, 5.) Kuvasta 4 nähdään Itämerellä käytettyjen polttoaineiden jakauma laivatyypeittäin vuodelta 2019. Eniten käytetty polttoaine on edelleen MGO. HFO:ta käyttävät lähinnä ropax-, ajoneuvonkuljetus- ja risteilyalukset, joihin on asennettu skrubberit rikkirajan vuoksi. Tislepohjaisista polttoaineista MGO on huomattavasti suosittu kuin MDO. LNG:n käyttö on edelleen hyvin vähäistä ja vain säiliöaluksilla on pieni osuus LNG:ta käytössä. Muissa luokissa LNG käyttöiset laivat ovat vielä yksittäisiä aluksia. (Jalkanen 2020, 6.)



Kuva 4. Itämeren polttoainejakauma vuonna 2019 (Jalkanen 2020)

### 2.3 Päästövertailu

Ihmisten aiheuttamat kasvihuonepäästöt ovat vaikuttaneet ilmaston lämpenemiseen. Kasvihuonekaasuja ovat hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>) ja dityppioksidi (N<sub>2</sub>O). Merenkulkualalla on tehtävänä oma osuutensa ilmastomuutoksen torjunnassa. Merikuljetus on vastuussa 90 %:sta maailmanlaajuisesta kaupankäynnistä, mutta se tuottaa vain 2,7 % globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Päästöjä tulee vähentää taloudellisesti kannattavalla tavalla siten, että se ei tule vaikuttamaan negatiivisesti merikuljetuksiin, maailmankauppaan tai taloudelliseen kasvuun. Vuonna 2018 Merenkulun ympäristösuojelukomitea (Marine Environment Protection Committee, MEPC) 72. kokouksessa päätettiin kasvihuonepäästöjen hillitsemiseksi seuraavia asioita: pakollisen energiatehokkuusindeksin (Energy Efficiency Design Index, EEDI) tiukentamista uusille aluksille, vuoteen 2030 kuljetussuoritusten (tonnia/km) CO<sub>2</sub> päästöjen vähentämistä vähintään 40 % ja vuoteen 2050 70 % vähennykseen verrattuna vuoden 2008 päästöihin. Tavoitteena on saavuttaa kasvihuonepäästöjen huippu mahdollisimman pian, jonka jälkeen vähentää niitä tasaisesti ja vuonna 2050 absoluuttinen vuotuinen päästömäärä olisi enää 50 % vuoden 2008 tasosta. Tavoitteena on myös vähentää hiilidioksidin määriä vuoden 2050 jälkeen, mahdolliseen täydelliseen poistamiseen, jotta Pariisin ilmastosopimuksen lämpötavoitteisiin päästäisiin. (Björkendahl s.a.)

### 2.3.1 Polttoaineiden hiilipitoisuudet

Vaikka HFO:n käyttö on vähenemässä sen rikkipitoisuuden vuoksi, on sen hiilipitoisuus pienempi kuin tisleiden. Taulukosta 2 huomataan, että tisleiden diesel / gas oil hiilipitoisuus on 0,875, HFO:n 0,5 ja LNG:n 0,75. Hiilijalanjälki mitataan tuhannesta kilosta poltettua polttoainetta syntyvästä hiilidioksidin määrästä. Taulukosta 2 nähdään, että suurin hiilijalanjälki syntyy tisleistä, joka on 3,206 t-CO<sub>2</sub>/t-polttoaine ja pienin syntyy LNG:sta, 2,75 t-CO<sub>2</sub>/t-polttoaine. (Acomi 2014, 3.)

Taulukko 2. Polttoaineiden hiilipitoisuudet (Acomi 2014)

Polttoainetyyppi	Viite	Hiilipitoisuus	t-CO <sub>2</sub> /t-polttoaine
Diesel / Kaasuöljy	ISO 8217	0,875	3,20600
Kevyt polttoöljy (LFO)	ISO 8217	0,86	3,15104
Raskas polttoöljy (HFO)	ISO 8217	0,85	3,11440
Nesteytetty maaöljy (LPG)	Propaani	0,819	3,00000
	Butaani	0,827	3,03000
Nesteytetty maakaasu (LNG)		0,75	2,75000

Polttoaineiden hiilidioksidipäästöjä voidaan myös vertailla niiden päästökertoimien avulla. Päästökertoimet kertovat, kuinka paljon hiilidioksidia syntyy tuotettuun energiamäärään nähden. Yksikköinä voidaan käyttää gCO<sub>2</sub>/MJ. Päästökertoimet ovat seuraavanlaiset: HFO 80,1 gCO<sub>2</sub>/MJ, MGO 73,6 gCO<sub>2</sub>/MJ ja LNG 56,5 gCO<sub>2</sub>/MJ. Näihin lukuihin on huomioitu vain poltossa syntyvät hiilidioksidipäästöt. Vaikka LNG:lla on pienin päästökerroin, ei siihen ole huomioitu metaanivuotoja. (Pavlenko ym. 2020, 8.)

### 2.3.2 Elinkaarivertailu

Vuonna 2014 Chalmersin teknillinen korkeakoulu ja Ruotsin ympäristötutkimuslaitos (IVL Swedish Environmental Research Institute) tekemässä tutkimuksessa, *Transportation Research Part D: Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels*, polttoaineiden päästöjä verrattiin käyttämällä elinkaariarviointia. Elinkaariarvioinnissa polttoaineen päästöjä arvioidaan raaka-aineiden hankinnasta aina sen käyttöön asti. Tutkimuksessa verrattiin neljää eri polttoainevaihtoehto-

toa: HFO, HFO avoimen kierron skrubberilla ja SCR-järjestelmällä varustettuna, MGO SCR-järjestelmällä varustettuna ja LNG. Jokaista polttoainetta verrattiin ro-ro-aluksessa, jonka moottoria käytettiin 500 RPM kierrosnopeudella. LNG:ta arvioidessa on käytetty 3 % metaanivuotoa, joka tarkoittaa 30 kg:aa metaania vuotaa ilmastoon tuhatta kiloa poltettua LNG:ta kohden. On myös oletettu, että puolet LNG:sta on tuotettu Norjassa (350 meripeninkulmaa) ja toiset puolet Qatarissa (7 000 meripeinkulmaa). Skrubberien arvioidaan tuovan 1–3 % lisää energiantarvetta aluksen käyttöön, joten tutkimuksessa on käytetty 2 % lisää energiankäyttöön. Myös typpeä poistava SCR-järjestelmä tuottaa hieman lisää päästöjä, koska SCR-järjestelmä käyttää typen poistoon ureaa. Urea on orgaaninen yhdiste, joka on valmistettu nestemäisestä ammoniakista ja hiilidioksidista, joten myös nämä päästöt on lisätty tutkimukseen. (Brynolf ym. 2014, 1.)

Elinkaariarvioinnin tuloksista huomataan, että suurin osa polttoaineiden päästöistä syntyy edelleen palamisessa. Kaikilla neljällä vaihtoehdolla on samankaltaiset vaikutukset ilmaston lämpenemiseen, MGO:lla ja LNG:lla se on kuitenkin hieman pienempi kuin HFO:lla. Vaikka LNG:n metaanivuoto olisi 3 %, sen vaikutukset ilmaston lämpenemiseen ovat edelleen pienimmät. Jos metaanivuodot saataisiin eliminoitua kokonaan, tai edes alle 2 %, olisi LNG:n ilmaston lämpenemisen vaikutukset huomattavasti pienemmät kuin muilla verratuilla polttoaineilla. On kuitenkin huomioitavaa, että 4 % tai suuremmat metaanivuodot tekisivät LNG:n vaikutuksesta ilmaston lämpenemiseen suuremmat kuin muilla verratuilla polttoaineilla. (Brynolf ym. 2014, 12.)

Tutkimuksen mukaan SCR-järjestelmä on hyvä tapa vähentää typpipäästöjä. Ongelmana ovat mahdolliset ammoniakkivuodot ureasta. Jos ureaa käytetään liikaa SCR-järjestelmässä, on riskinä ammoniakkivuoto. Tämä voisi mahdollisesti tehdä SCR-järjestelmän täysin turhaksi, sillä ammoniakilla on hyvin suuret pienhiukkaspäästöt. Tutkimuksessa huomattiin myös SCR-järjestelmän nostavan hiilidioksidipäästöjä n. yhdellä prosentilla. Kuitenkin, jos ammoniakkivuodot pystytään eliminoimaan, SCR-järjestelmillä pystytään laskemaan typpipäästöt samaan tasoon LNG:n kanssa. Toinen ongelma SCR-järjestelmän kanssa on sen yhdistäminen skrubbereihin. Haasteita tuo se, että SCR-järjestelmä ja skrubberit toimivat eri lämpötiloissa, mikä hankaloittaa niiden yhdistä-

mistä. Tutkimuksessa oletetaan, että nämä kaksi toimivat yhdessä ilman ylimääräistä polttoaineen kulutusta. Todellisuudessa polttoaineen kulutus voi lisääntyä, mikä nostaisi HFO:n vaikutusta ilmaston lämpenemiseen. (Brynnolf ym. 2014, 8, 12.)

Kaikki kolme vaihtoehtoista polttoainetta vähentävät rikkipäästöjä Itämeren sekä SECA-alueiden tasolle. On tärkeää, että metaani- ja ammoniakkiuotoja seurataan ja säännöstellään, jotteivat vaihtoehtoisten polttoaineiden hyödyt jäisi olemattomiksi. MGO:n ja HFO:n tuotannon tuomia päästöjä verrattaessa on käytetty vuonna 2003 tehtyä tutkimusta. On kuitenkin arvioitu, että vähärikkisen MGO:n tuotannon päästöt ovat hieman suuremmat. Tämä nostaisi MGO:n hiilidioksidipäästöt samaan tasoon skrubberilla ja SCR-järjestelmällä varustetun HFO:n päästöjen kanssa. (Brynnolf ym. 2014, 12, 15.)

On myös arvioitu, että LNG:n ja skrubberien käyttö vähentäisi rahdin määrää. Taulukosta 3 nähdään, että LNG-käyttöisen aluksen paino on ollut vain 7 200 tonnia, verrattuna muiden alusten 7 500 tonniin eli 4 % vähemmän. Tämä nostaa hieman LNG:n päästöjä, jos hiilidioksidipäästöjä verrataan kuljetettuun rahtiin. On myös mahdollista, että skrubberit vaikuttavat aluksien vakauteen, ja näin vähentävät mahdollista alusten rahdin määrää. Arvion mukaan skrubberilla varustettu laiva pystyisi kuljettamaan 2 % vähemmän rahtia muihin verrattuna. Arvioiden mukaan SCR-järjestelmällä ja skrubberilla varustettua HFO:ta käyttävän laivan vaikutus ilmaston lämpenemiseen on jopa 6 % suurempi kuin HFO ilman SCR-järjestelmää ja skrubberia. Tutkimuksessa on myös oletettu, että puolet LNG:sta on tuotettu Qatarissa ja puolet Norjassa. Qatarista tuotetun LNG:n päästöt ovat suuremmat, koska se tuodaan kauem-paa. Tulevaisuudessa, kun LNG:n tuotanto lisääntyy ja on mahdollista saada enemmän lähituotettua LNG:ta, tulevat päästöt hieman laskemaan elinkaariarviointia ajatellen. (Brynnolf ym. 2014, 12.)

Taulukko 3. *Transportation Research Part D: Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels (2014)* -tutkimuksen eri alusten ominaisuudet ja päästöt (Brynnolf ym. 2014)

	Ro-ro-alus, polttoaineena HFO	Ro-ro-alus, polttoaineena HFO, varustettu SCR järjestelmällä ja skrubberilla	Ro-ro-alus, polttoaineena MGO, varustettu SCR järjestelmällä	Ro-ro-alus, polttoaineena LNG	Ro-ro-alus, polttoaineena LNG
Moottorin teho (KW)	14,68	14,68	14,68	14,68	14,68
Moottorin tyyppi	keskinopea nelitahti dieselmoottori	keskinopea nelitahti dieselmoottori	keskinopea nelitahti dieselmoottori	Kaksoispolttoainemoottori	Kipinäsytytyskaasumoottori
Moottorin hyötysuhde (%)	41	41	41	41	41
Moottorin nopeus (RPM)	500	500	500	500	500
Moottorin kuorma (%)	85	85	85	85	85
Rahdin määrä (tonnia)	7500	7500	7500	7200	7200
Kuormituskerroin	88	88	88	88	88
keskimääräinen lastattu rahti (tonnia)	6600	6600	6600	6336	6336
Nopeus (solmua)	18	18	18	18	18
Aluksen hyötysuhde (KWh työ/tonni km)	0,0568	0,0568	0,0568	0,0591	0,0591
Polttoaine (MJ/tonni km)	0,4987	0,5087	0,4987	0,5189	0,5189
Urea (g/MJ)	0	0,86	0,8	0	0
CH <sub>4</sub> (g/MJ)	0,0005	0,0005	0,0005	0,62 <sup>b</sup> (1,65 <sup>c</sup> )	0,91 <sup>c</sup>
CO(g/MJ)	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3
CO <sub>2</sub> (g/MJ)	79	79(80 <sup>d</sup> )	75(76 <sup>d</sup> )	57	57
NO <sub>x</sub> (g/MJ)	1,6	0,28	0,28	0,12	0,12
N <sub>2</sub> O(g/MJ)	0,0004	0,004	0,004	-	-
NH <sub>3</sub> (g/MJ)	0,00003	0,0029	0,0029	-	-
NMVOC(g/MJ)	0,056	0,056	0,059	-	-
PM <sub>10</sub> (g/MJ)	0,093	0,07	0,011	0,004	0,004
SO <sub>2</sub> (g/MJ)	1,33	0,049	0,047	0,001	0,0001
<p><sup>a</sup> Skrubberien käyttö saattaa vähentää rahdin määrää aluksissa</p> <p><sup>b</sup> Esittää 3 %:in metaanivuoto moottorista</p> <p><sup>c</sup> Suurempi päästökerroin perustuu ISO 8178/IMO meridieselmoottoareiden tyyppioksidipäästöjen valvonnan tekninen säännöstö Nielsen ja Stenersen (2010), kuvaa keskimääräistä metaani vuotoa, 8 % Kaksoispolttoainemoottorilla ja 4,4 % Kipinäsytytyskaasumoottorilla</p> <p><sup>d</sup> Esittää ureasta syntyvät CO<sub>2</sub> päästöt, sen hajoamisesta ammoniakiksi ja hiilidioksidiksi.</p>					

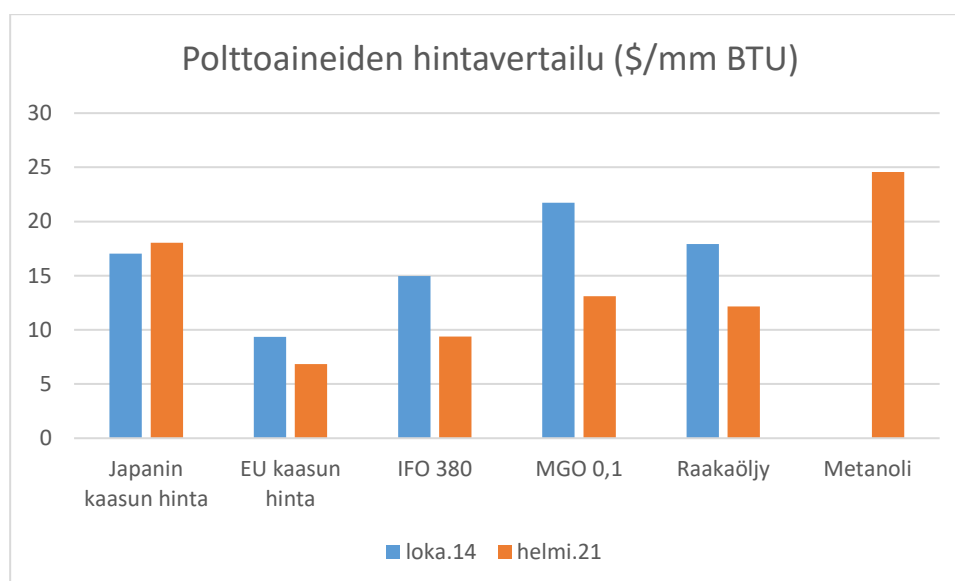
Vaikkei vaihtoehtoisten polttoaineiden vaikutus ilmaston lämpenemiseen ole kovinkaan suuri, ovat muiden päästöjen vähenemiset hyvin mittavia. Taulu-



kosta 3 huomataan, että suurimmat vähenemiset nähdään typpi- ja rikki päästöissä, jotka ovat Tier 3 -rajan, sekä 2015 asetetun rikki rajan 0,1 % alapuolella. Myös pienhiukkaspäästöt ovat vähentyneet. (Brynnolf ym. 2014, 12.)

## 2.4 Polttoaineiden hinnat

Merenkulun luokituslaitos DNV on tehnyt selvityksen polttoaineiden hintakehityksestä vuodesta 2014. Selvityksen hintayksikkönä käytetään \$/mmBTU (brittiläinen terminen yksikkö), jossa 1 BTU vastaa 1,055 kilojoulea. Selvityksessä verrattavat polttoaineet ovat: IFO 380, MGO, raakaöljy, metanoli (CH<sub>3</sub>OH), Japanin ja EU:n kaasu. Metanolin datan vertailu alkaa vasta maaliskuusta 2019. Kuvassa 5 polttoaineiden hintoja verrataan lokakuulta 2014 (sininen palkki) ja helmikuulta 2021 (oranssi palkki). Kaikkien muiden polttoaineiden hinta on laskenut, Japanin kaasua lukuun ottamatta. Metanoli on myös polttoaineista kallein. EU:n kaasuhinta, eli LNG, on kaikista alhaisin. MGO on edelleen kalliimpaa kuin IFO 380. (DNV 2021.)



Kuva 5. Polttoaineiden hinnat lokakuussa 2014 ja helmikuussa 2021 (DNV 2021)

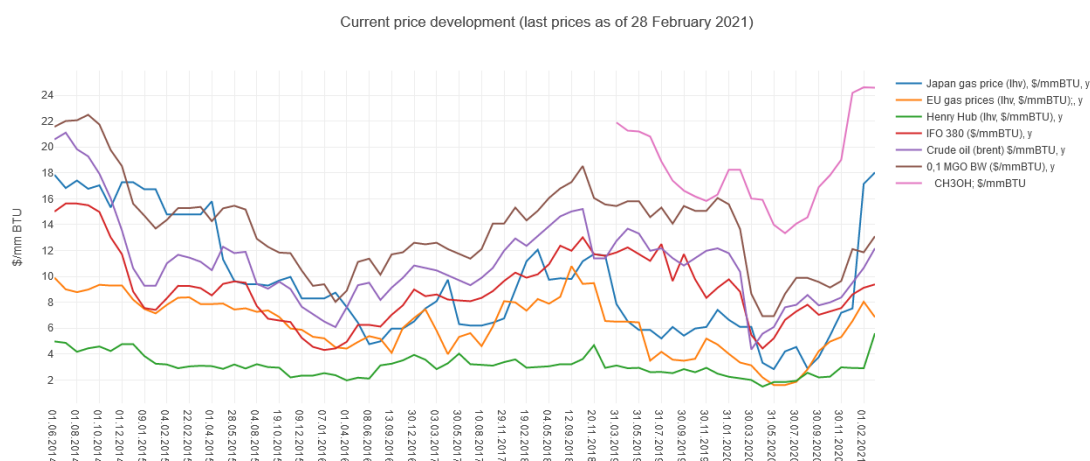
Tarkempi hintakehitys nähdään kuvassa 6. Kuvaajassa on lisätty Henry Hub, joka on maakaasun kaasulinjojen jakokeskus Louisianassa. Henry Hubin hinnat määrittelevät pitkälti koko Yhdysvaltojen maakaasun hinnat. Huomattavia hinnan muutoksia kuvaajassa huomataan vuoden 2015 ja 2016 vaihteessa ja vuoden 2020 alussa. Vuoden 2020 hintaromahdus johtuu koronavirus pandemiasta ja sen vaikutuksesta polttoaineen hintoihin. On myös huomioitavaa,

että kaikkien polttoaineiden hinnat nousevat ja laskevat samanaikaisesti. Eli vuodesta 2014 jostain toisesta polttoaineesta ei ole tullut halvempaa/kalliimpaa kuin toisesta.

Vuonna 2021 helmikuussa hinnat olivat seuraavat:

- IFO 380/180: 9,4/11,2 \$/mmBTU = 360/430 \$/t
- MGO 0,1% S: 13 \$/mmBTU = 530 \$/t
- kaasu (EU): 6,8 \$/mmBTU = 318 \$/t
- CH<sub>3</sub>OH: 24,6 \$/mmBTU = 464 \$/t
- raakaöljy: 12,2 \$/mmBTU = 467,2 \$/t

IFO 380 ja IFO 180 (ei kuvaajassa) nykyisellä hinnalla on huomattava ero. Suurempi viskositeettinen polttoaine on tonnilta 70 \$ kalliimpaa. (DNV 2021.)



Kuva 6. Polttoaineiden hintakehitys vuodesta 2014 (DNV 2021)

Vuonna 2020 koronavirus pandemia romahdutti polttoaineiden hinnat. Pandemia vaikutti rajusti laivaliikenteeseen ja näin polttoaineiden kysyntään. Hinnat olivat matalampia kuin vuonna 2016, jolloin ne olivat viimeksi olleet edes lähellä tätä hintaluokkaa. Vuoden 2019 ja 2020 vaihteesta kaikkien polttoaineiden hinnat olivat huhtikuuhun mennessä tippuneet noin puolella. Esim. MGO:n hinta oli 2019 lopussa 16.06 \$/mmBTU ja huhtikuussa 2020 hinta oli tippunut 6.92 \$/mmBTU. Kuitenkin, kuten vuoden 2016 hinnan pudotuksen jälkeen, ovat hinnat nousemassa takaisin normaaleihin lukemiin. Japanin kaasu hinnat olivat helmikuussa 2021 suuremmat kuin ennen pandemian alkua. (DNV 2021.)

Energiayhtiön MAN tekemässä tutkimuksen, *Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels* (2011), ennustetaan polttoaineiden hintoja tulevaisuudessa. Tutkimuksen mukaan kaikkien polttoaineiden hintojen uskotaan nousevan, mikä johtuu öljyn- ja kaasuntuotannon kustannuksien noususta. MGO:n ja LSFO:n hintojen uskotaan nousevan nopeammin kuin LNG:n ja HFO:n, niiden nousevan kysynnän takia. Sama tutkimus myös vertaili LNG:n ja skrubberien tuottamien investointien takaisinmaksuaikaa. Tutkimuksessa verrattiin LNG:ta, LNG:ta varustettuna hukkalämmön talteenottojärjestelmällä (WHR, Waste heat recovery unit), skrubberia ja skrubberia varustettuna hukkalämmön talteenottojärjestelmällä. Hukkalämmön talteenottojärjestelmässä pakokaasut lämmittävät kattilaa, josta tuleva höyry pyörittää turbiinia tuottaakseen sähköä. LNG-käyttöiset laivat, skrubberit ja WHR-järjestelmät ovat kaikki miljoonien eurojen investointeja ja niiden takaisinmaksuaika riippuu hyvin paljon siitä, paljonko laivaa käytetään. WHR-järjestelmällä varustettujen alusten takaisinmaksuaika on pidempi kuin ei-WHR-järjestelmällä varustettujen, sen tuoman suuren investoinnin takia. Laivan koko, sekä mitä enemmän laiva kulkee SECA-alueilla vaikuttavat takaisinmaksuaikaan. Pienempiin LNG-laivoihin tarvittavat investoinnit ovat pienemmät kuin isoihin. Pienempien LNG-laivojen takaisinmaksuaika voi olla täten alle kaksi vuotta, jos laivalla kuljetaan paljon SECA-alueilla. WHR-järjestelmät nopeuttavat takaisinmaksua vasta hyvin suurissa aluksissa, joissa moottorin vaatimat tehot ovat korkeat. Myös skrubberien takaisinmaksuaika on isoissa laivoissa nopeampi kuin LNG:lla, jos aluksien kulkema aika SECA-alueella ylittyy 65 %. Tutkimuksen mukaan kuitenkin näin isot laivat (14 000 konttia) harvoin kulkevat näin paljoa SECA-alueilla. Yleensä tämän kokoiset laivat kulkevat korkeintaan n. 20 % ajasta SECA-alueilla. Kunhan LNG:n hinta tulee pysymään samana tai alhaisempaa kuin HFO:n, niin suurimmassa osassa tapauksia takaisinmaksuaika tulee olemaan lyhyempi LNG:lla kuin skrubberilla. (MAN Diesel & Turbo 2011, 9–13.)

## **2.5 Tulevaisuuden polttoaineet**

Jotta vuosien 2030 ja 2050 kasvihuonekaasupäästöjen tavoitteisiin päästään, vaatii se isoja muutoksia nykyisessä polttoainekäytössä. Nykyiset öljypohjaiset

polttoaineet tulee korvata vähempipäästöisillä, jopa nollapäästöisillä polttoaineilla. Alla on listattuna eri vaihtoehtoja, joita voidaan nähdä laivakäytössä tulevaisuudessa, sekä niiden hyviä ja huonoja puolia.

### **2.5.1 Metanoli**

Metanoli on alkoholin yksinkertaisin muoto ja sitä käytetään jo nyt hyvin paljon kemianteollisuudessa. Sitä pystytään tuottamaan monesta eri raaka-aineesta, sekä fossiilisista että uusiutuvista. Suurimmat uusiutuvat raaka-aineet saadaan biojätteistä, selluteollisuuden ja muiden metsäteollisuuden ylijäämäjätteistä. Metanolista ei synny lainkaan rikkipäästöjä. Metanolin typpioksidi päästöt ovat pienemmät ja se on ympäristöystävällisempi verrattuna HFO:hon. (Bakhtov 2019, 9.)

Metanolin huonona puolena on sen yli puolet heikompi energiatiheys verrattuna perinteisiin polttoaineisiin. Se siis vaatii n. 2,5 kertaa enemmän kuljetustilaa perinteisiin polttoaineisiin verrattuna. Metanolin tuotannosta syntyy myös päästöjä. Metanolikaasu on lisäksi hyvin myrkyllistä ja sen hengittäminen voi johtaa sokeuteen tai jopa kuolemaan. (Bakhtov 2019, 9.)

### **2.5.2 Biopolttoaineet**

Biopolttoaineita pystytään tuottamaan monista raaka-aineista ja teknologia sen tuottamisen ympärillä on koko ajan kehittymässä. Biopolttoaineita voidaan käyttää pelkästään tai yhdessä fossiilisten polttoaineiden kanssa. Biopolttoaineisiin kuuluu biometanoli, bioetanoli, biodieselit, kasviöljyt, dimetyylieetteri, biokaasut ja orgaaniset yhdisteet. Alun perin biopolttoaineita, pääosin bioetanolia ja biodieseliä, tehtiin ruokasadosta ja eläinten rasvoista. Myöhemmin biopolttoaineita on alettu valmistamaan syömäkelvottomista biomassoista. Tämä toiminta ei ole vielä kuitenkaan saavuttanut kaupallista tasoa. (Bakhtov 2019, 10.)

Suurin haaste biopolttoaineissa on sen saatavuus. Nykyisin biopolttoaineita ei tuoteta tarpeeksi, jotta niiden käyttö olisi kestävää meriliikenteessä. Biopolttoaineiden energiapitoisuus ei myöskään ole samalla tasolla perinteisiin polttoaineisiin verrattuna. (Bakhtov 2019, 10.)

### 2.5.3 Sähkö

Viimeaikaiset kehitykset laivojen sähköistymisessä näyttävät lupaavilta tulevaisuuden suhteen. Energiatehokkuuden lisäämisen lisäksi sähköistäminen vähentää laivoista syntyvää ääntä ja värinää, mikä on todella myönteistä etenkin matkustaja-aluksille. Akkukäyttöisten alusten hyötynä on myös niiden päästöttömyys. Käytönaikaisia rikki-, hiilidioksidi-, typpi-, VOC- ja pienhiukkas-päästöjä ei synny lainkaan. Kehitteillä on useampiakin sähkön varastointitek-nologioita, varsinkin pienempiin laivoihin. (Bakhtov 2019, 11.)

Kuitenkin suurin ongelma on akkujen koko. Akkujen kapasiteetit eivät ole vielä tarpeeksi isoja, jotta niitä voisi käyttää ainoana käyttövälineenä laivoissa. Tämä on ainoastaan mahdollista pienimmissä laivoissa lyhyimmillä matkoilla. Akkujen kehitys keskittyy pääosin pienempiin laivoihin, joten isommat laivat saavat odottaa. Akut täytyy myös uusia tietyin väliajoin, koska akut kestävät vain tietyn verran uudelleenlatauksia. Akkujen tuotanto vaatii myös harvinaisia malmeja, joita saadaan kaivoksista. Tästä johtuen kaivostoiminnan päästöt tulee huomioida, kun verrataan akkukäyttöisten laivojen ympäristöystävällisyyttä. (Bakhtov 2019, 11.)

Suurempien alusten ja pidempien matkojen ratkaisuna sähköistymiseen on ns. hybridialukset. Ne ovat sekä akkukäyttöisiä että polttomoottorikäyttöisiä. Hybridialuksien päästöt ovat n.15 % pienemmät verrattuna normaaleihin aluksiin. Aluksen liikkuaessa dieselgeneraattorit lataavat akkuja. Näin alus pystyy liikkumaan sähkön avulla lyhyitä matkoja. Hybridialukset voisivat olla ratkaisu pidemmille matkoille, jolloin akkuja pystytään lataamaan ajon aikana ja alus ei olisi riippuvainen sähköstä. Hybridialukset voivat myös ajaa pelkällä sähköllä satamassa, jolloin polttoaineista muodostuvat pakokaasut eivät joudu satamiin tai niiden läheisiin ihmisasutuksiin. (Infineon 2021.)

### 2.5.4 Tuuli- ja aurinkovoima

Tuulta voidaan hyödyntää laivoissa ns. roottoripurjeilla, jotka ovat putkilomaisia, ja niitä ohjaa sähkömoottori. Pyörivä roottoripurje tuottaa sen eri puolille paine-eron ja syntyy Magnus-efekti, joka työntää tuulen avulla laivaa eteenpäin. Tämän avulla voidaan vähentää tuulen nopeudesta riippuen 5–20 % polttoainekulutusta. (Björkendahl s.a.) Roottoripurjeet vaativat kuitenkin suuria

investointeja ja vaativat ylimääräistä vakautta laivoilta. Toinen tuulta hyödyntävä teknologia on ns. sky sail -teknologia, jossa eräänlainen purje vetää laivaa eteenpäin. Tällainen teknologia on kuitenkin haastavaa Itämerellä sen pienen koon ja tiiviin laivaliikenteen vuoksi. (Bakhtov 2019, 10, 11.)

Aurinkovoimaa voidaan hyödyntää aurinkopaneelien avulla. Aurinkokennojen nopeaa kehitystä voidaan siis hyödyntää myös meriliikenteessä. Suurin ongelma aurinkovoimalle on laivojen rajattu tila aurinkokennoja varten. Myös energianvarastointi on ongelma. Kehitys on menossa hyvää vauhtia eteenpäin ja alusten on mahdollista saada osa niiden työntövoimasta aurinkovoimasta. Kuitenkin kokonaan aurinkovoimalla kulkevat alukset vaativat vielä paljon teknologian kehittymistä. (Bakhtov 2019, 10, 11.)

Aurinko- ja tuulivoimalla on hyvinkin samanlaiset ongelmat. Molemmat vaativat tietyt olosuhteet, jotta niitä voitaisiin hyödyntää. Molemmat vaativat paljon tilaa laivalla, tuulivoima suurten roottoripurjeiden muodossa ja aurinkovoima paneeleiltaan. Aurinkovoima ei ole vielä tarpeeksi tehokas parhaisakaan olosuhteissa. Tuulivoimalla voidaan saavuttaa laivan täysi liikkuvuus, mutta tämäkin voi hidastaa matkoja. Tämä myös tarkoittaa, että aurinko- ja tuulivoiman on hankala syrjäyttää perinteisiä polttoaineita niiden ongelmien takia. (Bakhtov 2019, 10, 11.)

### **2.5.5 Synteettiset polttoaineet, vety ja ammoniakki**

Synteettiset polttoaineet on tehty hiilidioksidista tai hiilimonoksidista ja vedystä. Vetyä saadaan esim. vesielektrolyysillä, jossa vettä hajotetaan vedyksi ja hapeksi. Tämän jälkeen hiilimonoksidi tai hiilidioksidi yhdistetään vetyyn ja saadaan polttoaineeksi sopivia aineita. Tarvittava hiilidioksidi voidaan saada tuotannosta syntyvästä hiilidioksidista, joka on otettu talteen tai suoraan ilmasta. Vetyä voidaan käyttää polttoaineena itsenään tai siitä voidaan tehdä esim. ammoniakki, jolloin sitä yhdistetään vetyyn. Synteettiset polttoaineet voivat olla kaasu- tai nestemuodossa. (Solakivi & Ojala 2021, 33.)

Jos prosessi tuotetaan uusiutuvalla sähköllä, voivat synteettiset polttoaineet olla hyvinkin ympäristöstävällisiä. Synteettisiä polttoaineita on myös mahdol-

lista lisätä fossiilisiin polttoaineisiin, jonka avulla voidaan vähentää polttoaineen hiilidioksidipäästöjä. Monet suuret energia-alan yritykset ovat jo tutkimaan synteettisiä polttoaineita. Synteettisten polttoaineiden kehitys voi olla yksi parhaista tavoista päästä kohti hiilineutraalia liikennettä. (Eisto 2019.)

Vetyä tuotetaan 70 miljoonaa tonnia vuodessa ja ammoniakkia 200 miljoonaa tonnia. Kuitenkin suurin osa tuotannosta päätyy muihin kuin polttoaine tarkoituksiin. Vedyn ja ammoniakin tuotanto polttoaineeksi ei ole kannattavaa ja siitä syntyy suuret hiilidioksidipäästöt. Vaikka ammoniakki ja vety ovat itsessään päästöttömiä, on niiden tuotanto hyvin suuripäästöistä. Vedyn haasteita polttoaineena on sen vaativa säiliötarve, sekä nesteytetyn vedyn alhainen höyrystymisaste. Sen energiatiheys on hyvin alhainen tilavuuden suhteen ja se voi vaikuttaa hyvin paljon laivojen lastikapasiteettiin. Tähän ratkaisuna ovat vedynsiirtäjät, kuten ammoniakki, jolla vety on yhdistetty johonkin toiseen aineeseen ja sitä voidaan käyttää polttoaineena. Ammoniakin hyötyjä polttoaineena on se, että sitä voidaan polttaa dieselmootoreissa ja vedylle suunnitelluissa polttokennoissa. Kuten vety, vaatii ammoniakkikin enemmän tilaa perinteisiin polttoaineisiin verratessa, mutta silti vähemmän kuin vety. Silti suurin ongelma ammoniakissa on sen toksisuus. Sen vuoto ei pelkästään vaikuta veteen ja ilmaan, vaan voi myös johtaa ihmisen kuolemaan. (Solakivi & Ojala 2021, 33.)

Synteettiset polttoaineet ovat kuitenkin kovasta kehityksestään huolimatta pitkälti teoriatasolla. Jotta ne saataisiin käyttöön, vaadittaisiin isoja investointeja tuotantolaitoksiin, sekä suuria tehtaita ja jalostamoja. Myös tuotannon kustannukset ovat kalliita. Synteettisten polttoaineiden murros on vielä pitkällä. Aalto-yliopiston energiatekniikan professori Martti Larmin mukaan, viiden vuoden päästä voidaan nähdä synteettisiä polttoaineita sekoitettavan fossiilisiin, ja kymmenen vuoden päästä synteettistä metanolia voidaan nähdä meriliikenteessä. (Eisto 2019.)

### **2.5.6 Nesteytetty biokaasu (LBG)**

Nesteytetty biokaasu (Liquefied biogas, LBG) on LNG:n tapaan suurimmaksi osaksi metaania ja sitä tuotetaan biokaasun tapaan biojätteestä. Suomessa tätä jätettä syntyy kodeissa, vähittäismyymälöistä ja teollisuudesta, kun taas

Ruotsissa tuotanto muodostuu maatalouden sivuvirroista, kuten viljan oljista ja kuorista. Palaessaan LBG vapauttaa vain vettä ja hiilidioksidia. Koska LBG on tuotettu biohajoavasta materiaalista, synnyttäisivät ne joka tapauksessa hiilidioksidia kompostoituuksaan. Tämän takia LBG ei aiheuta uusia hiilidioksidipäästöjä palaessaan. LBG:ta voidaan käyttää samoissa laivoissa kuin LNG:ta ja niitä voidaan sekoittaa keskenään. (Towards cleaner maritime transport with LBG s.a.)

Suurimmat haasteet LBG:lla ovat samat kuin biokaasulla yleensä, sen tuotantopotentiaali. Biokaasua tuotetaan Suomessa n. 1 TWh ja sen kokonaispotentiaali on n. 15 TWh. Suomessa vuoden 2018 autoilun kokonaisenergiankulutus oli 46 TWh, joten on selvää, että biokaasu ei tule kokonaan korvaamaan liikenteen fossiilisia polttoaineita. Biokaasua voidaan toki tuottaa myös synteettisesti, mutta se ei ole vielä kannattavaa ja vaatisi paljon energiaa, joka lisäisi sen elinkaaripäästöjä. (BioHauki s.a.)

### **2.5.7 Ydinvoima**

Ydinvoimalla kulkevat laivat käyttävät pienimodulaarisia ydinreaktoreita (small modular reactor, SMR) liikkumiseen. Reaktorit ovat pieniä ja sähkötehoiltaan korkeintaan 300 megawattisia. Reaktoreita pystyttäisiin tuottamaan sarjatuotantona ja isompia voimaloita saadaan asentamalla useampi reaktori yhteen. Tätä tekniikka on käytetty jo sotilaskäytössä sukellusveneissä ja aluksissa 1950-luvulta lähtien. Seuraavan vuosikymmenen aikana SMR-tekniikan uskotaan laajentuvan sähköntuotantoon, lämmitykseen ja teollisuuteen. (Luukko 2018.)

Ydinvoimaa käytetään myös jo nyt jäänmurtaajissa ja merivoimien aluksissa. Ydinvoiman hyvät puolet ovat sen päästöttömyys. Ydinvoima on teknisesti ja taloudellisesti välttämätön Venäjän pohjoisella napapiirillä, jossa olosuhteet ovat liian vaativat tavallisille jäänmurtaajille. Haasteita tuovat 3 metrin paksuiset jääkerrokset ja tankkauksen vaikeus. Ydinvoimaa kuitenkin pidetään vielä liian riskialttiina perinteisiin kaupallisiin laivoihin. (Bakhtov 2019, 10.)



### 3 HAASTATTELUT

Osana opinnäytetyötä tehtiin kolme eri haastattelua merenkulualan ammattilaisten kanssa. Haastatteluiden tarkoituksena on lisätä jo kirjallisuudesta saattua tietoa ja verrata niitä toisiinsa. Haastattelujen tavoitteena on saada ammattilaisten näkökulmaa eri polttoaineista ja niiden vaikutuksista ilmastoon ja laivojen koneistoihin sekä tulevaisuuden näkemyksiä eri polttoaineista.

#### 3.1 Toteutus

Haastattelut toteutettiin Microsoft Teamsissa videohaastatteluina. Haastattelut olivat rakenteiltaan puolistrukturoituja, jolloin samaa kysymyspohjaa käytettiin jokaisessa haastattelussa. Tämä toi välillä haasteita, kun jotkin haastattelukysymykset olivat suunnattu enemmän tietyille ammattiryhmille, esim. LNG:hen liittyvät kysymykset. Tarkentavia kysymyksiä kysyttiin haastateltavasta ja hänen ammatillisesta osaamisestaan riippuen.

Haastateltavat ovat alan ammattilaisia. Heidät pyrittiin valitsemaan niin, että saataisiin mahdollisimman paljon eri näkemyksiä eri yrityksiltä ja ammattilaisilta. Haastateltavat henkilöt olivat: Suomen Varustamot ry:n Mats Björkendahl, Gasumin Kimmo Rahkamo ja Nesteen Ville Sipilä. Heistä jokainen omaa monien vuosien kokemuksen alalta. Kaikki toimivat erilaisissa yrityksissä ja tehtävissä, täten saadaan laaja näkemys ja erilaisia mielipiteitä kysymyksiä koskien. Haastateltavien määränä kolme oli juuri sopiva. Näin saadaan tarpeeksi laaja näkemys, sekä haastateltavien vastauksia voidaan vertailla keskenään.

Kysymyspaletti pidettiin jokaisessa haastattelussa samana. Pääkysymykset olivat jokaiselle samat, mutta tarkentavia kysymyksiä kysyttiin haastateltavan ammatillisen osaamiseen liittyen. Kysymyksillä haluttiin saada lisätietoa ja mielipiteitä jo opinnäytetyössä käsiteltyihin asioihin. Kysymykset liittyivät laivapolttoaineiden kokonaiskäyttöön, hintaan, vaikutukseen laivojen koneistoihin, päästöihin ja niiden saatavuuteen. Myös rikkirajoitukset, LNG:n käyttöönotto, skrubberit, tulevaisuudennäkymät ja poliittiset tekijät olivat aiheina.

Haastatteluja analysoidaan kriittisesti ja kaikkien näkemykset pyritään tuomaan esille. Vastauksia pyritään katsomaan objektiivisesti ja asioiden hyvät

sekä huonot puolet tuomaan esille. Vastauksia analysoidaan jo aikaisemman kirjallisuudesta saadun tiedon valossa. Haastateltavien mielipiteitä ja näkemyksiä kunnioitetaan ja arvostetaan.

### **3.2 Haastattelujen sisältö ja tulokset**

Ensimmäinen kysymys haastattelussa koski polttoaineiden käyttöä vuoden 2015 rikkidirektiivin jälkeen. Kaikki haastateltavat totesivat, että öljypohjaiset polttoaineet ovat edelleen valtavirtaa. Kevyet polttoöljyt, MDO ja MGO ovat saaneet hyvin markkinaosuutta rikkidirektiivin jälkeen ja laivat, jotka kulkevat vielä HFO:lla käyttävät skrubbereita. Gasumin edustaja Kimmo Rahkamo toteaa, että muutos on ollut hitaampaa mitä he olettivat. Itämerellä kulkee LNG:lla toimivia aluksia, mutta kokonaisuus on arvioiden mukaa vielä alle prosentin luokkaa. Tyytyväinen Rahkamo on kuitenkin siitä, että kulmakerroin LNG:n käytön suhteen on oikea. Rahkamo on tyytyväinen myös siihen, että LNG:sta on tulossa Pohjoismaisen ilmiön sijaan koko maailmanlaajuinen ilmiö.

Seuraava kysymys koski polttoaineiden hintaa ja saatavuutta. Molempien Varustamot ry:n edustajan Mats Björkendahlin ja Kimmo Rahkamon mukaan markkinat määräävät polttoaineiden hinnat. Raakaöljyn hinta peilautuu polttoöljyjen hintaan samoin kuin LNG:n hinta peilautuu maakaasun hinnasta. LNG on kuitenkin vielä niin pieni osa koko kaasumarkkinasta, että se mitä tapahtuu meriliikenteen puolella, ei vaikuta vielä hirveän paljon koko kaasumarkkinoiden tasapainoon. Nesteen edustajan Ville Sipilän mukaan myös kilpailu sekä saatavuus vaikuttavat hintoihin. Koronapandemian alku vuonna 2020 romahdutti polttoaineiden hinnat. Björkendahlin mukaan ennen koronapandemiaa öljyn ja energian hinta oli tasaisessa nousussa, mutta pandemian alun jälkeen nähtiin jopa negatiivisia öljyn hintoja. Rahkamo kuitenkin muistuttaa, että nyt yli vuoden koronapandemian alun jälkeen ollaan samoissa hintatasoissa kuin ennen korona-aikaa. Rahkamon mukaan kaasumarkkinat ovat hänen mielestään olleet öljymarkkinoita stabiilimmat. Hän myös uskoo, että kaasua ja öljyä on hyvin saatavilla nykyisin sekä tulevaisuudessa.

Seuraavassa kysymyksessä haastateltavilta kysyttiin, mitkä ovat heidän näkemyksensä siihen, kuinka polttoainerajoitukset näkyvät laivayhtiöissä taloudellisesti. Björkendahlin mukaan ennen vuoden 2015 rikkirajoitusta pelättiin, että

merikuljetusten hinnat nousisivat paljonkin vähärikkisten polttoaineiden saata-  
vuuden ja hintojen nousun takia. Näin ei kuitenkaan käynyt ja polttoaineiden  
hinnat pysyivät hyvin hillityissä lukemissa. Kuitenkin varustamot, jotka asensi-  
vat skrubberit laivoihinsa, ovat joutuneet tekemään merkittävämpiä investoin-  
teja. Rahkamon mukaan, LNG voisi olla ratkaisu polttoanerajoitusten tuomiin  
taloudellisiin haasteisiin varustamoille. Hänen mukaansa LNG on hinnaltaan  
hyvin kilpailukykyinen öljypohjaisille polttoaineille. Vaikka LNG alusten raken-  
taminen tuokin hieman lisäkustannuksia varustamoille, se voi alhaisemman  
hintansa vuoksi maksaa lisäkustannukset nopeastikin takaisin.

Haastateltavilta kysyttiin eri polttoaineiden vaikutuksesta laivojen koneistoihin  
ja niiden huollontarpeisiin. Björkendahlin mukaan tislepohjaisilla polttoaineilla  
huollontarpeet ovat pienemmät kuin HFO:lla. Täten pienemmällä huoltokustan-  
nuksilla voidaan säästää hieman rahaa, vaikka itse polttoaine onkin kalliim-  
paa. Hänen mukaansa myös moottorien komponenttien eliniät ovat pidempiä  
tislepohjaisilla polttoaineilla. Rahkamon mukaan konehuoneet ovat aivan eri  
näköisiä puhtauden osalta, kun verrataan LNG:ta ja polttoöljyä. LNG käyttöi-  
set konehuoneet ovat hyvin klinisiä verrattuna öljykäyttöisiin.

Keskusteluita käytiin myös alusten polttoaineiden vaihtoprosessista HFO:sta  
kevyisiin tai LNG:hen. Kaikkien haastattelijoiden mukaan on mahdollista muut-  
taa vanhoja polttoöljyllä toimivia aluksia LNG-käyttöisiksi. Kuitenkin tällaiset  
muunnokset ovat niin kalliita, että ne eivät ole kannattavia varustamoille. Björ-  
kendahlin mukaan HFO:sta kevyisiin polttoöljyihin siirtyminen on paljon hel-  
pompaa. Hänen mukaansa ainoa asia, jota mahdollisesti koneistoon joudu-  
taan päivittämään, ovat suodattimet. Tislepolttoaineiden suodatusaste on pie-  
nempi kuin perinteisillä polttoaineilla. Rahkamo toteaa, että on olemassa kak-  
soispolttoainemoottoreita, jotka pystyvät käyttämään sekä öljypohjaisia poltto-  
aineita, että LNG:tä. Toki tällaisetkin moottorit vaativat LNG-säiliön alukseen,  
jos sitä halutaan käyttää. Tällaiset moottorit ovat kuitenkin hieman normaaleja  
moottoreita kalliimpia.

Eri polttoaineiden päästöjä vertaillen halusin erityisesti tietää, mitä muita  
päästöjä kuin käytössä syntyviä päästöjä eri polttoaineista syntyy. Björkendah-  
lin mukaan tislepohjaisten polttoaineiden hiilidioksidipäästöt ovat hieman  
HFO:ta suurempia. Ero on pieni, mutta se on kuitenkin olemassa. Raskaan

polttoöljyn partikkelipäästöt ovat paljon suuremmat kuin tisleiden. Björkendahl myös toteaa, että yli 90 % kaikista kasvihuonepäästöistä on hiilidioksidipäästöjä, muiden ollessa mustahiilipäästöt, metaanipäästöt ja dityppioksidipäästöt. Tämän takia juuri hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen pitäisi keskittyä. Sipilän mukaan HFO:sta muodostuu myös ns. ”sludgea” eli jäteöljyä. Rahkamon mukaan LNG:n yksi haaste on metaanivuodot, joka heikentää sen kilpailukykyä. Metaanivuodon ei tarvitse olla hirveän suuri, että sen kasvihuonevaikutukset ovat suurempia kuin muiden polttoaineiden. Rahkamo kuitenkin sanoo, että metaanivuodot ovat parantuneet viime vuosina ja eri maiden konetekniikoissa on eroja, jotka voivat vaikuttaa metaanivuotojen määriin. Myös tuotantojen päästöissä on eri maissa suuria eroja ja Norjassa on tällä hetkellä maailman parhaita tuotantoja. Björkendahl ja Rahkamo ovat molemmat sitä mieltä, että on hyvä tarkastella polttoaineiden päästöjä elinkaaripäästöjen näkökulmasta. Björkendahlin mukaan olisi huolestuttavaa alkaa käyttämään sellaisia polttoaineita, jotka käytön osalta olisivat vähempipäästöisiä, mutta jonkun muun tuotantoketjun kohdalta isompipäästöisiä. Hän myös muistuttaa, että jos tuotanto-alueella pystytään vähentämään päästöjä, ei näitä päästövähennyksiä lasketa meriliikenteen hyväksi, eikä toisin päin.

Seuraava kysymys koski skrubberien etuja ja haittoja. Rahkamo toteaa, että skrubberit ovat aivan toimivia laitteita ja niiden asentaminen on aluksiin paljon helpompaa kuin aluksen konvertoiminen LNG-käyttöiseksi. Skrubberien huono puoli on taas se, että ne poistavat vain rikkioksidit, eivätkä vaikuta hiilidioksidipäästöihin. Björkendahlin mukaan yleinen väärinkäsitys rikkipesurien suhteen on se, että avoimen kierron pesureissa rikki päätysi mereen. Kuitenkin näin ei ole, vaan rikki muutetaan sulfaateiksi, jota on meressä valmiiksi todella paljon. Hänen mukaansa yritetään tutkia, ovatko avoimen kierron skrubbereista mereen joutuvat kemikaalit ja raskasmetallit haitallisia meriympäristölle. Rikkipesurit ovat myös miljoonien eurojen investointeja ja Björkendahlin mukaan pesurien taloudellinen hyöty alkaa näkyä silloin, kun vähärikkisen ja runsasrikkisen polttoaineen ero on yli 100 taalaa tonnilta. Sipilän mukaan skrubberien etuna on, että voidaan käyttää halvempaa raskasta polttoöljyä polttoaineena. Hänen mukaansa avoimen kierron skrubberit eivät toimi makean veden tai murtoveden alueilla. Jotkut satamat ovat kieltäneet avoimen kierron skrubberien käytön tästä johtuen.

Seuraava kysymys koski LNG:ta ja mitkä ovat haastateltavien mielestä varustamoiden strategioita sen käyttöönotossa. Sipilän mukaan varustamoiden uusissa aluksissa LNG on ainakin jotenkin otettu huomioon. Sipilä ja Rahkamo molemmat toteavat, että eri varustamoilla on hyvin erilaiset suunnitelmat ja viisiot LNG:n suhteen. Rahkamon mukaan varustamoita on kahdesta päästä, niitä, jotka ottavat LNG:n mielellään käyttöön ja niitä, jotka eivät. Hänen mukaansa jälkimmäinen ryhmä odottaa ns. ihmettä, jossa markkinoille tulisi vielä LNG:ta puhtaampi, halvempi ja yksinkertaisesti parempi polttoaine. Hänen mielestään kuitenkin on epärehellistä odottaa tällaista ihmettä. Björkendahlin mukaan LNG auttaa varustamoita uudisrakennuksien EEDI-määräyksiensä kanssa, jotka kiristyvät koko ajan. EEDI-indeksin laskennassa polttoaine, jota laiva käyttää, on suuressa osassa, joten LNG tulee olemaan merkittävässä osassa EEDI vaatimustason alituksessa. Hänen mukaansa myös LNG:n infrastruktuuri tulee kehittymään, kun maakaasun ja LNG:n käyttö lisääntyy. Hänen mukaansa LNG on askel oikeaan suuntaan hiilidioksidipäästöjen vähennyksen suhteen, mutta muistuttaa metaanivuodoista ja että LNG on myös fossiilinen polttoaine.

Seuraavaksi kysyin LNG:n käyttöönoton haasteista, kuten infrastruktuurista. Rahkamon mukaan haasteita on tuonut se, että jotkut satamat ovat rajoittaneet LNG bunkrauksia. Hänen mukaansa on myös joitakin tapauksia, joissa kiinteään infrastruktuurin kanssa on tullut teknisiä ongelmia, mutta mitään ylityspääsemätöntä ei ole ollut. Epäsäännölliset ja satunnaiset bunkraukset ovat helpoimmin toteutettavissa suoraan rekasta. On myös mahdollista, että tulevaisuudessa nähtäisiin enemmän rekkoja, jotka toimivat myös LNG:llä, jolloin itse LNG:n kuljetus satamaan olisi puhtaampaa. Satamainfrastruktuuri on kuitenkin fiksua rakentaa silloin, kun satamassa on säännöllistä liikennettä, esim. kahden sataman välinen matkustajalaiva. Björkendahlin mukaan LNG infrastruktuurin rakentaminen on ollut haasteellista, mutta se on kehittynyt Euroopassa jo niin hyvin, että sitä ei oikeastaan voi kutsua enää ongelmaksi. Kuitenkin pidemmät valtamerien väliset matkat voivat tuoda joitakin haasteita. Björkendahl ja Rahkamo molemmat toteavat, että LNG:n laivasta laivaan bunkraus tulee kehittymään ja kasvamaan tulevaisuudessa. Sipilän mukaan se, että LNG on erittäin kylmä tuote, tuo joitakin riskejä. Sen joutuessa ihmisen iholle, se voi aiheuttaa vahinkoa ja se voi myös aiheuttaa kylmäaurautta putkistoissa. Myös, jos rekoilla bunkraus kasvaa liikaa, se voi aiheuttaa ruuhkia

satamissa. Hänen mukaansa myös, jos varustamot alkaisivat käyttämään uusia polttoaineita tulevaisuudessa, voisi se tehdä LNG:ta varten rakennetusta infrastruktuurista turhaa.

Seuraavaksi haastateltavilta kysyttiin, miltä heidän mielestään tulevaisuuden laivapolttoaineet näyttävät. Sipilän mukaan nousevia polttoaineita tulevat luultavasti olemaan ammoniakki, LNG, metanoli ja sähkö-LNG-hybridilaivat. Rahkamon mukaan monissa tulevaisuuden polttoaineissa, kuten metanolissa, akuissa ja ammoniakissa on omat ongelmansa, eikä usko niiden tulevan valtavirran käyttöön. Metanolin ongelmana on sen vesiliukoisuus, akuissa niiden kapasiteetti ja ammoniakissa sen toksisuus. Hän uskoo, että LNG tulee olemaan suuressa osassa tulevaisuudessakin bio- ja synteettisen LNG:n muodossa. Sipilän ja Rahkamon mukaan myös öljypohjaisia polttoaineita tullaan näkemään myös tulevaisuudessa, mutta sen osuuksia on vaikea sanoa. Sipilän mielestä, jos tietyt teknologiat kehittyvät tarpeeksi, voivat öljypohjaiset polttoaineet olla mahdollinen vaihtoehto tulevaisuudessa. Björkendahlin mielestä, LNG:ta käyttävien alusten luonnollinen seuraava askel päästöjen vähennykseen olisi käyttää biokaasua ja biopohjaista- ja synteettistä metaania. Polttoöljyä käyttävien alusten luonnollinen askel olisi taas alkaa käyttää biopohjaista polttoöljyä ja synteettistä dieseliä. Tästä vielä seuraava vaihe olisi alkaa käyttää nollahiilisiä polttoaineita, kuten vetyä ja ammoniakkia. Hän myös uskoo sähköistymiseen, varsinkin pienemmillä aluksilla, jotka kulkevat lyhyitä matkoja. Kysyttäessä hiilidioksidin talteenottojärjestelmistä laivoissa, kaikki haastateltavat olivat sitä mieltä, että ne sopisivat paremmin teollisuuteen, koska laivoissa niiden koko voisi olla ongelmana. Björkendahlin mukaan rikkipesureihin on suunnitteilla hiilidioksidin talteenottojärjestelmiä. Nämä eivät ehkä saisi 100 % hiilidioksidista talteen, mutta esim. 30–40 % olisi jo suuri askel eteenpäin. Kuitenkin ongelmaksi voisi muodostua hiilidioksidin varastointi ja se, miten siitä päästään eroon.

Haastateltavilta kysyttiin, miten he näkevät poliittisen ohjauksen vaikuttavan laivapolttoaineiden kehitykseen. Kaikkien haastateltavien mielestä poliittinen ohjaus on tärkeässä roolissa polttoaineiden kehityksessä. Sipilän mukaan polttoainestrategioilla päätetään, millä keinoin ja millä vauhdilla polttoaineet kehittyvät. Hän myös muistuttaa, että Suomi on useasti eturintamassa polttoaineiden kehityksessä. Rahkamon mukaan regulaatioiden tulisi olla ennen

kaikkea kansainvälisiä. Hänen mukaansa Suomessa polttoaineiden verottaminen johtaisi siihen, että alukset alkaisivat bunkraamaan halvempaa polttoainetta muissa maissa. Björkendahlin ja Rahkamon mukaan jonkinlainen päästökauppa voisi olla askel oikeaan suuntaan. Björkendahlin mukaan jotkut varustamot ottavat käyttöön vähempipäästöisiä polttoaineita, joko vapaaehtoisesti tai heidän asiakkaidensa pyynnöstä. Kuitenkaan ilman poliittisia keinoja ei saataisi mitään merkittäviä muutoksia aikaiseksi.

Viimeinen kysymys koski tulevaisuuden polttoaineita, joista ei vielä hirveästi puhuta. Sain kaksi eri vastausta. Björkendahlin toi esille ydinvoiman, Sipilä tuulivoiman. Rahkamo mainitsi nämä molemmat. Björkendahlin mukaan, jos nollapäästöisiä polttoaineita ei saada kehitettyä tarpeeksi vuoteen 2050 tai edes vuosisadan loppuun mennessä, on ydinvoima yksi ratkaisu näihin tavoitteisiin. Hänen mielestään ydinvoima on hyvin herkkä aihe poliittisesti, joka on yksi syy, miksi siitä ei puhuta vielä hirveästi. Tilanne voi hänen mielestään olla kuitenkin hyvin erilainen jo esim. 20 vuoden päästä. Rahkamon mukaan pieneydinvoima suuriin laivoihin on kehitetty jo sotilaspuolella yli 50 vuotta sitten, mutta se ei ole nähnyt siviilipuolella kannatusta poliittisten syiden vuoksi. Teknologialla on kuitenkin suuria mahdollisuuksia kaupallisesti sekä merikäytössä että maakäytössä. Venäjällä on myös käytössä jäänmurtajia ja sukellusveneitä, jotka toimivat pieneydinvoimalla. Hän myös muistuttaa, että moni asia on kehittynyt ja parantunut viimeisen 50 vuoden aikana. Sipilä mainitsee tuulivoimasta roottoripurjeet ja sky sail- purjeet, sekä niitä kehittävät yritykset, suomalaisen Norsepowerin ja ruotsalaisen Wallenius Marinen. Rahkamon ja Sipilän mukaan tuuli voi olla isokin apuvoima alukselle, mutta eivät laivat pelkällä tuulivoimalla tule tulevaisuudessa kulkemaan.

#### **4 POHDINTA**

Itämerellä käytetyt polttoaineet ovat muuttuneet vuoden 2015 rikkidirektiivin jälkeen jo paljon aikaisempaan verrattuna ja onkin selvää, että tulevaisuudessa muutokselle ei näy loppua. LNG vaikuttaa kaikin puolin potentiaaliselta vaihtoehdolta öljypohjaisille polttoaineille, mutta sen osuudet ovat vielä hyvin pienet Itämerellä. LNG:n hitaaseen tulemiseen on varmasti vaikuttanut bunkrauksien haasteellisuus, laivojen uudisrakentamisen hitaus ja hinta, sekä vanhojen laivojen muuttamisen kalleus LNG-käyttöisiksi. On siis edullisempaa

asentaa tuoreimpiin polttoöljykäyttöisiin laivoihin skrubberit ja vanhemmissa alkaa käyttää HFO:n sijaan tislepolttoaineita. On kuitenkin todennäköistä, että kun vanhojen polttoöljykäyttöisten laivojen käyttöikä alkaa olla täynnä, tulee niiden tilalle LNG-käyttöisiä aluksia. Myös LNG:n kehittyneet bunkrausmahdollisuudet varsinkin Euroopassa motivoivat varustamoita LNG:n käyttöön. Kunhan enemmän laivoja ja rekkoja aletaan käyttämään bunkrausta varten, eivät laivat ole enää riippuvaisia satamista, joissa on LNG-terminaaleja. Tämä tulee auttamaan etenkin pienempiä satamia, joihin ei ole kannattavaa rakentaa LNG-terminaaleja.

Päästöjä tarkastellessa huomataan myös, että LNG on hyvä vaihtoehto, varsinkin typpi- ja rikkipäästöjen vähentämiseksi. Kuitenkin Ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa LNG ei ole täydellinen ratkaisu, varsinkin jos metaanivuotoja ei saada kuriin. Nykyisillä teknologioilla metaanivuodot ovat vielä niin suuret, että LNG ei ole öljypohjaisia polttoaineita paljoakaan parempi vaihtoehto ilmaston lämpenemistä ajatellen. Jos teknologia kehittyy tulevaisuudessa niin, että metaanivuodot saadaan kuriin, niin LNG olisi parempi vaihtoehto öljypohjaisiin polttoaineisiin verrattuna kaikkia päästöjä vertaillessa. Nykyisin typpi- ja rikkipäästöjä voidaan yhtä hyvin vähentää skrubbereilla ja SCR-järjestelmillä. Etenkin skrubberien ansiosta varustamoilta on säästynyt rahaa ja mahdollista päänvaivaa polttoaineiden vaihtoprosesseissa. Vaikka skrubberit ovatkin varsin toimivia laitteita, voivat ne mahdollisesti hidastaa uudisrakenteiden siirtymistä LNG:hen, jos varustamot näkevät pelkät skrubberit tarpeellisin vaihtoehtoina rajoitusten alittamiseen. Laivojen eliniän ollessa n. 30 vuotta, siirtyisi öljypohjaisista polttoaineista luopuminen vielä pidemmälle tulevaisuuteen, varsinkin jos laivojen muuttaminen LNG-käyttöiseksi ei halpene ollenkaan.

Jotta vuoden 2050 ilmastotavoitteisiin päästään, pitää tehdä suuria päätöksiä vähintään EU-tasolla. Yksittäisten maiden on hankala tehdä tämän kaltaisia päätöksiä, koska meriliikenne lähes poikkeuksetta tapahtuu usean maan välillä. Yksi tapa voisi olla eräänlainen päästökauppa merenkulkualalle. Tällä motivoitaisiin varustamoita ja laivateknologian kehittäjiä kehittämään pieni-päästöisiä ratkaisuja taloudellisin motiivein. Varsinkin uudet polttoaineet ja muut teknologiat tulevat olemaan ratkaisevassa asemassa ilmastotavoitteisiin



pyrkimisessä. Vaikka monissa tässä opinnäytetyössä käsitellyissä tulevaisuuden polttoaineissa on omat ongelmansa, voivat ne yhdessä muodostaa laajan kirjon vaihtoehtoisia vähähiilisiä polttoaineita. Jos nämä polttoaineet eivät riitä, tarvitaan muita vaihtoehtoja, kuten tuulipurjeet, ydinvoima ja hiilidioksidintalteenottojärjestelmät. Toiset laivayhtiöt, kuten Viking Line, ovat jo nyt luopunut roottoripurjeista, koska niiden tuottamat säästöt olivat niin pienet. Jos hiilidioksidintalteenottojärjestelmien kokoa saataisiin pienennettyä niin, että ne saataisiin mahtumaan laivoille, voitaisiin öljypohjaisia polttoaineita käyttää vielä tulevaisuudessakin. Vaikka ydinvoima on vähäpäästöistä ja todettu hyvinkin turvalliseksi energianlähteeksi, on se edelleen hyvin arka aihe poliittisesti. Jos pienydinvoimaloiden sarjatuotanto yleistyy, olisi merenkulkualalla todella hyvä mahdollisuus päästä käsiksi vähäpäästöiseen tapaan liikkua. Kuitenkin, jos ydinvoima yleistyisi laivaliikenteessä, tulisi turvallisuustarkastuksien olla hyvin tarkat, jottei suuria vahinkoja pääsisi tapahtumaan. On myös tärkeää, että päästöjä vertaillaan elinkaaripäästöinä, eikä vain käytössä syntyvissä päästöissä. On kuitenkin tärkeää pitää tuotannossa ja käytössä syntyvät päästöt erillään, kun tehdään elinkaarivertailua. Tämä on tärkeää siksi, että kumpikaan osapuoli ei pysty hyötymään toisen tekemistä parannuksista, vaan molempien osapuolien on pyrittävä vähäpäästöisimpiin ratkaisuihin.

Polttoaineiden hinnat ovat pysyneet vuosien aikana suhteellisen tasaisina polttoainerajoituksista huolimatta. Vuoden 2015 rikkirajoitusten jälkeen polttoaineiden hinnat eivät nousseet ollenkaan. Tämä johtuu luultavimmin siitä, että kysyntä ei siirtynyt täysin tislepohjaisiin polttoaineisiin, vaan skrubbereiden avulla pystyttiin edelleen käyttämään HFO:ta. Kysynnän ja tarjonnan lakia voidaan myös nähdä koronavirus pandemian alussa, kun polttoaineiden hinnat putosivat. Tulevaisuudessa voidaan nähdä suuriakin hinnanmuutoksia, kun LNG yleistyy ja sen kysyntä kasvaa. Sen hinta ei välttämättä tule ohittamaan öljypohjaisia, jos LNG:n tuotanto kasvaa ja öljypohjaisten polttoaineiden verotus pysyy samana tai nousee.

Kirjallisessa osiossa ja haastatteluosiossa johtopäätökset ovat pitkälti samankaltaiset, mutta eroavaisuuksiakin kuitenkin oli. LNG:n ongelmista oltiin osakseen eri mieltä kirjallisuudesta saatujen tietojen kanssa. Haastateltavien mielestä bunkraus ei ole niin suuri ongelma kuin monet lähteet antoivat ymmärtää

kirjallisessa osiossa. Myös muita ongelmia, kuten kylmähaaraus ja terminaalien teknilliset ongelmat, tulivat ilmi vasta haastatteluissa. Öljypohjaisten polttoaineiden tulevaisuus nähtiin mielestäni positiivisempänä kuin kirjallisessa osiossa. Skrubbereita puollettiin, mutta myös niiden haasteita makeanveden tai murtoveden alueilla tuli ilmi. Kirjallisuudesta ei löytynyt paljoa tietoa ydinvoiman tulevaisuudesta merenkulkualalla, mutta kaksi kolmesta haastateltavasta puolsi sitä ja totesi, että sillä on todella suuri potentiaali. Haastateltavien näkemykset vaihtelivat muutenkin tulevaisuuden polttoaineiden suhteen suuresti. Kaikilla oli hieman erilaiset näkemykset verrattaessa kirjallisuudesta saatuun tietoon.

## LÄHTEET

Acomi, N. & Acomi, O. 2014. The influence of different types of marine fuel over the energy efficiency operational index. *Energy Procedia* 59, 243-248. Elsevier. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214017408> [viitattu 28.4.2021].

[Bakhtov, A. 2019. Alternative fuels for shipping in the Baltic Sea Region. Helcom. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/HELCOM-EnviSUM-Alternative-fuels-for-shipping.pdf](https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/10/HELCOM-EnviSUM-Alternative-fuels-for-shipping.pdf) [viitattu 21.12.2020].

BioHauki s.a. Biokaasun hyödyt ja haasteet. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.biohauki.fi/hyodyt-ja-haasteet/> [viitattu 6.5.2021].

Björkendahl, M s.a. Ilmastonsuojelu ja ilmastonmuutos. Suomen Varustamot ry. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://shipowners.fi/vastuullisuus/ymparisto/ilmastosuojelu-ja-ilmastonmuutos/> [viitattu 16.1.2021].

Brynolf, S., Magnussen M., Fridell, E. & Andersson, K. 2014. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transportation Research Part D Transport and Environment* 28, 6-18. Verkkolehti. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920913001454> [viitattu 4.4.2021].

DNV. 2021. Current price development oil and gas. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.dnv.com/maritime/Ing/current-price-development-oil-and-gas.html> [viitattu 20.4.2021].

Eisto, S. [2019. Vihreämpi vaihtoehto liikenteeseen – synteettiset polttoaineet valmistuvat ilmasta ja vedestä. Op media. WWW-dokumentti. Julkaistu 25.7.2019. Saatavissa: https://www.op-media.fi/liikenne/vihreampi-vaihtoehto-liikenteeseen--synteettiset-polttoaineet-valmistuvat-ilmasta-ja-vedesta/](https://www.op-media.fi/liikenne/vihreampi-vaihtoehto-liikenteeseen--synteettiset-polttoaineet-valmistuvat-ilmasta-ja-vedesta/) [viitattu 20.4.2021].

ESN. 2013. ESN – Way Forward SECA report. Selvitys. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.shortsea.gr/wp-content/uploads/SECA\\_esn-seca-report-2013-0.pdf](https://www.shortsea.gr/wp-content/uploads/SECA_esn-seca-report-2013-0.pdf) [viitattu 20.3.2021].

Gasum. 2018. LNG alittaa kaikki päästörajat. *Gasetti* 1/2018, 4–9. verkkolehti. Saatavissa: [https://www.gasum.com/globalassets/pdf-files/julkaisut/gasum\\_sidosryhmalehti\\_gasetti\\_lng-teema\\_01-2018.pdf](https://www.gasum.com/globalassets/pdf-files/julkaisut/gasum_sidosryhmalehti_gasetti_lng-teema_01-2018.pdf) [viitattu 8.1.2021].

Gasum LNG-terminaali Porissa s.a. Gasum. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gasum.com/kaasusta/maakaasu/lng-toimitusketju/terminals-liquefaction-plants/gasum-lng-terminaali-pori/> [viitattu 10.1.2021].

HaminaLNG s.a. LNG-terminaalin kaupallinen käyttöönotto tapahtuu kaasu-  
vuoden 2022 alussa. PDF-dokumentti. Päivitetty 3.3.2021. Saatavissa:  
<https://www.haminalng.fi/wp-content/uploads/2021/03/HLNG-Tiedote-3.3.2021.pdf> [viitattu 5.4.2021].

[Helcom. 2018. Maritime activities in the Baltic Sea. PDF-dokumentti. Saatavissa: https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP152-1.pdf](https://www.helcom.fi/wp-content/uploads/2019/08/BSEP152-1.pdf) [viitattu 18.1.2021].

Ilmatieteenlaitos. 2016. Alusten rikkipäästöt kääntyneet huimaan laskuun Itämerellä. WWW-dokumentti. Tiedote 5.9.2016. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/236462540> [viitattu 2.12.2020].

Ilmatieteenlaitos. 2018. Puhtaammat laivojen polttoaineet tuovat terveyshyötyjä, mutta vaikuttavat myös ilmastoon. WWW-dokumentti. Tiedote 6.2.2018. Saatavissa: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/tiedote/481116940> [viitattu 2.12.2020].

IMO s.a. Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-\(NOx\)-%E2%80%93Regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-(NOx)-%E2%80%93Regulation-13.aspx) [viitattu 8.2.2021].

Infineon. 2021. Why ships of the future will run on electricity. WWW-dokumentti. Päivitetty 1.7.2021 Saatavissa: <https://www.infineon.com/cms/en/discoveries/electrified-ships/> [viitattu 5.5.2021].

Icopal Noxite s.a. Nitrogen oxide (NOx) pollution. WWW-dokumentti. Saatavissa: <http://www.icopal-noxite.co.uk/nox-problem/nox-pollution.aspx> [viitattu 8.2.2021].

Jalkanen, J. & Johanson, L. 2018. Emissions from Baltic Sea Shipping in 2017. Helcom. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://portal.helcom.fi/meetings/MARITIME%2018-2018-503/MeetingDocuments/4-3%20Emissions%20from%20Baltic%20Sea%20Shipping%20in%202017.pdf> [viitattu 27.3.2021].

Jalkanen, J. 2020. Emissions from Baltic Sea shipping in 2006 – 2019. Helcom. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://portal.helcom.fi/meetings/MARITIME%2020-2020-787/MeetingDocuments/5-2%20Emissions%20from%20Baltic%20Sea%20shipping%20in%202006%20-%202019.pdf> [viitattu 24.3.2021].

Lindholm, M. 2015. LNG-kuljetukset. Aker Arctic Technology Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.kaasuyhdistys.fi/wp-content/uploads/2018/12/LNG-kuljetukset-2016-Mauri-Lindholm.pdf> [viitattu 15.1.2021].

LNG terminal in Tornio s.a. Gasum. LNG terminal in Tornio. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gasum.com/en/our-operations/lng-supply-chain/terminals--liquefaction-plants/manga-terminal-tornio/> [viitattu 10.1.2021].

Luukko, K. 2018. Mikä ihmeen SMR. Helen. Blogi. Julkaistu 15.3.2018. Saatavissa: <https://www.helen.fi/helen-oy/vastuullisuus/ajankohtaista/blogi/2018/smr> [viitattu 8.5.2021].

Man diesel & turbo. 2011. Costs and Benefits of LNG as Ship Fuel for Container Vessels. PDF-dokumentti. Saatavissa: <https://www.mandiesel-turbo.com/docs/default-source/shopwaredocuments/costs-and-benefits-of-lng3739431d863f4f5695c4c81f03ac752c.pdf?sfvrsn=3> [viitattu 28.4.2021].

Marquard & Bahls. 2015a. Heavy Fuel Oil (HFO). WWW-dokumentti. Päivitetty 1.12.2015. Saatavissa: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/heavy-fuel-oil-hfo.html> [viitattu 16.12.2020].

Marquard & Bahls. 2015b. Marine Diesel Oil (MDO) & Intermediate Fuel Oil (IFO). WWW-dokumentti. Päivitetty 1.12.2015. Saatavissa: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-diesel-oil-mdo-intermediate-fuel-oil-ifo.html> [viitattu 18.12.2020].

Marquard & Bahls. 2015c. Marine Gasoil (MGO). WWW-dokumentti. Päivitetty 1.12.2015. Saatavissa: <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/marine-gasoil-mgo.html> [viitattu 18.12.2020].

Marquard & Bahls. 2015d. LNG (Liquefied Natural Gas). WWW-dokumentti. Päivitetty 1.12.2015. Saatavissa <https://www.marquard-bahls.com/en/news-info/glossary/detail/term/lng-liquefied-natural-gas.html> [viitattu 20.12.2020].

Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N. & Rutherford, D. 2020. The climate implications of using LNG as a marine fuel. International Council on Clean Transportation. Tutkimus. Saatavissa: [https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel%2C%20working%20paper-02\\_FINAL\\_20200416.pdf](https://theicct.org/sites/default/files/publications/LNG%20as%20marine%20fuel%2C%20working%20paper-02_FINAL_20200416.pdf) [Viitattu 5.9.2021].

Pohjola, P s.a. Rehevöityminen on Itämeren pahin ongelma. Itämeri.fi. WWW-dokumentti. Saatavissa: [https://www.itameri.fi/fi-FI/Luonto\\_ja\\_sen\\_muutos/Itameren\\_tila/Rehevoityminen](https://www.itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Itameren_tila/Rehevoityminen) [viitattu 12.2.2021].

Pöntynen, R. & Lempiäinen, P. 2015. Rikkisääntely ja uudet polttoaineet. Turun yliopiston Braea keskus. Merenkulkualan koulutus- ja tutkimuskeskuksen julkaisuja 2015: B202. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.utu.fi/sites/default/files/media/MKK/Julkaisut/B202\\_Rikkis%C3%A4%C3%A4ntely\\_ja\\_uudet\\_polttoaineet.pdf](https://www.utu.fi/sites/default/files/media/MKK/Julkaisut/B202_Rikkis%C3%A4%C3%A4ntely_ja_uudet_polttoaineet.pdf) [viitattu 24.4.2021].

Solakivi, T. & Ojala, L. 2021. Laivaliikenteen vähähiiliset polttoaineet ja niiden tuleva kehitys. Logscale Oy. PDF-dokumentti. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/349818477\\_Laivaliikenteen\\_vahahiiliset\\_polttoaineet\\_ja\\_niiden\\_tuleva\\_kehitys](https://www.researchgate.net/publication/349818477_Laivaliikenteen_vahahiiliset_polttoaineet_ja_niiden_tuleva_kehitys) [viitattu 5.5.2021].

Towards cleaner maritime transport with LBG s.a. Gasum. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.gasum.com/en/sustainable-transport/maritime-transport/liquefied-biogas/> [viitattu 6.5.2021].

VDL AEC Maritime s.a. Exhaust gas cleaning solutions. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.vdlaecmaritime.com/scrubbers> [viitattu 21.3.2021].

Haastattelu kysymykset haastateltavalle:

Kertokaa hieman itsestänne? Toimenkuva, kauanko olette olleet alalla, miten hyvin tunnette päästövähennystekniikat jne.

Miten käytettävien laivapolttoaineiden käyttö on muuttunut Itämerellä rikkidi-  
rektiivin astuttua voimaan ja miltä se näyttää nyt?

Mitkä asiat vaikuttavat tällä hetkellä polttoaineiden saatavuuteen ja hintaan?  
Entä tulevaisuudessa?

Miten polttoainerajoitukset, kuten rikkirajoitukset, näkyvät laivayhtiöissä talou-  
dellisesti?

Mitkä ovat eri polttoainetyyppien vaikutukset laivojen koneistoihin?

Mitä muita kuin käytöstä syntyviä päästöjä muodostuu eri polttoaineiden käy-  
töstä esim. elinkaaripäästöt?

Mitkä ovat rikkipesurien, eli skrubberien edut ja haitat?

Millaisia strategioita varustamoilla on LNG:n käyttöönotossa?

Mitä haasteita LNG käyttöönotto tuo?

Miten näette laivapolttoaineiden käytön muuntuvan tulevaisuudessa?

Miten näette poliittisen ohjauksen vaikuttavan laivapolttoaineiden kehitykseen  
ja käyttöönottoon?

Mitä ovat tulevaisuuden polttoainelaadut, joista ei vielä hirveästi puhuta?