



**Vipuvoimaa**  
**EU:lta**  
2014–2020

**Tilaaja: Etelä-Karjalan liitto, naviSaimaa- hanke**

# **Laivaliikenteen vähähiiliset polttoaineet ja niiden tuleva kehitys**

**28.2.2021**

**Tomi Solakivi**

**Lauri Ojala**

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>6</b>
1.1	Merikuljetukset ja niiden osuus kasvihuonekaasujen päästöistä.....	6
1.2	Meriliikenteen volyyymien ja CO <sub>2</sub> -päästöjen näkymiä.....	7
1.3	Työn tarkoitus .....	8
1.4	Työn rakenne .....	10
1.5	Tekijät ja ohjausryhmä.....	11
<b>2</b>	<b>Yleiskatsaus Saimaan vesiliikenteeseen</b> .....	<b>12</b>
2.1	Saimaan tavaraliikenne.....	12
2.2	Saimaan matkustajaliikenne .....	15
2.3	Saimaan vesiliikenteessä käytettävän aluskaluston ominaisuuksia .....	16
2.4	Saimaan liikenteen luotsaustoiminta.....	17
2.5	Saimaan liikenteen väylämaksut.....	18
2.6	Saimaan vesiliikenteen toimijat.....	19
<b>3</b>	<b>Alusliikenteen vähähiilisiä käyttövoimia käsittelevän tutkimuksen nykytila</b> .....	<b>20</b>
3.1	Skenaarioita vaihtoehtoisten polttoaineiden käytöstä .....	20
3.2	Merenkulun päästöt ja päästövähennysten potentiaali.....	22
<b>4</b>	<b>Toteutuneita ja suunnitteluvaiheessa olevia vähähiilisiä käyttövoimahankkeita</b> .....	<b>25</b>
4.1	Polttokennot ja vety.....	25
4.1.1	METHAPU.....	25
4.1.2	FellowSHIP - Viking Lady .....	25
4.1.3	e4ships .....	25
4.1.4	ZEMSHIP.....	26
4.1.5	HySHIP.....	26
4.2	Sähkö.....	26
4.2.1	Yara Birkeland .....	26
4.2.2	Vision of the Fjords .....	27
4.2.3	Portliner .....	27
4.2.4	CPC 21 ja 22.....	27
4.2.5	Hurtigrutten hybridikäyttöiset matkustaja-alukset .....	27
4.2.6	Zhongtiandianyun 001 .....	27
4.3	Ammoniakki .....	27
4.3.1	Viking Energy.....	28
4.3.2	ZEEDS .....	28

<b>5</b>	<b>Aiempaan tutkimukseen perustuva vähähiilisten käyttövoimien käyttötekniinen vertailu.....</b>	<b>29</b>
5.1	Käyttövoimien elinkaaritarkastelussa huomioitavia seikkoja.....	29
5.2	Polttoaineiden saatavuus.....	32
5.2.1	Biopolttoaineet .....	32
5.2.2	Sähkö.....	32
5.2.3	Vety ja muut synteettiset polttoaineet.....	33
5.3	Käytettävyys.....	34
5.3.1	Biopolttoaineet .....	34
5.3.2	Sähkö.....	34
5.3.3	Vety ja muut synteettiset polttoaineet.....	35
5.4	Tekninen valmius .....	35
5.4.1	Biopolttoaineet .....	36
5.4.2	Sähkö.....	37
5.4.3	Vety ja muut synteettiset polttoaineet.....	38
5.5	Päästöt .....	39
5.5.1	Biopolttoaineet .....	39
5.5.2	Sähkö.....	41
5.5.3	Vedyn kuljettajat.....	43
5.6	Biopolttoaineet .....	44
5.7	Muita käytössä olevia polttoaineita.....	45
5.7.1	LNG.....	45
5.7.2	Metanoli.....	46
<b>6</b>	<b>Vähähiilisten polttoaineiden SWOT –analyysi.....</b>	<b>47</b>
<b>7</b>	<b>IMO:n säädöstilanne koskien käytössä olevia ja suunnitteilla olevia käyttövoimaratkaisuja .</b>	<b>53</b>
7.1	MEPC ja MARPOL-sopimus .....	53
7.2	MSC SOLAS ja IGF.....	55
<b>8</b>	<b>Yhteenveto.....</b>	<b>55</b>
	<b>Lähteet.....</b>	<b>60</b>

## LYHENTEET JA TERMIT

<b>Ah</b>	Ampeeritunti
<b>Bunkraus</b>	Laivan polttoainesäiliöiden täyttö
<b>CO<sub>2</sub>e</b>	Hiilidioksidiekvivalentti; ks. myös GWP-kerroin ja Tietoruutu 1
<b>Deep Sea Shipping</b>	Valtameriliikenne eri maanosien välillä
<b>Drop in –polttoaine</b>	Uusiutuva polttoaine, joka ei vaadi muutostöitä aluksen tekniikkaan. Voi vaatia sekoittamista muihin polttoaineisiin.
<b>DWT</b>	Deadweight tonnage; aluksen kuollut paino eli aluksen vesivarastojen, tarvikkeiden, polttoaineen, lastin ja henkilöiden suurin yhteispaino, myös muodossa kantavuus
<b>EEDI</b>	Energy Efficiency Design Index; alusten energiatehokkuusindeksi
<b>EtOH</b>	Etanolin eli etyylialkoholin lyhenne
<b>FAME</b>	Fatty Acid Methyl Ester; rasvahappometyyliesteri, eräs biodiesel-tyyppi
<b>GHG</b>	Greenhouse gases; kasviuonekaasut; ks. tarkemmin Tietoruutu 1
<b>GWP-kerroin</b>	Global warming potential –kertoimia käytetään muunnettaessa eri kasviuonekaasujen päästöjä hiilidioksidiekvivalenteiksi. Nykyisin suositellaan käytettäväksi IPCC:n 5. arviointikierroksessa vahvistettuja ns. GWP AR5-arvoja. Hiilidioksidin <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvo on 1.
<b>HFC-yhdisteet</b>	Fluorihiihivedyt; käytetään kylmäaineina mm. kylmä- ja ilmastointilaitteissa. Useimmat HFC-yhdisteet ovat voimakkaita kasviuonekaasuja; <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvot vaihtelevat välillä 4 – 12 400
<b>HFE-yhdisteet</b>	Fluoratut eetterit; useimmat HFE-yhdisteet ovat voimakkaita kasviuonekaasuja; <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvot vaihtelevat välillä <1 – 12 400
<b>HFO</b>	Heavy Fuel Oil; raskas polttoöljy
<b>IEA</b>	International Energy Agency; Kansainvälinen energijärjestö
<b>IGF</b>	International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-flashpoint Fuels; Kaasua tai muuta matalan leimahduspisteen polttoainetta käyttäviä aluksia koskeva kansainvälinen turvallisuussäännöstö
<b>IMDG</b>	International Maritime Dangerous Goods Code: Vaarallisten aineiden merikuljetussäännöstö
<b>IMO</b>	International Maritime Organization; Kansainvälinen merenkulkujärjestö, joka on osa YK:n järjestelmää
<b>IPCC</b>	The Intergovernmental Panel on Climate Change; YK:n alaisuudessa toimiva hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli
<b>Kryogeeninen säilytys</b>	Tuotteen (esim. kaasun) säilytys erittäin alhaisessa lämpötilassa

<b>kW</b>	Kilowatti
<b>LBG</b>	Liquefied Biogas; nesteytetty biokaasu
<b>Lignoselluloosa</b>	Kasvin biomassa, joka koostuu selluloosasta, hemiselluloosasta ja ligniinistä. Biopolttoaineteollisuus on kiinnostunut käyttämään lignoselluloosaa bioetanoliksi
<b>LNG</b>	Liquefied Natural Gas; nesteytetty maakaasu
<b>LSHFO</b>	Low-Sulfur Heavy-Fuel Oil; matalarikkiset raskaat polttoaineet
<b>MARPOL</b>	International Convention for the Prevention of Pollution from Ships; IMO:n yleissopimus alusten aiheuttamien haitallisten päästöjen ehkäisemisestä
<b>Btu</b>	Brittiläinen terminen yksikkö, joka vastaa 1,055 kilojoulea
<b>MDO</b>	Marine Diesel Oil; ”meridiesel”, aluskäyttöön tarkoitettu diesel
<b>MeOH</b>	Metanolin eli metyylialkoholin lyhenne; myrkyllinen alkoholi
<b>MJ</b>	Megajoule, eli $10^6$ joule = 1 000 kilojoule
<b>MRV</b>	Monitoring, Reporting, Verification, EU:n asettama CO <sub>2</sub> -päästöjen raportointivelvollisuus yli 5 000 bruttotonnin aluksille
<b>Mtoe</b>	Miljoonaa öljytonniekvivalenttia; eri käyttövoimien energiamäärä muutettu öljyn energiamäärää vastaavaksi (metrisinä tonneina)
<b>MWh</b>	Megawattitunti
<b>NECA</b>	Nitrogen Emission Control Area, IMO:n määrittelemä alusten typpipäästöjen valvonta-alue (esim. koko Itämeri on NECA-alue)
<b>NF<sub>3</sub></b>	Typpifluoridi, erittäin voimakas kasvihuonekaasu, jonka <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvo on 16 100
<b>PEM-polttokennojärjestelmä</b>	Proton-exchange membrane. Polttokennojärjestelmä, joka muuntaa vedyn kemiallisen energian sähköksi
<b>PFC</b>	Perfluoratut yhdisteet; niissä hiiliketjun vedyt on korvattu fluorilla. PFC-yhdisteet ovat erittäin voimakkaita kasvihuonekaasuja, niiden <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvot vaihtelevat välillä 6 600 – 23 500
<b>Propulsio</b>	Järjestelmä, jolla tuotetaan työntövoimaa. Yksi laivojen mahdollisista käyttövoimista
<b>RME</b>	Rypsimetyyliesteri, eräs biodiesel-tyyppi
<b>RoRo-alus</b>	roll on – roll off – alus, joka lastataan ja puretaan ajoramppien kautta
<b>Saimax</b>	Laivat, jotka mahtuvat kulkemaan Saimaan kanavan suluista
<b>SECA</b>	Sulphur Emission Control Area; IMO:n määrittelemä alusten rikkipäästöjen valvonta-alue (esim. koko Itämeri on SECA-alue)

<b>SEEMP</b>	Ship Energy Efficiency Management Plan; Alusten energiatehokkuuden hallintasuunnitelma
<b>SF<sub>6</sub></b>	Rikkiheksafluoridi, erittäin voimakas kasvihuonekaasu, jonka <a href="#">GWP</a> (AR5)-arvo on 23 500
<b>Short Sea Shipping</b>	Lyhyen matkan merenkulku esimerkiksi Euroopan sisällä
<b>SOFC</b>	Solid oxide fuel cell; kiinteäoksidipolttokeho
<b>SOLAS</b>	Safety of Life at Sea; IMO:n yleissopimus merenkulun turvallisuudesta
<b>SWOT</b>	Strengths, Weaknesses, Opportunities, Threats; nelikenttäanalyysi, jossa käydään läpi tarkasteltavan asian vahvuudet (S), heikkoudet (W), mahdollisuudet (O) ja uhat (T)
<b>Syväys</b>	Aluksen tiedoissa ilmoitettu syväys tarkoittaa aluksen rakentajan tai luokituslaitoksen ilmoittamaa suurinta syvyyttä, joka ilmaisee kuinka matalassa vedessä alus voi kulkea täydessä lastissa saamatta pohjakosketusta
<b>TEU</b>	Twenty-foot Equivalent Unit; 20 jalan pituista standardoitua merikonttia vastaava kuljetusyksikkö
<b>TJ</b>	Terajoule, eli $10^{12}$ joule = 1 000 gigajoulea tai 1 000 000 megajoulea
<b>Trimmi</b>	Trimmillä tarkoitetaan tässä aluksen asentoa kulun aikana.
<b>UNCTAD</b>	United Nations Conference on Trade and Development; Yhdistyneiden kansakuntien kauppaa- ja kehityskonferenssi
<b>USD</b>	Yhdysvaltain dollari; 1 EUR on noin 1,22 USD (helmikuun loppu 2021)

# 1 Johdanto

## 1.1 Merikuljetukset ja niiden osuus kasvihuonekaasujen päästöistä

Merikuljetuksilla, mukaan lukien sisävesikuljetukset, on keskeinen rooli kansainvälisen kaupan volyymien kuljettajana ja mahdollistajana. UNCTAD:n (2020) mukaan vuonna 2020 noin 80 %, siis noin 11 miljardia tonnia maailmankaupasta kuljetettiin merikuljetuksilla.

IMO:n (2020) mukaan merenkulun kasvihuonekaasu- eli GHG-päästöt ovat noin 1,1 miljardia tonnia, joka on noin 2,9 % maailman GHG-päästöistä. (GHG:n määritelmä; ks. Tietoruutu 1)

### Tietoruutu 1. Kasvihuone- eli GHG-kaasut: määritelmä ja päästöjen laskentatapa

Kasvihuonekaasupäästöjen yksikkö on CO<sub>2</sub>-ekvivalentti (CO<sub>2e</sub>), sillä ne muodostuvat useiden eri yhdisteiden päästöistä. YK:n ilmaston lämpenemistä käsittelevään sopimukseen vuonna 1997 tehdyn Ns. Kioton lisäpöytäkirjan mukaisia GHG-kaasuja ovat seuraavat; suluissa niiden tunnus ja laskennallisen osuuden suuruusluokka Suomen CO<sub>2e</sub>-päästöistä:

- hiilidioksidi CO<sub>2</sub>; 83 %,
- dityppioksidi N<sub>2</sub>O; 9 %,
- metaani CH<sub>4</sub>; 7 % ja
- ns. F-kaasut HFCs, PFCs, SF<sub>6</sub> ja NF<sub>3</sub>; yhteensä noin 2 %.

Eri kasvihuonekaasujen ilmastoa lämmittävä vaikutus yhteismitallistetaan CO<sub>2</sub>-ekvivalenteiksi käyttämällä nk. GWP (global warming potential) -kertoimia. Nykyisin suositellaan käytettäväksi IPCC:n 5. arviointikierroksessa vahvistettuja ns. [GWP](#) (AR5)-arvoja.

Hiilidioksidin GWP (AR5)-arvo on 1, ja muiden kasvihuonekaasujen GWP-arvot on määritetty vertaamalla niiden yhden kilogramman päästön aiheuttamaa säteilypakotetta maan pinnalla (W/m<sup>2</sup>) hiilidioksidin vastaavaan säteilypakotteeseen. Vaikutuksen aikajännteeksi IPCC on ottanut 100 vuotta, ja GWP-arvoja kutsutaan myös lyhenteellä GWP100.

Kun lasketaan GHG-kokonaispäästöjen nettomäärää, tulee inventaariossa huomioida myös ilmakehän hiilidioksidia sitovat ns. hiilinielut. Näitä löytyy erityisesti maankäytön, maankäytön muutosten ja metsätalouden sektorilla (ns. land use, land-use change and forestry, eli LULUCF-sektori), jonka merkitys Suomessa on suuri. Esimerkiksi vuonna 2019 tämä nettonielu oli Suomessa -17,4 miljoonaa CO<sub>2e</sub> tonnia, kun bruttopäästöt olivat 52,8 miljoonaa CO<sub>2e</sub> tonnia.

Lähteet: Tilastokeskus 2020a ja 2020b

Toimiva merenkulku on koko suomalaisen yhteiskunnan ja elinkeinoelämän toimivuuden elinehto. Esimerkiksi vuonna 2017 kaikkiaan 86 % tavaratuonnin arvosta ja 80 % tonneista sekä 80 % tavaraviennin arvosta ja 92 % tonneista kuljetettiin meritse (Ojala ym. 2018). Merenkulkusektoria Suomen kansantaloudessa ovat tarkastelleet myös Kuntze ym. (2019).

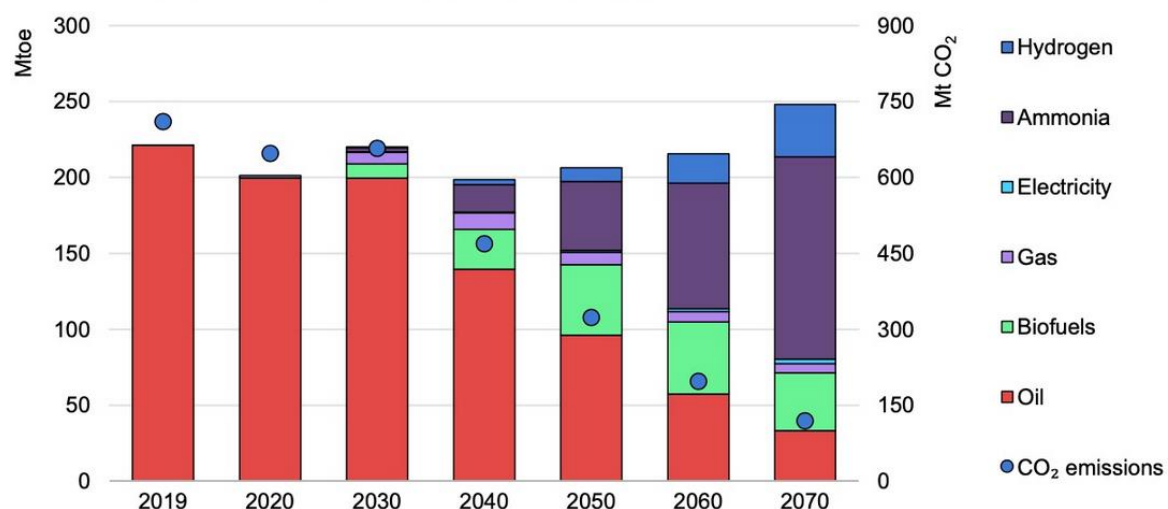
Merikuljetukset ovat suoriteyksikköä kohti vähäpäästöisin tapa suurten tavaramäärien kuljettamiseen. Merenkulun ympäristövaikutuksia pyritään kuitenkin vähentämään monin tavoin. Mm. kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita merenkulun päästöjen vähentämiseksi. Näitä ovat jo voimassa olevat alusten energiatehokkuusindeksi EEDI sekä alusten energiatehokkuuden hallintasuunnitelma SEEMP, jotka velvoittavat aluskohtaisten päästöjen seurantaan ja hallintaan.

## 1.2 Meriliikenteen volyymien ja CO<sub>2</sub>-päästöjen näkymiä

Merenkulun volyymien ennustetaan kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa. Samalla alan kokonaispäästöt kasvavat nykysääntelyssä alusten energiatehokkuuden paranemisesta huolimatta. IMO:ssa valmistellaankin lyhyen ja pitkän tähtäimen sääntelyä päästöjen vähentämiseksi entisestään.

Myös muut kansainväliset toimijat valmistelevat omia päästöjen vähentämiseen tähtäviä mekanismejaan. Esimerkiksi Euroopan unioni suunnittelee merenkulun sisällyttämistä EU:n päästökauppamekanismiin osana Green Deal –pakettiaan.

**Kuvio 1 Kansainvälisen meriliikenteen energiankulutus ja CO<sub>2</sub>-päästöt 2019–2070 kestävän kehityksen skenaarion mukaisesti (IEA, 2020)**



Tähän mennessä tehdyt päästövähennyspäätökset ja valmistelussa oleva sääntely tähtäävät pääasiassa merenkulun energiatehokkuuden parantamiseen. Vuonna 2019 merenkulun käyttämä energiamäärä oli noin 220 miljoonaa öljykvivalenttitonnia, josta noin 93 % tuotetaan öljypohjaisilla (fossiilisilla) polttoaineilla (DNV GL, 2020 ja IEA 2020) (Kuvio 1).

Tämä yhdistettynä merenkulun volyymien ennustettuun voimakkaaseen kasvuun tarkoittaa sitä, että ilman merkittäviä lisätoimenpiteitä merenkulun CO<sub>2</sub> –päästöjen arvioidaan kasvavan jopa 50 % nykyisestä (IMO, 2020).

**Taulukko 1 Maailman kauppalaivaston (2020) sekä Suomessa vuonna 2018 käyneiden alusten moottorityypit ja propulsiojärjestelmät**

Moottorityyppi	Maailman kauppalaivasto vuonna 2020	Suomessa käyneet alukset vuonna 2018
Akut ja Diesel	0,07 %	0,1 %
Diesel 2-tahti	42,50 %	26,9 %
Diesel 4-tahti	55,60 %	69,6 %
Diesel-sähkö	1,17 %	3,4 %
Kaasuturbiini	0,11 %	0,1 %
Muut	0,55 %	
<b>Propulsio</b>		
Sähköinen	1,30 %	3,5 %
Mekaaninen	98,70 %	96,5 %

Käytännössä edellä mainitut kehityskulut tarkoittavat sitä, että merenkulun päästöjen vähentämiseksi meriliikenteen vaatima energia tulee tulevaisuudessa tuottaa suurelta osin nykyisistä poikkeavilla polttoaineilla. Tästä tekee erityisen haasteellista se, että nykyinen aluskalusto on suurimmaksi osaksi teknisiltä ominaisuuksiltaan sellaisia, että niiden käytettävissä oleva polttoainevalikoima on rajallinen. Taulukko 1 esittää maailman kauppalaivaston sekä Suomessa vuonna 2018 käyneiden alusten moottori- ja propulsiotyyppit.

### 1.3 Työn tarkoitus

Tämä raportti vetää yhteen tämänhetkistä tutkimukseen ja selvityksiin perustuvaa tietoa nyt ja tulevaisuudessa käytössä olevista merenkulun vähähiilisistä polttoaineratkaisuista.

Meriliikenteelle soveltuvat vähähiiliset polttoaineratkaisut voidaan jakaa kolmeen ryhmään (ks. esim. Lam ym. 2020):

- 1) fossiilipohjaisiin, konventionaalsiin polttoaineisiin verrattuna vähemmän hiiltä sisältäviin (LNG, metanoli sekä sen johdannaiset)
- 2) biomassaan perustuviin uusiutuviin polttoaineisiin (esim. bio-LNG, biometanoli, biodiesel, hydrattu kasviöljy, bioöljy, pyrolyysiöljy)
- 3) ei-biopohjaisiin uusiutuviin polttoaineisiin, käytännössä sähköön ja vedyn kuljettajiin perustuviin ratkaisuihin sekä synteettisiin polttoaineisiin.

Meriliikenteessä on jo nyt käytössä vähähiilisiä polttoaineita, kuten biopolttoaineet, joista erityisesti ns. ensimmäisen sukupolven biopolttoaineita on vähintään testikäytössä. Sähkömeriliikenteen käyttövoimana on vain hyvin rajallisessa liikenteessä tai testikäytössä, ja esimerkiksi vetyyn perustuvat teknologiat ovat vielä selkeästi kokeiluasteella.

Edellä mainittuja käyttövoimia tarkastellaan tässä raportissa muutaman keskeisen kriteerin näkökulmasta (ks. esim. Lam ym. 2020). Näitä ovat:

- 1) Polttoaineen saatavuus nykytilanteessa ja tulevaisuudessa
- 2) Polttoaineen käytettävyys
- 3) Tekninen valmius
- 4) CO<sub>2</sub>-päästöt

Meriliikenteen tarvitsema energiamäärä on huomattavan suuri eräiden polttoaineratkaisujen tämänhetkiseen tuotantoon verrattuna. Esimerkiksi biopolttoaineiden tuotannon skaalattavuutta rajoittaa raaka-aineen saatavuus. Osalle polttoaineista kohdistuu myös muuta kysyntää, mikä pakottaa meriliikenteen kilpailemaan polttoaineesta esimerkiksi muiden kuljetusmuotojen kanssa. Meriliikenteen nykyinen toimintalogiikka on nojannut vahvasti edulliseen polttoaineeseen, joten kilpailutilanne saattaa tarkoittaa sitä, että muut, maksukykyisemmät kuljetusmuodot vievät merkittävän osan potentiaalisesta tarjonnasta.

Esimerkiksi vetyä ja ammoniakkia tuotetaan pääosin tai kokonaan muihin tarkoitukseen kuin polttoaineeksi. Niiden käyttäminen laajasti meriliikenteen polttoaineena edellyttäisi merkittävää tuotannon lisäämistä, mikä saattaa edellyttää uudenlaisia tuotantomenetelmiä.

Polttoaineen käytettävyydellä tarkoitetaan tässä sen tekniseen hyödyntämiseen liittyviä vaatimuksia niin aluksella kuin polttoaineen jakelujärjestelmän näkökulmasta. Käytettävyyttä tarkastellaan siitä näkökulmasta, kuinka erikoistunutta tai monimutkaista teknologiaa polttoaineen käyttöön, säilyttämiseen ja jakeluun tarvitaan. Esimerkiksi osa vähähiilisistä polttoaineratkaisuista on suoraan hyödynnettävissä nykyisissä moottoreissa, kun taas osa polttoaineratkaisuista on sellaisia, että ne vaativat merkittäviä muutoksia aluksen moottoreissa, voimansiirrossa tai säiliöratkaisuissa, tai niillä on merkittäviä vaikutuksia esimerkiksi aluksen lastikapasiteettiin.

Teknisellä valmiudella käsitetään tässä sitä, millaisessa kypsyyssvaiheessa polttoaineet ovat meriliikenteen näkökulmasta. Päästöjen näkökulmasta eri polttoaineiden osalta pyritään huomioimaan niiden päästöt, erityisesti CO<sub>2</sub>-päästöt koko polttoaineen elinkaaren ajalta.

Eräiden käyttövoimien, kuten esimerkiksi sähkön, paikallispäästöt voivat olla hyvinkin alhaiset, mutta niiden elinkaaren aikaiset päästöt riippuvat paljon energian tuotantotavasta.

Käyttövoimina vety ja ammoniakki voivat CO<sub>2</sub>-päästöjen näkökulmasta olla päästöttömiä, mutta molempia tuotetaan tällä hetkellä pääosin fossiilisten polttoaineiden avulla, mikä

nostaa niiden elinkaaripäästöjä huomattavasti. Vastaavasti synteettiset polttoaineet saattavat jopa sitoa hiiltä, jolloin niiden vaikutus jopa vähentää päästöjä, mikäli niitä tuotetaan uusiutuvalla energialla.

Käyttövoimavaihtoehdot eroavat toisistaan myös siinä, millaiseen liikenteeseen ne parhaiten sopivat. Tästä syystä polttoaineratkaisujen potentiaalia käsitellessä tarkastellaan myös kriittisesti, miten ne sopivat eri tyyppiseen liikenteeseen, toisin sanoen ns. valtameriliikenteeseen (Deep Sea Shipping), lähimerenkulkuun (Short Sea Shipping) sekä sisävesiliikenteeseen. Nämä eroavat merkittävästi toisistaan niin aluskoon/ lastikapasiteetin kuin matkan ja sitä kautta aluksen mukana kulkevan energiavaraston koon mukaan.

Loogisesti esimerkiksi sisävesikuljetuksiin saattaa olla helpommin hyödynnettävissä sellaisia polttoaineratkaisuja, jotka eivät esimerkiksi energiasisältönsä tai varastointikapasiteetin tarpeensa takia ole käyttökelpoisia lähimerenkulussa tai valtameriliikenteessä.

#### 1.4 Työn rakenne

Luku 1 johdattelee aihepiiriin ja esittelee työn tarkoituksen ja tekijät, ja luvussa 2 käsitellään erityisesti Saimaan sisävesiliikenteen ominaispiirteitä.

Alusliikenteen ympäristöystävällisiä ja vähähiilisiä käyttövoimavaihtoehtoja käsittelevien tutkimusten ja selvitysten nykytilaa esitellään luvussa 3.

Luvussa 4 tarkastellaan vähähiilisiä polttoaineratkaisuja ja niiden saatavuutta, käytettävyyttä, kypsyysvaihetta ja päästöjä aihetta käsittelevän tutkimuskirjallisuuden ja selvitysten näkökulmasta. Biopolttoaineet ovat jo nykyisin operatiivisessa käytössä meriliikenteessä, joten luvussa keskitytään erityisesti sähköteknologiaan ja vetyyn perustuviin polttoaineratkaisuihin ja käyttövoimiin.

Luku 5 perustuu aiempaan tutkimuskirjallisuuteen, ja siinä esitettyihin vähähiilistä käyttövoimien käyttötekniisiin vertailuihin.

Luvussa 6 havainnot eri polttoainevaihtoehdoista kootaan ns. SWOT<sup>1</sup>–analyysi eri vähähiilisten polttoaineratkaisujen osalta, huomioiden eri tyyppisen alusliikenteen erityispiirteet. Tämä tarjoaa mahdollisuuden tarkastella kutakin vaihtoehtoa myös sisävesiliikenteeseen sopivien käyttövoimien kannalta.

Luvussa 7 esitetään IMO:n säädöstilanne koskien käytössä olevia ja suunnitteilla olevia käyttövoimaratkaisuja, ja luku 8 kokoaa raportin keskeiset tulokset ja johtopäätökset.

---

<sup>1</sup> Strengths, weaknesses, opportunities & threats

## 1.5 Tekijät ja ohjausryhmä

Raportin laativat logistiikan professori Lauri Ojalan ja apulaisprofessori Tomi Solakivi, jolla on Maritime Business and Policy -apulaisprofessuuri Turun kauppakorkeakoulussa.

Toteutukseen osallistuivat aineiston keruun osalta myös KTM Eeli Friman ja KTM Aleks Paimander sekä sisällön viimeistelyn osalta tekn. yo. Ilona Kairinen.

Työtä varten tarvittavia taustoittavia haastatteluja on tehty alkuvuonna 2021 mm. seuraavien tahojen kanssa: tutkimusjohtaja Petteri Laaksonen, LUT yliopisto (Energiatekniikka), hallituksen puheenjohtaja Jussi Mälkiä sekä Development Manager Thomas Friis, Meriaura Group, toimitusjohtaja Mats Rosin, Suomen Lauttaliikenne Oy sekä Senior Advisor Markku Mylly, MyNavix OÜ.

Työn ohjausryhmänä on toiminut naviSaimaa- hankkeen projektipäällikkö Antti Vehviläinen ja hankesuunnittelija Kaisa Hirvonen.

## 2 Yleiskatsaus Saimaan vesiliikenteeseen

Saimaan vesiliikenne voidaan jakaa kolmeen pääryhmään.

- 1) Saimaan sisäiseen liikenteeseen
- 2) Saimaan kanavan kautta kulkevaan kotimaan liikenteeseen
- 3) Saimaan kanavan kautta kulkevaan ulkomaan liikenteeseen

Saimaalla liikennekauden pituus riippuu jäätilanteesta. Avovesikausi on ollut keskimäärin 211 vuorokautta mikä tarkoittaa noin 9,5–10 kuukauden liikennekautta (Ramboll 2020, jossa Saimaan vesiliikenteen volyymeja ja ominaispiirteitä on avattu laajemmin).

### 2.1 Saimaan tavaraliikenne

Vuonna 2020 Saimaan kanavan tavaraliikenne oli noin 1,23 miljoonaa tonnia, eli noin 0,2 miljoonaa tonnia (noin 21 %) enemmän kuin vuonna 2019. Kasvua oli erityisesti raakapuun, mutta myös muiden metsäteollisuuden tuotteiden ja lannoitteiden määrissä (Taulukko 2). Kanavan kautta kulkevasta rahdista hieman alle 7 % on kotimaanliikennettä (vrt. Taulukko 5).

**Taulukko 2 Saimaan kanavan kautta kulkenut rahtiliikenne tavaralajeittain vuonna 2019 ja 2020, tonnia (naviSaimaa 2020 ja Tilastokeskus 2021a)**

Tavaralaji	Tuonti	Vienti	Yhteensä (01-12/2020)	Yhteensä (01-12/2019)	Muutos %
Raakapuu	493 605	37 018	530 623	405 566	30,8
Sahatavara		48 774	48 774	33 638	45,0
Sellu	6 966	73 358	80 324	50 728	58,3
Paperi		90 663	90 663	58 761	54,3
Kivihilli	20 768		20 768	34 821	-40,4
Lannoitteet	1 535	124 543	126 078	98 008	28,6
Kemikaalit	4 805	1 980	6 785	4 699	44,4
Raakamineraalit, sementti	246 773	114 033	360 806	343 235	5,1
Metallituotteet		3 917	3 917	8 072	-51,5
Kappaletavara		1 834	1 834	261	602,7
Muut	7 449		4 948	15 301	-51,3
<b>Yhteensä</b>	<b>781 901</b>	<b>496 120</b>	<b>1 278 021</b>	<b>1 053 090</b>	<b>21,4</b>

Vuonna 2020 Suomen ulkomaankaupasta meritse kuljetettiin yhteensä noin 96,0 miljoonaa tonnia ja kotimaan vesiliikenteessä 2020 yhteensä 7,0 miljoonaa tonnia. Saimaan kanavan liikenteen osuus oli molemmista noin 1,2 % (Tilastokeskus 2021 a ja b).

Liikenteestä merkittävä osa (noin 30 %) koostuu Venäjän tuontiliikenteestä. Kanavan kautta Saimaalle kuljetetun tuonnin osuus oli 61 % koko tavaraliikenteen tonneista; viennin osuus oli 39 % (Taulukko 3 ja 4).

Saimaan rahtiliikenne on puutavaravoittoista, joista keskeinen tuoteryhmä on raakapuun tuonti Venäjältä. Lokakuussa 2020 järjestetyn INFUTURE Round Table- keskustelussa Anatoly Burkow nosti esille mahdollisuuden, että lannoitteilla ja kemikaaleilla, metallituotteilla (romurauta, takkirauta) sekä soralla on kasvupotentiaalia tulevaisuudessa (INFUTURE 2020).

**Taulukko 3 Kanavaa ylös kulkevat tavaravirrat lähtö- ja määräsatamittain vuonna 2019, tonnia (Lähde: Ramboll 2020 Kanavatilastot, Traficom mukaan).**

Tuonti (tonnia, 2019)	Lappeenranta	Imatra	Joutseno	Joensuu	Ristiina	Kuopio	Savonlinna	Varkaus	Siilinjärvi	Yhteensä
Venäjä	147 171	118 290			26 526	1 510	14 590	4 712		312 799
Alankomaat	56 675		110 718	1 330						168 723
Latvia		15 452		50 066						65 518
Viro		57 212					2 485			59 697
Saksa	5 036	2 132		4 700		4 486		11 791		28 145
Suomi	20 826									20 826
Tanska						7 551				7 551
Belgia						4 950				4 950
Ruotsi									4 699	4 699
Portugali				4 560						4 560
Liettua		1 624					1 170			2 794
Irlanti	329									329
<b>Yhteensä</b>	<b>230 037</b>	<b>194 710</b>	<b>110 718</b>	<b>60 656</b>	<b>26 526</b>	<b>18 497</b>	<b>18 245</b>	<b>16 503</b>	<b>4 699</b>	<b>680 591</b>

Vuonna 2019 tärkeimmät tuontimaat olivat Venäjä (46 % kokonaistuonnista), Alankomaat (25 %) ja Latvia (10 %). Vilkkaimmat tuontisatamat puolestaan olivat Lappeenranta (34 % kokonaistuonnista), Imatra (29 %) ja Joutseno (16 %).

Venäjän rooli tuontiliikenteessä on merkittävä, ja se keskittyy raakapuuhun. Vuonna 2008 liikenne supistui Venäjän tuontitullien vuoksi, eivätkä volyymit ole tämän jälkeen palanneet sitä edeltäneelle tasolle.

Saimaan kanavan kautta rahtia voidaan kuljettaa pitkälle Eurooppaan ilman välipurkuja ja lastauksia, joka tekee siitä tehokkaan ja suoraviivaisen tavan kuljettaa rahtia. Vuonna 2019 keskeisimmät vientimaat olivat Puola (16 % kokonaisviennistä), Ruotsi (16 %) ja muu Suomi (14 %).

**Taulukko 4 Kanavaa alas kulkevat tavaravirrat lähtösatamittain ja määrämaittain vuonna 2019, tonnia (Lähde: Ramboll 2020 Kanavatilastot, Traficom)**

Vienti 2019, tonnia	Siilinjärvi	Imatra	Joensuu	Lappeenranta	Kitee	Varkaus	Kuopio	Savonlinna	Yhteensä
Puola	2 372	43 541	8 440	6 345					60 698
Ruotsi	39 354	5 675		14 704					59 733
Suomi	48 433				2 249		1 529		52 211
Alankomaat	4 500	12 175	22 599						39 274
Saksa	11 904	8 072	17 073						37 049
Britannia			10 421	4 300	16 299	771		3 049	34 840
Tanska	25 692								25 692
Liettua	9 572	2 441		8 531					20 544
Ranska					7 176	12 240			19 416
Irlanti			603	4 412	2 311				7 326
Venäjä							5 511		5 511
Viro	4 614								4 614
Latvia		1 165	2 501						3 666
Belgia		1 925							1 925
<b>Yhteensä</b>	<b>146 441</b>	<b>74 994</b>	<b>61 637</b>	<b>38 292</b>	<b>28 035</b>	<b>13 011</b>	<b>7 040</b>	<b>3 049</b>	<b>372 499</b>

**Taulukko 5 Saimaan kanavan kautta kulkenut kotimainen rahtiliikenne 2019 ja 2020, tonnia (Tilastokeskus 2021b)**

Kotimaan liikenne	tammi-joulukuu 2020	tammi-joulukuu 2019	Muutos %
Tuonti	13 033	20 826	-37,4
Vienti	73 146	52 211	40,1
<b>Yhteensä</b>	<b>86 179</b>	<b>73 037</b>	<b>18,0</b>

Ulkomaan liikenne	tammi-joulukuu 2020	tammi-joulukuu 2019	Muutos %
Tuonti	768 868	659 765	16,5
Vienti	422 974	320 288	32,1
<b>Yhteensä</b>	<b>1 191 842</b>	<b>980 053</b>	<b>21,6</b>

Vilkkaimmat vientisatamat olivat vuonna 2019 Siilinjärvi (39 % kokonaisviennistä), Imatra (20 %) ja Joensuu (17 %). Vientimaat jakautuvat tuontia tasaisemmin. Imatralla on keskeinen rooli sekä tuonti- että vientiliikenteessä; se on 2. vilkkain satama molempiin suuntiin.

Vuonna 2020 Saimaan rahtiliikenteestä kotimaan liikennettä oli noin 7 % (Taulukko 5).

**Taulukko 6 Saimaan sisäinen liikenne 2019 tonneissa (lähde: naviSaimaa 2020)**

		Raportointisatama					Yhteensä
		Imatra	Joutseno	Lappeenranta	Ristiina	Varkaus	
Lastaus/purkusatama	Varkaus	49 470	31 104	45 855			126 429
	Juuka	1 504	5 780	1 424			8 708
	Savonranta	3 990			1 952		5 942
	Joensuu	13 536	26 039	66 784	5 898		112 257
	Kuopio	32 526		9 487			42 013
	Nurmes		4 378	3 093			7 471
	Iisalmi		8 942				8 942
	Ahkiolahti		10 562				10 562
	Savonranta		3 579	24 928			28 507
	Saimaa muut	38 185	61 070	63 569		13 408	176 232
	<b>Yhteensä</b>	<b>139 211</b>	<b>151 454</b>	<b>215 140</b>	<b>7 850</b>	<b>13 408</b>	<b>527 063</b>

Kaikki liikenne ei kulje kanavan läpi. Saimaan sisäinen liikenne on noin 0,5 miljoonaa tonnia vuodessa uitto mukaan lukien (Taulukko 6). Tilavuutena mitattuna Saimaan puunkuljetukset aluksilla ja uitettuna ovat yhteensä noin 1,1 miljoonaa kuutiota.

## 2.2 Saimaan matkustajaliikenne

Saimaan kanavan matkustajaliikenne ei ole absoluuttisissa määrissä valtakunnan tasolla kovinkaan suurta. Vuonna 2018 matkustaja-aluksilla tilastoitiin yhteensä 34 669 matkustajaa ja huvialuksilla Saimaan kanavan läpi 2 286 matkustajaa. Vuonna 2019 matkustaja-alusten matkustajamäärä laski noin tuhannella. Vuoden 2019 huvialuksilla kulkeneiden määrä ei ollut saatavilla. Taulukko 7 esittää Saimaan kanavan matkustajaliikenteen volyymit. Saimaan kanavalla tapahtuvan matkustajaliikenteen lisäksi Saimaan järviolueella risteilee vuosittain noin 100 000 matkustajaa.

Merkittävin muutos matkustajamäärissä tapahtui vuonna 2001, kun viisumipakon myötä matkustajamäärät vähenivät sen hetken noin 100 000 vuosittaisesta matkustajasta alimmillaan noin 27 000 matkustajaan vuonna 2003. Matkustajamäärät pysyttelivät alle 40 000 vuosittaisessa matkustajassa vuoteen 2009 asti, jolloin viisumipakko poistettiin. Matkustajamäärät nousivat hetkellisesti, mutta eivät ole palautuneet; vuodesta 2010 eteenpäin trendi on jälleen ollut laskeva.

**Taulukko 7 Saimaan kanavan matkustajaliikenne (lähde: Traficom 2019)**

Vuosi	Matkustaja-alukset (matkustajaa)			Huvialukset (matkustajaa)	Yhteensä (matkustajaa)
	Matkustaja-aluksissa kanavan läpi	Risteilyllä Suomen puolella	Yhteensä	Aluksissa kanavan läpi	
2018	16 413	18 256	34 669	2 286	36 995
2019	18 870	14 892	33 762	-	-

Purjehduskautena 2020 matkustajaliikenne on suureksi osaksi lakannut, ja kansainvälinen liikenne lakannut käytännössä kokonaan.

### 2.3 Saimaan vesiliikenteessä käytettävän aluscaluston ominaisuuksia

Saimaan kanavan suurin sallittu aluskoko määräytyy kanavan sulkujen mukaan. Aluskoosta on käytetty nimitystä Saimax. Saimax-aluksen pituus 82,50 metriä. Sulkukammiossa hinaajan ja puutavaralautan kokonaispituus saa olla enintään 84 metriä. Avokanavassa yhteispituus saa olla enintään 240 metriä.

Hinaajan ja hinattavan aluksen kokonaispituus saa olla sulkukammiossa enintään 82,50 metriä. Aluksen leveys saa olla korkeintaan 12,60 metriä ja suurin korkeus vedenpinnasta 24,50 metriä. Syväys saa olla korkeintaan 4,35 metriä ja hinattavan aluksen syväys saa olla 4,50 metriä. (Ramboll (2020))

Päätös pidentää Saimaan kanavan sulkukammioita laajentaa liikenteeseen soveltuvan aluskannan jopa 93 metrin pituisiin aluksiin, jolloin maksimipituutta lähenevän yksittäisen aluksen tavarankuljetuskyky kasvaa varsin tuntuvasti.

Hankkeen kokonaiskustannuksiin valtion vuoden 2021 budjetissa Väylävirastolle on varattu 90 milj. euroa. Hankearvioinnin hyöty-kustannuslaskelman ns. HK-suhde on 0,52–0,59 riippuen kanavan liikennekauden pituudesta (VM 2020).

Alle lukuarvon 1 oleva HK-suhde tarkoittaa, että tällainen hanke ei ole yhteiskuntatalouden näkökulmasta kannattava. Valitulla hankevaihtoehdolla Ve 2b saavutetaan kuitenkin suurimmat säästöt kuljetuskustannuksissa, mutta kanavan ja syväväylän ylläpitokustannukset kasvavat merkittävästi (Lapp 2020).

Avovesikausi on Saimaalla ollut keskimäärin 211 vuorokautta, mikä tarkoittaa noin 9,5–10 kuukauden liikennekautta (Ramboll 2020). Saimaalla tai Saimaan kanavan kautta ei siis ole ympärivuotista liikennettä, eikä jäänmurrolle ole rannikkosatamien kaltaista tarvetta.

Myöskään alusten jääluokkavaatimus ei tästä syystä ole yhtä kriittinen ominaisuus kuin talviaikaisessa liikenteessä rannikon satamiin.

Saimaan liikenteessäkin on tilanteita, jossa väylien käytettävyys myös jääolosuhteissa ja alusten jäissäkulkukyky on tärkeää. Joulukuussa 2020 Saimalla otettiin käyttöön [Väyläviraston](#) tilaama jäätä murtava irtokeula, joka on ensimmäinen laatuaan maailmassa (ks. demonstraatiovideo [täältä](#)).

Myös Suomen meriliikenteessä alusten koko on kasvanut jatkuvasti ja sen myötä Saimaan kanavalle soveltuvien alusten lukumäärä on vähentynyt (Ojala ym. 2018, 86-91). Alusten heikko saatavuus oli keskeinen peruste päätökselle pidentää Saimaan kanavan sulkua.

Saimaan kanavan kautta liikkuu pääsääntöisesti monikäyttöisiä kuivalastialuksia, joista useat kuljettavat irtolasteja ja kappaletavaraa. Useimmat laivat pystyvät kuljettamaan myös jonkin verran kontteja ja joissakin on valmiit konttikiinnityspaikat valmiina.

Säännöllistä konttiliikennettä on ideoitu myös Saimaalle. Konttikuljetuksien etuna pienien lastierien helppo yhdistäminen yhteen laivakuljetukseen. Kontit tulee kuljettaa Saimaan satamista joko suoraan Euroopan satamaan maanteitse tapahtuvaan loppukuljetukseen tai yleisemmin syöttöliikenteenä valtamerisatamaan, josta kontti kuljetetaan tyyppillisesti valtameren takaisiin kohteisiin. Konttiliikenteen tilanne ja Eurooppaan suuntautuvien konttikuljetuksien tarkoituksenmukaisuus on vaihdellut vuosien saatossa markkinatilanteen muutoksien myötä. Konttiliikenteen aloitus ei välttämättä vaadi suuria investointeja, jos satamassa on muutenkin riittävää nosturikapasiteettia.

## 2.4 Saimaan liikenteen luotsaustoiminta

Suomessa sekä Saimaan kanavan vuokra-alueella luotsaustoiminnasta vastaa valtion täysin omistama Finnipilot Pilotage Oy, joka on valtioneuvoston kanslian omistajaohjausosaston ohjauksessa toimiva ns. erityistehtäväyhtiö (VNK 2021).

Vuosittain Suomen satamiin on noin 24 000 luotsaustapahtumaa, joista noin 3 000 on Saimaalla, jossa luotsattavat matkat ovat usein varsin pitkiä (ks. esim. Ojala ym. 2018, s. 52). Saimaan kanavassa on luotsipakko kaikilla yli 35 metriä pitkillä aluksilla. Liikenne- ja viestintävirasto voi anomuksesta myöntää aluksen päällikölle oikeuden kuljettaa alusta kanavassa tai Saimaalla jollakin luotsausosuudella ilman luotsia sen jälkeen, kun päällikkö on suorittanut siihen vaadittavan tutkinnon (linjaluotsinkirja). (Väylävirasto 2021)

Luotsauslain mukaisesti luotsauksen yksikköhinnasta, alennetusta yksikköhinnasta ja muista hinnoista päättää luotsausyhtiön hallitus. Luotsausmaksu määräytyy luotsattavan aluksen nettovetoisuuden ja luotsatun matkan perusteella, ja se peritään jokaiselta alkavalta maililta. Saimaan kanavalla ja Saimaan vesistöalueella peritään alennettuun yksikköhintaan perustuvaa maksua (Finnipilot 2021).

Finnpilot Pilotage Oy on 2010-luvulla saanut valtiolta vuosittain noin 4 milj. euroa tukena Saimaan luotsauksen huomattavasti alhaisempien luotsausmaksujen vastineeksi. Valtion vuoden 2021 talousarvioesityksessä tämä Saimaan alueen luotsauksen hintatuen nimellä kulkeva erä oli 3,8 milj. euroa (VM 2020).

Saimaan liikenteen luotsaustoimintaa on sivuttu myös Rambollin raportissa (2020).

## 2.5 Saimaan liikenteen väylämaksut

Väylämaksu on veroluontoinen maksu vesiväylien käytöstä, jonka Suomessa perii Tulli; Suomessa se määräytyy aluksen koon, tyyppin, jääloukan ja käyntikertojen mukaan. Toisin kuin luotsausmaksua, sitä ei peritä kuljetun matkan perusteella.

Vuoteen 2015 saakka väylämaksukertymä oli noin 90 milj. euroa vuodessa. Siitä eteenpäin on sovellettu alennettua väylämaksua, jolla pyrittiin kompensoimaan niin sanotun alusten rikkipäästöjen vähentämistä koskevan sääntelyn aiheuttamia kustannuksia Suomen merenkululle. Samalla maksukertymä puolittui noin 40-45 milj. euroon (ks. myös Ojala ym. 2018 ja Kuntze ym. 2019). Alennettuja maksuja on päätetty jatkaa ainakin vielä vuonna 2021.

Väylämaksujen säädösperusteena on väylämaksulaki, jota sovelletaan Suomen vesialueella kauppamerenkulkua harjoittaviin aluksiin (Tulli 2021). Väylämaksulain ulkopuolelle on kuitenkin jätetty:

1. alus, joka liikennöi Saimaan kanavalla tai Saimaan vesialueella
2. alus, joka matkalla ulkomaisesta satamasta toiseen kulkee Suomen aluevesien kautta poikkeamatta Suomessa satamaan
3. alus, joka saapuu Suomeen ja lähtee Suomesta Saimaan kanavan kautta poikkeamatta Suomen rannikon satamaan
4. lasti- ja risteilyalukset, joiden nettovetoisuus on alle 300 ja
5. matkustaja-alukset, joiden nettovetoisuus on alle 600
6. alus, jota käytetään jäänmurtoon Suomen sisäisillä tai ulkoisilla aluevesillä ja joka tuottaa Väylävirastolle jäänmurtopalveluja sopimus- tai valtiosopimus pohjaisesti.

Väylämaksua on siis maksettava, kun alus saapuu ulkomailta Suomen aluevesille tai kun alus saapuu suomalaisesta satamasta suomalaiseen satamaan. Väylämaksua ei kuitenkaan suoriteta aluksen saapuessa Saimaan satamaan eikä aluksen hakiessa lastia toisesta Saimaan satamasta. Väylämaksu kuitenkin suoritetaan Saimaan kanavalta Suomen rannikon merisatamaan saapuvalta alukselta.

Saimaan liikenteen väylämaksuvapautus on alueen vesiliikenteelle merkittävä tuki. Viranomaisarviota tästä kustannushyödyistä ei ole käytössä, mutta vuonna 2020 Saimaan kanavan alusliikenteessä oli yhteensä 1 085 alusta, joista puolet liikkui kanavaa ylös ja puolet alas (Tilastokeskus 2021c).

Vastaavantyyppisessä liikenteessä rannikon satamiin väylämaksuja kertyisi tekijöiden arvion mukaan noin 2 milj. euroa nykyisillä alennetuilla yksikköhinnoilla.

## 2.6 Saimaan vesiliikenteen toimijat

Saimaan vesiliikenteen sidosryhmiin kuuluvat laivaajien, varustamojen ja satamien lisäksi myös toiminnot kuten luotsaus, väylän ylläpito, jäänmurto, tilastointi sekä valvonta ja turvallisuus (Taulukko 8)<sup>2</sup>.

**Taulukko 8 Saimaan vesiliikenteen toimijoita (Hirvonen, 2020)**

Rooli	Toimija
<b>Suurimmat laivaajat</b>	Stora Enso Oyj; UPM-Kymmene Oyj; Yara Oy; Schwenk Oy
<b>Varustamot (10)</b>	<b>Kansainvälinen liikenne:</b> kaksi kotimaista kaksi keskieurooppalaista Hollantilainen Wagenborg Shipping B.V. Saksalainen Rhenus Maritime Services GmbH (RMS) kolme venäläistä <b>Sisäinen liikenne:</b> kolme kotimaista
<b>Satamat (18)</b>	Viisi julkista satamaa: <b>Lappeenranta, Joensuu, Kuopio, Savonlinna ja Varkaus</b> 13 teollisuusyritysten yksityistä satamaa, esimerkiksi Stora Enson Vuoksi (Imatra) ja Yaran Siilinjärvi
<b>Luotsaustoiminta</b>	Finnpilot Oy
<b>Väylän ylläpito</b>	Väylävirasto
<b>Jäänmurto</b>	Alfons Håkans Oy
<b>Kanavavaltuutettu toimisto</b>	LVM
<b>Liikennetilastointi</b>	Traficom/Tilastokeskus
<b>Liikenteen valvonta ja turvallisuus</b>	Saimaa Vessel Traffic Service (VTS); v. 2021 alusta se on osa Fintraffic VTS Oy:tä; emoyhtiön nimi on nykyään Fintraffic Oy; emoyhtiön aiempi nimi oli Traffic Management Finland Group.

Taulukon listaus koskee pääasiassa rahtiliikennettä. Matkustajaliikenteen sidosryhmät ovat Väyläviraston sekä Saimaan kanavan osalta samat. Saimaan risteilyliikenteessä ei tarvita ahtausta, luotsausta eikä jäänmurtoa.

<sup>2</sup> Saimaan toimijakenttää on avattu laajemmin Kaisa Hirvosen opinnäytetyössä Saimaan vesiliikenteen kehittämisorganisaation toimintamallin rakentaminen. (2020) s. 6–9.

### **3 Alusliikenteen vähähiilisiä käyttövoimia käsittelevän tutkimuksen nykytila**

Merenkulun päästöjä ja päästötavoitteita sekä päästövähennyskeinoja, ml. vähähiiliset käyttövoimavaihtoehdot, on käsitelty laajasti alan tutkimus- ja selvityskirjallisuudessa. Tutkimuskirjallisuuden, lähinnä tieteellisten artikkelien ja alan selvitysten välinen keskeinen ero on, että tieteelliset artikkelit keskittyvät tyypillisesti hyvin rajattuun ongelmaan tai aihepiiriin, ja pyrkivät käsittelemään sitä syvällisesti.

Toimialaa palvelevat selvitykset ovat luonteeltaan yleisselvityksiä. Näissä on pyritty luomaan kuvaa merenkulun energian kulutuksen nykytilasta sekä arvioimaan siitä, mihin ja millaisella aikajänteellä merenkulku on kehittymässä. Keskeisiä selvityksiä ovat mm. IMO:n kasvihuonekaasujen päästöjä koskevat GHG-raportit, joissa luodaan kattava kuva merenkulun energian kulutuksesta ja päästöistä sekä tulevaisuuden päästökehityksestä. Viimeisin näistä on vuodelta 2020.

Myös eräät muut kansainväliset järjestöt julkaisevat raportteja maailman energiankulutuksesta sektoreittain sekä arvioita tulevaisuuden kehityssuunnista. Esimerkiksi IEA:n Energy Technology Perspectives (IEA 2020) –raportti arvioi myös merenkulun tämänhetkistä energian kulutusta sekä sen jakautumista eri tuotantotapoihin. Liikennesektorin kehitystä kohti vähähiilisyyttä seuraa myös mm. OECD:n yhteydessä toimivia International Transport Forum, joka on julkaissut useita meriliikennettä käsitteleviä selvityksiä (ks. esim. ITF 2018 ja 2020)

#### **3.1 Skenaarioita vaihtoehtoisten polttoaineiden käytöstä**

IEA:n raportissa (2020) esitellään skenaariomaisesti niitä kehityskulkuja ja teknisiä ratkaisuja, joilla merenkulun päästöjä saadaan vähennettyä, erityisesti tilanteessa jossa merenkulun volyymien odotetaan kasvavan.

Raportissa kehitys on jaettu lyhyen, keskipitkän ja pitkän aikavälin skenaarioihin, ja niiden pohjalta esitetty arvio siitä, millaiset merenkulun käyttövoimat ja millaisin osuuksin tulevat IEA:n arvion mukaan olemaan lyhyellä, keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä.

Myös muut organisaatiot, esimerkiksi luokituslaitokset Det Norske Veritas – Germanischer Lloyd omassa Energy Transition Outlook (DNV GL, 2020) sekä siihen liittyvässä Maritime Forecast to 2050 –raportissaan esittävät oman arvionsa merenkulun energiatarpeesta sekä merenkulun tulevista käyttövoimista. (Ks. Kuvio 2)

**Kuvio 2 DNV GL:n skenaariot vaihtoehtoisten polttoaineiden käytöstä vuonna 2050 (DNV GL 2020)**



Lloyds ja UMAS (2020) esittävät teknis-taloudellisen analyysin vähähiilistä ja ns. zero carbon –teknologioista, sisältäen niin investointivalmiuden, teknisen valmiuden kuin ns. yhteiskunnallisen valmiuden (community readiness). Raportissa näitä asioita lähestytään erilaisten skenaarioiden näkökulmasta, huomioiden energian kysyntä, energian hinnan kehitys sekä eri teknologioiden kustannukset.

Edellä mainittujen yleisselvitysten lisäksi eri organisaatiot ja tutkimuslaitokset ovat julkaisseet myös suppeammin rajattuja selvityksiä, esimerkiksi yksittäiseen energiavaihtoehtoon tai tuotantotapaan liittyen. Tällaisista esimerkkeinä ovat mm. IEA:n (2019a) vetyteknologiaan keskittyvä ”The Future of Hydrogen”, ja merenkulun biopolttoaineita käsittelevä ”Biofuels for the marine shipping sector” (Hsieh ja Felby, 2017) sekä ruotsalaisen merenkulun osaamiskeskus Lighthouse’n ammoniakkin hyödyntämistä merenkulun polttoaineena käsittelevä raportti ”On the potential of ammonia as fuel for shipping” (Hansson ym. 2020).

### 3.2 Merenkulun päästöt ja päästövähennysten potentiaali

Merenkulun päästöjä ja käyttövoimavaihtoehtoja käsittelevien tutkimusartikkelien määrä on lisääntynyt nopeasti viime vuosina. Näin ollen kirjallisuuden tyhjentävä läpikäynti on mahdotonta. Osa tutkimusartikkeleista on rajannut tarkastelun yksittäiseen polttoainevaihtoehtoon, siinä missä osa käsittelee useita polttoainevaihtoehtoja samanaikaisesti. Osa tutkimusartikkeleista ei rajaa tarkastelua pelkästään vaihtoehtosiin polttoaineisiin, vaan vetää yhteen aiempaa tutkimusta merenkulun päästövähennyskeinojen potentiaalista yleisemminkin.

Taulukko 9 esittää Bouman ym. (2017) artikkelin yhteenvedon merenkulun päästövähennyskeinojen potentiaalista. Bouman ym. (2017) lisäksi myös esimerkiksi Eide ym. (2013) käsittelee artikkelissaan merenkulun päästövähennyspotentiaalia sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden roolia siinä.

Useita polttoainevaihtoehtoja samanaikaisesti käsittelevistä tutkimuksista voi nostaa esiin esimerkiksi Balcombe ym. (2019), joka lähestyy polttoainevaihtoehtoja meriliikenteen vähähiilisyden (dekarbonisaation) näkökulmasta, ja sisällyttää omaan tarkasteluunsa eri polttoainevaihtoehtoja kuten biopolttoaineet, LNG:n polttokennot ja metanolin. Denis ja Zincir (2015) puolestaan analysoivat LNG:tä, metanolia, etanolia ja vetyä sekä taloudellisesta, että ympäristöllisestä näkökulmasta.

**Taulukko 9 Merenkulun päästövähennyskeinojen potentiaali Bouman ym. (2017) mukaan**

Keinon tyyppi	Arvioitu menetelmä	Lyhyt kuvaus	CO <sub>2</sub> -vähennys-potentiaali
<b>Rungon design</b>	Aluksen koko	mittakaavaedut ja kapasiteetin käyttöasteen parantaminen	4 - 83 %
	Rungon muoto	Mitat ja muodon optimointi	2 - 30 %
	Kevyemmät materiaalit	Kestävämpi teräs, komposiittimateriaalit	0,1-22 %
	Ilmavoitelu		1-15 %
	Vastusta vähentävät laitteet	Muut asennettavat vastusta vähennettävät laitteet	2-15 %
	Painolastin vähentäminen	Aluksen designin muuttaminen painolastin vähentämiseksi	0-10 %
	Rungon pinnoittaminen	Eri tyyppiset pinnoitteet	1-10 %
<b>Voimansiirto ja propulsio</b>	Hybridi voimansiirto/ propulsio	Hybridi apukoneet ja propulsio	2-45 %
	Sähkö	sähköinen energiantuotanto	1-35 %
	Propulsion tehokkuutta parantavat laitteet		1-25 %
	Hukkalämmön talteenotto		1-20 %
	Aluksella tarvittavan energian (mm. valaistus) tehostaminen		0,1 -3 %
<b>Vaihtoehtoiset polttoaineet</b>	Biopolttoaineet		25-84 %
	LNG		5-30 %
<b>Vaihtoehtoiset energialähteet</b>	Tuulivoima	Leijjat, purjeet	1-50 %
	Polttokennot		2-20 %
	Maasähkö		3-10 %
	Aurinkoenergia	Aurinkopaneelit katolla	0,2 -12 %
<b>Operatiiviset</b>	Nopeuden optimointi, nopeuden vähentäminen		1- 60 %
	Kapasiteetin käyttöasteen parantaminen		5-50 %
	Reittioptimointi		0,1-48 %
	Muut operatiiviset keinot	trimmin/ syväyksen optimointi, energiajohtaminen, huollon optimointi	1-10 %

Percic ym. (2020) puolestaan tarkastelevat eri vaihtoehtoisia polttoaineita ja niiden elinkaarikustannuksia ja päästövähennyspotentiaalia erityisesti lähimerenkulun näkökulmasta, kun taas Gilbert ym. (2018) keskittyvät eri polttoainevaihtoehtojen, käytännössä eri biopolttoaineiden, LNG:n vedyn ja metanolin koko elinkaaren aikaisiin päästöihin. Horvath ym. (2018) puolestaan pyrkivät tarkastelemaan eri polttoainevaihtoehtojen maturiteettia, ja esittävät oman skenaarionsa vähähiiliselle meriliikenteelle vuosille 2030 ja 2040.

Lisäksi useat tutkimukset ovat analysoineet yksittäisiä polttoaineita. Bengtsson ym. (2012) keskittyvät erityisesti biopolttoaineisiin, ja esittävät kaksi vaihtoehtoista polkua sekä niihin liittyviä haasteita ja potentiaalia biopolttoaineiden käytön lisäämiseksi merenkulussa. Mohr ja Rahman (2013) puolestaan käsittelevät biopolttoaineita erityisesti siitä näkökulmasta, miten ensimmäisen ja toisen sukupolven biopolttoaineet eroavat toisistaan. Bicer ja Dincer (2018) keskittyvät erityisesti ammoniakilla toimivien alusten ympäristövaikutusten arviointiin.

Tutkimuskirjallisuudessa on mainittu eräänä potentiaalisena väylänä liikenteen päästöjen vähentämiseksi myös ns. synteettiset polttoaineet. Synteettiset polttoaineet ovat käytännössä polttoaineita, joille löytyy oma fossiilinen vastineensa, mutta joita tuotetaan päästöttömästi (Hänggi et al. 2019). Tulevaisuudessa uusiutuvan energian, kuten tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotannon oletetaan kasvavan merkittävästi. Niiden tuotannolle on ominaista suuret säästä johtuvat vaihtelut. Koska myös energian kulutus vaihtelee merkittävästi niin vuodenaikojen, vuorokaudenaikojen kuin satunnaisen vaihtelun seurauksena, on tulevaisuudessa odotettavissa entistä suurempaa epätasapainoa niiden välillä. Tästä syystä on esitetty (ks. esim. Luo et al. 2015), että tuulivoiman ja aurinkovoiman tuotannon ajoittaista ylijäämää käytettäisiin synteettisten polttoaineiden, kuten metaanin, metanolin, dimetyylieetterin tai synteettisen dieselin tuotantoon.

## 4 Toteutuneita ja suunnitteluvaiheessa olevia vähähiilisiä käyttövoimahankkeita

Luku yhteenveto tällä hetkellä käytössä olevista tai toteutus- ja suunnitteluvaiheessa olevista merenkulun hankkeista, joissa käyttövoimat ovat vähähiilisiä tai kokonaan hiilettömiä. Luku on jaoteltu kolmen tärkeimmän käyttövoimavaihtoehdon mukaan, joita ovat:

1. Polttokennot ja vety
2. Sähkö
3. Ammoniakki

### 4.1 Polttokennot ja vety

#### 4.1.1 METHAPU

EU:n 6. puiteohjelman hanke “Validation of a Renewable Methanol-based Auxiliary Power System for Commercial Vessels<sup>3</sup>” oli käynnissä marraskuusta 2006 lokakuulle 2010. Projektin tavoitteena oli kehittää metanolikäyttöisiä järjestelmiä kauppa-alusten apukoneisiin. Projektin koko oli 1,9 miljoonaa euroa, ja mukana olivat Wärtsilä, Lloyd’s Register, Wallenius Marine Ab, Genovan yliopisto Italiasta sekä Det Norske Veritas.

Projektin aikana mm. asennettiin Wallenius Marine Ab:n autojenkuljetusalus Undineen SOFC (solid oxide fuel cell) –teknologialla toimiva 20 kW:n metanolikäyttöinen polttokenno.

#### 4.1.2 FellowSHIP - Viking Lady

FellowSHIP-projektissa<sup>4</sup> Eidesvik Offshore, Wärtsilä Norway ja DNV GL tutkivat LNG-toimisten polttomoottorien, polttokennojen ja sähkömoottorien yhteiskäyttöä. Parantuneen energiatehokkuuden lisäksi vuonna 2018 päättyneessä projektissa dokumentoitiin edistystä myös päästöjen vähentämisen näkökulmasta, kun havaittiin hybriditeknologian olevan tehokas keino vähentää LNG-koneiden alhaisilla kierrosluvuilla tuottamia suurempia metaanipäästöjä.

#### 4.1.3 e4ships

e4ships - fuel cells in marine applications on vuosina 2009–2016 käynnissä ollut yhteistyöprojekti, jossa Saksan liittovaltio sekä saksalaiset telakat (Meyer Werft ja Thyssen

<sup>3</sup> Ks. <https://cordis.europa.eu/project/id/31414>

<sup>4</sup> Ks. <https://www.dnvgl.com/expert-story/maritime-impact/FellowSHIP-project-concludes-15-years-of-maritime-battery-and-fuel-cell-research.html>

Grupp), varustamot, polttokennovalmistajat sekä luokituslaitokset kehittivät yhdessä polttokennoteknologian hyödyntämistä merenkulussa. Projekti jakautui kahteen eri moduuliin, SchIBZ ja Pa-E-ell, joista ensimmäisessä testattiin polttokennoteknologian hyödyntämistä erikoisaluksilla ja jahdeilla, ja jälkimmäisessä matkustaja-aluksilla.

Projektin tulosten mukaan metanolin käyttö polttoaineena polttokennoissa vähentäisi aluksen paikallisia CO<sub>2</sub> –päästöjä noin 30 %, parantaisi energiatehokkuutta noin 20 % sekä käytännössä poistaisi rikki-, typpi, ja pienhiukkaspäästöt kokonaan.

#### 4.1.4 ZEMSHIP

Zemship (zero emissions ships) on saksalainen yhteistyöprojekti, joka vuonna 2008 kehitti ja rakensi FCS Alstervasser –aluksen Alsterjärven liikenteeseen Hampurissa. 25,56 metriä pitkä ja 5,2 metriä leveä alus on varustettu kahdella 48 kW PEM (Proton-exchange membrane) polttokennojärjestelmällä, jotka yhdessä akuston (7\*80 VB, 360 Ah) lisätehon kanssa tuottavat noin 100 kW tehon. Aluksella vety varastoidaan 350 barin säiliöihin.

#### 4.1.5 HySHIP

HySHIP viittaa sekä Wilhelmsen Holding ASA:n koordinoimaan EU:n Horizon 2020 –ohjelman tutkimushankkeeseen, että Wilhelmsen –yhtiön suunnitelmiin rakentaa ensimmäinen nestemäistä vety polttokennotekniikalla hyödyntävä RoRo –alus Stavangerin ja Kristiansundin väliseen liikenteeseen Norjassa.

Tutkimushanke on käynnistynyt tammikuussa 2021 ja päättyy joulukuussa 2025. Wilhelmsenin lisäksi konsortiossa ovat mukana mm. Equinor ja Strathclyden yliopisto Iso-Britanniasta. Energijärjestelmän suunnittelusta ja toteutuksesta vastaa norjalaisyhtiö Kongsberg. Aluksen rakentamisen kustannuksia ei ole julkaistu, mutta tutkimushankkeen kustannusarvio on noin 10,8 miljoonaa euroa, josta EU-rahoituksen osuus on noin 7,9 miljoonaa euroa.

## 4.2 Sähkö

### 4.2.1 Yara Birkeland

Yara Birkeland on autonominen 120 TEU:n lastikapasiteetin ja 3 200 DWT:n kantavuuden suuruinen konttialus, jonka on tarkoitus aloittaa liikenne Herøyasta Brevikiin (10 km) ja Larvikiin (45 km) Norjassa vuonna 2021. Aluksen pituus on 80 metriä, leveys 15 metriä ja syväys 5 metriä. Se on varustettu 360 astetta kääntyvillä Azimuth-potkureilla ja sähkömoottoreilla, jotka saavat virtansa 9 MWh akuista. Aluksen huippunopeus on 12 solmua ja operointinopeus 6 solmua. Aluksen kustannusarvio on 25 miljoonaa euroa.

#### 4.2.2 Vision of the Fjords

Vision of the Fjords on vuonna 2016 valmistunut hybridimatkustaja-alus. Alus on 40 metriä pitkä ja 15 metriä leveä, ja se on suunniteltu kuljettamaan 400 matkustajaa noin 32 kilometrin pituista reittiä 8 solmun nopeudella. Aluksen voimanlähteenä on kaksi 150 kW:n Oswald PM-sähkömoottoria sekä kaksi 749 kW:n MAN dieselmoottoria.

#### 4.2.3 Portliner

Hollantilainen yritys Portliner on suunnitellut kahdenlaisia akkukäyttöisiä aluksia sisävesikuljetuksiin. EC110 on 110 metriä pitkä ja 11,45 metriä leveä konttiproomu, joka on suunniteltu kuljettamaan 280 konttia (TEU). EC52 on 52 metriä pitkä ja 6,7 metriä leveä monitoimialus, joka on suunniteltu kuljettamaan 400 - 1 000 tonnia irtolastia tai vaihtoehtoisesti kontteja. Portlinerin mukaan virtausakkuteknologiaa hyödyntävän EC110:n toimintasäde on 230 km.

#### 4.2.4 CPC 21 ja 22

Vuonna 2018 CPC toimitti Kaohsiungin satamaan Taiwaniin kaksi hybriditoimista bunkrausalusta. Kantavuudeltaan 2900 DWT:n suuruisilla aluksilla on sähkömoottorien lisäksi Yanmarin 6EY22ALW dieselgeneraattorit, jotka tuottavat sähkövirtaa sähkömoottoreille.

#### 4.2.5 Hurtigrutten hybridikäyttöiset matkustaja-alukset

Norjalainen Hurtigrutten on tilannut kolme hybridikäyttöistä risteilyalusta. Vuonna 2019 käyttöön otettu MS Roald Amundsen, vuonna 2020 valmistunut MS Fridtjof Nansen sekä myöhemmin nimettävä kolmas sisaralus ovat jäävahvistukseltaan erittäin korkeaa luokkaa (ns. Polaariluokka PC6).

Alukset ovat 140 metriä pitkiä, 23,6 metriä leveitä ja 5,3 metrin syvyyksellä kulkevia aluksia, joiden voimanlähteenä on pääosin dieselmoottorit, mutta jotka pystyvät tarvittaessa kulkemaan sähköenergian avulla noin 30 minuutin ajan.

#### 4.2.6 Zhongtiandianyun 001

Zhongtiandianyun 001 on sähkökäyttöinen, 70 metriä pitkä ja lastikapasiteetiltaan 1 000 tonnin bulk-alus, joka on suunniteltu kulkemaan Yangtze -joessa Changzhoussa Kiinassa. Aluksen 20 tonnia painava ja 1 458 kWh:n akuston avulla aluksen toimintasäde on 2,5 tunnin latauksella noin 50 km ja nopeus 7 solmua.

### 4.3 Ammoniakki

#### 4.3.1 Viking Energy

Viking Energy<sup>5</sup> on LNG-käyttöinen, 94 metriä pitkä ja 20,6 metriä leveä offshore-alus, joka on tarkoitus muuttaa vuoteen 2024 mennessä 2 MW:n ammoniakkikäyttöisillä polttokennoilla toimivaksi. Aluksesta tulee näin ensimmäinen ammoniakkikäyttöinen alus kaupallisessa liikenteessä.

Aluksen muuntaminen toteutetaan osana 25 miljoonan US-dollarin ShipFC-projektia, jossa ovat mukana mm. aluksen omistaja Eldesvik. Aluksen voimansiirrosta sekä ammoniakin toimitus- ja varastointijärjestelmistä vastaa Wärtsilä Norway, ja polttokennot toimittaa Prototech. Polttoaineen toimittaa Yara.

#### 4.3.2 ZEEDS

Zero Emission Energy Distribution at Sea<sup>6</sup> on Wärtsilän ja muutaman muun yrityksen yhteistyöprojekti, jonka fokus on erityisesti kestävästi tuotetun ammoniakin hyödyntämisestä meriliikenteen polttoaineratkaisuna, mutta joka mahdollisuuksien mukaan tarkastelee myös vedyn ja biokaasun mahdollisuuksia.

Alusten polttoaineratkaisujen lisäksi projekti selvittää myös uudenlaisen, offshore-jakelupisteisiin perustuvan polttoainejakelujärjestelmän mahdollisuuksia.

---

<sup>5</sup> Ks.: <https://www.ammoniaenergy.org/articles/viking-energy-to-be-retrofit-for-ammonia-fuel-in-2024/>

<sup>6</sup> Ks.: <https://zeedsinitiative.com/>

## 5 Aiempaan tutkimukseen perustuva vähähiilisten käyttövoimien käyttötekninen vertailu

### 5.1 Käyttövoimien elinkaaritarkastelussa huomioitavia seikkoja

Käyttövoimien teknistä ja myös kaupallista käytettävyyttä tarkasteltaessa on huomioitava kunkin polttoaineen koko elinkaari. Keskeisiä tekijöitä ovat tällöin mm.:

- Polttoaineen tuotantotapa ja siihen tarvittavien raaka-aineiden saatavuus, tuotantoketjut ja –teknologiat, olemassa oleva tuotantokapasiteetti, nykyinen käyttö ja jakelujärjestelmät sekä vapaana oleva kapasiteetti
- Polttoaineen logistiikan erityispiirteet, ml. polttoaineen ominaisuudet, varastointivaatimukset, turvallisuus ja polttoainetta koskeva sääntely, tarvittava jakeluinfrastruktuuri,
- Käytettävyys laivalla, ml. tarvittavat teknologiat (sekä käytön, että varastoinnin osalta) ja kustannukset.

Polttoaineiden käytettävyyttä määrittelevät siis niiden fyysiset ominaisuudet, kuten olomuoto, kiehumispiste, leimahduspiste, energiatiheys sekä polttoaineiden saatavuuteen, logistiikkaan, varastointiin ja jakeluun liittyvät vaatimukset.

Näiden lisäksi myös polttoaineiden markkinahinnan kehitys ja vaihtoehtoisten käyttövoimien keskinäinen hintaero ovat toimijoille hyvin tärkeitä tekijöitä. Myös kysyntä vaikuttaa hinnanmuodostukseen samoin kuin erilaisten kansalliset tai kansainväliset sääntelytoimet. Sääntely voi liittyä esimerkiksi polttoaineiden verotukseen, jakeluvolvoitteisiin<sup>7</sup> tai päästörajoituksiin.

Lam ym. 2020 jakaa vähähiiliset polttoainevaihtoehdot kolmeen ryhmään:

- 1) fossiilipohjaisiin, konventionaalisiin polttoaineisiin verrattuna vähemmän hiiltä sisältäviin (LNG, metanoli sekä sen johdannaiset)
- 2) biomassaan perustuviin uusiutuviin (bio-LNG, bio-metanoli, biodiesel, hydrattu kasviöljy, bioöljy, pyrolyysiöljy), ja
- 3) ei-biopohjaisiin uusiutuviin polttoaineisiin, käytännössä sähköön ja vedyn kuljettajiin perustuviin ratkaisuihin.

<sup>7</sup> Tällä tarkoitetaan vaatimusta sekoittaa tietty määrä biopolttoainetta fossiiliseen polttoaineeseen. Maantieteellisessä jakeluvolvoiteprosentti kaikkien kulutukseen luovutettujen liikennepolttoaineiden energiasisällöstä on Suomessa 18 prosenttia vuonna 2021, ja osuus nousee 30 prosenttiin vuonna 2029. ([Vero 2020](#))

Keskeinen löydös on, että yksikään tarkastelussa olevista polttoaineista ei ympäristösuorituskykyä lukuun ottamatta vastaa konventionaalisten polttoaineiden suorituskykyä. Lam ym. (2020) mukaan toimiala ei pysty toteuttamaan päästötavoitteita fossiilisia polttoaineita käyttämällä ilman päästökompensaatiota muilta sektoreilta. Näin ollen joko biopolttoaineiden tai vedyn käyttö on välttämätöntä.

Biopolttoaineiden riittävyys on kuitenkin ongelma. Kestävistä lähteistä saatu biomassa ei tule riittämään merenkulun energiatarpeisiin, varsinkin kun biopolttoaineille on myös muuta kysyntää.

Lloyd's ja UMAS (2020) arvioivat eri vähähiilisten voimanlähteiden teknistä ja taloudellista kannattavuutta (feasibility) verrattuna LSHFO –polttoainetta käyttävään tavanomaiseen alukseen; esimerkkialuksena on 82 000 tonnin irtolastialus. Tarkasteltavia osatekijöitä ovat: 1) investointivalmius, kuten laajempi energiajärjestelmä ja tulevien polttoaineiden tuotanto; 2) tekninen valmius; 3) yhteiskunnallinen valmius, ml. interaktio muiden sektorien kanssa. Selvitys ei arvioi turvallisuuskysymyksiä, vaikka ne ovatkin luonteeltaan pääosin teknisiä.

Lloyd's:n ja UMAS:n (2020) skenaarioiden perusteella muihin uusiutuviin polttoaineisiin verrattuna biopolttoaineet ovat kilpailukykyisiä lyhyellä aikavälillä, mutta menettävät etuaan ajan kuluessa. Uusiutuvaan sähköntuotantoon perustuvien vaihtoehtojen kilpailukyvyyn oletetaan paranevan tasaisesti ajan kuluessa, sillä tämän sähkön hinnan odotetaan laskevan.

Uusien vähähiilisten polttoaineratkaisujen ja uusiutuvaan sähköntuotantoon perustuvien ratkaisujen kilpailukyky riippuu hiilen hinnan kehityksestä. Mitä kalliimpi CO<sub>2</sub>-tonnin hinta, sitä nopeammin niistä tulee kannattavia. Raportin mukaan akkupohjaiset ratkaisut ovat kokonaiskustannuksiltaan kalliimpia kuin muut vaihtoehdot. Vedyllä kaikkein suurimmat varastointiin ja lastitilan menetykseen liittyvät kustannukset vähähiilisistä polttoaineratkaisuista.

IEA (2020) arvioi omassa meriliikenteen kestäväen kehityksen skenaariossaan merenkulun päästövähennysten toteutuvan kolmessa vaiheessa. Lyhyellä tähtämellä merenkulun päästövähennyspotentiaaliin vaikuttaa merkittävästi IMO:n rikkisääntely, joka ohjaa varustamot joko siirtymään matalarikkisiin polttoaineisiin tai asentamaan käytössä olevaan kalustoon rikkipesureita. CO<sub>2</sub>-päästöjen kannalta nämä ratkaisut kuitenkin sitovat olemassa olevan kaluston fossiilisiin polttoaineisiin ja siten hidastavat siirtymää vähäpäästöisiin ratkaisuihin. Osa uudisrakennuksista toteutetaan LNG-käyttöisinä, mutta niiden merkitys CO<sub>2</sub>-päästöjen vähentämisessä on rajallinen (lähteestä riippuen 8-25 % verrattuna konventionaalisiin polttoaineisiin), erityisesti mikäli metaanivuotoja ei saada poistettua.

2020-luvulla osa aluskalustosta tulee IEA:n mukaan käyttämään biopolttoaineita ainakin sekoitettuna, mutta sekä biopolttoaineiden rajallinen saatavuus, että fossiilisia polttoaineita korkeampi hinta tulee rajoittamaan niiden käyttöä.

Keskkipitkällä aikavälillä biopolttoaineiden sekoittaminen konventionaalisiin polttoaineisiin saa nykyistä suuremman roolin. IEA:n arvion mukaan niiden käyttö meriliikenteessä on noin 25 miljoonaa tonnia vuonna 2040 ja 50 miljoonaa tonnia vuonna 2050 (merenkulun polttoainetarve on tällä hetkellä noin 210 miljoonaa tonnia). Biopolttoaineiden käyttöä rajoittaa kuitenkin kestävästi saatavilla olevan biomassan määrä sekä rajallisen kapasiteetin kysyntä myös muilla sektoreilla, erityisesti lentoliikenteessä.

Pitkällä aikavälillä IEA näkee kuitenkin biopolttoaineet väliaikaisena ratkaisuna. Sen mukaan biopolttoainetta käyttävät alukset tulevat elinkaarensa päähän 2050-luvulla, jonka jälkeen ne korvautuvat aluksilla, jotka on varustettu vetyä tai ammoniakkia hyödyntävillä moottoreilla ja polttoainejärjestelmillä. IEA näkee erityisesti ammoniakilla merkittävää potentiaalia merenkulun polttoaineena pitkällä aikavälillä (130 Mtoe vuonna 2070), kun taas vedyn roolin oletetaan olevan pienempi erityisesti siihen liittyvien varastointihaasteiden ja alhaisen energiatiheyden seurauksena. Nämä ovat haasteita erityisesti valtameriliikenteessä, kun taas lähimerenkulussa haasteita voidaan tiheämpien satamakäyntien takia pitää vähäisempinä.

Sähkön roolin meriliikenteen käyttövoimana IEA näkee rajallisena aina vuoteen 2070 saakka, erityisesti akkuteknologiaan liittyvien haasteiden ja korkeiden kustannusten takia. Pääosin sähköä tullaan näkemään hybridiratkaisuna polttomoottorien ohessa sekä hyvin lyhyen matkan liikenteessä. Päästöjen vähentämisen näkökulmasta sähkön hyöty nähdään erityisesti maasähkön ja satamassa olon aikaisten päästöjen vähentämisessä.

Polttoaineiden potentiaalia tarkasteltaessa on huomioitava sen koko elinkaari. Lam ym. (2020) mukaan keskeisiä tarkasteltavia tekijöitä ovat tällöin mm.

Polttoaineen tuotantotapa ja siihen tarvittavien raaka-aineiden saatavuus, tuotantoketjut ja –teknologiat, olemassa oleva tuotantokapasiteetti, nykyinen käyttö ja jakelujärjestelmät sekä vapaana oleva kapasiteetti

Polttoaineen logistiikan erityispiirteet tulee myös huomioida. Näitä ovat mm. polttoaineen ominaisuudet, varastointivaatimukset, turvallisuus ja polttoainetta koskeva sääntely, tarvittava jakeluinfrastruktuuri, käytettävyys laivalla, ml. käytössä ja varastoinnissa tarvittavat teknologiat sekä näihin liittyvät kustannukset.

Osa tarkastelussa olevista polttoaineista ei ole vielä vuonna 2021 laajassa operatiivisessa käytössä. Niiden osalta tulee lisäksi kriittisesti arvioida teknologian tämänhetkistä valmiustasoa, mahdollisia esteitä teknologian laajalla käyttöönotolle, teknologian kaupallisen käyttöönoton realistista aikataulua sekä taloudellista kannattavuutta.

Tässä raportissa eri polttoainevaihtoehtoja tarkastellaan polttoaineiden saatavuuden, polttoaineiden jakeluun liittyvän logistiikan, käytettävyyden, teknisen valmiuden sekä päästöjen perusteella.

## 5.2 Polttoaineiden saatavuus

### 5.2.1 Biopolttoaineet

Biopolttoaineet jaetaan tyypillisesti ns. ensimmäisen ja toisen sukupolven biopolttoaineisiin. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet tehdään elintarviketuotantoon kelpaavasta raaka-aineesta, kun taas toisen sukupolven biopolttoaineet tehdään tavallisesti lignoselluloosapitoisesta (selluloosaa, hemiselluloosaa ja ligniiniä sisältävää biomassaa) jätteestä. Kuljetusalan energiantarve on noin 117 exajoulea ( $10^{18}$ ), joka on noin 27 % maailman energiatarpeesta.

Merenkulun, tieliikenteen ja lentoliikenteen käyttämästä energiasta on 92-93 % on öljyperäistä. Maakaasun ja biopolttoaineiden osuus tästä on noin 3-3,5 % (DNV, 2020).

Biopolttoaineiden käyttö on toistaiseksi ollut nykyisen aluskaluston teknisten rajoitusten ja biopolttoaineiden korkean hinnan takia rajallista. Esimerkiksi IEA (2020) arvioi kuitenkin, että biopolttoaineiden käyttö meriliikenteessä tulee lisääntymään noin 50 miljoonaan tonniin vuoteen 2050 mennessä, mikä vastaisi alle neljäsosaa tämänhetkisestä (noin 220 Mtoe) meriliikenteen energian tarpeesta. Biopolttoaineiden käytön lisääntymistä tulee kuitenkin rajaamaan merkittävästi kestävä biomassan saatavuus. IEA (2020) arvioi kestävä biomassan riittävän yhteensä noin 220 miljoonan tonnin vuosittaiseen tuotantoon.

Meriliikenteen ja sitä kautta myös meriliikenteen energian tarpeen oletetaan kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi (ks. esim. UNCTAD, 2020). Se tarkoittaa, että kestävällä tavalla tuotetuilla biopolttoaineilla ei pystyittäisi korvaamaan edes nykyistä, saati kasvavaa meriliikenteen energiatarvetta. Biopolttoaineiden potentiaalia arvioitaessa tulee kuitenkin huomioida myös muiden liikennemuotojen vaikutus. Eryteisesti lentoliikenteen arvioidaan tulevaisuudessa käyttävän merkittäviä määriä biopolttoaineita, mikä vähentää niiden saatavuutta meriliikenteen käyttöön.

### 5.2.2 Sähkö

Vuonna 2020 sähkön tuotanto maailmassa oli yhteensä 25,8 biljoonaa kilowattituntia. Vuoteen 2050 mennessä maailman sähköntuotannon odotetaan lähes kaksinkertaistuvan noin 44 biljoonaan kilowattituntiin. Maailman sähköntuotannosta hieman alle 60 % (52,8 % vuonna 2020) tuotetaan fossiililla polttoaineilla. Hieman yli 10 % maailman sähköntarpeesta tuotetaan ydinvoimalla, ja hieman yli 30 % uusiutuvilla energialähteillä, joihin sisältyy myös vesivoima.

Pääosan lisääntyvästä sähköntuotannosta oletetaan tapahtuvan uusiutuvilla energiamuodoilla, joiden tuotannon arvioidaan kasvavan nykyisestä noin 7 biljoonan kWh:n

volyymistä noin 22 biljoonaan kWh:iin. Sähkön rooli meriliikenteen energiaratkaisuna ei niinkään riipu saatavuudesta, vaan teknisistä ominaisuuksista sekä jakelukapasiteetista.

### 5.2.3 Vety ja muut synteettiset polttoaineet

Vetyä voidaan hyödyntää meriliikenteen polttoaineena sekä suoraan esimerkiksi nesteytettynä, tai vaihtoehtoisesti erilaisiin vedyn kuljettajiin, kuten ammoniakkiin varastoituna. Ammoniakin tuotannossa vety yhdistetään typeen.

Myös ns. synteettisten polttoaineiden tuotantoprosessi perustuu vesielektrolyysille tai muuten tuotettuun vetyyn. Synteettisten polttoaineiden tuotannossa vety yhdistetään ns. metanisaatiossa joko hiilidioksidiin ( $\text{CO}_2$ ) tai hiilimonoksidiin ( $\text{CO}$ ). Synteettisiä polttoaineita voidaan tuottaa niin kaasumaisina (ns. Power-to-gas), kuin nestemäisinä (Power-to-liquid) (Urbansky, 2020).

Vetyä tai ammoniakkia tuotetaan pääasiassa muihin, esimerkiksi teollisuuden tarkoituksiin, kuin polttoaineeksi. Maailman vedyntuotanto on noin 70 miljoonaa tonnia vuodessa, josta noin 76 % tuotetaan maakaasusta, ja 23 % öljyn avulla. Kestävästi elektrolyysin avulla tuotetun vedyn osuus vuosittaisesta tuotannosta on vain noin 2 %. Maakaasun ja öljyn korvaaminen vedyn tuotannossa merkitsisi merkittävää sähkön kulutuksen kasvua.

IEA (2019) arvioi, että nykyisen vedyn ( $\text{H}_2$ ) tuotantomäärän valmistaminen elektrolyysillä tarkoittaisi noin 3 600 TWh sähkön kulutusta, mikä vastaa Euroopan unionin tämänhetkistä sähkön tuotantokapasiteettia. Vedyn tuotantokustannuksissa on merkittävää vaihtelua riippuen tuotantotavasta. IEA (2019) arvioi, että perinteisellä maakaasuun ja öljyyn perustuvalla tuotantotavalla kustannus on 1 USD/kg  $\text{H}_2$ . Tämä tarkoittaa sitä, että sähkön hinnan pitäisi olla 10-40 USD/MWh, jotta vedyn tuottaminen elektrolyysillä olisi kustannustehokasta perinteisiin tuotantomenetelmiin verrattuna.

Aivan kuten vetyä, myös ammoniakkia tuotetaan pääosin muihin tarkoituksiin kuin polttoaineeksi. Ammoniakkia tuotetaan maailmassa noin 200 miljoonaa tonnia vuodessa. Noin 88 % tuotannosta tapahtuu ns. Haber-Bosch –menetelmällä, jossa maakaasu reagoi höyryyn ja veteen. Vaikka ammoniakki ei itsessään sisällä hiiltä, on ammoniakin tuotanto nykyisillä tuotantotavoilla merkittävä  $\text{CO}_2$ -päästöjen lähde.

Ammoniakin käyttö vähähiilisenä polttoaineena perustuu ammoniakin tuotantoon elektrolyysin avulla. IEA (2019) toteaa myös, että vedyn muuttaminen edelleen ammoniakiksi ei ole nykyisillä polttoaineen hintatasoilla taloudellisesti kannattavaa.

Synteettisten nestemäisten polttoaineiden valmistus elektrolyysillä tuotetusta vedystä tarkoittaisi jopa 20 USD/MWh sähkön hinnalla polttoaineen tuotantokustannuksen asettumista noin 70 dollariin barreililta (noin 440 USD/tonni), jopa silloin kun hiililähteen

kustannusta ei oteta huomioon. Synteettisen kaasun tuottaminen elektrolyysin kautta kustantaisi IEA:n (2019) arvion mukaan 10-12 USD/MBtu, tai 370-440 USD/m<sup>3</sup>.

## 5.3 Käytettävyys

### 5.3.1 Biopolttoaineet

Meriliikenne on biopolttoaineiden näkökulmasta edullinen sektori, koska laivojen moottorien vaatimukset polttoaineen laadulle ovat väljemmät kuin muilla liikenteen sektoreilla, kuten tieliikenteessä, ja erityisesti lentoliikenteessä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että laivojen moottoreissa voidaan hyödyntää polttoaineita, joissa on korkeampi viskositeetti, ja joita ei ole niin pitkälle jalostettu. Näin ollen biopolttoaineita voidaan tuottaa meriliikenteelle alhaisemmin tuotantokustannuksin kuin muille sektoreille.

Käytettävyyden näkökulmasta biopolttoaineet ovat vähähiilisiä polttoaineratkaisuista lähimpänä nykyisiä polttoaineita. Merkittävän osan biopolttoaineista muodostavat biodiesel, bioetanoli ja biokaasu, jotka ovat ns. Drop in –polttoaineita, toisin sanoen ne ovat pääosin hyödynnettävissä nykyisillä moottoreilla ja polttoaineilla ilman merkittäviä konversiotarpeita.

Määritelmänsä mukaisesti niiden tulee olla varastointi- ja käyttöominaisuuksiltaan nykyisiä öljypohjaisia liikennepolttoaineita vastaavia. Näin ollen niiden pitää olla varastoitavissa, kuljetettavissa ja käytettävissä nykyisen järjestelmän ja nykyisten laitteiden kanssa. Yleisimmin käytössä oleva biopolttoaine, bioetanoli ei ole sellaisenaan käytettävissä laivojen dieselmoottoreissa, vaan se sekoitetaan muihin polttoaineisiin. Tavallinen biodiesel (FAME) sen sijaan toimii meridieseleissä, muttei muun tyyppisissä dieselmoottoreissa.

### 5.3.2 Sähkö

Sähkön käyttöä alusten käyttövoimana voidaan jakaa kahteen eri osaan. Ensimmäinen on kokonaan sähköllä toimivat alukset, joiden osalta käytettävyyden osalta tulee ratkaista haasteita niin alusten propulsioon ja moottoriteknologian, aluksen energiavarastojen, kuin alukselle energiaa toimittavan sähköverkon osalta. Toisaalta sähköä voidaan hyödyntää alusten käyttövoimana myös osana hybridiratkaisua, jossa energiaa aluksen moottoreille ja verkkoon tuotetaan edelleen dieselgeneraattorien avulla, mutta jossa aluksella on myös akkukapasiteettia tilapäistä sähköllä kulkemista varten.

Osa nykyisestä aluskalustosta on myös ns. diesel-sähkömoottoreita, joissa aluksen moottorit ovat sähkötoimisia, mutta niiden energia tuotetaan generaattoreilla. Tällaiset moottori- ja voimansiirtoratkaisut ovat tyypillisiä aluksille, joiden liikkuminen vaatii merkittäviä tehonsäätötarpeita. Tällaisia ovat esimerkiksi sellaiset alukset, jotka kulkevat säännöllisesti reittejä, joissa on erilaisia nopeusrajoituksia sekä alukset, jotka on suunniteltu jäissä kulkua varten.

Käytettävyyden näkökulmasta sähkön käytön suurimmat esteet ovat nykyisen akkukapasiteetin rajallisuus sekä sähkönjakeluinfrastruktuurin riittävyys.

### 5.3.3 Vety ja muut synteettiset polttoaineet

Käytettävyyden näkökulmasta **vety** on meriliikenteen polttoaineena vielä toistaiseksi pääosin kokeiluasteella. Vaikka vetyä ja polttokennoteknologiaa on erilaisissa kokeiluluontoisissa projekteissa testattu myös meriliikenteessä jo noin 15 vuoden ajan, on niiden laajamittainen käyttö edelleen pääosin tulevaisuutta. Vedyn käytön lisäetuina on vähäinen melu ja värähtely polttomootoreihin verrattuna. Yhdistettynä sähkömoottoriin myös tehohäviö alhainen.

Keskeisiä haasteita vedyn käytettävyydelle ovat säiliötarve sekä nesteytetyn vedyn alhainen höyrystymispiste. Vaikka vedyn energiasisältö painoyksikköä kohden on korkeampi kuin perinteisesti merenkulussa käytetyillä polttoaineilla, on sillä potentiaalisista polttoaineista alhaisin energiatiheys tilavuuden suhteen. Tämän johdosta vedyn käytöllä on polttoaineratkaisuista suurin vaikutus aluksen lastikapasiteettiin (Horvath ym. 2018).

Nesteytetyn vedyn alhainen höyrystymispiste tarkoittaa käytännössä monimutkaisempia polttoaineen säilytysjärjestelmiä kuin konventionaalisilla polttoaineilla. (Balcombe ym. 2019) Denisin ja Zincirin (2015) mukaan vedyllä on kuitenkin korkein itsesyttymispiste, mikä itsessään tekee siitä turvallisen polttoainevaihtoehdon.

Vedyn alhaisen (tilavuuteen suhteutettuna) energiatiheyden takia on arvioitu, että edullisin ratkaisu on tuottaa vetyä polttokennojen käyttöön aluksella erilaisista vedyn siirtäjistä (hydrogen carriers), kuten ammoniakista.

Ammoniakki on hyvä keino vedyn kuljettamiseen, se ei sisällä lainkaan hiiltä, ja sitä voidaan polttaa suoraan dieselmootoreissa, mutta myös vedyn lailla polttokennoissa (Bicer ja Dincer, 2018). Sitä voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä ja käyttää polttoaineena polttokennoissa tai polttomootoreissa. Ammoniakilla on suurempi tilavaatimus aluksella verrattuna useisiin muihin polttoaineisiin vetyä lukuun ottamatta, mikä voi rajoittaa sen käyttöä kaukoliikenteessä. Turvallisuus on suuri huolenaihe: sen lisäksi, että ammoniakkin vapautumisesta aiheutuu vaikutuksia veden ja ilman laatuun, aluksen sisäinen vuoto voi olla katastrofaalinen miehistön kannalta (Hansson ym. 2020).

Synteettiset polttoaineet puolestaan ovat käytettävyydessään fossiilisten vastineidensa tasolla.

## 5.4 Tekninen valmius

Liitteessä 1 on esitetty Lloydsin ja UMAS:n (2020) arvio eri polttoainevaihtoehtojen teknisestä valmiudesta niin polttoainejakelun/ bunkrauksen, säiliötekniikan kuin polttoaineen käytön, siis moottori- ja voimansiirtotekniikan osalta. Taulukossa tekniselle valmiudelle on annettu arvosana 1 ja 9 välillä riippuen siitä, missä vaiheessa polttoaine on:

- 1) Peruseriaatteet havaittu
- 2) Teknologiakonsepti muodostettu
- 3) Ensimmäinen toteutettavuuskonsepti
- 4) Ensimmäinen prototyyppi laboratorio-olosuhteissa
- 5) Prototyyppiä testataan käyttäjäympäristössä
- 6) Tuotantoa edeltävä prototyyppi valmis
- 7) Pienen volyymin pilottituote esitelty
- 8) Valmistus täysin testatulla ja validoidulla tuotteella
- 9) Tuotanto ja tuote täydessä toiminnassa

**Taulukko 10 Vaihtoehtoisten polttoaineiden teknisiä ominaisuuksia (Nair, 2016)**

Ominaisuus	HFO	MDO	LNG	RME	LBG	MeOH	EtOH
Fyysinen olomuoto	Neste	Neste	Kaasu	Neste	Kaasu	Neste	Neste
Tiheys (kg/m <sup>3</sup> )	989	890	448,4	890	448,4	795,5	792
Leimahduspiste °C	>60	>60	-175	149	-175	12	17
Kiehumispiste °C	350-650	175	-161	369	-162	65	78
Sekoitettavissa	Ei	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä	Kyllä
Moottorityyppi	Diesel	Diesel	Dual fuel/otto	Diesel	Dual fuel/otto	Dual fuel	Dual fuel
Säiliötyyppi	Teräs	Kryo-geeninen	Teräs	Teräs	Kryo-geeninen	Erikois	Erikois

#### 5.4.1 Biopolttoaineet

Teknisen valmiutensa osalta biopolttoaineita voidaan pitää lähimpinä korvaajina tällä hetkellä pääroolissa oleville öljypohjaisille polttoaineille. Mm. Balcombe ym. (2019) toteavat, että ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet ovat laajasti saatavilla, ja myös toisen sukupolven biopolttoaineiden tuotantoa ollaan nopeasti laajentamassa.

Biopolttoaineita voidaankin hyödyntää laajasti jo nykyisillä aluksilla käytössä olevalla moottoritekniikalla. Käytännössä biopolttoaineista helpoimmin hyödynnettäviä ovat nestemäiset biopolttoaineet, jotka toimivat joko sellaisenaan tai öljypohjaisiin polttoaineisiin sekoitettuna puristusytteisissä laivamoottoreissa.

Kaasupohjaiset biopolttoaineet puolestaan vaativat kipinäsytytteen moottorin, joten mahdollisuudet niiden tekniseen hyödyntämiseen nykyisessä aluskalustossa ovat

rajallisemmat. Tilanne on kuitenkin vähitellen paranemassa, sillä kaasutoimiset alukset ovat yleistymässä maailman kauppalaivastossa. Vaikka kaasukäyttöisten alusten osuus maailman kauppalaivastosta oli vuonna 2020 vain noin 3 % (ks. esim. Solakivi ym. 2020a), painottuu osuus erityisesti nuorempaan aluskalustoon. Näin ollen myös kaasupohjaisten biopolttoaineiden hyödyntäminen merenkulussa on tulevaisuudessa teknisesti helpompaa. (Vrt. Taukukko 10)

#### 5.4.2 Sähkö

Sähköä voidaan hyödyntää meriliikenteen käyttövoimaratkaisuna monella eri tavalla, joista osa on jo laajasti käytössä, ja osa joko hyvin rajallisessa käytössä tai vasta testivaiheessa. Anwar ym. (2020) mukaan sähkön hyödyntämisessä meriliikenteessä tulee teknisten edellytysten näkökulmasta huomioida seikkoja niin propulsioon ja voimansiirron, sähköenergian varastoinnin sekä sähköverkon näkökulmasta.

Maailman kauppalaivastosta hieman yli prosentissa oli vuonna 2020 asennettuna ns. diesel-sähkö –järjestelmä, joissa aluksen kulku tapahtuu sähkömoottoreilla, mutta sähkö aluksen moottoreille tuotetaan dieselgeneraattoreilla (CRSL, 2020). Vaikka diesel-sähkö –järjestelmät ovatkin pienemmän tehohäviön takia pelkkiä dieselmoottoreita energiatehokkaampia, on Näiden järjestelmien yleistymisen haasteena kuitenkin nykyisellä öljypohjaisten polttoaineiden hintatasolla järjestelmän korkeampi hinta. Em. järjestelmiä onkin pääasiassa asennettu aluksiin, joiden operointiprofiili on sellainen, että se vaatii esimerkiksi merkittäviä vaihteluita aluksen kulkunopeuteen. Teknisessä mielessä sähkömoottorit ja sähkön hyödyntäminen ovat kuitenkin jo mahdollisia.

Mikäli sähköä tarkastellaan alusten polttoainevaihtoehtona vähähiilisuuden näkökulmasta, ei kyseeseen kuitenkaan tule järjestelmät, joissa sähkö moottoreille tuotetaan edelleen fossiilisilla polttoaineilla. Uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun sähkön käyttö aluksilla puolestaan edellyttää sähköenergian toimittamista ja varastointia alukselle. Tällä hetkellä sähkön varastointi tapahtuu akustojen avulla.

Tieliikenteessä, erityisesti henkilöliikenteessä sähköautot ovat yleistymässä, mutta niidenkin osalta käytettävyyttä rajoittaa nykyisten akkujen rajallinen kapasiteetti ja sen seurauksena ajoneuvojen rajallinen toimintasäde. Toinen käyttöä rajoittava tekijä on nykyisin käytössä oleva latausteho, joka edellyttää pitkiä latausaikoja. Meriliikenteessä nämä ongelmat korostuvat, koska liikuteltavat massat ovat suuria ja kuljetut matkat ovat merkittävästi pidempiä kuin tieliikenteessä.

Viime aikoina (ks. luku 5.2) on meriliikenteeseen alkanut tulla ns. hybridiratkaisuja, joissa aluksen pääasiallinen käyttövoima on edelleen polttomoottori, mutta alus kykenee kulkemaan lyhyitä aikoja myös pelkän akkuihin varastoidun sähköenergian voimalla. Nykyisillä akku- ja latauskapasiteeteilla pelkästään sähköllä kulkevat alukset ovat kuitenkin

harvinaisia, ja niiden toimintasäde on hyvin rajallinen. Kokonaan sähköllä kulkevat alukset ovatkin tähän mennessä olleet pääasiassa lauttoja, joiden kulkema matka on lyhyt, ja joita voidaan ladata usein.

Suomessa ensimmäinen sähkökäyttöinen lautta, Suomen Lauttaliikenne Oy:n (FinFerries) L/A Elektra otettiin käyttöön vuonna 2019 Paraisten ja Nauvon väliseen liikenteeseen.

Pelkästään sähkö- ja akkuteknologiaan perustuva merenkulku rajoittuu liikenteeseen, jossa välimatkat ovat lyhyitä, ja liikenne mahdollistaa pitkät latausajat.

Suomen meri- ja sisävesiliikenteessä on vuosittain noin 37 000 aluskäyntiä, eli hieman yli 100 aluskäyntiä päivässä. Suurimpien Suomessa käyvien alusten koneteho on yli 100 000 kW, ja sisävesilläkin tyypillisesti noin 2 000 kW. Näin tehokkaiden alusten lataaminen edellyttäisi sähköverkolta aivan toisenlaista kapasiteettia kuin on tällä hetkellä käytössä.

Sähkön käyttö pitkän matkan liikenteessä edellyttäisi akku- ja latausteknologian merkittävää kehitystä sekä suuria investointeja sähkönjakelun infrastruktuuriin.

### 5.4.3 Vety ja muut synteettiset polttoaineet

Suurin potentiaali vedyn hyödyntämisessä meriliikenteen polttoaineena on tulevaisuudessa. Vaikka vetyä onkin jo hyödynnetty liikennepolttoaineena erityisesti tieliikenteessä, IEA:n (2020) mukaan vedyn rooli meriliikenteessä rajoittuu vuoden 2021 alussa vielä yksittäisiin testiprojekteihin, tai vetyteknologian rajalliseen hyödyntämiseen täydentävänä energiaratkaisuna aluksilla.

Vedyn ja ammoniakkin kaltaisten vedyn kuljettajien rooli liikenteen käyttövoimana on vielä erittäin rajallinen. Niiden houkuttelevuus voi kasvaa käynnissä olevan teknologisen kehityksen ja merenkulun muille polttoaineille asetettavien GHG-päästötavoitteiden takia. Vetyä voidaan hyödyntää puhtaan vedyn lisäksi myös muuttamalla sitä muiksi polttoaineiksi. Näitä ovat mm. synteettinen metaani ja muut synteettiset polttoaineet sekä ammoniakki.

Vedyn ja ammoniakkin osalta on kuitenkin useita teknisiä kysymyksiä ratkaistavana. Vaikka vedyn energiasisältö painoyksikköä kohden on perinteisiä polttoaineita suurempi, sen alhainen höyrytymispiste edellyttää kallista ja tilaa vievää varastointia aluksella.

Ammoniakkia voi käyttää polttoaineena myös nykyisen tyyppisissä polttomoottoreissa, mutta sen kunnollinen palaminen vaatii nykyistä tehokkaampia kipinäsytytysjärjestelmiä sekä muita teknisiä muutoksia moottoreihin (Brown, 2018). Hansson ym. (2020) mukaan tähänastisissa kokeiluissa ammoniakkia on sekoitettu muihin polttoaineisiin, jossa ammoniakkin osuus on ollut varsin alhainen. Ongelmia on ollut sekä päästöjen että järjestelmän tehokkuuden kanssa.

Erytisesti pitkällä aikavälillä monet kansainväliset asiantuntijaorganisaatiot, kuten IEA (2020) ja DNV GL (2020), ovat meriliikennettä koskevissa skenaarioissaan korostaneet vedyn ja ammoniakkin potentiaalia tulevaisuuden polttoaineena.

Vedyn ja ammoniakkin haasteet koskevat myös niiden valmistusta, kuljettamista ja varastointia. Valmistuksen merkittävin tekninen haaste on vedyn tuottaminen päästöttömästi tai vähähiilisesti.

Pääosa maailman vedyn ja ammoniakkin tuotannosta perustuu hiileen tai maakaasuun, jolloin sen CO<sub>2</sub> -päästöt polttoaineena ovat merkittävät. Vetyä voidaan tuottaa myös (vesi)elektrolyysillä, mutta haasteena on tuotannon kustannustaso, erityisesti uusiutuvilla energiamuodoilla, joilla vedyn tuotantokustannus on merkittävästi perinteistä hiili- ja kaasutuotantoa korkeampi.

Saman tyyppinen kustannushaaste koskee myös muita synteettisiä polttoaineita. Polttoaineiden tuotannossa on kaksi keskeistä ratkaistavaa kysymystä: raaka-aineiden saatavuus tuotannon lähialueilla, sekä vedyn tuotannossa tarvittavan energian hinta. Tämä tarkoittaa synteettisten polttoaineiden tapauksessa sitä, että teollisen tuotannon kannattavuuden osalta pitää varmistaa sekä kustannustehokkaan vedyn, että hiilidioksidin tai hiilimonoksidin kustannustehokas saatavuus tuotantoprosessiin.

## 5.5 Päästöt

Taulukko 11 esittää eräiden käytössä tai testikäytössä olevien polttoaineiden energiasisältöä ja päästöjä. Polttoaineen päästöjen osalta olennaista on tarkastella sekä käytön aikaisia päästöjä, että polttoaineen tuotantoon ja muuhun elinkaareen liittyviä päästöjä. Tässä alaluvussa käsitellään tarkastelussa olevien vähähiilisten polttoaineiden päästöjä molemmista näkökulmista.

**Taulukko 11 Vaihtoehtoisten polttoaineiden energiasisältö ja päästöt (Nair, 2016)**

Ominaisuus	HFO	MDO	LNG	RME	LBG	MeOH	EtOH
Energiatiheys (MJ/kg)	40,4	42,7	48,2	37,0	48,2	20,0	28,0
Säiliökapasiteetin tarve (m <sup>3</sup> /TJ)	25,0	26,3	46,3	30,4	46,3	62,9	45,1
Polttoainetarve (MT/MJ)	24,8	23,4	20,7	27,0	20,7	50	35,7
Päästökerroin	3,114	3,206	2,750	1,920	1,012	0,340	0,678
Päästöt tuotettua energiayksikköä kohti (MJ/TJ)	83,7	75,0	62,3	51,9	21,0	17,0	24,2

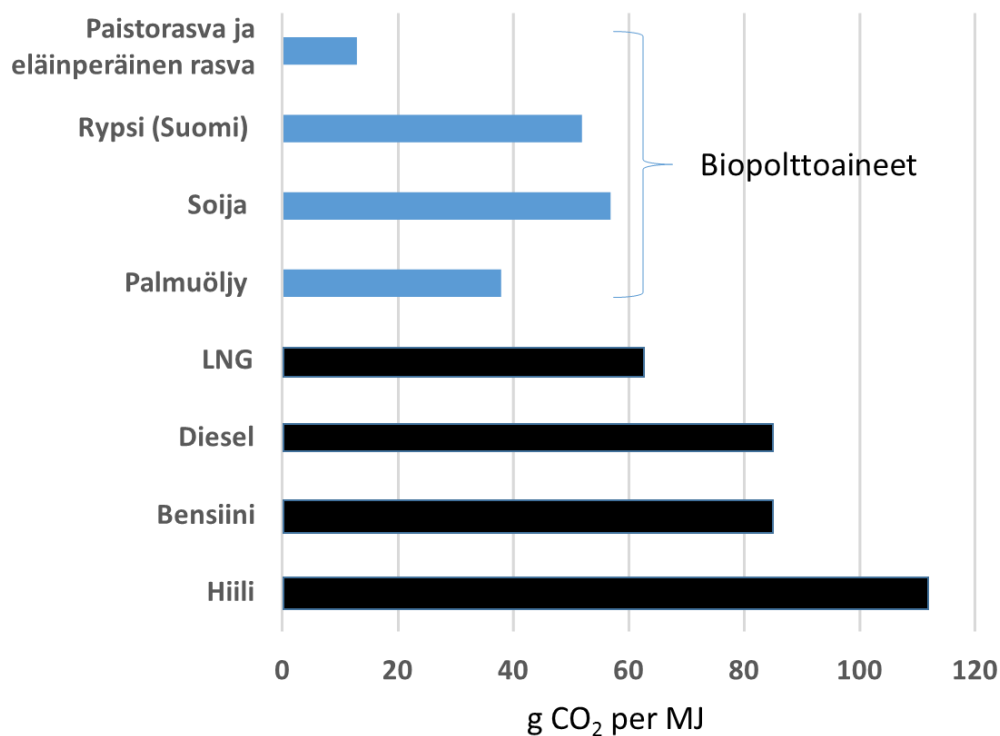
### 5.5.1 Biopolttoaineet

Biopolttoaineet sisältävät hiiltä aivan kuten fossiiliset polttoaineet. Niiden vaikutus kasvihuonekaasupäästöihin perustuu siihen, että fossiilisesta sisällöstään huolimatta ne ovat

hiilineutraaleja. Tämä liittyy siihen, mistä biopolttoaineet on valmistettu. Polttoainetta käytettäessä niistä vapautuu ilmakehään hiilidioksidia. Niiden raaka-aineena käytetään kuitenkin sellaista biomassaa, joka kasvaessaan on sitonut hiiltä ilmakehästä (Hanaki ja Portugal-Pereira, 2018).

Biomassan kasvatuksen vaikutukset hiilidioksidipäästöihin voivat kuitenkin vaihdella merkittävästi. Ensimmäisen sukupolven biopolttoaineet (ks. esim. Mohr ja Rahman, 2013) tuotetaan määritelmänsä mukaisesti elintarvikkeeksi tarkoitettusta biomassasta. Näin ollen niiden tuotanto pahimmillaan vie tuotantoalaa elintarviketuotannolta, mikä kasvavan elintarvikesyntynän oloissa johtaa uuden tuotantoalan raivaamiseen elintarvike- ja biopolttoainetuotannolle.

**Kuvio 3 Biodieselin CO<sub>2</sub> päästöt verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin (aineistolähde Iso-Britannian hallitus, 2020)**



Eryisesti palmuöljyn tuotannossa on raportoitu sademetsien hakkaamisesta palmuöljytuotannon tieltä. Kuvio 3 esittää biodieselin CO<sub>2</sub>-päästöjä verrattuna tavanomaisiin fossiilisiin polttoaineisiin. Luvut perustuvat olettamukseen, että biodiesel on tuotettu siten, ettei se ole johtanut maankäytön muutoksiin.

Kuviosta voidaan todeta, että biodiesel on tuotantolähteestä riippumatta päästövaikutuksiltaan parempi kuin perinteiset polttoaineet. Eri raaka-ainelähteillä on kuitenkin merkittäviä vaikutuksia biodieselin päästöjen tasoon. Siinä missä soijapohjainen (57

g CO<sub>2</sub> per MJ) ja rypsipohjainen (52 g) biopolttoaine ovat päästöiltään lähes samalla tasolla kuin LNG, ovat palmuöljystä tuotetun biodieselin päästöt 40 % alhaisemmat ja paistorasvasta tuotetun biodieselin päästöt jopa 80 % alhaisemmat kuin LNG:n.

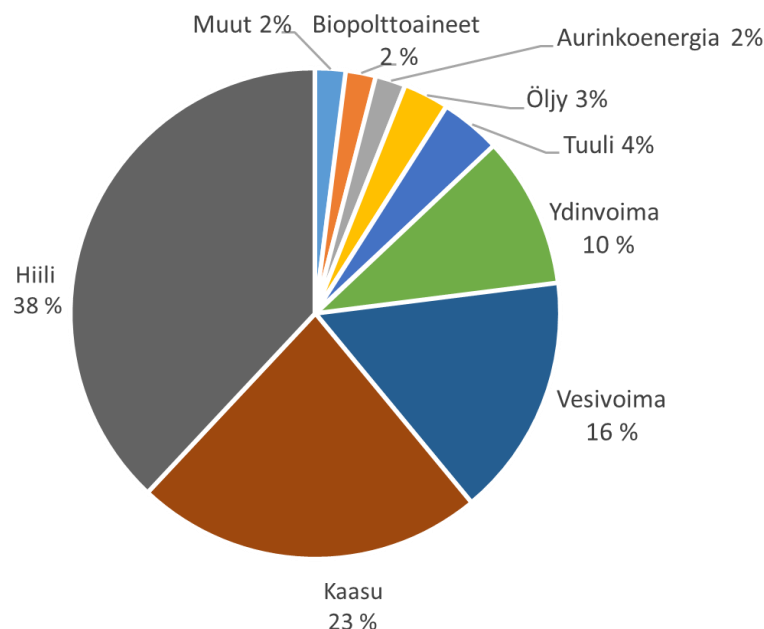
Mikäli edellisiä vertaillaan dieseliin, ero on vielä suurempi. Palmuöljyllä tuotetun biodieselin päästöt ovat jopa 56 % ja paistorasvasta tuotetun biodieselin päästöt jopa 85 % alhaisemmat kuin fossiilisen dieselin.

Biodieselin ja muiden biopolttoaineiden osalta pitää kuitenkin huomioida, että kestävästi tuotetun biomassan määrä on rajallinen. Mikäli biopolttoaineiden tuotanto johtaa maankäytön muutoksiin ja sitä kautta esimerkiksi hiilinielujen pienenemiseen, niiden vaikutus CO<sub>2</sub> –päästöihin vähenee merkittävästi. Lisäksi mahdollisilla maankäytön muutoksilla on vaikutuksia biodiversiteettiin. Näin ollen biopolttoaineet ovat väistämättä ainoastaan osa ratkaisua päästöjen vähentämisessä (IEA 2020, DNV 2020).

### 5.5.2 Sähkö

Sähkön vaikutus päästöihin vaihtelee merkittävästi sen perusteella, millä sähkö on tuotettu. Kansainvälisesti sähkön haasteena suhteessa kasvihuonekaasupäästöihin on, että merkittävä osa maailman sähköntuotannosta perustuu edelleen fossiilisiin polttoaineisiin.

**Kuvio 4 Maailman sähkön tuotanto eri tuotantotavoilla vuonna 2017 (IEA, 2019)**



Hiilen osuus maailman sähköntuotannosta oli IEA:n (2019) mukaan noin 38 % vuonna 2017. Lisäksi sähköstä tuotettiin kaasun avulla 23 % ja öljyn avulla 3 %. Yhteensä noin 2/3 maailman sähkön tuotannosta perustuu siis edelleen fossiilisiin polttoaineisiin (Kuvio 4).

Taulukko 11 esittää IPCC:n käyttämät arviot eri sähkön tuotantotapojen hiilidioksidipäästöistä. Siinä missä vesivoiman CO<sub>2</sub>-päästöt ovat keskimäärin noin 4 g, tuulivoiman 12 g ja aurinkoenergian 22-46 g kilowattituntia kohti, ovat ne kaasulla tuotettuna 469 g ja hiilellä tuotettuna 1 001 g per kWh<sub>e</sub>. Sähkön tuotantotapa vaikuttaa siis erittäin paljon siihen, miten vähähiilinen polttoaineratkaisu sähköä tosiasiaassa on.

Taulukko 12 Sähköntuotannon hiilidioksidipäästöt per kilowattituntiekvivalentti (Moomaw ym. 2011) eri sähkön tuotantotavoilla

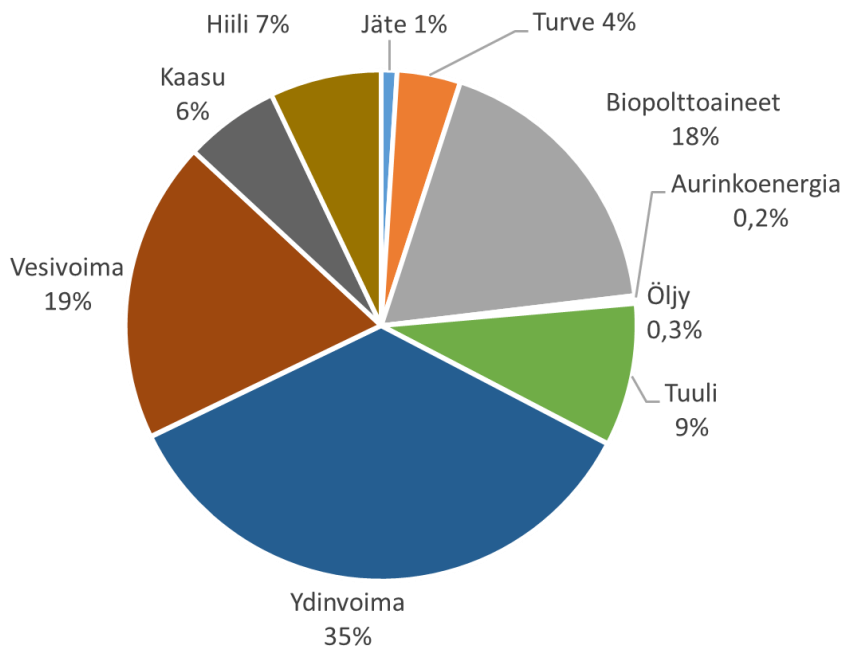
Teknologia	gCO <sub>2</sub> /kWh <sub>e</sub>
Vesivoima	4
Tuulivoima	12
Ydinvoima	16
Biomassa	18
Aurinkoenergia (terminen)	22
Geoterminen energia	45
Aurinkoenergia (polypii)	46
Kaasu	469
Hiili	1 001

Kuvio 5 tarkastelee sähkön tuotantoa erityisesti suomalaisesta näkökulmasta. Eri tuotantotapojen osuudet Suomen sähkön tuotannosta ovat merkittävästi erilaiset kuin kansainväliset keskiarvot. Suomessa jopa 35 % sähköstä tuotetaan ydinvoimalla. Seuraavaksi suurimmat osuudet Suomen sähkön tuotannosta tuotetaan vesivoimalla (19 %), ja biopolttoaineilla (18 %). Ainoastaan 17 % Suomen sähköntuotannosta perustuu uusiutumattomiin fossiilisiin polttoaineisiin (ml. turve).

Suomen sähkön tuotannosta noin 4 % perustuu turpeeseen, jolla on merkittävät suorat ja epäsuorat päästövaikutukset. Myös turve luokitellaan uusiutumattomaksi fossiiliseksi polttoaineeksi. Suomen turvetuotanto tulee nykyisillä päätöksillä vähenemään nopeasti.

Yhteenvetona voi todeta, että koska Suomen sähköntuotanto on jo nykyisellään suurelta osin hiilidioksidineutraalia, on sähkön käyttö voimanlähteenä suomalaisella tuotannolla arvioituna huomattavasti vähäpäästöisempää kuin kansainvälisesti arvioituna.

**Kuvio 5 Sähkön tuotanto Suomessa eri tuotantotavoilla vuonna 2019 (Energiateollisuus, 2020)**



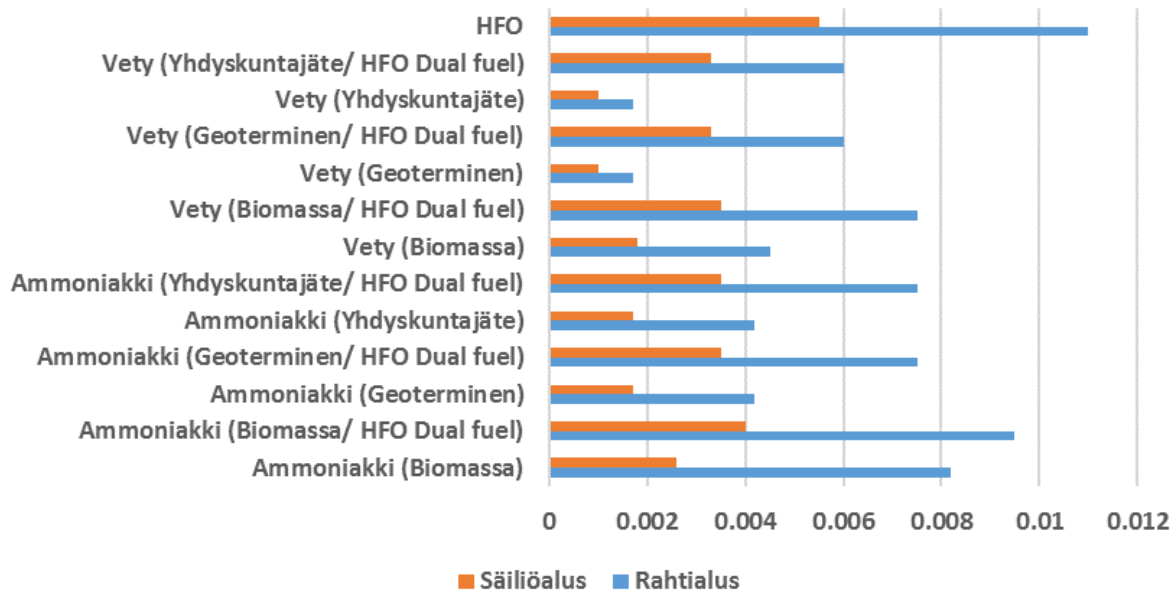
Tulevaisuutta arvioitaessa on niin kansainvälisesti, mutta erityisesti kansallisesti syytä huomioida, että trendi näyttäisi olevan kohti vähähiilisempää sähkön tuotantoa. Uusiutuvien energiamuotojen osuuden odotetaan kasvavan tulevaisuudessa merkittävästi, samalla kun uusiutumattomien fossiilisten polttoaineiden osuus sähköntuotannosta tulee laskemaan.

### 5.5.3 Vedyn kuljettajat

Yleisin tapa vedyn saamiseksi on maakaasu, mutta sitä voidaan saada myös biomassasta ja elektrolyysillä. Vedyn käytön haittana on sen pieni varastointitiheys. Koska sitä voidaan valmistaa vedyn siirtäjistä (hydrogen carriers), aluksella tuotanto näyttää olevan halvempaa ja tehokkaampaa kuin vedyn tuotanto muualla.

Polttokennossa voidaan käyttää uusiutuvaa vetyä, joka on tuotettu vesielektrolyysillä eli sähkökemiallisella prosessilla, jossa veden vety ja happi erotetaan sähkökäyttöisessä elektrolyysilaitteessa (Percic ym.2020). Polttokennojen vähähiilisyys riippuu kuitenkin vedyn tuotantomenetelmien päästöistä. Vedyn käytön lisäetuna on vähäinen melu ja värähtely polttomoottoreihin verrattuna, ja yhdistettynä sähkömoottoriin sen tehohäviö on alhainen. Vedyn energiatiheys on alhainen, ja sen säiliötilan tarve on polttoaineista suurin, mikä rajoittaa lastitilaa (Balcombe ym.2019). Vedyllä on polttoaineista korkein itsesyttymispiste, mikä tekee siitä polttoaineista turvallisimman (Denis & Zincir, 2015)

**Kuvio 6 Ammoniakin ja vedyn kasvihuonekaasupäästöt eri tuotantotavoilla (kg CO<sub>2</sub> eq. /tkm) (Bicer ja Dincer, 2018)**



Vedyllä ei ole toiminnallisia CO<sub>2</sub>-päästöjä, mutta sitä tuotetaan nyt pääosin fossiilisista polttoaineista, joten sen elinkaaren CO<sub>2</sub>-päästöt ovat huomattavasti perinteisiä polttoaineita suuremmat. Elinkaaripäästöt huomioiden vedyn edut toteutuvat vain, jos sen raaka-aineiden ja syöttöenergian CO<sub>2</sub>-päästöt saadaan alhaisiksi esimerkiksi uusiutuvalla energialla, kuten käyttämällä aurinko- tai tuulivoimaa elektrolyysiin (Gilbert ym. 2018; ks. myös Kuvio 6).

Ammoniakki on hiilivapaa yhdiste, jota voidaan tuottaa uusiutuvilla energialähteillä ja jota voidaan käyttää polttoaineena polttokennoissa tai polttomoottoreissa. Ammoniakilla on suurempi tilavaatimus aluksella verrattuna useisiin muihin polttoaineisiin, vetyä lukuun ottamatta. Tämä voi rajoittaa ammoniakkin käyttöä kaukoliikenteessä. Tähän mennessä ammoniakkia käyttävien moottoreiden testaaminen on ollut rajallista, ja niissä on käytetty merkittäviä määriä toissijaista polttoainetta. Turvallisuus on suuri huolenaihe harkittaessa ammoniakkia polttoaineena. Sen lisäksi, että ammoniakkin vapautumisesta aiheutuu vaikutuksia veden ja ilman laatuun, aluksen sisäinen vuoto voi myös olla katastrofaalinen miehistön kannalta (Hansson ym. 2020)

Synteettiset polttoaineet sisältävät saman verran hiiltä kuin fossiiliset polttoaineet. Niiden etuna verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin on, että niiden sisältämä hiili on sidottu niiden tuotantoprosessin aikana ilmakehästä tai muusta lähteestä. Näin ollen synteettiset polttoaineet ovat elinkaaripäästöjen osalta hiilineutraaleja, mikäli niiden tuotannossa käytetty energia on tuotettu uusiutuvilla energialähteillä (Brynnolf et al. 2018).

## 5.6 Biopolttoaineet

Ensimmäisen sukupolven polttoaineet jo saatavilla, Vähäiset muutokset nykyisiin moottoreihin, rajoitettu saatavuus jos kriteerinä pidetään kestäviä raaka-aine/materiaalilähteitä, kaasumuotoiset biopolttoaineet vaativat ottomoottorin (spark-ignition engines), nykyinen hintataso merkittävästi korkeampi kuin perinteisillä polttoaineilla, raaka-ainelähteiden monimuotoisuuden takia vähäpäästöisyyden varmistaminen haasteellista (Balcombe ym. 2019)

Haasteena kilpailu muiden energiaa tarvitsevien sektoreiden kanssa, mahdollisen vuodon sattuessa biodiesel hajoaa nopeammin, ja on vähemmän myrkyllistä luonnolle, biodiesel saattaa lisätä polttoaineensuodattimien huoltotarvetta, sekoitteiden stabiilius varastoitaessa saattaa olla haaste. Maailman kauppalaivaston vuotuinen energiatarve noin 80-kertainen nykyiseen biopolttoaineiden tuotantoon verrattuna, tätä ei ole mahdollista täyttää ensimmäisen eikä toisen sukupolven biopolttoaineilla (Bengtsson ym. 2012)

Biopolttoaineiden päästövähennyspotentiaali oli Gilbert ym. 2018) tarkastelemista vaihtoehdoista suurin, pois lukien nestemäinen vety. Biopolttoaineiden päästövähennyspotentiaali riippuu kuitenkin voimakkaasti siitä, miten ja mistä raaka-aineista polttoaine on tuotettu. Vaikutus on suurin, mikäli polttoaineeseen käytettävä biomassa on sitonut ilmakehästä sellaista hiilidioksidia, jota ei muuten olisi sidottu. Biopolttoaineilla voi kuitenkin olla merkittäviä vaikutuksia maankäyttöön ja sitä kautta siihen, kuinka kestävästi polttoainetta tuotetaan. (Gilbert ym. 2018)

Typipäästöjen osalta biopolttoaineilla sama ongelma kuin konventionaalisilla polttoaineilla. Jopa ideaaliolosuhteissa CO<sub>2</sub>-päästövähennykset ovat rajalliset, poikkeuksena Bio-LNG, joiden käytöllä on mahdollista vähentää päästöjä merkittävästi. Kasvihuonevaikutuksen kannalta olennaista on kuitenkin etanolipäästöjen hillitseminen biokaasun tuotannon ylävirrassa sekä kaasun hyödyntämisessä. (Gilbert ym. 2018)

## 5.7 Muita käytössä olevia polttoaineita

### 5.7.1 LNG

Vuonna 2020 noin 3 prosenttia maailman aluskalustosta käyttää polttoaineenaan nesteytettyä maakaasua, eli LNG:tä (ks. esim. Solakivi ym. 2020a). LNG:llä voidaan saavuttaa teoriassa jopa 20-30 % päästövähennys verrattuna tavanomaisiin polttoaineisiin, tosin metaanivuodot alentavat sen todellista potentiaalia noin 15 prosenttiin (Balcombe ym. 2019) LNG:llä on polttoaineista kaikkein pienin sallittava vaihtelu (4-16 %) sekoitussuhteessa ja se vaatii tuplasti säiliötilaa HFO:iin verrattuna.

LNG-alusten polttoainejärjestelmä on erilainen kuin nestemäisiä polttoaineita käyttävien. Alukset tarvitsevat erikoissuunniteltuja säiliöitä, kaasun tuuletustilaa, kaksiseinäiset kaasuputket, suojatut bunkrausasemat, päämoottorin erottamisen konehuoneesta seinillä ja

kaasuturvallisen konetilan (Gumpel, 2012). Metanoli- ja etanolipolttoaineella varustetuissa aluksissa on myös muutoksia pääkoneissa. (Denis ja Zincir, 2015)

Eräs LNG-vaihtoehto on uusiutuvalla sähköenergialla tuotettu synteettinen maakaasu, jonka päästöt ovat noin 2 % tavalliseen maakaasuun verrattuna, pääosin tuotannossa vapautuvien metaanipäästöjen takia. (Horvath ym. 2019)

### 5.7.2 Metanoli

Metanoli vähentää CO<sub>2</sub> -päästöjä noin 25 % verrattuna konventionaalisiin polttoaineisiin. Metanolin etuna on, että sitä voidaan tuottaa monella eri tavalla. Samalla pitää kuitenkin huomioida, että tuotantotavasta riippuen metanolin päästöt vaihtelevat merkittävästi. Esimerkiksi kaasusta tuotettuna metanolin päästöt ovat 10 % korkeammat kuin HFO:n tai MDO:n. (Balcombe ym. 2019)

Metanoli- ja etanolipolttoainejärjestelmät tarvitsevat lisää polttoainesäiliöitä tai aluksen painolastisäiliöiden muuntamista polttoainesäiliöiksi. Siirtopumppujen ja korkeapainepumppujen erillisiin huoneisiin tarvitaan tilaa (Westling, 2013). Kaksiseinäisiä putkia tarvitaan päämoottorin polttoaineen toimittamiseen (MAN, 2015; Westling, 2013). Polttoaineen syöttöön sylintereihin tarvitaan ylimääräisiä polttoainesuuttimia ja polttoainepumppuja (MAN, 2015; Haraldson, 2014). (Denis & Zincir, 2015)

Metanolin potentiaali polttoaineena on ainakin nykyisillä tuotantotavoilla rajallinen. Sen ainoana etuna LNG:een verrattuna voidaan pitää sitä, että sillä voidaan helposti korvata muita polttoaineita ilman teknisiä muutoksia moottoreissa (ns. drop in fuel). Sen elinkaaren CO<sub>2</sub>-päästöt ovat kuitenkin merkittävät. Mikäli metanolia tuotetaan biomassasta, sen elinkaaripäästöt ovat kuitenkin alhaisemmat. (Gilbert ym. 2018)

Metanoli on nestemäisen tilansa vuoksi hyvin samanlainen kuin perinteiset meriliikenteen polttoaineet. Tästä syystä sitä voidaan käyttää nykyisessä dieselinfraktuurissa pienillä muutoksilla, jotka liittyvät sen alhaisen leimahduslämpötilan (11 °C) ongelmaan, joka voidaan voittaa käyttämällä kaksiseinäistä rakennetta. Sen hiilipitoisuus on 38 %, mikä tekee siitä houkuttelevan käytettäväksi ympäristönsuojelumääräysten noudattamiseksi. Vertailun vuoksi dieselin hiilipitoisuus on noin 87 %. (Percic ym. 2018)

## 6 Vähähiilisten polttoaineiden SWOT –analyysi

Tarkastellut vähähiiliset polttoaineratkaisut esitetään ns. SWOT-analyysin avulla niiden vahvuuksien, heikkouksien, mahdollisuuksiin ja uhkatekijöiden osalta (Taulukko 13).

Merenkulkua on monenlaista, ja osa taulukossa mainituista tekijöistä on merkittäviä jollekin liikennetyypille ja vähemmän merkittäviä jollekin toiselle. Merenkulun tulevat energiaratkaisut tulevat ainakin osittain eroamaan toisistaan myös liikenteen tyyppin mukaan. Eri vaihtoehtojen vahvuudet ja heikkoudet riippuvat myös tarkastelun aikajänteestä.

Vähähiilisiä käyttövoimia, kuten biopolttoaineita, on jo meriliikenteen käytössä, ja osa on vielä testivaiheessa. Käytettävyyden ja teknisen valmiuden kannalta helpoin siirtymä on kohti biopolttoaineita. Tästä syystä esimerkiksi IEA (2020) arvioi biopolttoaineiden merkityksen merenkulun vähähiilisenä polttoaineratkaisuna kasvavan erityisesti lyhyellä aikavälillä. Niin nestemäisiä kuin kaasumaisia biopolttoaineita voidaan hyödyntää nykyisellä aluskalustolla ja pääosassa nykyisin käytössä olevaa moottoritekniologiaa.

Biopolttoaineet ovat toistaiseksi fossiilisia polttoaineita huomattavasti kalliimpia. Merenkulun kiristyvän ympäristösääntelyn vaikutuksesta (ks. esim. Solakivi ym. 2020b) biopolttoaineiden, samoin kuin muiden vaihtoehtojen ja vähähiilisten polttoaineiden suhteellinen kustannuskilpailukyky tulee tulevaisuudessa paranemaan. Niiden yleistymisen esteenä on kuitenkin kestävästi tuotetun biomassan rajallinen saatavuus, joka parhaassakin tapauksessa riittää tyydyttämään korkeintaan murto-osan merenkulun energiatarpeesta.

Biopolttoaineiden osalta uhkatekijäksi voi nostaa lisäksi merenkulun ulkopuolisia asioita. Eräs näistä liittyy biopolttoaineiden tuotantotapoihin, sillä ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden tuotannolla on ollut haitallinen vaikutus maankäyttöön. Osittain biopolttoaineita varten on raivattu metsäalaa palmuöljytuotantoon esim. Indonesiassa, Malesiassa ja Brasiliassa, joissa biopolttoaineiden tuotanto on osittain syrjäyttänyt elintarviketuotantoa. Tämä ei ole biodiversiteetin, hiilinielujen tai sosiaalisen kestävyysnäkökulmasta toivottavaa, josta erityisesti palmuöljytuotantoa on kritisoitu voimakkaasti. Nämä kysymykset tulevat rajoittamaan biopolttoaineiden tuotantopotentiaalia.

Vaikka biopolttoaineiden osuus meriliikenteen polttoaineena todennäköisesti kasvaa ovat lyhyellä aikavälillä, ohjaa niiden rajallinen saatavuus kohti muita käyttövoimaratkaisuja keskipitkällä ja pitkällä aikavälillä.

Myös sähkö merenkulun käyttövoimana on jo todellisuutta. Vaikka pääosa maailman kauppalaivastosta edelleen hyödyntää fossiilisia polttoaineita, on erilaisten diesel-sähkö- ja hybridiratkaisujen määrä ollut kasvussa, erityisesti sellaisessa liikenteessä, joka edellyttää aluksen moottoreilta ja voimansiirroilta sopeutumiskykyä eri nopeuksiin.

Alusten pääasiallisena voimanlähteenä sähkömoottorit ovat edelleen harvinaisia, ja niitä on käytössä lähinnä lyhyen matkan matkustajaliikenteessä. Sähkötoimisten alusten suurin

haaste on sähkön varastointi aluksella sekä huomattavan pitkät latausajat. Nykyisellä akkuteknologialla ei pystytä säilömään merenkulun edellyttämiin pitkiin toimintasäteisiin riittävää energiamäärää. Akkukäyttöiset alukset tulevatkin todennäköisesti rajoittumaan sellaiseen liikenteeseen, jossa latauspaikkojen välimatkat ovat verrattain lyhyitä, ja alusten kuljettamat massat ja siihen tarvittava teho ovat suhteellisen pienet.

Pelkällä sähköenergialla toimivien alusten haasteena on myös lataus- ja sähkönsiirtoinfrastruktuurin riittävyys sekä siihen tarvittavat investoinnit. Laivojen tehon tarve on huomattavan suuri. Tämä korostuu erityisesti talvimerenkulussa, jossa jäissä kulku edellyttää aluksilta suurempia konetehoja sekä hetkittäin suurta tehon tarvetta.

Nykyisellä akkuteknologialla tulisi latausmahdollisuuksia ja riittävä sähkönsiirron infrastruktuuri löytyä useissa kohteissa. Juuri näistä syistä myös IEA (2020) arvioi ladattavien sähköalusten roolin alusliikenteessä jäävän rajalliseksi.

Sähkön potentiaalia arvioitaessa tulee myös huomioida sähkön tuotannon päästöt. Vaikka sähkö ei tuotakaan paikallispäästöjä, sen elinkaaren aikaiset CO<sub>2</sub>-päästöt voivat olla varsin suuret. Noin 2/3 maailman sähköstä tuotetaan edelleen fossiilisilla polttoaineilla, kun Suomessa vastaava osuus on vain noin 17 % (IEA, 2020, Energiatieteellisyys, 2020).

Alusliikenteen sähköistyminen ei ole vain akkuteknologian varassa, vaan monissa arvioissa polttokennoteknologia nähdään lupaavana ainakin pitemmällä aikavälillä. Koska vety ja ammoniakki eivät sisällä hiiltä, voisivat ne periaatteessa vähentää alusliikenteen päästöjen merkittävästi. Vedyn ja ammoniakkin hyödyntämisen ongelmat ovat pääosin teknisiä. Tällä hetkellä myös niiden tuotantokustannukset ovat huomattavan korkeat.

Vaikka vetyä on käytetty liikennepolttoaineena esimerkiksi tieliikenteessä, on sen käyttö meriliikenteessä edelleen kokeiluasteella. Myös ammoniakkin käyttö on pääosin rajoittunut sekoittamiseen muiden polttoaineiden kanssa kipinäsytytteisissä moottoreissa.

Vedyn energiasisältö suhteessa painoon on korkea, mutta suhteessa tilavuuteen alhainen, millä on suuri vaikutus käytettävissä olevaan lastitilaan. Tähän pystytään osittain vaikuttamaan käyttämällä ammoniakkia tai muita vedyn kuljettajia, joista vety valmistetaan aluksella. Ammoniakin osalta ratkaistavana on mm. sen myrkyllisyyden aiheuttamat riskit alusten miehistölle itse moottoritekniikkaan liittyvien haasteiden lisäksi.

Vedyn ja ammoniakkin tuotanto perustuu pääosin fossiilisiin polttoaineisiin. Mikäli vedystä tai ammoniakista halutaan meriliikenteen merkittävä käyttövoimavaihtoehto, on tuotantomenetelmiä muutettava ja tuotantoa kasvatettava merkittävästi. IEA:n (2020) ja DNV GL:n (2020) mukaan tämän pitäisi olla mahdollista, ja ne odottavatkin vedyn ja ammoniakkin osuuden meriliikenteen polttoaineista kasvavan erityisesti pitkällä aikavälillä.

Taulukko 13 Polttoainevaihtoehtojen SWOT-kehikko

	Vahvuudet	Heikkoudet	Mahdollisuudet	Haasteet
<b>Biopoltto- aineet</b>	Jo operatiivisessa käytössä	Kestävästä biomassasta valmistettujen polttoaineiden saatavuus rajallinen	Lyhyellä aikavälillä käyttöä laajennettavissa nykyisestä	Liikenteen päästötavoitteiden takia kilpailu tarjonnasta muiden liikennemuotojen kanssa
	Käytettävissä perinteisten polttoaineiden tapaan nykyisillä moottoriteknologioilla	Tällä hetkellä fossiilisia polttoaineita korkeampi hinta	Käytön laajuus lyhyellä aikavälillä ensisijaisesti hintakysymys	Kestävästi tuotetun biomassan määrä rajallinen, eikä riitä kuin murto-osaan merenkulun energiatarpeesta
	Eivät vaadi uutta, erillistä jakeluinfrastruktuuria		Tuotantoa myös kotimaisista raaka-aineista	Erityisesti 1. sukupolven biopolttoaineilla uhkana ruoantuotantokapasiteetin käyttö polttoaineeksi  Mahdolliset vaikutukset maankäyttöön
<b>Sähkö</b>	Ei paikallispäästöjä	Maailman nykyinen sähköntuotanto suurelta osin fossiilisiin polttoaineisiin perustuva	Uusiutuvan sähkön tuotanto yleistyy ja sähkön elinkaaripäästöt laskevat	Laivojen energian kulutus suurta, lataaminen ei onnistu nykyisellä sähkön siirron infrastruktuurilla
	Teknologia olemassa, sähkömoottoreita jo meriliikenteen käytössä	Päästövähennykset edellyttävät uusiutuvan sähkön tuotannon laajentumista	Uudet tuotantotavat laskevat sähkön hintaa, mikä tekee sähköstä kustannustehokkaamman käyttövoiman	Lataus- ja jakeluinfrastruktuurin rakentaminen merkittävä investointi
	Sähkömoottorin hyötysuhde polttomoottoria parempi	Keskeinen haaste energian varastointi aluksella	Akkuteknologian kehitys mahdollistaa tulevaisuudessa pidemmät toimintasäteet	Akku- ja latausteknologia edellyttää kehitystä
	Teknologia käytössä myös muilla kuljetusmuodoilla, kehitys ei pelkästään meriliikenteen toimijoiden varassa	Nykyinen akkuteknologia mahdollistaa ainoastaan lyhyen toimintasäteen, ei sovellu pitkän matkan liikenteeseen  Nykyinen latausteknologia edellyttää pitkiä latausaikoja	Latausteknologian kehitys mahdollistaa lyhyemmät latausajat	Akuille ja niissä käytettäville mineraaleille merkittävää kysyntää myös muualla

<b>Vety</b>	Hiiletön polttoaine	Alhainen höyrystymispiste	Teknologia jo käytössä muilla kuljetusmuodoilla, teknologian siirto mahdollista	Nykyinen vedyn tuotantotapa pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuva
	Vedyn energiasältö painoyksikköä kohti suurempi kuin muilla polttoaineilla	Alhainen energiasältö tilavuutta kohti	Käynnissä useita kehitysprojekteja, teknologinen kehitys nopeaa	Kestävä tuotanto vaatii tuotantotavan muutoksen
	Voidaan tuottaa esimerkiksi vesielektrolyysillä päästöttömästi	Suurin negatiivinen vaikutus lastitilaan	Uusiutuvan energian yleistyessä elektrolyysissä tarvittavan sähkön hinta oletettavasti laskee ja tekee vedystä kilpailukykyisemmän polttoaineen	Vedyn tämänhetkinen tuotanto pientä verrattuna merenkulun nykyiseen tai ennustettuun energiatarpeeseen
		Vaatii erikoistuneempaa säilytysteknologiaa		Elektrolyysiin perustuvaa vedyn tuotantoa ei laajasti käytössä
		Ei olemassa olevaa jakelujärjestelmää		Tämänhetkinen tuotannon hinta korkea verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin
	Polttokennoteknologia ei vielä pääasiallisena voimanlähteenä merenkulussa, teknologia vasta tulevaisuudessa käytössä			

<b>Ammoniikki</b>	Ammoniikki ei sisällä hiiltä, näin ollen (hiili)päästötön polttoaine	Tämän hetken tuotannon mittakaava on pieni verrattuna meriliikenteen tarvitsemaan energiaan - - -	Voidaan käyttää vedyn kuljettajana	Ammoniakin tuotanto tällä hetkellä pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa
	Tuotantoteknologiat tunnettuja ja käytössä	Tuotanto tällä hetkellä pääosin fossiilisiin polttoaineisiin perustuvaa	Tuotettavissa päästöttömästi uusiutuvilla energiamuodoilla	Käyttö polttoaineena edellyttäisi merkittävää tuotantokapasiteetin kasvattamista ja uusia, päästöttömiä tuotantomenetelmiä
	Voidaan käyttää sekä polttokennoissa, että nykyisissä moottoreissa (muunnoksin) polttoaineena	Ammoniikki on myrkyllistä, vuodot aluksella kohtalokkaita miehistölle	Hyödynnettävissä myös nykyisillä moottoritekniikoilla, siksi siirtymä mahdollisesti helpompi kuin esim. vedyllä	Teknologia vasta testivaiheessa, teknologian kypsyminen laajamittaiseen käyttöön edelleen kysymys
	Helpommin säilytettävä ja kuljetettava kuin vety, toimii siksi vedyn kuljettajana	Ammoniikki vasta testiasteella meriliikenteen polttoaineena, tähänastisissa kokeiluissa sekoitettu pieniä määriä muihin polttoaineisiin	Tuotantomenetelmät olemassa	Turvallisuus polttoainekäytössä ratkaistava
	Vaikutus lastitilaan pienempi kuin esimerkiksi vedyllä		Kuljetusinfrastruktuuri ja varastointi helpommin toteutettavissa kuin vedyllä	Edellyttää jakelu- ja varastointi-infrastruktuurin luomista
<b>Synteettiset polttoaineet</b>	Käytettävissä perinteisten polttoaineiden tapaan nykyisillä moottoritekniikoilla	Tällä hetkellä fossiilisia polttoaineita tai biopolttoaineita korkeampi hinta	Tuotettavissa päästöttömästi uusiutuvilla energiamuodoilla	Käyttö polttoaineena edellyttäisi merkittävää tuotantokapasiteetin kasvattamista ja uusia, päästöttömiä tuotantomenetelmiä
	Eivät vaadi uutta, erillistä jakeluinfrastruktuuria  Ei paikallispäästöjä, hiilineutraali myös elinkaaripäästöjen osalta, mikäli tuotanto uusiutuvalla energialla	Tuotantoprosessi vaatii merkittävästi edullista, päästöttöntä energiaa  Energiahäviö elinkaaren aikana melko suuri	Tuotantomenetelmä teknisesti valmis  Suomessa mahdollista merkittävään synergiaan raaka-aineiden tuotannossa olemassa olevan teollisuuden kanssa	Teollisen mittakaavan tuotantoa ei tällä hetkellä olemassa

Synteettisissä polttoaineissa yhdistyvät biopolttoaineiden mahdollisuudet toimia ns. drop-in –polttoaineena nykYTEknologian mukaisilla moottoreilla, ja toisaalta haasteet niiden tuotannon energiaintensiivisyyden ja kustannustason osalta. Synteettisten polttoaineiden heikkous liikennepolttoaineena on niiden merkittävä tehohäviö. Esimerkiksi Brackerin ja Timpen (2017) mukaan synteettisten polttoaineiden tuotantoon käytetystä energiasta vain 13% kohdistuu henkilöauton voimanlähteenä kulkuneuvon liikkumiseen. Syynä ovat polttoaineen tuotantoprosessi ja polttomoottorin heikko hyötysuhde. Meriliikenteen käyttövoimaksi synteettiset polttoaineet voivat sopia henkilöautoliikennettä paremmin.

Vaikka synteettisten polttoaineiden tuotantoprosessi on niin vesielektrolyysin, hiilidioksidin talteenoton kuin metanisaation osalta teknisesti tunnettu, on niiden tuotanto merkittävästi fossiilisia polttoaineita kalliimpaa. Esimerkiksi Brynolf et al. (2018) arvioivat synteettisten polttoaineiden tuotannon olevan jonkin verran kalliimpaa kuin biopolttoaineiden tuotannon vielä 2030-luvulla. Suomessa on merkittävää CO<sub>2</sub>-intensiivistä teollisuutta, jonka tuotannosta syntyvää hiilidioksidia voisi hyödyntää synteettisten polttoaineiden tuotannossa.

Tuotantokustannukset ovat merkittävä tekijä vedyn ja ammoniakkin tai synteettisten polttoaineiden yleistymiselle meriliikenteen polttoaineena. Tällä hetkellä niiden käyttö on vielä merkittävästi fossiilisia polttoaineita kalliimpaa. Vaikka uusiutuvan energiatuotannon kasvun odotetaan laskevan myös vedyn ja ammoniakkin tuotantokustannuksia, tulee niiden korkea(mpi) hinta hidastamaan laajempaa käyttöönottoa liikennepolttoaineena ainakin vielä 2020-luvun lopulla ja todennäköisesti vielä 2030-luvulla.

## 7 IMO:n säädöstilanne koskien käytössä olevia ja suunnitteilla olevia käyttövoimaratkaisuja

Merenkulun sääntelyn osalta keskeinen toimija on kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO, jonka päätökset sitovat sen 171 jäsenmaata ja tarkkailijajäseniä. IMO:n työskentely jakautuu komiteoihin, joita ovat:

- 1) Merenkulun turvallisuuskomitea (MSC)
- 2) Meriympäristön suojelukomitea (MEPC)
- 3) Lakikomitea
- 4) Teknisen yhteistyön komitea (TC)
- 5) Välitystoimikunta (FAL)

Merenkulun käyttövoimaratkaisuja koskevan sääntelyn näkökulmasta keskeisiä komiteoita ovat erityisesti MSC, jonka SOLAS –konventiolla (International Convention for the Safety of Life at Sea) on keskeinen rooli määriteltäessä alusten rakentamista, varustelua ja operointia erityisesti meriturvallisuuden näkökulmasta.

Meriympäristön suojelukomitea MEPC puolestaan on komitea, jonka vastuulla ovat merenkulun ympäristöasiat ja merenkulun ympäristösääntelyyn liittyvät kysymykset, joita käsitellään MARPOL-sopimuksessa (Maritime Pollution Convention). Tässä luvussa käsitellään tiivistetysti, miten MSC:n ja MEPC:n säädökset vaikuttavat merenkulun käyttövoimaratkaisuihin. Osa sääntelystä liittyy suoraan käyttövoimaratkaisujen hiilidioksidipäästöihin, kun taas osalla sääntelystä on polttoaineratkaisuihin epäsuora vaikutus.

### 7.1 MEPC ja MARPOL-sopimus

MARPOL-sopimus jakaantuu kuuteen temaattiseen kokonaisuuteen (Annex), joista MARPOL-sopimuksen Liite I (Annex I) käsittelee erityisesti mereen päätyviä öljypäästöjä ja niiden ehkäisyä. Liitteessä määritellään mm. säiliöalusten suunnitteluominaisuudet, joiden tarkoituksena on minimoida öljyn päästöt mereen aluksen operoinnin aikana ja mahdollisissa onnettomuustapauksissa. Siinä säädetään konehuoneen pilssiveden, painolastivesien ja säiliön puhdistusjätteiden käsittelystä kaikille suurille kaappa-aluksille.

Osana liitettä määritellään myös ns. ”Erytisen herkäät merialueet” (Particularly Sensitive Sea Areas, PSSA), joiden katsotaan olevan vaarassa öljyn aiheuttamalle pilaantumiselle. Öljyn päästäminen niiden sisällä on kokonaan kielletty muutamia vähäisiä poikkeuksia lukuun ottamatta. IMO:n määritelmässä Itämeri on kokonaisuudessaan PSSA-alueetta.

Liite II käsittelee päästökriteereitä suurina määrinä kuljetettavien haitallisten nestemäisten aineiden aiheuttaman saastumisen ehkäisemiseksi. Liite määrittelee yksityiskohtaiset toimenpiteet ja toimintastandardit eri aineille sekä määrittelee miten em. aineet on kierrätettävä vastaanottolaitoksissa, tai millaisina pitoisuuksina niitä on mahdollista vapauttaa meriympäristöön. Liite myös määrittelee, että epäpuhtauksia sisältäviä aineita ei ole sallittua päästää mereen alle 12 meripeninkulman tai 22 kilometrin etäisyydellä rannikosta.

Liite III sisältää yleiset vaatimukset pakkaamista, merkintöjä, dokumentointia, varastointia, määrän vähentämistä, jakamista ja ilmoituksia koskeville standardeille haitallisten aineiden aiheuttaman saastumisen estämiseksi. Liitteen vaatimukset ovat yhtenevät kansainvälisessä vaarallisten aineiden merikuljetuksia koskevassa säännöstössä (IMDG) kuvattujen menettelytapojen kanssa.

Liite IV käsittelee laivojen jätevesien käsittelyä sekä niiden hävittämiseen liittyviä sääntöjä ja rajoituksia. Liitteessä V määritetään etäisyydet maasta, johon alusten kiinteitä jätteitä voidaan hävittää, ja luokitellaan erityyppiset jätteet. Tiukin sääntely kohdistuu muovijätteeseen, jonka päästämisen mereen liite kieltää kokonaan.

Liite VI käsittelee laivojen päästöjä ilmaan, ja se on laivojen polttoaineiden näkökulmasta MARPOL-sopimuksen tärkein osa. Liite säätelee mm. laivapolttoaineiden rikkipitoisuutta, joka on vuoden 2020 alusta saakka ollut maailmanlaajuisesti korkeintaan 0,5 %, ja ns. SECA-alueilla (Sulphur Emission Control Area) 0,1 %. Mm. Itämeri ja Pohjanmeri ovat SECA-alueita.

MARPOL-sopimuksen liitteeseen on kirjattu myös tiukentuvat rajoitteet laivojen typpipäästöille. Vuoden 2021 alusta voimassa olevat rajat laivojen typpipäästöille ovat maailmanlaajuisesti maksimissaan 14,4 g/kWh ja ns. NECA-alueilla (Nitrogen Emission Control Area) 3,4 g/kWh. Mm. Itämeri ja Pohjanmeri ovat NECA-alueita.

Rikki- ja typpipäästöjen osalta käyttövoimaratkaisuihin vaikuttavia asioita ovat voimassa olevassa MARPOL-sopimuksessa myös laivojen energiatehokkuutta säätelevät EEDI (Energy Efficiency Design Index), joka asettaa energiatehokkuuskriteerit uusille käyttöön otettaville aluksille suhteessa kullekin alustyyppille määriteltyyn ns. referenssilinjaan<sup>8</sup>.

Tällä hetkellä säädösten mukaan noudatetaan EEDI:n vaihetta 2, jossa uusien käyttöön otettavien alusten oletetaan olevan 15-20 % energiatehokkaampia suhteessa referenssilinjaan. EEDI:n 2. vaihe astui kansainvälisesti voimaan 1.1.2020.

EEDI:n viimeiseen eli 3. vaiheeseen siirrytään vuonna 2025, jolloin käyttöön otettavien alusten oletetaan olevan 30 % energiatehokkaampia kuin referenssilinjan alusten. Erityisesti Suomen osalta on olennaista, että ulkomaankaupallemme keskeisiin jäävahvistettuihin aluksiin sovelletaan ns. korjauskertoimia, jotka pyrkivät huomioimaan sen, että jääoloissa alusten liikkuminen edellyttää suurempia konetehoja kuin avovedessä. Näin EEDI:n

---

<sup>8</sup> Ks. esim. Suomen Varustamojen [www](http://www.suomenvarustamo.fi)-sivut.

mukaisella jäävahvistetulla aluksella voi olla suurempi koneteho kuin vastaavalla jäävahvistamattomalla aluksella.

Vuoden 2021 alussa voimassa olevaa alusten energiatehokkuuteen liittyvää sääntelyä MARPOL:ssa on lisäksi SEEMP (Ship Energy Efficiency Management Plan), joka edellyttää varustamoita seuraamaan aktiivisesti alustensa energiatehokkuutta ja sen kehittymistä.

Alusten käyttövoimaratkaisujen näkökulmasta olennaista on myös IMO:ssa käynnissä oleva kehitys. Vuonna 2018 IMO julkaisi alustavan strategian merenkulun kasvihuonekaasujen vähentämiseksi. Strategian nimeämä tavoite on vähentää meriliikenteen päästöjä 50 % vuoden 2008 tasosta vuoteen 2050 mennessä. Päästövähennyskeinoiksi IMO:n strategiassa on esitetty niin operatiivisia päästövähennyskeinoja, alusten nopeuden alentamista, erilaisia markkinapohjaisia päästövähennyskeinoja, mutta myös vaihtoehtoisia, vähähiilisiä polttoaineratkaisuja.

Vaikka MARPOL-sopimus ei nyky muodossaan puutu kovin yksityiskohtaiseksi vähähiilisiin polttoaineratkaisuihin, on hyvin todennäköistä, että tulevaisuudessa myös MARPOL sisältää elementtejä, jotka ohjaavat merenkulkua vähähiilisiin polttoaineratkaisuihin.

## 7.2 MSC SOLAS ja IGF

Kansainvälinen yleissopimus ihmishengen turvallisuudesta merellä (engl. International Convention for the Safety of Life at Sea; SOLAS) on kansainvälinen meriturvallisuutta käsittelevä sopimus. Se takaa, että kaikki sopimuksen allekirjoittajamaissa rekisteröidyt laivat läpäisevät tietyt minimiturvallisuusmääräykset, jotka koskevat niin rakennetta, välineistöä kuin laivan toimintaa. Sopimuksen on allekirjoittanut 164 valtiota ja se kattaa noin 99 % maailman kauppalaivastosta.

SOLAS jakaantuu 12 lukuun, jotka käsittelevät turvallisuutta eri näkökulmista, kuten esimerkiksi alusten rakennetta, navigointia, viestintälaitteita, paloturvallisuutta ja palonsammutuslaitteistoja, miehitysvaatimuksia jne.

Polttoaineiden näkökulmasta olennaisin osa SOLAS-yleissopimusta on IGF (International Code of Safety for Ship Using Gases or Other Low-Flashpoint Fuels), joka nimensä mukaisesti säätelee ja asettaa turvallisuusstandardit aluksille, jotka käyttävät polttoaineena kaasuja tai muita alhaisen leimahduspisteen eli erityisen syttymisherkkiä polttoaineita.

IGF:ssä on huomioitu LNG:n yleistymisen laivapolttoaineena sekä LNG:n turvalliseen käyttöön liittyvät erityispiirteet. IMO tunnistaa kuitenkin uusien kaasumaisten polttoaineiden nopean kehityksen, ja arvioi siksi IGF:ää säännöllisesti, jotta myös uusien kaasumaisten polttoaineiden ominaispiirteet ja mahdolliset erityisvaatimukset tulevat siinä huomioiduksi.

## 8 Yhteenveto

Tämä raportti esittää yleiskuvan laivaliikenteen vähähiilisten polttoaineratkaisujen nykytilasta sekä niiden tulevasta kehityksestä. Se perustuu viimeaikaisimpaan tutkimuskirjallisuuteen sekä alan keskeisten toimijoiden selvityksiin.

Tarkastelussa on käsitelty erityisesti biopolttoaineita, sähköön perustuvia ratkaisuja sekä vetypohjaisia energiaratkaisuja, ml. vedyn kuljettajiin perustuvat ratkaisut.

### **Meriliikenteen kasvihuonepäästöt**

Meriliikenne muodosti vuonna 2019 hieman alle 3 % maailman kasvihuonekaasujen päästöistä. Laivaliikenteen ja sitä myötä sen päästöjen odotetaan nykyisillä käyttövoimaratkaisuilla kasvavan merkittävästi tulevaisuudessa. Samalla merenkulun sääntelyn kannalta keskeiset toimijat kuten kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO ja EU ovat asettaneet merkittäviä tavoitteita meriliikenteen päästöjen vähentämiseksi.

Jo asetettujen tavoitteiden lisäksi suunnitteilla on uutta sääntelyä. IMO:n meriympäristön suojelukomitea MEPC suunnittelee tiukennuksia alusten energiatehokkuusvaatimuksiin ja tutkii ns. markkinaperusteisia keinoja laivaliikenteen päästöjen vähentämiseksi.

Euroopan komissio sekä Euroopan Parlamentti puolestaan valmistelevat merenkulun sisällyttämistä EU:n päästökauppamekanismiin tai vaihtoehtoisesti oman EU:n laajuisen päästökauppamekanismin luomista merenkululle.

Merenkulun päästövähennykset eivät todennäköisesti tule toteutumaan nykyisin käytössä olevin keinoin, vaan niiden täyttämiseksi tarvitaan muita keinoja. Uudet vähähiiliset tai hiilineutraalit polttoaineratkaisut tulevat olemaan tässä keskiössä.

### **Meriliikenteen vähähiilisten käyttövoimaratkaisujen taustaa**

Tässä raportissa vähähiilisiä käyttövoimaratkaisuja on käsitelty erityisesti niiden käytettävyyden, teknisen valmiuden ja päästöjen näkökulmasta. Tämän pohjalta tehty tarkastelu ja SWOT-analyysi osoittavat, että käyttövoimaratkaisut etenevät eri tahtia: osa polttoaineista on jo operatiivisessa käytössä ja niitä voidaan hyödyntää nykyisellä moottoriteknologialla, kun taas osa on vasta kokeiluasteella ja edellyttää käyttöön vielä kehitysvaiheessa olevaa teknologiaa.

Eri polttoaineilla on myös hyvin erilaiset vaatimukset jakelujärjestelmän, säilytyksen jne. suhteen. Tämän vuoksi eri käyttövoimaratkaisuiden rooli on erilainen riippuen niiden kehityksen aikajänteestä ja liikennetyypistä.

### **Biopolttoaineet vesiliikenteen käyttövoimana**

Tarkastelluista polttoainevaihtoehdoista biopolttoaineet, erityisesti 1. sukupolven biopolttoaineet ovat jo operatiivisessa käytössä. Biopolttoaineet vastaavat käytöltään ja

ominaisuuksiltaan öljypohjaisia polttoaineita, ja niitä voidaan hyödyntää nykyisissä aluksissa yleisesti käytössä olevalla moottoritekniologialla. Myös niiden saatavuus voidaan hoitaa nykyisen polttoaineiden jakelujärjestelmän puitteissa.

Näin ollen alan keskeiset toimijat näkevät biopolttoaineissa potentiaalia laivaliikenteen päästöjen vähentämisessä erityisesti lyhyellä aikavälillä. Biopolttoaineiden haittana on toistaiseksi ollut niiden öljypohjaisia polttoaineita korkeampi hinta. Se on tarkoittanut sitä, että biopolttoaineita on pääasiassa käytetty muualla kuin merikuljetuksissa.

Toinen tekijä, joka tulee rajoittamaan biopolttoaineiden roolia laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä, on niiden rajallinen saatavuus. Kestävästi tuotetun biomassan määrä vastaa vain murto-osaa merenkulun energian tarpeen tyydyttämiseen tarvittavasta määrästä.

Lisäksi nestemäisten biopolttoaineiden kysyntä on suuri myös muissa kuljetusmuodoissa. Eräiden arvioiden mukaan merkittävä osa kestävästi tuotetuista biopolttoaineista tullaan tulevaisuudessa käyttämään lentoliikenteen päästöjen vähentämiseen. Biopolttoaineista ei siis odoteta keskeistä ratkaisua laivaliikenteen päästöihin keskipitkällä tai pitkällä aikavälillä.

### **Biopolttoaineet sisävesiliikenteen ja Saimaan liikenteen näkökulmasta**

Sisävesiliikenteen ja Saimaan liikenteen näkökulmasta tämä tarkoittaa, että biopolttoaineet voivat toimia lyhyellä aikavälillä myös Saimaan liikenteen päästöjen vähentämisen keinona. Huomioiden Saimaan liikenteen aluskannan korkea keski-ikä ja pieni koko, biopolttoaineiden etuna voidaan pitää sitä, että niiden vaatima investointitarve on rajallinen ja mahdollistaa siten kaluston käyttämisen elinkaarensa loppuun.

Pidemmällä aikavälillä biopolttoaineiden saatavuuden haasteet vaikeuttavat niiden soveltuvuutta sisävesien tai Saimaan liikenteen vähähiiliseksi ratkaisuksi.

### **Sähkö vesiliikenteen käyttövoimana**

Sähköön käyttövoimana liittyy monia tekijöitä, jotka vaikuttavat sen toimivuuteen eri liikennetyypeissä. Tähän asti sähkön käyttö laivaliikenteessä on rajoittunut pääosin ns. dieselsähkö –ratkaisuihin, joissa aluksen propulsio toimii sähkömoottoreilla, mutta sähköenergia tuotetaan dieselkäyttöisillä generaattoreilla. Koska ratkaisu perustuu edelleen öljypohjaisiin polttoaineisiin, ei siitä ole vähähiiliseksi ratkaisuksi.

Hybridiratkaisut tai kokonaan ladattavat sähköiset alukset ovat tähän mennessä olleet harvinaisia. Niiden käyttöä on rajoittanut akkujen rajallinen kapasiteetti ja alusten rajallinen toimintasäde sekä lataustekniologian edellyttämät pitkät latausajat. Valtameriliikenteen ja pääosin myös lähimerenkulun vaatimukset alusten toimintasäteelle sulkevat akkuteknologiaan perustuvat ratkaisut käytännössä kokonaan pois. Tämän vuoksi akkuteknologiaan perustuvien ratkaisuiden merkitys laivaliikenteessä jäänee vähäiseksi.

Tällä hetkellä käytössä, rakenteilla ja suunnitteilla olevat akkuteknologiaan perustuvat alukset ovatkin tyyppillisesti sellaisessa käytössä, jossa kuljettu matka on rajallinen, jossa aluksilla on suhteellisen lyhyt matka latausmahdollisuudesta toiseen. Sisävesiliikenteen näkökulmasta akkuteknologiaan perustuvien sähköisten ratkaisujen potentiaali on saman tyyppinen. Lisäksi on huomioitava myös latausinfrastruktuurin ja sähkönsiirtoinfrastruktuurin vaatimukset sekä niiden suhteellisen suuret investointikustannukset.

Alusten vaatima tehon tarve on myös sisävesiliikenteen aluksilla niin suuri, että se edellyttää riittävän sähkönsiirtotehon ja latausinfrastruktuurin rakentamista tarvittaville latauspaikoille. Tämä yhdistettynä akkujen kapasiteetista johtuvaan rajalliseen toimintasäteeseen tarkoittaa sitä, että sähköisten ratkaisujen voidaan olettaa olevan myös sisävesiliikenteessä sopivia lähinnä sellaiseen liikenteeseen, joissa alukset kulkevat säännöllistä lyhyttä reittiä latauspisteiden välillä.

### **Vety ja vedyn kuljettajat vesiliikenteen käyttövoimana**

Pitkällä aikavälillä alan keskeiset toimijat arvioivat, että merkittävä osuus laivaliikenteestä tulee siirtymään vedyn ja vedyn kuljettajien kuten ammoniakkin käyttöön. Ennen kuin niiden hyödyntämistä laivaliikenteessä voidaan ajatella laajamittaisesti, on niiden osalta ratkaistava kuitenkin useita eri kysymyksiä. Niiden käyttöön tarvittava teknologia on meriliikenteen osalta vielä pääosin kokeiluasteella.

Polttokennoteknologiaa on tähän mennessä testattu laivoissa lähinnä apukoneiden tapaisissa toissijaisissa energiaratkaisuissa. Alusteknologiaan liittyen myös vedyn säilyttäminen aluksella on toistaiseksi haaste.

Vaikka vedyn energiasisältö suhteessa painoon on suuri, tarkoittaa sen alhainen höyrystymispiste sitä, että sen vaatima säiliötila ja vaikutus lastitilaan on suurempi kuin muilla polttoaineilla. Ratkaisuksi onkin mietitty vedyn valmistamista aluksella esimerkiksi ammoniakista. Sen myrkyllisyys aiheuttaa kuitenkin omat varastointiin liittyvät ongelmansa.

Ennen vedyn tai ammoniakkin laajamittaista käyttöönottoa tulee ratkaista niiden tuotantotapa, joka perustuu nyt pääosin fossiilisiin polttoaineisiin, lähinnä maakaasuun. Nykyisillä tuotantomenetelmillä tuotettuna vedyn elinkaaripäästöt ovat korkeat, eikä se siten tarjoa ratkaisua laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Lisäksi vedyn ja ammoniakkin nykyiset tuotantomäärät ovat pieniä verrattuna laivaliikenteen energiatarpeeseen. Myös tuotantokustannukset ovat huomattavasti nykyisiä fossiilisia polttoaineita korkeammat.

Ennen kuin vety tai ammoniakki voisivat olla ratkaisu laivaliikenteen päästöihin, on niiden tuotantotavan, -volyymin ja -kustannusten muututtava merkittävästi. Vesielektrolyysiin perustuvan tuotannon kustannuskilpailukykyyn ja volyymiin on kuitenkin odotettavissa

muutoksia sitä mukaa kuin uusiutuvaan energiaan perustuva tuotanto yleistyy, ja sen kustannukset laskevat mittakaavaetujen ja teknologisen kehityksen myötä.

### **Synteettiset käyttövoimat vesiliikenteessä**

Vedyn ja vedyn kuljettajien kaltaista kehitystä on odotettavissa myös ns. Power-to-X – teknologioiden avulla tuotettavien synteettisten polttoaineiden tuotannossa. Niiden tuotannossa vesielektrolyysillä tuotettu vety yhdistyy metanisaatiossa talteen otettuun hiilidioksidiin. Tämän tyyppisten polttoaineiden tuotantoteknologia on teknisesti valmis, mutta kustannussyistä teollisen mittakaavan tuotantoa ei ole tähän mennessä käynnistetty.

Teollisen mittakaavan tuotantoa ollaan kuitenkin käynnistämässä, ja siihen olisi mahdollisuuksia sekä teknologian, että raaka-aineiden saatavuuden näkökulmasta myös Suomessa. Vaikka synteettisten polttoaineiden tuotannon arvioidaan tällä hetkellä olevan fossiilisia polttoaineita ja biopolttoaineita kalliimpaa on oletettavaa, että kiristynvä ympäristösääntely ja erityisesti Euroopan unionin kunnianhimoiset ilmastotavoitteet tulevat ajan myötä parantamaan niiden suhteellista kilpailuasemaa.

### **Lopuksi**

Merenkulku ja sen käyttövoimat ovat uusiutumassa lähivuosikymmeninä. Toimialalla ei tule olemaan yhtä ainoaa käyttövoimaratkaisua, vaan energiatarve – ja mahdolliset energiaa säästävät toimenpiteet - tullaan hoitamaan kulloiseenkin tilanteeseen sopivalla ja myös taloudellisesti mahdollisella ratkaisulla.

Sisävesiliikenteen lyhyet kuljetusmatkat mahdollistavat käyttövoimia, jotka avomeriliikenteessä ovat poissuljettuja. Toisaalta pienet kuljetusvolyymit, alhainen liikennefrekvenssi ja pirstaleinen satamarakenne vaikeuttavat kattavien jakelujärjestelmien rakentamista eri käyttövoimille ja varsinkin sähkölle, ja usein estävät niiden kannattavuuden.

Pyrkimys vähähiiliseen tai fossiilittomaan yhteiskuntaan on paljon liikennesektoria laajempi kysymys. Tavoitteen saavuttaminen nojaa paitsi teknologiseen kehitykseen, ennen muuta poliittisiin päätöksiin. Sääntelyä ja kannustimia koskevaa päätöksentekoa vaikeuttaa mm. se, että teknologisen kehityksen nopeutta on vaikea ennakoida, minkä vuoksi eri toimenpiteiden päästöjä vähentävää vaikutusta on vaikea verrata niiden vaatimiin kustannuksiin. Vaikka arviot eri toimenpiteiden kustannusvaikutuksista vaihtelevat erittäin paljon, esimerkiksi energian tuotantoa ja teollisia prosesseja kehittämällä CO<sub>2</sub>-päästöjen yksikkökustannus (€/CO<sub>2</sub>-tonni) on usein huomattavasti alhaisempi kuin monilla liikenteen toimenpiteillä – erityisesti verrattuna autokannan sähköistämiseen (The Economist 2021).

## Lähteet

- Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., Staffell, I., (2019) How to decarbonise international shipping: Options for fuels, technologies and policies, *Energy Conversion and Management*, 182, 72-88.
- ben Brahim, T., Wiese, F., Münster, M. (2019) Pathways to climate-neutral shipping: A Danish case study, *Energy*, 188.
- Bengtsson, S., Fridell, E., Andersson, K. (2012) Environmental assessment of two pathways towards the use of biofuels in shipping, *Energy Policy*, 44, 451-463.
- Bicer, Y., Dincer, I. (2018) Environmental impact categories of hydrogen and ammonia driven transoceanic maritime vehicles: A comparative evaluation, *International Journal of Hydrogen Energy*, 43, 4583-4596.
- Bouman, E.A., Lindstad, E., Rialland, A.I., Strömman, A.H., (2017) State-of-the-art technologies, measures and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review, *Transportation Research Part D*, 52, 408-421.
- Bracker, J., Timpe, C. (2017) *An outline of sustainability criteria for synthetic fuels used in transport*, Öko-Institut e.V.
- Brown, T. (2018) Pilot project: an ammonia tanker fueled by its own cargo, *Ammonia Energy*. [www.ammoniaenergy.org/pilot-project-an-ammonia-tanker-fueled-by-its-own-cargo/](http://www.ammoniaenergy.org/pilot-project-an-ammonia-tanker-fueled-by-its-own-cargo/).
- Brynolf, S., Taljegard, M., Grahn, M., Hansson, J. (2018) Electrofuels for the transport sector: A review of production costs, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1887-1905.
- Denis, C., Zincir, B. (2016) Environmental and economical assessment of alternative marine fuels, *Journal of Cleaner Production*, 113, 438-449.
- de-Troya, J.J., Álvarez, C., Fernández-Garrido, C., Carral, L. (2016) Analysing the possibilities of using fuel cells in ships, *International Journal of Hydrogen Energy*, 41, 2853-2866.
- DNV GL (2020) Energy Transition Outlook 2020, Maritime Forecast to 2050. Saatavissa täältä: <https://eto.dnvgl.com/2020/index.html#Footer>
- Economist, The, (27.2.2021), What is the cheapest way to cut carbon? Haettu 27.2.2021 < <https://www.economist.com/finance-and-economics/2021/02/22/what-is-the-cheapest-way-to-cut-carbon> >
- Eide, M.S., Chrystakis, C., Endresen, Ø. (2013) CO<sub>2</sub> abatement potential towards 2050 for shipping, including alternative fuels, *Carbon Management*, 4, 3, 275-289.

Energiäteollisuus (2020) Energiavuosi 2019, Sähkö.

Finnpilot (2021) Luotsausmaksut, haettu 22.2.2021, <<https://finnpilot.fi/wp-content/uploads/2020/09/LUOTSAUSMAKSUT-2021.pdf>>.

Gilbert, P., Walsh, C., Traut, M., Kesieme, U., Pazouki, K., Murphy, A. (2018) Assessment of full life-cycle air emissions of alternative shipping fuels, *Journal of Cleaner Production*, 172, 855-866.

Hanaki, K., Portugal-Pereira, J. (2018) The Effect of Biofuel Production on Greenhouse Gas Emission Reductions, *Biofuels and Sustainability*, 53-71, Springer Science for Sustainable Societies Book Series.

Hansson, J., Fridell, E., Brynolf, S. (2020) *On the potential of ammonia as fuel for shipping, a synthesis of knowledge*, Lighthouse reports

Harmsen, J., Nesterova, N., Bekdemir, C., van Kranenburg, K. (2019) Green Maritime Methanol, WP2 Initiation and Benchmark analysis, TNO Report.

Hirvonen, K. (2020) Saimaan vesiliikenteen kehittämisorganisaation toimintamallin rakentaminen.  
<[https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345909/Hirvonen\\_Kaisa\\_2020\\_10\\_05.pdf?sequence=2](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/345909/Hirvonen_Kaisa_2020_10_05.pdf?sequence=2)>, haettu 17.12.2020.

Horvath, S., Fasihi, M., Breyer, C. (2018) Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: Technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040, *Energy Conversion and Management*, 164, 230-241.

Hsieh, C-W.C., Felby, C. (2017) Biofuels for the marine shipping sector – An overview and analysis of sector infrastructure, fuel technologies and regulations, IEA Bioenergy.

Hänggi, S., Elbert, P., Bütler, T., Cabalzar, U., Teske, S., Bach, C., Onder, C. (2019) A review of synthetic fuels for passenger vehicles, *Energy Reports*, 5, 555-569.

IEA (2019) Electricity generation by source, World 1990-2017, IEA data and statistics 2020.

IEA (2020) Energy Technology Perspectives 2020. Saatavissa täältä (vaatii rekisteröitymisen):  
<<https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020>>

IMO (2020) Reduction of GHG Emissions from Ships, Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report.

INFUTURE (2020) Online Round Table-keskustelu. Potential Cargo Flows and Routing.

ITF (2018) Decarbonising Maritime Transport: Pathways to zero carbon-shipping by 2035. Haettu 21.2.2021 <<https://www.itf-oecd.org/decarbonising-maritime-transport>>.

- ITF (2020) Navigating Towards Cleaner Maritime Shipping - Lessons From the Nordic Region. <<https://www.itf-oecd.org/navigating-towards-cleaner-maritime-shipping>>. Haettu 21.2.2021
- Kuntze, V., Ojala, L. ja Kauppi, H. (2019) Merenkulku kansantaloudessa. HAZARD Publications 33/2019, Turku, 110 sivua. <<https://www.utupub.fi/handle/10024/148682>>
- Lam, S.L.J., Thepsithar, P. (2020) Alternative Fuels for International Shipping, Nanyang Technological University, Singapore
- Lapp, T. (2020) Saimaan kanavan sulkujen pidentäminen – Hankearviointi, Väyläviraston julkaisuja 31/2020, Haettu 22.2.2021, <[https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj\\_2020-31\\_saimaan\\_kanavan\\_web.pdf](https://julkaisut.vayla.fi/pdf12/vj_2020-31_saimaan_kanavan_web.pdf) >
- Lloyd's ja UMAS (2020) Techno-Economic Assessment of Zero Carbon Fuels
- Moomaw, W., Burgherr, P., Heath, G., Lenzen, M., Nyboer, J., Verbruggen, A. (2011) Annex II: Methodology. In IPCC Special Report on Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation.
- Nair, A. (2016) Alternative Fuels for Shipping: Potential for reductions in CO2 emissions, Financial viability for ship owners and, Optimized fleet mix design for policymakers, Erasmus University Rotterdam
- naviSaimaa (2020) Saimaan liikennetilastot. <<http://www.navisaimaa.fi/liikennetilastot>>, haettu 17.12.2020.
- Ojala, L., Solakivi, T., Kiiski, T., Laari, S. ja Österlund, B. (2018) Merenkulun huoltovarmuus ja Suomen elinkeinoelämä – Toimintaympäristön tarkastelu vuoteen 2030. Huoltovarmuusorganisaatio. <<https://www.huoltovarmuuskeskus.fi/julkaisut>>.
- Perčić, M., Vladimir, N., Fan, A. (2020) Life-cycle cost assessment of alternative marine fuels to reduce the carbon footprint in short-sea shipping: A case study of Croatia, *Applied Energy*, 279.
- Ramboll (2020) Saimaan tavaraliikenteen yhteiskuntataloudelliset vaikutukset. <[https://www.pohjois-karjala.fi/documents/5590622/5919705/Saimaan+tavaraliikenteen+yhteiskuntataloudelliset+vaikutukset\\_Raporttilogolla.pdf/77872502-ee95-9e6c-f95d-64bcd49fa4aa?version=1.0&previewFileIndex=>](https://www.pohjois-karjala.fi/documents/5590622/5919705/Saimaan+tavaraliikenteen+yhteiskuntataloudelliset+vaikutukset_Raporttilogolla.pdf/77872502-ee95-9e6c-f95d-64bcd49fa4aa?version=1.0&previewFileIndex=>)>, haettu 17.12.2020.
- Ren, J., Liang, H. (2017) Measuring the sustainability of marine fuels: A fuzzy group multi-criteria decision making approach, *Transportation Research Part D*, 54, 12-29.
- Ren, J., Lützen, M. (2017) Selection of sustainable energy source for shipping: Multi-criteria decision making under incomplete information, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 1003-1019.

- Spoof-Tuomi, K., Niemi, S. (2020) Environmental and Economic Evaluation of Fuel Choices for Short Sea Shipping, *Clean Technologies*
- Solakivi, T., Kilpi, V., Kiiski, T., Ojala, L. (2020a) Merenkulun päästövähennyskeinojen vaikutukset varustamoliiketoimintaan ja logististen ketjujen toimintaan. Tukkk:n julkaisuja
- Solakivi, T., Jalkanen, J.-P., Perrels, A., Kiiski, T., Ojala, L. (2020b) Merenkulun päästökaupan vaikutukset, Valtioneuvosto kanslian selvitys 1:2020.
- Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., Landälv, J. (2018) Renewable methanol as a fuel for the shipping industry, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 1217-1228.
- Tilastokeskus (2020a) Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2019, Haettu 21.2.2021 <[https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki\\_2019\\_2020-05-28\\_kat\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2019/khki_2019_2020-05-28_kat_001_fi.html)>
- Tilastokeskus (2020b) Suomen kasvihuonekaasupäästöt 1990–2019, Haettu 21.2.2021 <[https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/yymp\\_kahup\\_1990-2019\\_2020.pdf](https://www.stat.fi/static/media/uploads/tup/khkinv/yymp_kahup_1990-2019_2020.pdf)>
- Tilastokeskus (2021a) Ulkomaan merikuljetukset satamittain ja tavaralajeittain, 1970-2020, <[https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_lii\\_\\_uvliik\\_\\_vv/statfin\\_uvliik\\_\\_pxt\\_12it.px/](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__lii__uvliik__vv/statfin_uvliik__pxt_12it.px/)>; Haettu 22.2.2021
- Tilastokeskus (2021b) Kotimaan vesiliikenteen kuljetukset tavaralajeittain, Haettu 22.2.2021 <[https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_lii\\_\\_kvliik\\_\\_vv/statfin\\_kvliik\\_\\_pxt\\_12il.px/](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__lii__kvliik__vv/statfin_kvliik__pxt_12il.px/)>
- Tilastokeskus (2021c) Saimaan kanavan alusliikenne, Haettu 22.2.2021, <[https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin\\_\\_lii\\_\\_uvliik\\_\\_vv/statfin\\_uvliik\\_\\_pxt\\_12jc.px/](https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/StatFin__lii__uvliik__vv/statfin_uvliik__pxt_12jc.px/)>
- Traficom (2019) Kanavaliikenteen tilastot. Haettu 17.12.2020. <<https://www.traficom.fi/fi/tilastot/kanavaliikenteen-tilastot?toggle=Kanavaliikenteen%20vuositilastot&toggle=Saimaan%20kanava&toggle=Kanavaliikenteen%20kuukausitilastot%202019>>
- Tulli (2021) Väylämaksut, Haettu 22.2.2021, <<https://tulli.fi/yritysassiakkaat/kuljetus-ja-varastointi/vaylamaksut#>>,
- UNCTAD (2020) Review of Maritime Transport 2020, United Nations Publications.
- Urbansky, F. (2020) The potential of synthetic fuels, *MTZ Worldwide*, 81, 8-13.
- Vero (2020) Biopolttoaineiden jakeluvuote. Antopäivä 16.11.2020. Haettu 26.2.2021. <<https://www.vero.fi/syventavat-vero-ohjeet/ohje-hakusivu/56210/biopolttoaineiden-jakeluvuote2/>>

VM (2020) Valtiovarainministeriö, Valtion talousarvioesitys 2021, Haettu 22.2.2021,  
<<https://budjetti.vm.fi/indox/sisalto.jsp?year=2021&lang=fi&maindoc=/2021/tae/hallituksenEsitys/hallituksenEsitys.xml&opennode=0:1:139:383:1059:1075>>

VNK (2021) Valtioneuvoston kanslia, Omistajaohjausosasto,  
<<https://vnk.fi/omistajaohjaus/yhtiot>>, Haettu 22.2.2021

Väylävirasto (2021) Luotsaus Saimaan kanavalla ja Saimaalla,  
<<https://vayla.fi/vaylista/vesivaylat/kanavat/saimaan-kanava/luotsaus>>, Haettu  
22.2.2021

Liite 1. Polttoaineiden tekninen valmius Lloyd'sin ja UMAS:n (2020) mukaan.

Skaala (ks. tarkemmin luku 5.4.): 1 = Peruseriaatteet havaittu; ... 9 = Tuotanto ja tuote täydessä toiminnassa

Polttoainetyyppi	Bunkraus			Säilyttäminen aluksella			Käsittely ja konversio			Propulsio					
	Laitteisto	Menettelytavat	Polttoaineen laatu-standardit	Säiliö	Kaksikerros-säiliö	IMO A-tyypin säiliö	IMO B-tyypin säiliö	IMO C-tyypin säiliö	Tuuletus-järjestelmä	Polttoaineen syöttö-järjestelmä	Reformointi	2-tahti poltto-moottori	4-tahti poltto-moottori	Poltto-kenno	Kat-tila
<b>LSHFO</b>															
(referenssialus)	9	9	9	9					9	9		9	9		9
Bio-diesel	9	9	9	9					9	9		9	9		9
E-diesel	9	9	9	9					9	9		9	9		9
Bio-metanoli	7	6	3	7					7	7		7	6		2
E-metanoli	7	6	3	7					7	7		7	6		2
Bio-LNG	9	9	9		8		9	9	9	9		9	9		9
E-LNG	9	9	9		8		9	9	9	9		9	9		9
E-ammoniakki	7	2	2			7	7	7	3	7		3	2		2
NG-ammoniakki	7	2	2			7	7	7	3	7		3	2		2
E-vety	4	2	3				3	6	2	2		2	5		2
NG-vety	4	2	3				3	6	2	2		2	5		2
<b>Polttokenno</b>															
Bio-metanoli	7	6	3	7					7	7	3		6	7	2
E-metanoli	7	6	3	7					7	7	3		6	7	2
Bio-LNG	9	9	9		8		9	9	9	9	4			7	
E-LNG	9	9	9		8		9	9	9	9	4			7	
E-ammoniakki	7	2	2			7	7	7	3	7	2		2	7	2
NG-ammoniakki	7	2	2			7	7	7	3	7	2		2	7	2
E-vety	4	2	3				3	6	2	2			5	7	2
NG-vety	4	2	3				3	6	2	2			5	7	2
Akut	4	2	3				3	6	2	2			5	7	

Alkutunnisteiden selitykset: Bio = biopolttoaineet; E = mm. elektrolyysin avulla tuotetut synteettiset polttoaineet; NG = maakaasun tyyppiset polttoaineet