



# MERILIIKENTTEEN PÄÄSTÖ- VÄHENNYSRATKAISUT

MEPTEK-hankkeen loppuraportti

Elias Altarriba (toim.)

Elias Altarriba (toim.)

# MERILIIKENTEEEN PÄÄSTÖVÄHENNYS- RATKAISUT

MEPTEK-hankkeen loppuraportti



Uudenmaan liitto  
Nylands förbund

KYMEN  
LAAKSON  
LIITTO



Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu

Vipuvoimaa  
EU:lta  
2014–2020



Euroopan unioni  
Euroopan aluekehitysrahasto

XAMK TUTKII 24

KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU

KOTKA 2022

© Tekijät ja Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu  
Kannen kuva: Elias Altarriba  
Taitto ja paino: Grano Oy  
ISBN: 978-952-344-503-1 (PDF)  
ISSN: 2489-4575 (verkko)  
[julkaisut@xamk.fi](mailto:julkaisut@xamk.fi)

# TIIVISTELMÄ

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu toteutti Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu -hankkeen (MEPTEK) vuosina 2020–22. Hankkeen rahoitti Euroopan aluekehitysrahasto. Hankkeen tavoitteena on ollut tehdä kokonaisvaltainen analyysi meriliikenteen päästövähennystekniikoista, niiden tehokkuudesta ja sovellettavuudesta. Päämenetelminä ovat olleet kirjallisuustutkimus, päästömittaukset kulussa olevilla aluksilla ja päästödatan analysointi. Näiden perusteella on luotu Excel-ympäristössä toimiva päästövertailutyökalu, jonka avulla erityyppisiä aluksia voidaan vertailla keskenään käyttäjäystävällisesti. Hankkeen alkuperäisenä tavoitteena oli suorittaa päästömittauksia varsin laajasti ja luoda näin laaja päästödatapankki tutkijoiden käyttöön, mutta COVID-19-pandemian alkaminen keväällä 2020 esti päästömittausten toteuttamisen ennen kesää 2022. Lopulta päästömittauksetkin saatiin kuitenkin aloitettua, mutta pandemian takia alkuperäisiin määrällisiin tavoitteisiin ei päästy.

Toisaalta tällä ajanjaksolla merenkulun päästöt ovat olleet tärkeä puheenaihe: Maailmanlaajuinen rikkirajoitus kiristyi vuoden alussa 2020 ja Itämerestä tuli NECA-alue 2021. Euroopan komissio julkaisi heinäkuussa 2021 suunnitelmat Fit for 55 -ilmastotoimenpidepaketista, joka sisälsi useita ehdotuksia myös meriliikenteen päästöjen vähentämiseksi. Lisäksi meriliikenteen polttoaineiden koostumuksen ja kehittämisen osalta FuelEUMaritime-säädöspaketilla pyritään vähentämään tulevaisuudessa meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä. Lopulta vuonna 2022 Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja sen välillisenä seurauksena kehittynyt energiakriisi nosti merkittävästi erityisesti LNG:n hintaa muuttaen huomattavasti eri polttoainevaihtoehtojen taloudellista kilpailukykyä.

Asiasanat: Merenkulun päästöt, laivaliikenne, Itämeri



# ABSTRACT

The benchmarking study of emission reduction technologies (MEPTEK) is implemented by the South-Eastern Finland University of Applied Sciences in 2020-2022, funded by the European Regional Development Fund. The aim of the project has been to carry out a comprehensive analysis of marine transport emission reduction techniques, their effectiveness and applicability. The most important methods have been literature research, on-board emission measurement in ships, and analysis of emission data. Based on research done during this project, an emission comparison tool that works in the Excel environment has been created. Applying the tool, different types of ships can be compared in a user-friendly way. The original aim of the project was to carry out on-board emission measurements quite extensively and thus, create a large emission data bank for researchers, but the start of the COVID-19-pandemic in spring 2020 prevented the emission measurements from being carried out before the summer 2022. Finally, on-board measurements also started, but due to the pandemic, the original quantitative goals were not reached. On the other hand, during this research period, a lot of conversation regarding to maritime emissions has been on-topic: The global sulfur emission limit was tightened at the beginning of 2020 and the Baltic Sea became a NECA area in 2021. The European Commission published (a) climate action plan called “Fit for 55” in July 2021, including several proposals to reduce maritime transport emissions too. In addition, the aim of the FuelEU Maritime proposal affects the composition of the fuels used in maritime transport, which aims to reduce/aiming to reduce greenhouse gas emissions from the maritime sector. Finally, in 2022, Russia’s attack on Ukraine and the energy crisis that developed as an indirect result significantly increased the price of LNG, which remarkably changed the economic competitiveness of different fuel options.

Keywords: Maritime sector emissions, shipping, Baltic Sea

# LUKIJALLE

Meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu (MEPTEK) -hanke on toteutettu Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Logistiikka ja merenkulku- ja Metsä, ympäristö ja energia -vahvuusalojen yhteistyönä. Päärahoitus hankkeelle tuli Euroopan aluekehitysrahastosta Uudenmaan ja Kymenlaakson maakuntaliittojen jakamana. Hanke alkoi koronavuonna 1.5.2020 ja päättyi 31.12.2022. Hankkeen päätavoitteena on verrata erityyppisiä meriliikennekäytössä olevia päästövähennystekniikoita ja -menetelmiä. Johtoajatuksena alun perin oli tehdä päästömittauksia ja kulkudatan tallennusta kulussa olevilta aluksilta ja analysoida tätä dataa tilastollisin menetelmin sekä elinkaarianalyysiä soveltaen. Näiden menetelmien tavoitteena oli selvittää erityyppisten päästövähennysratkaisujen tehokkuuserot niiden todellisissa käyttöolosuhteissa. COVID-19-pandemia kuitenkin aiheutti haasteita mittausten järjestämisen osalta, kun työmatkustus ja matkustus ulkomaille oli ajoittain kokonaan kiellettyä. Lisäksi varustamoiden omat koronavarautumistoimet estivät käytännössä vierailut aluksilla. Tämän vuoksi hanke painottui huomattavasti enemmän teoreettiseen työhön kuin alun perin oli tarkoitus. Keväällä 2022 mittauksiakin päästiin vihdoin tekemään.

Meriliikenteen päästöjen vähentäminen on erittäin ajankohtainen asia. Hankkeen aikana tämä konkretisoitui useaan otteeseen, kun 14.7.2021 Euroopan komissio julkaisi Fit for 55 -ilmastopakettin, jossa päästökauppaa ehdotetaan laajennettavaksi muun muassa meriliikenteeseen. Yhtä merkittävä lanseeraus oli FuelEU Maritime-nimellä kulkenut toimintapohjainen ehdotus, jonka mukaan laivapolttoaineiden hiili-intensiteettiä on tarkoitus vähentää asteittain mutta määrätietoisesti seuraavien vuosikymmenien aikana.

Talvella 2021–2022 Eurooppa ajautui energiakriisiin Ukrainan sodan ja siihen liittyneen kehityskulun takia. Tämän seurauksena öljytuotteiden ja maakaasun hinnat kohosivat merkittävästi, mikä näkyi myös laivapolttoaineiden hintatasossa. Hintojen voimakas nousu sai aikaan merkittävän taloudellisen paineen varustamoille etsiä keinoja säästää polttoainetta. Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi polttoaineen kulutuksen vähentäminen on suoraviivaisin keino, mutta usein kaikkea muuta kuin helppo toteuttaa. Päästökaupan tarkoituksena on asettaa hiilidioksiditonille hinta ja näin tuottaa taloudellista painetta siirtyä vähähiilisiin ratkaisuihin. Käytännössä korkea polttoaineen hinta vaikuttaa tähän kokonaisuuteen samalla tavalla luoden voimakkaan taloudellisen kannustimen vähentää kulutusta tai investoida vaihtoehtoisin ratkaisuihin.

Helppoja ratkaisuja ei kuitenkaan ole tarjolla: Öljypohjaiset polttoaineet ovat tehokkaita ja soveltuvat ominaisuuksiltaan hyvin meriliikenteen voimanlähteeksi. Vaihtoehtoja on toki olemassa, mutta kilpailukyvyltään ne jäävät ainakin toistaiseksi vielä öljypolttoaineiden taakse. Tekniikka kuitenkin kehittyy koko ajan. Tämä loppuraportti avaa tätä kokonaisuutta lukijalle ja esittelee hankkeessa tehtyjä havaintoja.

*Elias Altarriba*, TkL, projektipäällikkö  
Kotkassa 31.12.2022

# TEKIJÄT

**ELIAS ALTARRIBA**, TkL, projektipäällikkö

Logistiikka ja merenkulku

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**SIRPA RAHIALA**, TkT, tutkimuspäällikkö

Kymilabs, Metsä, ympäristö ja energia

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**TARU TANHUANPÄÄ**, MMK, TKI-asiantuntija

Logistiikka ja merenkulku

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

**MARKO PIISPA**, tekn., laboratorioteknikko

Kymilabs, Metsä, ympäristö ja energia

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu

# SISÄLTÖ

TIIVISTELMÄ .....	3
ABSTRACT .....	4
LUKIJALLE .....	5
TEKIJÄT .....	7
MEPTEK-HANKKEEN TAUSTA JA TAVOITTEET .....	9
Elias Altarriba	
ALUSTEN PAKOKAASUPÄÄSTÖJEN KOOSTUMUS .....	21
Taru Tanhuanpää & Elias Altarriba	
EUROOPAN UNIONIN TAVOITTEET MERILIIKENTEEN PÄÄSTÖJEN RAJOITTAMISEKSI .....	38
Taru Tanhuanpää	
MERILIIKENTEEN POLTTOAINERATKAISUT .....	75
Elias Altarriba	
ÖLJYPOLTTOAINEIDEN HINTAKEHITYS .....	100
Taru Tanhuanpää	
PÄÄSTÖVÄHENNYSTEKNIIKOIDEN VERTAILU .....	125
Elias Altarriba	
PÄÄSTÖVÄHENNYSMENETELMIEN ELINKAARI- JA YMPÄRISTÖKUSTANNUSANALYYSI .....	160
Sirpa Rahiala	
PÄÄSTÖMITTAUKSET .....	186
Elias Altarriba & Marko Piispa	
PÄÄSTÖVÄHENNYSMENETELMIEN TALOUDELLISEN JA YMPÄRISTÖSUORITUSKYVYN VERTAILU .....	205
Sirpa Rahiala	

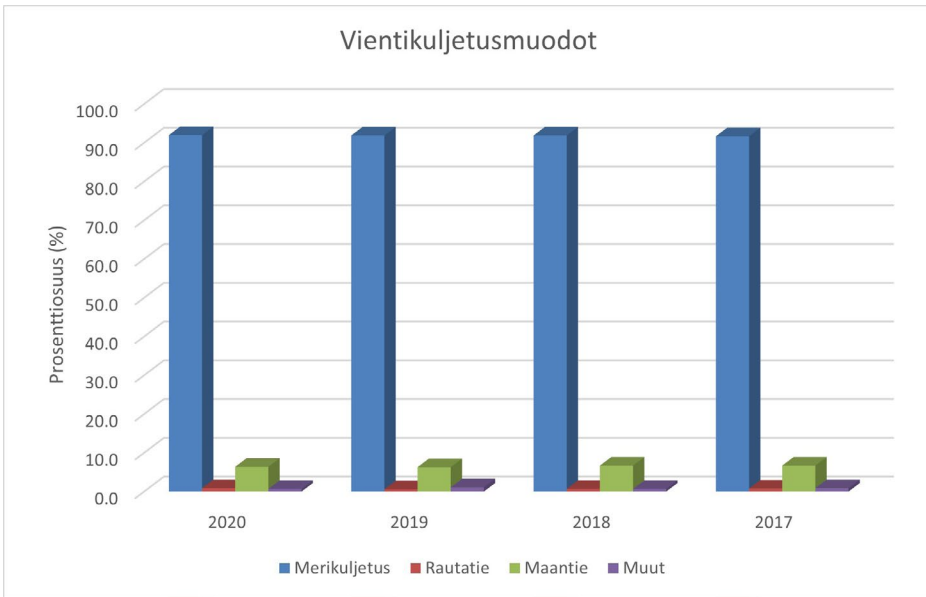
# MEPTEK-HANKKEEN TAUSTA JA TAVOITTEET

Elias Altarriba

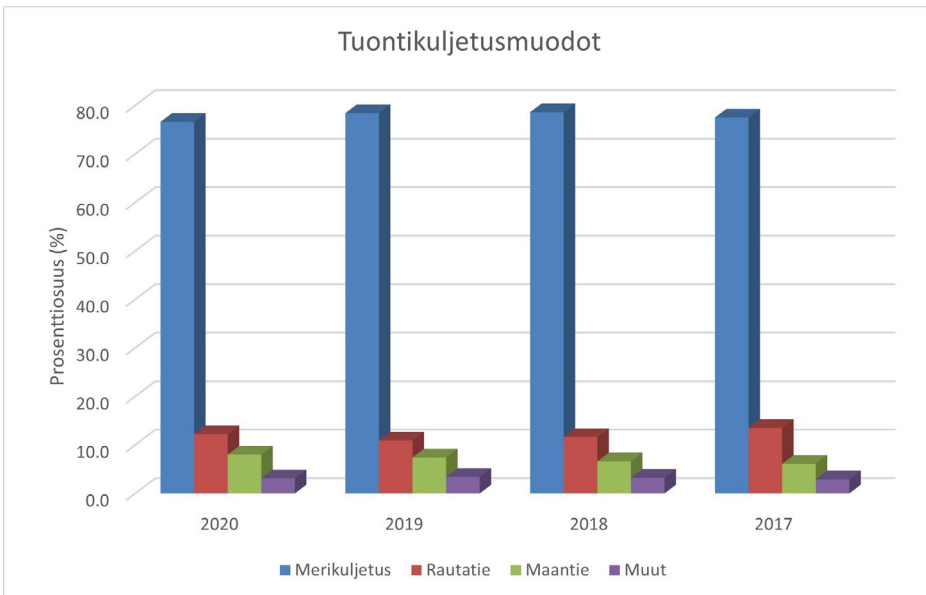
Gloaalien maailmanmarkkinoiden vaatimat logistiikkaketjut painottuvat vahvasti meriliikenteeseen. Merirahdista puhuttaessa monille tulee ensimmäisenä mieleen erityisesti maanosasta toiseen tapahtuva kontti- tai tankkeriliikenne. Merirahti liikenteen maantieteelliset pullonkaulat, kuten Suezin tai Panaman kanavat, mahdollistavat merkittävät oikoreitit merialueelta toiselle. Toisaalta juuri niiden merkittävän strategisen aseman vuoksi niiden mahdolliset toimintahäiriöt vaikuttavat helposti globaaleihin tavaravirtoihin laajalla skaalalla. Näitä voivat olla poliittiset kriisit, joita on esimerkiksi Suezin kanavaan liittynyt sen olemassaolon aikana useita, mutta myös onnettomuudet, kuten Ever Given -konttialuksen juuttuminen Suezin kanavaan 23.3.2021. Lisäksi merenkulussa öljyllä polttoaineena on vahva asema: Kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n mukaan suurin osa kauppamerenkulun aluksista käyttää polttoaineenaan raskasta polttoöljyä ja esimerkiksi nesteytettyä maakaasua eli LNG:tä polttoaineena hyödyntävien alusten osuus globaalissa laivastossa on vielä marginaalinen (IMO, 2020, 6–8). Maakaasukin on tosin fossiilinen polttoaine öljyn tapaan.

Valtameriliikenteessä rahdin kuljetus on keskittynyt erityisesti suuriin konttisatamiin, kuten Euroopan suurimpaan konttisatamaan Rotterdamiin (IMO, 2020, 52). Itämerelle suuntautuvaa liikennettä rajoittaa Tanskan salmien kulkusyvyys, mikä käytännössä rajoittaa Rotterdamin kaltaisten solmukohtien muodostumista Itämeren alueelle. Itämeren ranta-  
valtioille merenkulku on kuitenkin erittäin tärkeä kuljetusmuoto, ja esimerkiksi Suomen ulkomaankaupassa merikuljetukset ovat ylivoimaisesti tärkein kuljetusmenetelmä. Kuvissa 1 ja 2 visualisoidaan merikuljetusten hallitsevuutta. Erityisesti vientisektorilla puhutaan lähes 90 prosentin osuudesta, siinä missä tuonnin puolella osuus jää ”vain” noin 80 prosenttiin (Suomen tulli, 2020). Käytännössä trendi on ollut tämä jo pitkään, eikä lähitulevaisuudessa ole nähtävissä tähän oleellisesti vaikuttavia muutoksia. Logistisesti Suomi on saari, vaikkakin maantieteellisesti näin ei tietenkään ole.





**Kuva 1.** Suomen meri-, rautatie-, maantie- ja muiden kuljetusmuotojen osuus vientilogistiikassa. Datan lähde: Suomen tulli, 2020.



**Kuva 2.** Suomen meri-, rautatie-, maantie- ja muiden kuljetusmuotojen osuus tuontilogistiikassa. Datan lähde: Suomen tulli, 2020.

## Itämeren meriliikenteen erityispiirteet

Itämeren liikenteessä on kansainvälisesti tarkasteltuna monia erityispiirteitä: Meri on varsin matala, ja erityisesti Suomen rannikko on karikkoinen ja saaristoinen merialue. Alueella on merkittävästi öljy- ja kemikaalikuljetuksia, kontti- ja kuivarahtikuljetuksia sekä matkustajaliikennettä. Alueella liikkuu kansainvälisiä risteilyaluksia, mutta hyvin tavallisia ovat suurempien rannikkokaupunkien välillä liikkuvat, kiinteitä linjoja operoivat ROPAX-alukset (roll on/roll off & passenger). Erityisesti Helsingin ja Tallinnan, Helsingin ja Tukholman, Turun ja Tukholman, Tallinnan ja Tukholman, Riian ja Tukholman, Trelleborgin ja Travemündens sekä Helsingin ja Travemündens välinen ROPAX-liikenne on vilkasta. Vastaavia linjoja kulkee myös muun muassa Naantalin ja Kapellskärin, Vaasan ja Uumajan, Gotlannin ja manner-Ruotsin, sekä Etelä-Ruotsin ja Puolan, välillä. (Jalkanen & Johansson, 2019, 5; Raza et al., 2019, 3–7.)

ROPAX-linjojen operoinnissa on lukuisia erityispiirteitä: niiden aikataulut on varsin tiukka ja pääsy satamiin aikataulun mukaisesti on käytännössä varmistettu nimetyillä aluspaikoilla. Tämä on merkittävä ero verrattuna muuhun rahtiliikenteeseen, jossa satamiin pääsyä joudutaan joskus odottamaan ankkuripaikoilla pidempäänkin, jos satama on ruuhkainen. Aikataulut on pyritty sovittamaan siten, että lähtö- ja saapumisajat synkronoisivat mahdollisimman hyvin matkustajien ja rekkarahdin aikataulujen kanssa. Parhaimmillaan rekkakuski pystyy näin tekemään täyden ajopäivän ennen saapumistaan laivalle, täyttämään merimatkan aikana lakisäätteiset lepoaikavaatimukset ja laivan saavuttua perille tekemään välittömästi uuden täyden ajopäivän. Käytännössä tämä merkitsee, että näiden ROPAX-alusten matkanopeudet ovat useilla linjoilla suhteellisen suuria, luokkaa 20 solmua.

Talvisin Itämerellä jääolosuhteet ovat tavallisia. Jäätyminen alkaa Perämereltä ja Suomenlahden perukoilta yleensä viimeistään joulukuussa (Räisänen, 2017, 22–24). Ilmaston lämpenemisen seurauksena jäätalvien erot ovat kuitenkin kasvaneet merkittävästi. On talvia, jolloin jäitä on ainoastaan Perämerellä, Suomenlahden pohjukassa ja saaristossa. Toisaalta ankarat jäätalvet, joina meri voi jäätä Gotlannin-Baltian tasalle asti, eivät ole myöskään tavattomia. Jäätalven ankaruus ei kuitenkaan suoraan riipu ainoastaan jäätyneen alueen laajuudesta. Mikäli talvi on hyvin tuulinen ja sisältää useita kylmiä jaksoja, voivat liikkuvat jääkentät kasautua vaikeiksikin ahtojäävalleiksi erityisesti Merenkurkkuun tai Suomenlahdelle. Nämä voivat jumiuttaa jääolosuhteissa muutoin hyvin selviävät alukset, jolloin jäänmurtaajien tarjoamat avustuspalvelut nousevat hyvin tärkeiksi talvimerenkulun toimivuuden kannalta. Kuvassa 3 on nähtävissä jään laajuus normaalina jäätalvena 2020–2021 (Ilmatieteen laitos, 2021).

Erityisesti monet Itämerellä liikennöivät ROPAX-alukset on suunniteltu toimimaan jääolosuhteissa. Niiden jääluokitus on yleisesti ottaen 1A Super, mikä käytännössä mahdollistaa itsenäisen operoinnin normaalin jäätalven aikana. Korkea jääluokitus edellyttää alukselta monia teknisiä ominaisuuksia, kuten riittävän vahvaa runkoa ja aluksen massaansa nähden riittävästi moottoritehoa. Nämä ovat sellaisia ominaisuuksia, jotka vaikuttavat suoraan aluksen polttoaineen kulutukseen myös avovesikautena koko aluksen elinkaaren ajan. Tämä näkyy käytännössä myös päästöissä, sillä EEDI (energy efficiency design index) -energiatohokkuuskriteerejä ei korkeasti jääluokitettu alus pysty täyttämään samalla suorituskyvyllä verrattuna jääluokittelemattomaan alukseen. Tämä on erityispiirre, joka koskee erityisesti Itämerellä ympärivuotisessa liikenteessä operoivia varustamoja.



**Kuva 3.** Itämeren jäätilanne talvella 2020–2021. Datan lähde: Ilmatieteen laitos 2021.

Kasvihuonekaasupäästöjä on kuitenkin tavalla tai toisella pyrittävä rajoittamaan ilmastonmuutoksen hillitsemiseksi. Meriliikenteen osuus globaaleista päästöistä on vajaan kolmen prosentin luokkaa (IMO, 2020, 112). Rahtiliikenteessä rahtitonnimailia kohden laivojen tuottamat päästöt ovat muihin liikennemuotoihin verrattuna alhaiset (IMO, 2020, 206–213). On kuitenkin syytä huomioida, että alustyyppien keskinäiset eroavaisuudet ovat suuria (Jalkanen & Johansson, 2019, 3). Suurten rahtimassojen kuljettaminen meriteitse on suhteellisen vähäpäästöistä verrattuna esimerkiksi tieliikenteeseen. Puhuttaessa risteilyaluksista tilanne ei kuitenkaan ole näin suoraviivainen, sillä matkustajat ja laivalla tuotettavat palvelut tarvitsevat ympärilleen tilaa, jolloin risteilypalvelun tuottaminen vaatii väistämättä ”lastiin” nähden suhteellisen suurikokoisen aluksen. On olemassa monentyyppisiä matkustaja-aluksiakin eri käyttötarkoituksiin: turistiristeilyjen kohdalla tilantarve korostuu, siinä missä lauttayhteydet tyypillisesti mahdollistavat tilankäytöllisesti tehokkaammat ratkaisut. Aikataulutustarpeet vaikuttavat myös kokonaisuuteen, sillä risteilyalusten tavoitteena on ajoittaa siirtymät yöaikaan ja mahdollistaa näin päivittäiset satamakäynnit. Näissä tapauksissa on usein kiinnitettävä suhteellisesti enemmän huomiota alusten tuottamiin päästöihin satamissa verrattuna vaikkapa pitkää valtamerilinjaa operoivaan konttialukseen.

Itämerellä tyypilliset, kiinteitä reittejä operoivat ROPAX-alukset ovat eräänlainen välimuoto rahti- ja risteilyalusten välillä. Rahtitonneihin suhteutetut päästömäärät yleensä kasvavat johtuen mukana kulkevan kumipyöräkaluston tehottomammasta tilankäytöstä. Lisäksi aluksissa on yleensä varsin hyvin varusteltu hotellipuoli matkustajia varten. Monet linjoista on myös varsin tiukasti aikataulutettu, jolloin ajonopeudet ovat moniin rahtilaivoihin verrattuina suhteellisen suuria (Jalkanen & Johansson, 2019, 6–9.). Lisäksi aluksille tyypillinen korkea jääluokitus lisää polttoaineen kulutusta. Satamassaoloajat vaihtelevat linjoittain muutamasta tunnista päiväpysähdyksiin. Toisaalta näillä aluksilla on yleensä kiinteät satamapaikat käytössään. Tällöin investoinnit esimerkiksi maasähkövalmiuteen tai muiden satamafasiliteettien parempaan hyödyntämiseen ovat monissa tapauksissa huomattavasti kannattavampia verrattuna viljejä linjoja operoiviin rahtialuksiin.

## Vaihtoehtoja päästöjen vähentämiseksi

Laivat ovat kooltaan ja massaltaan suuria, jolloin niiden liikuttelu vaatii väistämättä paljon energiaa riippumatta propulsiojärjestelmäratkaisusta. Tällä hetkellä meriliikenteessä vallitsevana propulsiojärjestelmänä on neli- tai kaksitahtinen dieselmäntämoottori, joka käyttää polttoaineenaan fossiilista öljyä. Raskas tai keskiraskas polttoöljy on kansainvälisesti eniten käytetty laivapolttoaine (IMO, 2020, 6–8.). Etenkin suurissa aluksissa on riittävästi tilaa raskaan polttoöljyn polttoaineensyöttöjärjestelmälle esilämmitys- ja käsittelylaitteistoinen, ja

raskaan polttoöljyn maailmanmarkkinahinta on suhteellisen vähäisen kysynnän vuoksi ollut moniin muihin öljytuotteisiin verrattuna edullinen. Vuonna 2020 astui voimaan globaali rikkirajoitus koskien myös raskasta polttoöljyä (IMO s.a.). Rikkirajoitus määrittää polttoaineen enimmäisrikkipitoisuudeksi 0,5 %, mikäli alusta ei ole varustettu rikkipesureilla. Itämerellä säännöstö on ollut tiukempi: vuodesta 2015 alkaen Itämeri on määritelty rikkirajoitus-, eli SECA-alueeksi, missä enimmäisrikkipitoisuus ilman rikkipesureita on vain 0,1 %. Tämä on käytännössä johtanut siihen, että rikkipesurittomat alukset ovat siirtyneet käyttämään kevyitä tislepolttoöljyjä MGO:ta (marine gas oil) tai MDO:ta (marine diesel oil) tai vaihtoehtoisesti vähärikkistä raskasta jäännöspolttoöljyä (esim. RMB). Myös kaksoispolttoainemoottoreilla varustettuja LNG-aluksia on otettu käyttöön erityisesti kiinteillä ROPAX-linjoilla.

LNG on kiistanalainen polttoaineratkaisu (Grönholm et al., 2022, 13681–13685): Nesteytetty kaasu palaa puhtaammin verrattuna polttoöljyihin, mutta toisaalta metaani on hiilidioksidiin verrattuna huomattavasti pahempi kasvihuonekaasu, ja kaasulaivojen metaanivuodot ovat ongelmallinen ilmiö. Ukrainan sodan ja venäläiseen energiaan kohdistettujen pakotteiden seurauksena LNG:n hinta on noussut merkittävästi talvella 2021–2022, ja nousu on jatkunut vuoden 2022 aikana. Tämän seurauksena operoiminen LNG:llä ei ole ollut taloudellisesti läheskään yhtä houkuttelevaa takavuosiin verrattuna.

Fossiiliseen öljyyn perustuvien polttoaineiden korvaaminen laivaliikenteessä on haasteellista (Ytreberg et al., 2021, 1–3): Aluksen on kyettävä kuljettamaan mukansa tarvitsemansa energiamuoto, ja polttoöljyjen energiatiheys tilavuuteen nähden on suuri. Kiinteiden linjojen osalta polttoainetäydennysratkaisuihin on helpompi tehdä erityisinvestointeja, mutta etenkin viljejä linjoja operoivien alusten osalta teknisten ratkaisujen on taattava aluksen huoltovarmuus eri satamissa. Tietoyhteiskunta on sosiaalisena yhteisönä varsin nopeatemppoinen, jolloin rahdin ja matkustajien on kuljettava aikataulussa, ja täten tavoitteena on minimoida vallitsevien olosuhteiden vaikutukset aluksen kulkueen.

Fossiilisen öljyn korvaaminen bioöljyillä tai -kaasulla on yksi lähestymistapa edesauttaa suljettujen hiilikierrojen muodostumista (Coronado et al., 2009, 1889–1892). Suljetussa hiilikierrossa hiilidioksidi, joka syntyy polttoainetta poltettaessa, sidotaan polttoaineeseen sitä valmistettaessa. Näin hiilidioksidin määrä ilmakehässä ei nousisi. Tämä (fossiilisten öljyn korvaaminen) kuitenkin vaatii kokonaisen tuotantoinfrastruktuurin rakentamista, sillä näiden tuotteiden nykyiset tuotanto- ja jakeluverkot eivät millään riitä kattamaan kysyntää. Metanolia on esitetty yhdeksi vaihtoehdoksi fossiilisen öljyn korvaajana, sillä se soveltuu käytettäväksi metanolille modifioitujen polttomoottoreiden polttoaineena ja varastointi onnistuu nesteinä huoneenlämmössä (Olah, 2005, 2636–2639). Metanolitalouden mahdollistava infrastruktuuri kuitenkin käytännössä puuttuu, mikä estää nopeat siirtymät.

Myös ammoniakkia on esitetty hiilettömäksi polttoainevaihtoehdoksi fossiiliselle öljylle vastaavin käytännön ongelmin (Giddey et al., 2017, 10231–10239).

Erilaisilla savukaasujen puhdistusratkaisuilla tavoitellaan haitallisten yhdisteiden vähentämistä (Ytreberg et al., 2021, 1–2). Hiilidioksidin osalta haasteena on sen muodostuminen palamisprosessissa varsin lineaarisesti suhteessa kulutettuun polttoaineeseen (IMO, 2020, 74). Hiilidioksidin talteenottojärjestelmät ovat vasta kehityksessä oleva teknologia, ja tilantarpeesta johtuen niiden sovellukset tulevat yleistymään ensin maalaitoksissa. Typen oksidien päästöt muuttuvat palamislämpötilan ja sitä myötä koneen kuormituksen mukaan (IMO, 2020, 75). Näiden vapautumiseen on mahdollista vaikuttaa monilla teknisillä ratkaisuilla: palamislämpötilaa voidaan alentaa vesiruiskutusjärjestelmillä tai imuilman höyrynkostutuksella. Käytännössä katalysaattoriratkaisut ovat kuitenkin tehokkaampia ja niiden avulla on mahdollista täyttää IMO:n määrittelemät TIER III -vaatimukset typen oksidien enimmäismäärille (IMO s.a.). Pakokaasujen takaisinkierätyjärjestelmä EGR tulee yleistymään myös meriliikenteessä rajoittaen typen oksidien muodostumista jo palamisvaiheessa. Rikkipäästöjen osalta suoraviivaisin ratkaisu on vähentää polttoaineiden rikkipitoisuutta, mutta rikki on vesiliukoisena mahdollista myös pestä pois savukaasuista rikkipesureilla (IMO, 2020, 70). Satamissa apukoneiden tuottamat lähipäästöt voidaan poistaa maasähköä hyödyntämällä.

Yksinkertaista kaikkeen toimivaa ratkaisua ei kuitenkaan ole tarjolla: satamissa syntyvät päästöt ovat haittavaikutukseltaan usein moninkertaisia johtuen asutuksen läheisyydestä, siinä missä merellä liikkuvien alusten tuottamat päästöt kuormittavat ensisijaisesti ilmakehää (Teinilä et al., 2018, 1–28). Toisaalta rikkipesureiden pesuvedet, LNG:n metaanipäästöt, polttoaineiden tai maasähkön tuotantoprosessin aikaiset päästöt, ratkaisujen käytettävyys ja sovellettavuus sekä vallitsevat taloudelliset realiteetit tekevät kombinaatiosta haastavan kokonaisuuden, mikäli tavoitteena on tehdä meriliikenteestä nollapäästöistä tai edes vähemmän päästöjä tuottava kuljetussektori.

## MEPTEK-hankkeen tuotokset

Tämä julkaisu koostaa Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun MEPTEK (meriliikenteen päästövähennystekniikoiden vertailu) -hankkeen keskeiset havainnot yksiin kansiin. Tämän lisäksi hankkeessa on tuotettu seuraavat opinnäytetyöt:

- Mona Untolahti: Satamien päästömäärät
- Jimi Koivuniemi: Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu
- Väinö Hotti: Meriliikenteen päästövähennystekniikat satamissa
- Nicolò Anfossi: LNG supply analysis in the European context: Comparison between Italy and Finland



Untolahden työssä (Untolahti, 2021) käsitellään Haminan, Kotkan ja Helsingin satamien päästömäärien ja -laatuojen kehittymistä. Satamien ympäristöluvut edellyttävät ilman ja vesistöjen päästöjen, sekä maahan päätyvien päästöjen, seuranta. Satamat ovat velvollisia raportoimaan vuosittain näistä päästömääristä alueen Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle. Opinnäytetyössä perehdyttiin näihin raportteihin ja niiden sisältämään dataan. Raportoinnin etuna on tilannekuvan muodostuminen päästöläjien ja -määrien kehittymisestä vuosien saatossa. Vaikka näiden satamien liikennemäärät ovatkin tarkastelujaksolla kasvaneet, tästä huolimatta päästöjä on saatu vähennettyä. Lisätietoja asiasta on luettavissa opinnäytetyöstä.

Koivuniemen työssä (Koivuniemi, 2021) vertaillaan Itämerellä käytettäviä laivapolttoaineita keskittyen pääasiassa kolmeen polttoainetyyppiin. Tietoa on haettu niin kirjallisuudesta, tilastoista kuin alan asiantuntijoita haastattelemallakin. Työssä pohditaan myös tulevaisuuden vaihtoehtoja meriliikenteen energianlähteiksi, mikäli fossiilisesta öljystä halutaan päästä eroon. Polttoaineratkaisuilla on merkittävä vaikutus päästöläjien ja -määriin. Etenkin asiantuntijoiden haastattelussa tuli hyvin ilmi, että monet julkisuudessa esitetyistä ratkaisuista eivät oikeasti ole läheskään niin mustavalkoisia kuin usein annetaan ymmärtää.

Hotin opinnäytetyö (Hotti, 2022) käsittelee päästövähennysmenetelmien ja satamien infrastruktuurin vuorovaikutusta. Osa menetelmistä ei vaadi satamatoiminnoilta mitään erityistoimia. Osa taas vaatii: esimerkiksi LNG-alukset vaativat kaasubunkrausmahdollisuuksia, kun taas maasähköön liittyminen edellyttää valmiutta paitsi laivoilta, myös satamilta. Toisaalta etenkin lähipäästöjen väheneminen parantaa vastaavasti ilmanlaatua satamissa ja niiden lähiympäristöissä. Etenkin Kymenlaakson ja Uudenmaan alueella sijaitsevat Suomen mittakaavassa varsin tärkeät tuonti- ja vientisatamat, minkä vuoksi asia koskettaa erityisesti näitä maakuntia.

Anfossin opinnäytetyö (Anfossi, 2022) käsittelee LNG:n jakeluinfrastruktuurirakenteita ja vertailee Suomen ja Italian olemassa olevaa infrastruktuuria, tulevaisuuden investointisuunnitelmia ja -tarpeita. Kaasualusten yleistyessä oleellista on, että jakeluinfrastruktuuri pysyy kehityksessä mukana. Infrastruktuurista on suoraa hyötyä myös silloin, mikäli fossiilista kaasua korvataan tulevaisuudessa biokaasulla.

Hankkeen tiimoilta on tuotettu kaksi konferenssijulkaisua:

- Elias Altarriba, Sirpa Rahiala, Taru Tanhuanpää, Marko Piispa, 2022. Improving the environmental performance of shipping and maritime transport – Highlights of the maritime emissions workshop. 6<sup>th</sup> International conference on maritime technology and engineering, 24–26 May 2022, Lisbon, Portugal.

- Elias Altarriba, Sirpa Rahiala, Taru Tanhuanpää, Marko Piispa, 2022. Developing sustainable shipping and maritime transport: Multi-criteria analysis between emission abatement methods. 19<sup>th</sup> International congress of the international maritime association of the Mediterranean, 26–29 September 2022, Istanbul, Turkey.

MARTECH 2022-konferenssi on Lissabonin teknillisen yliopiston merenkulkuosaston järjestämä merenkulun teknologian ja insinööriosaimisen kansainvälinen tieteellinen konferenssi. Konferenssi järjestettiin kuudetta kertaa ja siellä pidettiin esitelmä hankkeen tiimoilta 6.10.2021 järjestetyn kansallisen Merenkulun päästöt -työpajan esitelmissä ja keskusteluissa esiin nousseista asioista (Altarriba et al., 2022a). Monet asioista ovat globaaleja, mutta toisaalta Suomen riippuvuus merenkulusta ja talvimerenkulun tuottamat ominaispiirteet edellyttävät, että näistä asioista viestitään myös kansainvälisesti. Tämä korostuu Euroopan Unionin valmistellessa päästökaupan laajentamista merenkulkuun sekä uutta meriliikennepolttoainedirektiiviä, joka alentaisi fossiilisen öljyn osuutta lähivuosikymmeninä tuntuvasti.

IMAM 2022 -konferenssissa esiteltiin hankkeen aikana kehitetyn päästöanalyysityökalun tuottamia tuloksia eri päästövähennystekniikoiden ja -menetelmien keskinäisistä eroavaisuuksista (Altarriba et al., 2022b). Työkalu mahdollistaa erilaisten skenaarioiden luomisen ja niiden tarkastelun kokonaisvaltaisesti. Työkalu on luotu Excel-ympäristöön, jotta mahdollisimman moni käyttäjä pystyisi hyödyntämään sitä.

Viestintä yleisölle ja sidosryhmille on olennainen osa hanketyöskentelyä. Osana tätä viestintää hanketta on pidetty esillä lukuisissa julkaisuissa, joiden tavoitteena on ollut viestiä aihepiiristä, sen uusista trendeistä ja ylipäättään hankkeen etenemisestä. Hankkeen aikana on julkaistu seuraavat artikkelit:

- Sirpa Rahiala, Elias Altarriba, Marko Piispa, Taru Tanhuanpää, 2022. Päästövähennysmenetelmien suorituskyvyn mittaukset todellisissa olosuhteissa Itämerellä. Teoksessa Soininen, Haatanen ja Pulkkinen (toim.): Metsä, ympäristö ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2022. Mikkeli: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Elias Altarriba, Sirpa Rahiala, Taru Tanhuanpää, 2022. IMAM konferenssi. Teoksessa Henttu (toim.): Maalla, merellä, ilmassa. Katsaus Logistiikan ja merenkulun tutkimus- ja kehitystoiminnasta 2022. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Elias Altarriba, Taru Tanhuanpää, 2022. Tutkimuksen teko on yhteistyötä – Referaatti MARTECH 2022-konferenssiesitelmistä. Teoksessa Henttu (toim.): Maalla, merellä, ilmassa. Katsaus Logistiikan ja merenkulun tutkimus- ja kehitystoiminnasta 2022. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Elias Altarriba, 2022. Merenkulun ilmapäästöjä tutkitaan. Xamk Read 1/2022.

- Elias Altarriba, 2022. Yhteenvedo meriliikenteen ympäristövaikutuksista. Teoksessa Hämäläinen & Poikolainen (toim.): Visiona kestävämpi tulevaisuus: Pelaamalla vähähiilisempi yhteiskunta. Xamk kehittää 190, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Elias Altarriba, 2021. Benchmarking study of marine emission reduction technologies. Merikotka annual report, KMRC, 2021.
- Elias Altarriba, 2021. Fit for 55 määrittää päästövähennyksen suuntaviivoja meriliikenteessäkin. Xamk Read, 3/2021.
- Elias Altarriba, Taru Tanhuanpää, 2021. Päästökauppa on laajentumassa meriliikenteeseen 2020-luvun aikana. Teoksessa Henttu & Potinkara (toim.): Tulevaisuutta tekemässä: Tuloksia Logistiikan ja merenkulun tutkimus- ja kehitystoiminnasta 2021. Xamk kehittää 177, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Sirpa Rahiala, Elias Altarriba, Marko Piispa, 2021. MEPTEK-hankkeessa työskennellään monialaisilla menetelmillä. Teoksessa Soininen, Haatanen & Pulkkinen (toim.): Metsä, ympäristö ja energia: Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2021. Xamk kehittää 183, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Elias Altarriba, 2020. Xamk jatkaa vahvaa meriliikenteen tutkimusta. Xamk Read 1/2020.
- Elias Altarriba, Sirpa Rahiala, Marko Piispa, 2020. MEPTEK-merenkulun päästövähennystekniikoiden vertailuhanke käynnistyi koronan varjossa. Teoksessa Henttu & Potinkara (toim.): Suuntaa antamassa: Tuloksia Logistiikan ja merenkulun tutkimus- ja kehitystoiminnasta. Xamk kehittää 129, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Sirpa Rahiala, Elias Altarriba, Marko Piispa, 2020. Puhtaamman meriliikenteen mahdollisuudet. Teoksessa Soininen, Haatanen, Pulkkinen (toim.): Metsä-, ympäristö- ja energia. Soveltavaa tutkimusta ja tuotekehitystä. Vuosijulkaisu 2020. Xamk kehittää 131, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Hanketyöryhmämme kiittää hankkeen päärahoittajatahoa Euroopan aluekehitysrahastoa ja rahoituksesta päättäneitä Kymenlaakson ja Uudenmaan maakuntaliittoja. Kiitokset ohjausryhmäläisille (Annukka Lehikoinen, Meriturvallisuuden ja -liikenteen tutkimuskeskus Merikotka; Jukka-Pekka Jalkanen, Ilmatieteen laitos; Ville-Veikko Intovuori, Liikenne- ja viestintävirasto Traficom; Ilari Rainio, Väylävirasto; Mats Björkendahl, Suomen Varustamot ry; Okko Outinen, Suomen Ympäristökeskus SYKE; Timo Rosendahl, HaminaKotka Sata-ma oy; Petteri Jernström, Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu; Anna-Riikka Karhunen, Kymenlaakson liitto) sekä Uudenmaan maakuntaliiton Antti Taroselle. Kiitokset myös Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoululle hankkeen omarahoitusosuuden kattamisesta.

Päästöjen vähentämiseksi ja ilmastomuutoksen hillitsemiseksi on tehtävä vielä paljon työtä. Tämä hanke on ollut osa tätä globaalia prosessia.

## LÄHTEET

Altarriba, E., Rahiala, S., Tanhuanpää, T., Piispa, M. 2022a. Improving the environmental performance of shipping and maritime transport – Highlights of the maritime emissions workshop. Teoksessa Guedes-Soares & Santos (toim.): Trends in maritime technology and engineering, vol. 2. Proceedings of the 6<sup>th</sup> international conference on maritime technology and engineering. London: CRC Press.

Altarriba, E., Rahiala, S., Tanhuanpää, T., Piispa, M. 2022b. Developing sustainable shipping and maritime transport: Multi-criteria analysis between emission abatement methods. Teoksessa Ergin & Guedes-Soares (toim.): Sustainable development and innovations in marine technologies. Proceedings of the 19<sup>th</sup> international congress of the international maritime association of the Mediterranean. London: CRC Press, 77–84.

Anfossi, N. 2022. LNG supply analysis in the European context: Comparison between Italy and Finland. Genova: Università degli studi di Genova scuola di scienze sociali dipartimento di economia, gestione degli investimenti e finanziamenti delle aziende di transport.

Coronado, C.R., Andrade de Carvalho, J., Yashioka, J.T., Silveira, J.T. 2009. Determination of ecological efficiency in internal combustion engines: The use of biodiesel. *Applied thermal engineering*, 29, 1887–1892.

Giddey, S., Badwal, S.P.S., Munnings, C., Dolan, M. 2017. Ammonia as a renewable energy transportation media. *ACS sustainable chemistry & engineering*, 5(11), 10231–10239.

Grönholm, T., Mäkelä, T., Hatakka, J., Jalkanen, J-P., Kuula, J., Laurila, T., Laakso, L., Kukkonen, J. 2022. Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station. *Environmental science and technology*, 55(20), 13677–13686.

Hotti, V. 2022. Meriliikenteen päästövähennystekniikat satamissa. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Ilmatieteen laitos. 2021. Ice season in the Baltic Sea. WWW-dokumentti. Viitattu 11.11.2021. Saatavissa: [en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-season-in-the-baltic-sea](https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ice-season-in-the-baltic-sea)

International maritime organization IMO. 2020. Fourth IMO GHG study 2020. London: IMO.

International maritime organization IMO. s.a. IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. WWW-dokumentti. Viitattu 29.11.2022. Saatavissa: [imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx](https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx)

Jalkanen, J-P., Johansson, L. 2019. Emissions from Baltic Sea shipping in 2006–2018. Maritime working group Lisbon, Portugal, 23–26 September 2019.

Koivuniemi, J. 2021. Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Olah, G.A. 2005. Beyond oil and gas: The methanol economy. *Angewandte chemie international edition*, 44(18), 2636–2639.

Raza, Z., Woxenius, J., Finnsgård, C. 2019. Slow steaming as part of SECA compliance strategies among RORO and ROPAX shipping companies. *Sustainability*, 11(5), article 1435.

Räisänen, J.A. 2017. Future climate change in the Baltic Sea region and environmental impacts. London: Oxford university press.

Suomen tulli. 2020. International trade transports. Helsinki: Suomen tullin tilastot.

Teinilä, K., Aakko-Saksa, P., Jalkanen, J-P., Karjalainen, P., Bloss, M., Laakia, J., Saarikoski, S., Vesala, H., Pettinen, R., Koponen, P., Kuittinen, N., Piimäkorpi, P., Timonen, H. 2018. Effect of aftertreatment on ship particulate and gaseous components at ship exhaust. Helsinki: Finnish meteorological institute, Envisum WP2 report.

Untolahti, M. 2021. Haminan, Kotkan ja Helsingin satamien päästö määrin ja -laatuksen kehittyminen. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Ytreberg, E., Åström, S., Fridell, E. 2021. Valuating environmental impacts from ship emissions – the marine perspective. *Journal of environmental management*, 282, article 111958.

# ALUSTEN PAKOKAASU- PÄÄSTÖJEN KOOSTUMUS

Taru Tanhuanpää & Elias Altarriba



© Elias Altarriba

Meridieselmootoreiden tuottamat päästökäomponentit ovat tyypiltään vertailukelpoisia muiden mäntämootoreiden tuottamiin päästöihin (IMO, 2020, 74; Repka et al., 2017, 14–18). Hiilidioksidipäästöt ovat seurausta polttoaineina toimivien hiilivety-yhdisteiden polttamisesta. Dieselmootoreille tyypilliset typen oksidien päästöt ovat merkittävä ongelma erityisesti merimootoreissa. Rikkiyhdistepäästöt ovat seurausta lähinnä polttoaineen sisältämästä rikistä, jonka määrää on rajoitettu merkittävästi vasta viime aikoina. Toisaalta monet muissa yhteyksissä toteutetut polttomootoreiden päästörajoitusmenetelmät ovat skaalattavissa ja sovellettavissa myös meriliikenteeseen. Keskeiset meriliikenteen dieselmootoreiden tuottamat ilmapäästökäomponentit on esitelty loppuraportin tässä artikkelissa.



Dieselprosessissa polttoaineen ruiskutus sylinteriin aloitetaan aivan puristusvaiheen lopussa männän ollessa liki yläkuolokohdassaan. Sylinteriin ahtimen kompressoima ilmamassa kuumenee puristustahdin aikana liki adiabaattisesti mahdollistaen polttoaineen syttymisen. Vaadittava ruiskutusaine tuotetaan korkeapainepumpuilla, ja annostelu sylintereihin tapahtuu polttoaineen ruiskutuslaitteiden avulla. Dieselprosessissa ruiskutusainetta tarvitaan lähtökohtaisesti vähintään useita satoja bareja mahdollistamaan polttoaineen virtaaminen paineistettuun sylinteriin. Yhteispainejärjestelmissä ruiskutusaineita on kasvatettu huomattavasti, minkä tavoitteena on parantaa polttoainepisaroiden atomisoitumista. Raskaalla polttoöljyllä toimivien moottoreiden polttoaine esilämmitetään kattiloiden tuottamalla prosessihöyryllä yleensä 60–80 °C lämpötilaan mahdollistamaan polttoöljyn suodatettavuus ja pumpattavuus. Päivätankista polttoaine siirretään separaattorille, jossa polttoaineesta erotellaan suurimmat epäpuhtaudet ja vesimolekyylit. Suodatusten jälkeen polttoaineen syötöstä moottoreille huolehtivat boosteriyksiköt. (Woodyard & Latarche, 2009, 1–40.)

Polttoainesumun virratessa suuttimesta sylinterin kuuman ilmamassan sekaan sumu pisaroituu ja kevyet ainesosat, kuten vesi ja kevyet hiilivedyt, höyrystyvät. Palaminen alkaa höyrystyneiden hiilivetyjen reagoidessa happia sisältävän ilman kanssa, jolloin vapautuu lämpöenergiaa ja raskaammista rakenteista muodostuvien pisaroiden pintalämpötila kasvaa edelleen. Lopulta itse pisarat palavat vapauttaen lämpöenergiaa. Seurauksena sylinterin kaasuseoksen paine kasvaa, ja paisuva kaasuseos työntää kiertokankeen kytkettyä mäntää tuottaen näin mekaanista energiaa. Polttoöljyt ovat kemiallisesti hiilivetyjä, joten ideaalitalanteessa polttoaineen hiilen palaessa syntyy palamistuotteena hiilidioksidia ja lämpöä, ja vedyn palaessa höyrystynyttä vettä (ja lämpöä). Käytännössä mäntämoottorissa palaminen on aina epätäydellistä, jolloin epätäydellisesti palaneet komponentit ilmenevät häikä- tai hiilivety päästöinä. Lisäksi polttoaine sisältää myös muita aineita, tyypillisimpänä rikkiyhdisteitä, jolloin niiden palaminen lisää kaasupäästöjen monimuotoisuutta. (Woodyard & Latarche, 2009, 235–268.)

## PÄÄSTÖTYYPIT

### Hiilidioksidi

Polttoöljyn tai kaasun palaessa hiilidioksidipäästöt ovat verrannollisia poltetun polttoaineen määrään. Yleensä voidaan puhua riittäväällä tarkkuudella suorasta verrannollisuudesta, vaikkakin moottorit on suunnitteluvaiheessa optimoitu toimimaan määrätyllä kierrosluvulla ja kuormitusasteella. Optimalueen ulkopuolella moottorin hyötysuhde heikkenee ja muodostuvat ilmapäästölajit muuntuvat moottorikohtaisesti. Eri polttoöljylaatujen

palamisominaisuudet vaihtelevat jonkin verran (Alakangas et al., 2016, 174–176), mutta yleisesti ottaen voidaan todeta seuraavien polttoainekilojen tuottavan listan mukaiset hiilidioksidipäästöt (IMO, 2020, 74):

1 kg raskasta polttoöljyä	=	3,114 kg hiilidioksidia
1 kg kevyttä polttoöljyä	=	3,206 kg hiilidioksidia
1 kg metaania (LNG)	=	2,750 kg hiilidioksidia

Hiilidioksidi on kaasuna ominaisuuksiltaan inerttiä, ja se säilyy ilmakehässä tuhansia vuosia. Hiilidioksidi on voimakas kasvihuonekaasu. Monilta muilta ominaisuuksiltaan se on varsin harmiton: kasvikunta tarvitsee hiilidioksidia yhteyttämiseen, eikä hiilidioksidi suoraan ole ympäristölle vaarallista tai ihmisille haitallista, elleivät pitoisuudet kasva liian suuriksi.

Hiilidioksidi on merkittävin ilmaston lämpenemistä aiheuttava kasvihuonekaasu, koska voimakkuutensa lisäksi se on yleisin ihmisen toiminnasta aiheutuvin kasvihuonekaasu (Euroopan komissio s.a.) Lisääntynyt ilmakehän hiilidioksidipitoisuus aiheuttaa myös merien happamoitumista (Turner et al., 2018, 368–378), sillä ilmakehän hiilidioksidi muodostaa veteen liuutessaan pH:ta laskevaa hiilihappoa. On arvioitu, että ilmakehän lisääntyvä hiilidioksidipitoisuus laskee valtameren pH:ta vuosittain 0,002 yksiköllä (Rein et al., 2013; Turner et al., 2018, 368–369). Jägerbrand et al. (2019, 8–9) huomauttavat tutkimuksessaan, että myös Itämeri on herkkä happamoitumiselle. Merten happamoituminen on ongelma etenkin kalkkikuorisille eliöille, joiden kalkkikuoren muodostamista happamoituminen vaikeuttaa (Jägerbrand et al., 2019, 8). Kalkkikuorisia eliöitä ovat muun muassa simpukat, kotilot, ravut ja korallieläimet. Koralliriutat ovat lajirikkaita ekosysteemejä, minkä vuoksi niiden väheneminen uhkaa monia valtameren eliöitä. Itämeren kalkkikuorisista eliöistä sinisimpukka on erityisen tärkeä laji. Sinisimpukka on Itämeressä niin kutsuttu avainlaji, jonka vähenemisellä voi olla merkittäviä vaikutuksia koko meriekosysteemin ravintoverkkoon (Kiviluoto, s.a.).

Hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen voidaan vaikuttaa lähinnä vähentämällä tavalla tai toisella hiilipitoisen polttoaineen kulutusta. Polttoaineen kulutus on varustamoille merkittävä kustannuserä, minkä vuoksi tähän on jo lähtökohtaisesti olemassa vahva taloudellinen kannustin. EU-alueella (EU, 2015) varustamot ovat vuodesta 2018 olleet veloitettuja raportoimaan aluskohtaisesti vuotuinen polttoaineen kulutus ja sen perusteella tuotetut hiilidioksidipäästöt EU:n MRV-tietokantaan (monitoring, reporting and verification). Euroopan unionin ehdottaman päästökaupan laajentamisen meriliikenteeseen (EU, 2021a; EU, 2021b) ja polttoaineiden minimiverotasojen määrittämisen on tarkoitus vahvistaa tätä taloudellista kannustinta tekemällä hiilidioksidipäästöjen tuottamisesta (eli polttoaineen

kuluttamisesta) entistä kalliimpaa. Moottoreiden ja laivojen hyötysuhteen parantaminen on kuitenkin pitkä prosessi ja edellyttää käytännössä myös laivaston uusiutumista, mikä on nykyisillä 30–40 vuoden aluskohtaisilla elinkaarilla pitkä prosessi. Tulevaisuudessa saatetaan nähdä myös hiilidioksidin talteenottolaitteistoja, mutta niiden yleistymisaikataulusta on vaikea sanoa mitään varmaa.

## Typen oksidit

Typen oksideita muodostuu dieselmoottorissa joko polttoaineen sisältämän typen palaessa tai palamisilman sisältämän typen reagoiessa imuilman hapen kanssa (IMO, 2013, annex 1 & 2). Typen oksideista puhutaan yleisesti NO<sub>x</sub>-päästöinä, jotka luokitellaan yleisellä tasolla myrkkypäästöiksi. Typen oksidit leviävät laajalle alueelle eivätkä niiden haittavaikutukset ole pelkästään paikallisia, vaikkakin lähipäästöt ovat useimmiten eniten suoria haittavaikutuksia aiheuttava asia. Typen oksidit aiheuttavat hengitystieoireita, supistavat keuhkoputkea ja ärsyttävät sen limakalvoja. Erityisesti lapset ja hengityselinsairaat henkilöt kuuluvat typen oksidien vaikutusten riskiryhmään. Erityisesti moottoreiden (pääkoneet ja apukoneet) käyttö satamissa ja asuttujen alueiden läheisyydessä pahentaa typen oksidien aiheuttamia inhimillisiä haittavaikutuksia. Lisäksi typen oksidit ovat osatekijänä alailmakehän otsonin (O<sub>3</sub>) muodostumisessa (Jägerbrand et al., 2019, 12–13). Alailmakehän otsoni on voimakas kasvihuonekaasu, ja lisäksi sillä on haittavaikutuksia ihmisten terveydelle ja kasvillisuudelle (Jägerbrand et al., 2019, 14–16).

Laivaliikenteen osuus ihmiskunnan aiheuttamista NO<sub>x</sub>-päästöistä on arviolta noin 15 prosenttia (IMO, 2015, 2). Typen oksidit leviävät maahan kuiva- tai märkälaskeumana. Märkälaskeumalla tarkoitetaan käytännössä happosateita. Happamoittavat laskeumat harsuunnuttavat puiden lehtiä ja neulasia vaikuttaen näin metsien kuntoon. Täten niillä on negatiivisia vaikutuksia metsien kykyyn toimia hiilinieluinä. Metsien kunto vaikuttaa luonnollisesti myös biodiversiteettiin, sillä huonokuntoinen puusto tarjoaa vähemmän pesäpaikkoja ja ravintoa muille eliöille. Happamoituminen vähentää myös jäkälien määrää, sillä jäkälät ovat erityisen herkkiä happamoittaville yhdisteille. Skandinavian maaperä on erityisen altis happamoitumiselle (Jägerbrand et al., 2019, 12–15), sillä alueen maaperä sisältää happamia kivilajeja ja on siten luonnostaan hapanta (Soveri, 1992, 135–143). Lisäksi typpi- ja rikkioksidien yhteislaskeumat aiheuttavat makeiden vesien happamoitumista (Jägerbrand et al., 2019, 6–8). Etenkin kalkkikuoriset eliöt kärsivät makeiden vesien happamoitumisesta samaan tapaan kuin meriekosysteemeissäkin. Jägerbrand et al., (2019, 12) mukaan happamoituminen on aiheuttanut muutoksia järvien ravintoverkkoihin ainakin Skandinavian alueella, jossa sisävedet ovat alttiita happamoitumiselle alueen maaperän tapaan. Rikin ja typen oksidien on todettu lisäävän paikallisesti myös merien happamoitu-

mista etenkin pohjoisella pallonpuoliskolla (Jägerbrand et al., 2019, 12), vaikka hiilidioksidi onkin globaalisti merkittävämpi valtameriä happamoittava yhdiste.

Ylimääräinen typpikuormitus vesistöissä aiheuttaa myös kasvien ja levien perustuotannon lisääntymistä, sillä typpi on kasvien tarvitsema ravinne. Perustuotannon lisääntyminen vesiekosysteemeissä tarkoittaa vesistön rehevöitymistä. Rehevöityminen on määritelty Itämeren suurimmaksi ympäristöongelmaksi, ja vuonna 2018 meriliikenteen on arvioitu aiheuttaneen noin 10 prosenttia Itämeren kokonaistyppikuormituksesta (Pohjola s.a.). Rehevöitymisen kenties tunnetuin haittavaikutus on sinilevien, eli syanobakteerien, lisääntyminen vedessä. Osa syanobakteereista on myrkyllisiä. Niiden runsas esiintyminen tekee vedestä uimakelvotonta ihmisille, ja myrkylliset sinilevät aiheuttavat terveysongelmia myös muun muassa linnuille. Rehevöitymisen myötä hajottajaeliöiden toiminta kiihtyy veden pohjassa, sillä runsastunut vesikasvusto lisää hajotettavan materiaalin määrää. Lisääntyneen hajotustoiminnan vuoksi hapenkulutus vedessä lisääntyy (Raudsepp, 2019, 191), mikä voi johtaa vedenpohjan happikatoon. Tämä aiheuttaa huomattavaa ekosysteemin köyhtymistä esimerkiksi kalakuolemien myötä. Happikato on erityisen suuri ongelma Itämeressä ja muissa vesistöissä, joissa vesi vaihtuu hitaasti (Conley et al., 2009, 3412–3413). Rehevöityminen aiheuttaa monia muutoksia vesiekosysteemin ravintoverkkoon. Perustuotannon lisääntyminen suosii lintuja, jotka käyttävät ravinnokseen leviä ja kasveja, kun taas kalaa pyydystävien lintujen ravinnonsaanti vaikeutuu veden samenenemisen myötä (Andersen et al., 2017, 143–146; Reissmann et al., 2009, 72–75). Rehevöityminen vähentää esimerkiksi lohikalojen määrää ja toisaalta lisää särkikalojen määrää (KVVY s.a.). Kala- ja lintukantojen muutokset vaikuttavat koko ravintoketjuun. Särkikalojen lisääntyminen Itämeressä voi esimerkiksi vähentää sinisimpukoiden kantoja, sillä särkikalat käyttävät niitä ravinnokseen.

Pelkästään typpikuorman vaikutukset rehevöitymiseen ovat kuitenkin monimutkaiset. Esimerkiksi Raudsepp et al. (2019, 194–195) mukaan laivaliikenteestä aiheutuva typpikuorma ei yksistään vaikuta merkittävästi Itämeren ekosysteemin toimintaan, sillä typpikuormitus suosii enemmän piilevien ja siimalevien kasvua syanobakteerien sijaan. Syanobakteerit hyötyvät enemmän fosforista, joka on toinen rehevöitymistä lisäävä ravinne. Kuitenkin tutkijat huomauttavat (Raudsepp et al., 2019, 202), että ravinnekuorma, jonka laivaliikenne aiheuttaa Itämerelle, vastaa isosta joesta valuvaa ravinnekuormaa. Näin ollen rehevöitymisen vaikutuksia on hyvä kuitenkin pohtia laivaliikenteen typpipäästöjen vaikutuksia käsiteltäessä.

Typhen oksidien muodostuminen ei ole suoraan verrannollinen polttoaineen kulutukseen tai muuhun vastaavaan yksiselitteisesti mitattavaan moottorisuureeseen, mikä tekee niiden vähentämisestä ja erityisesti päästötasojen valvonnasta haasteellista (Karvonen et al., 2010,

33–36). Typen oksideja voidaan vähentää kuitenkin monella tavalla: Polttoaineita voidaan kehittää vähentämällä niiden sisältämää typpeä, jolloin polttoaineesta johtuvat typen oksidipäästöt vähenevät. Palamislämpötilaa laskemalla voidaan tehokkaasti vähentää typen oksidien muodostumista. Teknisiä menetelmiä palamislämpötilan laskemiseksi ovat muun muassa veden ruiskuttaminen polttoaineen sekaan (tai suoraan sylinteriin) ja pakokaasujen takaisinkierätykset. Vedellä on suuri ominaislämpökapasiteetti, joten sylinteriin ruiskutettu vesi sitoo tehokkaasti vapautuvaa lämpöenergiaa vähentäen typen oksidien muodostumista. Pakokaasujen takaisinkierätyksen menetelmässä (EGR) osa pakokaasuista johdetaan takaisin sylinteriin, jolloin niiden sisältämä polttoaineprosessissa muodostuvien kaasujen lämpötiloihin verrattuna jäähtynyt hiilidioksidi sitoo tehokkaasti lämpöenergiaa vähentäen näin typen oksidien muodostumista. Tehokkain tapa vähentää typen oksideja pakokaasuista on hyödyntää savukaasujen katalyyttistä jälkikäsitteilyä: esimerkiksi SCR-katalysointori kykenee optimitilanteessa vähentämään savukaasujen sisältämiä typen oksideja jopa yli 90 % (Karvonen et al., 2010, 6). Moottoreiden typen oksidipäästöjen vähentämiseksi onkin asetettu kansainväliset TIER-rajoitusluokat, ja korkein TIER III-luokka käytännössä vaatii, että dieselmoottori on varustettu katalysointorilla. TIER rajoitusluokat I–III on määritelty seuraavasti (Karvonen et al., 2010, liite 1):

- TIER I: Koskee 2000–2010 rakennettuja aluksia sekä sellaisia tätä aiemmin rakennettuja aluksia, joiden sylinteritilavuus on yli 90 litraa ja koneteho yli 5 MW.
- TIER II: Koskee 2011–2015 rakennettuja aluksia päästörajan ollessa 11 g/kWh.
- TIER III: Koskee vuoden 2016 jälkeen rakennettuja aluksia, jotka operoivat määritellyillä typen oksidien rajoitusalueilla (NECA-alueet), asettaen päästörajan 3 g/kWh.

Typen oksidipäästöille on myös alueellisia rajoitustoimia. Esimerkiksi Ruotsissa on myönnetty vuosina 1998–2017 myönnetty väylämaksuista alennusta, mikäli alus on alittanut typen oksidien päästörajan 6 g/kWh (Lindé et al., 2019, 80). Vuodesta 2018 väylämaksualennusten laskentaperusteita on yleistetty kattamaan myös monia muita päästökäsitteitä. Typen oksidien todellisten päästötasojen aluskohtainen viranomaisvalvonta on kuitenkin haastavaa: TIER-luokkien sallimat päästömäärät perustuvat moottorin kierroslukuun, joten päästötasojen havainnointi vaatii käytännössä aluskohtaisia mittauksia, joissa huomioidaan mitattavien moottoreiden käyntiolosuhteet. Tämän vuoksi typen oksidien viranomaisvalvonta esimerkiksi satamien läheisyydessä sniffereillä rikkidioksidipäästöjen valvonnan tapaan ei käytännössä ole toimiva ratkaisu.

## Rikkipäästöt

Laivaliikenteen osuus ihmiskunnan aiheuttamista rikkiyhdiste- eli SO<sub>x</sub>-päästöistä on arviolta noin 13 prosenttia (IMO, 2015, 2). Rikkiyhdisteiden päästöistä tyypillisin päästökomponentti on rikkidioksidi SO<sub>2</sub>. Rikkipäästöjen lähteenä ovat polttoaineen sisältämät rikkiyhdisteet, ja polttoaineen rikkipitoisuutta vähentämällä voidaan rikkipäästöjä vähentää tehokkaasti (IMO, 2020, 11). Meriliikenteessä käytettävät polttoaineet ovat perinteisesti sisältäneet paljon rikkiä pääasiassa polttoaineiden matalan jalostusasteen vuoksi. Tämän seurauksena myös meriliikenteen rikkipäästöt ovat olleet ongelmallisia. Itämeren alueesta tuli vuonna 2015 rikkirajoitus- eli SECA-alue, missä polttoaine sai sisältää rikkiä korkeintaan 0,1 prosenttia. Maailmanlaajuisesti polttoaineen enimmäisrikkipitoisuudeksi on rajoitettu 0,5 prosenttia 1.1.2020 alkaen aiemman rajan oltua 3,5 prosenttia.

Rikkipäästöt luokitellaan myrkkypäästöiksi niiden haitallisuuden takia. Rikkidioksidi on väritön ja voimakkaasti haiseva kaasu. Se reagoi herkästi veden kanssa, ärsyttää hengityselimiä ja silmiä aiheuttaen ongelmia erityisesti hengitystiesairauksista kärsiville ja on suuressa roolissa ympäristön happamoitumisessa (Jägerbrand et al., 2019, 6–8). Pilvissä rikkiyhdisteet liukenevat vesipisaroihin muodostaen happosateita mahdollisesti kaukana rikkipäästölähteestä. Happamoitumisella on monia haittavaikutuksia ekosysteemeille, metsille, vesistöille ja rakennetulle ympäristölle (Jägerbrand et al., 2019, 12). Happamoitumisen ympäristövaikutuksia on esitelty tarkemmin raportin hiilidioksidi- ja typpipäästöjä käsittelevässä luvussa. Rikkipäästöjen osalta sateiden mukana kulkeutuva märkälaskema on vesiliukoisuudesta johtuen hallitseva, mutta myös kuivalaskeumaa tapahtuu yhdisteiden kulkiessa ilmavirtojen mukana ja laskeutuen erityyppisille pinnoille.

Käytettäessä asetetut rikkipitoisuusrajat ylittävää polttoainetta on aluksessa oltava toiminnassa olevat rikkipesurit (IMO, 2020, 74). Rikkipesureilla savukaasuista pestään pois rikkiyhdisteet hyödyntäen rikkidioksidin vesiliukoisuutta. Rikkipesurit voivat olla tyypiltään avoimen kierron pesureita, joissa pesuvedet lasketaan suoraan mereen, tai suljetun kierron pesureita, joissa pesuprosessista muodostuvat jätevedet toimitetaan satamissa jätevesien käsittelyyn (Santalahti, 2017, 11–14). Lisäksi on olemassa hybridimallin järjestelmiä, joissa avoimen ja suljetun kierron toiminta voidaan valita aluksella tilanteen vaatimalla tavalla. Itämeren matala suolapitoisuus aiheuttaa haasteita avoimen kierron pesureiden toiminnalle, minkä vuoksi erityisesti vähäsuolaisilla alueilla hybridiratkaisut ovat usein toimivampia.



## Hiilimonoksidipäästöt

Polttomoottoreiden toiminta tuottaa aina hiilimonoksidi- eli häkäpäästöjä, sillä polttoaineen palamisolosuhteet sylinterissä eivät ole ideaaliset sen enempää seoksenmuodostuksen kuin seoksen palamisenkaan osalta (Woodyard & Latarche, 2009, 62–63). Osa polttoaineesta palaa käytännössä aina happivajeessa. Hiilimonoksidi eli häkä on väritön ja hajuton, myrkyllinen kaasu. Se kuitenkin reagoi hapen kanssa tehokkaasti palaen hiilidioksidiksi, mikäli happea on vain tarjolla. Reaktiot ovat mahdollisia (joskin hitaampia) myös matalammissa lämpötiloissa. Hiilimonoksidipäästöjä ei kuitenkaan pidetä kovinkaan ongelmallisina verrattuna typen oksideihin tai rikkiäpäästöihin.

Hiilimonoksidin myrkyllisyys voi aiheuttaa häikämyrkytyksen, sillä se sitoutuu veren hemoglobiiniin huomattavasti tiukemmin verrattuna happeen. Tämä kuitenkin edellyttää, että hiilimonoksidia on hengitysilmassa suuria määriä, mikä yleensä tarkoittaa pakokaasujen kulkeutumista syystä tai toisesta sisätiloihin. Ulkoilmaan johdettujen pakokaasujen hiilimonoksidipitoisuus on niin vähäistä, että nimenomaan hiilimonoksidin liittyvät terveysvaikutukset jäävät yleensä vähäisiksi etenkin meriliikennenympäristössä. Hiilimonoksidi on tarvittaessa hapetettavissa hiilidioksidiksi katalyyttisesti. Henkilöautoissa tätä prosessia on hyödynnetty häikäpäästöjen vähentämiseksi jo vuosikymmeniä, ja tavoitteena on ollut pienentää erityisesti kaupunkiliikenteen myrkkypäästöjä. Meriliikenteessä hiilimonoksidipäästöjen rajoittamista ei ole toistaiseksi katsottu tarpeelliseksi. Sitä vastoin korkeat hiilimonoksidipäästöt ovat hyvä indikaattori epätäydellisestä palamisesta, jonka seurauksena yleensä erityyppiset hiukkaspäästöt ovat korkeat. LNG-aluksissa korkeat hiilimonoksidipäästöt viittaavat yleensä myös korkeisiin metaanipäästöihin.

## Palamattomien hiilivetyjen, hiukkasten ja mustan hiilen päästöt

Polttomoottorissa palaminen ei ole täydellistä (Bourman, 2017, 408–409). Palamattomilla hiilivedyillä tarkoitetaan yleisesti ottaen palamattomia polttoainejakeita, joiden ominaisuudet voivat vaihdella merkittävästi (Woodyard & Latarche, 2009, 62–63). Ne voivat olla haihtuvia VOC- tai puolihaihtuvia SVOC-yhdisteitä tai vaihtoehtoisesti hiukkasmaisia päästökomponeentteja. Hiukkaspäästöjen osalta tarkastelussa yleensä kiinnitetään huomiota hiukkasten kokoluokkaan, jossa alaindeksi kertoo hiukkasten koon ylärajan mikrometreinä. Esimerkkejä hiukkasrajoista ja kokoluokkien kutsumanimistä:

- $PM_{10}$ : Hengitettävät hiukkaset
- $PM_{2,5}$ : Pienhiukkaset
- $PM_{0,1}$ : Ultrapienet hiukkaset

Hiukkaspäästöt ovat monin tavoin ongelmallinen päästökokonaisuus: Laivojen pako- kaasujen sisältämät hiukkaset asettuvat kokoluokaltaan hyvinkin laajalle skaalalle. Lisäksi hiukkasista puhuttaessa on aina tärkeää noteerata muodostuneiden hiukkaspäästöjen maantieteellinen alue, koska satamien tai asuttujen alueiden lähellä tuotettujen hiukkaspäästöjen haitallisuusaste on lähtökohtaisesti monin verroin ongelmallisempi verrattuna avomerellä tuotettuihin hiukkaspäästöihin. Hiukkaset voivat kuitenkin kulkeutua ilmapvirtausten mukana kauaskin päästöalueelta, joten alueellisella liikennetiheydellä on myös vaikutusta hiukkaspäästöjen vaikutuksia arvioitaessa. (Repka et al., 2017, 13 ja 26.)

Mustaksi hiileksi kutsutaan epätäydellisessä palamisessa syntyneitä epäorgaanisen hiilen pienhiukkaspäästöjä. Mustan hiilen määritelmä ei ole yksikäsitteinen, mutta kategoriaan yleisimmin luettavien hiiliyhdistepäästöjen vaikutus ilmastoon erityisesti arktisella alueella vaikuttaa olevan merkittävä. Musta hiili on ilmakehässä lyhytikäinen kasvihuonekaasu, mutta se aiheuttaa välillisesti ilmaston lämpenemistä myös maan pinnalla. Arktisilla alueilla maahan laskeutuvat mustan hiilen hiukkaset sulattavat jäätä ja lunta. Jään ja lumen sulaminen lämmittää ilmastoa, koska tumma pinta imee itseensä auringonvaloa, kun taas lumi ja jää heijastavat sitä takaisin ilmakehään. Laivaliikenne päästää eniten mustaa hiiltä ilmakehään pohjoisella pallonpuoliskolla ja rannikoilla. Asutuksen lähellä mustan hiilen päästöt vaikuttavat myös ihmisten terveyteen. (Comer et al., 2017, 35–51.)

Comer et al. (2017, 2) mukaan laivojen mustahiilipäästöt olivat vuonna 2015 kokonaisuudessaan noin 67 kilotonnia. Tutkijoiden mukaan tämä määrä vastasi noin 6–8 prosenttia laivojen ilmastonlämmityspotentiaalista sadan vuoden aikajänteellä (GWP100). Kahdenkymmenen vuoden aikajänteellä määrä vastasi 18–24 prosenttia laivaliikenteen ilmastonlämmityspotentiaalista (GWP20).

Residuaalipolttoaineet, eli raskaat polttoöljyt, aiheuttavat huomattavasti enemmän mustahiilipäästöjä kuin tislepolttoaineet (Comer et al., 2017, 5). Arvion mukaan esimerkiksi vuoden 2015 globaalin laivaliikenteen mustahiilipäästöt olisi voitu puolittaa, jos kaikki alukset olisivat operoineet tislepolttoaineilla sen sijaan, että enemmistö aluksista käytti kyseisenä vuonna residuaalipolttoainetta (Comer et al., 2017, 4–6). Myös nesteytetyn maakaasun käyttö vähentäisi laivaliikenteen mustahiilipäästöjä, vaikka polttoaine tuottaakin muita kasvihuonekaasupäästöjä (Comer et al., 2017, 8). Residuaalipolttoaineista ilmaan kulkeutuvia mustahiilipäästöjä on mahdollista vähentää jonkin verran rikkipesurien avulla koskien käytännössä lähinnä tapauksia, joissa rikkipesurit on asennettu alukseen mahdollistamaan korkearikkisen polttoaineen käyttö. Tämä on kuitenkin tehottomampi keino kuin residuaalipolttoöljyjen vaihtaminen tislepolttoaineisiin tai nesteytetyyn maakaasuun. Comer et al., (2017) mustahiilitutkimuksen tarkasteluvuonna 2015 esimerkiksi Itämeri kuului jo

SECA-alueisiin, joilla vallitsee tiukat rikkirajoitukset. Siten nämä mustahiilipäästöjäkin vähentävät keinot olivat tällöin jo käytössä Itämerellä. Toisaalta globaalisti vain murto-osa merialueista kuuluu SECA-alueisiin, joten kyseisenä vuonna monilla alueilla on edelleen operoitu residuaalipolttoaineella ilman rikkipesureita. Vuodesta 2020 alkaen kuitenkin yhä useampi alus on joutunut vähentämään rikkipäästöjään edellä mainituilla keinoilla (IMO, 2020, 113–116), kun IMO:n kiristynyt globaali rikkirajoitus astui voimaan. Täten voitaneen olettaa, että myös aluskohtaiset mustahiilipäästöt vähenisivät lähitulevaisuudessa.

Laivaliikenteen mustahiilipäästöt eivät toistaiseksi kuulu globaalin sääntelyn piiriin, vaikka esimerkiksi rikkirajoitukset vähentävätkin käytännössä myös mustahiilipäästöjä. Mustan hiilen päästöistä ja niiden vaikutuksista tarvitaan paljon lisää tietoa, ja tulevaisuudessa tähän päästökategoriaan kuuluvat päästöt ovat todennäköisesti enenevän mielenkiinnon kohteena. Parhaillaan IMO:ssa tutkitaankin keinoja vähentää mustan hiilen päästöjä laivaliikenteessä, mikä viittaa siihen, että tällekin päästöalajille voitaisiin asettaa globaaleja rajoituksia tulevaisuudessa.

## Ammoniakkipäästöt

Ammoniakkia on ehdotettu yhdeksi tulevaisuuden polttoaineratkaisuksi fossiilivapaata meriliikennettä suunniteltaessa. Ammoniakkia voidaan käyttää polttoaineena kyseiselle polttoaineelle modifioituissa mäntämoottoreissa metanolin tapaan. Nykyiset meridieselmoottorit voivat olla varustettuja typen oksideja vähentävillä SCR-katalysaattoreilla, joissa pelkistinaineena käytetään ammoniakkia tai ureaa. Järjestelmän toimiessa suunnitellusti ammoniakkipäästöt minimoituvat, mutta ongelmaksi muodostuu tilanne, jossa syystä tai toisesta järjestelmän toiminta häiriintyy. Tuolloin liiallisen pelkistimen käytön yhtenä seurauksena on savukaasussa kasvanut ammoniakin määrä.

Ammoniakki on vesiliukoista, ja riittävän väkevänä vesiliuksena siitä tulee voimakkaasti syövyttävää ja erittäin myrkyllistä vesiliöistölle. Vesistöissä bakteerit hapettavat ammoniakin nitraatiksi, mikä edesauttaa happikadon kehittymistä. Lisäksi ammoniakki hajoamistuotteen rehevöittää vesistöjä. Ammoniakkihöyrylle altistuminen ärsyttää hengitysteitä sekä silmiä ja suurissa pitoisuuksissa myös ihoa. Lyhytaikainenkin altistuminen yli 5000 ppm:n pitoisuuksille voi olla hengenvaarallista. (CDC, s.a.)

Ammoniakin käytöstä polttoaineena syntyy myös dityppioksidin eli typpioksiduulin päästöjä (N<sub>2</sub>O). Zincir (2022, 18151–18152) havaitsi tutkimuksessaan, että dityppioksidipäästöt kasvavat sitä mukaa, mitä suurempi osa aluksen energiasta saadaan ammoniakin käytöstä. Typpioksiduuli on ilmakehässä erittäin voimakas kasvihuonekaasu, jonka päästöt on otettava huomioon, kun arvioidaan ammoniakin ympäristöystävällisyyttä (Zincir 2022, 18164–18165).

## Metaanipäästöt

Metaani on hajuton ja ilmaa kevyempi kaasu, joka on ominaisuuksiltaan hiilidioksidia huomattavasti voimakkaampi kasvihuonekaasu. Metaanin elinikä ilmakehässä on kuitenkin vain noin 12 vuotta (EPA 2022; IEA 2022), mikä on murto-osa verrattuna hiilidioksidin viipymään (useita tuhansia vuosia). Metaanin voimakkuutta kasvihuonekaasuna kuvaa se, että lyhyestä eliniästään huolimatta metaanin kyky lämmitteä ilmakehää on hiilidioksidin verrattuna noin 28–34-kertainen, kun tarkastellaan sadan vuoden ajanjaksoa (global warming potential, GWP100). Kahdenkymmenen vuoden aikajänteellä metaanin ilmastonlämmityspotentiaali (GWP20) on puolestaan arviolta 85 kertaa korkeampi kuin hiilidioksidin. (Grönholm et al., 2021, 13678.) Metaanipäästöt ovat aiheuttaneet arviolta 30 prosenttia teollisen vallankumouksen jälkeen toteutuneesta lämpötilan noususta. Metaani on myös osatekijänä alailmakehän otsonin muodostumisessa. (IEA 2022.)

Metaanin pääasialliset lähteet ovat soiset maa-alueet, joista erityisesti ikiroudan sulaessa voi vapautua huomattavia määriä metaania ilmakehään. Ikiroudan sulaminen on yksi ilmastonmuutoksen aiheuttamista palautevaikutuksista: ilmaston lämpeneminen kiihdyttää ikiroudan sulamista, minkä seurauksena ilmakehään vapautuu entistä enemmän kasvihuonekaasuja, jotka edelleen lämmittevät ilmastoa. Ihmisen toiminnan seurauksena metaania vapautuu fossiilisten polttoaineiden valmistuksesta ja käytöstä, kaatopaikoilta ja jätevesien puhdistamoilta (EPA 2022). Myös karjatalous ja riisin viljely ovat merkittäviä metaanipäästöjen lähteitä (Ilmasto-opas s.a.). Arviolta noin 60 prosenttia globaaleista metaanipäästöistä aiheutuu ihmisen toiminnasta. On arvioitu, että ilmakehän metaanipitoisuus on 2,5-kertainen verrattuna esiteolliseen aikaan. Lisäksi metaanipitoisuus on kasvanut kiihtyvällä tahdilla viime vuosina. Näihin arvioihin liittyy kuitenkin epävarmuuksia. (IEA 2022.)

Meriliikenteen tuottamat metaanipäästöt ovat aiemmin olleet vähäisiä. Asia voi kuitenkin olla muuttumassa, kun nesteytettyä maakaasua eli LNG:tä hyödyntävät alukset yleistyvät. Vuosina 2012–2018 laivaliikenteen metaanipäästöt kasvoivat arviolta 87 prosenttia, mikä johtuu pääasiassa LNG:n käytön yleistymisestä laivaliikenteessä (IMO, 2020, 11). Metaania pääsee ilmakehään LNG-aluksista pakokaasujen mukana. Polttoprosessin tapahtuessa ideaalisesti metaanin pitäisi palaa moottorissa liki täydellisesti, mutta käytännössä mäntämoottoreissa ideaalitalanteesta ollaan kaukana. Myös moottorityyppien keskinäiset eroavaisuudet ovat suuria (IMO, 2020, 49): LNG:tä hyödyntävät ottomoottorit ovat harvinaisia, mutta niiden metaanipäästöt ovat suhteellisen suuria. Korkeapainedieselmoottorissa kaasu ja pilottipolttoaineena toimiva diesel ruiskutetaan suoraan sylinteriin, jolloin metaanipäästöt ovat suhteellisen vähäisiä. Matalapainedieselmoottori on otto- ja dieselprosessien kombinaatio, ja siinä kaasu seostetaan imukanavissa ilman kanssa. Seos puristetaan puristustah-

din aikana ja sytytetään vähän ennen männän yläkuolokohtaa ruiskuttamalla sylinteriin pilottipolttoaineena toimivaa dieseliä. Matalapainedieselin metaanipäästöt ovat selkeästi korkeapainedieselin metaanipäästöjä suurempia. Metaanipäästöt voivat helposti heikentää LNG-alusten sijoittumista kasvihuonekaasuja vähemmän tuottavien teknologioiden listauksessa. Metaanipäästöjä voi syntyä myös polttoainetäydennysten tai teknisten vikojen yhteydessä. Toistaiseksi LNG-alusten metaanipäästöt eivät suoraan kuulu kansainvälisen sääntelyn piiriin (Grönholm et al., 2021, 13684–13685). Tulevaisuudessa tilanne saattaa kuitenkin muuttua, sillä LNG-alusten metaanipäästöihin on jo nyt alettu kiinnittää aiempaa enemmän huomiota. Muun muassa FuelEU Maritime -säädösehdotus sisältää myös metaanipäästöjen huomioinnin.

## Laivaliikenteen päästöt yhteiskunnallisesta näkökulmasta

Yhteiskunnan kannalta laivaliikenteen tuottamat päästöt ovat niin kutsuttuja ulkoisvaikutuksia. Ulkoisvaikutus on taloudellisen toiminnan vaikutus, joka kohdistuu kolmannen osapuoleen ja joka ei sisälly hyödykkeen markkinahintaan. Päästöjen aiheuttamat ympäristöongelmat ja terveyshaitat koituvat yhteiskunnalle, eivätkä nämä haitat sisälly esimerkiksi rahdattavien tuotteiden hintaan. Tästä poikkeuksen tekee lähitulevaisuudessa hiilidioksidi, kun varustamot alkavat maksaa hiilidioksidipäästöistään Euroopan unionin alueella päästökaupan myötä.

Vaikkei ympäristöhaitoille olekaan markkinoita, niille voidaan antaa rahallisia estimaatteja ympäristötaloustieteessä kehitetyin menetelmin. Tämä taloudellinen arvottaminen perustuu siihen, että ympäristöhyödykkeelle, jolle ei ole markkinoita, pyritään luomaan hinta estimoimalla ihmisten maksuhalukkuutta hyödykkeestä (Ytreberg et al., 2021, 1–10). Tätä voidaan tehdä esimerkiksi kyselytutkimusten avulla. Taloudellisen arvottamisen myötä voidaan verrata ympäristönsuojelutoimien, kuten päästöjen vähentämisen, hyötyjä ja kustannuksia yhteiskunnalle. Päästöjen kustannuksia yhteiskunnalle on käsitelty myös loppuraportin artikkelissa “Päästövähennysmenetelmien elinkaari- ja ympäristökustannusanalyysi”.

Ytreberg ym. (2021, 1–10) arvioivat tutkimuksessaan Itämeren laivaliikenteen päästöjen aiheuttamia kustannuksia yhteiskunnalle. Tutkimusdatana käytettiin vuoden 2018 päästöjä. Tarkastelussa huomioitiin muun muassa moottorien pakokaasuista, harmaavedestä ja jätevedestä aiheutuvat päästöt sekä laivojen pinnoitteista veteen liukenevat myrkylliset aineet. Tutkijat arvioivat neljän eri ympäristöongelman kustannuksia. Ongelmia olivat heikentynyt ilmanlaatu, ilmastonmuutos, Itämeren rehevöityminen ja meren ekotoksisuus (engl. marine ecotoxicity). Tutkimuksen mukaan Itämeren laivaliikenteen päästöt aiheuttivat alueella vuonna 2018 yhteensä 2,9 miljardin euron kustannukset. Suurin kustannus

koitui heikentyneestä ilmanlaadusta (n. 820 milj. eur). Rehevöitymisen (n. 770 milj. eur) ja ilmastomuutoksen (n. 740 milj. eur) kustannukset olivat samaa luokkaa, kun taas ekotoksisuuden kustannus oli näistä pienin (n. 580 milj. eur).

Ytreberg ym. (2021, 9) huomauttavat, että heidän kustannusarvionsa ympäristöongelmista, joita laivaliikenteestä koituu Itämeren ekosysteemille, on todennäköisesti aliarvio. Tämä johtuu siitä, että tutkimuksessa ei huomioitu esimerkiksi laivaliikenteen aiheuttamaa Itämeren happamoitumista tai vedenalaisen melun vaikutuksia ekosysteemiin. Lisäksi on syytä huomata, että tutkimusalueena oli Itämeri, joten tutkimustulokset eivät ole suoraan sovellettavissa muille merialueille. (Ytreberg et al., 2021, 1–10.)

Laivaliikenteen ympäristövaikutusten tutkimus on Ytreberg ym. (2021, 1–2) mukaan keskittynyt ilmanlaatuun sekä ilmanlaadun heikkenemisen taloudellisiin vaikutuksiin. Tätä tietoa hyödynnetään yleisesti, kun ympäristönsuojelutoimille tehdään kustannus-hyötyanalyysyjä. Sen sijaan tutkimustieto laivaliikenteen vaikutuksista meriekosysteemiin on puutteellisempaa, ja vaikutusten taloudellinen analyysi on vielä lapsenkengissä. (Ytreberg et al., 2021, 2.) Tiedon puutteen riskinä on, että kustannus-hyötyanalyyseissä painotetaan liiallisesti ilmanlaatua suhteessa meriekosysteemien suojeluun. Ytreberg ym. (2021, 6–9) tutkimuksessa meren ekotoksisuuden ja rehevöitymisen kustannukset muodostivat vajaa puolet ympäristövaikutusten kokonaiskustannuksista. Siten kustannus-hyötyanalyyseissä olisi jatkossa tärkeää huomioida myös vaikutukset meriekosysteemiin, kunhan vaikutuksista ja niiden kustannuksista saadaan enemmän tietoa.

## LÄHTEET

Alakangas, E., Hurskainen, M., Laatikainen-Luntama, J., Korhonen, J. 2016. Properties of indigenous fuels in Finland. Espoo: VTT technical research centre of Finland.

Andersen, J.H., Carstensen, J., Conley, D.J., Dromph, K., Fleming-Lehtinen, V., Gustafsson, B.G., Josefson, A.B., Norkko, A., Villnäs, A., Murray, C. 2017. Long-term temporal and spatial trends in eutrophication status of the Baltic Sea. *Biological reviews*, 92(1), 135–149.

Bourman, E.A., Lindstad, E., Riialand, A.I., Strømman, A.H. 2017. State-of-the-art technologies, measures, and potential for reducing GHG emissions from shipping – A review. *Transportation research part D: Transport and environment*, 52, 408–421.

Centers for disease control and prevention CDC, s.a. Ammonia. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [cdc.gov/niosh/idlh/7664417.html](https://www.cdc.gov/niosh/idlh/7664417.html)

Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B. and Rutherford, D. 2017. Black carbon emissions and fuel use in global shipping, 2015. Washington DC: International Council on Clean Transportation.

Conley, D.J., Björck, S., Bonsdorff, E., Castersen, J., Destouni, G., Gustafsson, B.G., Hietanen, S., Kortekaas, M., Kuosa, H., Meier, H.E.M., Müller-Karulis, B., Nordberg, K., Norkko, A., Nürnberg, G., Pitkänen, H., Rabalais, N.N., Rosenberg, R., Savchuk, O.P., Slomp, C.P., Voss, M., Wulff, F., Zillén, L. 2009. Hypoxia-related processes in the Baltic Sea. *Environmental science & technology*, 43(10), 3412–3420.

United States Environmental Protection Agency EPA. 2022. Overview of greenhouse gases. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CH4-reference](https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases#CH4-reference)

European commission. s.a. Causes of Climate Change. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change\\_en](https://climate.ec.europa.eu/climate-change/causes-climate-change_en)

European commission. 2015. Regulation (EU) 2015/757 of the European parliament and of the council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emission from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC.

Euroopan komissio. 2021a. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757. 2021/0211 (COD).

Euroopan komissio. 2021b. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure and, repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council. 2021/0223 (COD).

Grönholm, T., Mäkelä, T., Hatakka, J., Jalkanen, J-P., Kuula, J., Laurila, T., Laakso, L., Kukkonen, J. 2021. Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station. *Environmental science & technology*, 55(20), 13677–13686.

International energy agency IEA. 2022. Methane and climate change. WWW-dokumentti. Saatavissa: [iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change](https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022/methane-and-climate-change)

International maritime organization IMO. 2015. Third IMO GHG Study 2014. Executive summary and final report. London: International maritime organization.

Ilmasto-opas s.a. Metaani. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/metaani](http://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/metaani)

International Maritime Organization IMO. 2013. Air pollution and energy efficiency. Final report of the correspondence group on assessment of technological developments to implement the Tier III NO<sub>x</sub> emission standards under MARPOL Annex VI. London: International maritime organization.

International Maritime Organization IMO. 2020. Fourth IMO greenhouse gas study. Executive summary. London: International maritime organization.

Jägerbrand, A. K., Brutemark, A., Sveden, J. B., Gren, M. 2019. A review on the environmental impacts of shipping on aquatic and nearshore ecosystems. *Science of the Total Environment*, 695, article 133637.



Kiviluoto, S. s.a. Avainlajit ja avainluontotyypit pyörittävät Itämerä. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.itameri.fi/fi-FI/Luonto\\_ja\\_sen\\_muutos/Asiantuntijan\\_kynasta/Avainlajit\\_ja\\_avainluontotyypit\\_pyoritta\(52475\)](http://www.itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Asiantuntijan_kynasta/Avainlajit_ja_avainluontotyypit_pyoritta(52475))

KVVY. s.a. Rehevöityneiden järvien kalasto. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [vesienhoito.kvvy.fi/kunnostajan-abc/kalasto/#:-:text=Rehev%C3%B6ityminen%20vaikuttaa%20eri%20kalalajeihin%20eri,ja%20hapekasta%20vett%C3%A4%20vaativat%20lohikalat](http://vesienhoito.kvvy.fi/kunnostajan-abc/kalasto/#:-:text=Rehev%C3%B6ityminen%20vaikuttaa%20eri%20kalalajeihin%20eri,ja%20hapekasta%20vett%C3%A4%20vaativat%20lohikalat)

Lindé, T., Vierth, I., Cullinane, K. 2019. Evaluating the effects of Sweden's environmentally differentiated fairway dues. *Transportation research part D: Transport and environment*, 70, 77–93.

Raudsepp, U., Maljutenko, I., Kõuts, M., Granhag, L., Wilewska-Bien, M., Hassellöv, I. M., Eriksson, K.M., Johansson, L., Jalkanen, J-P., Karl, M., Matthias, V., Moldanova, J. 2019. Shipborne nutrient dynamics and impact on the eutrophication in the Baltic Sea. *Science of the Total Environment*, 671, 189–207.

Pohjola, P. s.a. Rehevöityminen on Itämeren pahin ongelma. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [itameri.fi/fi-FI/Luonto\\_ja\\_sen\\_muutos/Itameren\\_tila/Rehevoityminen](http://itameri.fi/fi-FI/Luonto_ja_sen_muutos/Itameren_tila/Rehevoityminen)

Rhein, M., Rintoul, S.R., Aoki, S., Campos, E., Chambers, D., Feely, R.A., Gulev, S., Johnson, G.C. 2013. Observations: Ocean. Teoksessa Stocker et al. (toim.), *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: Cambridge university press.

Reissmann, J.H., Burchard, H., Feistel, R., Hagen, E., Lass, H.U., Mohrholz, V., Nausch, G., Umlauf, L., Wicczorek, G. 2009. Vertical mixing in the Baltic Sea and consequences for eutrophication – a review. *Progress in oceanography*, 82(1), 47–80.

Repka, S., Ojala, L., Jalkanen, J-P., Alhosalo, M., Niemi, J., Pöntynen, R., Solakivi, T., Pohjola, T., Haavisto, R., Lensu, M., Erkkilä-Välimäki, A., Haukioja, T., Kiiski, T. 2017. Merenkulun kansainvälisen ilmasto- ja ympäristösääntelyn vaikutukset Suomen elinkeinoelämälle. Helsinki: Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 55/2017.

Santalhti, A. 2017. Pakokaasupesurien erot suljetun kierron ja avoimen kierron välillä. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Soveri, J. 1992. Acidifying effects on groundwater. *Studies in environmental science*, 50, 135–143.

Turner, D. R., Edman, M., Gallego-Urrea, J. A., Claremar, B., Hassellöv, I. M., Omstedt, A. Rutgersson, A. 2018. The potential future contribution of shipping to acidification of the Baltic Sea. *Ambio*, 47(3), 368–378.

Woodyard, D., Latache, M. 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Oxford: Elsevier Science & Technology.

Ytreberg, E., Åström, S., Fridell, E. 2021. Valuating environmental impacts from ship emissions – the marine perspective. *Journal of environmental management*, 282, article 111958.

Zincir, B., 2022. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(41), 18148–18168.

# EUROOPAN UNIONIN TAVOITTEET MERILIIKENTEEN PÄÄSTÖJEN RAJOITTAMISEKSI

Taru Tanhuanpää



© Elias Altarriba

## JOHDANTO

### Raportin aihe ja rajaukset

Euroopan unionin merenkulku on siirtymässä hyvin todennäköisesti eurooppalaisen päästökaupan piiriin lähivuosina. Euroopan komissio julkisti ehdotuksensa (Fit for 55) merenkulun päästökaupan toteutustavoista heinäkuussa 2021. Komission ehdotuksesta käydään parhaillaan parlamentaarista neuvottelukierrosta, jonka aikana päästökaupan yksityiskohdat täsmentyvät. Lopullinen päästökauppa ei siten välttämättä vastaa Euroopan komission alkuperäistä ehdotusta.

Tämä raportti käsittelee EU:n merenkulun päästökaupan toteutustapoja sekä sen mahdollisia vaikutuksia unionin merenkulkuun ja kasvihuonekaasupäästöihin. Raportissa esitellään erilaisia vaihtoehtoja siihen, miten merenkulun päästökauppa voidaan toteuttaa Euroopan unionissa. Lisäksi käydään läpi, millaista päästökauppajärjestelmää Euroopan komissio ehdotti merenkululle heinäkuussa 2021.

## Päästökaupan tausta

Euroopan unionin päästökauppajärjestelmä (EU ETS) kattaa vuonna 2021 noin 40 prosenttia EU:n kasvihuonekaasupäästöistä. Järjestelmä astui voimaan vuonna 2005 ja on yksi maailman laajimpia käytössä olevia hiilidioksidipäästöjen hinnoittelumekanismia. Vuonna 2021 päästökaupan piiriin kuuluvat EU:n alueella toimivat energia- ja teollisuussektorit. (EU Emissions Trading System s.a.) Näiden sektorien pienet toimijat on kuitenkin rajattu päästökaupan ulkopuolelle. Toimijan koko määräytyy esimerkiksi laitoksen tuotantokapasiteetin tai energia-alalla lämpötehon mukaan. (EU Emissions Trading System s.a.; Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EY) 2003/87, liite I.)

Teollisuus- ja energiasektorin lisäksi Euroopan päästökauppaan kuuluu Euroopan talousalueen (ETA) sisäinen lentoliikenne (EU Emissions Trading System s.a.). Euroopan talousalueeseen kuuluvat unionin jäsenmaiden lisäksi Islanti, Norja ja Liechtenstein. Lentoliikenne on vuonna 2021 ainoa liikennemuoto, joka kuuluu Euroopan päästökauppaan (Honkatukia ym. 2021, 10).

Päästökaupan piiriin kuuluvan laitoksen on luovutettava vuosittain päästöjään vastaava määrä niin kutsuttuja päästöoikeuksia. Jos tätä määräästä ei noudata, seuraa tuntuvat sakot. Yksi päästöoikeus antaa haltijalleen oikeuden päästää ilmakehään yhden hiilidioksidiekvivalenttitonin verran kasvihuonekaasupäästöjä. Tarjolla olevien päästöoikeuksien kokonaismäärä (engl. ”emissions cap”) rajaa siten toimijoiden yhteensä aiheuttamien kasvihuonekaasupäästöjen määrää. Tämä päästökatto on pienempi kuin mitä alan toimijat aiheuttaisivat ilman hiilen hinnoittelumekanismia. Lisäksi päästöoikeuksien määrää vähennetään vuosittain lineaarisesti, jotta kokonaispäästöt vähenevät ajan myötä. (Emissions cap and allowances s.a.) Päästöjen vähentämisen tavoitteena on hillitä ilmastonmuutosta.

Päästöoikeuksien alkujako yrityksille tapahtuu joko huutokauppaamalla tai jakamalla oikeuksia ilmaiseksi. Vuosien saatossa ilmaisaon osuus on vähentynyt huomattavasti, ja nykyään huutokauppa on pääasiallinen päästöoikeuksien jakotapa. (EU 2015, 24.) Ilmaisia päästöoikeuksia jaetaan kuitenkin yhä aloille, joilla on niin kutsutun hiilivuodon riski. Hiilivuodolla tarkoitetaan tilannetta, jossa yritykset siirtävät tuotantoaan EU:n ulkopuolelle

maihin, jotka eivät ole yhtä tiukkoja päästöjen suhteen. (Carbon leakage s.a.) Hiilivuotoilmiössä yritykset siis välttävät päästöjen kustannuksia siirtämällä tuotantoaan maihin, joissa ei käytetä hiilidioksidin hinnoittelumekanismia (Mellin ym. 2020, 17). Hiilivuodon mahdollistaa se, että unionin päästökauppa on alueellinen järjestelmä. Mikäli päästökauppa olisi globaali, ei hiilivuotoilmiötä ainakaan nykyisessä muodossa todennäköisesti ilmenisi.

EU ETS on jaettu päästökauppakausiin. Parhaillaan on meneillään neljäs päästökauppakausi (2021–2030). Päästökauppakausilla tarkoitetaan ajanjaksoa, jolloin päästöoikeudet huutokaupataan tai jaetaan ilmaiseksi yrityksille (EU Emissions Trading System s.a.). Järjestelmään kuuluvat yritykset saavat vapaasti käydä kauppaa päästöoikeuksilla tarjolla olevan päästöoikeuksien maksimimäärän (emissions cap) puitteissa. Päästökauppaa pidetään kustannustehokkaana tapana vähentää päästöjä, koska päästöjä todennäköisemmin vähennetään siellä, missä se on halvinta toteuttaa (Honkatukia ym. 2021, 12). Käytännössä yritykset, joiden on halvempi vähentää päästöjä kuin ostaa päästöoikeuksia, myyvät oikeuksia niille, joille päästöjen vähentäminen on kalliimpaa kuin päästöoikeuksien ostaminen.

Päästöoikeuden hinta, joka on kaikille toimijoille sama, määräytyy päästöoikeuksien markkinatarjonnan ja -kysynnän mukaan (Ojala 2021, 6). Vuosien saatossa hinta on vaihdellut voimakkaasti päästöoikeuksien kysynnän mukaan. Päästöoikeuksien kysyntä puolestaan reagoi helposti talouden suhdannevaihteluihin. Esimerkiksi taantuman aikaan päästöoikeuksien kysyntä on alhainen, mikä laskee päästöoikeuksien hintaa. Päästökauppa siis vähentää hiilidioksidipäästöjä kahdella eri tavalla. Päästökauppaan kuuluvien toimijoiden päästöt eivät voi ylittää ennalta päätettyä päästöoikeuksien enimmäismäärää. Toisaalta hiilidioksiditonille asetetun hinnan on tarkoitus tehdä päästöjen vähentämisestä yrityksille taloudellisesti kannattavampaa. (Mellin ym. 2020, 37) Päästöoikeuden hinnan ollessa korkea toimijoiden kannattaa taloudellisesti pyrkiä minimoimaan päästöt, vaikka päästökaton asettama raja ei ylittyisikään. Toisaalta alhainen päästöoikeuden hinta ei kannusta yrityksiä vähentämään päästöjään enempää kuin mitä päästökatto vaatii.

Vuoden 2008 finanssikriisi romahdutti päästöoikeuden hinnan, sillä kysyntä alitti reippaasti päästöoikeuksien ennalta määrätyn tarjonnan. Vuosina 2012–2017 päästöoikeuden hinta pysyi alle kymmenessä eurossa liikatarjonnan vuoksi. (Gerlagh ym. 2020, 856–857.) Alhaiset hiilidioksidin hinnat eivät motivoineet yrityksiä investoimaan päästöjä vähentäviin teknologioihin (Solakivi ym. 2020, 38). Vuoden 2018 jälkeen EU teki päästökauppaan muutoksia, joilla pyrittiin vakauttamaan päästöoikeuden hintaa. Muutosten myötä päästöoikeuden hinta on viime aikoina noussut merkittävästi. (Euroopan komissio 2021f.) Päästöoikeuksien tulevaisuuden hintakehitystä on kuitenkin vaikea ennustaa, sillä hinta määräytyy edelleen kysynnän ja tarjonnan mukaan (Ojala 2021, 6). Kuva 1 havainnollistaa, miten päästöoikeuden hinnat ovat vaihdelleet vuosien saatossa.



**Kuva 1.** EU:n päästöoikeuden hinta on noussut viime vuosina merkittävästi oltuaan vuosia hyvin alhainen. Toukokuussa 2021 päästöoikeuden hinta nousi 50 euroon, joka oli siihenastinen ennätys. Lähde: Trading economics (s.a.)

Lisätietoa päästökauppajärjestelmän toiminnasta löytyy EU:n vuonna 2015 julkaisemasta EU ETS Handbook -käsikirjasta (Euroopan komissio, 2015). Päästökauppajärjestelmään vuoden 2018 jälkeen tehdyistä muutoksista, jotka nostivat huomattavasti päästöoikeuden hintaa, on löydettävissä lisätietoa kattavasti EU:n verkkosivustolta osoitteesta ”[ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/ets/reform_en)”.

## Meriliikenteen sisällyttäminen EU:n päästökaupan piiriin

Meriliikenne on siirtymässä EU:n päästökaupan piiriin sovitun aikataulun mukaan vuonna 2023 (Euroopan komissio 2021c, artikla 3ga, 42). Jatkossa merenkulun toimijoiden tulisi siis hankkia päästöoikeuksia tuottamilleen kasvihuonekaasupäästöille. Päästökauppa voi siten vaikuttaa merkittävästi EU:n merenkulun kustannuksiin ja kilpailukykyyn. Vaikutukset riippuvat kuitenkin paljon siitä, miten merenkulun päästökauppa toteutetaan ja mille tasolle päästöoikeuksien hinnat tulevaisuudessa asettuvat.

Meriliikenne tuottaa vuosittain noin kolme prosenttia globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä (International Maritime Organization (IMO) 2020, 2). Silti meriliikenne on vähäpäästöisin tapa kuljettaa rahtia, kun tarkastellaan hiilidioksidipäästöjä kuljetettua rahtiyksikköä kohti. Esimerkiksi lentorahdin hiilidioksidipäästöt ovat keskimäärin 435 g/tonnikilometri ja rekan noin 80 grammaa tonnikilometriä kohti. Vastaavat keskimääräiset luvut rahtilavalle ovat 7,9 g/tonnikilometri ja isolle konttialukselle 3 grammaa tonnikilometriä kohden. (Aunola 2019.)

Meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen ennustetaan kuitenkin lisääntyvän 90–130 prosenttia vuoteen 2050 mennessä, jos päästövähennyksiin tähtääviä poliittisia toimenpiteitä ei tehdä (IMO 2020, 3). Päästöjen ennakoitu kasvu johtuu siitä, että laivaliikenteen volyymin arvioidaan kasvavan voimakkaasti tulevina vuosina. Meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen kokonaiskasvu olisi ristiriidassa Pariisin ilmastotavoitteiden kanssa (Reducing emissions from the shipping sector s.a.).

Euroopan unioni on sitoutunut vähentämään kasvihuonekaasupäästöjään ”nettomääräisesti vähintään 55 % vuoteen 2030 mennessä vuoden 1990 tasoihin verrattuna” (Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a). Lisäksi on sovittu, että unionin pitäisi olla ilmastonutraali vuoteen 2050 mennessä (Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a). Alueen ilmastonutraaliudella tarkoitetaan sitä, että kasvihuonekaasupäästöjä ei synny enempää kuin mitä alueen hiilinielut pystyvät sitomaan (5 facts about the EU’s goal of climate neutrality, s.a.). EU:n ilmastonutraaliustavoite edellyttää liikenteen päästöjen vähentämistä 90 prosentilla vuoteen 2050 mennessä (Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a.).

Laivaliikenne (mukaan lukien sisävesiliikenne) puolestaan tuotti vuonna 2017 noin 13 prosenttia EU:n liikennesektorin aiheuttamista päästöistä (Euroopan komissio 2020a, 6). Päästökaupan ulottamisella merenkulkuun pyritään vähentämään meriliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä kustannustehokkaasti (Euroopan komissio 2020b, 3). Euroopan Unionin sivuilla todetaan, että kansainvälinen sääntely olisi tehokkain keino vähentää laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä. Kansainvälisten säädösten hyväksyminen kansainvälisessä merenkulkujärjestö IMO:ssa on kuitenkin hidas prosessi. Siksi unioni pyrkii omilla toimillaan vähentämään merenkulun päästöjä alueellaan. (Reducing emissions from the shipping sector s.a.)

Merenkuluelinkeinolla on erityispiirteitä, joita ei ole muilla päästökaupaan jo kuuluvilla sektoreilla. Meriliikenne on kansainvälistä toimintaa niin EU:n sisällä kuin globaalistikin. EU-alueen ulkopuolella tapahtuva merenkulku muodostaakin valtaosan jäsenmaiden meriliikenteestä. Lisäksi EU:n alueella liikkuu paljon aluksia, joiden lippuvaltio ei ole unionin jäsenmaa. (Solakivi ym. 2020, 25.) Päästökauppajärjestelmän kustannustehokkuus meriliikenteessä riippuu siitä, miten järjestelmä toteutetaan (Solakivi ym. 2020, 11). Päästökaupan vaikutus merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen kokonaismäärään riippuu niin ikään siitä, miten hyvin hiilivuodon riskit huomioidaan toteutuksessa (Solakivi ym. 2020, 51). Toteutustapoja on lukuisia, ja niillä jokaisella on omat erityispiirteensä. Riippumatta toteutustavasta päästökauppajärjestelmä aiheuttaa epävarmuutta merenkulun kustannuksiin, sillä EU:n päästöoikeuksien hinnat voivat vaihdella paljon ajan myötä (Ojala 2020, 6). (Ks. kuva 1 päästöoikeuksien hintahistoriasta.) Epävarmuus tulevista kustannuksista

on hankala asia merenkulkusektorille, koska alusinvestoinnit ovat pitkäaikaisia laivojen linkaaren ollessa yleensä 30–40 vuotta (Koesler ym. 2015, 27). Lisäksi päästöoikeuksien ostaminen ja myyminen on hallinnollinen rasite, josta voi koitua haittaa erityisesti pienille varustamoille (Solakivi ym. 2020, 18; Hughes 2020, 21).

## MERENKULUN PÄÄSTÖKAUPPA: MAHDOLLISIA TOTEUTUSTAPOJA JA KOMISSION EHDOTUS TOTEUTUKSEN YKSITYISKOHDISTA

Tässä luvussa käsitellään mahdollisia toteutustapoja merenkulun sisällyttämiseksi EU:n päästökauppaan. Luvussa esitellään erilaisia vaihtoehtoja päästöoikeuksien jakotavoista, päästökaupan maantieteellisestä laajuudesta ja siitä, mitä päästöjä kauppaan sisällytetään. Tämä pohdinta antaa osviittaa siitä, miten merenkulun päästökauppa voisi kehittyä tulevaisuudessa. Lisäksi tässä luvussa esitellään, millaista päästökauppaa Euroopan komissio ehdotti merenkululle heinäkuussa 2021. Tätä kirjoitettaessa (marraskuussa 2022) parlamentaarinen neuvotteluprosessi on kuitenkin edelleen kesken, joten merenkulun päästökaupan lopullisesta muodosta ei ole vielä tehty päätöksiä.

### Mahdollisia toteutustapoja merenkulun päästökaupalle

Koska meriliikenne on kansainvälistä, päästökaupan maantieteellinen laajuus vaikuttaa ratkaisevasti järjestelmän tehokkuuteen ja todelliseen toimivuuteen. Esillä on ollut kolme eri maantieteellisen laajuuden mallia: EU:n sisäiseen päästökauppaan (”MINTRA”) kuuluisivat vain unionin jäsenmaiden väliset merimatkat. Toiseen malliin kuuluisivat unionin sisäisen liikenteen lisäksi kaikki päästöt, joita aiheutuu EU-maiden ja kolmansien maiden välisillä merimatkoilla (”MEXTRA100”). Näiden välimuodoista on ollut esillä malli, jossa laskettaisiin unionin sisäisen liikenteen päästöt kokonaan ja 50 prosenttia kolmansiin maihin ulottuvan liikenteen päästöistä (”MEXTRA50”). (Honkatukia ym. 2021, 12, 55.)

Vaihtoehdoista MEXTRA-järjestelmät olisivat tehokkaampia kuin pelkkä EU:n sisäisen meriliikenteen kattava systeemi. MEXTRA-laajuisia järjestelmiä voisi olla kuitenkin hyvin vaikea toteuttaa, koska päätös vaatisi hyväksynnän myös kolmansilta mailta. Tällöin ainakin EU:n tärkeimpien kauppakumppanien lainsäädäntöelinten pitäisi antaa hyväksyntänsä järjestelmälle. Esimerkiksi Euroopan lentoliikenteen päästökaupan piti alun perin kattaa myös kolmansista maista ETA-alueelle saapuva lentoliikenne. Kolmannet maat kuitenkin vastustivat tätä ankarasti (Vihma & van Asselt 2014, 3). Siten Euroopan lentoliikenteen päästökauppaa ulottuu nykyisellään vain ETA-alueen välisiin lentoihin (Vihma & Van Asselt 2014, 7).



Myös päästöoikeuksien alkujakotapa on keskeinen valinta merenkulun päästökaupassa (Solakivi ym. 2020, 11). Mitä vähemmän elinkeinolle jaetaan ilmaisia päästöoikeuksia, sitä kalliimpaa päästöjen tuottaminen on. Jos ilmaisjakoa ei olisi ollenkaan, merenkulun sektorin yritykset joutuisivat ostamaan kaikki tarvitsemansa päästöoikeudet huutokaupasta. Tämä kannustaisi yrityksiä vähentämään päästöjään mutta myös lisäisi merikuljetuskustannuksia.

Kuten raportissa todetaan, muilla sektoreilla ilmaisjakoa käytetään vähentämään päästökaupasta aiheutuvaa hiilivuodon riskiä. Siksi esimerkiksi teollisuusalan yritykset saavat yleensä osan päästöoikeuksistaan ilmaiseksi. Sen sijaan sähköntuotannon sektorilla, joka ei kilpaile kansainvälisillä markkinoilla, kaikki päästöoikeudet hankitaan huutokaupasta. (Mellin ym. 2020, 22.)

Myös lentoliikenteessä ilmaisjako on toistaiseksi ollut pääasiallinen päästöoikeuksien allokointitapa. Lentoliikenteessä ilmaisjako perustuu niin kutsuttuun vertailuanalyysiin (engl. benchmarking-method). Vertailuanalyyssissä yritykset, jotka vähentävät enemmän päästöjään, saavat enemmän ilmaisia päästöoikeuksia. Lentoliikenteessä päästöt mitataan kuljetussuoritetta kohden. Vertailuanalyyssissä yritykset voivat tehdä voittoa myymällä ylimääräiset, ilmaiseksi saadut päästöoikeudet, muille toimijoille. (Mellin ym. 2020, 22.) Siten menetelmä kannustaa yrityksiä keskinäiseen kilpailuun päästövähennyksissä.

EU:n merenkulun kustannusten ja siten kilpailukyvyn kannalta on myös tärkeä kysymys, kuinka paljon toimiala saa mahdollisia ilmaisia päästöoikeuksia. Esimerkiksi lentoliikenteelle ja useimmille teollisuuslaitoksille jaettavien päästöoikeuksien määrä ei kata näiden sektorien tuottamia kasvihuonekaasupäästöjä (Hughes 2021, 35). Hughes (2021, 35) arvioi, että myös merenkulussa mahdollinen päästöoikeuksien ilmaisjako kattaisi vain osan toimialan aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä. Jos merenkulkuun saisi osan päästöoikeuksista ilmaiseksi, ilmaisten oikeuksien osuus luultavasti vähenisi ja mahdollisesti loppuisi kokonaan ajan myötä (Hughes 2021, 35). Tämä olisi linjassa sen kanssa, että myös muilla sektoreilla, kuten lentoliikenteessä, ilmaisjaon osuutta on vähennetty ja vähennetään jatkossa lisää (Reducing emissions from the shipping sector s.a).

Ilmaisten päästöoikeuksien allokointi merenkululle voisi perustua vertailuanalyysiin kuten lentoliikenteessä. Toisaalta lentoliikenteessä tämän metodin käyttäminen on yksinkertaisempaa. Merenkulun vertailuanalyyssissä tulisi huomioida, että eri alustyypeillä on erilaiset mahdollisuudet vähentää päästöjään. (Mellin ym. 2020, 22.) Lisäksi alusten päästöjä suhteessa kuljetussuoritteeseen ei voi aina vertailla suoraviivaisesti. Esimerkiksi Suomen varustamot (2021) on painottanut, että ”jäävahvistetut alukset kuluttavat väistämättä muita aluksia enemmän polttoainetta myös avovesissä kuljettaessa”. Siten esimerkiksi alusten jääluokat tulisi huomioida mahdollisissa päästöoikeuksien ilmaisjaossa.

Päästökaupan vaikutukset EU:n merenkulkuun riippuvat oleellisesti siitä, tuleeko meriliikenteen päästökaupasta avoin vai suljettu. Avoimessa päästökaupassa meriliikenne sisällytettäisiin osaksi nykyistä Euroopan päästökauppajärjestelmää. Tällöin merenkulkusektori voisi vapaasti käydä kauppaa päästöoikeuksilla muiden päästökauppaan kuuluvien sektorien kanssa. (Wang ym. 2015, 1, Honkatukia ym. 2021, 12.) Siten myös päästöoikeuden hinta olisi merenkulkusektorilla sama kuin muilla päästökaupan toimialoilla (Honkatukia ym. 2021, 12). Suljettu päästökauppa tarkoittaa, että meriliikenteelle luodaan oma EU:n laajuinen päästökauppajärjestelmänsä. Tässä mallissa päästöoikeuksilla käydään kauppaa vain merenkulun toimijoiden välillä. (Wang ym. 2015, 1, Honkatukia ym. 2021, 12.) Siten suljettuun merenkulun päästökauppaan muodostuisi oma päästöoikeuden hintatasonsa (Honkatukia ym. 202, 12).

Suljetussa järjestelmässä merenkululle pitäisi määrittää oma päästökattonsa eli tarjolla olevien päästöoikeuksien kokonaismäärä (Kågeson 2007, 16, Wang ym. 2015, 1). Kågeson (2007, 16) huomauttaa, että soveltuvan päästökaton valinta merenkululle on vaikeaa muun muassa siksi, että meriliikenteen volyyymi todennäköisesti kasvaa tulevaisuudessa. Päästökaton tulisi siis olla riittävän korkea, koska suljetussa järjestelmässä merenkulun toimijat eivät voisi ostaa päästöoikeuksia muilta sektoreilta (Kågeson 2007, 16). Toisaalta liian korkea päästökatto olisi riittämätön kannustin päästöjen laajamittaiseen vähentämiseen.

Honkatukia ym. (2021, 12) esittelevät myös kolmannen vaihtoehdon avoimen ja suljetun päästökaupan rinnalle. Tässä välimuodossa ”merenkulku saa ostaa muun päästökaupan oikeuksia, mutta sama ei toimi vastakkaiseen suuntaan”. Lentoliikenteen päästökauppa oli tällainen puoliavoin järjestelmä vuoteen 2020 asti, jonka jälkeen se muuttui kokonaan avoimeksi (Työ- ja elinkeinoministeriö s.a.). Puoliavoin malli olisi merenkulun kannalta joustavampi kuin kokonaan suljettu päästökauppa.

Päästökauppaan kuuluvia sektoreita tulee luonnollisesti valvoa, jotta yritysten todelliset päästöt eivät ylittäisi niiden hallussa olevia päästöoikeuksia. Meriliikenteen osalta valvonassa aiotaan hyödyntää EU:ssa jo käytössä olevaa merenkulun MRV-asetusta (Monitoring, reporting and verification) (Euroopan komissio 2021a). Merenkulun päästökaupan valvonassa voitaisiin periaatteessa hyödyntää jotain muutakin menetelmää, kuten jonkinlaista online-valvontaa. Tässä raportissa ei kuitenkaan käsitellä näitä vaihtoehtoja.

MRV-asetus on EU:n säädös ”meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen tarkkailusta, raportoinnista ja todentamisesta” (Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2015/757). Asetus on tullut voimaan vuonna 2015, ja ensimmäinen raportointikausi oli vuonna 2018 (International Chamber of Shipping (ICS), 2020). Asetuksen mukaan alusten hiilidioksidipäästöjä

tulee tarkkailla luotettavilla menetelmillä ja päästöistä on raportoitava. Raportointivelvollisuus koskee aluksen juridista omistajaa tai muuta laivaisäntää. Riippumaton osapuoli puolestaan todentaa päästöselvityksen. MRV-sääntelyä sovelletaan tiettyjä poikkeuksia lukuun ottamatta aluksiin, joiden bruttovetoisuus on yli 5000 GT (engl. gross tonnage). Säädos koskee vain kaupallisiin tarkoituksiin käytettäviä aluksia. Täten sitä ei sovelleta esimerkiksi sota- ja kalastusaluksiin eikä jäänmurtajiin. MRV-asetus ei ulotu myöskään sisävesiliikenteeseen. (EU/2015/757, artikkelat 1,2,3,14.)

MRV-sääntelyssä hiilidioksidipäästöt tulee raportoida unionin sisäisiltä matkoilta ja matkoilta, joiden lähtö- tai päätesatama sijaitsee EU:n jäsenvaltiossa. Aluksen hiilidioksidipäästöt lasketaan kertomalla polttoaineenkulutus kyseisen polttoaineen päästökertoimella, joka vaihtelee polttoainetyypeittäin. Polttoaineen kulutuksen laskemiseen on puolestaan useampia hyväksytyjä menetelmiä. (EU/2015/757, 2. artikla, liite I.)

Merenkulun toimijoiden kannalta on keskeistä, mitkä kasvihuonekaasupäästöt sisällytetään sektorille ulotettavaan päästökauppaan. Meriliikenteen tuottamia kasvihuonekaasupäästöjä ovat muun muassa hiilidioksidi, typpioksiduuli ja metaani. Laivojen typpioksiduulipäästöt ovat kuitenkin kokonaisuutta tarkastellen vähäisiä. Metaanipäästöjä syntyy lähinnä vain aluksilla, joissa polttoaineena käytetään nesteytettyä maakaasua (engl. liquified natural gas, LNG). LNG-alusten määrä globaalisti on kuitenkin edelleen marginaalinen, vaikkakin niiden määrä on 2010-luvun aikana kasvanut merkittävästi. Laivojen pakokaasupäästöistä syntyy myös ilmastonmuutosta kiihdyttäviä mustahiilipäästöjä, jotka eivät kuitenkaan kuulu EU:n päästökaupan piiriin (Mellin ym. 2020, 18).

Hiilidioksidipäästöt muodostavat toistaiseksi valtaosan eli 98 prosenttia merenkulun aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä. Toisaalta LNG-laivojen määrän mahdollisesti lisääntyessä myös laivaliikenteen metaanipäästöjen arvioidaan kasvavan merkittävästi. Metaanipäästöjen sisällyttäminen päästökauppaan voisi lisätä LNG-laivojen tarvitsemia päästöoikeuksia.

EU:n päästökauppadirektiivissä nimetään kuusi kasvihuonekaasua, joihin järjestelmää voidaan soveltaa: Hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), metaani (CH<sub>4</sub>), typpioksiduuli (N<sub>2</sub>O), fluorihiihivedyt (HFC), perfluorihiihivedyt (PFC) ja rikkiheksafluoridi (SF<sub>6</sub>) (EY/2003/87, Liite II). Mellin ym. (2020) huomauttavat kuitenkin, että EU:n päästökaupan käsikirjassa (engl. EU ETS Handbook) nimetään päästökaupan koskevan hiilidioksidipäästö-, typpioksiduulipäästö- ja PFC-päästöjä tietyiltä teollisuuden aloilta. Tämä viittaa siihen, että järjestelmää ei toistaiseksi sovelleta kaikkiiin päästökauppalainsäädännössä nimettyihin päästöihin. Unionin dokumenteista puuttuu esimerkiksi tarkka ohjeistus siihen, miten metaanipäästöt voisi huomioida päästökaupassa. (Mellin ym. 2020, 18–19.)

Mellin ym. (2020, 19) mukaan lähtökohta on, että kaikki päästökauppalainsäädäntöön kuuluvat kasvihuonekaasupäästöt sisällytettäisiin merenkulun päästökauppaan. Kuten edellisessä kappaleessa todetaan, parhaillaan päästökauppaa sovelletaan kuitenkin suppeammin. Lisäksi MRV-sääntely kattaa toistaiseksi vain alusten hiilidioksidipäästöt. Käytännössä päästöjen raportointivelvollisuus tulisi laajentaa kaikkiin päästöihin, joihin päästökauppa ulotetaan. (Mellin ym. 2020, 19).

Edellä mainittujen tekijöiden lisäksi on oleellista, mitä yksikköä kohti kasvihuonekaasupäästöt mitataan. Mellin ym. (2020, 36) mainitsevat, että hiilidioksidipäästöt voisi mitata esimerkiksi tonnikipometriä kohden. Tonnikipometristä käytetään myös nimityksiä kuljetussuorite ja liikennesuorite. Tilastokeskuksen (s.a.) määritelmän mukaan ”kuljetussuorite (tonnikipometri) kuvaa kuljetustyön määrää, joka saadaan kuljetetun tavaramäärän (tonnia) ja kuljetusmatkan pituuden (kilometriä) tulona”.

MRV-asetus vaatii raporttoimaan aluksen hiilidioksidipäästöt kolmella eri tavalla. Laiva-isännän on ilmoitettava aluksen vuosittaiset kokonaispäästöt sekä kokonaispäästöt kuljettua matkaa (merimaili) ja kuljetussuoritetta kohti (tonnimaili). (European Maritime Safety Agency (EMSA) s.a.) Tonnimaili mittaa kuljetussuoritetta tonnikipometrin tavoin, vain etäisyyden mittayksikkö on eri. Mellin ym. (2020) ehdotus päästöjen mittaamisesta kuljetussuoritetta kohti olisi siten linjassa MRV asetuksen edellyttämän raportoinnin kanssa.

Euroopan unioni tukee vähähiilisten teknologioiden käyttöönottoa eri toimialoilla Innovaatorahaston (engl. Innovation Fund) avulla. Innovaatorahastoa ylläpidetään tuloilla, joita saadaan päästöoikeuksien huutokaupasta. (Innovation Fund s.a.) Innovaatorahasto vai- kuttaa tähän asti soveltuvan tarkoitukseensa (Euroopan komissio 2021c, liite 11, 59). Myös merenkulun päästökauppaan on ehdotettu tämänkaltaista tukirahastoa vuosille 2022–2030. Niin kutsuttu Ocean Fund -rahasto tukisi vähähiilisiä ratkaisuja merenkulkusektorilla. (Euroopan parlamentti 2020.) Huutokaupasta saatujen tulojen käyttö merenkulun hyväksi voisi lisätä meriliikenteen päästökaupan hyväksyttävyyttä alan toimijoiden keskuudessa.

## **Euroopan komission ehdotus meriliikenteen päästökaupan toteuttamiseksi (14.7.2021)**

Euroopan komissio on ehdottanut, että meriliikenne liitettäisiin osaksi nykyistä EU:n päästökauppaa (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 16). Tämä vaihtoehto oli komission kuulemien sidosryhmien suosiossa (Euroopan komissio 2021c, luku 4, 157–158). Merenkululle ei siis komission esityksen mukaan luotaisi omaa päästökauppajärjestelmäänsä. Tätä raporttia kirjoittaessa näyttää siltä, että päästökauppa olisi avoin molempiin suuntiin. Tämä

tarkoittaa, että myös muiden sektoreiden toimijat voisivat ostaa päästöoikeuksia merenkulun toimijoilta (ja vastaavasti merenkulun toimijat muiden sektoreiden toimijoilta).

Euroopan komissio arvioi, että merenkulun liittäminen päästökauppaan lisäisi järjestelmän piiriin noin 90 miljoonaa hiilidioksiditonnia. Päästökauppaan kuuluvien hiilidioksidipäästöjen kokonaismäärään verrattuna tämä lisäys on suhteellisen vähäinen. Siten päästöoikeuksien saatavuus muilla sektoreilla ei oletettavasti juuri muutu, vaikka merenkulku liitetään järjestelmään. (Euroopan komissio 2021c, luku 4,158.)

Komissio ehdottaa kuitenkin, että päästöoikeuksien kokonaismäärää lisättäisiin 79 miljoonalla kappaleella, kun merenkulku liitetään päästökauppaan (Euroopan komissio 2021c, artikla 3h, 44). Ideana on, että päästökattoa kasvatettaisiin MRV-asetukseen kuuluvien alusten vuosina 2018–2019 tuottamien hiilidioksidipäästöjen verran. Päästödata näille vuosille saadaan MRV-asetuksella kerätyistä tiedoista. (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 17.)

Päästökatto kuitenkin pienenee lineaarisesti vuosittain. Vuonna 2021 tämä lineaarinen päästövähennyskerroin (engl. linear reduction factor) on 2,2 % (Revision for phase 4 s.a.). Komissio ehdottaa kuitenkin, että jatkossa lineaarista päästövähennyskerrointa kasvatettaisiin 4,2 prosenttiin, jolloin päästökatto pienenesi kiihtyvällä tahdilla. Tämä muutos tulisi voimaan vuoden päästä siitä, kun komission ehdotukset merenkulun liittämisestä päästökauppaan astuisivat voimaan. (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 17.) Muutoksella pyritään siihen, että EU voi saavuttaa 55 prosentin päästövähennystavoitteen vuoteen 2030 mennessä.

Maantieteelliseksi laajuudeksi ehdotetaan ”MEXTRA50”-mallia. MEXTRA50 kattaisi kokonaan EU:n sisäisten merimatkojen päästöt ja unionin jäsenmaiden satamissa aiheutuvat päästöt. Lisäksi mallissa huomioitaisiin puolet päästöistä, jotka aiheutuvat EU-maiden ja kolmansien maiden välisistä merimatkoista. Laivayhtiöiden tulisi siis hankkia päästöoikeuksia joko 100 % (sisäiset matkat) tai vastaavasti 50 % (kolmansiin maihin suuntautuvat matkat) näiden matkojen päästöistä. (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 16.) Kolmansista maista EU-satamaan saapuvassa liikenteessä lähtöpiste päästölaskennalle olisi viimeinen unionin ulkopuolella oleva satama ja päätepiste puolestaan ensimmäinen EU-satama. EU-satamasta lähtevälle meriliikenteelle sama päteisi toisinpäin. (Euroopan komissio 2021c, luku 17, 144.)

Euroopan komissio ehdottaa, että kaikki päästöoikeudet jaettaisiin merenkululle huutokauppaamalla riippumatta alusten päästövähennysmahdollisuuksista (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 52). Komission ehdotuksen mukaan myöskään jäävähvistetuille aluksille ei siis tulisi ilmaisjakoa, vaikka esimerkiksi Suomen varustamoliitto oli tätä toivonut (Suomen Varustamot 2021).

Koska meriliikenteen päästökaupan valvonnassa aiotaan hyödyntää MRV-asetusta, tuleva meriliikenteen päästökauppa kattaa ne merenkulun aktiviteetit ja toimijat, joita nykyinen MRV-asetus koskee. Päästökauppasäädösten noudattamisesta olisivat niin ikään vastuussa samat tahot, joilla on MRV-asetuksen mukainen raportointivelvollisuus alusten päästöistä. (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 50–51.) Taulukko 1 havainnollistaa päästökauppasääntelyn rajauksia.

**Taulukko 1.** EU:n MRV-asetuksen rajaukset. Lähde: Euroopan komissio (2021c, luku 17, 144)

EU MRV -asetukseen kuuluvat matkat ja alukset	EU MRV -asetukseen kuulumattomat matkat ja alukset
<b>Matkat</b> , joilla käydään EU-satamassa.	<b>Matkat</b> , joilla ei käydä EU-satamassa.
<b>Matkan tarkoitus:</b> Matkustajien kuljettaminen Rahdin kuljettaminen	<b>Matkan tarkoitus:</b> Matkat, joiden tarkoitus on muu kuin rahdin tai matkustajien kaupallinen kuljettaminen.
<b>Laivat:</b> >5000 GT Konttialukset Irtolastialukset Rahtialukset Ro-ro-alukset Tankkerialukset Lautat	<b>Laivat:</b> < 5000 GT Sota-alukset Kalastusalukset Puiset alukset Alukset, jotka eivät kulje konevoimalla.

MRV-asetuksen mukaan hiilidioksidipäästöt raportoidaan aluskohtaisesti. Päästökauppaa varten päästötiedot vaadittaisiin kuitenkin yhtiötasolla. Raportointivelvollisen tahon pitäisi siis summata kaikkien sen vastuulla olevien alusten päästöt ja raportoida ne kokonaisuudessaan. (Euroopan komissio 2021c, artikla 3, 60.) Tätä raporttia kirjoittaessa näyttää siltä, että päästöjen mittayksikkönä käytettäisiin vuotuisia kokonaispäästöjä (milj. tonnia CO<sub>2</sub>-päästöjä) sen sijaan, että päästöt mitattaisiin esimerkiksi kuljetussuoritetta kohti (Euroopan komissio 2021c, artikla 3, 41–42).

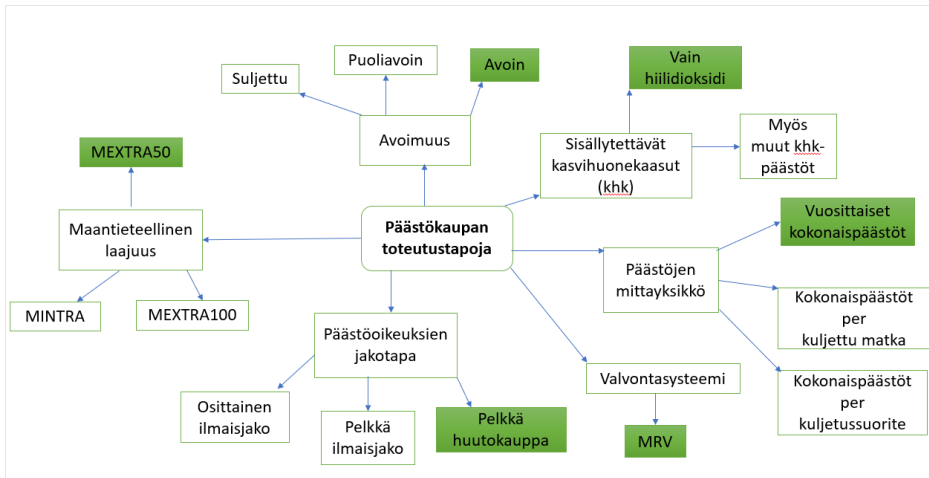
Merenkulun päästökauppaan sisällytetään ainakin alkuvaiheessa vain hiilidioksidipäästöt, sillä tämä on linjassa MRV-asetuksen edellyttämän raportoinnin kanssa (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 51). Myös Mellin ym. (2020, 20) toteavat, että muiden kasvihuonekaasupäästöjen sisällyttäminen merenkulun päästökauppaan hidastaisi järjestelmän käyttöönottoa. Euroopan komission mukaan merenkulun päästökauppa tulisi kuitenkin ajan myötä laajentaa koskemaan kaikkia kasvihuonekaasupäästöjä, joita merenkulusta aiheutuu (Euroopan komissio 2021c, luku 5, 51).

Euroopan komissio esittää Innovaatorahaston koon kasvattamista lähivuosina (Euroopan komissio 2021a.). Tällöin nykyistä useampi toimija voi saada avustusta vähähiilisten tekniikoiden käyttöönottoon. Osa rahaston varoista on tarkoitus ohjata merenkulun vihreän siirtymän tukemiseen (Euroopan komissio 2021c, artikla 3h, 47–48).

Esityksen aikataulun mukaan merenkulun päästökauppa alkaisi rajoitetusti vuonna 2023 (Euroopan komissio 2021c, artikla 3ga, 42). Tämä aika-arvio on optimistisempi kuin esimerkiksi Mellin ym. (2020, 23) esittämä arvio, jonka mukaan meriliikenteen päästökauppa voisi alkaa aikaisintaan vuonna 2026. Onkin mahdollista, että päästökaupan aikataulu viivästyy huomioiden, että tätä kirjoitettaessa marraskuussa 2022 lopullista poliittista päätöstä päästökaupasta ei ole vielä tehty. Euroopan komission ehdotuksessa on tosin kolmen vuoden siirtymäaika merenkulun päästökaupalle. Vuosina 2023–2025 vain osa laivojen päästöistä kuuluisi järjestelmän piiriin. Siirtymäaika loppuisi vuonna 2026, jolloin laivayhtiöiden päästöoikeuksien määrän olisi vastattava niiden raportoituja päästöjä. (Euroopan komissio 2021c, 44 artikla 3ga.) Taulukko 2 esittää komission ehdottamaa aikataulua merenkulun päästökaupalle. Kuva 2 puolestaan havainnollistaa päästökaupan mahdollisia toteutustapoja.

**Taulukko 2.** Komission ehdotus merenkulun päästökaupan aikataulusta. Esimerkiksi vuonna 2023 laivaisännän pitäisi luovuttaa päästöoikeuksia määrä, joka vastaa 20 prosenttia aluksen todennetuista päästöistä. Lähde: Euroopan komissio (2021c, 44, artikla 3ga)

Vuosi	Merenkulun päästökaupan piiriin kuuluvien CO <sub>2</sub> -päästöjen osuus alusten kokonaispäästöistä
2023	20 %
2024	45 %
2025	70 %
2026 ja tästä vuodesta eteenpäin	100 %



**Kuva 2.** Erilaisia vaihtoehtoja päästökaupan toteuttamiseen. Vaihtoehdot, joita komissio on ehdottanut, on maalattu vihreällä.

## PÄÄSTÖKAUPPAMALLIEN MAHDOLLISET VAIKUTUKSIA KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖIHIN JA EU:N MERENKULUN KILPAILUKYKYYN

### Merenkulun päästökaupan mahdollisia vaikutuksia kasvihuonekaasu-päästöihin

Solakivi ym. (2020, 46) mukaan päästökaupan vaikutuksia merenkulun hiilidioksidipäästöihin ei voi tässä vaiheessa ennustaa tarkasti. Seuraavissa kappaleissa pohditaan kirjallisuuslähteisiin tukeutuen, millaisia päästövaikutuksia EU:n merenkulun päästökaupalla voisi olla. Luvussa käsitellään sekä ehdotetun päästökauppamallin että vaihtoehtoisten toteutustapojen mahdollisia vaikutuksia. Lisäksi esitellään, millä tavoin merenkulun toimijat voivat yrittää kiertää päästökauppasäännöksiä. Säännösten kiertäminen heikentäisi päästökaupan päästövaikuttavuutta.

Solakivi ym. (2020, 51) päättelevät kirjallisuuden perusteella, että alueellinen merenkulun päästökauppa ei automaattisesti vähennä toimialan kokonaispäästöjä vaan voisi pahimmassa tapauksessa jopa kasvattaa niitä. Vaikutukset kasvihuonekaasupäästöihin riippuvat olennaisesti päästökaupan toteutustavasta. Alueellisessa järjestelmässä on ensiarvoisen tärkeää huomioida hiilivuodon riskit (Hughes 2020, 54). Hughes (2020, 23) huomauttaa, että Euroopan päästökaupan laajentaminen unionin sisäiseen lentoliikenteeseen ei näytä vähentäneen hiilidioksidipäästöjä tällä sektorilla.



Solakivi ym. (2020, 49) puolestaan olettavat, että päästökauppa kannustaa joka tapauksessa yrityksiä vähentämään hiilidioksidipäästöjään ainakin operatiivisin toimin. Näihin kuuluu esimerkiksi kulkunopeuden alentaminen. Toisaalta Gu ym. (2019, 333) toteavat, että operatiiviseen toimintaan vaikuttavat päästöoikeuden hinnan lisäksi polttoaineen hinta, markkinatilanne ja kuljetussuoritteiden taloudellinen kannattavuus.

Mitä laajempi päästökauppa on alueellisesti, sitä suurempi osuus päästöistä sen piiriin kuuluu (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 88). Euroopan komission ehdottama MEXTRA50-laajuinen malli vähentää merenkulun kasvihuonekaasupäästöjä arviolta 45–47 megatonnia vuoteen 2030 mennessä. Vastaava arvio EU:n sisäiselle MINTRA-mallille on 30–34 megatonnia ja laajimmalle MEXTRA100-mallille on 59 megatonnia. Vertailukohtana päästövähennyksille on niin sanottu business-as-usual -skenaario ilman merenkulun päästövähennyksiin tähtäviä toimenpiteitä. (Euroopan komissio 2021c, luku 7, 146.)

Merenkulun päästökaupan avoimuus vaikuttaa puolestaan siihen, millä sektoreilla päästövähennykset toteutuvat. Suljetussa päästökaupassa päästökatto on sitova merenkululle, jolloin kaikki päästövähennykset tehdään meriliikenteessä. Mellin ym. (2020, 27–28) arvioivat, että päästöjen vähentäminen on kalliimpaa merenkulussa kuin monilla muilla Euroopan päästökauppaan kuuluvilla sektoreilla. Siksi on ennakoitu, että nyt ehdotetussa avoimessa päästökaupassa merenkulusta tulee päästöoikeuksien netto-ostaja. Täten päästövähennyksiä tehtäisiin enemmän muilla päästökaupan sektoreilla. (Kågeson 2007, 22.)

Koska muiden toimialojen päästöt vähenisivät, merenkulun liittäminen päästökauppaan vähentäisi kokonaisuudessaan unionin nettopäästöjä. Siten Euroopan komission arvion mukaan unionin nettopäästöihin ei vaikuta se, tuleeko merenkulun päästökaupasta avoin vai suljettu. Toisaalta tämä vaikuttaa siihen, millainen kannustin merenkulun toimijoilla on pyrkiä välttämään päästökauppasäädöksiä. (Euroopan komissio 2021c, luku 7, 146.) Seuraavissa kappaleissa pohditaan eri tapoja kiertää päästökauppasäädöksiä.

## Tapoja, joilla merenkulun toimijat voivat pyrkiä kiertämään päästökauppa-säännöksiä

Mitä kalliimpi päästökauppa on EU:n merenkulun toimijoille, sitä kannattavampaa päästökauppasäännösten välttely on. Siten tällaisen välttämiskäyttäytymisen riskiin vaikuttavat samat tekijät kuin merenkulun kilpailukykyyn. Päästöoikeuksien ilmaisjaon puuttuminen voi lisätä riskiä päästökauppasäännösten välttelyyn; tämä riippuu myös päästöoikeuden hinnasta. Sen sijaan komission ehdottamaan avoimeen päästökauppaan liittyy pienempi välttämiskäyttäytymisen riski kuin suljettuun päästökauppaan.

Laajinkaan (MEXTRA100) unionin päästökaupamalli ei olisi globaali. Kolmansien maiden väliset matkat jäisivät joka tapauksessa Euroopan päästökaupan ulkopuolelle. Siten Euroopan komission mukaan hiilivuodon riski merenkulussa kasvaa unionin päästökaupan maantieteellisen laajuuden myötä. (Euroopan komissio 2021c, luvut 6 & 7, 88, 147.) Komission ehdottama MEXTRA50 -laajuus on maantieteellisesti vähiten ja eniten kattavimman mallin välimuoto. Siten yksistään maantieteellisen laajuuden tuoman riskin voidaan ehkä ajatella olevan vaihtoehtojen keskitasoa. Hiilivuodon kokonaisriski riippuu luonnollisesti päästökaupan toteuttamisen kokonaisuudesta.

Eräs välttämiskäyttötymisen muoto on se, että alukset tekisivät ylimääräisen pysähdyksen EU:n ulkopuoliseen satamaan. Tässä strategiassa laivayhtiöt lyhentäisivät matkaa, jolta päästöt lasketaan. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 94.) Esimerkiksi Euroopan ulkopuolelta Helsinkiin matkalla oleva alus voisi tehdä välipysähdyksen Pietariin. Tällöin päästöt laskettaisiin vain Pietari-Helsinki-väliltä todellisen matkan sijaan. Tällainen välttämiskäyttötyminen vähentää yhtiön tarvitsemien päästöoikeuksien määrää ja heikentää puolestaan merenkulun päästökaupan kattavuutta (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 94).

Toisaalta pysähtyminen ylimääräisessä satamassa aiheuttaa lisäkuluja, kuten operatiivisia kustannuksia ja vaihtoehtokustannuksia. Ylimääräisen pysähdyksen todennäköisyyteen vaikuttaakin se, kuinka kallis operaatio tämä on suhteessa päästöoikeuksien hintaan. Pidemmillä matkoilla lisäpysähdys on halvempi muihin kuluihin suhteutettuna. Merimatkan pituus lisää siten riskiä välipysähdykselle. (Euroopan komissio 2021c, 94–96.)

Ehdotetussa MEXTRA50-laajuudessa ylimääräisen pysähdyksen riski on arvioitu minimaaliseksi, jos päästöoikeuden hinta olisi 30 euroa. Vaihtoehtoisessa MEXTRA100-laajuudessa riski koskisi sitä vastoin 6,7 prosenttia kaikista päästökauppaan kuuluvista matkoista. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 96.) Toisaalta kesällä 2021 päästöoikeuden hinta on ollut jo viidenkymmenen euron tienoilla (Ember s.a.). Tällä hinnalla lisäpysähdyksen riski koskisi arviolta vajaata viittä prosenttia MEXTRA50-mallin kattamista matkoista. Tämä osuus on puolestaan noin kahdeksan prosenttia päästöistä, joihin MEXTRA50-malli ulottuisi. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 96.)

Euroopan komission mukaan lisäpysähdyksen riskiä ehkäisee huomattavasti se, että käyntisatamalle on tarkka määritelmä MRV-asetuksessa (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 95). Asetuksen mukaan ”käyntisatamalla” tarkoitetaan ”satamaa, johon alus pysähtyy lastaamaan tai purkamaan lastia taikka päästämään matkustajat alukseen tai aluksesta”. Siten esimerkiksi satamaa, jossa vain tankataan polttoainetta, ei luokitella käyntisatamaksi. (EU/2015/757, artikla 3.) Tarkka määritelmä vaatii siis alukselta tiettyjä toimenpiteitä sata-

massa. Ilman näitä lisäpysähdyksellä ei saada lyhennettyä matkaa, jolta päästöt lasketaan. Toisaalta on mahdollista, että osalla pitkistä rahtilaivojen matkoista yritys voisi purkaa osan lastista EU:n ulkopuoliseen satamaan, jolloin käyntisataman määritelmä täyttyisi. Euroopan komission mukaan käyntisataman määritelmää MRV-asetuksessa voidaan kuitenkin tarkentaa tulevaisuudessa. Tämä tulee kyseeseen silloin, jos ylimääräisiä pysähdyksiä aletaan tehdä siinä määrin, että se vähentää päästökaupan päästökattavuutta. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 95.)

Niin sanottu uudelleenlaivauksen riski koskee lähinnä konttialuksia (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 96; Solakivi ym. 2020, 13). Uudelleenlaivauksessa alukset ajettaisiin ensin unionin ulkopuoliseen satamaan, jossa kuorma purettaisiin ja lastattaisiin uudelleen toiseen alukseen. Kuorma kuljetettaisiin lopulliseen satamaansa vaihdetulla aluksella. Uudelleenlaivauksen riski kasvaa maantieteellisen laajuuden myötä, mutta mikään unionin päästökaupamalli ei eliminoi sitä kokonaan. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 96.) Satama, jossa uudelleenlaivaus toteutettaisiin, täyttäisi MRV-asetuksen mukaiset kriteerit käyntisatamalle. Siten myöskään MRV-asetuksen käyntisatamamääritelmän kiristäminen ei vähentäisi uudelleenlaivauksen riskiä.

Kuten ylimääräinen satamapysähdys, myös uudelleenlaivaus aiheuttaa kuluja. Siten toiminnan todennäköisyys riippuu sen kustannuksista ja sillä saavutetuista hyödyistä. Uudelleenlaivauksen kannattavuus riippuu oleellisesti ylimääräisen sataman vaatimien satamamaksujen suuruudesta. Lisäksi kustannuksiin vaikuttaa esimerkiksi se, kuinka paljon aluksen pitää poiketa varsinaiselta reitiltään uudelleenlaivauksen takia. Uudelleenlaivausta voisi tapahtua esimerkiksi Välimeren alueella Pohjois-Afrikassa tai Itämerellä Venäjän satamissa (olettaen, että kansainvälinen tilanne tulevaisuudessa mahdollistaa tämänkaltaiset logistiikkaketjut). Britannian tulevat merenkulun säädökset vaikuttavat siihen, tuleeko saarivaltion satamista houkuttelevia paikkoja uudelleenlaivaukselle. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 97.)

Eräs tapa välittää hiilidioksidipäästöjen hinnoittelua on siirtyä käyttämään aluksia, joiden bruttovetoisuus on alle 5000 GT. Tällaista toimintaa voisi harjoittaa lyhyemmillä, esimerkiksi unionin sisäisillä matkoilla. Siten riski tälle on suhteellisesti suurempi MINTRA-laajuudessa kuin MEXTRA-laajuudessa. Toisaalta pienempien alusten käyttöön voidaan siirtyä vain niillä sektoreilla, joilla se on verrattain tehokasta. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 98.) Myös tällainen käyttäytyminen vähentäisi merenkulun päästökaupan päästökattavuutta.

Tarvittavien päästöoikeuksien määrää voidaan pyrkiä vähentämään myös niin kutsutulla laivaston optimoinnilla. Tällä tarkoitetaan sitä, että laivanomistajat käyttäisivät energia-

tehokkaampia aluksiaan EU:n päästökaupan piiriin kuuluvilla alueilla. Päästökaupan ulkopuolisilla alueilla käytettäisiin tehottomampia aluksia. Tämä vähentäisi niiden alusten määrää, jotka vaativat energiatehokkuutta parantavia investointeja. Tällöin hiilidioksidipäästöt vähenisivät päästökaupan alueella mutta kasvaisivat sen ulkopuolella. Avoimessa päästökaupassa laivaston optimoinnin riskin arvioidaan kuitenkin olevan vähäinen. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 98.)

Merenkulun päästökaupassa on myös riski niin sanotulle liikennemuotojen muutokselle. Tällä tarkoitetaan sitä, että osa meriliikenteen kuljetuksista korvataan muilla kuljetusmuodoilla näiden ollessa merenkulkua edullisempia. Merikuljetusten siirtyminen maanteille lisäisi liikenteen kokonaispäästöjä, koska meriliikenteen hiilidioksidipäästöt ovat kuljetussuoritetta kohden pienemmät kuin maantieliikenteen. Sen sijaan rautatieliikenne on ympäristöystävällinen kuljetusmuoto, jos junat kulkevat päästöttömästi tuotetulla sähköllä. Tällöin päästöt voivat jopa vähentyä verrattuna siihen, että sama matka kuljettaisiin laivalla. (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 26–27.)

Lyhyillä ja keskipitkillä matkoilla junakuljetukset voivat olla varteenotettava vaihtoehto merenkululle reiteillä, joilla rautatielinja on käytettävissä. Lisäksi rautatiekuljetuksin voidaan saavuttaa sisämaassa sijaitsevat paikkakunnat. Toisaalta monet rautatielinjat ovat jo nyt ruuhkaisia ja lisäraiteiden rakentaminen on kallista. Maanteille voisi puolestaan siirtyä lähinnä osa konttiliikenteestä sekä RORO (roll on/roll off)- ja ROPAX (roll on/roll off & passenger) -alusten toteuttamista kumipyöräkuljetuksista. Konttien siirtäminen kuljetusmuodosta toiseen on suhteellisen helppoa. RORO- ja ROPAX-alukset ovat yleisiä etenkin Itämerellä liikenneiden meren ylityksen mahdollistamia kiinteitä linjoja. Näiden kuljetusten kohdalla lasketaan aina, onko meriyhteyden hyödyntäminen logistisesti taloudellisesti kannattavaa. Esimerkiksi Tukholmasta Tampereelle toteutettava kuorma-autokuljetus voitaisiin Saaristomeren ylitse toteutettavan laivauksen sijaan ajaa Tornion kautta maanteitse määränpäähänsä. Toisaalta esimerkiksi liikenneruuhkat, aikataulut ja kuljettajien lepoaikavaatimukset rajoittavat rahdin siirtämistä vesiltä maanteille (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 27).

Liikennemuotojen muutoksen todennäköisyyteen vaikuttavat siis muiden kuljetusmuotojen kustannukset suhteessa merenkulun kustannuksiin (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 27). Siten riski riippuu sekä merenkulun päästökaupan kustannuksesta että siitä, kuinka kallista päästöjen tuottaminen on muilla liikennesektoreilla. Suljettu merenkulun päästökauppa lähinnä nostaisi merikuljetuskustannuksia, jos puhtaampia ratkaisuja ei saataisi kohtuullisella aikavälillä käyttöön. Tällöin esimerkiksi osa rahtikuljetuksista voisi siirtyä maanteille erityisesti EU:n sisäisessä liikenteessä. Sen sijaan päästökaupan maantieteellinen

laajuus ei vaikuta liikennemuotojen muutoksen riskiin, koska muiden kulkuneuvojen kanssa kilpailee lähinnä EU:n sisäinen meriliikenne.

Komissio ehdottaa tieliikenteelle erillistä päästökauppaa, jonka lisäksi tieliikenteessä käytetyt polttoaineet ovat korkeasti verotettuja. Komissio arvioi, että näistä kuluista johtuen ehdotettu merenkulun päästökauppa ei siirtäisi merikuljetuksia maanteille. (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 26–27.) Toisaalta tieliikenteen päästöoikeuksille muodostuu oma hintatasonsa erillisen päästökaupan takia. Mikäli merenkulun hankkimien päästöoikeuksien hinta nousisi korkealle suhteessa tieliikenteen päästökaupassa myytäviin oikeuksiin, tämä edesauttaisi tieliikenteen kilpailukykyä merikuljetusten kustannuksella.

Laivaisännät voisivat myös raportoida päästöistä virheellisesti yrittääkseen vähentää vaadittujen päästöoikeuksien määrää. Päästöraporttien oikeellisuus on kuitenkin todennettava ulkopuolisella osapuolella MRV-asetuksen mukaisesti. Jos havaitaan, että päästöoikeuksia on luovutettu todellisia päästöjä vähemmän, laivaisäntä joutuu maksamaan tuntuvat sakot (Euroopan komissio 2021c, luku 18, 152). Laivaisännän on myös hankittava puuttuneet päästöoikeudet. Lisäksi päästökauppaa valvovien viranomaisten tulee julkistaa, mitkä yhtiöt eivät ole noudattaneet päästökauppasäädöksiä. Siten virheellisessä raportoinnissa on myös mainehaitan riski. (Euroopan komissio 2021c, luku 18, 152.) Näistä syistä johtuen virheellinen päästöjen raportointi ei välttämättä ole kovin todennäköinen uhka merenkulun päästökaupan toimivuudelle.

Euroopan komissio on estimoinut, kuinka todennäköistä päästökauppasäädösten kierto olisi merenkulun päästökaupan eri skenaarioissa. Ennusteissa on huomioitu päästökaupan maantieteellinen laajuus ja se, olisiko järjestelmä avoin vai suljettu. Komission ehdottamassa päästökaupamallissa riski säädösten kierrolle arvioidaan pieneksi. Laajemmassa MEXTRA100-mallissa, avoimessa päästökaupassa, riski on puolestaan keskitasoa. Sen sijaan suljetussa järjestelmässä riski olisi korkea ehdotetun MEXTRA50-laajuuden kanssa. MEXTRA100-laajuus yhdistettynä suljettuun merenkulun päästökauppaan aiheuttaisi erittäin korkean riskin päästökauppasäädösten välttelylle. Komission riskiarviot ulottuvat vuoteen 2030 asti. (Euroopan komissio 2021c, luku 7, 146.)

Euroopan päästökaupassa on tutkittu hiilivuotoilmiötä kahden ensimmäisen päästökaupakauden (2005–2007 ja 2008–2012) osalta. Päästöoikeuksien hankinta muodosti tarkastelluilla ajanjaksoilla vain pienen osan päästökauppaan kuuluvien toimijoiden tuotantokustannuksista. Siksi hiilivuodon riski oli pieni eikä siitä löydetty näyttöä. (Euroopan komissio 2021c, liite 9, 9.) Tämä luo toivoa siitä, ettei hiilivuotoa välttämättä tapahtuisi merkittävästi tulevassa merenkulun päästökaupassa.

Toisaalta hiilivuodon riskin suuruutta merenkulussa ei välttämättä voi arvioida sen perusteella, millaista näyttöä aiheesta on muilla sektoreilla. Arviointia vaikeuttavat merenkulun erityispiirteet, kuten kansainvälisyys. Lisäksi muilla toimialoilla hiilivuotoa on aiemmin ehkäisty ilmaisjaon avulla. Euroopan komissio ei kuitenkaan esitä merenkululle ilmaisjakoa. Päästöoikeuksien hinta on myös kasvanut viime vuosina reippaasti, mikä voi tehdä päästökaupan kiertämisestä yrityksille aiempaa kannattavampaa. On arveltu, että aiemmin hiilivuotoa on ehkäissyt myös päästöoikeuksien alhainen hinta. (Euroopan komissio 2021c, liite 9, 9.)

## Päästökaupan mahdolliset vaikutukset merenkulun kilpailukykyyn

Merenkulun päästökaupan vaikutukset alan toimijoiden kilpailukykyyn syntyvät suorista ja välillisistä kustannuksista, joita järjestelmä aiheuttaa sen piiriin kuuluville toimijoille. Sääntelyn ulkopuolelle jäävät voivat saada kilpailuetua välttäessään lisäkustannuksen. Tämä koskee esimerkiksi bruttovetoisuudeltaan juuri alle 5000 GT:n rajan alle jääviä aluksia (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 25). Toisaalta osa merenkulun sektoreista joutuu maksamaan päästökaupasta enemmän. Siten kilpailuasetelmat voivat muuttua myös järjestelmän sisällä. Tässä luvussa esitellään erilaisia kilpailukykyvaikutuksia, joita merenkulun päästökaupasta voi syntyä sektorille.

Komission ehdottamassa päästökaupamallissa on merenkulun kustannusten kannalta sekä positiivisia että negatiivisia puolia. Ehdotettu avoin päästökauppa saattaa aiheuttaa vähemmän kuluja meriliikenteelle kuin suljettu järjestelmä, koska merenkulun toimijat voivat ostaa päästöoikeuksia muilta sektoreilta. Tällöin ne voivat siis välttää osan kalliimmista päästövähennystoimista ostamalla päästöoikeuksia. Toisaalta ilmaisjaon puuttuminen lisää kustannuksia. Solakivi ym. (2020, 31) mukaan esimerkiksi 80 prosentin ilmaisjako-osuus merenkulun päästökaupan alkuvaiheessa lieventäisi kustannusvaikutuksia, joita päästökaupasta syntyy sektorille. Lisäksi kustannukset riippuvat päästöoikeuksien ja päästövähennysteekniikoiden hinnoista, joita on vaikea ennustaa (Mellin ym. 2020, 3, 28).

Osa merenkulun toimijoista on epäillyt, että merenkulun liittäminen Euroopan päästökauppaan vääristäisi unionin ja unionin ulkopuolisten laivaoperaattoreiden välistä kilpailua (Koesler ym. 2015, 24). Euroopan komissio ei pidä tätä uhkaa todennäköisenä. Päästökauppaa sovellettaisiin lippuvaltiosta riippumatta kaikkiin EU:n satamissa vieraileviin aluksiin. Tämä periaate koskee kaikkia toteutusvaihtoehtoja, joita komissio on ehdottanut merenkulun päästökaupalle. Satamavierailujen määrä saattaa kuitenkin vaikuttaa päästöjä vähentävien investointien takaisinmaksuaikaan. Aluksilla, joilla vieraillaan useammin unionin satamissa, voidaan hyötyä lyhyemmistä takaisinmaksuajoista. (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 25.)

Lyhyen ja pitkän matkan merenkulun toimijoiden välillä ei ole merkittävää kilpailua, koska ne palvelevat eri tarkoitusta. Merenkulun päästökaupan ei oleteta vaikuttavan tähän asetelmaan. (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 25.) Pitkillä matkoilla merikuljetuksille ei ole juuri relevantteja vaihtoehtoja. Lähimerenkulku kilpailee puolestaan lähinnä tieliikenteen (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 25) ja rautatieliikenteen kanssa. Mellin ym. (2020, 31) varoittavat, että merenkulun päästökauppa voi heikentää lähimerenkulun kilpailukykyä merkittävästi, jos sektorille ei jaeta ilmaisia päästöoikeuksia. Euroopan komissio on kuitenkin arvioinut, että lähimerenkulun kilpailukyky suhteessa muihin kuljetusmuotoihin pysynee ennallaan ehdotetun päästökaupan myötä (Euroopan komissio 2021c, luku 33, 26–27).

Päästökaupan aiheuttamat rasitteet riippuvat siitä, kuinka suuren osan kustannuksesta laivaisäntä voi sälyttää asiakkaille ja kuluttajille (Koesler ym. 2015, 23). Toinen tärkeä elementti on mahdollisuus vähentää alusten päästöjä kustannustehokkaasti (Mellin ym. 2020, 30–31). Nämä tekijät vaihtelevat paljon merenkulun sektorien välillä (Koesler ym. 2015, 23; Mellin ym. 2020, 30–31). Päästöjä voidaan vähentää operatiivisin menetelmin esimerkiksi hidastamalla kulkuvauhtia. Aikataulutetussa linjaliikenteessä nopeuden aleneminen ei kuitenkaan yleensä tule kyseeseen (Solakivi ym. 2020, 27). Lisäksi päästöoikeuksien tarpeeseen vaikuttaa se, mitä yksikköä kohti alusten päästöt mitataan. Mellin ym. (2020) arvioivat päästökaupan vaikutuksia eri alustyyppeihin, jos päästöt lasketaan kuljetussuoritetta kohti. Tällöin päästöoikeuksia tarvitsevat enemmän ne alukset, jotka kuluttavat paljon polttoainetta suhteessa kuljetussuoritteeseen. Tähän luokkaan kuuluvat RO-RO ja ROPAX-alukset. (Mellin ym. 2020, 32.)

Myös konttiliikenne kuluttaa verrattain paljon polttoainetta lastiyksikköä kohti, vaikkakin vähemmän kuin RO-RO- ja ROPAX-alukset (Solakivi ym. 2020, 27). Toisaalta erään arvioon mukaan konttiliikenteessä voidaan pitkällä aikavälillä sälyttää kaikki päästökaupan kustannukset kuluttajille. Tämä vähentäisi järjestelmän vaikutuksia sektoriin. (Koesler ym. 2015, 23.) Arvio koski kuitenkin globaalia päästökauppaa, joten ennuste ei välttämättä päde alueellisessa järjestelmässä.

Solakivi ym. (2020, 13) mukaan päästökauppa vaikuttaisi vähiten hitaaseen irtolastialusliikenteeseen. Wang ym. (2015, 5) tosin huomauttavat, että irtolastialukset ovat teknisesti yleensä vanhempia ja energiatehottomampia aluksia verrattuna esimerkiksi konttirahti-aluksiin. Tämä lisää sektorin tarvitsemia päästöoikeuksia, ellei irtolastialuskantaan tehdä merkittäviä alusinvestointeja.

Iän lisäksi aluksen koko vaikuttaa sen suhteelliseen tehokkuuteen. Pienet alukset kuluttavat kuljetussuoritetta kohti enemmän polttoainetta kuin isot laivat. Siten päästökauppa tuo

suhteessa enemmän kustannuksia pienemmillä aluksilla, joiden bruttovetoisuus kuitenkin ylittää päästökaupalle suunnitellun 5000 GT:n rajan. Siksi järjestelmä vaikuttaa enemmän lähimerenkulkuun kuin kaukomerenkulkuun ainakin, jos päästöt lasketaan kuljetussuoritetta kohti. (Mellin ym. 2020, 32.) Toisaalta osa pienistä aluksista kulkee isoja hitaammin (Mellin ym. 2020, 32), vaikka tämäkin vaihtelee paljon eri alustyyppien välillä. Itämeren lähimerenkulussa päästökaupan vaikutusta lisää myös se, että osa aluksista on jäävähvistettyjä.

Päästökaupasta aiheutuva hallinnollinen rasite puolestaan riippuu yrityksen koosta. Pk-yrityksillä ei ole hallinnollista kapasiteettia yhtä paljon kuin suurilla yrityksillä, joten moni niistä joutuisi ulkoistamaan päästökauppaan liittyviä hallinnollisia tehtäviä. Siten järjestelmä aiheuttaisi sen piiriin jääville pk-yrityksille suhteessa enemmän kuluja kuin suuryrityksille. Tämä voisi myös asettaa ne epäedulliseen asemaan globaalissa kilpailussa. Euroopan komission ehdottama päästökaupamalli jättää kuitenkin valtaosan, 95 prosenttia, merenkulkualan pk-yrityksistä järjestelmän ulkopuolelle. Tämä johtuu siitä, että päästökauppaan kuuluisivat vain alukset, joiden bruttovetoisuus on yli 5000 GT. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 101–103.)

Toisaalta muilla sektoreilla arviolta 90 prosenttia päästökaupasta aiheutuvasta hallinnollisesta taakasta liittyy päästöjen raportointiin. Merenkulussa raportointivelvollisuudet ovat MRV-asetuksen myötä olleet voimassa jo vuodesta 2018. Siten Euroopan komissio arvioi, ettei päästökauppa lisää merkittävästi hallinnollista taakkaa merenkulussa. (Euroopan komissio 2021c, luku 6, 101–102.)

## MUITA MERENKULUN PÄÄSTÖJÄ RAJOITTAVIA EU:N SÄÄDÖKSIÄ

Päästökauppa ei ole ainoa keino, jolla EU pyrkii tulevana vuosina vähentämään merenkulun kasvihuonekaasupäästöjä. EU yrittää tukea päästöjen vähentämistä myös FuelEU Maritime -aloitteella sekä esimerkiksi polttoaineiden verotusta muuttamalla. Komission mukaan nämä toimenpiteet täydentävät päästökauppaa (Euroopan komissio 2021d, 30; Euroopan komissio 2021e); tosin monimutkaistuviin päästösäännöksiin sisältyy aina riski päällekkäisestä sääntelystä ja sääntelyn yleisestä sekavuudesta. Tässä luvussa käsitellään muun muassa edellä mainittuja EU:n säädöksiä, jotka koskevat unionin merenkulun päästöjen rajoittamista.

FuelEU Maritime -aloitteella pyritään edistämään fossiilittomien energianlähteiden käyttöä EU:n merenkulussa matkojen aikana ja EU-satamissa. Tämän tarkoitus on vähentää merenkulun hiilidioksidipäästöjä päästökaupan ohella. Päästökaupan tavoin FuelEU Ma-



ritime –aloite perustuisi MRV-asetukseen ja koskisi siten samoja aluksia kuin MRV-asetus. (Euroopan komissio 2021d, 20, 30.)

FuelEU Maritime asettaa raja-arvot sille, kuinka paljon kasvihuonekaasupäästöjä merimatkal- la käytetty energianlähde saa tuottaa energiayksikköä kohti (Euroopan komissio 2021d, 23). Tätä kutsutaan energian kasvihuonekaasuintensiteetiksi. Komission ehdotuksessa sen mitta- yksikkö on hiilidioksidigrammaekvivalentti megajoulea kohden. Raja-arvojen määrittelyssä käytettäisiin referenssinä laivaston vuonna 2020 käyttämän energian keskimääräistä kasvi- huonekaasuintensiteettiä (Euroopan komissio 2021d, 23). Taulukossa 3 esitetään tarkemmin, miten merimatkoilla käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteettiä tulisi vähentää.

FuelEU Maritime -aloitteen raja-arvot koskisivat kaikkea EU:n sisäisessä meriliikenteessä käytettyä energiaa. Kolmansien maiden ja unionin jäsenmaiden välisessä liikenteessä huomi- oitaisiin puolestaan puolet matkalla käytetystä energiasta. (Euroopan komissio 2021d, 20.) Tämä maantieteellinen kattavuus muistuttaa päästökaupalle esitettyä MEXTRA50-mal- lia. FuelEU Maritime -aloitteessa huomioitaisiin kasvihuonekaasupäästöt, jotka syntyvät matkalla käytetyn energianlähteen koko elinkaaren aikana (Euroopan komissio 2021d, 23). Tähän kuuluvat esimerkiksi biopolttoaineen valmistuksesta syntyvät päästöt, joihin merenkulun päästökauppa ei ulotu. Hiilidioksidipäästöjen lisäksi aloite koskisi metaani- ja typpioksiduulipäästöjä, jotka eivät sisälly komission ehdottamaan merenkulun päästökaup- pamalliin (Euroopan komissio 2021d, 20).

**Taulukko 3.** Taulukko esittää, miten merimatkoilla käytetyn energian kasvihuonekaasuintensiteetin raja-arvot määritellään. Lähde: Euroopan komissio (2021d, 23).

Vuosi	Raja-arvot: prosenttiosuus, jolla energian kasvihuonekaasuintensiteettiä pitää vähentää vuoden 2020 vertausarvosta (X grammaa CO <sub>2</sub> -ekv/MJ)
2025	2 %
2030	6 %
2035	13 %
2040	26 %
2045	59 %
2050	75 %

Lisäksi FuelEU Maritime määrää, että alusten on käytettävä maasähköä EU:n satamissa vuodesta 2030 alkaen. Muiden energianlähteiden käyttö EU-satamissa on kielletty, paitsi jos aluksen energiantarpeet satamassa voidaan kattaa muilla päästöttömillä teknologioil-

la. (Euroopan komissio 2021d, 23.) Komissio määrittelee päästöttömiksi teknologioiksi tuuli- ja aurinkovoimalla tuotetun sähkön, matkan aikana varastoidun sähköenergian ja polttokennot, joiden energia on tuotettu kokonaan vähäpäästöisillä polttoaineilla (Euroopan komissio 2021d, liite III, 10).

Maasähkön käyttövelvoite koskee EU:n satamassa käyviä rahti- ja matkustaja-aluksia riippumatta niiden lähtösatamasta (Euroopan komissio 2021d, 20.). Komissio on määritellyt erityistapaukset, jolloin alusten ei tarvitse käyttää maasähköä. Velvoitteesta on vapautettu esimerkiksi alukset, jotka viipyvät EU-satamassa alle kaksi tuntia. Vaatimus ei päde myöskään silloin, jos satamassa ei ole vapaana maasähkön liitäntäpistettä tai jos se ei ole yhteensopiva aluksen laitteiston kanssa. (Euroopan komissio 2021d, 23–24.)

Tähän asti EU:ssa on yritetty lisätä uusiutuvien energianlähteiden käyttöä liikenteessä sääntelemällä niiden tarjontaa. Tarjontapuolta koskevat direktiivi vaihtoehtoisten polttoaineiden infrastruktuurin käyttöönotosta (EU/2014/94) ja direktiivi uusiutuvista lähteistä peräisin olevan energian käytön edistämisestä (EU/2018/2001). Direktiivit eivät kuitenkaan ole tuoneet toivottua tulosta merenkulussa, sillä uusiutuvien energianlähteiden kysyntä ei ole juuri lisääntynyt. (Euroopan komissio 2021d, 49–50.)

FuelEU Maritime -aloitteella pyritään vaikuttamaan nimenomaan vaihtoehtoisten polttoaineiden kysyntään (Euroopan komissio 2021d, 32). Tuotannon oletetaan kasvavan lisääntyvän kysynnän ansiosta ja synnyttävän tuottajille mittakaavaetuja. Tämä puolestaan voisi laskea vähäpäästöisten polttoaineiden hintoja suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin.

Vähäpäästöisten polttoaineiden hintojen lasku olisi eduksi myös merenkulun toimijoille, kun sektori liittyy päästökauppaan. Toisaalta jos tarjonta ei pystyisi vastaamaan kasvaneeseen kysyntään, vaihtoehtoisten polttoaineiden hinnat vain kallistuisivat entisestään. AFID- ja REDII-direktiivejä ollaan kuitenkin kehittämässä niin, että ne lisääisivät vähäpäästöisten polttoaineiden ja siihen liittyvän infrastruktuurin tarjontaa aiempaa enemmän (Euroopan komissio 2021d, 25; Euroopan komissio 2021b, 3). Euroopan komissio olettaa näiden direktiivien kehittämisen sekä lisääntyvän kysynnän kasvattavan tarjontaa riittävästi (Euroopan komissio 2021d, 25).

Komissio arvelee, että merenkulussa käytettävien biopolttoaineiden absoluuttiset hinnat eivät juuri muutu vuosina 2030–2050. Tämä johtuu siitä, että biopolttoaineiden raaka-aineet kallistuvat lisääntyneen kysynnän vuoksi. (Euroopan komissio 2021d, 57.) Biopolttoaineet halventuisivat kuitenkin suhteessa fossiilisiin polttoaineisiin, mikä kuuluu FuelEU Maritimen tavoitteisiin (Euroopan komissio 2021d, 32, 57).

Hughes (2021, 10) kritisoi sitä, että FuelEU Maritime ei ole ”tavoitepohjainen” keino vähentää päästöjä päinvastoin kuin päästökauppa. Päästökaupassa yrityksillä on vapaus päättää, miten asetettu päästökatto saavutetaan. Tällöin yritykset voivat valita kustannustehokkaimmat keinot päästöjen vähentämiseksi. FuelEU Maritime -aloite vaatii sen sijaan tiettyjen vähäpäästöisten energianlähteiden käyttöä. Tämä vie Hughes (2021, 10) mukaan resursseja muilta päästöjä vähentäviltä toimenpiteiltä, kuten energiatehokkuutta parantavilta investoinneilta. Näistä osa voisi olla tehokkaampia kuin vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttö. Pahimmillaan FuelEU Maritime voisi siis vaikeuttaa merenkulun päästöjen vähentämistä kustannustehokkaasti. Parhaimmillaan se kuitenkin tukee merenkulun päästövähennyksiä komission odotusten mukaisesti.

Edellä kuvaillun sääntelyn ohella merenkulun hiilidioksidipäästöjä yritetään vähentää polttoaineiden verotuksella. Merenkulussa käytetty polttoaine on tähän asti ollut EU:ssa kokonaan verovapaata. Tämä muuttuu, kun energiatuotteiden ja sähkön verotusta koskevaa direktiiviä (Neuvoston direktiivi (EY) 2003/96) uudistetaan. Uudistuksella asetetaan minimivero niille fossiilille polttoaineille, joita käytetään yleisimmin EU:n sisäisessä lautta- ja rahtiliikenteessä sekä kalastusaluksilla. Verotuksen tasossa huomioidaan kuitenkin hiilivuodon riski. Fossiilisten polttoaineiden verotusta nostetaan vähitellen seuraavien kymmenen vuoden aikana. Vähähiiliset polttoaineet ovat puolestaan verovapaita tänä aikana, jotta niiden käyttö merenkulussa lisääntyisi. (Euroopan komissio 2021e.)

## POHDINTA

### Merenkulun päästökaupan ja FuelEU Maritime -aloitteen tilanne syyskuun 2022

Tämä raportti on kirjoitettu enimmäkseen kesällä 2021. Tämän jälkeen Euroopan parlamentti ja jäsenmaiden neuvosto ovat tehneet omat lainsäädännölliset ehdotuksensa päästökaupasta ja FuelEU Maritime -aloitteesta tulevia kolmikantaneuvotteluja varten. Kolmikantaneuvotteluissa Euroopan komissio, parlamentti ja jäsenmaiden neuvosto sovitavat kantojaan yhteen. Tästä kompromissista syntyy lopullinen versio päästökaupasta ja FuelEU Maritime-aloitteesta. Tässä alaluvussa esitellään joitakin muutoksia, joita neuvosto ja parlamentti ovat ehdottaneet komission esitykseen, jota tämä raportti on käsitellyt. Osaa ehdotuksista voi pitää huomattavina muutoksina komission esitykseen verrattuna.

Euroopan parlamentti on ehdottanut, että merenkulun päästökauppa alkaisi vuonna 2024 eli vuotta myöhemmin kuin komission ehdotuksessa. Parlamentin ehdotuksessa päästö-

kauppa astuisi täysimääräisesti voimaan samana vuonna, eli laivaisännän tulisi luovuttaa päästöjään vastaava määrä päästöoikeuksia. (Euroopan parlamentti 2022a.) Sen sijaan neuvosto pitäisi komission ehdottaman siirtymäajan ennallaan, eli päästökauppa astuisi voimaan täysimääräisesti neljäntenä vuonnaan (ks. Taulukko 2 komission ehdottamasta siirtymäajasta) (Euroopan unionin neuvosto 2022a; Maersk 2022).

Maantieteelliseksi laajuudeksi parlamentti kannattaa MEXTRA50-mallia vuosille 2024–2026. Vuodesta 2027 parlamentti kuitenkin ehdottaa päästökaupalle MEXTRA100- laajuutta. Tämä lisäisi huomattavasti tarvittavien päästöoikeuksien määrää pitkällä, unionin ulkopuolelle suuntautuvilla, matkoilla verrattuna MEXTRA50-malliin. Parlamentin esityksen mukaan unionin ulkopuoliset maat voisivat vain poikkeustapauksissa saada helpotuksen siten, että päästöoikeuksia tulisi luovuttaa vain 50 prosentille päästöistä. (Euroopan parlamentti 2022b.)

Parlamentti esittää, että vuodesta 2027 alkaen päästökauppa ulotettaisiin aluksiin, joiden bruttovetoisuus on yli 400 GT. Siten MRV-asetus alkaisi koskea näitä aluksia vuonna 2024. Parlamentin esityksessä päästökauppa koskisi bruttovetoisuudeltaan yli 5000 GT kokoisia aluksia vuosina 2024–2026. (Euroopan parlamentti 2022a.) Myös neuvoston ehdotuksessa harkitaan päästökaupan ulottamista aluksiin, joiden bruttovetoisuus on alle 5000 mutta vähintään 400. Neuvoston mukaan komission tulisi vuoden 2026 loppuun mennessä selvittää, kuinka soveltuvaa ja kustannustehokasta olisi ulottaa päästökauppa bruttovetoisuudeltaan pienempiin aluksiin. (Euroopan unionin neuvosto 2022.)

Sekä neuvosto että parlamentti kannattavat metaanin ja typpioksiduulin lisäämistä päästökauppaan vastaisuudessa. Tämä edellyttää, että MRV-asetus laajennetaan koskemaan näitä kasvihuonekaasuja hiilidioksidin ohella. (Euroopan parlamentti 2022a; Euroopan unionin neuvosto 2022a.) Parlamentin ehdotuksen mukaan komission pitäisi vuoteen 2025 mennessä arvioida myös muiden kuin edellä mainittujen kasvihuonepäästöjen, sekä hiukkasten, vaikutusta ilmaston lämpenemiseen. Lisäksi komission tulisi tarvittaessa laatia ehdotus näiden päästöjen sisällyttämisestä EU:n merenkulun päästökauppaan. (Euroopan parlamentti 2022a.)

Sekä neuvosto että parlamentti huomioisivat päästökaupassa Suomelle tärkeän talvimerenkulun, mutta poikkeus olisi vain väliaikainen. Korkeampien jäätöalukitusten alukset saisivat neuvoston ehdotuksessa helpotuksia päästökauppaan vuoden 2030 loppuun asti, ja parlamentin ehdotuksessa helpotukset jatkuisivat vuoden 2029 loppuun asti. Tämän jälkeen päästökauppa koskisi täysimääräisesti myös jäätöalukitettuja aluksia. (Euroopan parlamentti 2022a; Euroopan unionin neuvosto 2022a.) Helpotus on tärkeä talvimerenkululle, mutta

toisaalta on huomioitava, että jääluokitettujen alusten polttoaineen kulutus pysyy muiden alusten kulutusta korkeamana myös vuoden 2030 jälkeen. Nähtäväksi jää, hyväksytäänkö parlamentin ja neuvoston ehdottamaa poikkeusta lainkaan kolmikantaneuvotteluissa ja jääkö poikkeus vain väliaikaiseksi, mikäli se hyväksytään.

Parlamentti kannattaa komission ehdottaman Ocean Fund -rahaston perustamista. Parlamentin ehdotuksessa rahastolle suunnattaisiin 75 prosenttia tuotoista, jotka saadaan merenkulun päästöoikeuksien huutokauppaamisesta. Ocean Fund -rahaston tarkoitus olisi tukea vähähiilisiä energiaratkaisuja merenkulussa. Parlamentti mainitsee, että rahaston pitäisi erityisesti tukea jääluokitettujen alusten vähähiilisiä energiaratkaisuja. (Euroopan parlamentti 2022a.)

Neuvosto ja parlamentti ovat laatineet esityksensä myös FuelEU Maritime -aloitteesta. Sekä neuvosto että parlamentti kannattavat komission ehdottamaa MEXTRA50-mallin kaltaista laajuutta FuelEU Maritime -aloitteelle. FuelEU Maritime -aloitteen osalta parlamentti ja neuvosto kannattavat komission ehdotusta siitä, että aloite koskisi bruttovetoisuudeltaan yli 5000 GT:n kokoisia aluksia. Neuvosto pitäisi ennallaan myös komission ehdotuksen siitä, kuinka paljon laivaliikenteen energianlähteiden kasvihuonekaasuintensiteettiä tulisi vuosien saatossa vähentää (ks. taulukko 3 komission ehdottamista vähennysprosentteista). Sen sijaan Euroopan parlamentti ehdottaa vähennysprosentteihin tiukennuksia: Esimerkiksi vuodelle 2035 parlamentti ehdottaa 20 prosentin vähennystä kasvihuonekaasuintensiteetissä komission ehdottaman 13 prosentin sijaan. Vuodelle 2050 parlamentti ehdottaa 80 prosentin vähennystä komission ehdottaman 75 prosentin sijaan. (Carroll 2022; Euroopan unionin neuvosto 2022b.) Neuvosto ja parlamentti ehdottavat jäävähvistetuille aluksille helpotuksia myös FuelEU Maritime -aloitteen kohdalla. Neuvoston esityksen mukaan helpotus olisi kuitenkin vain tilapäinen jatkuen vuoden 2029 loppuun asti. Parlamentin mukaan kompensaaion tulisi olla pysyvä. (Uusi Suomi 2022.)

Tätä osiota kirjoitettaessa, syksyllä 2022, merenkulun päästökaupan ja FuelEU Maritime -aloitteen lopullisista versioista ei ole vielä selvyttä. On oletettavaa, että näitä koskevat kolmikantaneuvottelut saadaan päätökseen vuoden 2022 loppuun mennessä. Kolmikantaneuvotteluissa selviää esimerkiksi, mitkä edellä esitetyistä, parlamentin ja neuvoston ehdottamista muutoksista, tulevat voimaan. Ainakin joidenkin tiukennusten läpimeno kompromissiratkaisussa voi olla haastavaa.

## Päästöoikeuksien hintojen kehitys

Myös päästöoikeuksien hinnat ovat nousseet entisestään kesän 2021 jälkeen. Päästökaupan vaikutukset merenkulkuun riippuvat olennaisesti päästöoikeuksien hinnoista. Siksi tässä alaluvussa pohditaan sitä, miten päästöoikeuksien hinnat kehittyivät loppuvuonna 2021 ja vuoden 2022 ensimmäisellä puoliskolla. Lisäksi pohditaan lyhyesti, miten päästöoikeuksien hinnat voisivat kehittyä lähivuosina.

Päästöoikeuksien kysyntään, ja siten hintaan, vaikuttaa sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä energian kysyntä, joka puolestaan riippuu muun muassa taloussuhdanteista. Vuoden 2021 jälkipuoliskolla ja vuonna 2022 Euroopan talous alkoi elpyä vuonna 2020 alkaneesta koronapandemiasta. Tämä saattoi lisätä päästöoikeuksien kysyntää ja siten nostaa niiden hintaa tänä aikana. Lyhyellä aikavälillä energian kysyntään vaikuttavat myös sääolosuhteet (Euroopan Keskuspankki 2022). Esimerkiksi alkuvuoden 2021 talvi Euroopassa oli poikkeuksellisen kylmä, mikä johti energian kysynnän kasvuun. Tämä puolestaan lisäsi päästöoikeuksien kysyntää ja siten hintaa alkuvuonna. (Euroopan Keskuspankki 2022.)

Euroopan Keskuspankki (2022) arvioi, että myös Fit For 55 -paketin julistus on voinut nostaa päästöoikeuksien hintaa vuonna 2021. Kesällä, jolloin komission tarkempi esitys Fit for 55 -paketista julkistettiin, päästöoikeuksien hinta pysyi kuitenkin melko tasaisena vaihdellen 50–60 euron tienoilla (Trading Economics s.a.). Toisaalta ilmastopaketin julkistamisajankohta on ollut tiedossa jo alkuvuonna 2021. Tällöin on ollut jo oletuksia siitä, että paketissa kaavailtaisiin päästöoikeuksien tarjonnan vähentämistä, uusien sektoreiden liittämistä päästökauppaan ja ilmaisaon vähentämistä. Tämä on voinut lisätä odotuksia siitä, että päästöoikeuden hinta nousisi lähitulevaisuudessa. Odotukset tulevaisuuden hinnannoususta ovat voineet olla osasy syy päästöoikeuksien kysynnän, ja siten hinnan, nousmiseen alkuvuonna 2021.

Päästöoikeuksien hinnat kallistuivat entisestään vuoden 2021 talvella. Marras-joulukuun aikana hinta kipusi jo yli 80 euroon pyörityään syksyllä 50–60 euron paikkeilla. (Trading Economics s.a.) Merkittävä syy hintojen nousulle oli maakaasun kallistuminen, mikä kannusti sähköntuottajia korvaamaan kaasua kivihiihellä. Kivihiihellä tuotettu sähkö aiheuttaa enemmän hiilidioksidipäästöjä kuin kaasulla tuotettu sähkö. Siten tämä lisäsi päästöoikeuksien kysyntää loppuvuodesta. (Euroopan Keskuspankki 2022.)

Helmikuussa 2022 päästöoikeudet maksoivat lähes sata euroa, mutta kuun loppupuolella hinta romahti äkillisesti 60 euroon (Trading Economics s.a.). Vaikka 60 euroa on historian valossa korkea hinta päästöoikeuksille, oli muutos huomattava. Päästöoikeuden hintaan

vaikuttavat monet tekijät, mutta notkahdus ainakin ajoittui samoihin päiviin, kun Venäjä hyökkäsi Ukrainaan. Hyökkäyksen jälkeen pörssikurssit romahtivat globaalisti, mikä saattoi vaikuttaa myös päästöoikeuksien hintaan. Toisaalta Eurooppa on hyvin riippuvainen Venäjältä tuoduista fossiilisista polttoaineista, ja hyökkäys nostikin polttoaineiden hintoja nopeasti. Voi olla, että hintojen odotettiin kallistuvan niin paljon, että hinnannousu vähentäisi fossiilisten polttoaineiden ja siten päästöoikeuksien kysyntää. On siis mahdollista, että odotukset päästöoikeuksien kysynnän vähenemisestä laskivat päästöoikeuden hintaa äkillisesti. On kuitenkin huomattava, että päästöoikeuden hinta palautui jo noin viikossa 80 euron tienoille (Trading Economics s.a.). Kuva 3 havainnollistaa päästöoikeuden hintakehitystä kesästä 2021 vuoden 2022 kesään.



**Kuva 3.** EU:n päästöoikeuksien hinta on vaihdellut melko paljon vuoden 2021 kesästä vuoden 2022 kesään. Päästöoikeudet ovat kuitenkin maksaneet tällä aikavälillä vähintään 50 euroa, mikä on korkea hinta aiempiin vuosiin verrattuna (vrt. kuva 1, jossa esitetään päästöoikeuksien koko hintahistoria toukokuuhun 2021 asti). Lähde: Trading Economics (s.a.).

Kansainvälinen energiajärjestö (2021) on tehnyt arvion siitä, mitä EU:n päästöoikeus maksaisi vuonna 2030. Järjestön arvioissa hinta riippuu siitä, kuinka kunnianhimoista ympäristöpolitiikkaa EU:ssa ja muualla maailmalla toteutetaan. Riippuen ympäristöpolitiikan kunnianhimon tasosta EU:n päästöoikeuden hinta olisi 65–130 dollaria, vastaten noin 60–120 euroa (vuoden 2020 hinnoilla), mikä on melko iso mutta kuitenkin suuntaa antava hintahaarukka. Paluu alle 50 euron hintoihin näyttää arvion perusteella epätodennäköiseltä, mistä voi kieliä myös vuoden 2021 aikana tapahtunut merkittävä päästöoikeuksien hinnannousu. Vuoden 2022 ensimmäisellä puoliskolla hinta on ollut pääasiassa 80 euron tienoilla.

On huomionarvoista, että viimeaikainen hinnannousu on tapahtunut jo ennen Fit For 55 -paketin tuomia muutoksia päästökauppaan. Fit For 55 -paketin voimaantulo voi nostaa päästöoikeuden hintaa entisestään, sillä esimerkiksi päästökattoa pienennetään sen myötä reippaammin lähivuosina. Siten esimerkiksi 100 euroa, mikä asettuu Kansainvälisen energijärjestön hintahaarukkaan, näyttää varsin mahdolliselta päästöoikeuden hinnalta lähivuosina. Toisaalta päästöttömän ja vähäpäästöisen energian lisääminen voi pidemmällä aikavälillä vähentää päästöoikeuksien kysyntää, mikä puolestaan laskisi hintaa. Tällainen ilmiö ei vaikuta kuitenkaan kovin todennäköiseltä ainakaan lähivuosina.

Korkea päästöoikeuden hinta luo yrityksille taloudellisen kannustimen päästöjen vähentämiseen etenkin tulevina vuosina, kun ilmaisjakoa ollaan samaan aikaan vähentämässä. Tällöin päästökauppa soveltuu tarkoitukseensa päinvastoin kuin varsinkin EU:n päästökaupan alkuaikoina, jolloin päästöoikeuden hinta oli liian alhainen kannustamaan yrityksiä päästövähennyksiin. Toisaalta korkeampi hinta ja ilmaisjaon väheneminen lisäävät myös hiilivuotoriskiä. Tässä raportissa on esitelty komission arvioita siitä, kuinka todennäköistä päästökauppasäädösten kiertäminen voisi olla merenkulun päästökaupan osalta. Aiemmin esiteltyt arviot koskevat skenaarioita, joissa päästöoikeuden hinta on enimmillään 50 euroa. Jos päästöoikeuden hinta olisi 100 euroa, kannustin päästökauppasäännösten kiertämiseen kasvaisi merkittävästi.

## JOHTOPÄÄTÖKSET

Laivaliikenteen osuus globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä on suhteellisen pieni laivaliikenteen volyymeihin nähden. Sektorin päästövähennykset ovat kuitenkin tarpeen, jotta Pariisin ilmastotavoitteet voidaan saavuttaa. Lisäksi Euroopan Unionissa on tavoitteena korvata osa kumipyöräliikenteestä laivaliikenteellä siten, että maantiekuljetuksia siirretäisiin sisävesiliikenteeseen. Tämä tavoite sekä globaalien markkinoiden kasvu lisäävät laivaliikenteen volyymejä lähivuosina, mikä tekee sektorin päästöjen vähentämisestä entistä tärkeämpää.

EU pyrkii lähivuosina vähentämään unionin meriliikenteen päästöjä päästökaupan ja FuelEU Maritime -aloitteen avulla sekä verottamalla fossiilisia meriliikenteen polttoaineita. Päästökauppa on tavoitepohjainen ja siten kustannustehokas tapa vähentää päästöjä. Meriliikenteellä on tosin monia erityispiirteitä, mikä tekee päästövähennyksen toteuttamisesta hankalampaa kuin monilla muilla sektoreilla. FuelEU Maritime -aloitteella pyritään alentamaan vähäpäästöisten polttoaineiden hintoja suhteessa fossiilisten polttoaineiden hintoihin. Tavoitteen toteutuminen riippuu siitä, pystyykö vaihtoehtoisten polttoaineiden tarjonta



vastaamaan lisääntyneeseen kysyntään. Toisaalta polttoainevero ja päästökauppa nostavat joka tapauksessa fossiilisten polttoaineiden hintaa suhteessa vähäpäästöisiin vaihtoehtoihin. Tämä tekee vähäpäästöisistä vaihtoehdoista aiempaa taloudellisesti kannattavampia.

EU:ssa on syytä kiinnittää huomiota siihen, ettei meriliikenteestä kuljetusmuotona tule näiden muutosten myötä liian kallista suhteessa muihin liikennemuotoihin. Jos näin kävisi, laivaliikennettä voitaisiin alkaa korvata osin esimerkiksi kumipyöräliikenteellä. Tämä lisäisi liikenteestä aiheutuvia hiilidioksidipäästöjä ja vaikeuttaisi siten EU:n päästövähennystavoitteiden saavuttamista. Toisaalta tieliikenteelle tulossa oleva oma päästökauppansa pienentää tätä riskiä.

Tämän raportin kirjoittamisen jälkeen komission ehdotukseen merenkulun päästökaupasta on ehdotettu joitakin muutoksia. Toisin kuin tässä raportissa on ennakoitu, vuonna 2022 näyttää siltä, että päästökauppaan olisi tulossa ainakin väliaikaisia helpotuksia talvimerenkulun osalta (Yle 2022). Tämä vähentäisi kustannuksia, joita päästökaupasta koituu talvimerenkululle. Kokonaisuudessaan Euroopan Unionin Fit For 55-paketti, johon merenkulun päästökauppakin kuuluu, on kuitenkin edelleen käsiteltävänä marraskuussa 2022.

## LÄHTEET

Aunola, V. 2019. Merenkulkuala on edelläkävijä päästöjen vähentämisessä.

*Navigator magazine*. WWW-dokumentti. Viitattu 13.5.2019. Saatavissa: [promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Merenkulkuala-on-edellakavija-paastojen-vahentamisessa#:~:text=P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6ksen%20mukaan%20kansainv%C3%A4lisen%20meriliikenteen%20kuljetussuoritusten,meness%C3%A4%20verrattuna%20vuoden%202008%20tasoon.](https://promaintlehti.fi/Turvallisuus-ja-ymparisto/Merenkulkuala-on-edellakavija-paastojen-vahentamisessa#:~:text=P%C3%A4%C3%A4t%C3%B6ksen%20mukaan%20kansainv%C3%A4lisen%20meriliikenteen%20kuljetussuoritusten,meness%C3%A4%20verrattuna%20vuoden%202008%20tasoon.)

Carbon leakage s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/carbon-leakage\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/free-allocation/carbon-leakage_en)

Carroll S.G. 2022. Parliament backs EU's maritime fuel law to curtail shipping emissions. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.euractiv.com/section/shipping/news/parliament-backs-eus-maritime-fuel-law-to-curtail-shipping-emissions/](https://www.euractiv.com/section/shipping/news/parliament-backs-eus-maritime-fuel-law-to-curtail-shipping-emissions/)

Ember s.a. Carbon pricing -The latest data on EU ETS carbon prices. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/](https://ember-climate.org/data/carbon-price-viewer/)

Emissions cap and allowances s.a. Euroopan Unioni. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/emissions-cap-and-allowances_en)

European Maritime Safety Agency (EMSA) s.a. CO2 emission report. THETIS-MRV. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report](https://mrv.emsa.europa.eu/#public/emission-report)

EU Emissions Trading System (EU ETS) s.a. Euroopan Unioni. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets_en)

Euroopan Keskuspankki. 2022. The role of speculation during the recent increase in EU emissions allowance prices. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/focus/2022/html/ecb.ebbox202203\\_06--cale9ea13e.en.html](https://www.ecb.europa.eu/pub/economic-bulletin/focus/2022/html/ecb.ebbox202203_06--cale9ea13e.en.html)

Euroopan komissio. 2015. EU ETS Handbook. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/system/files/2017-03/ets\\_handbook\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/system/files/2017-03/ets_handbook_en.pdf)

Euroopan komissio. 2020a. 2019 Annual Report from the European Commission on CO2 Emissions from Maritime Transport. Commission Staff Working Document. Full-length report. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/system/files/2020-05/swd\\_2020\\_82\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/clima/system/files/2020-05/swd_2020_82_en.pdf)

Euroopan komissio. 2020b. Inception Impact Assessment. Ref. Ares(2020)6081850 - 29/10/2020. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [Wstępna-ocena-skutków-Ares20206081850.pdf \(pracodawcy.pl\)](https://wstepna-ocena-skutkow-ares20206081850.pdf)

Euroopan komissio. 2021a. Questions and Answers - Emissions Trading – Putting a Price on carbon. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_21\\_3542](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3542)

Euroopan komissio. 2021b. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the deployment of alternative fuels infrastructure and, repealing Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council. 2021/0223 (COD).

Euroopan komissio. 2021c. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757. 2021/0211 (COD).

Euroopan komissio. 2021d. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. 2021/0210 (COD)

Euroopan komissio. 2021e. Revision of the Energy Taxation Directive (ETD): Questions and Answers. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_21\\_3662](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3662)

Euroopan komissio. 2021f. REPORT FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL on the Functioning of the European Carbon Market in 2020 pursuant to Articles 10(5) and 21(2) of Directive 2003/87/EC (as amended by Directive 2009/29/EC and Directive (EU) 2018/410). COM(2021) 962 final.

Eurooppa-neuvosto s.a. 5 facts about the EU's goal of climate neutrality. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/](https://consilium.europa.eu/en/5-facts-eu-climate-neutrality/)

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EY) 2003/87.

Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi (EU) 2014/94.

Euroopan parlamentin ja neuvoston asetus (EU) 2015/757.

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

Euroopan parlamentti. 2020. Parliament says shipping industry must contribute to climate neutrality. Press Releases. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20200910IPR86825/parliament-says-shipping-industry-must-contribute-to-climate-neutrality](https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20200910IPR86825/parliament-says-shipping-industry-must-contribute-to-climate-neutrality)

Euroopan parlamentti. 2022a. Amendments adopted by the European Parliament on 22 June 2022 on the proposal for a directive of the European Parliament and of the Council amending Directive 2003/87/EC. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0246\\_EN.html](https://www.europarl.europa.eu/doceo/document/TA-9-2022-0246_EN.html)

Euroopan parlamentti. 2022b. Fit for 55 in 2030: Parliament wants a more ambitious Emissions Trading System. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220603IPR32158/fit-for-55-in-2030-parliament-wants-a-more-ambitious-emissions-trading-system](https://www.europarl.europa.eu/news/en/press-room/20220603IPR32158/fit-for-55-in-2030-parliament-wants-a-more-ambitious-emissions-trading-system)

Euroopan unionin neuvosto. 2022a. General Approach on EU ETS. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10796-2022-INIT/x/pdf](https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-10796-2022-INIT/x/pdf)

Euroopan unionin neuvosto. 2022b. Fit for 55 package: Council adopts its position on three texts relating to the transport sector. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/02/fit-for-55-package-council-adopts-its-position-on-three-texts-relating-to-the-transport-sector/](https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/06/02/fit-for-55-package-council-adopts-its-position-on-three-texts-relating-to-the-transport-sector/)

Euroopan vihreän kehityksen ohjelma s.a. Eurooppa-neuvosto. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/](https://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/)

Gerlagh, R., Heijmans, R. J., Rosendahl, K. E. 2020. COVID-19 tests the market stability reserve. *Environmental and Resource Economics*, 76(4), 855–865.

Gu, Y., Wallace, S. W., Wang, X. 2019. Can an Emission Trading Scheme really reduce CO2 emissions in the short term? Evidence from a maritime fleet composition and deployment model. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74, 318–338.

Honkatukia, J., Savikko, H., Hokkanen, J., Rannikko, H. 2021. Merenkulun päästökaupan vaikutukset merenkulun kustannuksiin ja Suomen kilpailukykyyn. Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 2021:23. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-620-7](https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-243-620-7)

Hughes, E. 2020. Implications of application of the EU Emissions Trading System (ETS) to international shipping, and potential benefits of alternative Market-Based Measures (MBMs). A preliminary study commissioned by the European Community Shipowners' Associations (ECSA) and the International Chamber of Shipping (ICS). WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.ecsa.eu/sites/default/files/publications/ECSA-ICS-2020-Study-on-EU-ETS.pdf](http://www.ecsa.eu/sites/default/files/publications/ECSA-ICS-2020-Study-on-EU-ETS.pdf)

Hughes, E. 2021. FuelEU Maritime –Avoiding Unintended Consequences. Efficacy and implications of potential measures, including new EU fuel standards, to help decarbonise international shipping. A preliminary study commissioned by the European Community Shipowners' Associations (ECSA) and the International Chamber of Shipping (ICS). WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2021/05/FuelEU-Maritime-Avoiding-Unintended-Consequences-1.pdf](http://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2021/05/FuelEU-Maritime-Avoiding-Unintended-Consequences-1.pdf)

Innovation Fund s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund\\_en](https://ec.europa.eu/clima/eu-action/funding-climate-action/innovation-fund_en)

International Chamber of Shipping (ICS). 2020. EUROPEAN UNION MRV REGULATION. Guidance for ships over 5000GT which carry passengers or cargo to, from or between EU/EEA ports, regardless of Flag. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/08/ics-guidance-on-eu-mrv.pdf](http://www.ics-shipping.org/wp-content/uploads/2020/08/ics-guidance-on-eu-mrv.pdf)

International Maritime Organization (IMO). 2020. Fourth IMO Greenhouse Gas Study. IMO: London.

Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency). 2021. World Energy Outlook. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [World Energy Outlook 2021 \(windows.net\)](#)

Koesler, S., Achtnicht, M., Köhler, J. 2015. Course set for a cap? A case study among ship operators on a maritime ETS. *Transport Policy*, 37, 20–30.

Kågeson, P. 2007. Linking CO<sub>2</sub> Emissions from International Shipping to the EU Emissions Trading Scheme. Commissioned by the Federal Environment Agency, Germany. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.natureassociates.se/wp-content/uploads/2011/03/Linking-CO2-Emissions-from-International-Shipping-to-the-EU-ETS.pdf](#)

Maersk. 2022. Eu Emissions Trading System (ETS) – latest developments. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.maersk.com/news/articles/2022/07/12/eu-ets-latest-developments](#)

Mellin, A., Hansson, J., Zetterberg, L., Fridell, E. 2020. Including maritime transport in the EU Emission Trading System—addressing design and impacts. Digitaalinen vetenskaplika arkivet. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [\(PDF\) Including maritime transport in the EU Emission Trading System - addressing design and impacts \(researchgate.net\)](#)

Neuvoston direktiivi (EY) 2003/96.

Ojala, L. 2021. Differing impacts and interests of EU Member States regarding maritime emission solutions – A Policy Brief. Working paper.

Reducing emissions from the shipping sector s.a. Euroopan Unioni. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/transport-emissions/reducing-emissions-shipping-sector\\_en](#)

Revision for phase 4 s.a. Euroopan komissio. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/clima/eu-action/eu-emissions-trading-system-eu-ets/revision-phase-4-2021-2030\\_en](#)

Solakivi, T., Jalkanen J.P., Perrels, A., Kiiski, T., Ojala L. 2020. Merenkulun päästökaupan vaikutukset. *Valtioneuvoston selvitys*. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [urn.fi/URN:NBN:fi-fe202101293305](#)

Suomen Varustamot. 2021. Talvimerenkulun erityispiirteiden huomioiminen merenkulun päästökaupassa on välttämätöntä. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [shipowners.fi/talvimerenkulun-erityispiirteiden-huomioiminen-merenkulun-paastokaupassa-on-valttamatonta/](https://shipowners.fi/talvimerenkulun-erityispiirteiden-huomioiminen-merenkulun-paastokaupassa-on-valttamatonta/)

Tilastokeskus s.a. Kuljetussuorite. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.stat.fi/meta/kas/kuljetussuorite.html](http://www.stat.fi/meta/kas/kuljetussuorite.html)

Trading Economics s.a. EU Carbon Permits. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: <https://tradingeconomics.com/commodity/carbon>

Työ- ja elinkeinoministeriö s.a. Lentoliikenteen päästökauppa. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [tem.fi/lentoliikenteen-paastokauppa](http://tem.fi/lentoliikenteen-paastokauppa)

Uusi Suomi. 2022. Suomelle tärkeä helpotus meni läpi selvin luvuin – Näin EU aikoo puuttua päästöihin meriliikenteessä. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [Suomelle tärkeä helpotus meni läpi selvin luvuin – Näin EU aikoo puuttua päästöihin meriliikenteessä](https://uusisuomi.fi/2022/11/30/suomelle-tarkea-helpotus-meni-lapi-selvin-luvuin-nain-eu-aikoo-puuttua-paastoihin-meriliikenteessa) | Uusi Suomi

Vihma, A., van Asselt, H. 2014. The Conflict over Aviation Emissions: A Case of Retreating EU Leadership? FIIA Briefing Paper 150. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [mediamanager.sei.org/documents/Publications/Climate/FIIA-2014-EU-aviation-emissions.pdf](https://mediamanager.sei.org/documents/Publications/Climate/FIIA-2014-EU-aviation-emissions.pdf)

Wang, K., Fu, X., Luo, M. 2015. Modeling the impacts of alternative emission trading schemes on international shipping. *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77, 35–49.

Yle. 2022. Ministeri Harakka EU:n ilmastopaketista: 2030 meillä vielä valtaosa poltto-moottoriautoja, talvimerenkulun vaatimuksiin on luvassa kevennyksiä. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [yle.fi/uutiset/3-12468938](https://yle.fi/uutiset/3-12468938)

# MERILIIKENTEEN POLTTOAINERATKAISUT

Elias Altarriba



© Elias Altarriba

## LAIVOJEN ENERGIANTARVE

Laivojen absoluuttinen energiantarve on suuri, tosin alustyyppien väliset erot voivat olla merkittäviä (Woodyard & Latache, 2009, luvut 1 ja 2). Suurin osa energiantarpeesta menee aluksen kulkuun, jolloin aluksen uppouma rungonmuotoineen ja operointinopeuksineen asettaa fysikaaliset reunaehdot vaadittavalle energiantarpeelle (Jalkanen, 2020, 3–11). Etenkin nopeammissa aluksissa myös ilmanvastuksen osuus on merkittävä. Lisäksi alusten on täytettävä tarvitsemansa sähkö- ja lämpöenergiatarpeet sekä tuotettava energiaa hydraulikka- ja pneumaattikajärjestelmilleen. Merellä olevien alusten on kyettävä täyttämään nämä energiantarpeet itsenäisesti mahdollisesti viikkojenkin ajan, siinä missä lyhyempiä legejä operoivien alusten on mahdollista saada täydennystä useammin. Tämän vuoksi myös saavutettavat teknologiset ratkaisut vaihtelevat kohderyhmittäin (Gilbert et al., 2015,



447–461). Esimerkiksi pidempiä satamakäyntejä tekevien alusten osalta sataman infrastruktuurin hyödyntäminen maasähkön muodossa voi muodostua yhdeksi ratkaisuvaihtoehdoksi, siinä missä paljon merellä olevien alusten osalta maasähkö ei välttämättä tarjoa kovinkaan kattavaa kokonaisratkaisua (Hotti, 2022, 39–42; Untolahti, 2021, 22).

Tarkastellaan energiatarvetta seuraavanlaisen esimerkin näkökulmasta: Oletetaan, että esimerkkialuksemme kuluttaa raskasta polttoöljyä tasaisella matkanopeudella keskimäärin viisi tonnia tunnissa. Raskaan polttoöljyn lämpöarvon ollessa 11,8 kWh/kg tunnissa kulutetun polttoöljyn kokonaislämpöarvo olisi 59 000 kWh. Oletetaan tässä esimerkissä moottoreiden käyvän varsin optimaalisella, noin 80 % kuormitusalueella, jolloin ominaiskulutus olisi noin 0,185 kg/kWh (Woodyard & Latarche, 2009, luku 2). On syytä huomioida, että mäntämoottoreista puhuttaessa tämä on varsin energiatehokas lukema verrattuna vaikkapa maantieliikenteessä käytettäviin moottoreihin. Moottoreiden tuottama teho olisi 27 027 kW nostaa hyötysuhteen 45,8 %, jota voidaan pitää hyvänä lukemana. Lisäksi kokonaishyötysuhdetta voidaan parantaa teknisin ratkaisuin hyödyntämällä muun muassa pakokaasujen sisältämää lämpöenergiaa pakokaasukattiloiden avulla. Kaikkea akselitehoa ei kuitenkaan ole käytettävissä aluksen kulkuun, sillä tässä esimerkissä aluksen akseligenaattorit tarvitsevat tehoa yhteensä 2000 kW ja muut apulaitteet 500 kW. Lisäksi voimansiirtojärjestelmä hukkaa aina jonkin verran tehoa.

Potkureille tehoa riittäisi siis 23 500–24 000 kW. Potkureiden hyötysuhde vaihtelee potkuri- ja alustyypeittäin, minkä lisäksi hyötysuhteeseen vaikuttaa aluksen valittu operointinopeus suhteessa kyseisen aluskonstruktion optiminopeuteen (Carlton, 2007, luku 6). Potkureiden hyötysuhteen suuruusluokka tässä esimerkissä asettuu 60-70 % tuntumaan. Tällä työntövoimalla voitetaan kyseisellä nopeudella muodostuvat aero- ja hydrodynaamiset vastukset. Vaikka esimerkkialuksemme käyttövoima olisikin siis jokin muu kuin polttoöljy, energiaa aluksen kulkemiseksi tarvittaisiin edelleen suuria määriä. Esimerkiksi, mikäli potkureiden tehontarve olisi siis 24 000 kW ja niitä pyörittävien sähkömoottoreiden hyötysuhde 80 %, tarvitsisivat sähkömoottorit jatkuvaa 30 000 kW tehoa. Mikäli sähköä tuotettaisiin aurinkopaneelijärjestelmällä, mikä kykenisi takaamaan 50 W jatkuvan tehon paneelinelioometriä kohden, olisi laivaan sijoitettava 600 000 m<sup>2</sup> tällaista paneelia. Käytännössä aurinkosähköjärjestelmien tehoon vaikuttaa paneeliteknologian lisäksi alueella vallitseva auringon säteilyteho, johon vaikuttavat hyvin voimakkaasti vuorokauden- ja vuodenaajat sekä vallitseva säätila (Besharat et al., 2013, 800). Mikäli teho otettaisiin akuista, joiden kapasiteetti olisi 300 Wh/kg, tunnissa kulutettaisiin tyhjäksi 100 tonnia painava akusto (olettaen, että akun kapasiteetti olisi käytettävissä lineaarisesti polttoaineen tapaan). Nyt siis puhutaan vasta tunnista, joten lyhyilläkin legeillä akuston tarve kasvaa helposti tuhansiin tonneihin. Polttoöljyjen suuri energiatehous erityisesti tilavuuden suhteen tekee niistä

aluskäytössä hyvin käytännöllisen ja tämän vuoksi vaikeasti korvattavan polttoaineen (Woodyard & Latache, 2009, luku 5). Lisäksi polttomoottori on kokonaisuutena varsin kompakti ja alusympäristöön soveltuva lämpövoimakone (kuva 1).



**Kuva 1.** Polttomoottori on laivoissa vaikeasti korvattavissa oleva voimanlähde. Kuva: Elias Altarriba

## POLTTOÖLJYT

### Polttoainejärjestelmät

Höyryalukset korvautuivat moottorialuksilla toisen maailmansodan jälkeisinä vuosikymmeninä suhteellisen nopeasti. Moottorialusten etuina olivat kompaktimpi koneiston koko ja tehokkuus, höyrykattilatarpeen poistuminen ja öljypolttoaineiden korkea energiatiheys. Sittemmin raskas polttoöljy on vakiintunut kauppa-alusten polttoaineeksi sen edullisen hankintahinnan takia. Raskaan polttoöljyn käyttäminen vaatii sille soveltuvaa polttoainejärjestelmää, sillä pumpattavuuden mahdollistamiseksi öljyä on lämmitettävä. Kauppa-aluksissa näiden järjestelmien tilantarve ei yleensä ole ongelma. Usein järjestelmä mahdollistaa kevyiden ja raskaiden polttoaineiden joustavan rinnakkaiskäytön. (Landström, 1966.)

Polttoainejärjestelmissä on jonkin verran eroavuuksia eri alusten välillä, mutta pääsääntöisesti konstruktio noudattaa seuraavia piirteitä: Alukseen bunkrattu raskas polttoöljy varastoidaan varastointitankkeihin. Tankkien koko vaihtelee alustyypeittäin, mutta pääasiallinen tarkoitus on toimia aluksen energiavarastona vähintään merimatkan ajan, mahdollisesti pidempäänkin. Varastotankeista polttoaine pumpataan selkiytys- eli settling-tankkiin. Selkiytystankissa suurin osa polttoaineen sisältämästä vedestä erotetaan polttoaineesta hyödyntämällä polttoöljyn ja veden tiheyseroa. Selkiytystankista polttoaine siirretään separaattorille, jossa keskipakovoimaa hyödyntäen erotetaan polttoöljystä kiinteät epäpuhtaudet. Selkiytystankissa erotettu vesi ja separaattorilta tuleva kiinteä jäte ohjataan öljyiselle jätteelle tarkoitettuun sludge-tankkiin toimitettavaksi myöhemmin jatkokäsittelyyn. (Woodyard & Latache, 2009, luku 9.)

Separattorilta polttoaine pumpataan boostereille, joissa polttoaine suodatetaan ja syötetään edelleen moottoreille. Yhdellä moottorilla voi olla yksi boosteri, mutta usein monimoottorialuksissa yksi boosteri syöttää polttoainetta kahdelle moottorille. Mikäli aluksessa on erillinen säiliö kevyelle polttoöljylle, tapahtuu polttoainelaadun vaihto boosterissa erillisen sekoitusautomaatiojärjestelmän avulla. Raskaan polttoöljyn polttoainelinjat on lämmitettävä pumpattavuuden mahdollistamiseksi, siinä missä kevyen polttoöljyn lämmitys on tarpeetonta. Kevyet polttoöljyt ovat laadullisesti parempia, joten kiinteiden epäpuhtauksien poistoa separaattorilla ei tarvita. (Woodyard & Latache, 2009, luku 9.)

Polttoaineiden ominaisuudet vaihtelevat polttoainetyypeittäin (ISO 8217:2017; Koivuniemi, 2021, 11-15). Sekä kevyitä että raskaita polttoöljyjä on laadullisesti erityyppisiä. Suurimmat erot ilmenevät kevyiden ja raskaiden öljytyyppien välillä. Tärkeimmät muutujat laivakäyttöä ajatellen ovat öljyn viskositeetti ja tiheys (Park et al., 2015, 582-583). Raskaalla polttoöljyllä operoitaessa boosteri pyrkii pitämään polttoaineen viskositeetin noin 20 cSt:n tasossa, mikä vaatii esimerkiksi IFO380-polttoainelaadulla noin 120 °C lämpötilaa (Wärtsilä, 2019). Kevyillä polttoöljyillä viskositeettiarvot ovat huomattavasti alhaisempia, esimerkiksi MGO:lla laadusta riippuen tyypillisesti noin 2–6 cSt:a (ISO 8217:2017). Öljylaatujen erilaiset viskositeetit tuottavat haasteita: Liian viskoosia öljyä ei ole mahdollista pumpata tai suodattaa. Vastaavasti viskositeetin ollessa liian alhainen öljyn voiteluominaisuudet heikkenevät. Polttoöljy voitelee pumppuja, suuttimia, venttiilejä ja muita polttoainejärjestelmän liikkuvia mekaanisia osia. Epätäydellinen voitelu johtaa komponenttien tarpeettomaan kulumiseen ja pahimmillaan kiinnileikkautumiseen.

MGO:n leimahduspiste on noin 60–65 °C tietämällä, siinä missä raskaiden polttoöljyjen leimahduspiste asettuu yleensä 85–115 °C väliin (Fingas, 2014, luku 2; ISO 8217:2017). Erityisesti polttoainevaihtojen yhteydessä kevyttä polttoöljyä voidaan siis joutua jäähdyttä-

mään. Mikäli polttoaine pääsee höyrystymään polttoainelinjoissa, voi järjestelmään kehittyä syttymiskelpoista seosta. Höyrystymisen seurauksena erityisesti pumpuissa voi ilmetä kavi-taatiota, ja polttoainesyöttöongelmien takia ongelmia voi ilmetä myös moottorin käynnissä.

Laivamoottoreiden tuotekehitys on perustunut pitkään siihen olettamukseen, että poltto-aineena käytetään raskasta polttoöljyä. Tämän seurauksena moottorit on lähtökohtaisesti optimoitu toimimaan raskaalla polttoöljyllä. Vaikka kevyet polttoöljyt soveltuisivatkin polttoaineeksi ja aluksessa olisi oma polttoainejärjestelmä kevyen polttoöljyn rinnakkais-käyttöä varten, ei monia etenkään vanhempia moottorityyppejä ole suunniteltu toimimaan pitkiä aikoja kevyillä polttoöljyillä. Moottorin säätötoimenpiteillä voidaan parantaa asiaa, mutta usein kevyillä polttoöljyillä operoitaessa moottorin tehot jäävät pienemmiksi. Osit-tain syynä on polttoaineen energiasisältöerot, osittain moottorin rakenne. (Woodyard & Latache, 2009, luku 5 ja 9.)

Toisaalta kevyistä polttoöljyistä on myös etua, koska kevyiden polttoöljyjen käyttö vähentää huomattavasti moottoreiden ja polttoainejärjestelmän vaatimaa huoltoa verrattuna raskailla polttoöljyillä operointiin (Winkler, 1985, 154–162). Erityisesti kevyellä öljyllä operoitaessa suodattimien, separaattoreiden, esilämmittimien ja muiden vastaavien komponenttien puhdistustarve vähenee merkittävästi: Tarve päivittäiselle käsin tehtävälle puhdistukselle tai vastapaineilmalla toimivien automaattipuhdistimien hyödyntäminen suotimien puhtaana pitämiseksi vähenee merkittävästi. Kevyet polttoöljyt eivät lähtökohtaisesti tarvitse separointia, mutta jos öljy kuitenkin kierrätetään separaattorin kautta, separaattorin puh-distustarve minimoituu. Raskaalla polttoöljyllä operointi tuottaa huomattavasti enemmän hiukkaspäästöjä (Winnes & Fridell, 2009, 1394), joista suurin osa kulkeutuu pakoputkeen, mutta osa sotkeutuu moottorin voiteluöljyyn. Tämän seurauksena voiteluöljyäkin joudutaan joissain tapauksissa separoimaan hiiltojäänteiden poistamiseksi. Lisäksi voiteluöljyn suodattimien puhdistustarve vähenee kevyillä polttoöljyillä operoitaessa.

## Polttoöljystandardit

Merenkulun öljypolttoaineiden keskeiset ominaisuudet on määritelty standardissa ISO 8217/2017 (ISO 8217:2017). Kevyitä polttoöljyjä kutsutaan yleensä nimikkeillä MGO (ma-rine gas oil) ja MDO (marine diesel oil). MGO on ainoastaan tisleistä koostuvaa polttoöljyä, jonka säilyvyys ja suodatettavuus ovat hyviä ja samepiste alhainen. Tätä polttoainelajia ei tarvitse lämmittää varastoinnin tai pumppauksen aikana. Toisin kuin MGO, MDO ei ole puhdas tisle vaan sisältää pieniä määriä myös raskaampia yhdisteitä. Seossuhde vaihtelee polttoainetuotteen mukaan. Monilta käyttö- ja varastointiominaisuuksiltaan MDO on samankaltainen kuin MGO, mutta tiheys ja viskositeetti ovat usein suurempia. MDO:n

rikkipitoisuus vaihtelee myös, mutta monilla öljyntoimittajilla on tarjolla MDO-tuotteita, jotka mahdollistavat operoinnin rikkirajoitusalueilla ilman rikkipesureita. Standardi ei näitä tuotteita erottele MGO/MDO-nimillä, vaan MDO-polttoaineiksi kutsutaan käytännössä DMB/DFB-kategorian polttoaineita. Usein näistä molemmista polttoainetyypeistä käytetään yleisnimitystä ”diesel”, jolloin on selvitetävä tilannekohtaisesti, kumpaa polttoainetyypistä sillä tarkoitetaan. Taulukossa 1 on nähtävissä standardin määrittelemiä reunaehtoja kevyiden polttoöljyjen eri laaduille (ISO 8217:2017).

**Taulukko 1.** Kevyiden polttoöljyjen ominaisuuksia. Lähde: ISO 8217:2017

Ominaisuus	Yksikkö	DMX	DMA/DFA	DMZ/DFZ	DMB/DFB
Kinem. visk. (40°C)	cSt	1,4-5,5	2,0-6,0	3,0-6,0	2-11
Tiheys (max.)	kg/m <sup>3</sup>	-	890	890	900
Setaani (min.)		45	40	40	35
Rikki (max.)	massa %	1	1	1	1,5
Leimahduspiste (min.)	°C	43	60	60	60
Rikkivety (max.)	mg/kg	2	2	2	2
Happoluku (max.)	mg KOH/g	0,5	0,5	0,5	0,5
Sedimentit (max.)	massa %	-	-	-	0,1
Hiiltojäännös* (max.)	massa %	0,3	0,3	0,3	0,3
FAME (max.)	tilav. %	-	-/7	-/7	-/7
Tuhka (max.)	massa %	0,01	0,01	0,01	0,01
Ulkonäkö		Läpinäkyvä ja väritön			**

\* DMX, DAM/DFA, DMZ/DFZ-polttoaineilla hiilijäännös määritellään mikromenetelmällä 10 % tislusjäännöksen tilavuudesta, DMB/DFB mikromenetelmällä (ISO 10370)

\*\* Jos näyte ei ole läpinäkyvä ja kirkas, on maksimisedimenttipitoisuus (0,1 massa %) varmistettava

Standardi (ISO 8217:2017) erottelee raskaat polttoöljyt kuuteen pääkategoriaan (RMA, RMB, RMD, RME, RMG ja RMK). Näiden lisäksi RMG ja RMK-laadut jaetaan eri alakategorioihin kinemaattisen viskositeetin perusteella. Taulukossa 2 on esitetty standardin määrittämät ominaisuudet RMA-, RMB-, RMD- ja RME-öljyalaajuuille (ISO 8217:2017). Polttoainemarkkinoilla näihin kategorioihin kuuluvista tuotteista käytetään usein nimitystä

”keskiraskas polttoöljy” johtuen siitä, että näiden ominaisuudet asettuvat tisleiden (MGO ja MDO) ja raskaiden jäännesöljypolttoaineiden (RMG JA RMK) väliin. Hiiltojäännösten suurin sallittu määrä kasvaa nopeasti erityisesti verrattuna kevyiden öljyjen maksimimääriin. Samoin tuhkan määrä kasvaa.

**Taulukko 2.** Raskaiden polttoöljyjen ominaisuuksia (RMA, RMB, RMD ja RME).  
Lähde: ISO 8217:2017

Ominaisuus	Yksikkö	RMA10	RMB30	RMD80	RME180
Kinem. visk. (50°C)	cSt	10	30	80	180
Tiheys (max.)	kg/m <sup>3</sup>	920	960	975	991
Leimahduspiste (min.)	°C	60	60	60	60
Rikkivety (max.)	mg/kg	2	2	2	2
Happoluku (max.)	mg KOH/g	2,5	2,5	2,5	2,5
Sedimentit (max.)	massa %	0,1	0,1	0,1	0,1
Hiiltojäännös (max.)	massa %	2,5	10	14	15
Tuhka (max.)	massa %	0,04	0,07	0,07	0,07

Taulukossa 3 on esitetty RMG ja RMK-kategorioiden ominaisuudet (ISO 8217:2017). Nämä polttoöljyt ovat tiheydeltään hyvin lähellä makean veden tiheyttä, ja polttoainetuotteesta riippuen myös kinemaattinen viskositeetti vaihtelee voimakkaasti. Lisäksi hiiltojäännöstä ja tuhkaa sallitaan olevan enemmän verrattuna muihin polttoainelaatuihin.

**Taulukko 3.** Raskaiden polttoöljyjen ominaisuuksia (RMG ja RMK). Lähde: ISO 8217:2017

Ominaisuus	Yksikkö	RMG180/380/500/700	RMK380/500/700
Kinem. visk. (50°C)	cSt	180/380/500/700	380/500/700
Tiheys (max.)	kg/m <sub>3</sub>	991	1010
Leimahduspiste (min.)	°C	60	60
Rikkivety (max.)	mg/kg	2	2
Happoluku (max.)	mg KOH/g	2,5	2,5
Sedimentit (max.)	massa %	0,1	0,1
Hiiltojäännös (max.)	massa %	18	20
Tuhka (max.)	massa %	0,1	0,15

Lisätietoa Itämerellä käytettävistä laivapolttoaineista on saatavissa osana tätä projektia tehdystä Jimi Koivuniemen (2021) opinnäytetyöstä. Opinnäytetyö keskittyy kolmen yleisimmän polttoainetyypin vertailuun (raskaat ja kevyet polttoöljyt sekä LNG). Työssä tehdään myös yleiskatsaus tulevaisuuden mahdollisuuksiin. Lisäksi opinnäytetyö sisältää alan asiantuntijoiden haastatteluja, jotka avaavat polttoaineratkaisujen eroavaisuuksia erityisesti käytännön näkökulmasta.

Polttoaineratkaisut vaikuttavat myös satamien infrastruktuuriin: muun muassa alusten bunkraus (kuva 2) ja muut täydennystarpeet, mahdolliset maasähköt ratkaisut ja monenlaisten jäteliemien vastaanotto edellyttävät satamilta kykyä toimia muuttuvassa ympäristössä. Osana tätä hanketta toteutetussa Väinö Hotin (2022) opinnäytetyössä käsitellään erityyppisten päästövähennystekniikoiden vaikutuksia satamatoimintoihin. Erityisesti uudet polttoaineratkaisut, kuten LNG-alusten yleistyminen, vaativat merkittäviä muutoksia polttoainejakeluinfrastruktuuriin. Tämän hankkeen tiimoilta kansainvälisenä yhteistyönä yhdessä Genovan yliopiston kanssa toteutettu Nicolò Anfossin (2022) tekemä opinnäytetyö ”LNG supply analysis in the European context: Comparison between Italy and Finland” on vertaileva tutkimus Suomen ja Italian LNG-jakeluinfrastruktuurin tämänhetkisestä tilasta ja tulevaisuuden suunnitelmista. Lisäksi Suomessa satamilla on ympäristölupaan perustuva velvollisuus raportoida Elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskukselle sekä kaupungin ympäristönsuojeluviranomaisille ilmaan, vesiin ja maaperään kulkeutuneista päästöistä vuosittain. Osana hanketta toteutettu Mona Untolahden (2021) opinnäytetyö käsittelee näitä päästölajeja ja niiden muuntumista Haminan, Kotkan ja Helsingin satamien osalta. Raportointivelvoite on tehokas keino seurata päästömäärien kehittymistä ja muutosten vaikutuksia pidemmällä aikavälillä.





**Kuva 2.** Polttoainetäydennys säiliöaluksesta laivaan. Kuva: Elias Altarriba



## Polttoöljyjen eroavuudet päästöjen osalta

Raskas polttoöljy sisältää tyypeä kevyitä polttoöljyjä enemmän, minkä seurauksena typen oksidien päästöt ovat lähtökohtaisesti suuremmat (Karvonen et al., 2010, 1–8; Van et al., 2019, 124–125). Palamisilmassa olevan typen palamiseen ja tämän seurauksena muodostuviin typen oksidien päästöihin tällä ei kuitenkaan ole merkitystä (Lamas & Rodríguez, 2012, 77–78; Ni et al., 2020, luku 2; Woodyard & Latarche, 2009, luku 5). Typen oksidien muodostumiseen vaikuttaa merkittävästi palamislämpötila, mutta sen muutokset ovat moottorikohtaisia sekä teknisten ratkaisujen että kuormitustilanteiden suhteen. Lisäksi raskaille polttoöljyille suunniteltujen ja optimoitujen moottoreiden operointi kevyillä polttoöljyillä voi johtaa sopivissa käyntiolosuhteissa typen oksidien määrän kasvuun. Hiukkaspäästöjen osalta ero on kuitenkin merkittävä kevyiden polttoöljyjen tuottaessa huomattavasti pienemmät hiukkaspäästöt. Poltettua polttoainekiloa kohden tuotettujen hiilidioksidipäästöjen osalta kevyet (3,206 kg/pakg) ja raskaat polttoöljyt (3,118 kg/pakg) ovat varsin lähellä toisiaan (IMO, 2020, 74). On kuitenkin syytä huomioda, että mikäli kevyttä polttoöljyä kuluu enemmän edellä mainittujen syiden takia, kasvavat myös hiilidioksidipäästöt lineaarisesti kulutuksen kasvaessa.

Pakokaasujen rikkidioksidipäästöt johtuvat polttoaineen sisältämästä rikistä (Ibrahim, 2016, 3–16). Rikkipäästöjen vähentämiseksi yksinkertainen ratkaisu on vähentää polttoaineen rikkipitoisuutta. Itämeri on ollut rikkirajoitusalue vuodesta 2015 (IMO, 2015, liite 1), jolloin polttoaineet ovat saaneet sisältää enintään 0,1 prosenttia rikkiä. Maailmanlaajuinen enimmäisrikkipitoisuus väheni 3,5 prosentista 0,5 prosenttiin vuonna 2020 (IMO, 2019). Mikäli rikkipitoisempaa polttoainetta käytetään, on aluksessa oltava asennettuina rikkipesurit, ja niitä on käytettävä.

Moottori tai polttoprosessi eivät varsinaisesti rikkiä tarvitse. Maaöljyssä sitä kuitenkin on luonnostaan, tosin pitoisuudet vaihtelevat eri öljylähteistä pumpatuissa raakaöljyalaaduissa merkittävästi (Fingas, 2014, 42; Ghulam et al., 2013, 56–58). Rikki on kemiallisesti poistettava jalostettavasta öljystä osana öljynjalostusprosessia, mikäli tarkoituksena on tuottaa vähärikkistä polttoöljyä. Koska erityisesti raskaat polttoöljyt ovat pääsääntöisesti öljynjalostusprosessin edullisia sivutuotteita, niin sanottuja jäännösöljyjä, niiden jalostusaste on pidetty kustannussyistä matalana eikä rikkiä ole tämän vuoksi poistettu. Kevyet tislamalla tuotetut öljytuotteet ovat yleensä vähärikkisempiä, tosin niidenkin rikkipitoisuus vaihtelee tuotteittain. Nykyään rikkirajoitusten kiristyttyä myös vähärikkisille raskaille polttoöljyille on avautunut kasvaneen kysynnän seurauksena uudet markkinat, jolloin niiden saatavuus on parantunut huomattavasti takavuosiin verrattuna (Vedachalam et al., 2022, 11–12).

Rikki itsessään on tarpeellinen alkuaine elämälle, mutta rikin palaessa muodostuva rikkidioksidi on ongelmallinen yhdiste. Ilmakehässä rikkidioksidi aiheuttaa happamia sateita, jotka pilaavat ympäristöä laajasti: Happosateet muun muassa happamoittavat meriä ja muita vesialueita vahingoittaen vesieliöitä ja vesiekosysteemejä. Lisäksi happosateet aiheuttavat metsätuhoja ja pilaavat viljelysmaita. Rikkidioksidi on itsessään myrky, joka hengitettynä vaurioittaa hengitysteitä aiheuttaen muun muassa astmaa ja keuhkosityöpää. Rikkidioksidipäästöt ovat aiemmin aiheuttaneet merkittävän laajoja ongelmia fossiiliseen energiaan perustuneessa teollisuudessa, mutta erityisesti länsimaissa kiristynyt ympäristösääntely on vähentänyt rikkidioksidipäästöjä huomattavasti. Laivaliikenteen aiheuttamia rikkipäästöjä ja ympäristön happamoitumista käsitellään tarkemmin loppuraportin artikkelissa “Alusten pakokaasupäästöjen koostumus”. (Bufalini, 1971, 685–700.)

Hiukkaspäästöt ovat erityisesti raskaille polttoöljyille ominainen päästölaji (Winnes & Fridell, 2009, 1392-1395). Käytännössä ne pitävät sisällään monentyypisiä palamattomia nokikomponentteja. Pienhiukkasiksi kutsutaan alle 2,5 mikrometrin kokoisia hiukkaisia. Pienhiukkasten vaarallisuus perustuu erityisesti niiden kokoon, jolloin hengitysteihin kulkeutuessaan ne eivät pysähdy nenäonteloiden värekarvoihin vaan kulkeutuvat keuhkoihin asti tunkeutuen lopulta keuhkorakkuloihin. Erityisesti maantieliikenteessä dieselmootto- reiden pienhiukkaspäästöt ovat olleet huomion kohteena jo pidempään. Meriliikenteessä hiukkaspäästöjen haitallisuuteen vaikuttaa paljon alue, jolla operoidaan (Seppälä et al., 2021, 3215–3216): esimerkiksi satamatoimintojen tai satamamanoveerauksen yhteydessä muodostuvat hiukkaspäästöt ovat terveysvaikutuksiltaan huomattavasti vaarallisempia asutuksen läheisyydestä johtuen verrattuna vaikkapa avomerellä muodostuviin hiukkaspäästöihin.

Musta hiili on käsitteenä varsin epämääräinen. Se tarkoittaa palamisen yhteydessä muodostuvaa epäorgaanista hiiltä (Comer et al., 2017, 8–9; Zhang et al., 2019, 2–4). Kyseessä on yksi pienhiukkaslaji. Mustan hiilen ympäristövaikutukset erityisesti ilmaston lämpenemisen osalta ovat olleet viime vuosien tutkimuskohteita. Vaikuttaa siltä, että mustan hiilen päästöt voivat vaikuttaa huomattavasti erityisesti arktisilla alueilla tapahtuvaan ilmaston lämpenemiseen (Winiger et al., 2016, 5–6). Musta hiili sitoo auringon lämpöä lämmittäen näin ilmakehää, ja lumipinnalle laskeutunut hiili nopeuttaa lumien ja jään sulamista, jolloin niiden auringon säteilyä heijastava vaikutus vähenee.

## LNG

Maakaasun käyttäminen meriliikenteen polttoaineena on herättänyt paljon kiinnostusta erityisesti 2010-luvun aikana (Balcombe et al., 2019, 75–77). Maakaasu palaa puhtaasti, jolloin hiukkaspäästöjen määrä on lähtökohtaisesti pieni. Maakaasun koostumus vaihtelee

sen toimittajasta riippuen (Kalina & Grobarcikova, 2014, 72): maakaasu voi olla lähes täysin metaania, mutta myös muiden alkuaineiden osuus (esim. etaani tai propaani) voi osalla maakaasutoimittajista olla huomattava. Polttoainekilogrammaa kohden hiilidioksidipäästöjen määrä on öljytuotteisiin verrattuna alhaisempi (n. 2,75 kg/kgpa) ja kaasun lämpöarvo polttoöljytuotteita parempi (laadusta riippuen n. 13,5–13,7 kWh/kg). Kaasussa ei myöskään ole rikkiä, jolloin rikkipäästöongelma ratkeaa. Moottoriratkaisusta riippuen NO<sub>x</sub>-päästöjen määrää on mahdollista vähentää huomattavasti ilman NO<sub>x</sub>-päästövähennystekniikoiden käyttämistä (Li et al., 2015, 951–952). Myös tässä hankkeessa tehdyt mittaukset vahvistavat tämän asian. Kaasun hinta on lisäksi ollut läpi 2010-luvun suhteellisen edullinen ja hintanäkymät vakaat (Vaferi et al., 2020, 15–16). Tilanne on kuitenkin muuttunut radikaalisti vuoden 2021 aikana (Vivoda, 2022, 10–11), jolloin hintataso lähti nousuun kansainvälisen tilanteen kiristymisen takia. Helmikuussa 2022 alkanut Venäjän hyökkäys Ukrainaan ja tämän kriisin seurauksena länsimaiden ja Venäjän välille muodostunut pakotesota on aiheuttanut erityisesti Eurooppaan kaasupulan, minkä vuoksi maakaasun hinta on noussut entisestään ja tehnyt maakaasun tulevasta hintatasosta vaikeasti ennakoitavan. Tätä kirjoitettaessa tilanne on edelleen auki, jolloin kaasun tulevan hintakehityksen ennustaminen on haasteellista.

Kaasumaisen polttoaineen käyttäminen öljyjen sijaan tuottaa kuitenkin erilaisia haasteita: kaasun varastointi kaasumaisessa muodossa normaalipaineessa vaatisi niin paljon tilaa, ettei sen käyttö meriliikenteessä olisi mahdollista. Tätä tilantarvetta on mahdollista pienentää paineistamalla, mutta painesäiliöiden valmistus on kallista ja painesäiliöt muodostavat uudentyypin turvallisuusrisikin alusympäristöön. Myös bunkraaminen vaatii tuolloin erikoisvälineistöä. Kaasun nesteyttämisen tarkoituksena onkin pienentää sen vaatimaa varastotilaa huomattavasti: jäädytettäessä kaasua -162 °C:een se nesteytyy, jolloin sen tilavuus pienenee noin kuudessadasosaan NTP-olosuhteissa vaaditusta tilavuudesta. Nesteytys mahdollistaa siis kaasun varastoinnin normaalipaineessa hyvinkin energiatiheästi. Näin kylmien lämpötilojen saavuttaminen vaatii kuitenkin energiaa, ja kaasun pitäminen tässä lämpötilassa energiatehokkaasti edellyttää hyvää eristystä varastointijärjestelmältä. Kylmät lämpötilat vaativat komponenteilta kylmänkestävyyttä, ja vikatilanteessa järjestelmän stabiilius on taattava. LNG:tä käytettäessä alusympäristössä vaadituille rakenteille, turvallisuusjärjestelmille ja miehistön koulutukselle on asetettu kansainväliset standardit. (Anfossi, 2022, 10–27; Aneziris et al., 2020, 2–8.)

Pääosin kaasupolttoaineita hyödyntävät merimoottorit ovat dual fuel tai tri fuel -tyyppisiä monipolttoainemoottoreita (Grönholm et al., 2021, 13678). Näistä dual fuel -moottoreilla tarkoitetaan moottorityyppisiä, joita voidaan operoida kaasulla tai kevyellä polttoöljyllä. Tri fuel -moottoreiksi voidaan kutsua dual fuel -moottoreita, joihin on lisäksi

asennettu raskaan polttoöljyn syöttöjärjestelmä. Jälkimmäinen ratkaisu on harvinaisempi, sillä LNG-alusinvestointien pääajatuksena on lähtökohtaisesti ollut halvemman polttoaineen hyödyntäminen ja päästöjen vähentäminen. Raskaan polttoöljyn syöttöjärjestelmän asentaminen on kuitenkin merkittävä investointi, eikä se tällaisessa käytössä todennäköisesti kovinkaan nopeasti maksa itseään takaisin, kun huomioidaan kevyen ja raskaan polttoöljyn hintaero.

Kaasumoottori voidaan toteuttaa otto-prosessina, jolloin moottorikonstruktio käyttää polttoaineenaan pelkkää kaasua. Tämän moottorikonstruktion etuna on suhteellisen yksinkertainen rakenne, vähäiset NO<sub>x</sub>-päästöt ja hyvä energiatehokkuus kuormitettuna. Moottoriratkaisun haittapuolena on kuitenkin nakutusalttius, mikä vaatii kaasulta korkeaa metaanilukua. Lisäksi sytytystulppien kesto on rajallinen, ja etenkin osakuormalla operoitaessa metaanipäästöt kasvavat. Tämä moottorityyppi on myös sidoksissa maakaasuun, jolloin polttoaineen vaihto dieseliin, esimerkiksi maakaasun saatavuusongelmien tai hintavaihteluiden takia, ei ole mahdollista. (Aferin et al., 2020, 6; Lindstad et al., 2020, 8).

Varsinaisia monipolttainemoottorityyppejä ovat matala- ja korkeapainedieselit. Matalapainedieseileissä moottori toimii perinteisenä dieselmoottorina dieselillä operoitaessa, mutta siirryttäessä käyttämään kaasua moottori toimii eräänlaisena otto- ja dieselprosessien kombinaationa: kaasu seostetaan palamisilman kanssa imukanavissa, minkä jälkeen kaasu-ilmaseos puristetaan puristustahdin aikana ja sytytetään tahdin lopuksi ruiskuttamalla sylinteriin pieni määrä dieseliä. Tätä kutsutaan pilottipolttaineeksi. Kuormitettuna moottori on energiatehokas, jolloin erityisesti NO<sub>x</sub>-päästöt ovat vähäiset. Moottorityypin huonoina puolina on edellytys dieselsyöttöjärjestelmän olemassaololle, vaikka tarkoitus olisikin operoida pelkällä kaasulla. Kaasu-ilmaseoksen puristaminen tuottaa ottomoottorin tapaan metaanipäästöjä, sillä osa kaasu-ilmaseoksesta jää palamatta palorintaman pysähtyessä ennen sylinterien ja mäntien välistä rakoa. Erityisesti osakuormalla operoitaessa palamaton metaani on ongelma, sillä sylinterit muotoillaan toimimaan kuormitettuna, jotta energiatehokas toiminta olisi mahdollista normaaliolosuhteissa. Osakuormituksessa muotoilu ei kuitenkaan ole optimaalinen. Moottorityyppi on myös altis nakutukselle, jolloin kaasun metaaniluvun on oltava korkea ja nakutusta on ottomoottorin tapaan seurattava moottoriautomaation avulla. (Aferin et al., 2020, 4--)

Monipolttainenedieselistä valmistetaan myös korkeapaineisia versioita, joissa kaasu syötetään sylinteriin korkeapaineruiskutuksella ja sytytetään pilottipolttaineella (Aferin et al., 2020, 11; Lindstad et al., 2020, 8). Tämä konstruktio on kalliimpi, ja NO<sub>x</sub>-päästöt ovat usein korkeampia vaatien jälkikäsitteilyratkaisuja TIER III -vaatimusten täyttämiseksi. Toisaalta metaanipäästöt jäävät alhaiseksi verrattuna matalapainedieseliin tai ottomoottoriratkaisuun.

Myöskään nakutusongelmia ei matalapainedieselin tapaan ilmene, jolloin on mahdollista käyttää pienemmän metaaniluvun polttoainetta.

Riippumatta moottorityypistä nesteytetty maakaasu pitää höyrystää ennen syöttämistä moottorille. Yksinkertaisimmillaan höyrystinjärjestelmä voi hyödyntää ulkoilman lämpötilaa, mutta syöttömääriä ajatellen tämä ratkaisu ei ole kovin tehokas. Sähköllä, polttoaineella tai pakokaasukattiloiden tuottamalla höyryllä toimivat höyrystimet ovat tehokkaita mutta heikentävät lähtökohtaisesti aluksen kokonaishyötysuhdetta. Usein alusratkaisuissa hyödynnetään vesitoimisia höyrystimiä, sillä veden korkea ominaislämpökapasiteetti toimii hyvänä lämmönsiirtimenä. Glycolin avulla voidaan suhteellisen helposti ja edullisesti vähentää veden korroosiota aiheuttavia ominaisuuksia. Näin myös nesteen jäätymisvaaraa vähennetään, mikäli höyrystimen kiertovesipumppaus jostain syystä pysähtyisi. Lisäksi nesteen tehtävänä on kaasun höyrystämisen jälkeen lämmittää se vaadittuun syöttölämpötilaan. (Vuori, 2020, 38–49.)

LNG:n yleistymistä on hidastanut osaltaan LNG-bunkrausinfrastruktuurin puute (Anfossi, 2022, 5–9; Aymelek et al., 2014, 775; Baresic et al., 2018, 13–23). Bunkrausmahdollisuuksien järjestäminen voidaan toteuttaa periaatteessa samoilla tavoilla kuin öljynkin bunkraus (tankkiautoista laivaan, säiliöaluksesta laivaan tai maaterminaalista laivaan). Tankkiautoista bunkraaminen on periaatteessa joustavaa, mutta autojen pienten tilavuuksien takia se ei ole kovin tehokasta. Säiliöalusbunkraus tulee usein kyseeseen, mikäli alueella on useita LNG:tä käyttäviä aluksia ja lähistöllä LNG-terminaali. Suoraan terminaalista bunkraaminen on tehokasta mutta edellyttää sitä, että satamassa on terminaali. Erityisesti siirtymäkauden alussa ilmenee usein perinteinen ongelma, ettei infrastruktuuriin haluta investoida ennen kysynnän varmistumista (eli LNG-alusten yleistymistä). Toisaalta LNG-aluksiin ei haluta investoida, ennen kuin bunkrausinfrastruktuuri on kehittynyt riittävästi. Myös viime aikoina lisääntynyt huoli LNG:n metaanivuodoista on osaltaan voinut laskea halukkuutta investoida maakaasuun yhdessä Ukrainan sodan aiheuttaman kaasukriisin kanssa. Vaikka maakaasun hiilidioksidipäästöt ovat pienemmät kuin öljypolttoaineilla, metaanivuodot heikentävät LNG:n potentiaalia vähentää kasvihuonekaasupäästöjä (Grönholm et al., 2021, 13684).

Tällä hetkellä LNG:n tulevaisuus on kuitenkin epäselvä Ukrainan sodan ja siihen liittyvän energiakriisin vuoksi. LNG:n nopean hinnannousun takia moni toimija niin merellä kuin maissa on joutunut harkitsemaan toisenlaisia energiamuotoja. Monipolttoainemoottoreilla varustettujen laivojen osalta ratkaisu on kuitenkin periaatteessa helppo ja joustava toteuttaa operoimalla alusta kevyellä polttoöljyllä. Tämä mahdollistaa myös siirtymisen takaisin kaasun käyttöön joustavasti, mikäli LNG:n hintataso tulevaisuudessa laskee. Samalla

tekniikka mahdollistaa joustavan siirtymisen myös biokaasun tai synteettisen metaanin käyttöön.

Lisätietoa LNG-infrastruktuurien rakentamisesta on saatavilla muun muassa tämän hankkeen osana toteutetusta opinnäytetyöstä, jossa verrataan Suomen ja Italian LNG-infrastruktuuria ja kehittämissuunnitelmia:

- Nicolò Anfossi: LNG supply analysis in the European context: Comparison between Italy and Finland

## TULEVAISUUDEN RATKAISUT

### Biopolttoaineet

Biopolttoaineet voivat olla kaasumaisia tai nestemäisiä polttoaineita, jotka on tuotettu yleensä käymis- tai termokemiallisilla prosesseilla biomassasta. Biopolttoaineilla voidaan tarkoittaa seospolttoaineita, jotka koostuvat sekä fossiilisesta polttoaineesta että biopolttoaineesta. Biopolttoaine voi kuitenkin olla myös sataprosenttisesti biomassasta tuotettua, jolloin se tuotantoprosessin muodostamat päästöt huomioiden voi olla parhaimmillaan liki hiilineutraali polttoaine. Kaasumaisia biopolttoaineita ovat muun muassa biokaasu (joka voidaan myös nesteyttää maakaasun tapaan), joka on usein pääasiassa metaania. Nestemäisistä tavallisimpia ovat biobensiini tai -diesel. Myös biometanolin valmistuskapasiteetti tulevaisuudessa kasvaa kysynnän lisääntyessä. (Tyrovola et al., 2017, 415–421.)

Synteettisten polttoaineiden tapaan biopolttoaineisiin siirtyminen on varustamolle yleensä varsin helppoa: saatavuudesta ja hintatasosta riippuen käyttöönotto voidaan tehdä joustavasti eikä merkittäviä investointeja tarvitse tehdä. Biopolttoaineita tullaan siksi todennäköisesti käyttämään enenevässä määrin erityisesti siirtymäkauden ratkaisuna. Biopolttoaineiden etuna on mahdollisuus vähentää ilmakehään siirtyvää hiilidioksidia suljettua hiilikiertoa hyödyntäen, mutta moniin muihin päästölajeihin biopolttoaineiden käytöllä ei ole suoraa vaikutusta. Biopolttoaineiden hiilipäästöjä vertaillessa on erityisen tärkeä huomioida polttoaineen koko elinkaaren aikana syntyvät päästöt. Jos esimerkiksi metsää hakataan biopolttoaineen raaka-aineeksi, biopolttoaineen tuotannon hiilipäästöt kasvavat suuriksi. Lisäksi erityisesti ensimmäisen sukupolven biopolttoaineiden säilyvyys on asettanut haasteita, mutta säilyvyyttä on saatu parannettua huomattavasti. Verrattuna erityisesti fossiilisiin polttoaineisiin biopolttoaineiden nopean kierron järjestäminen on kuitenkin oleellinen osa säilyvyysongelmien ratkaisua. (Parmar et al., 2011, 10163–10172; Rodionova et al., 2017, 8–9.)

## Metanoli ja ammoniakki

Metanolialoutta on esitetty yhdeksi ratkaisuksi, jolla fossiilisista polttoaineista pyritään irtautumaan erityisesti liikennesektorilla (Jelić et al., 2021, 24 & 28–29). Myös meriliikenteessä metanolia on esitetty yhdeksi tulevaisuuden polttoainevaihtoehdoksi. Metanolia voidaan valmistaa varsin edullisesti maakaasusta, tosin maakaasun nykyinen hintataso on nostanut myös metanolin hintatasoa Ukrainan sodan aiheuttaman energiakriisin vuoksi. Metanolin tuotantoprosesseja on kuitenkin lukuisia muitakin, ja tarpeen vaatiessa myös biometanolin valmistaminen on mahdollista (Svanberg et al., 2018, 1217–1228). Metanolia voidaan käyttää polttoaineena mäntämoottoreissa, erityisesti ottomoottoreissa, kattiloissa tai polttokennoissa. Nykyisiä merimoottoreita ei kuitenkaan ole mahdollista suoraan operoida metanolilla, mikä käytännössä tekee siirtymästä haastavamman verrattuna bio- tai synteettiseen dieseliin.

Muita metanolin etuja ovat aineen hajoaminen biologisesti ja nestemäinen olomuoto, mikä tekee käsittelystä helpompaa verrattuna kaasumaisiin polttoaineisiin (Svanberg et al., 2018, 1217). Metanolin ongelmia ovat kuitenkin matala lämpöarvo ja dieseliin verrattuna voimakas syövyttävyyden erityisesti kevytmetallien ja tiivistemateriaalien osalta, jolloin polttoainjärjestelmien on kestettävä poikkeavat ominaisuudet. Toisaalta metanolimoottoreita on valmistettu jo pitkään, jolloin asian ratkaisu on lähinnä tekninen. Dieselimoottoreiden polttoaineeksi metanoli soveltuu kuitenkin huonosti sen korkean puristuskestävyyden takia, mutta metanolista jalostettua dimetyylieetteriä on esitetty fossiilisen dieselin korvaajaksi. Käytännössä kyseessä on synteettinen polttoaine, jonka olomuoto NTP-olosuhteissa on kaasu.

Ammoniakki ei sisällä lainkaan hiiltä, mikä tekee siitä hiilineutraalin polttoaineen (Jelić et al., 2021, 3–5). Palamisominaisuuksiltaan ammoniakki muistuttaa metanolia, mutta aineen hiilettömyys tekee siitä mahdollisen vaihtoehdon. Mäntämoottorit voidaan teknisesti suunnitella toimimaan ammoniakilla. Ammoniakkia voidaan tuottaa synteettisesti tai fossiilisista lähteistä, minkä vuoksi sen tuotantoprosessin ilmastovaikutus voi vaihdella merkittävästi prosessista riippuen. Zincir (2022, 18156) havaitsi, että kivihielestä ja öljystä tuotetulla ammoniakilla oli negatiivinen ympäristövaikutus, kun vaikutusarvioinnissa huomioitiin tuotantoprosessin päästöt. Maakaasusta tuotetulla ammoniakilla oli tutkimuksen mukaan puolestaan samankaltainen ympäristövaikutus kuin MDO-polttoaineilla. Sen vuoksi Zincir (2022, 18164) suosittelee, että tuotettaessa ammoniakkia maakaasusta olisi minimoitava tuotantoprosessin hiilipäästöt hyödyntämällä hiilen talteenottojärjestelmiä. Tällöin ammoniakkin käyttö olisi tutkijan mukaan mielekästä hiilidioksidipäästöjen vähentämisen näkökulmasta. Niin kutsuttu vihreä ammoniakki, joka tuotetaan uusiutuvalla

energialla, on tähän asti ollut varsin hintavaa vähäisen tarjonnan takia (Zincir, 2022, 18162). Ammoniakki on kuitenkin toistaiseksi metanolin ja dimetyylieetterin tavoin mahdollinen tulevaisuuden polttoaineratkaisu, mutta ratkaisun yleistyminen vaatii vielä paljon tutkimusta, standardeja, investointeja ja muita muutoksia.

## Vety

Vety on tehokas polttoaine, jota on mahdollista hyödyntää sellaisenaan monentyyppisissä vedylle konvertoituissa polttomoottoreissa. Vety soveltuu myös polttokennojen polttoaineeksi. Vedyn lämpöarvo massan suhteen (119 MJ/kg) on korkea verrattuna öljypohjaisiin polttoaineisiin. Toisaalta tilavuuden suhteen lämpöarvo jää alhaiseksi erityisesti normaalissa ilmanpaineessa johtuen vedyn alhaisesta tiheydestä. Asiaan voidaan vaikuttaa paineistamalla, mutta samalla joudutaan samankaltaisten ongelmien eteen kuin toimittaessa paineistetun kaasun kanssa. Vetyä on mahdollista myös nesteyttää maakaasun tapaan, mutta nesteyttäminen normaalipaineessa edellyttää  $-253\text{ °C}$  lämpötilaa. Tuolloinkin nestevedyn tiheys on ainoastaan  $71\text{ kg/m}^3$ , joten huolimatta korkeasta lämpöarvostaan massansa suhteen, myös nesteytetyn vedyn tilavuusenergiatiheys jää käytännössä alhaiseksi etenkin laivakäyttöä ajatellen. Tämä on vetypolttoaineen varastoinnin keskeinen ongelma. (Kauranen et al., 2012.)

Vetyä voidaan tuottaa elektrolyysillä vedestä. Maailman vesivarannot ovat fossiilisiin polttoaineisiin verrattuna hajautuneet ympäri maailmaa, mikä tekee vedystä lähtökohdaisesti huoltovarmun ja geopoliittisesti varsin hajautetun energiamuodon. Vaikka vedyn polttaminen onkin palamistuotteiltaan ympäristöystävällistä, vetytaloutta on kuitenkin tärkeää tarkastella kokonaisuutena. Vetyä voidaan valmistaa useilla menetelmillä, joiden energiantensiivisyys ja hyötysuhde vaihtelevat (Kothari et al., 2008, 555–560). Elektrolyysiprosessissa noin kolmannes prosessin vaatimasta sähköenergiasta muuttuu lämmöksi ja prosessi on varsin energiantensiivinen. Tällä hetkellä suurin osa vedystä tuotetaan maakaasusta reformoimalla, öljyn osittaishapetuksella tai kaasuttamalla hiiltä (Dincer & Acar, 2015, 11096). Näistä menetelmistä syntyy hiilidioksidipäästöjä, joten näillä tavoilla tuotettua vetyä ei voi kutsua hiilineutraaliksi, kun tarkastellaan elinkaaren aikaisia päästöjä. Tulevaisuudessa biomassan kaasuttaminen, pyrolyysi tai käymisprosessien muodostamien välituotteiden reformointi voivat muodostaa tärkeän tuotantomenetelmäperheen vedyn tuotannolle (Schneider et al., 2020, 150–158).

Vedyn tuotanto, kuljetus ja varastointi määrittävät vetytalousprosessien ympäristöystävällisyyden (Tseng et al., 2005, 1–17). Tuuli- ja aurinkoenergian tuotantokapasiteetti riippuu paljon vallitsevista olosuhteista, jolloin sähköenergian muuntaminen vedyksi on yksi tapa vakauttaa tuotannon ja kulutuksen suhdetta. Toisaalta sähköenergian muuntaminen ve-



dyksi ja myöhemmin kenties polttokennoissa takaisin sähköksi on varsin energiatehotonta verrattuna siihen, että sähköenergia olisi suoraan hyödynnettävissä sellaisenaan. Vetyä voidaan kuitenkin hyödyntää sähköverkon ulottumattomissa, kuten meriliikenteessä. Vedyn siirtämisessä paras ratkaisu on maakaasun tapaan putkikuljetukset, mutta tämä edellyttää kattavaa vedynsiirtoverkkoja. Vetyä on mahdollista kuljettaa paineistettuna säiliöaluksilla, säiliöautoilla tai rautateitse. Nesteyttäminen on myös mahdollista, mutta vaatii maakaasuun verrattuna huomattavasti kylmemmän lämpötilan. Vetyä on mahdollista varastoida myös liuottamalla se metallihydridiksi (Sakintuna et al., 2007, 1121–1140) tai hyödyntämällä vetyrikkaita kemikaaleja (Eberle et al., 2009, 6611–6614). Toistaiseksi nämä ratkaisut ovat vielä kehitysasteella, mutta ne avaavat mahdollisuuksia eräänlaisten ”vetyakkujen” yleistymiseksi, jolloin nesteytys- tai paineistusongelmat voitaisiin välttää.

Mikäli kehitys johtaa vetytalouden suuntaan, tapahtuu siirtymä todennäköisesti ensin muilla sektoreilla kuin meriliikenteessä. Vedyn ongelmana aluskäyttöä ajatellen on matalahko tilavuusenergiatiheys, varastointiin liittyvät haasteet, bunkrausinfrastruktuurin puutteet ja riittävän tehokkaiden polttokennojen kallis hankintahinta. Kehitystä hidastaa myös alusten pitkä käyttöikä, jolloin aluskaluston uudistuminen vie joka tapauksessa aikaa. Nykyisten alusten retrofittaus vetykäyttöisiksi niiden elinkaaren aikana on hyvin epätodennäköistä johtuen korkeista investointikustannuksista.

## Synteettiset polttoaineet

Synteettinen polttoaine on yleiskäsite teollisesti hiilidioksidista ja vedystä valmistetuille polttoaineille (Wahl & Kallo, 2022, 3515–3517). Sillä voidaan tarkoittaa yhtä lailla synteettistä metaania, bensiiniä, dieseliä tai monia muita hiilivety-polttoaineita. Mikäli polttoaineen sisältämä vety saadaan vedestä ja hiilidioksidi ilmasta, tarjoavat synteettiset polttoaineet periaatteessa hiilikiertoratkaisun, jossa polttoainetta poltettaessa syntyvä hiilidioksidi sidotaan polttoaineeseen sitä valmistettaessa (Speight, 2020, 3–8). Näin hiilidioksidimäärä ilmakehässä ei nousisi. Tämä kuitenkin edellyttää, että varsinainen polttoaineen tuotantoprosessi, joka on hyvin energiantensiivinen, saadaan hiilineutraaliksi. Tämän vuoksi synteettisten polttoaineiden ympäristöystävällisyyttä arvioitaessa on huomio syytä kiinnittää koko tuotantoketjuun, siinä missä esimerkiksi fossiilissa polttoaineissa jalostusprosessien osuus polttoainekilon polttamisesta syntyvistä kokonaispäästöistä on marginaalinen.

Synteettisten polttoaineiden tuotantoon tarvittava teknologia ei sinänsä ole uutta: Kemialliset prosessit on tunnettu jo pitkään, mutta fossiilisten polttoaineiden saatavuus ja hintataso ovat marginalisoineet synteettisten polttoaineiden kysynnän (Speight, 2020, 1–2). Erityisesti sähköenergian tarve synteettisiä polttoaineita valmistettaessa on suurta, mikä on osaltaan

rajoittanut synteettisten polttoaineiden kilpailukykyä. Käytännössä tämän teollisuushaaran kehittyminen vaatii edullisen ja hiilineutraalin sähköntuotannon kapasiteetin voimakasta kasvattamista. Tämä edellyttäneen niin ydinvoiman kuin aurinko- ja tuulisähkönkin tuotannon voimakasta lisärakentamista.

Synteettisten polttoaineiden tuote- ja tuotantokehitys on painottunut tällä hetkellä hiilineutraalin valmistusprosessin kehittämiseen (Rosa, 2017, 36–43). Meriliikenteessä öljypolttoaineiden korvaaminen vaihtoehtoisilla energiamuodoilla on osoittautunut haastavaksi, joten synteettisten polttoaineiden hyödyntäminen voisi olla potentiaalinen vaihtoehto meriliikenteen hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi. Synteettisten polttoaineiden parhaita piirteitä on niiden sovellettavuus myös vanhoissa, olemassa olevissa moottoreissa. Näin varustamon ei tarvitse tehdä suuria investointeja aluskalustoon. Mikäli synteettistä polttoainetta ei jostain syystä olisikaan saatavilla, voisi varustamo hyödyntää perinteistä fossiilista polttoöljyä. Tämä helpottaa käytännössä erityisesti siirtymävaihetta ja pienentää varustamon taloudellista riskiä. Synteettisten polttoaineiden yleistymisen edellyttää tuotantokapasiteetin ja -tarjonnan lisäksi kuitenkin kilpailukykyistä hintaa verrattuna fossiilisiin polttoaineisiin.

Synteettiset polttoaineet ovat mahdollinen ratkaisu hiilidioksidipäästöjen vähentämiseksi (Speight, 2020, 2), mutta moniin muihin päästökomponentteihin niillä ei ole suoraa vaikutusta: esimerkiksi typen oksidien päästöt riippuvat pääasiassa palamisolosuhteista ja vähemmissä määrin itse polttoaineesta. Sama pätee myös hiukkaspäästöihin, minkä vuoksi synteettiset polttoaineet antavat niiden vähentämiseksi lähinnä osaratkaisun. Toisaalta valmistusprosessissa on suoraviivaista tuottaa rikitöntä polttoainetta, jolloin rikkipäästö-ongelma ratkeaa.

## LÄHTEET

Aferin, M.A., Nabi, M.N., Akram, M.W., Islam, M.T., Chowdhury M.W. 2020. A review on liquefied natural gas as fuels for dual fuel engines: Opportunities, challenges and responses. *Energies*, 13(22), article 6127.

Anfossi, N. 2022. LNG supply analysis in the European context: Comparison between Italy and Finland. Genova: Università degli studi di Genova, scuola di scienze sociali dipartimento di economia.

Aneziris, O., Koromila, I., Nivolianitou, Z. 2020. A systematic literature review on LNG safety at ports. *Safety science*, 124, article 104595.

Aymelek, M., Boulougouris, E.K., Turan, O., Konovessis, D. 2014. Challenges and opportunities for LNG as a ship fuel source and an application to bunkering network optimization. Teoksessa Guedes-Soares & Santos (toim.): Proceedings of international conference on maritime technology and engineering. London: CRC Press.

Balcombe, P., Brierley, J., Lewis, C., Skatvedt, L., Speirs, J., Hawkes, A., Staffell, I. 2019. How to decarbonize international shipping: Options for fuels, technologies and policies. *Energy conversion and management*, 182, 72–88.

Baresic, D., Raucci, C., Rehmatulla, N., Smith, T., Rojon, I. 2018. LNG as a marine fuel in the EU: Market, bunkering infrastructure investments and risks in the context of GHG reductions. London: UMAS.

Besharat, F., Dehghan, A.A., Faghih, A.R. 2013. Empirical models for estimating global solar radiation: A review and case study. *Renewable and sustainable energy reviews*, 21, 798–821.

Bufalini, M. 1971. Oxidation sulfur dioxide in polluted atmospheres. Review. *Environmental science and technology*, 5(8), 685–700.

Carlton, J.S., 2007. Marine propellers and propulsion. Oxford: Butterworth-Heinemann.

Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B., Rutherford, D. 2017. Black carbon emissions and fuel use in global shipping 2015. Washington DC: International council on clean transportation.

Dincer, I., Acar, C. 2015. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *International journal of hydrogen energy*, 40(34), 11094–11111.

Eberle, U., Felderhoff, M., Schueth, F. 2009. Chemical and physical solutions for hydrogen storage. *Angewandte chemie international edition*, 48(36), 6608–6630.

Fingas, M., 2014. Introduction to oil chemistry and properties. Handbook of oil spill science and technology. New Jersey: John Wiley & Sons.

Ghulam, Y., Muhammad, I.B., Tariq, M.A., Syed, M.S.R.N., Muhammad, A., Khizar, A., Farah, N.T. 2013. Quality and chemistry of crude oils. *Journal of petroleum technology and alternative fuels*, 4(3), 53–63.

Gilbert, P., Bows-Larkin, A., Mander, S., Walsh, C. 2015. Technologies for the high seas: meeting the climate challenge. *Carbon management*, 5(4), 447–461.

Grönholm, T., Mäkelä, T., Hatakka, J., Jalkanen, J-P., Kuula, J., Laurila, T., Laakso, L., Kukkonen, J. 2021. Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station. *Environmental science & technology*, 55, 13677–13686.

Hotti, V. 2022. Meriliikenteen päästövähennystekniikat satamissa. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Ibrahim, S. 2016. Process evaluation of a Sox and NO<sub>x</sub> exhaust gas cleaning concept for marine application. Gothenburg: Chalmers university of technology.

International Maritime Organization IMO. 2013. Air pollution and energy efficiency. Final report of the correspondence group on assessment of technological developments to implement the Tier III Nox emission standards under MARPOL Annex VI. IMO: London.

International Maritime Organization IMO. 2019. Consistent implementation of MARPOL Annex VI, 2019 edition. IMO: London.

International Maritime Organization IMO. 2020. Fourth IMO greenhouse gas study. IMO: London.

International Maritime Organization IMO. 2015. 2015 guidelines for exhaust gas cleaning systems. Resolution MEPC.259(68), annex 1.

- ISO 8217:2017. Petroleum products – fuels (class F) – specifications of marine fuels.
- Jalkanen, J-P. 2020. Emissions from Baltic Sea shipping in 2006-2019. Helsinki: HELCOM maritime working group, 5–8 October 2020.
- Jelić, M., Mrzljak, V., Radica, G., Račić, N. 2021. An alternative and hybrid propulsion for merchant ships: Current state and perspective. *Energy sources, Part A: Recovery, utilization, and environmental effects*, 43, 1–33.
- Kalina, T., Grobarcikova, A. 2014. LNG as alternative fuel for European transport system. *Communications – Scientific letters of the University of Zilina*, 16(2), 70–76.
- Karvonen, T., Kalli, J., Holma, E. 2010. Laivojen typenoksidipäästöjen rajoittaminen. Selvitys MARPOL-yleissopimuksen VI liitteen Tier III -määräysten aiheuttamista kustannusvaikutuksista Suomen kauppamerenkululle. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 42/2010.
- Kauranen, P., Solin, J., Laurikko, L., Törrönen, K., Koivula, J. 2012. Vetytielkartta – vetyenergian mahdollisuudet Suomessa. Espoo: VTT, tutkimusraportti VTT-R-02257-13.
- Koivuniemi, J. 2021. Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.
- Kothari, R., Buddhi, D., Sawhney, R.L. 2008. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renewable and sustainable energy reviews*, 12(2), 553–563.
- Lamas, M.I., Rodríguez, C.G. 2012. Emissions from marine engines and NO<sub>x</sub> reduction methods. *Journal of maritime research*, 9(1), 77–82.
- Landström, B. 1966. Laiva: Katsaus laivan historiaan alkukantaisesta lautasta atomikäyttöiseen sukellusveneeseen. Helsinki: Otava.
- Li, J., Wu, B., Mao, G. 2015. Research on the performance and emission characteristics of the LNG-diesel marine engine. *Journal of natural gas science and engineering*, 27(2), 945-954.
- Lindstad, E., Eskeland, G.S., Riialand, A., Valland, A. 2020. Decarbonizing maritime transport: The importance of engine technology and regulations for LNG to serve as a transition fuel. *Sustainability*, 12(21), article 8793.

- Ni, P., Wang, X., Li, H. 2020. A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, article 118477.
- Park, J., Jang, J.H., Park, S. 2015. Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system for marine engines. *Ocean engineering*, 104, 580–589.
- Parmar A., Singh, N.K., Pandey, A., Gnansounou, E., Madamwar, D. 2011. Cyanobacteria and microalgae: A positive prospect for biofuels. *Bioresource technology*, 102(22), 10163–10172.
- Rodionova, M.V., Poudyal, R.S., Tiwari, I., Voloshin, R.A., Zharmukhamedov, S.K., Nam, H.G., Zayadan, B.K., Bruce, B.D., Hou, H.J.M., Allakhverdiev, S.I. 2017. Biofuel production: Challenges and opportunities. *International journal of hydrogen energy*, 42(12), 8450–8461.
- Rosa, R.N. 2017. The role of synthetic fuels for a carbon neutral economy. *C – Journal of carbon research*, 3(2), article 11.
- Sakintuna, B., Lamari-Darkrim, F., Hirscher, M. 2007. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review. *International journal of hydrogen energy*, 32(9), 1121–1140.
- Schneider, S., Bajohr, S., Graf, F., Kolb, T. 2020. State of the art of hydrogen production via pyrolysis of natural gas. *ChemBioEng reviews*, 7(5), 150–158.
- Seppälä, S.D., Kuula, J., Hyvärinen, A-P., Saarikoski, S., Rönkkö, T., Keskinen, J., Jalkanen, J-P., Timonen, H. 2021. Effects of marine fuel sulfur restrictions on particle number concentrations and size distributions in ship plumes in the Baltic Sea. *Atmospheric chemistry and physics*, 21(4), 3215–3234.
- Speight, J.G. 2020. Synthetic fuels handbook: Properties, process, and performance. New York: McGraw-Hill Education.
- Svanberg, M., Ellis, J., Lundgren, J., Landäl, I. 2018. Renewable methanol as a fuel for the shipping industry. *Renewable and sustainable energy reviews*, 94, 1217–1228.
- Tseng, P., Lee, J., Friley, P. 2005. A hydrogen economy: Opportunities and challenges. *Energy*, 30(14), 2703–2720.

Tyrovola, T., Dodos, G., Kalligeros, S., Zannikos, F. 2017. The introduction of biofuels in marine sector. *Journal of environmental science and engineering A*, 6(8), 415–421.

Untolahti, M. 2021. Haminan, Kotkan ja Helsingin satamien päästömäärien ja -laatuksen kehittyminen. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Vaferi, M., Pazouki, K., Van Klink, A. 2020. Declines in EROI of main fuels and the implications on developing LNG as a marine fuel. *Journal of marine science and engineering*, 8(9), article 719.

Van, T.C., Ramirez, J., Rainey, T., Ristovski, Z., Brown, R.J. 2019. Global impacts of recent IMO regulations on marine fuel oil refining processes and ship emissions. *Transportation research part D: Transport and environment*, 70, 123–134.

Vedachalam, S., Baquerizo, N., Dalai, A.K. 2022. Review on impacts of low sulfur regulations on marine fuels and compliance options. *Fuel*, 310(A), article 122243.

Vivoda, V. 2022. LNG export diversification and demand security: A comparative study of major exporters. *Energy policy*, 170, article 113218.

Vuori, S. 2020. LNG-järjestelmä risteilyaluksessa. Turku: Turun ammattikorkeakoulu.

Wahl, J., Kallio, J. 2022. Carbon abatement cost of hydrogen based synthetic fuels – A general framework exemplarily applied to the maritime sector. *International journal of hydrogen energy*, 47(6), 3515–3531.

Winiger, P., Andersson, A., Eckhardt, S., Stohl, A., Gustafsson, Ö. 2016. The sources of atmospheric black carbon at a European gateway to Arctic. *Nature communications*, 7, article 12776.

Winkler, M.F. 1985. Shipboard fuel handling and treatment for diesel engines. Teoksessa Jones (toim.): Marine Fuels. Philadelphia: ASTM International.

Winnes, H., Fridell, E. 2009. Particle emissions from ships: Dependence on fuel type. *Journal of the air & waste management association*, 59(12), 1391–1398.

Woodyard, D., Latache, M. 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Oxford: Elsevier Science & Technology.

Wärtsilä Finland Oy. 2019. Wärtsilä 46DF product guide. Vaasa: Wärtsilä, Marine solutions.

Zhang, Q., Wan, Z., Hemmings, B., Abbasov, F. 2019. Reducing black carbon emissions from Arctic shipping: Solutions and policy implications. *Journal of cleaner production*, 241, article 118261.

Zincir, B. 2022. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(41), 18148–18168.



# ÖLJYPOLTTOAINEIDEN HINTAKEHITYS

Taru Tanhuanpää



© Elias Altarriba

Polttoainekulut ovat laivayhtiöille merkittävä kustannuserä, sillä ne muodostavat keskimäärin 50–60 prosenttia alusten operointikustannuksista (Han & Wang, 2021, 1–2). Siksi polttoainekulujen hillitseminen on tärkeä osa laivayhtiöiden kustannusten hallintaa. Kustannusten minimointikeinot riippuvat polttoaineiden hinnoista, joita on vaikea ennustaa. Siten yritysten on tärkeä pohtia eri hintaskenaarioita polttoaineille. (De ym. 2021, 927–939.)

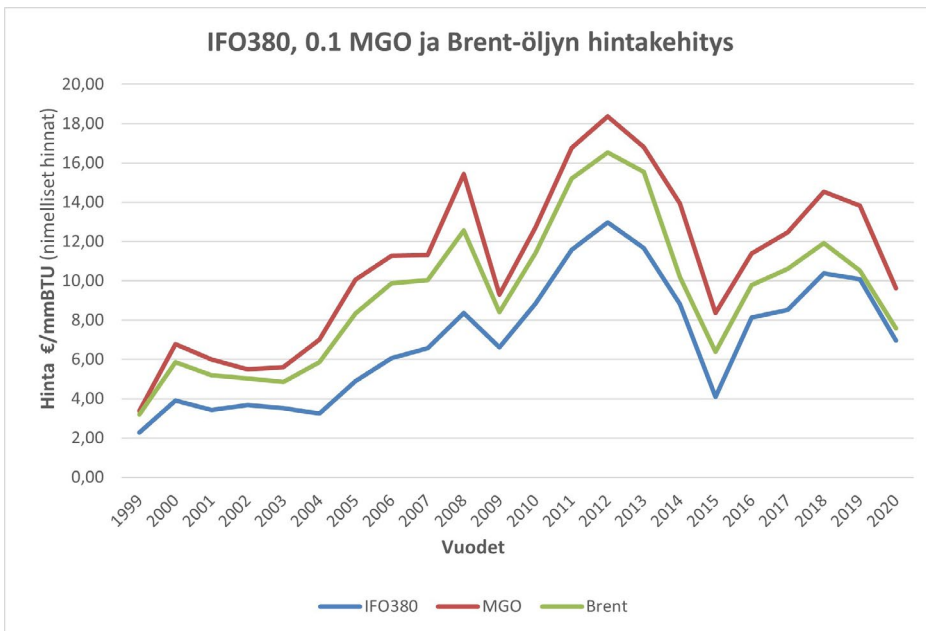
Meriliikenne on hyvin riippuvainen öljypohjaisista polttoaineista. Globaalisti käytetyin näistä on raskas polttoöljy (heavy fuel oil, HFO), jonka yleisiä tyyppejä ovat IFO180 ja IFO380 (intermediate fuel oil). Laivaliikenteessä käytetään myös raakaöljystä tislattuja kevyitä polttoaineita, joita ovat kaasuöljy (marine gas oil, MGO) ja dieselöljy (marine diesel oil, MDO). Öljypohjaisten polttoaineiden ohella osa aluksista käyttää nesteytettyä maakaasua (LNG), joka on fossiilinen polttoaine kuten polttoöljytkin. Nesteytetyn maakaasun käyttö

globaalissa merenkulussa on kuitenkin toistaiseksi pysynyt vähäisenä. Sen sijaan Itämeren alueella nesteytetyn maakaasun käyttö on verrattain yleistä erityisesti uudemmissa ROPAX (roll on/roll off & passenger) -aluksissa. Laivaliikenteessä käytettäviä polttoaineita on esitelty tarkemmin hankkeen puitteissa tehdyssä Koivuniemen opinnäytetyössä (Koivuniemi, J.: Itämerellä käytettävien laivapolttoaineiden vertailu, 2021).

Tämä raportti käsittelee laivaliikenteen polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä, joihin kuuluu esimerkiksi raakaöljyn hinta. Raportissa esitellään myös raakaöljyn hintaan vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi pohditaan, miten laivaliikenteen polttoaineiden hinnat voisivat mahdollisesti kehittyä tulevaisuudessa. Raportin tarkastelu on rajattu öljypohjaisiin polttoaineisiin. Siten esimerkiksi uusiutuvien polttoaineiden tai nesteytetyn maakaasun mahdollista hintakehitystä ei pohdita tässä raportissa.

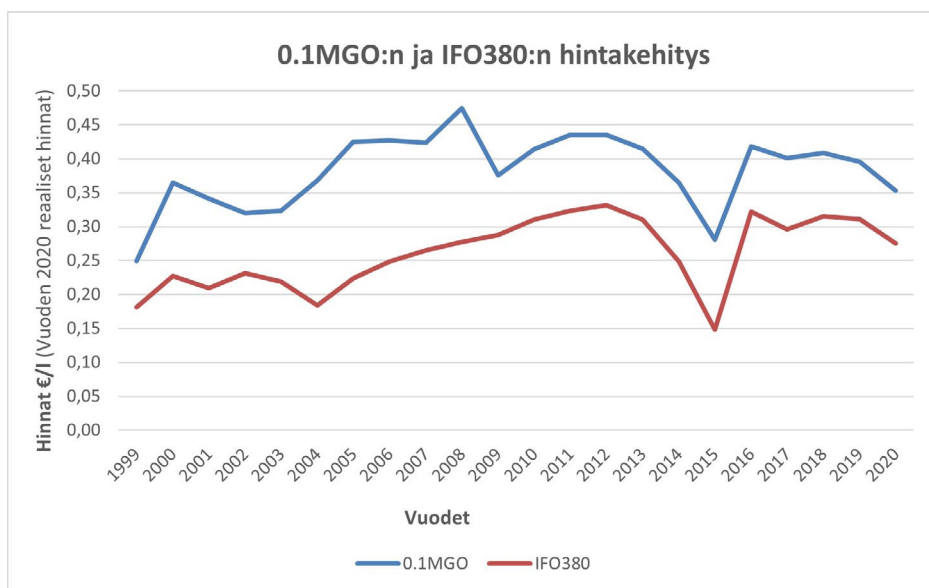
## Polttoaineiden ja raakaöljyn hintariippuvuus

Öljypohjaiset polttoaineet jalostetaan raakaöljystä, minkä vuoksi niiden hintaan vaikuttaa ratkaisevasti raakaöljyn hintataso (esim. Besbes & Savin 2009, 694–711; Chen & Ma 2022, 13-14; Ranjan ym. 2018, 162–165). Siksi raakaöljyn kahden yleisen viitelaadun, Brent- ja WTI-viitelaadun, hintoja pidetään indikaattoreina laivaliikenteen öljypohjaisten polttoaineiden hinnoille (Besbes & Savin 2009, 694–711). Koska öljyn hinnat ovat volatiilit eli voimakkaasti heilahtelevat (Miao ym. 2017, 77–78), myös laivaliikenteen polttoaineiden hinnat vaihtelevat huomattavasti ajan myötä. Kuva 1 havainnollistaa kahden eri polttoainetyypin, IFO380:n ja 0.1MGO:n, sekä Brent-öljyalaadun hintojen vaihtelua vuosien saatossa.



**Kuva 1.** Raakaöljyn Brent-viitelaadun sekä IFO380:n ja 0.1MGO:n hintakehitys vuosina 1999–2020. Alkuperäinen data on ilmaistu dollareina, mutta kuvaa varten hinnat on käännetty dollareista euroiksi vuotuisen valuuttakurssin avulla. Datan lähde: Det Norske Veritas.

Kuvasta 1 näkyy, että IFO:n ja MGO:n hintojen ja öljyn hinnan välillä on vahva positiivinen korrelaatio. Toisin sanoen öljyn hinnan laskiessa polttoaineiden hinnat laskevat, ja öljyn hinnan noustessa polttoaineiden hinnat nousevat. Siksi pohdittaessa laivaliikenteen polttoaineiden hintakehitystä on pohdittava myös öljyn hintaan vaikuttavia tekijöitä. Lisäksi kuvasta 1 näkyy, että myös IFO:n ja MGO:n hintojen välillä on positiivinen korrelaatio. Kuva 2 puolestaan havainnollistaa IFO380:n ja 0.1MGO:n litrahintoja vuosina 1999–2020.



**Kuva 2.** Polttoainetyyppien IFO380 ja 0.1MGO hintakehitys vuosina 1999–2020. Alun perin data on ilmaistu nimellisinä dollareina per miljoona brittiläistä lämpöyksikköä (British Thermal Unit, BTU). Kuvassa hinnat on ilmaistu vuoden 2020 euroina per litra. Nimelliset hinnat on käännetty reaalisiksi vuotuisen tukkuhintaindeksin avulla. Datan lähde: Det Norske Veritas.

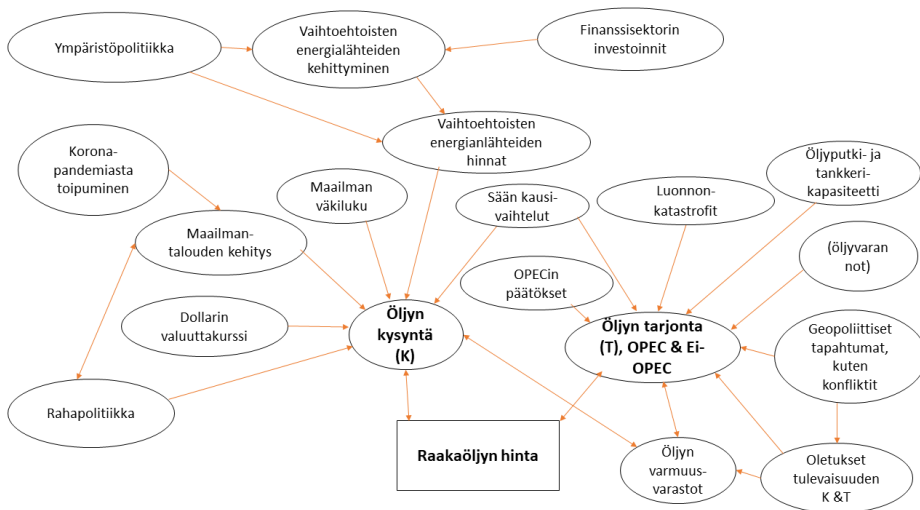
Kuvasta 2 näkyy, että 0.1MGO:n hinta on ollut alimmillaan 0,25 euroa ja enimmillään 0,47 euroa litraa kohti. Alhaisin IFO380:n litrahinta on puolestaan ollut 0,15 euroa ja korkein hinta 0,33 euroa. Keskiarvo MGO:n litrahinnalle on kyseisinä vuosina ollut 0,38 euroa ja IFO:lle vastaavasti 0,26 euroa. Polttoainetyyppi MGO on siis ollut kauttaaltaan kalliimpaa kuin IFO, mitä kuva 2 havainnollistaa. Myös Stefanakos ja Schinas (2014, 178) vahvistavat kevyempien polttoöljyjen yleisesti korkeamman hintatason raskaisiin polttoöljyihin verrattuna. Pääsyy tähän on kevyempien polttoöljyjen korkeampi jalostusaste, jolloin niiden hyödynnettävyys on laajempi ja tämän seurauksena kysyntä markkinoilla kovempaa, mikä nostaa hintatasoa. Lisäksi jalostaminen tuottaa aina lisää tuotantomääriä öljy-yhtiöille.

Kuvasta 1 puolestaan näkyy, että IFO380 on ollut jopa Brent-öljyalaatua halvempaa vuosina 1999–2019, ja vuonna 2019–2020 se on ollut melko samanhintaista kuin öljy. Tämä johtuu siitä, että IFO raskaana residuaalipolttoöljynä on öljynjalostuksen sivutuote, jolloin sen kysyntä polttoainemarkkinoilla on moniin korkeampijalosteisiin polttoaineisiin verrattuna vähäistä. Residuaalipolttoöljyt kuuluvat öljynjalostuksen vähiten arvokkaisiin tuotteisiin: tuotantomääriin verrattuna suhteellisen vähäisen kysynnän vuoksi öljy-yhtiöiden on yleensä

kannattavampaa muuttaa nämä tuotteet rahaksi halvemmalla hinnalla, sillä muussa tapauksessa yhtiöillä olisi hallussaan merkittävästi öljyiseksi jätteen luokiteltavaa sivutuotetta, jonka hävittäminen asianmukaisesti olisi kallista.

## Öljyn hintaan vaikuttavia tekijöitä

Öljymarkkinat ovat äärimmäisen volatiilit, mikä tekee öljyn hintojen ennustamisesta vaikeaa (Patel & Shah 2021, 1–16; Miao ym. 2017, 82–85). Öljymarkkinoiden volatiilisuus liittyy siihen, että lyhyellä aikavälillä öljyllä on matala kysynnän ja tarjonnan hintajousto (U.S. Energy Information Administration [Eia] s.a.). Hintajousto kuvaa sitä, miten kysyntä tai tarjonta muuttuu, kun hyödykkeen hinta muuttuu. Toisin sanoen öljyn kysyntä tai tarjonta ei lyhyellä aikavälillä juuri muutu hinnan noustessa tai laskiessa. Öljyn hinta muodostuu muiden hyödykkeiden tapaan kysynnän ja tarjonnan tasapainosta. Kysyntään ja tarjontaan vaikuttavat puolestaan lukuisat tekijät, joita havainnollistaa kuva 3. Tässä luvussa avataan kuvassa 3 esitettyjen muuttujien merkitystä öljyn kysyntään ja tarjontaan.



**Kuva 3.** Öljyn hinta muodostuu kysynnästä ja tarjonnasta, joihin puolestaan vaikuttavat lukuisat muut tekijät.

OPEC on öljynviejäm maiden järjestö (engl. Organization of the Petroleum Exporting Countries), jonka tarjontapäätöksillä on merkittävä vaikutus öljyn kokonaistarjontaan (Eia s.a.). OPEC:iin kuuluu 13 öljyntuottajamaata (Algeria, Angola, Gabon, Irak, Iran, Kongon tasavalta, Kuwait, Libya, Nigeria, Päiväntasaajan Guinea, Saudi-Arabia, Venezuela, Yhdistyneet

arabiemiirikunnat). Näistä merkittäviä öljyvaltioita ovat Venezuela, Nigeria, Libya sekä järjestön Lähi-idän maat. (OPEC 2022.) OPECin merkitys öljymarkkinoilla on vuosien varrella vähentynyt, kun järjestöön kuulumattomat maat ovat alkaneet tuottaa huomattavia määriä öljyä. Esimerkiksi Yhdysvaltojen liuskeöljytuotannosta on tullut 2010-luvulla globaalisti merkittävä öljyntuotantomuoto (Kilian 2015). Lisäksi Venäjä on ollut merkittävä öljyntuottajamaa. Tosin sen asema globaaleilla öljymarkkinoilla on ollut muutoksessa siitä lähtien, kun Venäjälle on asetettu merkittäviä talouspakotteita sen hyökättyä Ukrainaan vuonna 2022.

OPEC on kuitenkin edelleen huomattava toimija öljymarkkinoilla: sen osuus maailman öljyntuotannosta on noin 40 prosenttia, ja osuus globaalista viennistä on noin 60 prosenttia. Suuren markkinaosuutensa vuoksi järjestö pystyy vaikuttamaan öljyn hintoihin tuotantopäätöksillään. Kartellimaisesti toimiva OPEC pyrkiikin säätelemään hintoja siten, että jäsenmaat sopivat etukäteen öljyn tuotantotavoitteista. (Eia s.a.) Kun tuotantoa rajoitetaan, öljyn hinta pysyy keinotekoisesti korkeammalla kuin mitä se olisi ilman etukäteen sovittuja tuotantomääriä. Toisaalta OPECin täytyy varoa, etteivät sen tuotantopäätökset aiheuta liian suurta hinnannousua. Pidemmällä aikavälillä tämä lisäisi kannustimia siirtyä korvaaviin energianlähteisiin, mikä puolestaan vähentäisi öljyn kysyntää. Lisäksi kartellia on vaikea ylläpitää, sillä sen jäsenillä on taloudellinen kannustin poiketa tuotantosopimuksista. Tämä on näkynyt välillä myös OPECissa, kun yksittäiset jäsenmaat ovat tuottaneet öljyä enemmän kuin on sovittu (Eia s.a.) lisäten näin omia voittojaan.

Öljyntuottajat, jotka eivät kuulu OPECiin, ovat puolestaan hinnantottajia öljymarkkinoilla, eli ne eivät voi säädellä hintoja tuotantopäätöksillään. Siksi OPECiin kuulumattomien öljyntuottajien tarjonta reagoi öljyn markkinahintoihin, minkä vuoksi ne pyrkivät yleensä toimimaan lähes täydellä tuotantokapasiteetilla. (Eia s.a.)

Kysynnän ollessa korkealla lyhyen aikavälin tarjonta riippuu myös öljyputki- ja tankkerikapasiteetista. Tätä kapasiteettia ei voi hetkessä lisätä vastaamaan kasvaneeseen kysyntään. Lyhyellä aikavälillä tämä nostaa öljyn hintaa muiden tekijöiden pysyessä samana. Pidemmällä aikavälillä kapasiteettia voidaan lisätä, mikäli öljyn hinta pysyy korkealla. (Barsky ja Kilian 2004, 115–118.) Barsky ja Kilian (2004, 131) mukaan lyhyellä aikavälillä öljyn tarjonta riippuu öljyputki- ja tankkerikapasiteetista vähintään yhtä paljon kuin öljyvarannoista. Mielenkiintoisena esimerkkinä tähän liittyen voidaan pitää keväällä 2020 COVID-pandemian seurauksena syntyneitä nopeaa kysynnän vähenemistä, jolloin raakaöljyn hinta laski hetkellisesti negatiiviseksi: koska tuotanto ei välittömästi sopeutunut laskeneeseen kysyntään ja edellä mainittu varastointikapasiteetti oli rajallinen, tuottajien kannatti hetkellisesti jopa maksaa ostajille siitä, että ne suostuisivat vielä ottamaan vastaan öljyä ”vielä löytyviin varastoihinsa”, kuten esimerkiksi tankkereihinsa.

Öllyvarannolla tarkoitetaan jäljellä olevia öljyn löydettyjä ja löytämättömiä esiintymiä. Siten öljyn tarjontaan vaikuttaa lyhyellä aikavälillä myös öljyvarantojen määrä (Barsky ja Kilian 2004, 131). Teoriassa tämän pitäisi vaikuttaa öljyn tarjontaan myös pitkällä aikavälillä, sillä öljy on uusiutumaton luonnonvara. Öljyvarantojen on kuitenkin arvioitu riittävän seuraaviksi vuosikymmeniksi, minkä vuoksi niiden määrän ei arvioida rajoittavan tarjontaa lähivuosikymmeninä (Sunı 2007; Worldometer s.a.). Siksi kuvassa 3 tarjontaan vaikuttava tekijä ”öllyvarannot” on laitettu sulkuihin. Toisaalta öljyn hintataso vaikuttaa myös siihen, kuinka kannattavaa varantojen hyödyntäminen on: Hinnan ollessa alhainen taloudellisesti on usein järkevintä hyödyntää neitseellisiä öljyvarantoja. Sitä vastoin hinnan pysyessä korkealla voi olla kannattavaa ottaa käyttöön myös sellaisia lähteitä, joiden öljypitoisuus on alhaisempi. Tämän seurauksena tarjonta lisääntyy, mutta vaadittujen investointien takia tämä takaisinkytkentä tapahtuu hitaasti.

Sään kausivaihtelut ja luonnonkatastrofit voivat vaikuttaa merkittävästi öljyn kysynnän ja tarjonnan tasapainoon lyhyellä aikavälillä. Öljyntuotantoalueilla tapahtuvat luonnonkatastrofit, kuten hurrikaanit, voivat vähentää öljyntuotantokapasiteettia. Tämä vähentää tarjontaa ja siten nostaa öljyn hintaa. (Eia s.a.) Sääolosuhteet voivat puolestaan vaikuttaa sekä tarjontaan että kysyntään: äärimmäisen kylmä ilma voi aiheuttaa häiriöitä öljyn tuotantoon (Eia 2022). Toisaalta kylmät talvet myös lisäävät lämmitysöljyn kysyntää, mikä osaltaan nostaa öljyn hintoja (Eia s.a.).

Monet valtiot, joilla on öljyvarantoja, ovat poliittisesti epävakaita. Tämän vuoksi geopoliittiset tapahtumat ovat tärkeä tekijä öljyn hinnan muodostumisessa. Miao ym. (2017, 78) havaitsivat tutkimuksessaan, että terroristi-iskuilla Pohjois-Afrikassa ja Lähi-Idässä oli vaikutusta öljyn hintaan. Kirjallisuudessa esitetään kuitenkin ristiriitaisia selityksiä siitä, mistä geopoliittisten tapahtumien vaikutus hintaan johtuu. USA:n energiaviraston (U.S Energy Information Administration s.a.) mukaan geopoliittiset tapahtumat OPEC-maissa ovat historian saatossa vähentäneet öljyn tarjontaa. Barsky ja Kilian (2004, 119-121) mukaan vaikutus öljyn hintaan tapahtuu ennemminkin kysynnän kuin tarjonnan kautta. Kysynnän lisääntyminen puolestaan aiheutuu siitä, että geopoliittiset tapahtumat lisäävät oletuksia siitä, että tarjonta vähenisi lähitulevaisuudessa. Tämä kannustaa öljyn varastointiin, sillä tarjonnan väheneminen nostaisi hintoja. (Barsky & Kilian 2004, 124–125.) Kuvassa 3 geopoliittiset tapahtumat on merkitty vaikuttamaan öljyn hintaan sekä tarjonnan kautta suoraan että välillisesti kysynnän kautta.

Oletukset tulevaisuuden kysynnästä ja tarjonnasta riippuvat geopoliittisten tapahtumien lisäksi myös siitä, miten talouden ennustetaan kehittyvän (Eia s.a.). Tämä johtuu taloudellisen toiminnan vaikutuksesta öljyn kysyntään, mitä käsitellään myöhemmin tässä

luvussa. Oletukset tulevaisuuden kysynnästä ja tarjonnasta heijastuvat puolestaan OPECin tuotantopäätöksiin ja siten öljyn tarjontaan (Eia s.a.). Oletuksilla ei välttämättä ole välitöntä vaikutusta OPECiin kuulumattomien öljytuottajien tarjontaan, koska ne eivät pyri säätelemään öljyn hintaa vaan reagoivat siihen. Oletuksiin kysynnästä ja tarjonnasta vaikuttavat myös muut tekijät, joita ei tässä raportissa käsitellä. Kuvaan 3 ei ole myöskään merkitty oletuksia talouden kehityksestä erillisenä tekijänä, jotta kuva pysyisi selkeänä.

Öljyn varmuusvarastot (engl. oil inventories tai oil stocks) ovat fyysisiä raakaöljyn varastoja, jotka on sijoitettu maanpinnalle. Niiden tarkoitus on tasapainottaa öljyn tarjontaa sekä kysyntää ja siten vähentää öljyn hinnan heilahteluja. Kun öljyn kysyntä ylittää tarjonnan, öljyä voidaan vapauttaa käyttöön varastoista. Tarjonnan ylittäessä kysynnän öljyä voidaan puolestaan varastoida käytettäväksi tulevaisuudessa. Toisaalta varmuusvarastoja täytettäessä öljyn kysyntä lisääntyy. Täten öljyn kysyntä ja tarjonta vaikuttavat varmuusvarastoihin, mutta myös varmuusvarastot vaikuttavat tarjontaan ja kysyntään. Tätä molemminpuolista vaikutusta havainnollistetaan kaksisuuntaisilla nuolilla kuvassa 3.

Kirjallisuudessa korostuu usein maailman taloudellisen tilanteen merkitys öljymarkkinoilla (ks. esim. Chai ym. 2018, 281; Kilian 2014, 134–136; Miao ym. 2017, 79–80). Taloudellinen tilanne vaikuttaa luonnollisesti esimerkiksi energian ja öljypohjaisten polttoaineiden kysyntään, jolla puolestaan on suuri merkitys öljyn kysynnälle. Tulevaisuudessa etenkin OECD-järjestöön kuulumattomien valtioiden talouskasvulla on suuri merkitys öljymarkkinoilla, sillä näiden maiden öljyn kulutus on lisääntynyt viime vuosina voimakkaasti. (Eia s.a.; Kansainvälinen energiajärjestö [International Energy Agency, IEA] 2021a.) Näiden maiden tärkeys tulevaisuuden öljymarkkinoilla johtuu osin myös siitä, että maat ovat riippuvaisempia öljystä kuin OECD-maat. Myös väestönkasvu on nopeaa monissa OECD-järjestön ulkopuolisissa maissa, mikä voi lisätä maiden energian kulutusta tulevaisuudessa. (Eia s.a.) Öljyn kysyntään vaikuttaa yleisemminkin maailman väkiluku, joka on esitetty omana tekijänä kuvassa 3.

Maailmantalouden kehitykseen vaikuttavat luonnollisesti lukuisat tekijät, joista suurinta osaa ei tässä raportissa käsitellä. Kuvassa 3 on kuitenkin esitetty omana tekijänä koronapandemiasta toipuminen. Asia on ajankohtainen, sillä lähivuosina maailmantalouden kehitykseen vaikuttaa se, miten nopeasti maailma toipuu koronapandemiasta (Maailmanpankki 2021). Myös koronan takia määrätyt matkustusrajoitukset ovat vähentäneet öljypohjaisten polttoaineiden kysyntää pandemian aikana. Tätä raporttia kirjoittaessa, kesällä 2022, matkustusrajoitukset ovat kuitenkin monissa maissa jo poistuneet. Joka tapauksessa globaalien talouden toipuminen pandemiasta vie aikaa, ja tätä kehitystä on vaikea ennustaa.



Myös rahapolitiikalla on yhteys maailmantalouden tilaan, mutta toisaalta talouden tila vaikuttaa rahapolitiikkaan. Öljyn kysyntään puolestaan vaikuttaa rahapolitiikka: matalat korot lisäävät likvidin rahan määrää taloudessa, mikä lisää öljyn kysyntää, kun taas korkeat korot vähentävät sitä. (Jurvakainen 2008, 35–37.)

Chai ym. (2018, 281) korostavat dollarin valuuttakurssin merkitystä öljymarkkinoilla. Öljykauppaa käydään Yhdysvaltain dollareissa, joten dollarin kurssi vaikuttaa öljyn suhteelliseen hintaan USA:n ulkopuolella. Heikko Yhdysvaltain dollari voi lisätä öljyn kysyntää muualla, mikä puolestaan lisää painetta öljyn hintojen nousemiselle. (Eia s.a.) Yhdysvaltain energiaministeriön (s.a.) mukaan valuuttakurssin merkitys öljyn kysyntään on kuitenkin vaihdellut aikojen saatossa.

Öljy on monikäyttöinen raaka-aine ja energianlähde, jossa on energiaa tiiviissä muodossa. Huolimatta suurista hintavaihteluistaan se on edullinen verrattuna moniin vaihtoehtoisiin energianlähteisiin. Maailmantalouden riippuvuus öljystä syntyykin siitä, että kilpailukykyisiä vaihtoehtoja ei ole vielä tarjolla riittävästi kaikkiin tarpeisiin. Tästä johtuu öljyn matala kysynnän hintajousto.

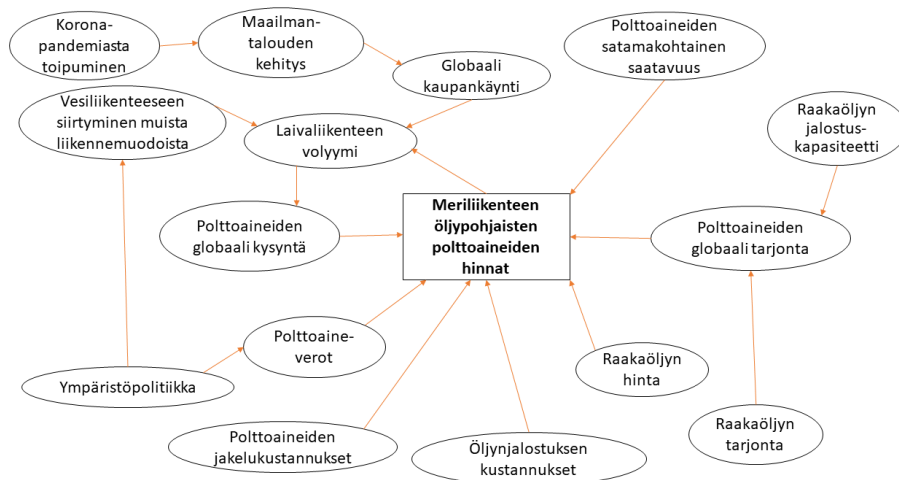
Riippuvuutta öljystä vähentäisi vaihtoehtoisten energianlähteiden kehittyminen, jota voidaan merkittävästi edistää ympäristöpolitiikalla. Muun muassa Kansainvälinen energiajärjestö (IEA 2021a) korostaa, että ympäristöpoliittisilla toimilla on tulevaisuudessa merkittävä rooli öljyn hinnan kehityksessä. Päästökauppa ja fossiilisten polttoaineiden verotus lisäävät uusiutumattomien energianlähteiden hintaa suhteessa vähäpäästöisiin vaihtoehtoihinsa. Esimerkiksi merenkulkuun lähivuosina ulotettava EU:n päästökauppa lisää taloudellisia kannustimia siirtyä vähäpäästöisiin polttoaineisiin laivaliikenteessä. Ympäristöä koskevalla sääntelyllä voidaan myös suoraan lisätä uusiutuvien energianlähteiden tarjontaa, mikä laskee näiden hintoja. Toisaalta poliittisilla toimenpiteillä voidaan ylläpitää riippuvuutta öljystä: monissa maissa öljypohjaiset tuotteet saavat erilaisia valtiontukia, mikä pitää näiden tuotteiden hintoja keinotekoisena alhaisina (Eia, s.a.) Tällainen poliittinen tuki voi olla myös epäsuoraa.

Vaihtoehtoisten energianlähteiden kehitys riippuu myös finanssisektorista eli siitä, mihin yksityisellä sektorilla investoidaan. Erään kansalaisjärjestöjen tuottaman raportin mukaan 35 yksityistä pankkia ympäri maailmaa tarjosi fossiilille energianlähteille lainaa ja vakuutus sopimuksia noin 2,7 biljoonan dollarin arvosta vuosina 2016–2019 (Banking on Climate Change, 2020, 4). On selvää, että tämä rahamäärä on edistänyt fossiilisten energianlähteiden kannattavuutta, ja toisaalta samalla summalla olisi vaihtoehtoisesti voitu tukea vähäpäästöisiä energianlähteitä.

Kukin tässä raportissa esitellyistä muuttujista vaikuttaa öljyn kysyntään tai tarjontaan ja siten hintaan. Näiden tekijöiden tulevaisuuden kehitystä on vaikea ennustaa. Vaikka öljyn tarjonta ja kysyntä ovat lyhyellä aikavälillä melko joustamattomia, reagoivat ne jonkin verran öljyn hintaan myös lyhyellä tähtämellä. Pidemmällä aikavälillä on selvää, että öljyn hinta vaikuttaa sen kysyntään ja tarjontaan. Tätä molemminpuolista vaikutusta hinnan, kysynnän ja tarjonnan välillä havainnollistetaan kuvassa 3 kaksisuuntaisella nuolella.

## Muita polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä

Laivaliikenteen öljypohjaisten polttoaineiden hintatasoon vaikuttavat monet tekijät raakaöljyn hinnan ohella. Kuva 4 havainnollistaa näitä tekijöitä. Tässä luvussa käsitellään, miten kuvassa olevat muuttujat vaikuttavat polttoaineiden hintatasoon.



**Kuva 4.** Meriliikenteen öljypohjaisten polttoaineiden hintoihin vaikuttavia tekijöitä.

Raakaöljyn tarjonta vaikuttaa öljypohjaisten polttoaineiden tarjontaan (Stefanakos & Schinas 2014, 177-180), jolla puolestaan on vaikutusta polttoaineiden hintoihin. Lisäksi raakaöljyn tarjonta vaikuttaa polttoaineiden hintoihin epäsuorasti raakaöljyn hinnan kautta, mitä on käsitelty tarkemmin raportin aiemmissa luvuissa. Toinen tärkeä tekijä, joka vaikuttaa polttoaineiden globaaliin tarjontaan, on raakaöljyn jalostuskapasiteetti (Stefanakos & Schinas 2014, 179). Jalostuskapasiteetin taso voi laskea tai nostaa merenkulun polttoaineiden hintoja tarjonnan kautta. Esimerkiksi jos muiden öljytuotteiden kysyntä kasvaa ja jalostuskapasiteettia on riittävästi, residuaalipolttoaineiden hinnat voivat laskea. Tämä

johtuu siitä, että raakaöljyä jalostetaan tällöin muihin tarpeisiin, mistä syntyy sivutuotteena vähemmän arvostettua residuaalipolttoainetta. Tällainen tilanne ei silti välttämättä laske enemmän jalostettujen polttoaineiden (MGO ja MDO) hintoja. Tällöin hintaero residuaalipolttoaineiden ja MGO:n välillä voi kasvaa. Jos taas jalostuskapasiteetti ei pysty vastaamaan öljytuotteiden kysyntään, residuaalipolttoaineiden hinnat voivat nousta muiden öljytuotteiden hintojen ohella.

Laivaliikenteen polttoaineiden hintoihin vaikuttaa myös niiden kysyntä, jota on yleisesti pidetty melko joustamattomana. Kysynnän alhainen hintajousto johtuu vaihtoehtoisten polttoaineiden puutteesta. (Stefanakos & Schinas 2014, 179; Mazraati 2011, 14–16.) Toisaalta korkeat laivaliikenteen polttoaineiden hinnat voivat vähentää ainakin lähimerenkulkua ja sisävesiliikennettä, joita voidaan korvata kumipyörä- ja rautatieliikenteellä. Siten laivaliikenteen polttoaineiden kysyntä voi reagoida hintoihin liikenteen volyymin kautta. Kuvassa 4 tämä suhde on esitetty polttoaineiden hintamuuttujan ja laivaliikenteen volyymin muuttujan välisellä nuolella. Lisäksi korkeat polttoaineiden hinnat lisäävät taloudellisia kannustimia alusten energiatehokkuuden lisäämiseen ja vaihtoehtoisten energianlähteiden etsimiseen. Vaihtoehtoisten polttoaineiden kehittyminen voi tulevaisuudessa lisätä polttoaineiden kysynnän hintajoustoa. Vaihtoehtojen kehittämistä voidaan edistää myös ympäristösääntelyllä.

Laivaliikenteen volyymiä voidaan niin ikään lisätä ympäristöpolitiikan keinoin. Esimerkiksi Euroopan unioni pyrkii siirtämään kumipyöräliikennettä vesiteille tavoitteenaan vähentää liikenteen kasvihuonekaasupäästöjä (Euroopan komissio s.a.). Toisaalta laivaliikenteen kiristyvät ympäristösäännökset voivat nostaa laivaliikenteen kustannuksia niin, että sen kilpailukyky vähenee suhteessa muihin liikennemuotoihin. Jos näin kävisi, osa laivaliikenteestä voisi siirtyä maanteille ja rautateille. Tämä vähentäisi ainakin jonkin verran laivaliikenteen volyymiä samaan tapaan kuin polttoaineiden hintojen nousu. Toisaalta myös muihin liikennemuotoihin kohdistuu runsaasti ympäristösääntelyä. Esimerkiksi tieliikenteelle on tulossa oma päästökauppajärjestelmänsä EU:ssa (Euroopan komissio 2021a, 57), ja tieliikenteen polttoaineet ovat monissa maissa melko korkeasti verotettuja.

Laivaliikenteen volyymi on hyvin riippuvainen globaalista kaupankäynnistä, joka puolestaan riippuu maailmantalouden tilasta. Maailmantalouden kehitystä on hyvin vaikea ennakoida. Ajankohtaisuutensa vuoksi koronapandemiasta toipuminen on esitetty kuvassa 4 omana muuttujanaan, joka vaikuttaa maailmantalouden kehitykseen.

Kysynnän ja tarjonnan tasapainon lisäksi polttoaineiden hintoihin vaikuttavat esimerkiksi mahdolliset polttoaineverot, joiden tasoon vaikuttaa ympäristöpolitiikka. Merenkulussa

käytettävä polttoaine on kuitenkin toistaiseksi kokonaan verovapaata muun muassa EU:ssa (Euroopan komissio 2021b). Verottomuus lisää polttoaineiden hintojen korrelaatiota raakaöljyn hinnan kanssa. Tästä huomauttaa myös Notteboom (2011 66–68), jonka mukaan meriliikenteen polttoaineiden hinnat seuraavat raakaöljyn hintoja huomattavasti enemmän kuin maantieliikenteen dieselöljyn hinnat. Tämä johtuu maantieliikenteen polttoaineiden korkeasta verotuksesta (Notteboom 2011, 79–83).

Kansainvälisessä merenkulkujärjestö IMO:ssa on vuosien varrella keskusteltu veron asettamisesta meriliikenteen öljypohjaisille polttoaineille. Keskustelu ei ole kuitenkaan edennyt konkreettial tasolle. Euroopan Unioni aikoo puolestaan lähivuosina asettaa minimiveron laivaliikenteen fossiilille polttoaineille (Euroopan komissio 2021b). Vero lisäisi fossiilisten polttoaineiden hintoja, mikä puolestaan kannustaisi laivayhtiöitä siirtymään vähäpäästöisempien polttoaineiden käyttöön. Vähäpäästöisten polttoaineiden kysynnän kasvaessa myös niiden tarjonta voisi lisääntyä. Polttoainevero vähentäisi korrelaatiota raakaöljyn hintojen kanssa. Siksi ainakaan EU:n alueella raakaöljyn hinta ei tulevaisuudessa enää indikoisi laivaliikenteen polttoaineiden hintoja aivan yhtä hyvin kuin ennen. Tosin korrelaation muutos riippuu veron suuruudesta: mitä isompi vero olisi, sitä vähemmän hinnat korreloisivat raakaöljyn hinnan kanssa.

Polttoaineiden hinnoista puhuttaessa on hyvä huomioida, että merenkulku on siirtymässä Euroopan Unionin päästökauppaan lähivuosina. Päästöoikeuksien hinta ei suoraan vaikuta polttoaineiden hintoihin päinvastoin kuin polttoaineverot, koska päästökaupan kustannus syntyy vasta aiheutettujen päästöjen myötä. Päästökauppa tekee kuitenkin fossiilisista polttoaineista suhteellisesti kalliimpia verrattuna vähäpäästöisiin polttoaineisiin. Päästökauppa ja sen vaikutusta merenkulkuun käsitellään tarkemmin loppuraportin artikkelissa “Euroopan unionin tavoitteet”.

Myös öljynjalostuksen kustannukset vaikuttavat meriliikenteen polttoaineiden hintoihin. Kuten raportissa on aiemmin todettu, polttoainetyyppien jalostusasteet vaihtelevat, minkä vuoksi myös jalostuksen kustannukset eroavat toisistaan. Polttoaineiden hintoihin vaikuttavat niin ikään jakelukustannukset. Polttoaineiden tuotantoketjussa raakaöljy on kuljetettava öljynjalostamoon, josta jalostettu polttoaine kuljetetaan satamiin ja muihin bunkrauskohteisiin. Mitä kauempana nämä kohteet ovat toisistaan, sitä korkeammaksi jakelukustannukset muodostuvat. (Clipper Oil 2017.)

Lopuksi on huomattava, että polttoaineiden hinnat voivat vaihdella merkittävästi eri satamien välillä (esim. Plum ym. 2014, 131–133; Chen ym. 2022, 5; Açık & Doymuş, 2022, 7–8). Merkittävimmät bunkraamiseen käytetyt satamat ovat Singaporen, Rotterdamin,

Fujairahin ja Houstonin satamat, ja ne määrittelevät polttoaineiden hinnat lähellään olevissa bunkrauskohteissa (Stefanakos & Schinas 2014, 178). Satamakohtaiset hinnat riippuvat polttoaineiden paikallisesta saatavuudesta, johon puolestaan vaikuttaa satamakohtainen tarjonnan ja kysynnän tasapaino (Besbes & Savin 2009, 694–711). Tasapaino vaihtelee ajan myötä, minkä vuoksi hintaerot satamien välillä voivat vaihdella jopa päivittäin (Plum ym. 2014, 132). Tarjonta satamassa riippuu muun muassa öljyn jalostuskapasiteetista (Lam ym. 2011, 176–203). Laivaliikenteen määrä satamassa on puolestaan merkittävin satamakohtaiseen kysyntään vaikuttava tekijä (Stefanakos & Schinas 2014, 179). Siten kysyntään ja tarjontaan vaikuttavat pitkälti samat seikat niin satamakohtaisesti kuin globaalistikin. Satamakohtaisiin hintoihin vaikuttavat myös jakelukustannukset. Satamakohtaisten hintojen vaikutus polttoaineiden loppuhintaan on huomattavasti vähäisempi kuin esimerkiksi raakaöljyn hinnan merkitys (Besbes & Savin 2009, 194–711). Tekijä on kuitenkin hyvä huomioida pohdittaessa polttoaineiden hintojen muodostumista.

## Pohdintaa laivapolttoaineiden hintojen kehityksestä

Laivaliikenteen polttoaineiden hintojen kehitystä on vaikea ennustaa. Ennustamista vaikeuttavat lukuisat polttoaineiden hintoihin vaikuttavat tekijät, kuten raakaöljyn hinta ja maailmantalous, jotka voivat kehittyä arvaamattomasti tulevaisuudessa (ks. kuva 4 polttoaineiden hintoihin vaikuttavista tekijöistä). Kirjallisuudesta löytyy kuitenkin tulevaisuuden hinnoille joitakin estimaatteja. Tässä luvussa esitellään estimaatteja ja tarkastellaan niitä esimerkiksi historiallisten hintojen valossa. Lisäksi pohditaan sitä, miten öljytuotteiden kysyntä voisi kehittyä tulevaisuudessa.

### Estimaatteja polttoaineiden tulevaisuuden hinnoille

Taulukossa 1 on esitetty kirjallisuudesta löydettyjä arvioita polttoaineiden tulevaisuuden hinnoille. Koska taulukossa annetut luvut ovat estimaatteja, on lukuihin suhtauduttava varauksella. Vuosi 2050 on pitkä aikaväli, jonne ennustaminen on hyvin vaikeaa. Myös vuoteen 2030 eli keskipitkälle aikavälille ulottuviin ennusteisiin liittyy monia epävarmuuksia. Estimaattien tarkoitus onkin vain antaa osviittaa mahdollisesta hintakehityksestä.

**Taulukko 1.** Kirjallisuuslähteiden estimaatteja residuaalipolttoaineen (HFO/VLSFO) ja kevyemmän polttoöljyn (MGO) tulevaisuuden hinnoille.

Polttoainetyypit	Hintaennusteet (per tonni polttoainetta*) vuosille 2030 ja 2050					
	2030				2050	
Residuaalipolttoaine (HFO/VLSFO)	375 <sup>1</sup>	370 <sup>2</sup> (matala)	530 <sup>2</sup> (keski)	690 <sup>2</sup> (korkea)	375 <sup>1</sup>	500 <sup>3**</sup>
MGO		560 <sup>2</sup> (matala)	885 <sup>2</sup> (keski)	1210 <sup>2</sup> (korkea)	600 <sup>3**</sup>	

Lähteet: <sup>1</sup>IMO (2020) ; <sup>2</sup>Åström ym. 2018; <sup>3</sup>Det Norske Veritas (DNV) 2021.

\*Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO ja DNV ovat ilmaisseet hinnat dollareissa ja Åström euroissa. Raportin kirjoitushetkellä, vuonna 2022, dollari on suurin piirtein yksi euro. Täten hintaestimaattien suuruusluokkia voi hyvin vertailla, vaikka hinnat ovat eri valuutassa. Tulevaisuuden valuuttakursseja on joka tapauksessa mahdoton ennustaa.

\*\*Taulukossa esitetyt Det Norske Veritasin estimoimat hinnat on alun perin ilmaistu gigajouleissa (GJ), kun taas Åström ja IMO ovat ilmaisseet hinnat tonnia kohti. Jotta eri hintaestimaatteja voidaan vertailla, on Det Norske Veritasin ilmoittamat hinnat käännetty ilmaisemaan tonnikohtaisia hintoja. Muuntosuhteena tonnin ja gigajoulen välillä on käytetty British Petroleumin (2021) ilmoittamia kertoimia residuaalipolttoöljylle ja dieselöljylle (MGO).

Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) hintaennuste vuodelle 2030 perustuu Maailmanpankin hintaestimaatteihin (engl. World Bank Commodity Markets Outlook) vuodelta 2020. Det Norske Veritasin estimaateissa on puolestaan arvioitu polttoaineiden tulevaisuuden tuotantokustannuksia ja lisätty siihen arvioidut jakelukustannukset. Tuotantokustannusten estimointia varten on arvioitu raaka-aineen eli raakaöljyn tulevaisuuden hintoja sekä polttoaineen jalostuskustannuksia. (Det Norske Veritas 2021.)

Åström ym. (2018, 223-236) ovat tehneet polttoaineiden hinnoille kolme eri skenaariota, jotka ovat matala hinta, keskitason hinta ja korkea hinta. Åström ym. (2018, 227) perustavat estimaattinsa Tanskan merenkulkuviranomaisen (engl. Danish Maritime Authority) arvioihin. Tanskan merenkulkuviranomaisen arvioissa residuaalipolttoaineen hinnoille on käytetty estimaatteja öljyn tulevaisuuden hinnoista hyödyntäen tietoa residuaalin ja raakaöljyn hintojen välisestä korrelaatiosta. MGO:n hintaennusteissa on puolestaan käytetty residuaalipolttoaineen ja MGO:n välistä korrelaatiota kuitenkin siten, että MGO on vähintään 1,5 kertaa kalliimpaa kuin raskas polttoöljy. (Danish Maritime Authority 2012.)

Kansainvälisen merenkulkujärjestön arvio (IMO 2020, 232) residuaalipolttoaineen hinnasta vuonna 2030 vastaa Åström ym. (2018, 231–233) matalan hintaskenaarion arviota. Yksinkertaistuksen vuoksi IMO on pitänyt hintaestimaatit vakiona vuosille 2030 ja 2050 (IMO 2020, 232–235). Yksinkertaistuksen takia IMO:n vuoden 2050 hintaennuste ei välttämättä toimi kovin relevanttina estimaattina. Toisaalta on mahdollista, että residuaalipolttoaineen hinta pysyy samalla tasolla vuoteen 2050 asti. Syitä mataliin hintoihin voivat olla esimerkiksi alhainen raakaöljyn hinta tai alhainen kysyntä, joka olisi tarjontaa vähäisempää. Det Norske Veritas (2021) puolestaan ennustaa residuaalipolttoaineen hinnaksi 500 dollaria tonnilta, mikä olisi noin satakolmekymmentä dollaria enemmän kuin IMO:n arvio. Toisaalta voidaan ajatella, ettei tällainen poikkeama hintaestimaateissa ole tavaton huomioiden, että vuoden 2050 ennusteet ovat joka tapauksessa hyvin epävarmoja. Det Norske Veritasin estimaatti vuodelle 2050 vastaa Åström ym. (2018, 227) keskitason hinta-arviota vuodelle 2030.

Taulukon 1 kirjallisuuslähteistä vain Åström ym. (2018, 231–234) ennustavat MGO:n hintoja vuodelle 2030. Estimaattien hintahaarukka on laaja vaihdellen 560 eurosta 1200 euroon skenaariosta riippuen. Vuodelle 2050 MGO:n hintoja ennustaa puolestaan vain Det Norske Veritas, jonka hinta-arvio 600 dollarista on lähimpänä Åströmin matalinta hintaskenaariota vuodelle 2030. MGO:n hintaestimaatit ovat kauttaaltaan korkeampia kuin residuaalipolttoaineiden hintaestimaatit, mikä heijastelee sitä, että MGO on aina ollut residuaalipolttoainetta kalliimpaa.

Hintaennusteille voi saada vertailukohtaa hintahistoriasta. Taulukko 2 esittää polttoaineiden hintojen keskiarvot sekä minimi- ja maksimi-arvot eri ajanjaksoina. Taulukossa on esitetty arvot pitkältä aikaväliltä vuosilta 1999–2020. Tämä ajanjakso kattaa monia geopolittisia ja taloudellisia tapahtumia. Lisäksi taulukossa on esitetty erikseen arvot viime vuosikymmeneltä eli vuosilta 2011–2020 sekä vuoden 2022 alusta elokuuhun asti.

**Taulukko 2.** Taulukko esittää hintojen keskiarvot, minimihinnat ja maksimihinnat kahdelle eri polttoaineelle eri ajanjaksoina.

Polttoainetyypit	1999–2020 <sup>1</sup> (€/ton)			2011–2020 (€/ton) <sup>1</sup>			2022 <sup>2</sup> (tammi-elokuu) (\$/ton)*		
	Ka	Min	Max	Ka	Min	Max	Ka	Min	Max
IFO380 (residuaali)	270	150 (v.2015)	340 (v.2012)	300	-"	-"	650	480	770
MGO	450	290 (v.1999)	560 (2008)	460	330 (v.2015)	510 (2012)	1100	720	1400

Datan lähteet: <sup>1</sup>Det Norske Veritas (s.a.), <sup>2</sup>Ship & Bunker (2022)

\*Ship & Bunker ilmoittamat arvot on laskettu 20 eri sataman hinnoista kyseisellä aikavälillä.

Taulukosta 2 nähdään, että vuosina 1999–2020 residuaalipolttoaine IFO:n hinta on ollut melko alhainen verrattuna taulukossa 1 esitettyihin estimaatteihin tulevaisuuden hinnoista. Kyseisenä ajanjaksona hintojen keskiarvo on ollut alhaisempi kuin Åströmin (2018, 228) vuoden 2030 hinta-arvio matalimman hinnan skenaariossa. Jopa ajanjakson maksimihinta, joka on osunut vuoteen 2012, on hiukan alhaisempi kuin Åström ym. (2018, 228) alhaisin hinta-arvio. Minimihinta, vuodelta 2015, on alle puolet matalimmasta hinta-arviosta vuodelle 2030. Det Norske Veritasin (2021) 500 dollarin ennuste vuodelle 2050 on puolestaan huomattavasti korkeampi kuin IFO:n hintojen keskiarvo vuosina 1999–2020: hintaero näiden välillä on noin 1,8-kertainen.

Myös MGO näyttää kallistuvan tulevaisuudessa, kun verrataan taulukon 2 historiallisia hintoja ja taulukon 1 hintaennusteita. Vuosien 1999–2020 hintojen keskiarvo on matalampi kuin vuoden 2030 alhaisin hinta-arvio, joka puolestaan on hiukan alhaisempi kuin Det Norske Veritasin hinta-arvio vuodelle 2050. Lisäksi matalin hintaennuste on yli 1,5-kertainen verrattuna MGO:n hintahistorian minimiarvoon. Hintahistorian maksimiarvo, 560 euroa, puolestaan vastaa Åström ym. (2018, 228) alhaisinta hintaestimaattia. Siten maksimiarvo on myös samaa suuruusluokkaa kuin Det Norske Veritasin (2021) estimaatti vuodelle 2050.

Taulukosta 2 näkyy myös, että vuonna 2022 polttoaineiden hinnat ovat olleet huomattavan korkeat verrattuna aiempiin vuosiin. Poikkeuksellinen hintojen nousu johtuu maailmalla ja etenkin Euroopassa vallitsevasta energiakriisistä, jonka merkittävin aiheuttaja on Venäjän hyökkäys Ukrainaan helmikuussa 2022. IFO:n hintojen keskiarvo vuodelta 2022 on lähellä Åström ym. (2018, 228) korkeinta hinta-arviota vuodelle 2030. Vuoden 2022 maksimihinta ylittää korkeimmatkin hintaennusteet. IFO:n minimihinta on puolestaan hyvin lähellä Det Norske Veritasin vuoden 2050 hinta-arviota, joka on samaa suuruusluokkaa kuin Åström ym. (2018, 228) keskitason estimaatti vuodelle 2030. Myös MGO:n hintojen keskiarvo vuodelta 2022 lähestyy Åström ym. (2018, 228) korkeinta hinta-arviota vuodelle 2030. MGO:n enimmäishinta vuonna 2022 ylittää korkeimmat hintaennusteet melko reilusti. Minimihinta puolestaan asettuu vuodelle 2030 tehtyjen matalan ja keskitason hintaskenaarioiden väliin. Vähimmäishinta ylittää vuoden 2050 estimaatin noin sadalla dollarilla.

Jos kirjallisuudessa esitettyjen hintaennusteiden suuruusluokka pitäisi paikkansa, öljypohjaisten polttoaineiden hinnat siis nousisivat parin viime vuosikymmenen takaisista hinnoista. Vuoteen 2022 nähden hintataso pysyisi puolestaan suurin piirtein samana tai laskisi vuoteen 2030 tai 2050 mennessä. Kuluvan vuoden hintapiikit antavat osviittaa siitä, miten vaikeaa polttoaineiden hintojen ennustaminen on. Poikkeamat ennusteiden ja historian välillä eivät kuitenkaan tarkoita sitä, että hintaennusteet olisivat epärealistisia.



Hintaestimaattien taustalla ovat ennusteet raakaöljyn hintakehityksestä ja öljypohjaisten polttoaineiden kysynnästä ja tarjonnasta. Seuraavissa kappaleissa pohditaan, miten öljytuotteiden kysyntä voisi kehittyä tulevaisuudessa ja miten kysynnän kehitys voisi heijastua laivaliikenteen polttoaineiden hintoihin.

## Öljytuotteiden kysynnän mahdollinen kehittyminen

Kansainvälinen energiajärjestö esittelee World Energy Outlook -raportissaan erilaisia skenaarioita siitä, miten öljyn kysyntä voisi kehittyä vuoteen 2050 mennessä (Kansainvälinen energiajärjestö [IEA] 2021a). Skenaarioissa globaalinen ympäristöpolitiikan taso vaihtelee. Kunnianhimoisimmassa NZE-skenaariossa (Net Zero Emissions by 2050) globaali energisektori saavuttaa nettonollapäästöt vuoteen 2050 mennessä. Tämä skenaario on IEA:n mukaan mahdollinen, mutta sen toteutuminen vaatisi nykyiseen verrattuna huomattavasti tiukempaa ympäristöpolitiikkaa. Keskitason APS-skenaariossa (Announced Pledges Scenario) puolestaan kaikki tähän asti sovitut ilmastositoumukset toteutettaisiin kokonaisuudessaan ja sovitussa aikataulussa. Tämän skenaarion toteutuminen ei siis edellytä uusia ilmastotavoitteita. Jo sovittujen tavoitteiden saavuttaminen vaatii kuitenkin enemmän konkreettisia toimenpiteitä kuin mitä vuoteen 2021 mennessä on tehty. STEPS-niminen skenaario (Stated Policies Scenario) kuvastaa jo toteutettuja ja kehitteillä olevia ympäristöpoliittisia toimenpiteitä. Jälkimmäiseen luokkaan kuuluvat muun muassa EU:n Fit For 55 -paketin kehitteillä olevat toimenpiteet. (IEA 2021a.) Tämä skenaario heijastelee siis nykyistä ympäristöpolitiikan tasoa.

STEPS-skenaariossa öljyn kulutus lisääntyy aina 2030-luvun puoliväliin asti. Skenaariossa ympäristöpoliittiset toimenpiteet ovat liian vähäisiä estämään öljyn kysynnän kasvun, jonka syynä on esimerkiksi kehittyvien maiden kasvava energiantarve. Kysynnän kasvaminen johtaa öljyn hintojen nousuun. Kulutushuipun jälkeen öljyn kysyntä alkaa vähentyä hyvin hitaasti vuoteen 2050 asti. Kysynnän väheneminen hidastaa öljyn hintojen nousua, vaikka energiajärjestö ennakoikin hintojen kasvavan hieman vielä vuodesta 2030 vuoteen 2050. (IEA 2021a.) Lienee todennäköistä, että STEPS-skenaariossa laivaliikenteen öljypohjaisten polttoaineiden hinnat nousevat raakaöljyn hinnannousun myötä. Tämä tukee edellä esitettyjä ennusteita, joiden mukaan tulevaisuudessa laivaliikenteen polttoaineiden hinnat nousisivat viime vuosikymmenien takaisista hinnoista.

APS-skenaariossa öljyn kulutus saavuttaa huippunsa pian vuoden 2025 jälkeen. Tästä eteenpäin öljyn kulutus vähenee miljoonalla barreililla päivässä (mb/d) vuoteen 2050 asti. Kysynnän vähetessä myös öljyn hinnat alkavat laskea. NZE-skenaariossa öljyn kulutus laskee viidesosalla jo vuosina 2020–2030. Vuosina 2030–2050 kulutus vähenee noin 5 pro-

sentilla vuosittain. Öljyn hintataso on matalampi kuin muissa skenaarioissa vähäisemmän kysynnän takia: STEPS-skenaarion hintataso on yli kaksinkertainen, ja APS-skenaarion hintataso lähes kaksinkertainen NZE-skenaarion tasoon verrattuna. (IEA 2021a.) Pelkästään öljyn hintojen perusteella näyttää siltä, että laivaliikenteen polttoaineet olisivat kalleimpia STEPS-skenaariossa ja halvimpia NZE-skenaariossa. NZE-skenaariossa polttoaineiden hinnat voisivat vastata esimerkiksi matalinta hintaestimaattia vuodelle 2030, koska Åström ym. (2018, 228) eri hintatasojen estimaattien perusteena on käytetty öljyn hintaennusteita. Toisaalta polttoaineiden hintojen ennustaminen ei ole näin suoraviivaista johtuen muiden hintoihin vaikuttavien tekijöiden takia. On huomioitava, että myös öljyn hintakehitystä on hyvin vaikea ennakoida. Kansainvälinen energiajärjestö korostaakin, etteivät sen esitellämät skenaariot ole ennusteita vaan mahdollisia vaihtoehtoisia ”versioita tulevaisuudesta” (IEA 2021a, 94). Kansainvälinen energiajärjestö ei ota kantaa skenaarioiden toteutumisen todennäköisyyteen.

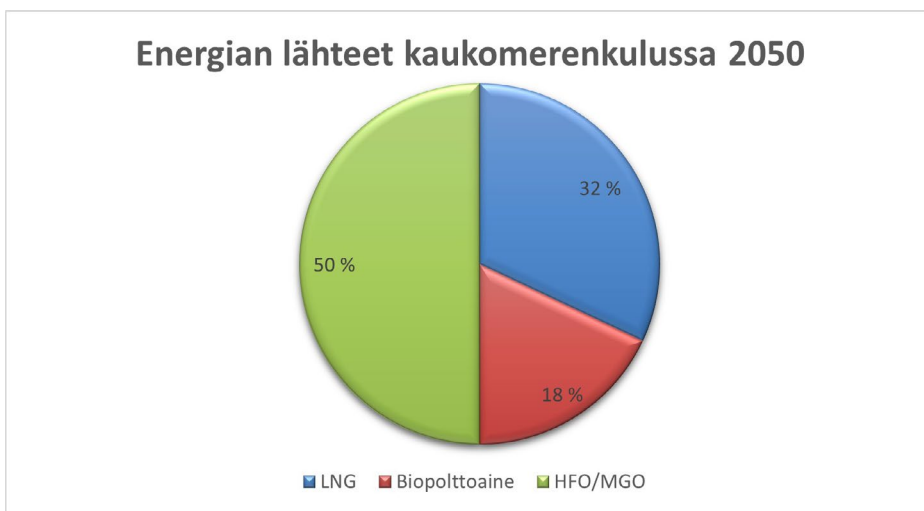
Yhtäältä öljypohjaisten polttoaineiden hinnat voisivat myös laskea pitkällä aikavälillä, jos niiden kysyntä vähenisi merkittävästi ennen tarjonnan vähenemistä. Kysyntä voisi vähentyä merkittävästi esimerkiksi sellaisen mullistavan teknologisen innovaation myötä, joka mahdollistaisi laivaliikenteen siirtyvän laajamittaisesti pois öljypohjaisten polttoaineiden käytöstä. Residuaalipolttoaineiden tarjonta voisi pysyä samalla tasolla kuin ennen, jos muiden sektorien öljyn kysyntä ylläpitäisi öljyn ja siten myös sivuvirtana muodostuvan residuaalin tuotantoa. Toisaalta MGO:n ja MDO:n kohdalla tarjonta voisi helpommin vastata suoraan kysyntään, koska nämä polttoaineet ovat erillisiä öljytuotteita eivätkä tuotannon sivuvirtoja.

Kirjallisuuden valossa näyttää kuitenkin todennäköisemmältä, että maantieliikenteen ja teollisuuden öljyriippuvuus vähenee nopeammin kuin laivaliikenteen öljyriippuvuus. Esimerkiksi Kansainvälisen energiajärjestön STEPS- ja APS-skenaarioissa laiva- ja lentoliikenteen öljyn kysyntä kasvaa merkittävästi muodostaen suurimman osan öljyn kokonaiskysynnän kasvusta. STEPS-skenaariossa kysyntä kasvaa 5 miljoonalla ja APS-skenaariossa 4 miljoonalla barrelilla per päivä vuoteen 2030 asti. NZE-skenaariossa lento- ja laivaliikenteen öljypohjaisten polttoaineiden kulutus pysyy samana vuosina 2020–2030. (IEA 2021a.) APS- ja NZE-skenaarioissa, joissa öljyn kysyntä laskee monella muulla sektorilla, voisi kysymykseksi laivaliikenteessä muodostua residuaalipolttoaineen tarjonta. Muiden öljytuotteiden tuotannon väheneminen nimittäin vähentää öljynjalostuksen sivutuotteiden, kuten residuaalipolttoaineiden, tuotantoa. Jos tuotanto ei enää vastaisi laivaliikenteen kysyntää, residuaalipolttoaineet, kuten IFO, kallistuisivat nykyisestä. Toisaalta kovan kysynnän myötä residuaalipolttoaineista voisi tulla myös öljyn tuotannon päätuote. Tällöinkin hinnat oletettavasti kallistuisivat nykyisestä, koska residuaalin edullisuus perustuu parhaillaan siihen, että se on öljynjalostuksen sivutuote. Tällainen kehityskulku on siis yksi tekijöistä,

jotka voivat nostaa polttoaineiden hintoja APS- ja NZE-skenaarioissa, vaikka pelkkien öljyn hintojen perusteella polttoaineiden hinnat näyttävät korkeimmilta STEPS-skenaariossa. Toisaalta MGO:n ja muiden kevyempien polttoöljyjen hintoihin sivuvirtojen vähenemisellä ei välttämättä olisi vaikutusta.

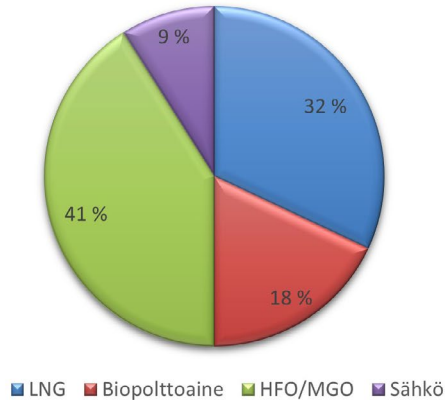
Öljypohjaisten polttoaineiden ennustetaankin pysyvän laivaliikenteen pääasiallisena energianlähteenä vuoteen 2030 asti (Safety4Sea, 2022). Myös Kansainvälinen Energiajärjestö (2021b) ennustaa vähähiilisten ja nollapäästöisten polttoaineiden kulutuksen laivaliikenteessä pysyvän marginaalisena jopa vuoteen 2050 asti. Järjestö arvioi, että nykyisellä ympäristöpolitiikalla vaihtoehtoiset polttoaineet muodostavat laivaliikenteen energiankulutuksesta noin kaksi prosenttia vuoteen 2030 mennessä ja viisi prosenttia vuoteen 2050 mennessä. (IEA 2021b.) Toisaalta laivaliikenteen ympäristösääntely saattaa kiristyä tulevaisuudessa, mikä voisi lisätä vaihtoehtoisien polttoaineiden osuutta huomattavasti Kansainvälisen energiajärjestön arviosta.

Det Norske Veritasin arvio vuodelta 2017 poikkeaa Kansainvälisen energiajärjestön ennusteesta. Det Norske Veritas arvioi, että biopolttoaineet muodostaisivat 18 prosenttia merenkulun energianlähteistä vuonna 2050 (DNV GL 2017). Nesteytetyn maakaasun osuus tässä arvioissa on runsaat 30 prosenttia. Osuus on merkittävä huomioiden, että vuonna 2022 LNG:n osuus globaalin merenkulun käyttämisestä polttoaineista on hyvin vähäinen (Zincir 2022, 18148-18149). Det Norske Veritasin (2017) arvioissa vajaa 10 prosenttia lähimerenkulun käyttämästä energiasta tuotettaisiin sähköllä vuonna 2050. Sähkön tuotannon päästöt tosin riippuvat siitä, miten sähkö on tuotettu. Loput energiasta saataisiin HFO:n ja MGO:n käytöstä (DNV GL 2017). Kuvat 5 ja 6 havainnollistavat Det Norske Veritasin (2017) arvioita.



**Kuva 5.** Arvio pitkän matkan merenkulun käyttämisestä energian lähteistä vuonna 2050. Datan lähde: DNV GL (2017).

## Energian lähteet lähimerenkulussa 2050



**Kuva 6.** Arvio lähimerenkulun käyttämistä energian lähteistä vuonna 2050. Datan lähde: DNV GL (2017).

## Johtopäätökset

Polttoainekulut muodostavat huomattavan osan alusten operointikustannuksista, minkä vuoksi polttoainekulujen hillitseminen on laivayhtiöille tärkeää. Laivaliikenteen öljypohjaisien polttoaineiden hintoihin vaikuttavat monet tekijät, joiden kehitystä on vaikea ennakoida. Eräs merkittävä tekijä on raakaöljyn hinta, joka on vaihdellut historian saatossa voimakkaasti. Raakaöljyn hinnan heilahtelut tekevät myös polttoaineiden hinnoista volatiileja, ja hinnat ovatkin vaihdelleet vuosien varrella huomattavasti. Näistä syistä polttoaineiden tulevaisuuden hintakehitystä on hyvin vaikea ennustaa.

Lisäksi polttoaineiden hintoihin vaikuttavat kysynnän ja tarjonnan tasapaino. Laivaliikenne on toistaiseksi pysynyt hyvin riippuvaisena öljypohjaisista polttoaineista, mikä johtuu tarjolla olevien vaihtoehtojen puutteesta. Vaihtoehtoisten energianlähteiden kehittyminen voi tulevaisuudessa vähentää öljypohjaisien polttoaineiden kysyntää. On kuitenkin vaikea arvioida, millä tahdilla vaihtoehtoiset energianlähteet kehittyvät tulevaisuudessa. Kirjallisuuden valossa näyttää siltä, että muut sektorit saattavat irtautua öljyn käytöstä laivaliikennettä aiemmin. Toisaalta laivaliikenteen ympäristösääntelyn kiristyessä ja teknologian kehittyessä vaihtoehtoisten, kustannustehokkaiden, energianlähteiden saatavuus voi myös parantua oletettua nopeammin. Ainakin EU:n alueella vähäpäästöiset polttoaineet muuttunevat aiempaa kannattavammiksi lähitulevaisuudessa, kun merenkulku siirtyy EU:n päästökauppaan ja merenkulun fossiilisille polttoaineille asetetaan minimivero.

## LÄHTEET

Açık, A. 2022. The Price Behavior of the MGO Bunker Market: An Integrated Causality and Interpretive Structural Modeling Approach. *Maritime Technology and Research*, 4(2), article 25251.

Banking on Climate Change. s.a. Fossil Fuel Finance Report 2020. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.bankingonclimatechaos.org/wp-content/uploads/2021/10/Banking\\_on\\_Climate\\_Change\\_\\_2020\\_vF.pdf](http://www.bankingonclimatechaos.org/wp-content/uploads/2021/10/Banking_on_Climate_Change__2020_vF.pdf)

Barsky, R. B., Kilian, L. 2004. Oil and the macroeconomy since the 1970s. *Journal of Economic Perspectives*, 18(4), 115–134.

Besbes, O., Savin, S. 2009. Going bunkers: The joint route selection and refueling problem. *Manufacturing & Service Operations Management*, 11(4), 694–711.

British Petroleum. 2021. Approximate conversion factors – Statistical Review of World Energy. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-approximate-conversion-factors.pdf](http://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2022-approximate-conversion-factors.pdf)

Chai, J., Lu, Q., Hu, Y., Wang, S., Lai, K.K., Liu, H. 2018. Analysis and Bayes statistical probability inference of crude oil price change point. *Technological Forecasting and Social Change*, 126, 271–283.

Chen, Y., Lu, J., Ma, M. 2022. How Does Oil Future Price Imply Bunker Price — Cointegration and Prediction Analysis. *Energies*, 15(10), article 3630.

Clipper Oil. 2017. Factors Affecting Marine Diesel Fuel Prices Online. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.clipperoil.com/factors-affecting-marine-diesel-fuel-prices-online/#:~:text=The%20price%20of%20crude%20oil,marine%20diesel%20fuel%20prices%20online](http://www.clipperoil.com/factors-affecting-marine-diesel-fuel-prices-online/#:~:text=The%20price%20of%20crude%20oil,marine%20diesel%20fuel%20prices%20online)

Danish Maritime Authority. 2012. North European LNG Infrastructure Project – A feasibility study for an LNG filling station infrastructure and test of recommendations. Full report. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.academia.edu/3044301/Danish\\_Maritime\\_Authority\\_North\\_European\\_LNG](http://www.academia.edu/3044301/Danish_Maritime_Authority_North_European_LNG)

De, A., Choudhary, A., Turkey, M., Tiwari, M. K. 2021. Bunkering policies for a fuel bunker management problem for liner shipping networks. *European Journal of Operational Research*, 289(3), 927–939.

Det Norske Veritas s.a. Current price development oil and gas. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html](http://www.dnv.com/maritime/insights/topics/lng-as-marine-fuel/current-price-development-oil-and-gas.html)

Det Norske Veritas. 2021. Maritime Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2021. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [eto.dnv.com/2021/maritime-forecast-2050/about](http://eto.dnv.com/2021/maritime-forecast-2050/about)

DNV GL. 2017. Maritime Forecast to 2050 - Energy Transition Outlook 2017. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.turunmessukeskus.fi/wp-content/uploads/David-Wendel-DNVGL-Energy-Outlook-2050\\_kokoustitila-4.pdf](http://www.turunmessukeskus.fi/wp-content/uploads/David-Wendel-DNVGL-Energy-Outlook-2050_kokoustitila-4.pdf)

Euroopan komissio s.a. Future-proofing European inland waterway transport - NAIADES III action plan. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-iii-action-plan\\_en](http://transport.ec.europa.eu/transport-modes/inland-waterways/promotion-inland-waterway-transport/naiades-iii-action-plan_en)

Euroopan komissio. 2021a. Proposal for a DIRECTIVE OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Directive 2003/87/EC establishing a system for greenhouse gas emission allowance trading within the Union, Decision (EU) 2015/1814 concerning the establishment and operation of a market stability reserve for the Union greenhouse gas emission trading scheme and Regulation (EU) 2015/757. 2021/0211 (COD).

Euroopan komissio. 2021b. Revision of the Energy Taxation Directive (ETD): Questions and Answers. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda\\_21\\_3662](http://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/qanda_21_3662)

Han, T.C., Wang, C.M. 2021. Shipping bunker cost risk assessment and management during the coronavirus oil shock. *Sustainability*, 13(9), article 4998.

International Maritime Organization IMO. 2020. Fourth IMO Greenhouse Gas Study. IMO: London.

Jurvakainen, J. 2008. Raakaöljymarkkinoiden volatiilisyyden syyt. Tampere: Tampereen yliopisto, taloustieteiden laitos.

Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency, IEA). 2021a. World Energy Outlook. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2021\\_5880a2eb-en](http://www.oecd-ilibrary.org/energy/world-energy-outlook-2021_5880a2eb-en)

Kansainvälinen energiajärjestö (International Energy Agency, IEA). 2021b. International shipping. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.iea.org/reports/international-shipping](http://www.iea.org/reports/international-shipping)

Kilian, L. 2014. Oil price shocks: Causes and consequences. *Annual Review of Resource Economics*, 6(1), 133–154.

Kilian, L. 2015. How the shale oil revolution has affected US oil and gasoline prices. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [cepr.org/voxeu/columns/how-shale-oil-revolution-has-affected-us-oil-and-gasoline-prices](http://cepr.org/voxeu/columns/how-shale-oil-revolution-has-affected-us-oil-and-gasoline-prices)

Lam, J. S. L., Chen, D., Cheng, F., Wong, K. 2011. Assessment of the competitiveness of ports as bunkering hubs: empirical studies on Singapore and Shanghai. *Transportation journal*, 50(2), 176–203.

Maaailmanpankki. 2021. The Global Economy: on Track for Strong but Uneven Growth as COVID-19 Still Weighs. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.worldbank.org/en/news/feature/2021/06/08/the-global-economy-on-track-for-strong-but-uneven-growth-as-covid-19-still-weighs](http://www.worldbank.org/en/news/feature/2021/06/08/the-global-economy-on-track-for-strong-but-uneven-growth-as-covid-19-still-weighs)

Mazraati, M. 2011. Challenges and prospects of international marine bunker fuels demand. *OPEC Energy Review*, 35(1), 1–26.

McKinsey s.a. Energy Insights. Residual fuel oil. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.mckinseyenergyinsights.com/resources/refinery-reference-desk/residual-fuel-oil/](http://www.mckinseyenergyinsights.com/resources/refinery-reference-desk/residual-fuel-oil/)

Miao, H., Ramchander, S., Wang, T., Yang, D. 2017. Influential factors in crude oil price forecasting. *Energy Economics*, 68, 77–88.

Notteboom, T. 2011. The impact of low sulphur fuel requirements in shipping on the competitiveness of ro-ro shipping in Northern Europe. *WMU Journal of Maritime Affairs*, 10(1), 63–95.

Organization of the Petroleum Exporting Countries. 2022. Member countries. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.opec.org/opec\\_web/en/about\\_us/25.htm](http://www.opec.org/opec_web/en/about_us/25.htm)

Patel, H., Shah, M. 2021. Energy Consumption and Price Forecasting Through Data-Driven Analysis Methods: A Review. *SN Computer Science*, 2(4), 1–16.

Plum, C.E.M., Jensen, P.N., Pisinger, D. 2014. Bunker purchasing with contracts. *Maritime Economics & Logistics*, 16(4), 418–435.

Ranjan, I., Raju, T. B., Jayaraj, R., Dutta, K. 2018. Understanding volatility and leverage effects in bunker markets. *International Journal of Global Energy Issues*, 41(1-4), 158–175.

Safety4sea. 2022. Report: Fossil fuel-based bunkers demand to be strong until 2050. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [safety4sea.com/report-fossil-fuel-based-bunkers-demand-to-be-strong-until-2050/](https://safety4sea.com/report-fossil-fuel-based-bunkers-demand-to-be-strong-until-2050/)

Ship & Bunker. 2022. Rotterdam Bunker Prices. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO](https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#MGO)

Stefanakos, C.N., Schinas, O. 2014. Forecasting bunker prices; a nonstationary, multivariate methodology. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 38, 177–194.

Suni, P. 2007. Riittääkö öljy ja millä hinnalla. Kansantaloudellinen aikakauskirja, 1, 2007. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.taloustieteellinenyhdistys.fi/images/stories/kak/kak12007/kak12007suni.pdf](http://www.taloustieteellinenyhdistys.fi/images/stories/kak/kak12007/kak12007suni.pdf)

U.S. Energy Information Administration s.a. Energy & Financial Markets. WHAT DRIVES CRUDE OIL PRICES? An analysis of 7 factors that influence oil markets, with chart data updated monthly and quarterly. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/](http://www.eia.gov/finance/markets/crudeoil/)

U.S. Energy Information Administration. 2022. Short-term Energy Outlook. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.eia.gov/outlooks/steo/pdf/steo\\_full.pdf](http://www.eia.gov/outlooks/steo/pdf/steo_full.pdf)

Worldometer s.a. World Oil Reserves. WWW-dokumentti. Viitattu 30.11.2022. Saatavissa: [www.worldometers.info/oil/](http://www.worldometers.info/oil/)



Zincir, B., 2022. Environmental and economic evaluation of ammonia as a fuel for short-sea shipping: A case study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(41), 18148–18168.

Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E. & Holland, M. 2018. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation Research Part D*, 59, 223–236.

# PÄÄSTÖVÄHENNYSTEKNIIKKOIDEN VERTAILU

Elias Altarriba



© Elias Altarriba

## Rikkipesurit

Rikkipesureiden eli scrubberien käyttäminen aluksissa mahdollistaa alueelliset rikkirajat ylittävän polttoöljyn käytön aluksen polttoaineena. Itämeren SECA-säännösten astuttua voimaan vuonna 2015 (rajaksi asetettiin 0,1 prosentin rikkipitoisuus polttoaineessa) varustamot joutuivat tekemään päätöksen joko siirtymisestä vähärikkisiin polttoöljyihin tai vaihtoehtoisesti asennuttamaan aluksiinsa rikkipesurit. Rikkipesurien asennuksen jälkeen liikennöinti rikkirajat ylittävällä polttoaineella on sallittua. Korkearikkinen polttoöljy on halvempaa verrattuna vähärikkisiin vaihtoehtoihin: esimerkiksi korkearikkinen raskas polttoöljy maksaa tonnia kohden noin puolet siitä mitä vähärikkinen kevyt polttoöljy. Alustyyppistä, polttoaineen kulutuksesta, operointiprofilista ja tulorakenteesta riippuu, onko

kannattavampaa investoida rikkipesureihin vai siirtyä käyttämään vähärikkistä polttoöljyä. Itämeren alueella on päädytty molempiin ratkaisuihin. Polttoaineen rikkipitoisuusraja tiukkeni maailmanlaajuisesti 3,5 prosentista 0,5 prosenttiin vuonna 2020. Tämä merkitsee, että rikkipesureiden käyttö on käytännössä tullut pakolliseksi ympäri maailmaa, mikäli halutaan käyttää rikkirajat ylittävää polttoainetta. (Bengtsson et al., 2014, 44–54; Repka et al., 2017, 14 ja 53.)

Rikkipesureiden toiminta-ajatus on suhteellisen yksinkertainen: Moottorilta korsteeniin ahtimien, pakokaasukattiloiden tai muiden apulaitteiden jälkeen johdettavat pakokaasut kulkevat rikkipesurijärjestelmän läpi ennen niiden johtamista ulkoilmaan. Pesureissa rikkiyhdisteet pestään pois pakokaasuista ruiskuttamalla vettä niiden joukkoon. Rikkiyhdisteet reagoivat veden kanssa tehokkaasti, jolloin pakokaasujen rikkipitoisuus laskee sallittuihin rajoihin. Mikään puhdistusjärjestelmä ei kuitenkaan poista rikkiyhdisteitä pakokaasuista täysin. Kuvassa 1 näkyy aluksen korsteenilinjaan asennettu rikkipesurijärjestelmä. (Hansen et al., 2014.)



**Kuva 1.** Rikkipesurijärjestelmä aluksessa. Kuva: Elias Altarriba

Pesuriratkaisuja on kolmea perustyyppiä: Avoimen kierron pesureissa pesuvedenä käytetään merivettä, ja pesutapahtuman jälkeen pesuvedet lasketaan välittömästi mereen. Suljetun kierron pesureissa meriveden ja kaustisen soodan seos reagoi pakokaasujen rikkiyhdisteiden kanssa. Pesuvedet ohjataan tämän jälkeen joko säiliöihin, jotta ne voidaan toimittaa jätevedenkäsittelyyn satamakäyntien yhteydessä, tai vaihtoehtoisesti osa niistä puhdistetaan ja lasketaan mereen. Kolmas perusratkaisu on hybridimalli, joka sisältää teknisesti molemmat pesurivaihtoehdot. Laivaväki voi tällöin valita, kumpaa toimintatapaa pesurissa käytetään. (Lee et al., 2022.)

Pesureissa on oltava rikkipäästöjen ja pesurin toiminnan valvontajärjestelmä, jonka on täytettävä IMO:n vaatimukset ja jolla valvotaan muun muassa SO<sub>2</sub> ja CO<sub>2</sub> -päästöasoja (Mellqvist & Conde, 2021, 4). Avoimen kierron pesureiden osalta myös mereen laskettavien pesuvesien laatua on valvottava jatkuvasti. Lisäksi pesureihin on integroitava erillinen jäähdytysjärjestelmä estämään järjestelmäkomponenttien ylikuumeneminen ja mahdollinen vaurioituminen, mikäli järjestelmä on syystä tai toisesta pois käytöstä operoinnin aikana. Rikkipesurit ovat aluskohtaisesti suhteellisen kallis investointi: kustannuksiin vaikuttaa muun muassa valittu järjestelmäratkaisu, aluksen rakenne ja sen mahdollistamat asennusratkaisut. Uusalusinvestointeja tehtäessä suunnittelijoilla on luonnollisesti enemmän vapautta valita sekä teknisesti että taloudellisesti parhaat konstruktiot rikkipesureiden asennusratkaisujen suhteen. Sitä vastoin jälkiasennuksien osalta tarvittavat muutostyöt ovat aina aluskohtaisia projekteja. Aluksen koneteholla on suora vaikutus pestävien pakokaasujen määrään, mikä edellyttää riittävää kapasiteettia pesurijärjestelmältä. Investointien suuruusluokasta puhuttaessa avoimen kierron pesureiden asennukset asettuvat yleensä 1–2 miljoonan euron suuruusluokkaan alusta kohden (konetehon ollessa alle 10 MW), hybridimallien ja suljettujen kierron järjestelmien ollessa investointikustannuksiltaan noin miljoona euroa tätä kalliimpia (Santalahti, 2017, 6–7, 28 ja 31). Mikäli konetehoa on enemmän tai aluksen konstruktion vuoksi pesureita joudutaan asentamaan useampia, nostaa tämä luonnollisesti kustannuksia. Koko laivaston varustaminen rikkipesureilla on siis monille varustamoille varsin merkittävä kustannuserä. (Andersson et al., 2020, 162–176; Wilewska-Bien et al., 2016, 371–372.)

Rikkipesurijärjestelmä asennetaan korsteeniin, ja jälkiasennusratkaisuissa tilanpuute tuottaa usein haasteita. Korsteenilinja on usein sijoitettu varsin ahtaaseen kuiluun, koska alusta suunniteltaessa ei ole huomioitu pesureiden kaltaisia jälkiasennustarpeita. Alustyyppistä riippuen mahdollisten pakokaasukattiloiden sijainti voi tuottaa ylimääräisiä haasteita vaaditun asennustilan osalta. Lisäksi suljetun kierron järjestelmissä on varattava tankkitilaa pesuvesille ja mahdolliselle puhdistusjärjestelmälle. Järjestelmän muut osat ovat fyysiseltä kooltaan pienempiä, ja niiden sijoittelu on teknisesti yleensä helpommin toteutettavissa.

Järjestelmällä on enemmän tai vähemmän vaikutusta myös aluksen vakavuuteen erityisesti sellaisissa tilanteissa, joissa järjestelmä on sijoitettava korkealle veden pinnasta. Järjestelmän paino on kokoluokasta riippuen yleensä useita kymmeniä tonneja. Vakavuuslaskelmat ja muut asennusratkaisut hyväksytetään luokituslaitoksilla ja aluksen lippuvaltion viranomaisilla. (Paulsrud, 2015, 42.)

Rikkipesurit lisäävät pakokaasujärjestelmän moottorille tuottamaa vastapainetta, mikä heikentää ahtimen toimintaa ja huonontaa moottorin volymetristä hyötysuhdetta. Valmistajat asettavat moottorityypeille suurimmat sallitut vastapaineet, ja niiden ylittyessä on pakokaasujen virtausta tehostettava. Yksi tapa tehostamiseen on asentaa virtausta tehostava puhallin. Puhaltimet tosin vaativat energiaa, mikä väistämättä lisää vähän aluksen polttoaineen kulutusta tuottaen samalla lisää pakokaasupäästöjä. (Lloyd's register, 2012, 14–28.)

Vesikäyttöisen rikkipesurin integrointi katalysaattorijärjestelmään erityisesti jälkiasennusratkaisujen yhteydessä on usein teknisesti haastavaa. Molemmat järjestelmät ovat suurikokoisia ja aluksilla on yleensä hyvin vähän vapaata tilaa. Pesurin läpi kulkevat pakokaasut jäähtyvät, jolloin niiden lämpötila ei enää riitä mahdollistamaan katalyyttisiä reaktioita. Tämä merkitsee, että pakokaasuja tulisi uudelleen lämmittää. Vaihtoehtoisesti katalysaattori olisi sijoitettava korsteenilinjaan ennen pesuria, mutta tuolloin rikkijyhdisteet aiheuttavat yleensä ongelmia katalysaattorille. Sitä vastoin esimerkiksi EGR- tai vesiruiskutusjärjestelmien kanssa pesurit ovat täysin integroitavissa. (Boscarato et al., 2015, 248–257.)

Rikkipesuri-investointi on varustamolle merkittävä linjapäätös, jossa taloudellista hyötyä tavoitellaan hyödyntämällä mahdollisuutta käyttää halvempaa, rikkipitoista polttoainetta (Santalahti, 2017, 6). Mikäli rikkipesurijärjestelmä ei vaadi teknisesti suurempia korjauksia (komponentit ovat varsin ankarissa olosuhteissa kuumien pakokaasujen, suolaisen meriveden ja rikkipitoisten happejen kyllästävässä ympäristössä), on järjestelmä käyttökustannuksiltaan suhteellisen edullinen (Lloyd's register, 2012, 14–28). Tämä pätee erityisesti avoimen kierron pesurien osalta, sillä suljetun kierron pesureiden pesuvesien mahdollinen toimittaminen satamiin puhdistettavana jätevetenä nostaa kustannuksia jätevesien käsittelymaksujen osalta. Joka tapauksessa rikkipesureiden taloudelliset hyödyt verrattuna esimerkiksi vähärikkisen polttoaineen hyödyntämiseen ovat saavutettavissa vasta pidemmällä aikavälillä (Spoof-Tuomi, 2013, 40–41 ja 51–58). Tosin hyödyistä puhuttaessa on syytä muistaa käsitteen suhteellisuus: hyödyistä puhuttaessa verrataan tätä ratkaisua muihin vaatimukset täyttäviin ratkaisuihin, mutta varsinaista rahallista tuottoa varustamolle järjestelmä ei tietenkään tarjoa. Edellä mainituista syistä rikkipesuri-investointi kuitenkin yleensä asemoi varustamon ympäristöpolitiikan polttoainevalintojen osalta vuosiksi eteenpäin.

Hiilidioksidin päästökaupan ehdotettu laajentuminen meriliikenteeseen tai polttoaineiden mahdollisten minimiverotasojen käyttöönotto tuskin suoraan vaikuttaa mitenkään rikkipe- sureiden yleisyyteen. Kuitenkin, polttoaineeseen sidoksissa olevien operointikustannusten kasvaessa, säästöratkaisuja etsitään entistä tarkemmin. Mikäli kevyen polttoöljyn kysyntä ja sen seurauksena myyntihinnat kasvavat suhteessa rikkipitoiseen raskaaseen polttoöljyyn, tukee tämä rikkipesuri-investointien kilpailukykyä muihin ratkaisuihin nähden.



**Kuva 2.** Rikkipesurin läpi kulkenut savukaasu saa suuresta vesihöyrypitoisuudesta johtuen harmaan sävyn. Kuva: Elias Altarriba

## Avoimen kierron pesurit

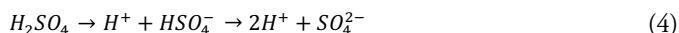
Avoimen kierron pesurit soveltuvat parhaiten avomerikäyttöön, missä veden suolapitoisuus ja emäsisyys on prosessille riittävä. Pakokaasu ohjataan pesukolonneihin, joissa sen sekaan ruiskutetaan merivettä. Kemiallisesti prosessi noudattaa seuraavaa toimintaperiaatetta (Lloyd's register, 2012, liite C; Wilewska-Bien et al., 2016, 371–372; Woodyard & Lartache, 2009, 61–86): Polttoaineen sisältämä rikki palaa moottorissa rikkidioksidiksi ( $\text{SO}_2$ ) ja rikkitrioksidiksi ( $\text{SO}_3$ ). Rikkidioksidi reagoi herkästi veden kanssa, jolloin muodostuu vetyä ja vetysulfittia:



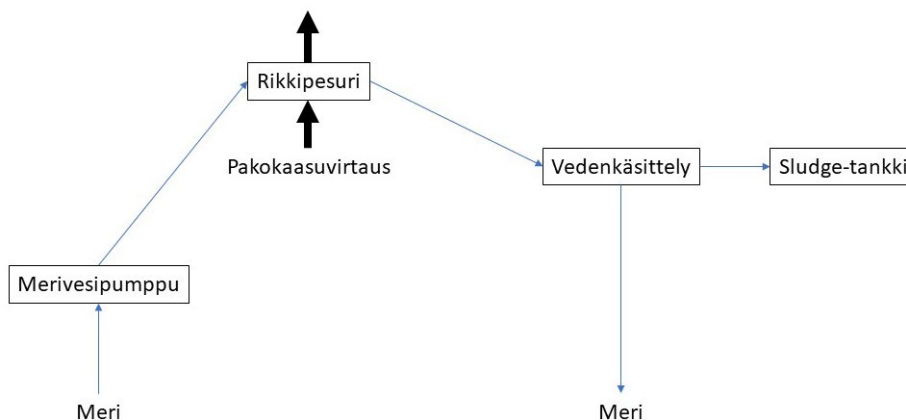
Jatkoreaktio tapahtuu seuraavaa kaavaa noudattamalla:



Muodostunut sulfitti hapettuu, jolloin muodostuu sulfaattia ( $\text{SO}_4$ ). Meriveden alkaliteetti mahdollistaa seuraavat reaktiot:



Meriveden emäksisyys neutraloi molemmat hapot, mutta meriympäristöä happamoitava vaikutus pesuvesillä saattaa silti olla (Comer et al., 2020, 18–29). Tämän vuoksi pesuvesien laskemista luonnonvesiin onkin rajoitettu alueilla, joilla veden vaihtuvuus tai luonnonvesien tilavuus on vähäistä. Pesuvesien lasku luonnonvesiin onkin kielletty monissa satamissa, jokisuistoissa tai sisävesialueilla, jolloin alusten on siirryttävä käyttämään vaihtoehtoista rikkipäästöjen vähennysmenetelmää, kuten vähärikkistä kevyttä polttoöljyä tai suljetun kierron rikkipesurimenetelmää (Osipova et al., 2021, 13–23; Safety4sea, 2021).



**Kuva 3.** Avoimen kierron järjestelmän prosessikaavio

Pakokaasuista pesuvesiin voi irrota myös muita partikkeleita, kuten raskasmetalleja tai polyaromaattisia hiilivetyjä (PAH-yhdisteitä) (Winnes et al., 2020, 1–21). IMO on asettanut rajoituksia pesuvesien sisältämille PAH-pitoisuuksille, pesuvesien pH-arvoille ja partikkelipitoisuuksille (Hassellöv et al., 2020, 24–28; IMO, 2009, liite 9 sivut 15–16). Partikkelipäästöjä monitoroidaan mittaamalla sisään- ja ulosmenevän pesuveden sameuseroa, jonka 15 minuutin keskiarvo ei saa ylittää 25 FNU:ta. Partikkelipäästöjä voidaan vähentää hyödyntämällä järjestelmään mahdollisesti integroitua selkiytystankkia tai hydro sykklonia ja

toimittamalla pesuvedestä erotetut partikkelit jätteenkäsittelyyn satamakäynnin yhteydessä. Pesuvesien happamuustasoa ohjataan säätämällä pesurijärjestelmän läpi ruiskutettua vettä. Pesuveden happamuutta voidaan tarkastella kahdella vaihtoehtoisella tavalla: sisään- ja ulostulevan veden happamuusero ei saa ylittää 2 pH tai vaihtoehtoisesti meriveden pH:n on oltava vähintään 6,5 mitattuna 4 metrin etäisyydellä ulostuloaukosta. Nämä ehdot on esitetty taulukossa 1. Vastaavasti, PAH-yhdisteiden suurimmat sallitut määrät on esitetty taulukossa 2. Suurimmat sallitut pitoisuudet riippuvat pesuveden virtaamasta suhteessa moottorin energiankulutukseen.

**Taulukko 1.** Raja-arvot sameuden ja pH:n osalta. Datan lähde: IMO.

Ehto	Raja-arvo
Sisään- ja ulosmenevän veden sameusero	Alle 25 FNU (15 min keskiarvo)
Sisään- ja ulosmenevän veden pH	Erotus alle 2 pH
Meriveden pH	Vähintään pH 6,5 mitattuna 4 metrin etäisyydellä ulostuloaukosta

**Taulukko 2.** PAH-yhdisteiden raja-arvot verrattuna pesuveden virtaamaan. Datan lähde: IMO

Pesuveden virtaama (t/MWh)	PAH-yhdisteiden pitoisuus (µg/l)
alle 1	2250
2,5	900
5	450
11,25	200
22,5	100
45	50
95	25

Tällä hetkellä avoimen kierron pesurit ovat kiistelty tekninen ratkaisu: pesureihin investoinneet varustamot suosivat lähtökohtaisesti avoimen kierron systeemiä halvempien investointikustannusten (yksinkertaisempi tekniikka) ja edullisempien käyttökustannusten (ei pesuvesien käsittelykustannuksia) takia. Myös hybridimalleja käytetään rajoitusalueiden ulkopuolella usein avoimen kierron tilassa. Pesuvesien määrät ovat suhteellisen suuria. Vaihtelua on jonkin verran pesurijärjestelmien ja asennusratkaisuiden välillä, mutta megawattia kohden virtausmäärät ovat usein 50–60 m<sup>3</sup>/h. Erityisesti tilavuudeltaan vähävetisillä ja tiheästi liikennöidyillä alueilla pesuvesien vaikutus ympäristöön on perusteltu huolenaihe,

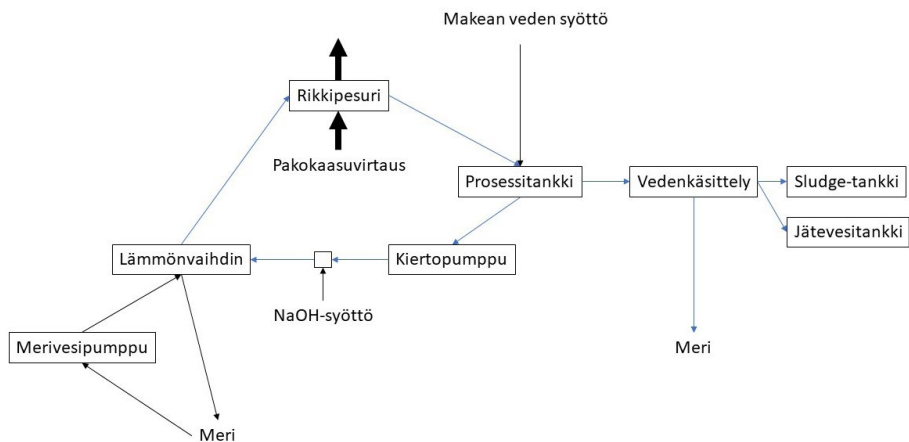


minkä vuoksi alueellisia rajoituksia onkin asetettu. Pesureiden käytön yleistymisen on kuitenkin niin uusi asia, että kansainvälisiä tutkimustuloksia pesuvesien mahdollisista haittavaikutuksista tai pitkäaikaisista vaikutuksista alkaa vasta ilmentyä. Mahdollisia poliittisia päätöksiä avoimen kierron pesureiden tulevaisuuden osalta on kuitenkin haastava ennakoida: yhden näkökannan mukaan avoimen kierron pesurit pitäisi kieltää, siinä missä toiset tahot eivät näe merkittäviä ongelmia ainakaan puhuttaessa pesuvesien laskusta avomerialueille. (Aakko-Saksa et al., 2021, 18–20; Comer et al. 2020, 29–31; Hassellöv et al., 2020, 43–53.)

## Suljetun kierron pesurit

Suljetun kierron pesureissa pesuvesi kiertää järjestelmässä, jolloin meriveden emäksisyys, suolapitoisuus tai lämpötila eivät vaikuta pesurin toimintaan (Paulstrud, 2015, 40–42). Suljetun kierron pesurit soveltuvat tämän vuoksi käytettäväksi matalan emäksisyyden vesialueilla, kuten järvilla, joilla tai vähäsuolaisessa murtovedessä (Andreasen & Mayer, 2007, 3276–3279). Koska pesuvesiä ei ole tarpeen laskea veteen, voidaan järjestelmää käyttää myös pesuvesien laskun rajoitusalueilla. Suljetun kierron pesureissa on oltava vastaavat järjestelmänvalvontatoiminnot kuin avoimen kierron järjestelmissäkin.

Suljetun kierron pesureiden toiminta on esitelty kuvassa 2. Järjestelmäkohtaisia eroavuuksia on, mutta yleisellä tasolla prosessi noudattaa tässä kuvattua toimintaperiaatetta. Suljetun kierron pesureissa pakokaasu ohjataan pesurijärjestelmään avoimen kierron pesureiden tavoin. Pesurissa pakokaasun annetaan reagoida makean veden ja natriumhydroksidin NaOH:n, eli lipeästä muodostuvan seoksen, kanssa. Natriumhydroksidi on vahva emäs, ja sen tehtävänä on neutraloida rikkiyhdisteiden happamuus. Pesuedet ohjataan pesurikolonnista prosessitankkiin, mistä vesi pumpataan uudelleen pesurille natriumhydroksidin annostelujärjestelmän kautta. Järjestelmän makean veden lisäys tapahtuu prosessitankin kautta. (Zannis et al., 2022, 8–18.)

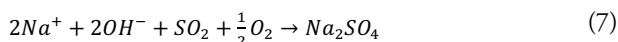
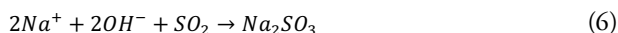
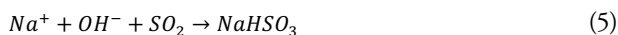


**Kuva 4.** Suljetun kierron järjestelmän prosessikaavio

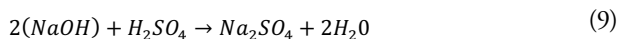
Systeemissä kiertävä vesi lämpenee pakokaasujen vaikutuksesta, minkä vuoksi sitä on jäähdytettävä lämmönvaihtimilla. Lämmönvaihtimet siirtävät lämpöä pesuvedestä meriveteen, mutta eri nestekiertojen välistä aineiden sekoittumista ei tapahdu. Lipeän lisäämisen takia pesuvedeen muodostuu natriumsulfaattia, joka on poistettava järjestelmästä. Muussa tapauksessa natriumsulfaatti kiteytyy putkistoihin aiheuttaen tukkeumia. Herkin komponentti kiteytymille on yleensä lämmönvaihdin. Lisäksi vedenpuhdistamista tarvitaan ehkäisemään pesuvesien kyllästymistä rikkiyhdisteillä ja takaamaan näin järjestelmän kyky pestä rikkiä pois savukaasuista. Vedenpuhdistusjärjestelmän tuottama jätevesi ohjataan erillisiin säiliöihin, joista se toimitetaan satamakäyntien yhteydessä jätteenkäsittelylaitokselle. Jonkin verran puhdistettua vettä voidaan tarvittaessa laskea myös mereen, jolloin pesuvesien vaatimien säiliöiden kapasiteetti kohtuullistuu erityisesti pitkillä legeilla. Pesuveden poisto järjestelmästä on suuruusluokkaa 0,1 m<sup>3</sup>/MWh riippuen kuitenkin konetehosta ja pesurin fyysisestä koosta. Säiliöiden avulla pesuveden laskeminen mereen voidaan kokonaan välttää sellaisilla alueilla, missä se on kiellettyä. Pesuvettä myös höyrystyy pesuvesien reagoiessa kuumien pakokaasujen kanssa, joten veden lisäystarve järjestelmään ei johdu pelkästään vedenkäsittelylaitoksen toiminnasta. Tämän vuoksi moottoreiden kuormitus vaikuttaa jonkin verran vedenlisäystarpeisiin. (Tran, 2017, 1–8; Zannis et al., 2022, 8–18.)

Järjestelmien natriumhydroksidin kulutus vaihtelee polttoaineen rikkipitoisuuden, puhtaustavoitteen ja moottorin kuormituksen suhteen (Lloyd's register, 2012, 20–21). Esimerkiksi Alfa Lavalin mukaan natriumhydroksidin kulutuksen ollessa 15 litraa/MWh (n. 50 % pesuvesiseos) päästään polttoaineen rikkipitoisuuden ollessa 2,7 % pesutulokseen, joka vastaa rikkipitoisuudeltaan 0,1 % polttoaineen käyttöä (Hansen et al., 2014, 16-20). Vastaavasti Langh ilmoittaa natriumhydroksidin kulutuksen olevan 5–6 litraa kerrottuna polttoaineen rikkipitoisuusprosentilla ja kyseisen moottorin tuottamilla megawattitunneilla (Langh tech, 2022, 8).

Suljetun kierron pesureissa natriumhydroksidi reagoi rikkidioksidin kanssa reaktiotuotteiden ollessa natriumsulfittia ja vettä (Andreasen & Mayer, 2007, 1–2; Lloyd's register, 2012, 20–28; Wilewska-Bien et al., 2016, 377; Woodyard & Latache, 2009, 61–86). Reaktioyhtälöt SO<sub>2</sub>:n osalta ovat seuraavat:



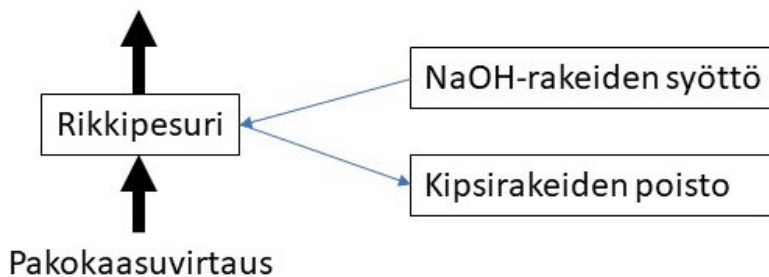
Vastaavasti SO<sub>3</sub> reagoi seuraavasti:



Natriumhydroksidiseosteisen veden tiheys on noin  $1500 \text{ kg/m}^3$  (n. 50 % seossuhde). Koska pesurit joudutaan usein asentamaan aluksen konstruktion takia suhteellisen korkealle veden pinnasta, pyritään pesuveden määrä järjestelmässä minimoimaan, jotta aluksen vakavuus paranisi. Natriumhydroksidi on syövyttävää, minkä vuoksi järjestelmän komponenttien on kestettävä syövyttäviä olosuhteita. Lisäksi aineen optimilämpötila varastoinnissa on  $20\text{--}50 \text{ }^\circ\text{C}$ . Kylmemmissä lämpötiloissa aineen viskositeetti kasvaa nopeasti vaikeuttaen pumpattavuutta, ja tätä kuumemmissa olosuhteissa monien terästen korroosio kiihtyy NaOH:n vaikutuksesta. (Zannis et al., 2022, 4–14).

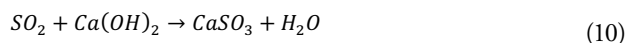
## Kuivapesurit

Kuivapesurit poikkeavat avoimen kierron ja suljetun kierron vesipesureista siten, että niissä ei käytetä lainkaan pesuvettä. Tämän seurauksena myöskään mereen ei voi kulkeutua pesuvesipäästöjä kuivapesureista. Kuivapesurijärjestelmässä pakokaasut johdetaan absorbointiyksikköön, jossa kaasujen sisältämät rikkiyhdisteet reagoivat kalsiumhydroksidirakeiden kanssa. Reaktio vaatii lämpöä, jota saadaan pakokaasuista (toimintalämpötila on yleensä  $250\text{--}450 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Reaktiotuotteena muodostuu kipsiä. Tämän lisäksi järjestelmä vaatii rakeiden syöttöjärjestelmän absorbointiyksikköön ja kipsin poiston yksiköstä. Rakeiden fyysinen koko on tyypillisesti  $2\text{--}8$  millimetriä. Lämpimien pakokaasujen ansiosta järjestelmä voidaan integroida toimimaan yhdessä SCR-katalysaattoreiden kanssa. Kuvassa 5 on esitetty kaaviokuva järjestelmän toimintaperiaatteesta. Lisäksi järjestelmä vaatii valvonta- ja ohjausjärjestelmän märkäpesureiden tavoin. (Lloyd's register, 2012, 26–27; Tran, 2017, 1–8.)

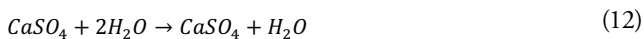


**Kuva 5.** Kuivapesureiden toimintakaavio

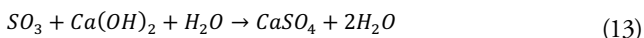
Kuivapesureissa kalsiumhydroksidi reagoi rikkidioksidin kanssa (Lloyd's register, 2012, liite C; Tseng et al., 2010, 109–119), jolloin reaktiotuotteina muodostuu vettä ja kalsiumsulfittia:



Kalsiumsulfitin ja hapen reaktiot tapahtuvat seuraavasti:



Vastaavasti rikkitrioksidin reagoidessa kalsiumhydroksidin kanssa muodostuu kalsiumsulfaattia ja vettä:



Kuivapesuritekniikkaa on käytetty teollisuuslaitoksissa jo kymmeniä vuosia, joten tekniikka on varsin testattua ja toimivaksi havaittua. Meriliikenteessä haasteena on kuitenkin järjestelmän suuri fyysinen koko ja massa. Mikäli tyyppillisen märkäpesurin paino on suuruusluokkaa 40–50 tonnia, on vastaavan kuivapesurin massa helposti lähemmäs 200 tonnia. Lisäksi järjestelmän toiminta edellyttää kalsiumhydroksidirakeiden varastointia ja kiinteiden aineiden siirtojärjestelmiä alukselle. Reaktiotuotteina syntyvät kipsirakeet on myös varastoitava ennen niiden toimittamista satamiin. Nesteiden siirto pumppaamalla on yleensä teknisesti helpompi ratkaisu alusympäristössä verrattuna kiinteiden aineiden siirtimiin, niiden vaatimaan tilaan ja tämän vuoksi kasvaneeseen järjestelmän painoon. Toisaalta kipsiä voidaan hyödyntää materiaalina teollisuudessa toisin kuin märkäpesureiden tuottamia jäteliemiä. (Jafarinejad, 2016, 242-253.)

## Katalysaattorit

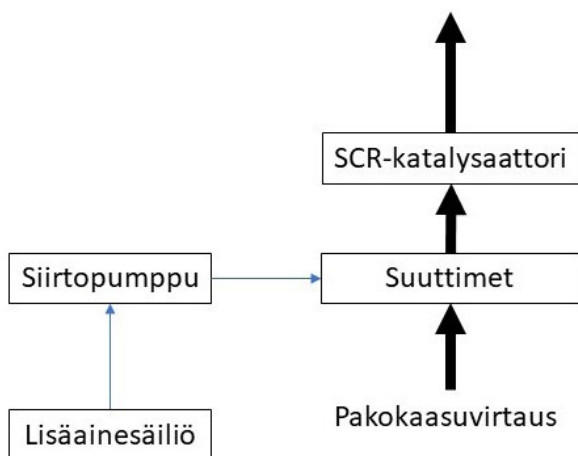
Katalysaattorit ovat tehokas keino vähentää typen oksidien päästöjä, ja parhaimmillaan niillä voidaan saavuttaa jopa 70–90 % vähennystasoja NO<sub>x</sub>-päästöihin (Guo et al., 2015, 941–942; Ni et al., 2020, 1–50). Käytännössä tämä tarkoittaa, että TIER III -vaatimukset on mahdollista täyttää hyvin toimivalla ja oikein mitoitettulla katalysaattorilla (IMO, 2013, 285). Todennäköistä on, että öljypohjaisia polttoaineita käyttävissä aluksissa katalysaattorit ovat tulevaisuudessa tärkein yksittäinen menetelmä typen oksidien päästöjen vähentämiseksi (Deng et al., 2021, 10–15).

Katalysaattorit ovat teknisesti vanha keksintö, ja maantieliikenteessä tämän innovaation toimivuutta on koeteltu jo pidempään. Suurin yksittäinen eroavuus merimoottoreiden katalysaattoreihin on skaala: kymmenientuhansien kilowattien moottoritehon tuottamien pakokaasujen käsittely vaatii kennoston fyysiseltä koolta suuret katalysaattorit, jotka asennetaan aluksen korsteenilinjaan. Suuren kokonsa vuoksi katalysaattorit vaativat tilaa, ja siksi asentaminen alukseen onnistuu parhaiten, kun asia huomioidaan jo alusta suunniteltaessa. Jälkiasennukset ovat myös mahdollisia, mutta vaaditun asennustyön suuruusluokka ja muut

tarvittavat muutokset alukseen ovat hyvin aluskohtaisia. Tämän vuoksi investointikustannukset vaihtelevat merkittävästi ollen kuitenkin aina miljoonaluokkaa. (Choi et al., 2015, 1020–1033; Hirata et al., 2009,1–6; Lamas & Rodríguez, 2012, 77–81)

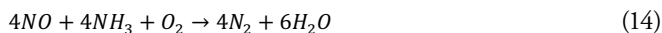
SCR-katalysaattorin (selective catalytic reduction) prosessikaavio on esitetty kuvassa 6 (Deng et al., 2021, 11). Katalysaattorin kennosto asennetaan lähelle moottoria riittävän lämpötilan takaamiseksi kennostossa. Lämpötilan on oltava vähintään 300 °C, mutta yli 500 °C lämpötiloissa katalysaattorin kennosto vaurioituu. Nelitahtisissa moottoreissa tämä lämpötilahaarukka on kaksitahtisia moottoreita helpompi saavuttaa. Mahdolliset hukkalämpöä hyödyntävät järjestelmät, kuten pakokaasukattilat, on syytä sijoittaa vasta katalysaattorin jälkeen. Katalysaattorijärjestelmä on teknisesti sovitettavissa kaksitahti-moottoreihin (Forteinos et al., 2021, 179–193), mutta pakokaasujen riittävän lämpötilan varmistamiseksi se on käytännössä integroitava ahdinjärjestelmän yhteyteen. Käytännössä erityisesti jälkiasennusratkaisuissa tulee ongelmaksi yleensä tilanpuute. Vähärikkisiä polttoaineita käytettäessä voidaan katalysaattoria operoida myös jonkin verran alle 300 °C lämpötiloissa, mutta korkearikkiset polttoaineet aiheuttavat tukkeutumisongelmia rikin kertyessä katalysaattoriin.

Lisäaineena toimiva urea on varastoitu ureasäiliöön, josta urea pumpataan suuttimille. Suuttimien toimintaa ohjataan automaattisesti moottorin kuormitusta ja katalysaattorin tehokkuutta valvomalla. Suuttimet eivät sijaitse kennostossa vaan pakokanavassa riittävän etäällä kennostosta, jotta lisäaine ehtii sekoittua pakokaasuseoksen kanssa. Näiden pääkomponenttien lisäksi järjestelmässä on automaattinen ohjausjärjestelmä. Katalysaattorin tehokkuutta ohjataan ja valvotaan mittaamalla typen oksidien määrää ennen ja jälkeen kennoston. (Hsieh & Wang, 2011, 409–422.)



**Kuva 6.** SCR-katalysaattorin toimintakaavio

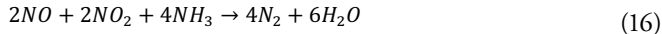
Ilmajlijäämällä toimivissa dieselmootoreissa kolmitoimikatalyysaattoritekniikka ei pelkistä typen oksideita, ja hapetinkatalyysaattorilla saadaan vaikutettua ainoastaan häkä- ja hiilivety päästöihin. SCR-tyyppisissä katalyysaattoreissa reaktio mahdollistetaan käyttämällä lisäaineena ureaa tai ammoniakkia (Wilewska-Bien et al., 2016, 359–364). Merenkulkuratkaisuissa lisäaine on yleensä ureaa, joka reagoi ennen katalyysaattoria muodostaen yhtenä reaktiotuotteena katalyyttiset prosessit käynnistävää ammoniakkia (Ibrahim, 2016, 13–17). Lisäainetta ruiskutetaan pakokaasujen sekaan, ja se reagoi katalyyttinä toimivassa jalometallikennostossa (esim. titaanidioksidi) pelkistäen typen oksideita. Menetelmä hyödyntää myös moottorin jäännöshappea. Reaktiot noudattavat seuraavia yhtälöitä (Lloyd's register, 2012, liite C). Typpimonoksidi reagoi ammoniakkin ja hapen kanssa pelkistystuotteiden ollessa tyyppiä ja vettä:



Vastaavasti typpidioksidin, ammoniakkin ja hapen reaktio tuottaa samoja reaktiotuotteita:



Lisäksi typpimonoksidi, typpidioksidi ja ammoniakki reagoivat seuraavasti:



Reaktioiden tapahtuminen edellyttää riittävän korkeaa lämpötilaa katalyysaattorin kennostossa. Riittävän lämpötilan ylläpito katalyysaattorissa ei yleensä tuota ongelmia, kun operoidaan täydellä tai lähes täydellä kuormalla ja kuormitus pysyy tasaisena pidempiä ajanjaksoja. Sitä vastoin toimittaessa osakuormalla esimerkiksi hitaassa saaristoajossa, vaihtelevalla kuormituksella tapahtuvassa satamaoperoinnissa tai muusta syystä moottoreiden ollessa kevyesti kuormitettuja ei pakokaasujen lämpötila välttämättä riitä pitämään perinteisen SCR-katalyysaattorin kennostoa riittävän lämpimänä pelkistysreaktioiden mahdollistamiseksi. Katalyysaattori voi olla varustettu lisälämmittimillä, jolloin se saadaan nopeammin käyttöön. Mikäli näin ei ole, vaatii katalyysaattorin lämpiäminen usein 30–90 minuuttia moottorin käynnistyksestä laitteiston konstruktioista ja operointiprofilista riippuen. Tämä on katalyysaattorialuksiin liittyvä ympäristöhaaste, sillä juuri näillä alueilla, joilla alukset käynnistetään, myrkyllisten typen oksidien vähentäminen olisi oleellista asutuksen läheisyyden vuoksi. (Cimino et al., 2016, 223–230.)

Katalyysaattori on periaatteessa kestävä järjestelmä. Jalometallikennoston kuluminen on hidasta, tosin tästä huolimatta sitä tapahtuu. Lisäksi pakokaasun sisältämät partikkelit voivat

peittää kennostoa estäen katalyyttisten reaktioiden tapahtumisen. Tämän vuoksi kennoston kennot suunnitellaan vaihdettaviksi ja puhdistettaviksi, ja järjestelmän on mahdollistettava epäpuhtauksien poistaminen kennostosta. Lisäaineen annostelun pettäminen syystä tai toisesta on kuitenkin ehkä järjestelmän yleisimpiä ongelmia: Tukkeutuneet suuttimet eivät ruiskuta pakokaasun sekaan riittävästi lisäainetta, jolloin pelkistysreaktiot jäävät vaillinaisiksi ja typen oksidien päästöt kohoavat. Toisaalta vuotavat suuttimet päästävät läpi joko liikaa lisäainetta tai eivät edesauta ruiskutetun lisäaineen sumuuntumista, jolloin seurauksena on niin ikään heikko puhdistusteho. Näissä tilanteissa myös ammoniakkipäästöt ovat usein lisääntyneet. Tämä on ongelmallista, sillä ammoniakki on ympäristömyrkkyy ja rasittaa liuotusominaisuuksiensa takia tarpeettomasti myös korsteenin rakenteita. (Lisi & Cimino, 2020, 1–24)

Katalyysaattori voidaan kytkeä pois toiminnasta katkaisemalla lisäaineen syöttö. Näissä tilanteissa pakokaasu kulkee kennoston läpi (ellei järjestelmään kuulu ohitusventtiiliä), mutta reaktioita ei tapahdu. Tämä ei kuitenkaan lähtökohtaisesti tuota vahinkoa järjestelmälle. Lisäaineen kulutus on katalyysaattorialuksissa merkittävä yksittäinen lisäkustannus varustamolle. Urean kulutus asettuu usein suuruusluokkaan 15 litraa/MWh (Karvonen et al., 2010, 38–40).

Toimittaessa matalilla katalyyttilämpötiloilla on käytettävä vähärikkistä polttoainetta katalyysaattorivaurioiden estämiseksi. Periaatteessa asia voidaan korjata asentamalla rikkipesuri ennen katalyysaattoria, mutta erityisesti märkäpesureita käytettäessä pakokaasujen lämpötila laskee niin paljon, että niitä on uudelleen lämmitettävä reaktioiden mahdollistamiseksi. Kuitapesurin kanssa tätä ongelmaa ei esiinny. Mikäli käytetään korkearikkistä polttoainetta, voidaan rikkipitoisuudesta aiheutuvia ongelmia ehkäistä huolehtimalla riittävän korkeasta katalyysaattorin toimintalämpötilasta. (Boscarato et al., 2015, 248–257.)

Nesteytettyä maakaasua käyttävissä aluksissa typen oksidipäästöt ovat vähäisiä verrattuna polttoöljykäyttöisiin moottoreihin, jolloin nykyisillä typen oksidien päästösäädöksillä SRC-katalyysaattoreita ei tarvita. Metaanipäästöt ovat kuitenkin ongelmana erityisesti LNG-aluksissa, ja pakokaasujen mukana ilmakehään kulkeutuvaa palamatonta metaania on mahdollista vähentää hapetuskatalyysaattoreilla (Lehtoranta et al., 2020, 1–12). Hapetuskatalyysaattorit ovat teknologisesti vanha keksintö, mutta niiden soveltaminen LNG-aluksissa on ollut vähäistä puuttuneen metaanipäästösääntelyn takia. Hapetuskatalyysaattorissa metaani hapetetaan hiilidioksidiksi ja vedeksi:



Prosessin haasteena on kuitenkin metaanin stabiilius, jolloin katalyyttinen prosessi vaatii paljon energiaa. Prosessiin tarvitaan katalyyttistä riippuen 300–500 °C lämpötilaa. Käytännössä tämä asettaa teknisiä haasteita, sillä pakokaasujen lämpötila jää usein alle 500 °C operoitaessa optimikuormalla. Erityisesti osakuormalla pakokaasujen lämpötila laskee monilla moottorityypeillä lähemmäs 400 °C, ja mikäli katalyysaattoria ei ole sijoitettu pakojärjestelmään välittömästi moottorin jälkeen, ehtivät pakokaasut jäähtyä ennen kulkeutumistaan katalyysaattorille. Mikäli katalyysaattorin tarve huomioidaan siis jo alusta suunniteltaessa, sen optimaaliseen sijoittamiseen on paremmat mahdollisuudet. Mahdollisten jälkiasennusten osalta alustyyppistä riippuu, miten suuria muutoksia optimaalinen asentaminen aluksen rakenteisiin vaatii. Läheskään aina asentaminen ei ole mahdollista ainakaan kohtuullisin kustannuksin. (Worth et al., 2016, 204–214.)

Tilanne ei kuitenkaan koske yksinomaan meriliikennettä, vaan kaasua käytetään polttoaineena yleisesti myös energiateollisuudessa ja maantieliikenteessä, erityisesti paikallisbusseissa. Katalyysaattoritekniikalle, jolla vähennettäisiin metaanipäästöjä, löytyy siis runsaasti sovelluskohteita. Katalyysaattorien valmistamisessa harvinaisten, katalyyttinä toimivien jalometallien saatavuus ja siitä johtuva hintataso tukee osaltaan uusien katalyyttiksi soveltuvien aineiden tutkimista. Palladium-zeoliittimateriaalit muodostavat erittäin aktiivisen materiaalin metaanin hapettamiseksi. Katalyysaattoreissa reaktiokyvyn ja toimintalämpötilan lisäksi katalyyttimateriaalin kestävyys kuitenkin ratkaisee, voidaanko kyseistä tekniikkaa soveltaa käytännössä. Tämä korostuu meriliikenteessä, missä katalyysaattoreiden fyysinen koko ja niiden vaatimat investointi- ja huoltokustannukset eivät saa kasvaa kohtuuttomiksi. (Petrov et al., 2018, 1–8.)

Hapetuskatalyysaattorit ovat herkkiä rikin haittavaikutuksille, mutta LNG-aluksissa tämä ei ole ongelma olettaen, että katalyysaattori voidaan ohittaa operoitaessa kevyellä polttoöljyllä tai käytettäessä ainoastaan vähärikkistä polttoöljyä. Tuotekehitystyötä tehdään tällä hetkellä merkittävästi hapetuskatalyysaattoreiden osalta nimenomaan metaanipäästöjen vähentämiseksi (ClassNK, 2022). Luokituslaitosten hyväksymien lanseerattavien ratkaisujen määrä tulee todennäköisesti lisääntymään nykyisestä lähitulevaisuudessa. Katalyysaattoreiden tehokkuutta osakuormalla operoitaessa tuskin kuitenkaan saadaan optimoitua ainakaan ensimmäisen sukupolven tuoteperheessä. Toki kokonaisuuden tarkasteluun on myös syytä kiinnittää huomiota: osakuormilla operointia pyritään kuitenkin välttämään jo ihan polttoainetaloudellisistakin syistä.



## Pakokaasujen takaisinkierrätys

Pakokaasujen takaisinkierrätysmenetelmässä osa pakokaasuista ohjataan takaisin sylinteriin. Pakokaasujen sisältämä hiilidioksidi nostaa ilmaseoksen ominaislämpökapasiteettia sitoen palotapahtumassa syntyvää lämpöenergiaa. Tämän seurauksena palamislämpötila laskee ja typen oksidien muodostuminen vähenee. Lisäksi ahtoilman hiilidioksidipitoisuus alentaa seoksen happipitoisuutta, mikä hidastaa palotapahtumaa (Sørgard et al., 2001). Ajoneuvotekniikassa EGR-järjestelmät (exhaust gas recirculation) ovat olleet yleinen typen oksidien vähennysmenetelmä 1990-luvulta alkaen, mutta merimoottoreissa EGR on suhteellisen uusi tulokas päästöjen vähennystekniikoiden joukossa. EGR soveltuu hyvin dieselmoottoreihin, ja sitä voidaan pitää primäärisenä päästönhallintakeinona, jossa päästökomponentin muodostuminen pyritään estämään teknisin toimenpitein. Kyseessä ei siis ole katalysaattoreiden tapainen jälkikäsitteilymenetelmä, jossa jo muodostuneesta päästöläjistä pyritään pääsemään eroon tai se pyritään muokkaamaan vähemmän haitalliseen muotoon. (Hansen et al., 2014, 22–37.)

EGR-järjestelmä integroituu tiiviisti moottorin toimintaan, minkä vuoksi järjestelmä on yleensä sidoksissa moottorin valmistajaan ja sen tarjoamiin teknisiin ratkaisuihin. Järjestelmä on siis jälkiasennettavissa, mikäli moottorinvalmistaja tarjoaa kyseiseen moottorityyppiin EGR-järjestelmää, mutta käytännössä kyseinen järjestelmä hankitaan yleensä uusien moottoreiden tilausten yhteydessä. Pakokaasujen takaisinkierrätystä on ohjattava reaaliaikaisesti yhdessä moottorin muun ohjauksen kanssa, ja sen on toimittava juuri kyseisessä moottorityypissä, mikä rajoittaa kolmansien osapuolten tekemien järjestelmien yleistymistä. (Hansen et al., 2014, 22–37.)

EGR-järjestelmää ohjaamalla voidaan typen oksidien vähentäminen tehdä kattavasti läpi kuormitusalueen. Siinä missä katalysaattorit vaativat riittävät toimintalämpötilat ja tämän vuoksi riittävän kuormitustason toimiakseen kunnolla, EGR poistaa optimaalisesti ohjattuna typen oksideja myös osakuormaoperoinnin aikana tehokkaasti. EGR voidaan integroida toimimaan tehokkaasti myös rikkipesureiden kanssa toisin kuin katalysaattorit. EGR-järjestelmiä on kehitetty niin neli- kuin kaksitahtimoottoreillekin. (Raptotasios et al., 2015, 814–823.)

EGR-järjestelmä voidaan toteuttaa teknisesti korkea- tai matalapaineratkaisuna. Korkea-paine-EGR ohjaa osan pakokaasuista ennen turboahdinta takaisin imupuolelle. Matalapaineratkaisussa pakokaasun takaisinohjaus tapahtuu pakopuolelta turboahdinten jälkeen, ja pakokaasu johdetaan imuilmaan ennen turbon kompressoria. Lähtökohtaisesti matalapainejärjestelmä on investointikustannuksiltaan edullisempi. Järjestelmät sisältävät yleensä

kierrätettävien pakokaasujen jäähdytysjärjestelmän, joka parantaa järjestelmän tehokkuutta. Suurissa laivaluokan merimoottoreissa jäähdytysjärjestelmä toimii yleensä vesiruiskuin, mutta kevyemmässä kalustossa voidaan käyttää myös lämmönvaihtimia. (Hiraoka et al., 2016, 40–47; Lapuerta et al., 2019, 155–163.)

Rikkipitoisella polttoöljyllä toimivien moottoreiden osalta EGR on monimutkaisempi ratkaisu. Rikkipitoista pakokaasua ei ole tarkoitus kierrättää, joten rikki poistetaan kierrätettävästä kaasusta osana EGR-järjestelmää. Käytännössä tämä tapahtuu siten, että kierrätettävä pakokaasu ohjataan ensin rikkipesurille, jossa rikki pestään kierrätettävästä pakokaasusta pois. Rikkipesuri voi tässäkin tapauksessa teknisesti olla avoimen tai suljetun kierron pesuri, jossa rikki huuhdellaan joko suoraan meriveteen tai natriumhydroksidin avulla erilliseen jätesäiliöön. Pesurin jälkeen, erityisesti suljetun kierron pesurimallissa, pakokaasu ohjataan jäähdyttimelle, minkä jälkeen kaasuvirtaus ohjataan puhaltimen välityksellä takaisin turboahtimelle. (Zannis et al., 2022, 7–9.)

EGR-järjestelmää voidaan hyödyntää myös metaanipäästöjen pienentämiseen (MAN, 2020). Pakokaasujen osittainen ohjaaminen takaisin imupuolelle johtaa sinne myös pakokaasujen sisältämää palamatonta metaania, jolloin metaani pääsee osallistumaan palotapahtumaan toisen kerran. Toistaiseksi LNG-aluksiin on kehitetty EGR-järjestelmiä, mutta niiden yleistyminen on ollut hidasta johtuen metaanipäästörajoitusten puutteesta. Mikäli Euroopan Unionin FuelEU Maritime -säädösehdotus astuu voimaan suunnitellusti huomioiden alusten metaanipäästörajat, tai metaanipäästöt saadaan neuvoteltua osaksi IMO:n ympäristösääädöksiä, yleistynevät metaanipäästöjen vähentämismenetelmät alusten teknisten ratkaisujen joukossa.

## Vesiruiskeutusmenetelmät

Vesiruiskeutusjärjestelmien tavoitteena on vähentää aluksen NO<sub>x</sub>-päästöjä. Järjestelmien toimintaidea perustuu veden jäähdyttävään vaikutukseen, minkä seurauksena palamislämpötila laskee ja typen oksidien muodostuminen vähenee. Toteutustapoja on useita erilaisia sisältäen suoravesiruiskeutuksen sylintereihin ja veden sekoittamisen polttoaineeseen. Näiden tavoitteena on muodostaa polttoaine-vesiemulsio ennen ruiskutustapahtumaa sylinteriin. Näiden lisäksi on olemassa lukuisia erityyppisiä menetelmiä kostuttaa vesihöyryllä huuhdelluilmalla, jolloin höyryn tehtävänä on sitoa lämpöenergiaa palotapahtuman yhteydessä. Vesiruiskeutusjärjestelmien toimintaperiaate on suhteellisen yksinkertainen, ja järjestelmä on usein toteutettavissa myös jälkiasennusratkaisuna. (Holtbecker & Geist, 1998; Karvonen et al., 2010, 8).

Vesiruisutusjärjestelmien tehosta on monenlaisia kokemuksia (Savila, 2017, 12-24): Teoriassa monilla vesiruisutusmenetelmillä voidaan päästä suhteellisen hyviin tuloksiin typen oksidien suhteen. Parhaimmillaan voidaan puhua jopa 50–60 % vähennyksestä typen oksidien muodostumisessa (Karvonen et al., 2010, 8). Käytännössä on kuitenkin havaittu, että näin suuriin lukemiin päästään lähinnä optimiolosuhteissa, ja 20–30 % lukema on huomattavasti realistisempi päästövähennystaso. Toisaalta vesiruisutusjärjestelmien etuna on niiden suhteellisen hyvä tekninen toimivuus osakuormaoperoinnissa.

Polttoaineen sekoittaminen veteen ei ole yksinkertaista johtuen siitä, että polttoöljyt eivät ole vesiliukoisia. Tämän vuoksi emulsioseosta ei käytännössä voida valmistaa ennalta esimerkiksi jalostamoissa ja siirtää aluksiin näin valmiina tuotteena polttoainetäydennysten yhteydessä. Emulsio ei ole stabiilia, ja se pyrkii nopeasti kerrostumaan kevyempien komponenttien noustessa pintaan ja raskaampien komponenttien jäädessä säiliön pohjalle. Tämä merkitsee, että mahdollinen sekoitustapahtuma on toteutettava juuri ennen polttoaineen syöttämistä sylintereihin. Toinen ongelmakokonaisuus liittyy veden öljyä huonompiin voiteluominaisuuksiin ja kavitaatioon. Polttoöljyllä on tärkeä rooli polttoainejärjestelmän pumppujen, suuttimien ja muiden liikkuvien osien voitelemisessä. Vesi-öljyemulsion voiteluominaisuudet eivät vastaa polttoöljyn ominaisuuksia, ja vedenannostelujärjestelmän osalta voiteluongelmasta tulee entistä kriittisempi öljykomponenttien puuttuessa nesteestä kokonaan. Vedellä on taipumus kiihdyttää metallien korroosiota. Kavitaatio aiheuttaa myös järjestelmätyypistä riippuen teknisinä vikoina ja kavitaatiokorroosiona ilmeneviä haasteita sellaisissa komponenteissa, joissa paineiden vaihtelut ovat suuret. (Holtbecker & Geist, 1998; Schmid & Weisser, 2005, 1–12.)

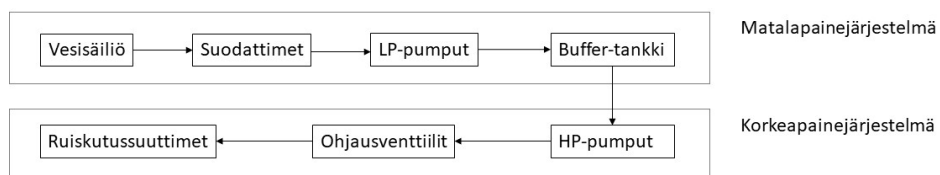
## Suoravesiruisutteenin DWI-järjestelmä

Suoravesiruisutusjärjestelmällä tarkoitetaan vesiruisutusratkaisua, jossa typen oksidien vähentämiseksi vettä ruiskutetaan suoraan sylinteriin. Järjestelmä voidaan toteuttaa joko alkuperäisasennuksena osana uusalusinvestointia tai asentaa alukseen jälkikäteen. Suoravesiruisutuksella voidaan saavuttaa varsin hyviä tuloksia, ja se toimii usein osakuormalla operoitaessa paremmin kuin katalysaattoriratkaisut. Pienillä kuormilla operoitaessa (valmistajakohtainen, mutta yleensä alle 40 % kuormat) järjestelmä kytketään pois käytöstä moottorin normaalin käynnin varmistamiseksi. TIER III -määräysten täyttämiseen DWI:n teho ei yksin riitä, minkä vuoksi päästönkäsittelyjärjestelmien trendinä näyttäisi olevan siirtyminen SCR-katalysaattoreihin. DWI-järjestelmä laskee pakokaasujen lämpötilaa noin 40–60 °C, minkä vuoksi se ei ole paras mahdollinen järjestelmä integroitavaksi toimimaan yhdessä katalysaattorijärjestelmän kanssa. Katalysaattoreiden tehokkuus huomioden tähän ei yleensä ole tarvettakaan. (Schmid & Weisser, 2005, 1–12; Sun et al., 2022, 1–9; Zannis et al., 2022, 20–23.)

DWI-järjestelmä asettaa suuret vaatimukset ruiskutusvedelle: Veden pitää olla erittäin puhdasta, mieluiten joko evaporoitua tai käänteisosmoosilla tuotettua. Veden seassa ei saa olla öljyjä, pinta-aktiivisuuteen vaikuttavia aineita, humusta, putkistosta irtoavaa ruostetta tai muita vastaavia epäpuhtauksia. Tämä vaatimus johtuu moottorin sylinteriin tapahtuvasta korkeapainepumppauksesta. Korkeapainepumppujen toleranssit ovat korkeat, ja pumpattavan nesteen sisältämät epäpuhtaudet aiheuttavat mekaanisia ongelmia ja heikentävät veden jo lähtökohtaisesti heikompaa voitelukykyä merkittävästi. Korkeapainepumppauksessa painenvaihteluista helposti aiheutuva kavitaatio rasittaa komponentteja, ja veden sekaan mahdollisesti irtoavat partikkelit ovat ongelmallisia järjestelmän teknisen kestävyuden kannalta. Järjestelmässä voidaan periaatteessa käyttää vesijohtovettä, mutta sen puhtaustaso on harvoin sellaisenaan riittävä ja sen käyttäminen näkyy välittömästi järjestelmän huoltotarpeessa. (Pruui & Trifan, 2009, 389–396; Sun et al., 2022, 1–9)

Vesiruiskutusjärjestelmä vaatii suuret määrät alukseen varastoitavaa vettä: käytettyyn polttoainemäärään nähden vettä tarvitaan noin 40–45 %, jolloin aluksessa, joka kuluttaa polttoainetta noin 50 tonnia vuorokaudessa, tarvitaan ruiskutusvettä vuorokautta kohden noin 20–22,5 tonnia. Aluksesta, alustyyppistä ja operointiprofilista riippuu tarve kuljettaa ruiskutusvettä aluksella, mutta joka tapauksessa mukana kuljetettava vesi lisää aluksen DWT:tä vieden lastinkuljetuskapasiteettia. Etenkin pidemmällä legeillä mukana kuljetettavan veden määrä on huomattava. (Savila, 2017, 17–24; Schmid & Weisser, 2005, 1–12)

Suoravesiruiskutuksen toiminnan periaatekaavio on esitetty kuvassa 7. Järjestelmäkohtaisia eroja luonnollisesti löytyy, mutta pääpiirteet niissä kaikissa noudattavat kuvattua prosessia. Järjestelmä koostuu matala- ja korkeapainepiireistä, joista jälkimmäinen vastaa veden ruiskuttamisesta sylinteriin matalapainepiirin toimiessa korkeapainepiirin vedensyöttöjärjestelmänä. Järjestelmää ohjataan ja sen toimintaa valvotaan ECM-ohjainjärjestelmällä. Ohjauksen vuorovaikutustaso moottorinohjauksen kanssa vaihtelee järjestelmätoimittajien kesken. (Chybowski et al., 2015, 393–405; Sarvi et al., 2009, 222–231.)



**Kuva 7.** DWI-vesiruiskutusjärjestelmän toimintakaavio

Matalapainejärjestelmä koostuu visisäiliöistä, suodattimista, matalapainepumppuista ja buffer-tankista. Järjestelmätyypistä riippuu, onko suodattimet ja pumput integroitu yh-

teen yksikköön, onko näitä yksiköitä mahdollisesti useampia vai onko järjestelmäsuunnittelussa tehty jokin muu ratkaisu. Matalapaineysikön tarkoituksena on syöttää vettä buffer-tankkiin pitäen yllä muutaman barin painetta ja mahdollistaa näin riittävä veden syöttö korkeapainepumpuille. Buffer-tankkiin palautuu myös korkeapainepuolelta sylintereihin syöttämättä jäänyt ylijäämävesi. Matalapainepuoli vaatii varsin vähän huoltoa ja on varsin toimintavarma kokonaisuus: suodattimien kunnossapitotyöt kuuluvat normaaleihin ylläpitotoimiin, ja tarvittaessa myös vesisäiliöitä on puhdistettava. Matalapainepumput ovat yleensä pitkäikäisiä. (Schmid & Weisser, 2005, 1–12.)

Korkeapainepuoli koostuu korkeapainepumpusta (HP-pumppu), ohjausventtiileistä ja ruiskutus-suuttimista. Korkeapainepumpun tehtävänä on kehittää järjestelmän vaatima työpaine ja pitää se tasaisena, jotta syöttöveden tasainen virtaus suuttimille ja sylinteriin olisi mahdollista. Työpaine on oltava suurempi kuin sylintereissä ilmenevä puristus-paine. Esimerkiksi Wärtsilä 46 -moottoreissa puristus-paine on suuruusluokkaa 160–180 baria, jolloin syöttöveden työpaineen on oltava käytännössä yli 200 baria. Näin suurten paineiden kehittäminen nesteeseen vaatii niin pumpuilta kuin ohjainventtiileiltä pieniä toleransseja ja suurta mekaanista kestävyyttä huomioiden pumpattavan veden öljyyn verrattuna heikot voiteluominaisuudet. Korkeapainepumpuissa on imu- ja painepuolella takaiskuventtiilit, jotka ovat usein vesiruiskutusjärjestelmien tekninen heikkous. Syöttöveden sisältämät epäpuhtaudet tarkoitus suodattaa matalapainepuolella pois mahdollisimman tehokkaasti, mutta pienistä toleransseista puhuttaessa myös pienet epäpuhtaudet voivat vaurioittaa komponentteja. Lisäksi epäpuhtauksia voi irrota veteen myös suodattimien jälkeisestä linjasta kulumisen tai kavitaatiokorroosion seurauksena. Venttiilien tekniset ongelmat vaikuttavat kuitenkin koko järjestelmän toimivuuteen: imupuolella vuotava takaisku aiheuttaa imupaineen vaihtelua ja painepuolella venttiiliviat voivat aiheuttaa painetason vaihteluita tai vajaapainetta järjestelmään. Joissain järjestelmissä painepuolelle on asennettu paineakut, joiden tarkoitus on ehkäistä akustisia paineiskuja ja vähentää komponenttien mekaanista rasitusta. (Schmid & Weisser, 2005, 1–12; Takasaki et al., 2003, 1–8.)

Paineistettu vesi annostellaan sylintereihin ruiskutus-suuttimilla, joita ohjataan sähköisesti ECM-järjestelmällä. Vesiruiskutus-suuttimet voidaan teknisesti integroida polttoaineen ruiskutus-suuttimiin, jolloin polttoaine-vesiemulsio voidaan periaatteessa toteuttaa ennen ruiskutushetkeä. Käytännössä suuttimen kestävyys ja seoksen tarkka annostelu tuottavat kuitenkin haasteita, ja vauriotapauksissa polttoainetta voi sekoittua korkeapainepiirissä kiertävään veteen. Näiden syiden vuoksi yhdistelmäsuuttimissa on yleensä päädytty ratkaisuun, jossa samassa suuttimessa on erilliset kanavat polttoaineelle ja vedelle saman komponentin sisältäessä periaatteessa kaksi ruiskutus-suutinta. Huollettavuuden ja teknisen kestävyuden takia täysin erillisiä suuttimiakin käytetään lisääntyvässä määrin: näin vesiruiskutus-suut-

timissa mahdollisesti ilmenevät ongelmat eivät vaikuta polttoainesuuttimien toimintaan ja sitä kautta moottorin luotettavuuteen ja toimivuuteen. (Chybowski et al., 2015, 393–405; Sarvi et al., 2009, 222–231; Schmid & Weisser, 2005, 1–12.)

Ruiskutus-suuttimet ovat monissa järjestelmissä kallein yksittäinen osakokonaisuus ja todennäköinen vikaantumiskohde. Ruiskutettava vesi voi aiheuttaa kavitaatiokorroosiota, ja veden sisältämät epäpuhtaudet voivat jumiuttaa tai vaurioittaa suuttimen neulaa. Myös lämpötila voi aiheuttaa ongelmia suuttimille: ruiskutusveden tehtävänä on jäähdyttää suutinta, ja mikäli vesikierto jostain syystä keskeytyy, voi suutin palaa moottorin käydessä normaalikuormituksessa (75 %) nopeasti (jopa alle tunnissa) käyttökelvottomaksi. Vesiruiskutusjärjestelmää ei siis voi turvallisesti kytkeä pois käytöstä ilman riskiä kaikkien suuttimien menetyksestä. Palanut suutin ei ainoastaan vaikuta päästöjen muodostumiseen vaan voi aiheuttaa moninaisia kerrannaisvaikutuksia: vesijärjestelmään voi päästä palota-  
pahtumasta syntyviä epäpuhtauksia, jotka voivat vastaavasti vaurioittaa ohjainventtiileitä, korkeapainepumppua tai muita suuttimia. Lisäksi vaurioituneesta suuttimesta voi irrota metallikappaleita sylinteriin, jolloin vaarassa ovat muun muassa sylinteri ja pakoventtiilit tai ahtimen pakopuolen siivekkeet. Näiden syiden vuoksi palanutta suutinta ei voi jättää moottoriin, vaan se tulee poistaa ja asennuspaikka tulpata odottaessa uuden suuttimen toimitusta alukselle. (Savila, 2017, 27–31.)

## Veden syöttö imukanaviin

Suoravesiruiskutusjärjestelmien syöttäessä vettä suoraan sylintereihin moottorin imupuolen kautta tapahtuva vesiansostelu poikkeaa tästä ratkaisusta sekoittamalla vettä moottoriin johdettavaan ilmamassaan. Tästä ratkaisusta on useita erilaisia kaupallisia variaatioita, joiden tehokkuus vähentää erityisesti typen oksidien päästöjä vaihtelee. Teoreettisesti voidaan parhaimmillaan saavuttaa noin 30–40 % vähennykset typen oksidien päästöissä, mutta käytännössä puhutaan pienemmistä luvuista. Osa valmistajista tosin lupaa tätäkin suurempia päästövähennyksiä. Näiden järjestelmien etuna on kuitenkin parempi tekninen kestävyys: suoravesiruiskutuksen korkeapainepuolen teknisistä ongelmista päästään monilta osin eroon mukaan lukien palaneen suuttimen mahdollisesti aiheuttamat tekniset ongelmat vesiruiskutusjärjestelmälle tai koko moottorille. (Radloff & Gautier, 2005, 1-9; Zannis et al., 2022, 7–8; Zhu et al., 2019, 139–158.)

Ilman kostuttamisen tavoitteena on laskea palamislämpötilaa ja vähentää siten typen oksidien muodostumista. Käytännössä tämä tapahtuu kahdella tavalla: Ahdetun ilman kylmistäminen vesihöyryllä syrjäyttää osan hapestä, jolloin palotapahtuman huippulämpötila laskee. Toisaalta ilman sisältämän veden ominaislämpökapasiteetti sitoo palamisreaktioista syntyvää lämpöä laskien sylinterissä ilmeneviä huippulämpötiloja. (Zhu et al., 2019, 147.)

Useimmissa järjestelmissä vesi ruiskutetaan kuumentuneen ahtoilman sekaan välittömästi turboahtimen jälkeen (esim. CWI, jatkuva vesiruiskutus). Olemassa on kuitenkin myös järjestelmiä, joissa ruiskutus tapahtuu ennen turboahdinta. Kuumentuneessa ilmassa vesi höyrystyy. Höyrystämisen jälkeen pisarat poistetaan ilmamassasta, jolloin ilman kylläsymisaste on liki 99 % ennen sen johtamista sylintereihin. (Zhu et al., 2019, 148–149.)

Imuilman kostutusjärjestelmissä tekniset ongelmat liittyvät yleensä veden kiihdyttämään korroosioon imukanavissa tai imuventtiileissä. Toisaalta on havaittu, että vedellä on myös kyky puhdistaa näitä kanavia, ja mikäli nämä epäpuhtaudet saadaan eroteltua riittävän tehokkaasti pisaranerottimessa, voi ilmiöstä olla myös hyötyä moottorin kunnossapidolle. Veden on kuitenkin oltava puhdasta: evaporoitua tai muutoin puhdistettua merivettä voidaan käyttää tai vaihtoehtoisesti voidaan hyödyntää satamasta saatavaa vesijohtovettä. Järjestelmän kyky erotella höyrystymätön vesi ilmamassasta on kuitenkin tärkeää. Mikäli sylinteriin kulkeutuu ahtoilman mukana pisaroitunutta vettä, rikkoo se sylinterin seinämien voitelevat öljykalvot ja kerää sylinterissä olevia epäpuhtauksia siirtäen niitä männänrenkaisiin. Liikenne- ja viestintäministeriön selvityksessä (Karvonen et al., 2010, 8) todetaan, että imuilman kostutusjärjestelmissä teoreettisesti typen oksidien vähentyminen voisi olla jopa 40 % luokkaa, mutta käytännössä päästään vain noin 20 % lukemiin. (Zhu et al., 2019, 139–158.)

Höyryinjektoratkaisut poikkeavat jonkin verran tekniseltä toteutukseltaan vesiruiskutusratkaisuista. Injektiojärjestelmässä palotilaan suihkutetaan kuumaa, noin 450–550-celsiusasteista vesihöyryä. Höyryn tuottoon on käytetty ensisijaisesti moottorin hukkalämpöä, joka on saatu esimerkiksi ahtoilman jäädyttimeltä tai pakokaasukattiloista, toissijaisesti hyödynnetään apupolttimia. Suihkutus sylinteriin tapahtuu puristustahdin lopussa tai työtahdin alussa höyrysuuttimen kautta noin 250 barin paineella. Höyryinjektion seurauksena sylinterin työpaine kasvaa, ja tuolloin myös moottorin teho kasvaa muutaman prosentin verran. Höyry myös sitoo jonkin verran lämpöenergiaa ja vähentää näin typen oksidien muodostumista. Järjestelmän tehokkuus ei kuitenkaan ole ollut kovin hyvä, minkä vuoksi se ei ole yleistynyt. (Raiko & Lehtinen, 2002, 1–3.)

## Moottorinohjaus- ja operointiratkaisut

Moottorinohjausratkaisuilla tarkoitetaan erilaisia menetelmiä, joilla aluksen moottorit pyritään optimoimaan toimimaan mahdollisimman hyvällä hyötysuhteella huomioiden aluksen operointiprofiili. Optimoinnissa pyritään usein mahdollisimman pieneen polttoainenkulutukseen, jolloin myös hiilidioksidipäästöt vähenevät lähes lineaarisesti. Moniin muihin

päästökomponentteihin on myös mahdollista vaikuttaa. Etenkin tyypen oksidien päästöt muuttuvat herkästi moottorin kuormituksen suhteen. Sama pätee metaanipäästöjen suhteen erityisesti matalapainedieselmoottoreissa, jolloin osakuormalla operointi tuottaa usein huomattavasti suurempia metaanipäästöjä. (Grönholm et al., 2021, 13677–13686; Hu et al., 2017, 138–152; Marvelos & Tehotokatos, 2018, 48–59; Zhou et al., 2017, 20351–20360.)

Moottori- ja alustyyppistä riippuu, miten paljon säätövaraa järjestelmissä käytännössä on. Mikäli alus operoi pitkäaikaisesti aina samaa vakioreittiä, voi varustamolle monissa tapauksissa olla taloudellisesti järkevää investoida aluksen mahdollisimman hyvään energiatehokkuuteen juuri kyseisellä reitillä. Aluksen energiatehokkuus on kuitenkin kokonaisuus: esimerkiksi kaksitahtidieselin paras hyötysuhde saavutetaan usein 80–90 % kuormituksella, jolloin onnistuneessa runkosuunnittelussa aluksen tulisi saavuttaa tuolloin tavoiteltu marssivauhti. Potkurit, turboahtimet, pakokaasukattilat ja muut järjestelmät on tuolloin optimoitu tätä silmällä pitäen. Kiinteäsiipisillä potkureilla varustetuille akselivetoisille aluksille on tarjolla suhteellisesti vähemmän operointiratkaisuja, joilla voitaisiin vaikuttaa aluksen kokonaise-nergiatehokkuuteen ainakaan ilman merkittäviä investointeja. Esimerkiksi dieselsähköisille aluksille on tarjolla enemmän vaihtoehtoja. Etenkin, mikäli dieselsähköinen alus on varustettu erikokoisilla pääkoneilla, voidaan usein varsin helpoin operointiratkaisuun pyrkiä saamaan alus toimimaan mahdollisimman energiatehokkaasti vaihtelevissa olosuhteissa. (Pohtila, 2017, 15–22.)

Slow steamingilla, eli moottoreiden alhaisempien käyntinopeuksien hyödyntämisellä, pyritään polttoainesäästöihin. Menetelmä yleistyi erityisesti rahtialusten operoinnissa vuoden 2008 aikana polttoaineiden hintojen nopean nousun takia (Pulkkinen, 2016, 6). Polttoaineen säästö vaikuttaa suoraan myös hiilidioksidipäästöjen muodostumiseen. Muiden päästökomponenttien osalta tilanne ei ole kovinkaan suoraviivainen. Pakokaasujen kokonaismäärä pienenee moottorin kaasunvaihdon pientyessä, mutta toimittaessa moottorin optimikuormitusalueen ulkopuolella monien haitallisten päästökomponenttien osuus kokonaispäästöistä voi kuitenkin kasvaa. Periaatteessa slow steaming on helppo toteuttaa muuttamalla aikataulutuksia, mutta käytännössä huomiota on kiinnitettävä järjestelmien kestävyyyteen pidemmällä aikavälillä erityisesti, mikäli kyseessä ei ole lyhytaikainen operointitapa ja moottoreita joudutaan slow steamingin takia osakuormittamaan pidempiä ajanjaksoja. Huomattavia eroavaisuuksia alustyyppien välillä kuitenkin on riippuen aluksen propulsioratkaisusta. (Cariou, 2011, 260–264, Pulkkinen, 2016, 14–38, Maloni et al., 2013, 151–171; Wiesmann, 2010, 49–55.)

Osakuormalla operoitaessa moottorin ahtimien toiminta heikkenee. Turboahtimet on suunniteltu toimimaan optimaalisesti normaalilla kuormitusalueella, ja osakuormalla pa-



kokaasujen massavirta jää tavoitteesta. Ahtimen säädettävyys kuormituksen suhteen riippuu ahdinmallista, mutta säädettävyydellä on parhaimmillaankin rajansa johtuen ahtimen fysikaalisista ominaisuuksista. Turboahtimen toiminnan heikentyessä moottorin huuhtelu heikkenee, jolloin tehollinen keskipaine laskee ja palamistehokkuus pienenee. Teknisesti on mahdollista varustaa moottori sähköisillä ahtimilla, millä voidaan varmistaa riittävä huuhteluilma kaikissa tapauksissa. Turboahtimien etuna on kuitenkin hyödyntää pakokaasujen sisältämää hukkaenergiaa moottorin tarvitseman huuhteluilman paineistamiseksi. Sähköiset ahtimet huolehtivat kyllä paineistuksesta, mutta tuolloin pakokaasujen hukkaenergiaa ei kyetä hyödyntämään pakokaasuahntimien tavoin. (Guan et al., 2014, 1–34.)

Polttoaineen palamisen heikentyminen lisää noki- ja hiukkaspäästöjä. Osin tämä johtuu epäoptimaalisesta täytöksestä ja alentuneesta puristusaineesta, osin polttoaineen atomisoinnisen heikentymisestä ruiskutuksen jälkeen. Noki aiheuttaa moottorin ja pakokanavien karstoittumista: karstaa voi alkaa kertyä sylinterien ja palotilan seinämille sekä männän yläpinnalle. Männänrenkaiisiin kulkeutunut karsta voi estää niiden normaalin toiminnan, jolloin sylinterien tiiveys ja männänlaen jäähdytys heikkenevät. Karstaa tuolloin todennäköisesti sekoittuu myös voiteluöljyyn aiheuttaen öljyn voiteluominaisuuksien heikkenemistä ja suodattimien tukkeutumista. Karstaa kertyy myös pakokanaviin, ahtimen pakopuolelle heikentäen sen toimintaa entisestään ja mahdollisiin pakokaasukattiloihin. Nokikarsta on hyvä eriste, jolloin pakokaasukattiloiden tehokkuus laskee ja nuohoustarve lisääntyy. Pahimmillaan karsta voi aiheuttaa nokipalon korsteenissa. (Dere et al., 2022, 1069–1081.)

Moottorin voitelujärjestelmää ei ole monissa moottoreissa optimoitu toimimaan osakuormalla pitkiä aikoja. Järjestelmän säädettävyys vaihtelee moottorikohtaisesti, mutta toisissa moottoreissa pitkäaikainen slow steaming saa aikaan tilanteen, jossa voiteluöljyä kiertää järjestelmässä liikaa suhteessa tarpeeseen. Öljyn nousu sylintereihin likaa männänrenkaita yhdessä karstan kanssa haitallisesti lisäten komponenttien mekaanista kulumista. Palamisen aikana voiteluöljystä muodostuu kidemäisiä hiukkasia, jotka lisäävät karstan haitallisuutta entisestään. (Harrold, 2014, 88–95.)

Moottorin käyntilämpötila pyrkii laskemaan osakuormituksessa, mikäli jäähdytysjärjestelmä ei säädy mukana. HT-piirin jäähdytysveden lämpötilan laskeminen suunniteltua alemmas lisää moottorin komponenttien lämpörasituksia ja lyhentää niiden elinikää. Suunniteltua viileämpi ahtoilma lisää tätä rasitusta. Mikäli savukaasut saavuttavat kastepisteen laskeneen lämpötilan ja riittävän korkean paineen seurauksena, erityisesti korkearikkisellä polttoaineella operoitaessa voi alkaa muodostua rikkihappoa. Syövyttävänä aineena rikkihappo kiihdyttää komponenttien korroosiota. (Dere et al., 2022, 1069–1081; Wiesmann, 2010, 49–55.)

Koneen tekninen ikä vaikuttaa merkittävästi moottorin säädettävyyteen: Vanhemman sukupolven moottoreiden käyttölaitteet saavat usein käyttövoimansa nokka-akseleilta, jolloin jälkikäteen tehtävät suuremmat muutokset vaativat usein komponenttien vaihtoja ja ovat tämän vuoksi kalliimpia toteuttaa. Turboahtimen, apupuhaltimien, apukattiloiden ja pakokaasukattiloiden ominaisuuksista ja osakuormalle soveltuvista käyttötavoista riippuen on mahdollista tehdä tilanteeseen soveltuvia kombinaatioita. Mikäli kyseessä on uudempi yhteispaineruiskutuksella varustettu moottori, on säätöjä mahdollista tehdä huomattavasti laajemmin hyödyntämällä moottorinohjausjärjestelmää. Softapohjainen ohjaus mahdollistaa muun muassa polttoaineen syöttömäärän tarkan ohjaamisen ruiskutuksen ajoitusta ja painetta säätämällä riippumatta moottorin kierrosnopeudesta. (Dere et al., 2022, 1069–1081.)

Konehuoneen automaattioratkaisuilla voidaan vähentää slow steaming -operoinnin tuottamaa manuaalista työtä huomattavasti. Uudemman sukupolven moottoreissa on usein slow steaming -tila tätä tarkoitusta varten. Vanhempien moottoreiden osalta vaadittavat huoltotoimenpiteet lisäävät konemiestön työtä. Polttoaineen syöttöventtiilien toimintaan ja huoltoon on kiinnitettävä erityistä huomiota, samoin polttoaineen viskositeetin ja lämpötilan pysymiseen määrättyissä rajoissa. HT- ja LT-veden lämpötilaa on seurattava, ja turboahtimia on puhdistettava todennäköisesti tiheämmin noudattaen valmistajan ohjeita. Pakokaasujen lämpötilaa on myös seurattava, koska liian matala lämpötila voi lisätä kylmäkorroosiota, siinä missä liian korkea lämpötila voidaan alentaa apupuhaltimia käyttämällä. Toisaalta apupuhaltimien jatkuvaa on/off-käyttöä tulisi välttää puhaltimien eliniän pidentämiseksi. Moottoria on ajoittain kuormitettava enemmän karstan polttamiseksi pois, ja pakokaasukattilaa on nuohottava tavanomaista tiheämmin. Nuohous on alusturvallisuuden kannalta oleellinen asia etenkin pitkäikäisissä moottoreissa, joissa voiteluöljyä käytetään suhteellisesti enemmän. Pahimmillaan nokkipalo kattiloissa voi johtaa vakavaan onnettomuuteen. (Pulkinen, 2016, 24–26.)

Mekaaniset värähtelyt ovat ongelma monilla aluksilla suurikokoisten pyörivien koneiden ja muutoinkin fyysikaalisesti hyvin dynaamisen ympäristön takia. Laivat ovat usein joko yksilöitä tai kuuluvat johonkin piensarjatuotantoerään, jolloin mekaanisten värähtelyjen vähentäminen on suunnitteluvaiheessa haasteellista johtuen monimutkaisesta rakenteesta ja toimintaympäristöstä. Mikäli värähtelyt lisääntyvät kriittisissä kohteissa (esimerkiksi akselistot, kampiakseli tms.) slow steaming -tilassa toimittaessa, voi niillä olla suurikin vaikutus näiden komponenttien elinikään. Matkustaja-aluksissa myös matkustusmukavuus voi heikentyä. Lisäksi slow steaming -operoinnista voi muodostua myös muita, kenties odottamattomiakin, kerrannaisvaikutuksia: esimerkiksi rungon vedenalaisten osien bioliikaantuminen voi lisääntyä eikä virtaaman voima välttämättä riitä irrottamaan kasvustoa rakenteiden pinnoilta, vaikka aluksessa olisikin käytetty foul release -tyyppisiä pinnoitteita.

Lisäksi kuljetusaikojen pidentyminen kasvattaa rahdinomistajan varastoon sidottua pääomaa ja hidastaa varaston kiertonopeutta. (Pulkkinen, 2017, 29–30.)

Monet merimoottoreiden valmistajat tarjoavat varustamoille muutospaketteja, mikäli vanhalla moottorilla on tarkoitus siirtyä vakituisesti slow steaming -operointiin. Moottorityypistä riippuu, millaisia teknisiä muutoksia on tarpeen toteuttaa. Usein ainakin polttoaineen syöttöventtiilit vaihdetaan osakuormaoperointiin soveltuviksi ja syötön ajoitusta optimoidaan toimimaan paremmin suhteessa käytettyihin kuormitusalueisiin. Myös voitelujärjestelmään tehdään muutoksia. Useammalla ahtimella varustetussa moottorissa ahtimia voidaan lepuuttaa tai vaihtaa ahtimet optimaalisemmiksi. Myös moottorin iskun pituutta voidaan usein lyhentää ja potkurit voidaan vaihtaa sellaisiksi, joiden hyötysuhde on parempi uudella nopeusalueella operoitaessa. (Wiesmann, 2010, 49–55.)

Nelitahtisten dieselmoottoreiden imuventtiilin aukioloajankohtaa säätämällä on mahdollista vaikuttaa typen oksidien päästöjen muodostumiseen tai moottorin hyötysuhteen parantamiseen. Tässä Miller-työkierrossa imuventtiili suljetaan joko normaalia aikaisemmin ennen männän alakuolokohtaa tai vaihtoehtoisesti vasta alakuolokohdan jälkeen. Ennen alakuolokohtaa tapahtuvassa sulkeutumisessa sylinteriin ei virtaa enempää ilmaa, mutta sylinterin täytöksen tilavuus laajenee männän liikkeen seurauksena, jolloin paine ja lämpötila laskevat. Kun täytöksen alkulämpötilaa saadaan näin laskettua, seurauksena myös loppulämpötila jää alhaisemmaksi. Tämän seurauksena myös palamisen loppulämpötila ja sylinterin maksimipaine alenee, jolloin typen oksidien muodostuminen vähenee. (Codan & Vlaskos, 2004, 3–13.)

Miller-työkierron ongelmana on imuventtiilin aikaisesta sulkeutumisesta johtuva lyhyempi aukioloaika, jolloin turboahtimen tuottama riittävä ahtopaine on tärkeää riittävän täytöksen saamiseksi sylinteriin. Männän alakuolokohdan jälkeen tapahtuvassa imuventtiilin sulkeutumisessa mäntä työntää sylinteristä ilmamassaa takaisin imukanaviin ennen venttiilin sulkeutumista, jolloin varsinainen puristustahti jää lyhyemmäksi. Merimoottoreiden Miller-työkierrot on yleensä toteutettu aikaisemmalla imuventtiilin sulkeutumisella johtuen menetelmän paremmasta soveltumisesta moottorin osakuormaoperointiin. Miller-työkiertoa hyödyntävissä moottoreissa ahtimien hyötysuhteeseen, ohjattavuuteen ja ahtoilman lämpötilaan on kiinnitettävä enemmän huomiota verrattuna normaaliin diesel-työkiertoon. Nelitahtimoottoreiden lisäksi Miller-työkiertoa on mahdollista hyödyntää soveltaen myös kaksitahtimoottoreissa säätämällä pakoventtiilin aukioloaikaa. (Zhou et al., 2017, 20352–20358.)

Ahdinten ominaisuuksien ja niiden säädettävyyden kehittyminen on tarjonnut paljon mahdollisuuksia vaikuttaa moottorinohjauksen kautta moottorin toimintaan ja sen seurauksena muodostuviin päästöihin. Perinteiset turboahtimet saivat käyttöenergiansa pakokaasuvirrasta, ja niiden ahtama ilmassa riippui hyvin vahvasti ahtimen geometriasta kulloisellakin moottorin kuormituksella. Yksinkertaisimmissa ahtimissa säätömahdollisuuksia ei ollut. Yksinkertaisin ahtimen säätölaite on hukkaportti, jonka avulla ahtimen tehoa oli mahdollista säätää ohjaamalla pakokaasuvirtaa ahtimen ohitse. Hukkaportin avulla ahdin on mahdollista mitoittaa suuremmaksi. Hukkaporttiratkaisu voidaan toteuttaa myös toisin: yhdistämällä ahtimen painepuoli hukkaportin välityksellä pakopuolelle voidaan ahtimen tuottamaa ylipainetta säätää ohjaamalla ilmaa painepuolelta moottorin ohitse pakopuolelle. Tällainen ratkaisu on varsin tavallinen erityisesti kaksitahtidieseleissä. (Zhou et al., 2017, 20358–20360.)

Maantielikenteen dieselmoottoreissa muuttuvageometrisia ahtimia (VGT tai VTG-ahtimet, mutta myös muita kaupallisia nimiä on olemassa) on käytetty suhteellisen laajasti jo 2000-luvulta alkaen. Merimoottoreissa ne yleistyvät myös, tosin yleistymisen on alkanut pienemmistä moottoreista. Muuttuvageometriset ahtimet mahdollistavat ahtopaineen joustavan säädön johdesiipien kulmia muuttamalla. Johdesiipien ohjaaminen voi tapahtua suoraan suhteessa vallitsevaan ahtopaineeseen, mutta ohjaus voidaan toteuttaa myös softapohjaisesti osana moottorin toiminnan kokonaisohjausta. (ABB turbo systems Ltd., 2009.)

Sähköisiä ahtimia käytetään apuahtimina tilanteissa, joissa pakokaasujen virtaama ei syystä tai toisesta riitä tuottamaan vaadittua ahtopainetta turboahtimen avulla. Usein tällainen tilanne tulee vastaan osakuormalla operoitaessa. Sähköinen ahdin voi olla integroitu myös turboahtimeen, jolloin puhutaan yhdistelmäahtimesta. Sähköinen ahdin ei pysty hyödyntämään turboahtimen tapaan pakokaasujen hukkaenergiaa, mutta sähköisten ahtimien säädettävyyttä voidaan toteuttaa hyvin helposti ahtimen sähkömoottoria ohjaamalla. Teknisesti myös ahtimen ennakoiva säätö onnistuu suoraviivaisesti. (ABB turbo systems Ltd., 2009.)

## LÄHTEET

Aakko-Saksa, P., Lehtoranta, K. 2019. Ship emissions in the future: Review. Espoo: VTT Technical research centre of Finland. VTT research report no. VTT-R-00335-19.

ABB turbo systems Ltd. 2009. The range of ABB turbochargers. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [ABB Turbocharging The range of ABB turbochargers - PDF Free Download \(docplayer.net\)](#)

Andersson, K., Brynolf, S., Lindgren, F., Wilewska-Bien M. 2016. Shipping and the environment. Gothenburg: SpringerNature.

Andersson, K., Jeong, B., Jang, H. 2020. Life cycle and cost assessment of a marine scrubber installation. *Journal of international maritime safety, environmental affairs and shipping*, 4(4), 162–176.

Andreasen, A., Mayer, S. 2007. Use of seawater scrubbing for SO<sub>2</sub> removal from marine engine exhaust gas. *Energy fuels*, 21, 3274–3279.

Bengtsson, S.K., Fridell, E., Andersson, K.E. 2014. Fuels for short sea shipping: A comparative assessment with focus on environmental impact. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part M: Journal of engineering for the maritime environment*, 228(1), 44–54.

Boscarato, I., Hickey, N., Kašpar, J., Prati, M.V., Mariani, A. 2015. Green shipping: Marine engine pollution abatement using a combined catalyst/seawater scrubber system. 1. Effect of catalyst. *Journal of catalysis*, 328, 248–257.

Cariou, P. 2011. Is slow steaming a sustainable means of reducing CO<sub>2</sub> emissions from container shipping? *Transportation research part D: Transport and environment*, 16(3), 260–264.

Choi, C., Sung, Y., Choi, G.M., Kim, D.J. 2015. Numerical analysis of NO<sub>x</sub> reduction for compact design in marine urea-SCR system. *International journal of naval architecture and ocean engineering*, 7(6), 1020–1034.

Chybowski, L., Laskowski, R., Gawdzinska, K. 2015. An overview of systems supplying water into the combustion chamber of diesel engines to decrease the amount of nitrogen oxides in exhaust gas. *Journal of marine science and technology*, 20, 393–405.

Cimino, S., Lisi, L., Tortorelli, M. 2016. Low temperature SCR on supported MnOx catalysts for marine exhaust gas cleaning: Effect of KCl poisoning. *Chemical engineering journal*, 283, 223–230.

ClassNK Nippon Kaiji Kyokai, 2022. Methane slip oxidizing device developed by Yanmar power technology co. Ltd., Hitachi Zosen corporation and Mitsui O.S.K. Lines, Ltd. Approval in principle, document no. KB22MK0088, 3 March 2022.

Codan, E., Vlaskos, I. 2004. Turbocharging medium speed diesel engines with extreme Miller timing. ABB turbo systems Ltd.

Comer, B., Georgeff, E., Osipova, L. 2020. Air emissions and water pollution discharges from ships with scrubbers. International council on clean transportation: ICCT consulting report.

Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., Wang, C., Chen, Z. 2021. A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fueled vessels. *Sciences of the total environment*, 766, article 144319.

Dere, C., Zincir, B., Inal, O.B., Deniz, C. 2022. Investigation of the adverse effects of slow steaming operations for ships. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part M: Journal of engineering for the maritime environment*, 236(4), 1069–1081.

Foteinos M.I., Christofilis, G.I., Kyrtatos, N.P. 2021. Large two-stroke marine diesel engine operation with a high-pressure SCR system in heavy weather conditions. *Journal of ship research*, 65(3), 179–193.

Grönholm, T., Mäkelä, T., Hatakka, J., Jalkanen, J-P., Kuula, J., Laurila, T., Laakso, L., Kukkonen, J. 2021. Evaluation of methane emissions originating from LNG ships based on the measurements at a remote marine station. *Environmental science & technology*, 55, 13677–13686.

Guan, C., Theotokatos, G., Zhou, P., Chen, H. 2014. Computational investigation of large containership propulsion engine operation at slow steaming conditions. *Applied energy*, 130, 370–383.

Guo M., Fu, Z., Ma, D., Ji, N., Song, C., Liu, Q. 2015. A short review of treatment methods of marine diesel engine exhaust gases. *Procedia engineering*, 121, 938–943.

Hassellöv, I-M., Hermansson, A.L., Ytreberg, E. 2020. Current knowledge on impact on the marine environment of large-scale use of exhaust gas cleaning systems (scrubbers) in Swedish waters. Gothenburg: Chalmers university of technology.

Hansen, J.P., Kaltoft, J., Bak, F., Gørtz, J., Pedersen, M., Underwood, C. 2014. Reduction of SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> and particulate matters from ships with diesel engines. Copenhagen: Miljøstyrelsen, environmental project no 1510.

Harrold, P. 2014. Lubricating marine crosshead engines operating at reduced load. *Marine engineering*, 49(1), 88–95.

Hiraoka, N., Miyanagi, A., Kuroda, K., Ito, K., Nakagawa, T., Ueda, T. 2016. The world's first onboard verification test of UE engine with low pressure EGR complied with IMO's NO<sub>x</sub> tier III regulations. *Mitsubishi heavy industries technical review*, 53(2), 40–47.

Hirata, K., Niki, Y., Kawada, M., Iida, M. 2009. Development of marine SCR system and field test on ship. International symposium on marine engineering (ISME), BEXCO, Busan, October 2009.

Holtbecker, R., Geist, M. 1998. Exhaust emissions reduction technology for Sulzer marine diesel engines: General aspects. Winterthur: Wärtsilä NSD Switzerland Ltd.

Hu, N., Zhou, P., Yang, J. 2017. Comparison and combination of NLPQL and MOGA algorithms for a marine medium-speed diesel engine optimization. *Energy conversion and management*, 133, 138–152.

Hsieh, M.F., Wang, J. 2011. Development and experimental studies of a control-oriented SCR model for a two-catalyst urea-SCR system. *Control engineering practice*, 19(4), 409–422.

Ibrahim, S. 2016. Process evaluation of a Sox and NO<sub>x</sub> exhaust gas cleaning concept for marine application. Gothenburg: Chalmers university of technology.

International Maritime Organization IMO. 2009. Annex 9 resolution mepc.184(59) 2009 guidelines for exhaust gas cleaning systems. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/184\(59\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/184(59).pdf)

International Maritime Organization IMO. 2013. Air pollution and energy efficiency. Final report of the correspondence group on assessment of technological developments to implement the Tier III Nox emission standards under MARPOL Annex VI. IMO: London.

International Maritime Organization IMO. 2020. Fourth IMO greenhouse gas study. IMO: London.

Jafarinejad, S. 2016. Control and treatment of sulfur compounds specially sulfur oxides (SO<sub>x</sub>) emissions from the petroleum industry: A review. *Chemistry international*, 2(4), 242–253.

Karvonen, T., Kalli, J., Holma, E. 2010. Laivojen typenoksidipäästöjen rajoittaminen. Selvitys MARPOL-yleissopimuksen VI liitteen Tier III -määräysten aiheuttamista kustannusvaikutuksista Suomen kauppamerenkululle. Helsinki: Liikenne- ja viestintäministeriön julkaisuja 42/2010

Lamas, M.I., Rodríguez, C.G. 2012. Emissions from marine engines and NO<sub>x</sub> reduction methods. *Journal of maritime research*, 9(1), 77–82.

Langh tech, 2022. Unique hybrid scrubbers. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.langhtech.com/\\_files/ugd/813dcb\\_1d80aaff9e4f4e12a1337404b65435e4.pdf](http://www.langhtech.com/_files/ugd/813dcb_1d80aaff9e4f4e12a1337404b65435e4.pdf)

Lapuerta, M., Ramos, A., Fernández-Rodríguez, D., González-García, I. 2019. High-pressure versus low-pressure exhaust gas recirculation in a Euro 6 diesel engine with lean-NO<sub>x</sub> trap: Effectiveness to reduce NO<sub>x</sub> emissions. *International journal of engine research*, 20(1), 155–163.

Lehtoranta, K., Koponen, P., Vesala, H., Kallinen, K., Maunula, T. 2020. Performance and regeneration of methane oxidation catalyst for LNG ships. *Journal of marine science and engineering*, 9, 111.

Lee, I., Chang, T., Chang, C., Truong, V.D.H., Ward, J.D. 2022. Comparison of open- and closed-loop operating strategies for exhaust gas scrubbing in marine applications: Modeling and sea-trial data. *Proceedings of the institution of mechanical engineers, Part M: Journal of engineering for the maritime environment*, published online.

Lisi, L., Cimino, S. 2020. Poisoning of SCR catalysts by alkali and alkaline earth metals. *Catalysts*, 10(12), article 1475.



Lloyd's register. 2012. Understanding exhaust gas treatment systems. Guidance for ship-owners and operators. London: Lloyd's register.

Maloni, M., Paul, J.A., Gligor, D.M. 2013. Slow steaming impacts on ocean carriers and shippers. *Maritime economics and logistics*, 15, 151–171.

MAN Energy solutions. 2020. EGR offered for dual-fuel ME-GA engine. Copenhagen: press release, 24.11.2020.

Mavrelou, C., Theotokatos, G. 2018. Numerical investigation of a premixed combustion large marine two-stroke dual fuel engine for optimizing engine settings via parametric runs. *Energy conversion and management*, 160, 48–59.

Mellqvist, J., Conde, V. 2021. Best practice report on compliance monitoring of ships with respect to current and future IMO regulation. Gothenburg: Chalmers university of technology.

Ni, P., Wang, X., Li, H. 2020. A review on regulations, current status, effects and reduction strategies of emissions for marine diesel engines. *Fuel*, 279, article 118477.

Osipova, L., Georgeff, E., Comer, B. 2021. Global scrubber washwater discharges under IMO's 2020 fuel sulfur limit. Washington DC: International council on clean transportation.

Paulsrud, H.M.J. 2015. A practical guide to Wärtsilä scrubber systems. *Marine engineering*, 50(3), 315–317.

Petrov, A.W., Ferri, D., Krumeich, F., Nachtegaal, M., van Bokhoven, J.A., Kröcher, O. 2018. Stable complete methane oxidation over palladium-based zeolite catalysts. *Nature communications*, 9, article 2545.

Pohtila, P. 2017. Laivan kokonaishyötysuhteen parantaminen. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Pulkkinen, A. 2016. Slow steamingin vaikutukset alukselle ja kuljetusketjuille. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Pruui, A., Trifan, A. 2009. Water based technologies used on diesel engines for the reduction of NO<sub>x</sub> emissions. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov, Series I: Engineering sciences*, 2(51), 389–396.

Radloff, E., Gautier, C. 2005. Diesel engine NO<sub>x</sub> reduction using charge air water injection. Proceedings of the ASME 2005 internal combustion engine division fall technical conference. ASME 2005 internal combustion engine division fall technical conference (ICEF2005), September 11–14, Ottawa, Canada.

Raiko, R., Lehtinen, M. 2002. Moottoritekniikan teknologiaohjelma ProMotor 1999-2003. Teknologiaohjelmaraportti 2/2004. Helsinki: Tekes.

Raptotasios, S.I., Sakellaridis, N.F., Papagiannakis, R.G., Hountalas, D.T. 2015. Application of a multi-zone combustion model to investigate the NO<sub>x</sub> reduction potential of two-stroke marine diesel engines using EGR. *Applied energy*, 157, 814–823.

Repka, S., Ojala, L., Jalkanen, J-P., Alhosalo, M., Niemi, J., Pöntynen, R., Solakivi, T., Pohjola, T., Haavisto, R., Lensu, M., Erkkilä-Välimäki, A., Haukioja, T., Kiiski, T. 2017. Merenkulun kansainvälisen ilmasto- ja ympäristösääntelyn vaikutukset Suomen elinkeinoelämälle. Helsinki: Valtioneuvoston selvitys- ja tutkimustoiminnan julkaisusarja 55/2017.

Safety4sea. 2021. Update: Scrubber discharges bans in ports. WWW-dokumentti. Viitattu 31.8.2022. Saatavissa: [safety4sea.com/update-scrubber-discharges-bans-in-ports/](https://www.safety4sea.com/update-scrubber-discharges-bans-in-ports/) (referred 2 Nov 2022)

Santalahti, A. 2017. Pakokaasupesurien erot suljetun kierron ja avoimen kierron välillä. Kotka: Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu.

Sarvi, A., Kilpinen, P., Zevenhoven, R. 2009. Emissions from large-scale medium-speed diesel engines: 3. Influence of direct water injection and common rail. *Fuel processing technology*, 90(2), 222–231.

Savila, M. 2017. Typpioksidien vähentäminen DWI-menetelmällä. Rauma: Satakunnan ammattikorkeakoulu.

Schmid, H., Weisser, G. 2005. Marine technologies for reduced emissions. Winterthur: Wärtsilä Switzerland Ltd.

Spooft-Tuomi, K. 2013. Laskentatyökalu laivojen rikkipesuri-investointien kannattavuudelle. Vaasa: Vaasan ammattikorkeakoulu.

Sun, X., Ning, J., Liang, X., Jing, G., Chen, Y., Chen, G. 2022. Effect of direct water injection on combustion and emissions characteristics of marine diesel engines. *Fuel*, 309, article 122213.

Sørgård, E., Mjelde, A., Sverud, T., Endresen, Ø. 2001. Technologies for reduction of pollution from ships. Report no. 99-2033. Oslo: Det Norske veritas, Norwegian research council.

Takasaki, K., Takaishi, T., Ishida, H., Tayama, K. 2003. Direct water injection to improve diesel spray combustion. Proceedings of the ASME 2003 internal combustion engine division spring technical conference. Design, application, performance and emissions of modern internal combustion engine systems and components. 11–14 May 2003, Salzburg, Austria.

Tran, T.A. 2017. Research of the scrubber systems to clean marine diesel engine exhaust gases on ships. *Journal of marine science: Research & development*, 7(6), article 1000243.

Tseng, H.H., Wey, M.Y., Lu, C.Y. 2010. The study of modified calcium hydroxides with surfactants for acid gas removal during incineration. *Environmental technology*, 23(1), 109–119.

Zannis, T.C., Katsanis, J.S., Christopoulos, G.P., Yfantis, E.A., Papagiannakis, R.G., Pariotis, E.G., Rakopoulos, D.C., Rakopoulos, C.D., Vallis, A.G. 2022. Marine exhaust gas treatment systems for compliance with the IMO 2020 global sulfur cap and TIER III NOx limits: A Review. *Energies*, 15, article 3638.

Zhou, S., Gao, R., Feng, Y., Zhu, Y. 2017. Evaluation of Miller cycle and fuel injection direction strategies for low NOx emission in marine two-stroke engine. *International journal of hydrogen energy*, 42(31), 20351–20360.

Zhu, S., Hu, B., Akehurst, S., Copeland, C., Lewis, A., Yuan, H., Kennedy, I., Bernards, J., Branney, C. 2019. A review of water injection applied on the internal combustion engine. *Energy conversion and management*, 184, 139–158.

Wiesmann, A. 2010. Slow steaming – a viable long-term option? *Wärtsilä technical journal 2/2010*, 49–55.

Wilewska-Bien, M., Lindgren, J.F., Magnusson, M., Zetterdahl, M., Salo, K., Gabriell, C., Granhag, L., Brynolf, S. 2016. Measures to reduce discharges and emissions. Teokses-sa Andersson, K., Brynolf, S., Lindgren, F., Wilewska-Bien M. (toim.), Shipping and the environment. Gothenburg: SpringerNature.

Winnes, H., Fridell, E., Moldanová, J. 2020. Effects of marine exhaust gas scrubbers on gas and particle emissions. *Journal of marine science and engineering*, 8(4), 299.

Worth, D.J., Stettler, M.E.J., Dickinson, P., Hegarty, K., Boies, A.M. 2016. Characterization and evaluation of methane oxidation catalysts for dual-fuel diesel and natural gas engines. *Emission control science and technology*, 2, 204–214.

Woodyard, D., Latache, M. 2009. Pounder's marine diesel engines and gas turbines. Oxford: Elsevier Science & Technology.

# PÄÄSTÖVÄHENNYSMENETELMIEN ELINKAARI- JA YMPÄRISTÖ- KUSTANNUSANALYYSI

Sirpa Rahiala



© Elias Altarriba

Tässä artikkelissa on esitelty päästövähennysmenetelmien elinkaari- sekä ympäristökustannusanalyysijä. Tällä hetkellä Itämeren alueella käytössä olevia päästövähennysmenetelmiä ovat esimerkiksi rikkirajoitusten täyttämiseksi vähärikkisen polttoaineen käyttö tai rikkipesurit ja  $\text{NO}_x$ -rajoitusten täyttämiseksi selektiivinen katalyyttinen pelkistys (Selective Catalytic Reduction, SCR) tai pakokaasujen takaisinkierätyks (Exhaust Gas Recirculation, EGR). Nesteytetyn maakaasun (LNG) avulla voidaan täyttää sekä rikki- että  $\text{NO}_x$ -rajoitukset. Eri vaihtoehtoja on käyty tarkemmin läpi loppuraportin artikkelissa “Päästövähennystekniikoiden vertailu”.

Elinkaariarviointi on standardoitu menetelmä, joka käsittelee tuotteen potentiaalisia ympäristövaikutuksia koko sen elinkaaren ajalta raaka-aineiden hankinnasta tuotantoon, käyttöön, käytöstä poistoon, kierrätykseen ja jätteiden loppusijoitukseen (ns. kehdesta hautaan). Myös eri elinkaaren osille voidaan laskea potentiaaliset ympäristövaikutukset, esim. alkutuotannosta portille (ns. kehdesta portille) tai portilta portille. Elinkaariarviointeja on hyödynnetty jo pitkään myös meriliikenteen ympäristövaikutuksia arvioitaessa, ja käytönaikaisen elinkaaren vaiheen on havaittu dominoivan päästöjen syntymistä (Chatziniolaou & Ventikos 2015, 119–120). Myös EU:ssa ollaan menossa kohti suuntaa, jossa eri vaihtoehtojen elinkaari-vaikutukset tulee huomioida. FuelEU Maritime -ehdotuksessa on nyt esitetty ilmaston lämpenemispotentiaalin osalta kertoimet eri elinkaari- vaiheille, joita tulisi käyttää eri polttoainevaihtoille (FuelEU Maritime 2021, Annex I–II).

Meriliikenteen elinkaarianalyysitutkimuksissa käytetty toiminnallinen yksikkö on usein ollut yksi tonnikilometri, joka on tavaraliikenteen mittayksikkö. Se edustaa yhden tonnin tavaroiden kuljetusta tietyllä kuljetusmuodolla yhden kilometrin etäisyydellä. Tutkimukset voidaan jaotella yleisesti kolmeen eri lähestymistapaan:

1. Koko laivan elinkaari sisältäen ympäristövaikutukset raaka-aineiden hankinnasta rakentamiseen, operointiin, huoltoon ja lopputuotteen hävitykseen tai kierrätykseen (Chatziniolaou & Ventikos 2015, 113–122; Jeong ym. 2018, 111–130).
2. Tuotetun polttoaineen elinkaari ("well-to-tank", WTT), joka sisältää pelkästään koko polttoaineen tuotantoketjun ympäristövaikutukset (Kesieme ym. 2019, 96–104).
3. Elinkaari polttoaineen käyttöön saakka (WTW "well-to-wake"), jossa otetaan huomioon polttoaineen valmistuksen ja kuljetuksen aikaiset potentiaaliset ympäristövaikutukset sekä polttoaineen käytöstä aiheutuvat vaikutukset (Bengtsson ym. 2011, 37–44; Ma ym. 2012, 301–308; Brynolf ym. 2014, 6–18).

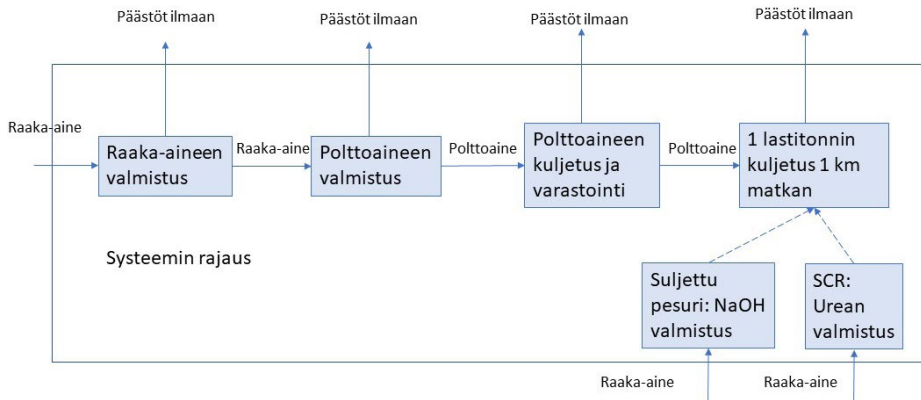
Laivan merkittävimpiä ilmapäästökomponeentteja ovat CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, hiukkaset ja musta hiili. Näitä on tarkemmin käyty läpi loppuraportin artikkelissa "Alusten pakokaasupäästöjen koostumus". LNG-laivoissa myös metaanivuodot eli CH<sub>4</sub>-päästöt voivat olla merkittäviä. Kirjallisuudessa laivojen elinkaarianalyysien ympäristövaikutusluokkiin on usein valittu globaali ilmaston lämpenemispotentiaali, happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaali, fotokemiallisen otsonin muodostuminen ja hiukkasmäärät sekä energiankulutus ja terveysvaikutukset. Ilmaston lämpenemispotentiaaliin vaikuttavat edellä mainituista komponenteista CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, hiukkaset sekä musta hiili, kun taas SO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub> vaikuttavat happamoitumiseen, NO<sub>x</sub> rehevöitymiseen sekä SO<sub>2</sub> ja NO<sub>x</sub> fotokemiallisen otsonin muodostumiseen.

Tässä tutkimuksessa elinkaarianalyysissä käytetään WTW-lähestymistapaa, jossa siis otetaan huomioon polttoaineen valmistuksesta ja käytön ajalta syntyvät päästöt. Vertailuun valitaan päästövähennystekniikoita, jotka ovat tällä hetkellä käytössä Itämerellä ja oletettavasti täyttävät sekä asetetut rikkirajoitukset että typenoksidirajoitukset (Tier III). Vertailuissa mielenkiintoisiksi kysymyksiksi nousee etenkin LNG:n tuottamat kasvihuonekaasupäästöt verrattuna muihin vaihtoehtoihin ja metaanivuodon vaikutus tuloksiin. Artikkelin ensimmäisessä luvussa on esitelty elinkaarianalyysin tuloksia valituille päästövähennysmenetelmille. Tässä artikkelissa esitetyt laskelmat eivät ole täydellisiä elinkaarianalyysijä, vaan ne sisältävät useita epävarmuuksia ja rajauksia tutkimuksen suhteen. Toisessa luvussa vaihtoehtoilta on tehty ympäristökustannusanalyysijä, jotta vaihtoehtojen kokonaisympäristövaikutuksia voitaisiin vertailla paremmin.

## Elinkaarianalyysit

Elinkaarianalyysin avulla voidaan arvioida nykyisten päästövähennystekniikoiden vaikutuksia laivan koko elinkaaren aikana sekä etsiä keinoja vähentää elinkaaren aikaisia ympäristövaikutuksia. Elinkaariarvioinnin tavoitteena on tutkia merikuljetusten ympäristövaikutuksia suhteessa valittuun päästövähennystekniikkaan ja polttoaineeseen. Tavoite määritellään seuraavalla kysymyksellä: ”Mikä nykyisistä vaihtoehtoista, joilla voidaan täyttää Itämeren päästörajoitukset, tuottaa pienimmät ympäristövaikutukset RORO-aluksella?”. Tutkimuksen tavoitteena on olla päätöksenteon tukena, kun varustamot miettivät polttoaineen ja/tai teknologian valintaa, jotta voivat mukautua IMO:n uusin ja nykyisiin vaatimuksiin. Tutkimuksen toiminnallinen yksikkö on yksi tonni lastia kuljetettuna 1 km normaaleissa meriolosuhteissa RO-RO-aluksella.

Tutkittavan järjestelmän rajaukset on esitetty kuvassa 1. Tutkittu järjestelmä sisältää polttoaineen tuotannon, kuljetuksen, varastoinnin ja lopulta polttamisen yhden tonnin lastin kuljettamiseen yhden kilometrin matkalla. Tutkimuksesta on rajattu pois jotkin elinkaaren osat, koska niitä pidetään joko merkityksettöminä tai liian monimutkaisina. Rajaukset voivat johtua myös siitä, että tietojen saaminen on vaikeaa tai ne ovat kaikissa vaihtoehtoissa samanlaisia. Tutkittava alustyyppi on matkustajalautta kaikissa vaihtoehtoissa, joten nämä samanlaiset elinkaaren pois jätettävät osat ovat laivan rakentaminen, ylläpito ja purkaminen. Lisäksi meriliikenteen elinkaaritutkimuksissa on havaittu, että käytönaikainen elinkaaren vaihe dominoi päästöjen syntymistä. Esimerkiksi CO<sub>2</sub>-päästöjen osalta 96 % muodostui käytöstä, 2 % laivan rakennuksesta, 0,9 % huollosta ja 0,8 % hävittämisestä (Chatzinikolaou & Ventikos 2015, 119–120).



**Kuva 1.** Polttoaineen elinkaari päästöt ilmaan raaka-aineen valmistuksesta polttoaineen käyttämiseen.

Elinkaarianalyysissä käytetään Spheran Gabi -ohjelmistoa. Datan laatuvaatimuksena on käyttää mahdollisimman tuoretta tietoa, joka on maantieteellisesti edustavaa. Vaikutusten arviointimenetelmänä käytetään CML 2001- Jan. 2016 versiota, ja menetelmästä voi lukea lisää esimerkiksi osoitteesta: [CML 2001 \(sphera.com\)](http://CML2001(sphera.com)). Tässä elinkaaritutkimuksessa otetaan huomioon seuraavat ympäristövaikutusluokat: ilmaston lämpenemispotentiaali (Global Warming Potential, GWP), happamoituminen (Acidification Potential, AP) ja rehevöityminen (Eutrophication Potential, EP). Lisäksi TRACI2.1-menetelmää (katso esim. [TRACI 2.1 \(sphera.com\)](http://TRACI2.1(sphera.com))) käytetään, kun arvioidaan vaikutusta ihmisten terveyteen (Human Health Particulate Air, HHPA).

Vertailuun otetaan mukaan kolme polttoainevaihtoehtoa: raskas polttoöljy (HFO), meriliikenteen kaasuöljy (MGO) sekä nesteytetty maakaasu (LNG). Raskaaseen polttoöljyyn yhdistetään joko avoin tai suljettu rikkipesuri. Typenoksidien vähennysmenetelmistä vertailuissa ovat mukana selektiivinen katalyyttinen pelkistys (Selective Catalytic Reduction, SCR) ja pakokaasujen takaisinkierätyks (Exhaust Gas Recirculation, EGR). Menetelmien oletetaan sopivan yhteen, vaikka todellisuudessa näiden yhdistelemisessä voi olla haasteita.

## Inventaarioanalyysi

Raskaan ja kevyen polttoöljyn tuotantotiedot perustuvat Euroopassa sijaitsevan öljynjalostamon Ecoinvent 3.6 –tietokantaan (Moreno-Ruiz & Weidema 2016, 1218-1230). Polttoaineen kuljetusmatkaksi oletetaan Rotterdam-Porvoo. Iso osa Eurooppaan tuotavasta LNG:stä on lähtöisin Algeriasta, ja muita suuria tuontimaita ovat myös Nigeria, Qatar ja Egypti (Bengtsson ym. 2011, 28). LNG:n tuotantomaiksi on nyt valittu Algeria ja Lähi-itä,



joiden oletetaan edustavan merkittävää osaa Eurooppaan tuotavasta LNG:stä. Myös LNG:n data-aineisto perustuu Ecoinvent 3.6 -tietokantaan (Moreno-Ruiz & Weidema 2016, 1218–1230).

Polttoaine oletetaan tuotavaksi Euroopasta, Rotterdamin satamasta Porvooseen, minkä jälkeen tehdään bunkrausmatka Porvoosta Helsinkiin. Bunkrausmatka on kaikille vaihtoehtoisille sama. LNG tuodaan joko Algeriasta tai Qatarista. Matkojen pituudet on arvioitu Marine Traffic -sivuston avulla ([www.marinetraffic.com](http://www.marinetraffic.com)).

Kaikissa vaihtoehtoisissa aluksen oletetaan olevan RO-RO-tyyppinen varustettuna keskinopeudella toimivalla mäntämoottorilla. Päästökertoimet ja ominaiskulutukset on arvioitu IMO:n viimeisimmän kasvihuonekaasuintentaarion pohjalta (Fourth IMO GHG Study 2020, 74). Energiankulutus on arvioitu Bengtsson ym. (2011, 37–44) mukaan.

Avoimen kierron pesurin oletetaan nostavan kulutusta 2 % ja suljetun kierron pesurin 0,75 % (Åström ym. 2018, Appendix Table A 16). Suljetun kierron pesurissa NaOH:n kulutukseksi oletetaan 15 l/MWh (Åström ym. 2018, Appendix Table A 16). NaOH:n tuotantotiedot on otettu Ecoinvent 3.6-tietokannasta (Moreno-Ruiz & Weidema 2016, 1218-1230). NaOH:n kuljetusta ei ole huomioitu analyysissä. Molemmissa vaihtoehtoisissa oletetaan 90 % vähennys SO<sub>2</sub>-päästöihin verrattuna peruspäästökertoimiin. Rikkipesureiden hiukkaspäästöjen voidaan olettaa vähenevän pesurissa esim. 32–43 % (Winnes ym. 2020, 1-21), mutta kirjallisuudessa luvuissa on esiintynyt paljon vaihtelua. Tässä tutkimuksessa on valittu 25 % hiukkasvähennys molempiin pesurivaihtoehtoihin.

SCR:n avulla oletetaan päästävän Tier III -rajoitukseen NO<sub>x</sub>-päästöjen osalta (IMO 2013, annex 7). Päästökertoimena käytetään Tier III -tasoa 2,6 g/kWh (IMO GHG Study 2020, 279). Urean kulutukseksi on esitetty kirjallisuudessa 15 g ureaa /kWh (Bengtsson ym. 2011, 12). Urean tuotantotiedot on otettu Ecoinvent 3.6 -tietokannasta (Moreno-Ruiz & Weidema 2016, 1218-1230). Urean kuljetusta ei ole huomioitu analyysissä. Lisäksi oletetaan, että SCR:n käytöstä syntyy ammoniakkipäästöjä 0,025 g/kWh (Bengtsson ym. 2011, Appendix B, XXV).

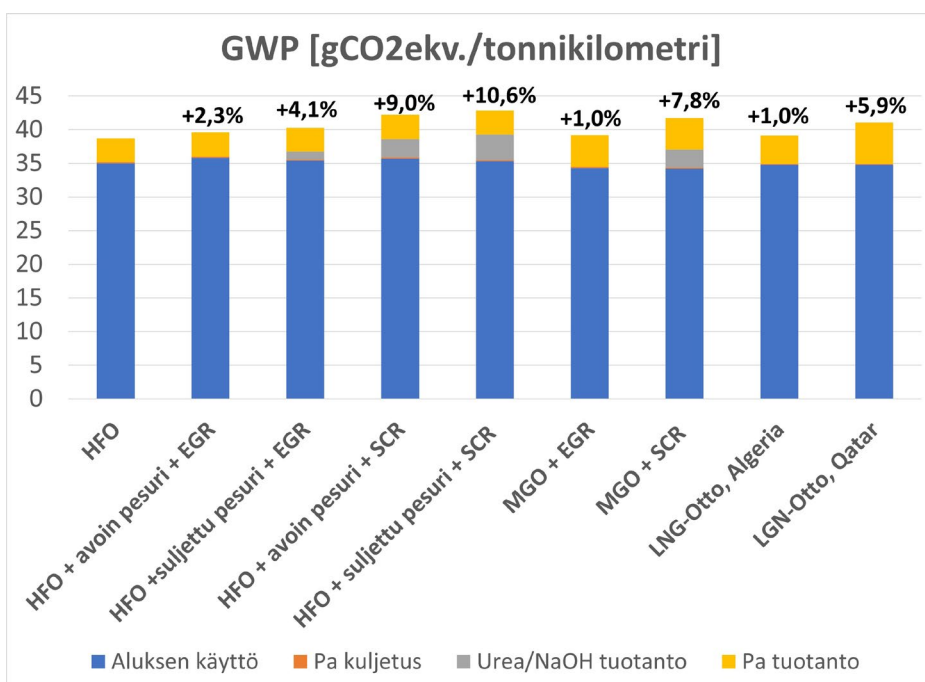
Nyt myös EGR:n avulla oletetaan päästävän Tier III -rajoitukseen NO<sub>x</sub>-päästöjen osalta, sillä raportissa (IMO 2013) EGR on listattu tekniikkana, jolla on potentiaali saavuttaa vuoden 2016 ja sitä myöhemmät Tier III -typenoksidien rajat joko yksinään tai yhdessä toisten ratkaisujen kanssa. EGR:n oletetaan lisäävän 0,3 % polttoaineen kulutusta (Winnes ym. 2016, Appendix B Table B.2).

## Vaikutusarviointi

Eri vaihtoehtojen ilmaston lämpenemispotentiaali on esitetty yksityiskohtaisemmin kuvassa 2. Kuvassa on esitetty myös vertailukohtana HFO-vaihtoehto, johon ei ole yhdistetty päästövähennystekniikkaa ja joka tuottaa kaikkein pienimmän ilmaston lämpenemispotentiaalin. Kuvista voidaan huomata, että ilmaston lämpenemispotentiaali vaihtelee maltillisesti eri päästövähennysmenetelmien välillä, ja pienimmän ja suurimman vaihtoehdon ero on alle 11 %. MGO varustettuna EGR:llä sekä LNG-Otto (Algeria) tuottavat samansuuruisen ja pienimmän ilmaston lämpenemispotentiaalin vaihtoehdoista, jotka täyttävät Itämeren typpi- ja rikkirajoitukset. Raskas polttoöljy yhdistettynä suljettuun pesuriin ja SCR-typenoksidivähennysmenetelmään tuottaa sitä vastoin kaikkein suurimman potentiaalin.

Jos verrataan pelkästään rikkirajoitukset täyttäviä dieselvaihtoehtoja eli MGO-vaihtoehtoa raskaan polttoöljyn ja suljetun tai avoimen pesurin yhdistelmään, havaitaan MGO:n tuottavan pienemmän GWP-arvon. Polttoaineen valmistuksesta johtuvat päästöt olivat kyllä isommat MGO-vaihtoehdossa verrattuna raskaaseen polttoöljyyn, mutta suurempi käytönaikainen polttoaineen kulutus ja kemikaalien tuotanto suljetussa pesurivaihtoehdossa johtavat pesurivaihtoehtojen suurempiin kokonaispäästöihin. Vertailtaessa avoimen ja suljetun pesurin vaihtoehtoja huomataan, että avoin pesuri aiheuttaa pienemmän GWP-tuloksen kuin suljettu pesuri eron ollessa alle 2 %. Typenoksidin vähennysmenetelmistä SCR tuottaa selkeästi suuremman ilmaston lämpenemispotentiaalin; ero EGR:n on yli 6 %.

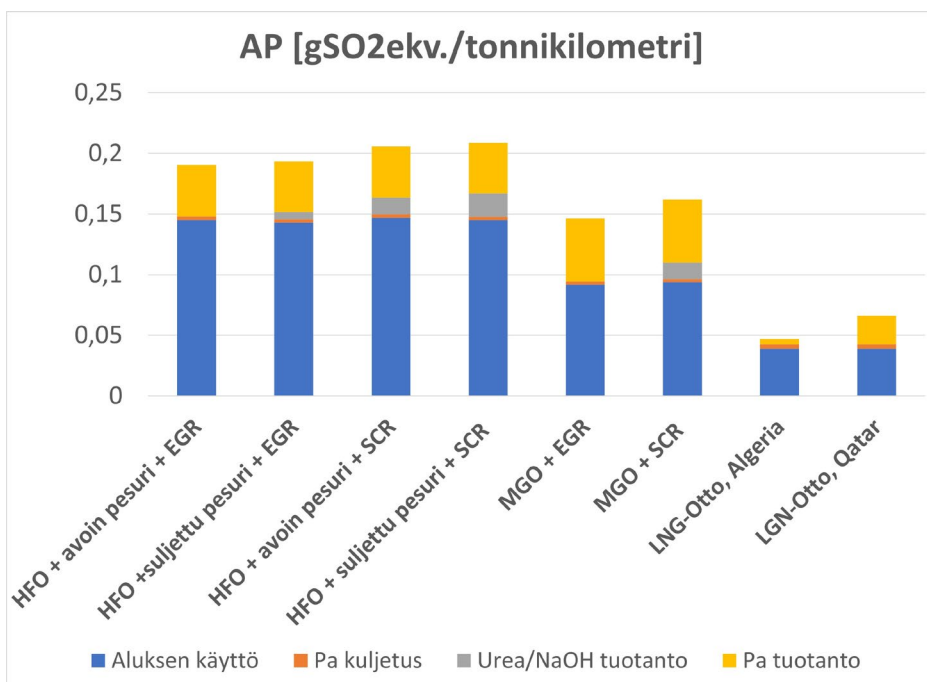
Tulokset on jaettu elinkaaren eri vaiheiden kesken: polttoaineen tuotanto ja kuljetus, mahdollinen kemikaalien tuotanto sekä käyttövaihe. Kuvasta 2 voidaan havaita, että käyttövaihe vaikuttaa eniten ilmaston lämpenemispotentiaaliin elinkaaren aikana kaikissa vaihtoehdoissa, ja kuljetuksen osuus on kaikissa vaihtoehdoissa alle 1 %. Polttoöljyvaihtoehdoissa polttoaineen tuotanto vastaa noin 10 % koko elinkaaren päästöistä meriliikenteen kaasuöljyn tuotannon osuuden ollessa hieman suurempi. LNG-vaihtoehdoissa polttoaineen tuotannon osuus on hieman suurempi eli noin 11–15 %. Käytön osuudeksi jää siten vaihtoehdosta riippuen 82–90 %. Urean tuotanto vastaa noin 6 % elinkaaren aikaisista päästöistä ja NaOH:n tuotanto alle 3 %.



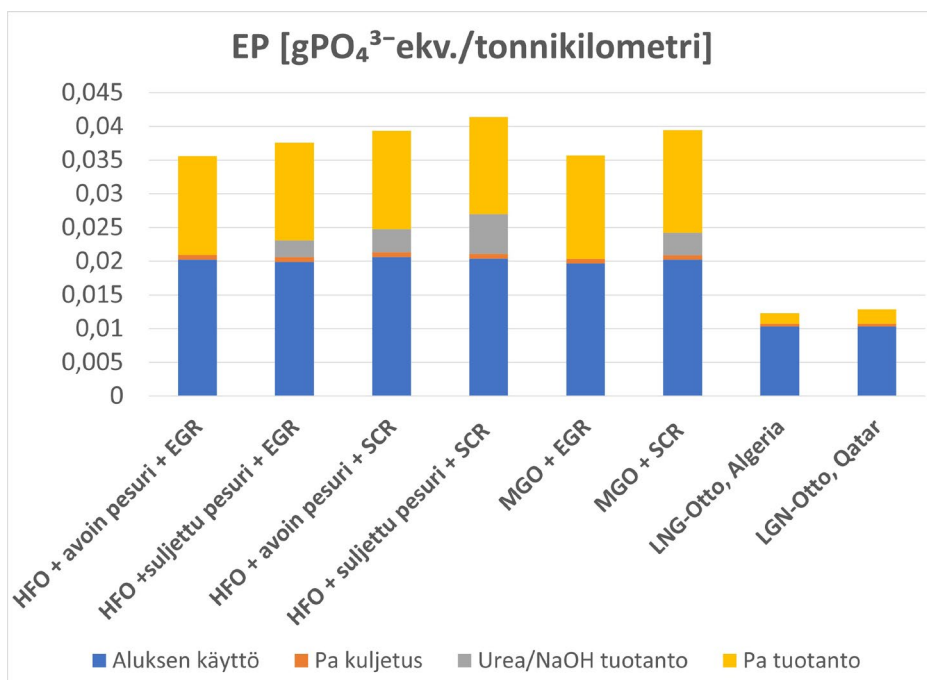
**Kuva 2.** Eri polttoaine- ja päästövähennysmenetelmien ilmastolämpenemispotentiaalit (GWP)

Rikki- ja typpirajoitukset täyttävien vaihtoehtojen happamoitumispotentiaali on esitetty kuvassa 3 ja rehevöitymispotentiaali kuvassa 4. LNG-vaihtoehtoilla on selvästi pienimmät happamoitumis- ja rehevöitymispotentiaalit. Käyttövaihe on hallitseva tekijä sekä happamoitumis- että rehevöitymispotentiaalissa kaikissa vaihtoehtoissa. Happamoitumispotentiaalissa käyttövaiheen osuus vaihtelee välillä 58–83 % kokonaisvaikutuksesta. HFO-vaihtoehtoilla käyttövaihe on kaikista merkittävin ja MGO-vaihtoehtoilla taas polttoaineen tuotannon aiheuttama happamoitumispotentiaali on muita vaihtoehtoja suurempi.

Koska valitut HFO- ja MGO-vaihtoehdot täyttävät Tier III -rajoitukset, käyttövaiheen osalta rehevöitymispotentiaal tulokset ovat hyvin samansuuruisia. Erot syntyvät polttoaineen ja tarvittavien kemikaalien tuotannon eroavaisuuksista. LNG:llä sekä käyttövaihe että polttoaineen tuotantovaihe on selkeästi pienempi verrattuna muihin polttoaineisiin niin happamoitumis- kuin rehevöitymispotentiaalissa. Eri päästövähennystekniikoita vertailtaessa havaitaan suljetun pesurin ja SCR:n arvojen olevan hieman korkeampia verrattuna avoimeen pesuriin ja EGR:n.

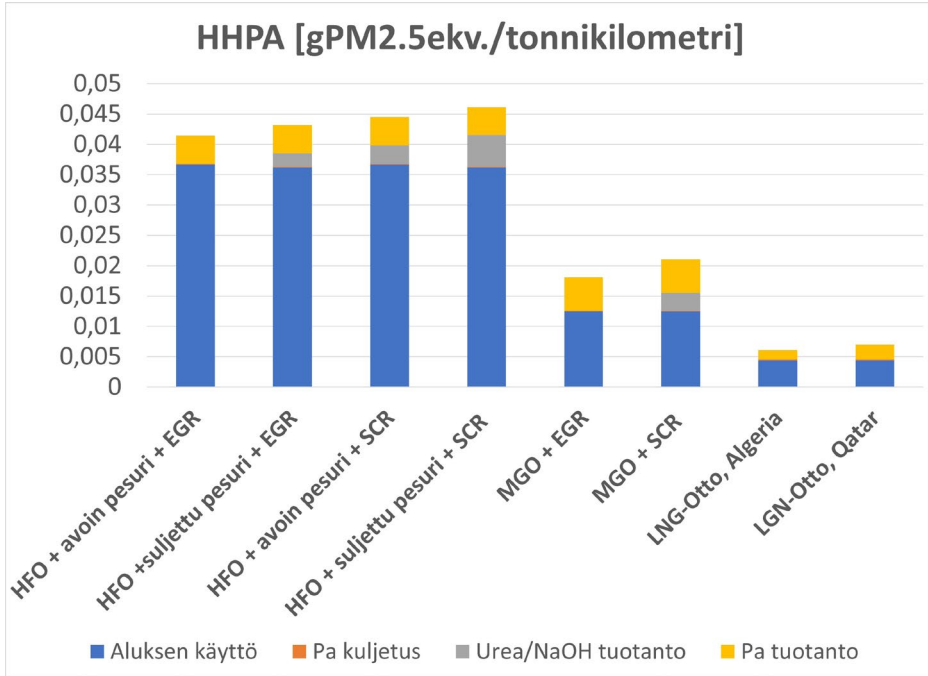


**Kuva 3.** Eri polttoaine- ja päästövähennysmenetelmien happamoitumispotentiaalit (AP)



**Kuva 4.** Eri polttoaine- ja päästövähennysmenetelmien rehevöitymispotentiaalit (EP)

Kuvassa 5 on esitetty HHPA-vaikutusluokan tulokset eri vaihtoehdoille. Tulokset jakautuvat hyvin eri polttoainevaihtoehtojen välillä: raskas polttoöljy tuottaa suurimmat arvot ja LNG kaikista pienimmät. MGO-vaihtoehtojen tulokset ovat merkittävästi raskasta polttoöljyä pienemmät. Kaikissa tapauksissa käyttövaihe on merkittävin elinkaaren vaiheista.



**Kuva 5.** Eri polttoaine- ja päästövähennysmenetelmien terveysvaikutuspotentiaalit (HHPA).

## Herkkyystarkastelut

Edellisten tulosten herkkyyttä tehdyille olettamuksille tarkasteltiin eri vaihtoehdoilla: NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmiä testattiin kahdella parametrilla, pesureita neljällä parametrilla ja LNG:tä metaanivuodon osalta kahdella arvolla. Taulukossa 1 on kuvattu tehtyjen herkkyyksianalyysojen perusteet.

NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmissä kirjallisuudessa on esitetty vaihtelevia arvoja; perustapauksessa polttoainenkulutuksen oletettiin lisääntyvän 0,3 % EGR:n johdosta, mutta 5 % arvo on myös esitetty EGR+WIF yhdistelmälle (Åström ym. 2018, Appendix Table A16). Samoin SCR:n urean kulutukselle on esitetty kirjallisuudessa pienempi arvo 6,5 g/kWh (Åström ym. 2018, Appendix Table A 16) verrattuna perustapaukseen 15 g/kWh.

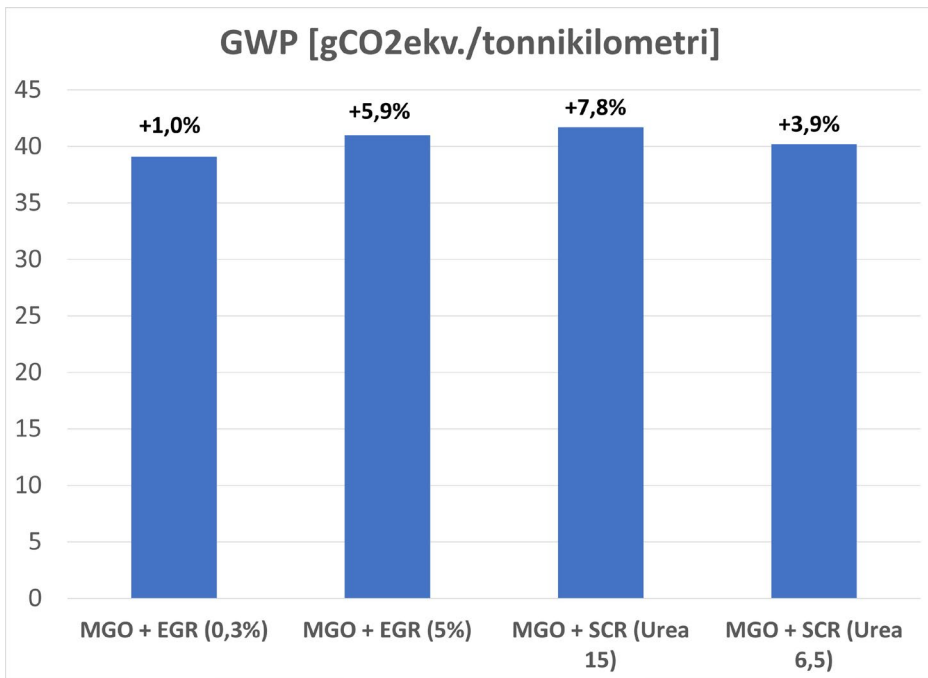
Suljetun pesurin aiheuttamalla vaikutukselle polttoaineenkulutukseen on esitetty vaihteluväliä 0,5–1 % ja avoimelle pesurille arvoa 2 %. Nyt herkkyystarkastelussa on testattu pienempiä arvoja verrattuna perustapauksiin. Myös NaOH:n kulutuksen vähentymisen vaikutusta on kokeiltu herkkyystarkastelussa. Hiukkasvähenemälle pesurissa on esitetty kirjallisuudessa hyvin vaihtelevia arvoja, joten myös suuremman vähenemän vaikutusta on nyt tutkittu.

LNG:tä käyttävän ottomoottorin metaanivuodolle on esitetty kirjallisuudessa myös suurempaa arvoa (6,9 g/kWh) (Stenersen & Thonstad 2017, 6), kuin mitä perustapauksessa (5,5 g/kWh) on käytetty. Myös mitattuja arvoja pienempää arvoa (3,5 g/kWh) eli potentiaalista vähennystä esim. katalyytin avulla on haluttu testata herkkyystarkastelussa.

**Taulukko 1.** Herkkyyssanalyysissä käytettyjen tyyppien oksidien päästövähennysmenetelmien kertoimet

<b>NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmät</b>	<b>Käytetty arvo (suluissa alkuperäinen)</b>
EGR:n aiheuttama kulutuksen lisäys	5 % (0,3)
Urean kulutus SCR:ssä	6,5 g/kWh (15)
<b>Pesurit</b>	
Avoimen pesurin aiheuttama kulutuksen lisäys	1,5 % (2)
Suljetun pesurin aiheuttama kulutuksen lisäys	0,5 % (0,75)
NaOH:n kulutus suljetussa pesurissa	6,5 g/kWh (15)
Hiukkasvähenemä pesurissa	50 % (25)
<b>LNG</b>	
LNG:n metaanivuoto	3,5 g/kWh (5,5)
LNG:n metaanivuoto	6,9 g/kWh (5,5)

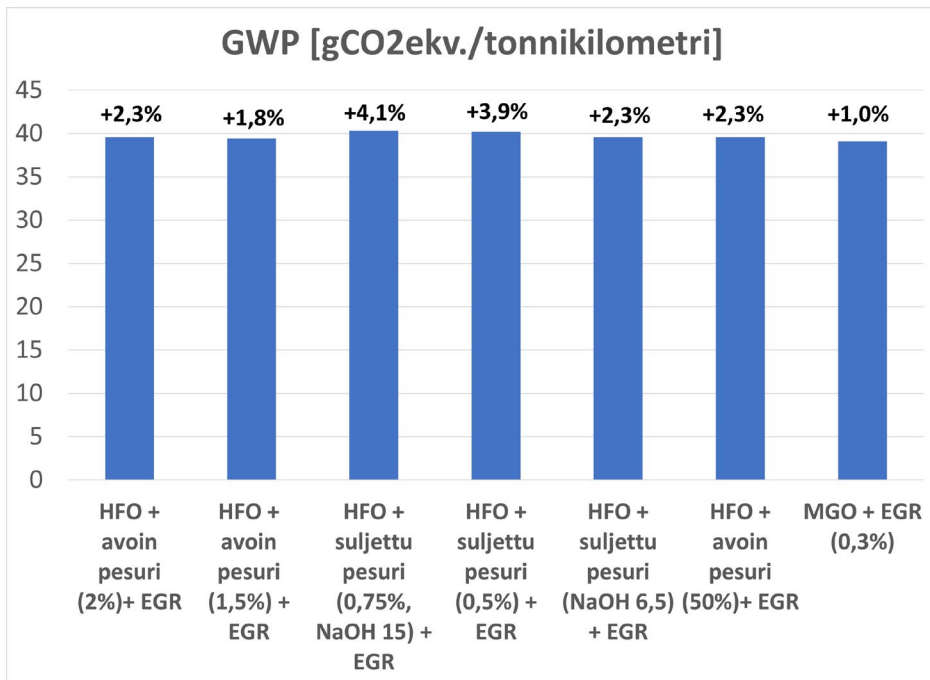
Kuvassa 6 on esitetty NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmissä testattujen muutosten vaikutus ilmaston lämpenemispotentiaaliin. Jos EGR:n vaikutusta kulutukseen kasvatetaan viiteen prosenttiin, EGR-vaihtoehtoon ja SCR:n ero kapenee huomattavasti. Vastaavasti, jos urean kulutusta pienennetään, SCR lähestyy alkuperäistä EGR-vaihtoehtoa ja antaa pienemmän arvon kuin mitä EGR suurella kulutuksella (5 %).



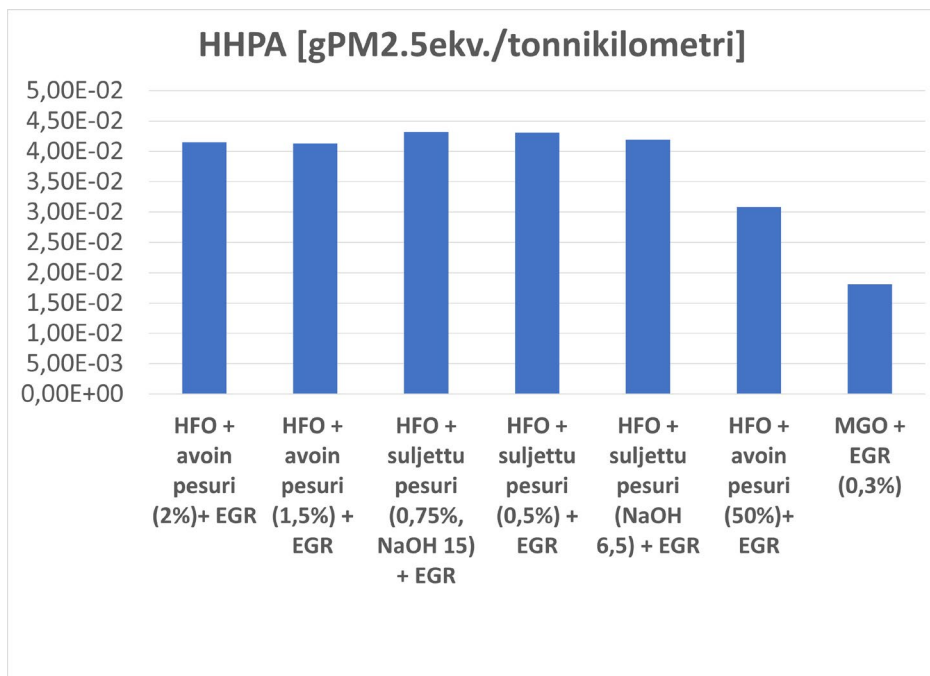
**Kuva 6.** NOx-vähennysmenetelmille tehdyn herkkyystarkastelun tulokset GWP:n suhteen MGO-opperoinnissa

Kuvassa 7 on havainnollistettu pesureihin tehtyjen oletusten vaikutusta ilmaston lämpenemispotentiaaliin. Suljetulla pesurilla voitaisiin mahdollisesti päästä samanlaiseen lukemaan avoimen pesurin kanssa, jos NaOH:n kulutus pienenesi riittävästi. MGO tuottaa kaikista alhaisimman potentiaalin huolimatta herkkyystarkastelun pienemmistä parametreista pesureissa. Ero on kuitenkin pienimmällään alle prosentin, joten muutokset polttoaineen tuotannon päästöissä voivat helposti muuttaa suhteita.

Yhdellä vaihtoehdoista (pesurissa tapahtuva hiukkasvähenemä) ei oletettukaan olevan vaikutusta ilmaston lämpenemispotentiaalin vaan HHPA-potentiaalin (kuva 8), mutta tulos on kuitenkin esitetty vertailussa. HHPA-potentiaali pienenee selkeästi, jos oletetaan pesurin vähentävän merkittävästi enemmän hiukkasia perustapaukseen verrattuna. MGO-vaihtoehto tuottaa kuitenkin kaikista pienimmän potentiaalin dieselvaihtoehdoista.



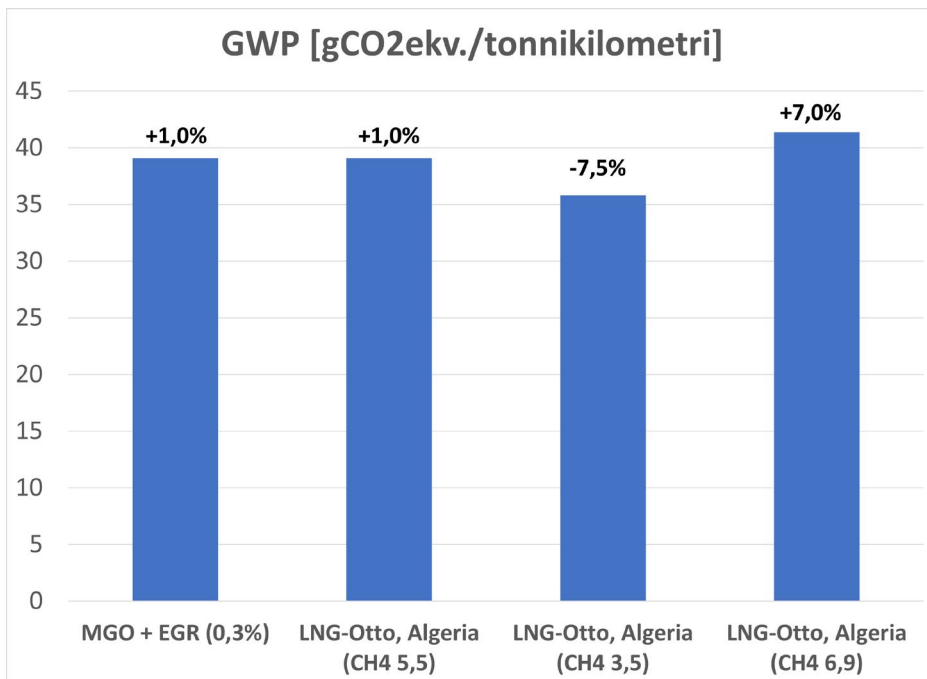
**Kuva 7.** Eri rikkipesurivaihtoehdoille tehdyn herkkystarkastelun tulokset GWP:n suhteen



**Kuva 8.** Eri rikkipesurivaihtoehdoille tehdyn herkkystarkastelun vaikutukset HHPA-potentiaaliin



Viimeisen herkkyystarkastelun eli LNG:n metaanivuodon vaikutus ilmaston lämpenemispotentiaaliin on esitetty kuvassa 9. Valitut vuotoarvot tuottavat noin 15 % vaihtelun tuloksiin, eli LNG voi tuottaa dieselvaihtoehtoa joko selkeästi suuremman tai pienemmän potentiaalin riippuen oletetusta vuodosta.



**Kuva 9.** LNG:n metaanivuodon herkkyystarkastelun tulokset GWP:n suhteen

## Tulosten tulkinta

Tämän työn tarkoituksena on vertailla nykyisiä meriliikenteen päästövähennysmenetelmiä suhteessa Itämeren rajoituksiin. Toisin sanoen työssä tutkitaan, millä menetelmällä voidaan täyttää rajoitukset ja saavuttaa pienimmät kokonaisympäristövaikutukset RORO-aluksella. Työssä rakennettiin vaihtoehdoille elinkaarianalyysimalli, jossa otetaan huomioon polttoaineen tuotanto ja kuljetus sekä käyttövaihe ja lisäksi huomioidaan päästövähennysmenetelmissä käytettyjen kemikaalien tuotanto ja vaikutus polttoaineen kulutukseen. Aineistona on pyritty käyttämään sekä ajallisesti että paikallisesti mahdollisimman validia dataa. Työn tuloksia analysoidaan ja johtopäätöksissä on hyvä muistaa, että elinkaarianalyysissa tutkitaan aina mahdollisia vaikutuksia eikä todellisia toteutuvia vaikutuksia. Työn tuloksista on tarkoitus viestiä eri sidosryhmille ja päätöksentekijöille. Tuloksia hyödynnetään myös ympäristökustannusanalyysissä, joka esitetään artikkelin seuraavassa luvussa sekä

päästövähennysmenetelmien vertailutyökalussa, joka on esitetty loppuraportin artikkelissa “Päästövähennysmenetelmien taloudellisen ja ympäristösuorituskyvyn vertailu”.

Analyysiin valitut vaikutusluokat ovat ilmaston lämpenemispotentiaali GWP, happamoitumispotentiaali AP, rehevöitymispotentiaali EP ja ihmisten terveys HHPA. Tärkein elinkaaren vaihe kaikissa vaihtoehdoissa ja vaikutusluokissa on käyttövaihe. GWP tulokset vaihtelevat välillä 39,1 ja 42,8 g<sub>CO<sub>2</sub>ekv.</sub>/tonnikilometri, ja arvot ovat suurusluokaltaan samantaisia kuin kirjallisuudessa on aiemmin esitetty (Bengtsson ym. 2011, 38). LNG ei näytä tuottavan etua verrattuna dieselvaihtoehtoihin ilmaston lämpenemispotentiaalin suhteen.

Näihin tekniikoihin liittyy kuitenkin tiettyjä oletuksia esim. vaikutuksesta kulutukseen, jotka voivat vaikuttaa vertailusta saatuihin tuloksiin ja päätelmiin, sillä erot vaihtoehtojen välillä ovat hyvin pieniä. Tähän vertailuun oli valittu esimerkiksi 25 % hiukkasvähenemä pesureissa, mutta todellisuudessa vähenemä voi vaihdella hyvinkin paljon. Nyt herkkyystarkastelun avulla on pyritty saamaan käsitys joidenkin merkittävien oletusten vaikutuksesta tuloksiin.

Herkkyystarkastelun perusteella havaitaan, että typenoksidin vähennysmenetelmien välinen ero voi keikahtaa kumpaankin suuntaan vain, vaikka perustapauksissa EGR on parempi mitä SCR. Siten ei voida varmuudella sanoa, kumpi vaihtoehdoista on parempi. Rikin vähennystekniikoiden vertailussa avoimella pesurilla voidaan mahdollisesti saavuttaa pienempi ilmaston lämpenemispotentiaali verrattuna suljettuun pesuriin myös herkkyystarkastelun perusteella. MGO:lla on dieselvaihtoehdoista mahdollisesti pienin ilmaston lämpenemispotentiaali. Herkkyystarkastelussa tarkasteltiin myös pesurin hiukkasvähenemän vaikutusta HHPA-vaikutusluokkaan ja havaittiin sen muuttavan merkittävästi tuloksia. LNG:stä tehdyt päätelmät ilmaston lämpenemispotentiaalin suhteen vaikuttavat olevan hyvin riippuvaisia oletetusta metaanivuodosta.

Myös AP-, EP- ja HHPA-vaikutusluokkien tulosten välillä havaittiin merkittäviä eroja. Herkkyystarkastelussa ei nyt huomioitu näitä vaikutusluokkia, paitsi edellä mainittu pesurin hiukkasvähenemän vaikutus HHPA-vaikutusluokkaan. LNG-vaihtoehdot antavat näissä vaikutusluokissa aina pienimmät tulokset. Dieselvaihtoehdoista MGO yhdistettynä EGR:n antaa kaikista pienimmät kokonaisvaikutukset, jos näitä kolmea vaikutusluokkaa (AP, EP, HHPA) tarkastelee yhdessä. Näissä vaikutusluokissa EGR:n ja avoimen pesurin avulla voidaan saavuttaa päästörajoitustavoitteet ja pienemmät potentiaalit verrattuna SCR:n ja suljettuun pesuriin.

Kirjallisuudessa on tehty vertailuja päästövähennysmenetelmien eroista ilmaston lämpenemispotentiaalin sekä muiden ympäristövaikutusluokkien suhteen. Tutkimustuloksia LNG:n haasteista kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä ovat esittäneet mm. Brynolf ym. (2014, 6–18), Gilbert ym. (2018, 855–866), Lindstad & Riialand (2020, 1–15) ja Pavlenko (2020, 1–40). Lisäksi Lindstad & Riialand (2020, 4–13) ja Ma ym. (2012, 301–308) tutkimusten mukaan MGO-polttoainetta käyttävät alukset tuottivat enemmän kasvihuonekaasupäästöjä verrattuna aluksiin, jotka käyttävät raskasta polttoöljyä ja pesuria. Bengtsson ym. (2011, 38) on kuitenkin esittänyt tuloksia, joissa raskas polttoöljy yhdistettynä pesuriin tuotti suuremmat kasvihuonekaasupäästöt verrattuna MGO-polttoaineen käyttöön.

Tulokset vastaavat hyvin pitkälti kirjallisuuden perusteella tehtyjä odotuksia; LNG näyttäytyy haastavana polttoaineena ilmaston lämpenemispotentiaalin suhteen vaikka tuottaakin selvästi etua muiden ympäristövaikutusluokkien suhteen. Tässä tutkimuksessa MGO tuotti pienemmän ilmaston lämpenemispotentiaalin verrattuna pesurivaihtoehtoihin, mutta erot olivat hyvin pieniä.

MGO yhdistettynä EGR:n vaikuttaa vaihtoehtoista myös mielenkiintoiselta LNG:n mahdollisen potentiaalin lisäksi. MGO:n ilmaston lämpenemispotentiaali voi olla maltillinen, samalla kun muiden vaikutusluokkien osalta tulokset ovat kohtuullisia. Erot eri vaihtoehtojen välillä ovat kuitenkin suhteellisen pieniä, joten tehtyjen oletusten suhteen tulee olla hyvin tarkkana ja niiden vaikutus tehtäviin päätelmiin tulee huomioida. Kokonaistarkasteluun vaikuttaa suuresti myös se, mikä on tavoiteltu potentiaali muiden ympäristövaikutusluokkien osalta. Esimerkiksi terveystaustien osalta LNG voi tuottaa selvää etua muihin vaihtoehtoihin verrattuna, mutta happamoitumisen ja rehevöitymisen osalta tulee miettiä, tavoitellaanko maksimaalista vähennystä ilmaston lämpenemispotentiaalin kustannuksella.

## Ympäristökustannusanalyysit

Meriliikenteen erilaisten päästövähennysmenetelmien vertailun tueksi tarvitaan tietoa sekä menetelmien vaatimista kustannuksista että ilmapäästöjen aiheuttamista kustannuksista. Kustannus-hyötyanalyysin, joka tehdään ilmanlaatua koskevan politiikan kehittämisen tukemiseksi, tarkoituksena yleisesti on tunnistaa erilaisia vaihtoehtoja, jotka aiheuttavat vähiten kustannuksia yhteiskunnalle (Holland ym. 2013, 2, 91, 92).

Ilman epäpuhtaudet, kasvihuonekaasut sekä muut ympäristöä pilaavat aineet voivat esimerkiksi vahingoittavaa ihmisten terveyttä, aiheuttaa materiaalivahinkoja, tuhota ekosysteemejä ja vähentää luonnon monimuotoisuutta. Näitä vahinkoja voidaan arvioida kustannuksina

tieteellisillä menetelmillä, ja menetelmät auttavat vertailemaan ihmisten terveyden ja ympäristön pilaantumisen kustannuksia sekä ympäristön- ja terveyden suojelun kustannuksia. Analyysissä on hyvä muistaa, että vaikka on mahdollista mitata joitakin terveydelle ja ympäristölle aiheutuvia vahinkoja, kaikkia vaikutuksia ei voida kuitenkaan määrällisesti mitata, ja siten analyysi on rajoitettu arvio vaikutuksista ja sisältää paljon epävarmuuksia. (Holland ym. 2013, 1–92.)

Tässä työssä on esitetty edellisen luvun päästövähennysmenetelmävaihtoehtojen ympäristökustannuslaskentoja, joiden tarkoituksena on vertailla eri vaihtoehtojen kokonaisvai-  
kutuksia. Aluksi on selvitetty kirjallisuudessa esitettyjä kustannuksia ilmapäästöille, joita aiheutuu alusten käytöstä ja tehty niistä yhteenvedoa.

## Kirjallisuudessa esitetyt ilmapäästöjen aiheuttamat kustannukset

Hiilidioksidin vähentämisen hyötyä voidaan arvioida hiilen sosiaalisen kustannuksen avulla (social cost of carbon, SC-CO<sub>2</sub>/SCC). SC-CO<sub>2</sub> on tarkoitettu kattavaksi arvioksi ilmas-  
tonmuutoksesta aiheutuvista vahingoista, ja kustannus kuvaa pitkäaikaista vahinkoa, joka aiheutuu tonnista hiilidioksidipäästöä tietyssä vuonna dollareina mitattuna. Yhdysvaltojen ympäristönsuojeluvirasto (US EPA) on käyttänyt hiilen sosiaalista kustannusta sääntöjen ja standardien laadinnassa jo yli kymmenen vuoden ajan kustannusten vaihdellessa välillä 42–69 \$<sub>2007</sub>/tCO<sub>2</sub>. US EPA on esittänyt vastaavia arvoja myös metaanin ja typpioksiduu-  
lin haittojen kustannuksille (1200–2500 \$<sub>2007</sub>/t<sub>CH<sub>4</sub></sub> ja 15 000–27 000 \$<sub>2007</sub>/t<sub>N<sub>2</sub>O</sub>). (US EPA 2017.) IPCC (2007) on myös esittänyt erilaisia arvioita SC-CO<sub>2</sub>:lle vaihteluvälillä 4–95 US \$/t<sub>CO<sub>2</sub></sub>. Vuodelle 2030 arviot vaihtelevat välillä 8–189 US \$/t<sub>CO<sub>2</sub></sub> (IPCC 2007).

Holland ym. (2013, 6) ovat jaotelleet muiden ilmapäästöjen (partikkelit, SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, VOC ja NH<sub>3</sub>) vaikutukset seuraaviin ryhmiin: terveys, maataloustuotanto, materiaalit, ekosys-  
teemit, näkyvyys, muutokset khk-päästöissä, juomaveden saatavuus ja laatu. Ilmapäästöjen vaikutuksille terveyteen on käytössä erilaisia vaihtoehtoja, kuten, elinvuoden arvo (Value of a life year, VOLY) ja tilastollisen eliniän arvo (Value of Statistical Life, VSL). Holland ym. (2013, 43) esittää VOLY:n arvoksi 57 700/ 138 700 €<sub>2005</sub> ja VSL:n 1,09/2,22 milj. €<sub>2005</sub>.

Saksan ympäristökeskus (UBA) on äskettäin julkaissut metodologisen yleissopimuksen 3.0, jossa se on päivittänyt suosituksensa ympäristövahinkojen arvioimiseksi ja mukauttanut ympäristövaikutusten kustannuksia (Matthey & Bungler 2019, 1–42). Tässä yleissopimuksessa on esitetty suuri joukko parametrejä ympäristön pilaantumisen kustannusten laskemiseksi, kuten vahingoittuneiden rakennusten ja infrastruktuurien kunnostuskustannukset, sadon

menetysten ja tuotannon menetysten markkina-arvo sekä summa, jonka ihmiset olisivat valmiita maksamaan terveydelle aiheutuvien vahinkojen välttämiseksi. UBA:n arvot kustannuksille ovat Saksan päästöjen keskiarvoja, ja UBA:n suosituksen mukaan esimerkiksi yksi tonni hiilidioksidiekvivalenttipäästöjä aiheuttaa ympäristökustannuksia noin 180 euroa (taulukko 2) (Matthey & Bungler 2019, 7–9).

Taulukossa 3 esitetään Saksassa ”tuntemattomista lähteistä” peräisin olevien päästöjen keskimääräiset ympäristökustannukset kyseistä ilmapäästöä kohti. UBA suosittelee käyttämään näitä keskiarvoja karkeaan arviointiin ilman epäpuhtauksien vahinkokustannuksista, jos päästöjen lähteistä ei ole saatavilla tarkkoja tietoja. (Matthey & Bungler 2019, 11–12.)

**Taulukko 2.** Esimerkki UBA:n suositukseksi ilmastokustannuksiksi  $\text{€}_{2016}/\text{t}_{\text{CO2eq}}$ .  
Lähde: Matthey & Bungler 2019, 7–9.

2016	2030	2050
180	205	240

**Taulukko 3.** Keskimääräinen ilmapäästöjen ympäristökustannus tuntemattomasta lähteestä  $\text{€}_{2016}/\text{t}_{\text{päästö}}$ . Lähde: Matthey & Bungler 2019, 11–12.

Päästö	Terveyshaitta	Biodiversiteetin vähenemä	Satovahinko	Materiaalivahinko	Yhteensä
PM <sub>2.5</sub>	58 400	0	0	0	58 400
PM <sub>karkea</sub>	960	0	0	0	960
PM <sub>10</sub>	41 200	0	0	0	41 200
NO <sub>x</sub>	14 400	2600	800	130	17 930
SO <sub>2</sub>	13 600	1000	-160	600	15 040
NM <sub>VO</sub> C	1 100	0	950	0	2 050
NH <sub>3</sub>	21 700	10 400	-100	0	32 000

Kirjallisuudessa on esitetty joitakin laivaliikenteeseen liittyviä hyöty-kustannusanalyyskejä Itämeren ympäristössä. Åström ym. (2018, 223–236) ovat tutkimuksessaan arvottaneet ilmastonmuutoksen vaikutukset kolmella hinnalla, EU päästökaupan perusteella tutkimuksen aikana olleella  $7 \text{€}_{2010}/\text{t}_{\text{CO2}}$ , tulevaisuuden päästökauppa hinta-arviona  $2030 \text{€}_{2010}/\text{t}_{\text{CO2}}$  ja Ruotsin CO<sub>2</sub>-veron perusteella  $105 \text{€}_{2010}/\text{t}_{\text{CO2}}$ . Arvioissa ei ole mukana happamoitumiseen, rehevöitymiseen, biologiseen monimuotoisuuteen ja muihin ekosysteemipalveluihin aiheutuvia rahallisia vaikutuksia. Satovahinkojen arvioimiseksi he käyttävät arviona 35 and  $146 \text{€}_{2010}/\text{t}_{\text{NOx}}$ . VSL-arvona he käyttävät  $1\,218\,000\text{--}3\,130\,000 \text{€}_{2010}$  per vältetty kuolema ilmansaasteiden vähentyessä ( $45\,000\text{--}155\,000 \text{€}_{2010}$  ilmaistuna VOLY:na).

Ytreberg ym. (2021, 1-10) ovat tuoreessa artikkelissaan arvioineet alusten päästöjen ympäristövaikutuksia kustannuksina. Vaikutusluokkina heillä on meren ekotoksisuus ja rehevöityminen sekä ilmastonmuutos ja heikentynyt ilmanlaatu. Ilmanlaadun ja ilmastonmuutoksen vahinkojen laskemiseen he käyttivät NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, PM<sub>2,5</sub>, CO, NMVOC ja CO<sub>2</sub>-päästöjen määriä. Ytreberg ym. (2019, 5) esittävät työssään vahinkokustannuksiksi Itämeren vuoden 2018 päästöille seuraavaa: NO<sub>x</sub> 1–6 €/2010/kg, PM<sub>2,5</sub> 6–30 €/2010/kg, SO<sub>2</sub> 4–19 €/2010/kg ja NMVOC 0,3–0,4 €/2010/kg. Taulukossa 4 tulokset on jaettu tulosten eettisen näkemysten eroavaisuuksien vuoksi VOLY ja VSL-arvoihin. He käyttivät laskelmissaan säteilypakotuksen taloudelliselle arvolle: 34 US \$<sub>2010</sub>/t<sub>CO2eq</sub>. (Ytreberg ym. 2021, 3–5.)

**Taulukko 4.** Arvioidut terveyteen liittyvistä vahingoista aiheutuvat kustannukset (€/2010/t<sub>päästö</sub>). Lähde: Ytreberg ym. 2021, 5.

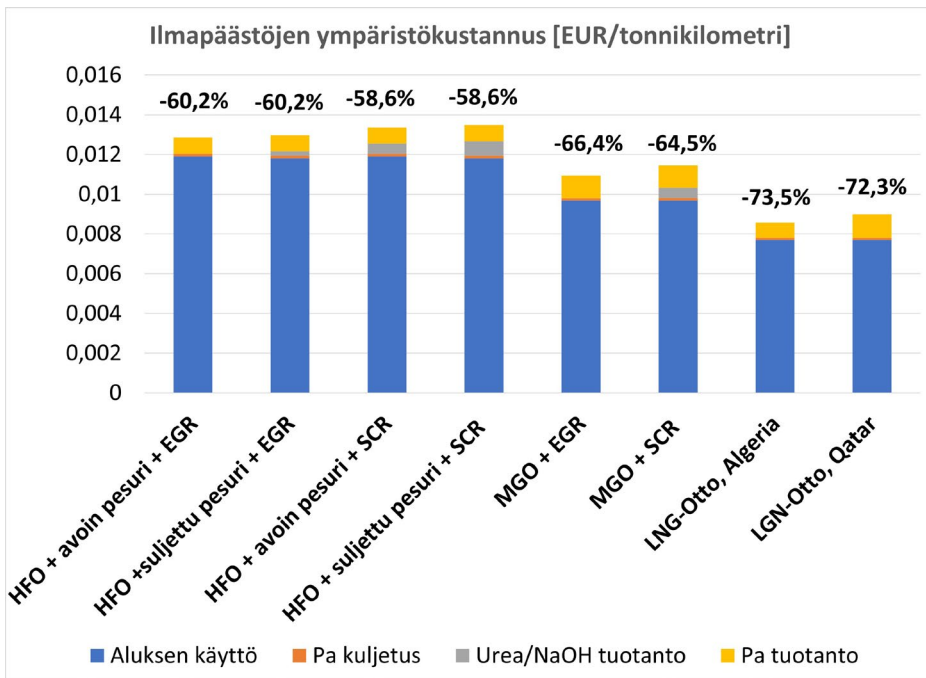
	VOLY	VSL
PM <sub>2,5</sub>	7 000 (6 000-15 000)	24 000 (13 000-30 000)
NO <sub>x</sub>	2 000 (1 000-3 000)	5 000 (3 000-6 000)
SO <sub>2</sub>	5 000 (4 000-10 000)	15 000 (8 000-19 000)
VOC	300 (300-400)	300 (300-400)

## Ympäristökustannusanalyysin tulokset

Tässä osiossa on vertailtu vaihtoehtoja, jotka on esitelty edellisessä luvussa. Ympäristökustannusten arvioinnissa on käytetty Gabi-ohjelmiston ilmapäästöjen ympäristökustannusarvoja ("Environmental cost of air emission", UBA, version 3.0, 2019). Vertailtaessa edellä esitettyjä Itämeren alueella tehdyissä tutkimuksissa käytettyjä arvoja UBA:n antamiin arvoihin havaitaan, että UBA:n arvot ovat kautta linjan korkeammat.

Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty tulokset vaihtoehtoissa, jotka täyttävät Itämeren SO<sub>2</sub>- ja NO<sub>x</sub> (Tier III) -rajoitukset. Vertailun vuoksi kuvassa on myös esitetty prosentuaaliset vähenemät jokaiselle vaihtoehdolle verrattuna HFO-vaihtoehtoon ilman päästövähennysmenetelmiä. Päästövähennystekniikkaa käyttävät HFO-vaihtoehdot antavat kaikkein suurimmat ympäristökustannukset vaihtoehtoista, joilla voidaan täyttää nykyiset rajoitukset.

LNG-laivat tuottavat sitä vastoin selkeästi pienemmät ympäristökustannukset, ja Algeriassa tuotetulla LNG:llä saavutetaan kaikkein pienimmät ympäristökustannukset. Vaihtoehto antaa noin 13 % pienemmän ympäristökustannuksen verrattuna parhaaseen HFO-vaihtoehtoon ja noin 7 % pienemmän verrattuna parhaaseen MGO-vaihtoehtoon. Tulokset vastaavat hyvin edellisessä luvussa esitettyjä tuloksia eri vaikutusluokkien osalta. LNG antoi muissa vaikutusluokissa selvästi pienemmät arvot, vaikka ilmaston lämpenemispotentiaali oli samaa suuruusluokkaa muiden vaihtoehtojen kanssa.

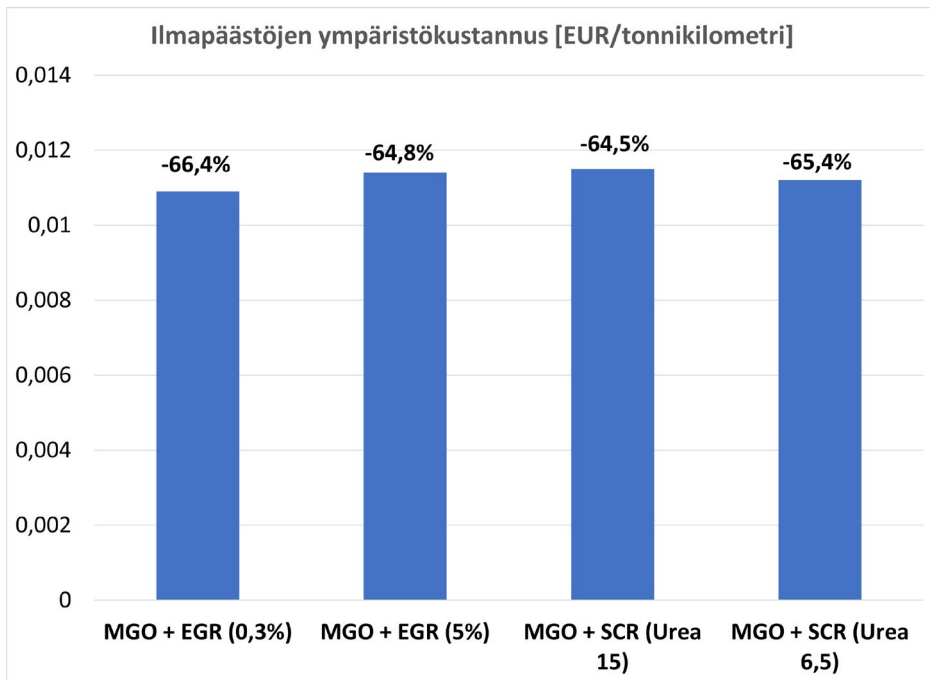


**Kuva 10.** Ilmapäästöjen ympäristökustannukset eri vaihtoehdoille

## Herkkyystarkastelun ympäristökustannusanalyysin tulokset

Edellisessä luvussa esitettyjen herkkyystarkastelujen (taulukko 1) vaikutus ympäristökustannuksiin on esitetty kuvissa 11–13. Kuvissa on myös esitetty prosentuaaliset vähenemät jokaiselle vaihtoehdolle verrattuna HFO-vaihtoehtoon ilman päästövähennysmenetelmiä.

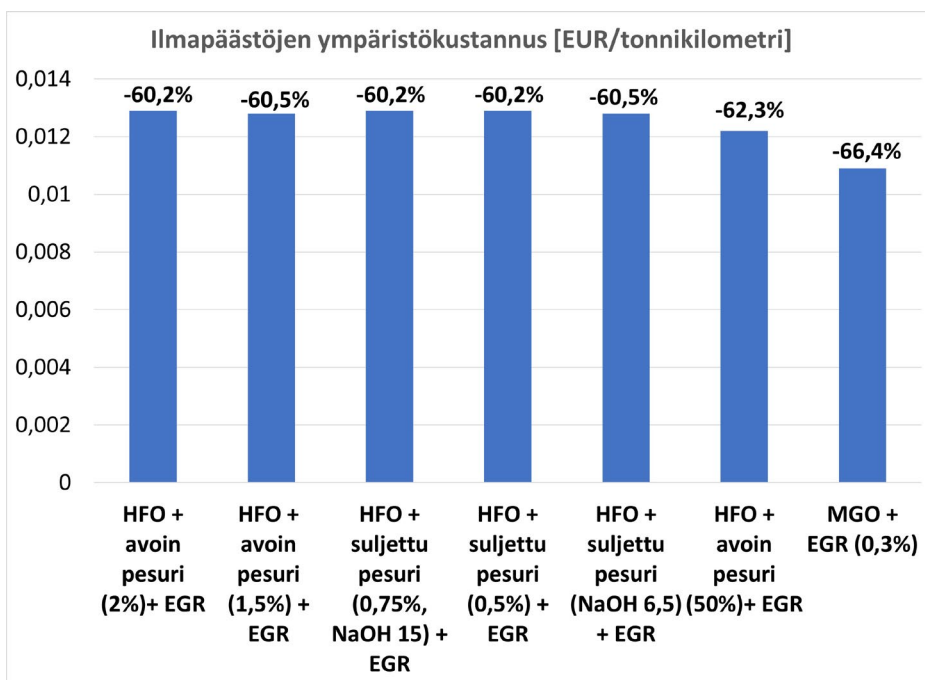
NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmien osalta erot eri vaihtoehtojen välillä ovat hyvin pieniä, alle 2 %. Tulokset vastaavat myös hyvin ilmaston lämpenemispotentiaalin osalta tehtyjä päätelmiä; EGR voi antaa pienimmän vaikutuksen, mutta lähtöoletukset vaikuttavat SCR:n ja EGR:n väliseen eroon helposti.



**Kuva 11.** Ilmapäästöjen ympäristökustannukset NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmien herkkyystarkasteluille

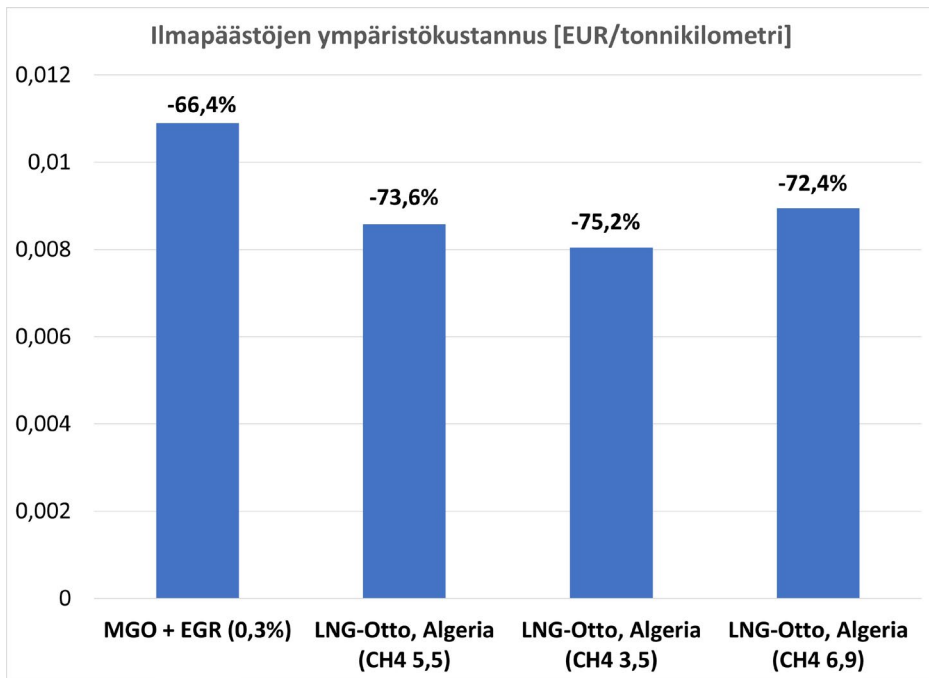
Pesureiden osalta herkkyystarkastelun vaikutus ympäristökustannuksiin on hyvin pieni. Vaikka pesurin aiheuttamaa muutosta kulutukseen tai kemikaalikulutusta vaihdellaan, erot tulosten välillä ovat alle prosentin. Sen sijaan hiukkasvähenemän muutos 25 %:sta 50 %:iin pienentää useamman prosenttiyksikön ympäristökustannuksia. Vertailun vuoksi kuvassa on myös MGO:n ympäristökustannus vastaavalla NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmällä. MGO antaa noin 6 % pienemmän tuloksen, vaikka ero ilmaston lämpenemispotentiaaliin esim. avoimen pesurin osalta oli vain noin 1 %. Ero johtuu siis MGO-vaihtoehdon muiden ilmapäästöjen pienemmistä tuloksista (esimerkiksi pienemmistä hiukaspäästöistä).





**Kuva 12.** Ilmapäästöjen ympäristökustannukset pesurien herkkyystarkasteluille

Kuvassa 13 on esitetty LNG:n herkkyystarkastelun vaikutus ilmapäästöjen ympäristökustannuksiin. Vaikka suurempi metaanivuoto aiheutti merkittävästi MGO-vaihtoehtoa suuremman ilmaston lämpenemispotentiaalin (kuva 9), LNG:n ympäristökustannukset ovat aina selkeästi pienimmät (yli 5 %). Tämä johtuu siitä, että LNG:n muut ilmapäästöt, kuten  $\text{NO}_x$ -,  $\text{SO}_2$ -, ja hiukkaspäästöt, ovat pienemmät kuin muilla vaihtoehdoilla, mikä kompensoi kasvihuonekaasujen vaikutusta ympäristökustannuksissa.



**Kuva 13.** Ilmapäästöjen ympäristökustannukset LNG:n herkkyystarkasteluille

## Yhteenveto

Tässä luvussa on esitetty elinkaarianalyysilaskentojen ympäristökustannusvaikutukset edellisessä luvussa esitetyille vaihtoehdoille, jotka täyttävät Itämeren tämänhetkiset päästörajoitukset. Oletuksena näissä laskelmissa on, että alus on RORO-tyyppinen keskinopeusmoottorilla varustettu alus, joka operoi Itämeren alueella. Vertailussa oli siis mukana dieselpolttoaineista rikkirajoitukset täyttävät raskas polttoöljy (HFO) yhdistettynä pesuriin ja meriliikenteen kaasuöljy (MGO). Dieselvaihtoehtoihin on yhdistetty NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmistä joko SCR tai EGR, joiden oletetaan täyttävän Tier III -rajoitus. Nesteytetty maakaasu (LNG) on myös mukana vertailussa ja sen oletetaan täyttävän rajoitukset ilman muita päästövähennysmenetelmiä. Ympäristökustannuslaskelmien tarkoituksena on pystyä vertailemaan eri vaihtoehtojen kokonaisvaikutuksia eikä vain yhtä vaikutusluokkaa, esim. ilmaston lämpenemispotentiaalia.

Laskentatulosten perusteella voidaan todeta, että pienempiin ympäristökustannuksiin päästään LNG-vaihtoehdoilla riippumatta esim. herkkyystarkastelun metaanivuodosta. Dieselvaihtoehtoista MGO antaa pienemmän ympäristökustannuksen kuin HFO yhdistettynä pesuriin, vaikka pesureihin liittyviä oletuksia muokattiin. Pesureiden hiukkas-

vähennemä oli merkittävin muuttuja, jolla saatiin eroa pienennettyä. Muuten pesureihin liittyvien oletusten vaikutus niiden ympäristökustannusten väliseen eroon oli hyvin pieni. Ympäristökustannusten perusteella tehtävät päätelmät vastaavat edellisessä luvussa tehtyjä päätelmiä NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmien ilmastolämpenemispotentiaalin osalta; vähennysmenetelmiin liittyvät oletukset voivat muuttaa vaihtoehtojen paremmuusjärjestyksen kumpaan suuntaan vain.

## LÄHTEET

Bengtsson, S., Andersson, K., Fridell, E. 2011. Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion. Report No. 11:125. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Brynolf, S., Magnusson, M., Fridell, E., Andersson, K. 2014. Compliance possibilities for the future ECA regulations through the use of abatement technologies or change of fuels. *Transportation Research Part D*, 28, 6–18.

Chatzinikolaou, S.D., Ventikos, N.P. 2015. Holistic framework for studying ship air emissions in a life cycle perspective. *Ocean Engineering*, 110, 113–122.

US EPA. 2017. The Social Cost of Carbon. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/climatechange/social-cost-carbon_.html)

FuelEU Maritime. 2021. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. WWW-dokumentti. Viitattu 14.7.2021. Saatavissa: [https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu\\_maritime\\_-\\_green\\_european\\_maritime\\_space.pdf](https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf) [viitattu 4.8.2021].

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.

Holland, M.R., Pye, S., Jones, G., Hunt, A., Markandya, A. 2013. The ALPHA Benefit Assessment. Model European Consortium for Modelling of Air Pollution and Climate Strategies – EC4MACS. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [ec4macs.eu/content/report/EC4MACS\\_Publications/MR\\_Final%20in%20pdf/Alpha\\_Methodologies\\_Final.pdf](http://ec4macs.eu/content/report/EC4MACS_Publications/MR_Final%20in%20pdf/Alpha_Methodologies_Final.pdf)

IMO 2013. Final report of the Correspondence Group on Assessment of Technological Developments to Implement the Tier III NO<sub>x</sub> Emission Standards under MARPOL Annex VI. MEPC 65/4/7 (8 February 2013).

International maritime organization IMO. 2020. Fourth IMO GHG Study 2020. London: IMO.

IPCC. 2007. Cost-benefit analysis, damage cost estimates and social costs of carbon. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [https://archive.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg3/en/ch3s3-5-3-3.html](https://archive.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg3/en/ch3s3-5-3-3.html)

Jeong, B., Wang, H., Oguz, E., Zhou, P. 2018. An effective framework for life cycle and cost assessment for marine vessels aiming to select optimal propulsion systems. *Journal of Cleaner Production*, 187, 111–130.

Kesieme, U., Pazouki, P., Murphy, A., Chrysanthou, A. 2019 Attributional life cycle assessment of biofuels for shipping: Addressing alternative geographical locations and cultivation systems. *Journal of Environmental Management*, 235, 96–104.

Lindstad, E., Riialand, A. 2020. LNG and Cruise Ships, an Easy Way to Fulfil Regulations—Versus the Need for Reducing GHG Emissions. *Sustainability*, 12, article 2080.

Ma, H., Steernberg, K., Riera-Palou, X., Tait, N. 2012. Well-to-wake energy and greenhouse gas analysis of SOX abatement options for the marine industry. *Transportation Research Part D*, 17, 301–308.

Matthey, A, Bungler, B. 2019. Methodological Convention 3.0 for the Assessment of Environmental Costs. Cost Rates. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [www.umweltbundesamt.de/publikationen](http://www.umweltbundesamt.de/publikationen)

Moreno-Ruiz, E., Weidema, B. 2016. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230.

Pavlenko, N., Comer, B., Zhou, Y., Clark, N., Rutherford, D. 2020. The climate implications of using LNG as a marine fuel. International Council on Clean Transportation Working Paper 2020–02.

Stenersen, D., Thonstad, O. 2017. GHG and NO<sub>x</sub> emissions from gas fuelled engines. Mapping, verification, reduction technologies. Report number OC2017 F-108, version 3.0. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [www.nho.no/siteassets/nox-fondet/rapporter/2018/methane-slip-from-gas-engines-mainreport-1492296.pdf](http://www.nho.no/siteassets/nox-fondet/rapporter/2018/methane-slip-from-gas-engines-mainreport-1492296.pdf)

Winnes, H., Fridell, E., Yaramenka, K., Nelissen, D., Faber, J., Ahdour, S. 2016. NO<sub>x</sub> controls for shipping in EU Seas. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. Report number: U 5552.

Winnes, H., Fridell, E., Moldanová, J. 2020. Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 1–21.

Ytreberg, E., Åström, S., Fridell, E. 2021. Valuating environmental impacts from ship emissions – The marine perspective. *Journal of Environmental Management*, 282, article 111958.

Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E., Holland, M. 2018. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation Research Part D*, 59, 223–236.

# PÄÄSTÖMITTAUKSET

Elias Altarriba & Marko Piispa



© Elias Altarriba

Päästömittausten tavoitteena on havainnoida savukaasukoostumusta. Mittausten toteuttaminen on tarkasti säänneltyä, jotta tulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoisia. Meriliikenteessä päästömittauksia voidaan tehdä akkreditoiteja varten, jolloin tavoitteena on osoittaa uuden tai olemassa olevan aluksen täyttävän säädösten asettamat päästövaatimukset. Esimerkiksi jälkiasenteisten päästövähennysjärjestelmien asentamisen jälkeen mittauksilla varmistetaan järjestelmän oikea toimivuus ja säädösten täyttyminen. Luokituslaitos tarvitsee tätä tietoa antaessaan alukselle uuden luokitustodistuksen. (Korhonen, 2002, 1–17.)

Merenkulun ominaispiirteitä ovat pitkään olleet kansainvälisyys, autonomisuus, vapaus, konservatiivisuus ja hierarkkisuus. Meret ovat yhdistäneet kaukanakin olevia valtioita toisiinsa, ja kansainvälisillä merialueilla ovat saaneet vapaasti liikkua kaikkiin maihin liputetut alukset. Myös aikana, jolloin etenkin tavallisten ihmisten matkustaminen oli vähäistä, merenkulkijoille kansainvälisessä ympäristössä toimiminen ympäri maailmaa sijaitsevina

satamiseen ja kulttuureineen oli arkipäivää. Laivat ovat myös olleet hyvin autonomisia yhteisöjä: ennen radiolaitteiden kehittymistä varustamalla ei käytännössä ollut mahdollisuutta olla yhteydessä aluksiinsa merelle lähdön jälkeen ja tämänkin jälkeen mahdollisuudet ovat olleet rajattuja. Sittemmin viestintälaitteiden ja tiedonvälityksen kehittymisen seurauksena autonomia on kaventunut huomattavasti, millä on ollut oma merkittävä osansa muun muassa globaalien logistiikkaketjujen tehostumisessa. Toimintaympäristö on osaltaan vaikuttanut siihen, että merenkulkuala on ollut varsin perinteitä kunnioittava ja hierarkkinen niin aluksilla, satamissa, varustamoissa kuin yhteistyösuhteissa viranomaisiin.

Kansainvälinen turvallisuussopimuskulttuuri merenkulussa on kehittynyt asteittain. Pääsääntelyn mahdollisti sopimusorganisaatioiden ja kansainvälisten hallintorakenteiden kehittyminen toisen maailmansodan jälkeen, kun vuonna 1948 perustettiin YK:n alainen IMCO (UK Chamber of shipping, 2017), josta vuonna 1959 kehittyi nykyinen IMO (IMO-News, 2008). IMCO:n saavutuksena oli muun muassa vuoden 1954 OILPOL-sopimus, jonka tavoitteena oli ehkäistä öljypäästöjä meriin (IMCO, 1954). Sopimusta on myöhemmin täydennetty. IMO:n MARPOL 73/78-sopimus täydennyksineen on laajentanut ympäristösäännöstöä huomattavasti (IMO, 1973): sopimuksen liite 1 käsittelee öljypäästöjen ehkäisyä ja liite 2 nestemäisten irtolastien turvallisuutta. Molemmat astuivat alun perin voimaan vuonna 1983. Vuonna 1992 voimaan astunut liite 3 käsittelee vaarallisten kappaletavara-lastien turvallisuutta ja liite 4 (2003) jätevesien käsittelyä. Kiinteiden jätteiden käsittelyä koskeva liite 5 on astunut voimaan vuonna 1988. Merenkulun ilmapäästöjä käsittelevä liite 6 on solmittu alun perin vuonna 1997, ja se on astunut voimaan vuonna 2005. Tämän jälkeen liitteitä on täydennetty useasti.

MARPOL-sopimuksen liite 6 määrittää siis kansainväliset raamit merenkulun ilmapäästöille (IMO, 1997). Sopimus sisältää muun muassa varustamojen velvoitteet alusten polttoaineen kulutuksen seurantaan ja asettaa energiatehokkuusmääräykset aluksille. Tähän perustuvat muun muassa alusten suunnittelua ohjaavat EEDI (energy efficiency design index) -säännökset (IMO, 2011). Sopimus antaa puitteet rajoittaa TVOC-päästöjä kansallisesti, ja siinä kielletään otsonikerrosta tuhoavien laitteiden (CFC ja halonit) asentaminen aluksiin 19.5.2005 jälkeen (IMO, 1997). Lisäksi HCFC:tä sisältävien laitteiden asennuskielto on astunut voimaan 1.1.2020. Rikkidioksidipäästöille asetettiin globaalit rajat, jolloin polttoaineiden enimmäisrikkipitoisuus asetettiin 3,5 %. Tätä rajaa tiukennettiin 1.1.2020 globaalisti 0,5 %, ellei käytössä ole rikkipesureita (IMO, 2020a). Näiden lisäksi alueellisesti voidaan sopia tiukemmistakin rikkipäästörajoituksista: esimerkiksi Itämeri on ollut vuodesta 2015 rikkirajoitusalue, missä polttoaineen enimmäisrikkipitoisuus on 0,1 %, mikäli käytössä ei ole rikkipesureita. MARPOL-sopimus asettaa säännökset hiukkaspäästöille ja määrittää uusille dieselmoottoreille NO<sub>x</sub>-päästörajoitukset.



Typen oksidien päästörajoitukset määritellään kolmella TIER-luokalla (IMO, 1997). TIER 1 -luokkaan kuuluvat asennusvuosimallien 2000–2011 yli 130 kW meridieselmoottorit ja sellaiset vuosimallien 1990-1999 meridieselit, joiden teho on yli 5000 kW tai sylinterilavuus yli 90 litraa. TIER 2 kattaa kaikki yli 130 kW meridieselit, jotka on asennettu aluksiin vuoden 2011 jälkeen. TIER 3 -luokkaan kuuluvat sellaiset yli 130 kW meridieselit, jotka on asennettu aluksiin vuoden 2016 alkaen ja jotka operoivat Pohjois-Amerikan NECA-alueilla, tai vuoden 2021 jälkeen asennetut vastaavan tehoiset moottorit, jotka operoivat Itämeren tai Pohjanmeren NECA-alueilla. TIER-rajoitukset perustuvat niiden NO<sub>x</sub>-päästöjen enimmäismäärään suhteessa moottorin tehoon, jotka moottori saa tuottaa määrättyllä kierrosluvulla (IMO, 1997). Tämä tekee rajoituksen käytännön valvonnan haastavaksi, sillä typen oksidipäästöjä valvottaessa on oltava tieto myös aluksen moottorin kierroksista ja kuormituksesta. Käytännössä rajoitusten valvonta painottuikin luokituksen yhteydessä tehtäviin päästömittauksiin.

Muita päästösäädöksiä ovat muun muassa vuonna 2015 käyttöön otettu EEDI-suunniteluindeksi, jonka tavoitteena on parantaa uusien alusten energiatehokkuutta. Vastaavasti nykyisille aluksille on tarkoitus ottaa käyttöön EEXI-indeksi vuonna 2023. (IMO, 2011.) Yli 5000 GT:n aluksille otetaan käyttöön vuonna 2022 hiili-intensiteetti-indeksi CII, jonka mukaan jokainen alus luokitetaan A:sta E:hen (IMO, 2020b). Euroopan unionin MRV-asetus määräsi alusten vuosittaisen polttoaineen kulutuksen raportoitavaksi vuonna 2018 (EU, 2015, luku 2). Mikäli Fit for 55-säädösehdotuksen sisältämä päästökaupan laajentaminen meriliikenteeseen toteutuu EU:n suunnitteleamalla tavalla, laajenee päästökauppa meriliikenteeseen asteittain vuosina 2023–2026, ja todennus perustuu nimenomaan MRV-raportointiin (EU, 2022). Lisäksi monia muitakin säädöksiä on, kuten EU:n energiaverodirektiivi, energiatehokkuusdirektiivi, ehdotettu asetukset meriliikenteen vaihtoehtoisista polttoaineista, maasähköstä ja vaihtoehtoisten polttoaineiden jakeluinfran laajentamisesta. Rajoituksia ja säädöksiä siis riittää, niin velvoitettuja, vapaaehtoisia, alueellisia kuin globaalejakin.

Nykyaikaisella aluksella pakokaasujen koostumusta mitataan automaattisesti osana puhdistusjärjestelmien toiminnan ohjaamista ja toimivuuden valvontaa. Nämä mittalaitteet on integroitu aluksen järjestelmiin, ja järjestelmästä riippuen ne keskittyvät yleensä vain toiminnan kannalta keskeisten päästökomponenttien havainnointiin (Schmid & Weisser, 2005, 1-12). Esimerkiksi SRC-katalyysaattorialuksissa urearuiskutuksen säätäminen vaatii jatkuvaa päästömittausdataa. Mikäli järjestelmän antama data on syystä tai toisesta virheellistä, säädetään katalyysaattorin ureansyöttöä väärin, jolloin katalyysaattorin puhdistuskyky heikkenee ja ammoniakkipäästöt mahdollisesti kasvavat. Pahimmillaan (myös) komponenttien ikäänntyminen nopeutuu merkittävästi. Päästöjen havainnointijärjestelmien ylläpito ja huolto on siis tärkeää. Erityisesti meridieselien pakokaasut sisältävät paljon hiukkasia, jotka tukkivat suotimia ja mittasondeja. Myös järjestelmän kalibrointi on oleellista tehdä määräajoin.

Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulun Kymilabs-päästömittauslaboratorio on FINAS-akkreditoitu päästömittauslaboratorio (Kymilabs, 2022). Akkreditointi antaa mahdollisuuden tehdä monenlaisia akkreditoituja mittauksia niin laivoilla kuin teollisuudessakin. Yleisimpiä syitä päästömittauksille ovatkin erilaiset järjestelmien käyttöönottomittaukset, kausittaiset seurantamittaukset ja mittaukset, jotka tehdään viranomaisille luovutettavia sertifikaatteja varten. Kokemusta mittaustoiminnasta Kymilabsilla on yli 20 vuotta.

Mittausten onnistuminen on kiinni monesta asiasta, mutta yleisesti ottaen oleellista on mahdollisimman häiriötön ja homogeeninen kaasuvirtaus mittauskohdassa. Parhaassa tapauksessa korsteenissa on tähän tarkoitukseen suunnitellut ja toteutetut mittaussyhteet, mutta monissa tapauksissa näin ei kuitenkaan ole. Mittaussondi asennetaan yhteeseen huolellisesti ja mahdollisimman tiiviisti, jotta vuotovirtaukset saadaan minimoitua. Erittäin tiivistä hiukkasmittauksia tehtäessä on tärkeää varmistua näytteenoton edustavuudesta, näytteenottolinjan tiiveydestä ja vältettävä suuttimen seinämäkosketuksia. Suuttimen, sondin ja suotimen lämpötilaa on valvottava kastepistehaittojen ehkäisemiseksi, ja ennen kaasumäärämittausta näytekaasut on kuivattava. Sondin suutin aiheuttaa aina jonkin verran imuvaikutusta johtuen virtauskanavan alipaineesta, ja mittaussyhteessä mahdollisesti ilmenevät vuodot voivat laimentaa näytettä. Todennäköisiä mittausepävarmuuden lähteitä ovat laitteiston likaantuminen, kalibroidun nollapisteen toleranssit ja muu mittalaitteisiin liittyvä kohina, ympäristöolosuhteet, mahdolliset häiritsevät komponentit sekä kalibrointikaasujen epätarkkuus erityisesti seoskaasujen osalta. Kaikki nämä vaikuttavat mittausten toistettavuuteen ja tulosten lineaarisuuteen. Lisäksi sinänsä pienten häiriölähteiden yhteisvaikutus voi joissain tapauksissa muodostua yllättävän suureksi.

Suorittaessa päästömittauksia aluksilla perusongelmana on dieselmoottorien tuottamat hiukkaspäästöt, jotka tukkivat mittalaitteet ja aiheuttavat näin epävarmuutta tuloksiin. Typen oksidit eivät reagoi mittaolosuhteissa oikeastaan minkään muun aineen kanssa. Näistä  $\text{NO}_2$  on vesiliukoinen, mutta se ei yleensä aiheuta ongelmia mittausten suhteen. Sitä vastoin rikkidioksidi liukenee veteen, minkä vuoksi näytekaasun on pysyttävä kuumana, jotta ongelmia ei ilmene. Lämpötilan laskiessa  $300\text{--}400^\circ\text{C}$  asteesta  $50^\circ\text{C}$  asteeseen reagointia tapahtuu jo jonkin verran. Tarvittaessa näytekaasu on siis lämmitettävä uudelleen ennen johtamista mittaustiloihin. Käytännössä mittalaitteiden puhdistus on tärkeää, jotta ongelmia ei ilmene: järjestelmät on huollettava vähintään viikoittain, tarvittaessa useamminkin.



**Kuva 1.** Mittauslaitteet toiminnassa. Kuva: Elias Altarriba

Kymilabsilla on käytössä päästömittauksiin Horiba PG350-analysaattori (kuva 1), joka on kompakti ja liikuteltavissa oleva mittauslaitteisto. Kyseisellä analysaattorilla on mahdollista mitata suoraan yleisimmät päästökomponentit valitulla otosvälillä ja tallentaa ne datamuotoon. Mittauslaitteisto kalibroidaan kalibroitikaasulla, ja laite tarvitsee toimiakseen verkkovirtaa (230 V). Lämmitysaika on noin 30 minuuttia. Taulukossa 1 on esitetty mittausjärjestelmän keskeiset ominaisuudet:

**Taulukko 1.** Horiba-mittausjärjestelmän ominaisuudet ja mittausprosessia määrittävät standardit

Kaasu	Menetelmä	Standardi	Mittausväli	Kalibrointi
NOx	Kemiluminesenssi	SFS-EN 14792	0-2500 ppm	0/200 ppm
SO <sub>2</sub>	IR-absorptio	CEN/TS 17021:2017	0-3000 ppm	0/100 ppm
CO	IR-absorptio	SFS-EN 15058	0-5000 ppm	0/100 ppm
CO <sub>2</sub>	IR-absorptio	ISO 12039	0-30 %	0/12,0 %
O <sub>2</sub>	Paramagnetismi	SFS-EN 14789	0-25 %	0/20,9 %

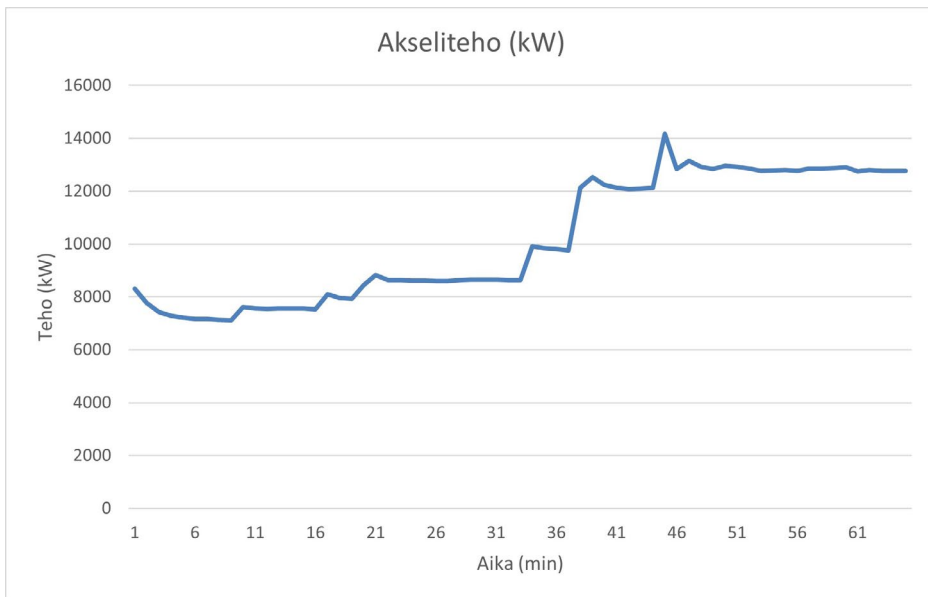
## MITTAUSHAVAINNOT

Tässä luvussa esitetään kooste hankkeen aikana tehtyjen päästömittausten havainnoista. Alun perin hankkeen keskeisenä tavoitteena oli tehdä mittauksia laajasti mahdollistamaan kattava vertailu eri polttoainetyyppien ja päästönkäsittelyjärjestelmien välillä. COVID 19 -pandemia kuitenkin esti mittausten tekemisen kokonaan vuosina 2020 ja 2021. Kesällä 2022 mittaukset saatiin vihdoinkin aloitettua, mutta määrä jäi kuitenkin aiotusta tavoitteesta hankkeen lähestyessä loppuaan.

### ROPAX A

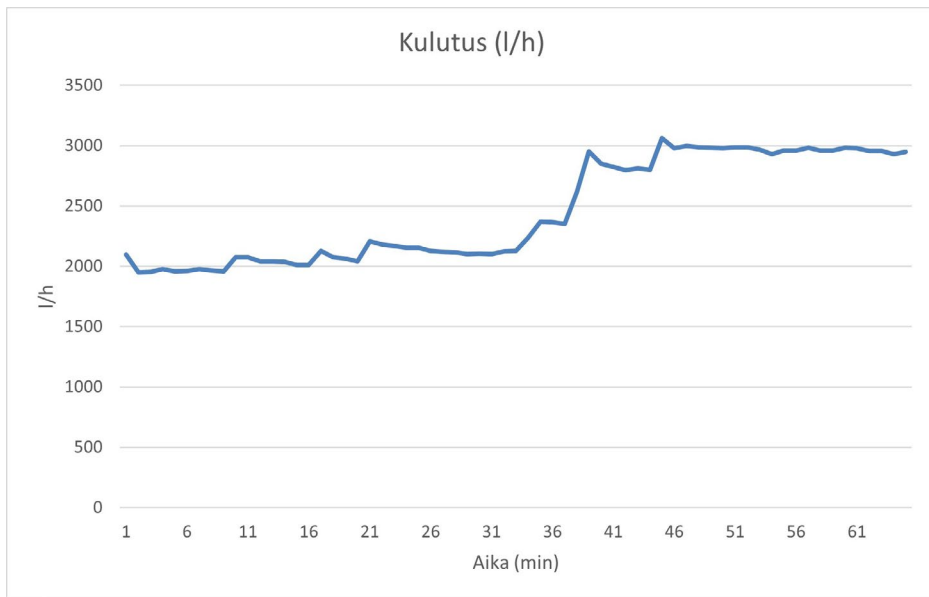
ROPAX A on rikkipesureilla varustettu kaksipotkurinen alus, joka operoi normaalisti neljällä pääkoneella. Akselikohtaisesti tehoa tuottaa siis kaksi Wärtsilä 9L46 -pääkoneita, jotka saavat polttoaineen samalta boosterilta. Aluksessa on apukoneiden lisäksi myös akseligeneraattorit. Polttoaineena käytetään raskasta, rikkipitoista polttoöljyä (RMG380), ja rikki pestään savukaasuista pois Ecosprayn avoimen kierron pesureilla. Kun pesureita ei käytetä, operoidaan alusta vähärikkisellä dieselillä. Pesurit on asennettu alukseen jälkiasennusratkaisuna, jotta operointi raskaalla polttoöljyllä olisi mahdollista vuoden 2015 rikkirajoitusten jälkeen. Typen oksidien jälkikäsittelymenetelmiä aluksessa ei ole.

Normaalisti operoitaessa molempien akseleiden yhteisteho asettuu 20–24 megawattiin riippuen operointiolosuhteista. Tasaisella vauhdilla ajettaessa moottoreiden kuormitus pysyy varsin ennustettavalla lukualueella, jolloin päästöjen koostumuskin on matkojen välillä hyvin samankaltainen. Tähän raporttiin on valittu esitettäväksi ajankohta, jolloin alus on vajaan tunnin aikana kiihdytetty satamasta lähdön jälkeen normaaliin marssivauhtiin. Nopeuden nostaminen on ottanut aikansa, sillä samaan aikaan polttoaine on vaihdettu kevyestä polttoöljystä rikkipitoiseen raskaaseen polttoöljyyn pesureiden kytkeytyessä päälle. Tämä ajanjakso mahdollistaa päästöjen tarkastelun eri kuormitusolosuhteissa. Päästöt on mitattu aluksen styyrpuurinpuoleiselta koneparilta (pääkoneet 3 ja 4). Kuvassa 2 on tämän koneparin antama akseliteho. Akselitehotiedot on saatu aluksen L3 Valmarine -järjestelmästä.



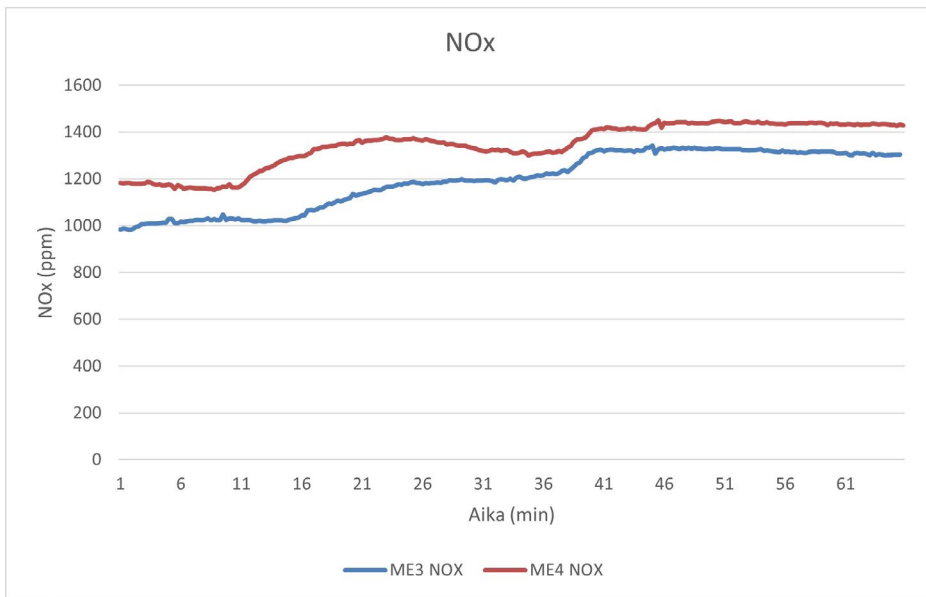
**Kuva 2.** Akselitehon muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla

Rikkipesurit on kytketty päälle muutama minuutti akselitehokäyrän tallentamisen aloittamisen jälkeen. Tämän jälkeen on aloitettu polttoaineen vaihto. Vaihto vie noin 30–40 minuuttia, minkä aikana moottoreiden kuormitus pidetään normaalia alhaisempana kulutuksen jäädessä noin 2000 l/h (ks. kuva 3). Noin 45 minuuttia tallennuksen aloittamisesta alus on siirtynyt normaaliin matkanopeuteen, mikä näkyy niin teho- kuin kulutuskäyränkin vakiintumisena. Kulutustieto on saatu boosterilta, eikä kyseisessä datassa erotella kevyen ja raskaan polttoöljyn osuutta.



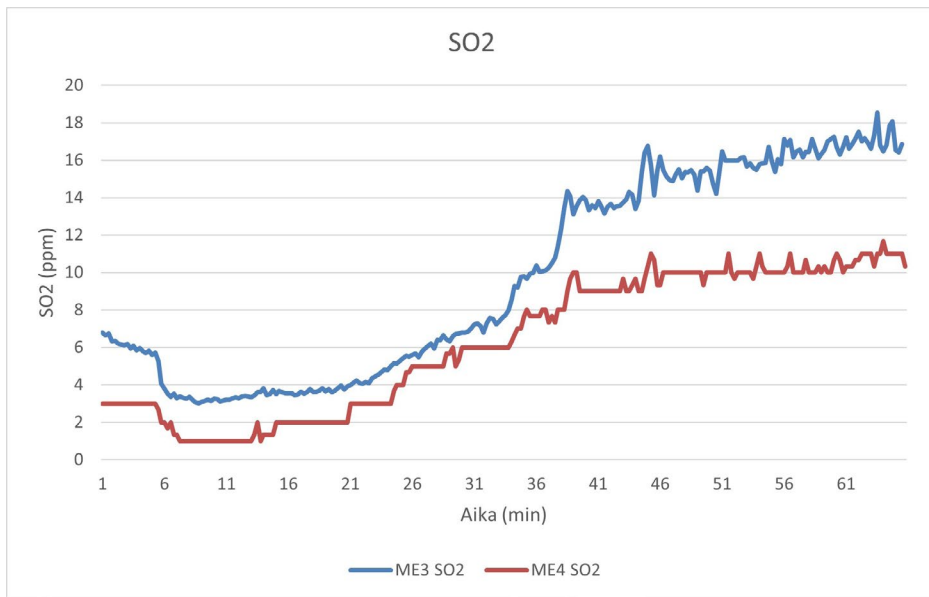
**Kuva 3.** Kulutuksen muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla

Molempien pääkoneiden (ME3 ja ME4) typen oksidien päästöt on esitetty kuvassa 4. Typen oksidin osuus savukaasussa pysyy suhteellisen tasaisena koko tarkasteluajanjakson ajan kasvaen kuitenkin jonkin verran siirryttäessä matkanopeuteen. Moottoreiden keskinäinen ero selittyy hyvin pitkälle ME4:n vähän kovemmasta kuormituksesta mittausjakson aikana. Polttoaineen vaihtojakson aikana on havaittavissa pientä nousua typen oksidien päästöissä suhteessa moottorien kuormitukseen tai kulutukseen. Tämä on todennäköisesti seurausta raskaan polttoöljyn sisältämästä tpestä.



**Kuva 4.** Typen oksidipäästöjen muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla

Savukaasujen sisältämä rikkidioksidi on esitetty kuvassa 5. Typen oksidien tapaan molempien pääkoneiden savukaasut on analysoitu erikseen. Tarkastelujakson alussa rikkidioksidipitoisuus on ollut hyvin alhainen operoitaessa vähärikkisellä polttoaineella (minuutit 1–5) alentuen edelleen rikkipesureiden kytkeytyessä päälle. Polttoaineen vaihtuminen lisää tasaisesti rikkidioksidin määrää savukaasuissa marssivauhdin saavuttamisen ja polttoaineen vaihtumisen jälkeen (n. minuutit 40–45) rikkidioksidimäärät asettuvat kuvaajien osoittamalle tasolle. Pesurit pesevät rikkiä pakokaasuista ilmeisen tehokkaasti: polttoaine sisältää rikkiä noin 2,5 %, joten ilman pesureita savukaasujen rikkidioksidipitoisuus olisi todennäköisesti 150–250 ppm.



**Kuva 5.** Rikkidioksidipäästöjen muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla

Taulukossa 2 esitetään 15 minuutin keskiarvot, kun polttoaine on vaihdettu kokonaan RMG:lle. Teho-, polttoaineensyöttö- ja kulutuslukemat on saatu aluksen järjestelmistä. Päästöarvot on laskettu konekohtaisesti mittauksista kilowattituntia kohden. Hiilidioksidipäästöjen perusteella moottorin ominaiskulutus olisi noin 191–192 g/kWh, mitä voidaan pitää varsin todennäköisenä lukemana. Typen oksideille on annettu mitattu arvo, sekä kosteus- ja lämpötilakorjattu arvo, joka indikoi paremmin todellista typen oksidien määrää. Rikkidioksidin määrä on myös suhteutettu tehoon. Häkäpäästöt ovat vähäiset, kuten ilmaylijäämällä toimivissa moottoreissa asianlaita yleensä on.

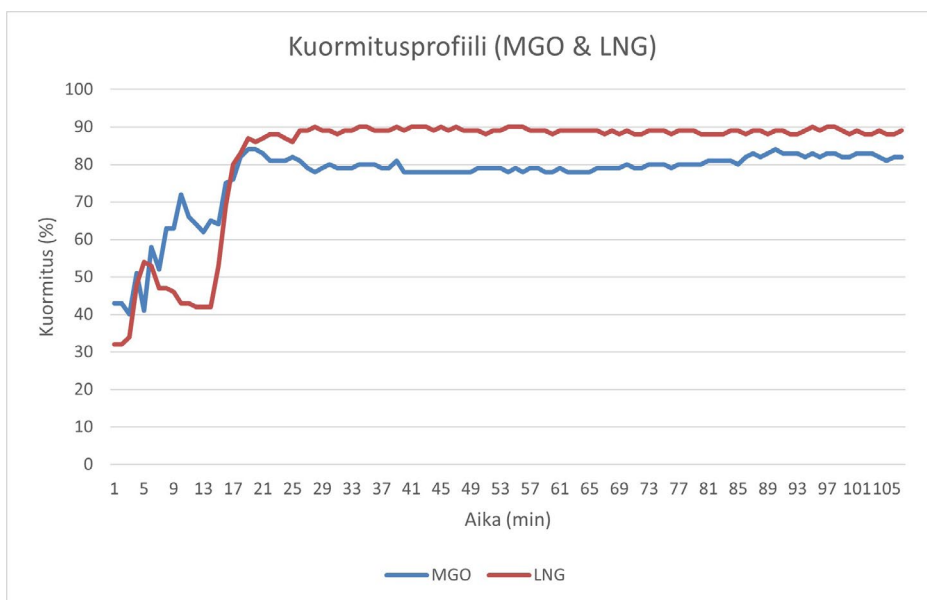
**Taulukko 2.** Pääkonekohtaiset mittauksilukemat

	Yksikkö	ME3	ME4
Teho	kW	7382	8007
Syöttö	%	65	69
Kulutus	kg/h	1383	1462
CO <sub>2</sub>	g/kWh	596	596
CO	g/kWh	0,22	0,21
NO <sub>x</sub>	g/kWh	14,55	15,68
NO <sub>x</sub> (kosteuskorjaus)	g/kWh	13,51	14,56
SO <sub>2</sub>	g/kWh	0,25	0,16



## ROPAX B

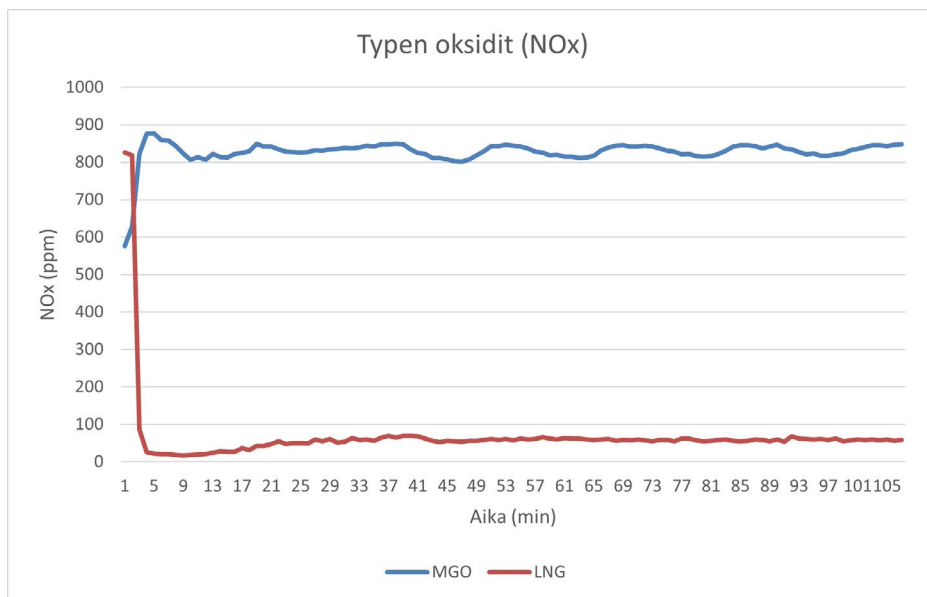
Tämä alus on varustettu dieselsähköpropulsiolla ja dual-fuel-moottoreilla, jotka mahdollistavat kevyen polttoöljyn (MGO) ja nesteytetyn maakaasun (LNG) joustavan käytön. Siirtyminen LNG:ltä MGO:lle onnistuu käytännössä ilman viipeitä, mutta siirtyminen kaasukäytölle vie muutaman minuutin, minkä aikana kuormitus pidetään alle 80 %. Mittausjakson aikana aluksen moottoreista (3 kpl Wärtsilän 12V50DF ja 2 kpl 6L50DF) olivat käytössä kaksi 12V50-moottoria, jotka riittivät turvaamaan aluksen energiansaannin kyseisissä olosuhteissa. Aluksessa ei ole varsinaisia erillisiä päästönkäsittelyjärjestelmiä. Alus ajaa edestakaisin varsin lyhyttä legiä. Mittausjärjestelyt toteutettiin siten, että yhden moottorin pakokaasupäästöjä mitattiin kahdella legillä, jolloin käytössä olivat vuoroin MGO ja LNG. Legien aikaiset kuormitusprofiilit on esitetty kuvassa 6.



**Kuva 6.** MGO- ja LNG-kuormitusprofiilien muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla

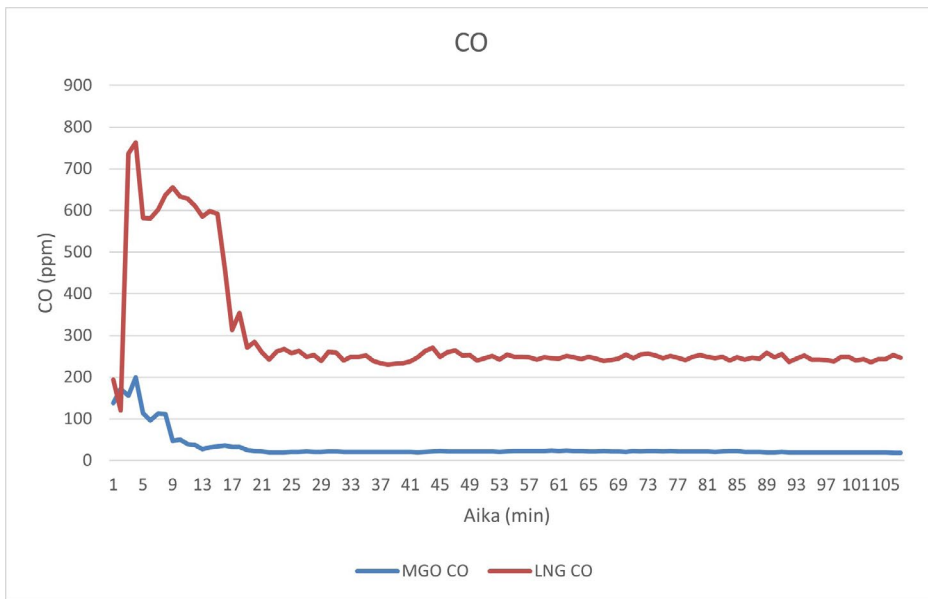
8 Mitatut typpioksidipäästöt savukaasussa on esitetty kuvassa 7. Polttoaineen vaihto MGO:lta LNG:lle on tapahtunut välittömästi mittausjakson alkuvaiheessa, ja typen oksidien dramaattinen pudotus polttoaineen vaihtumisen seurauksena näkyy LNG-käyrässä hyvin. Typen oksidien määrä on kaasulla operoitaessa hyvin alhainen pitoisuuden ollessa noin 50–70 ppm. Huomioiden, että aluksessa ei ole typen oksidien käsittelyjärjestelmiä, voidaan lukemaa pitää huomattavan alhaisena. Tämä on LNG-polttoaineen yksi vahvuus, jonka

nämä mittauksetkin hyvin vahvistavat. LNG tuottaa hyvin vähän myrkyllisiä typen oksideja verrattuna polttoöljyllä operointiin. Rikkidioksidipäästöjä ei ole tässä raportissa eritelty, sillä LNG ei niitä käytännössä tuota lainkaan ja vähärikkisellä MGO:lla operoitaessa niiden määrä on alhainen.



**Kuva 7.** Typen oksidipäästöjen muuttuminen ajan suhteen mittausjaksolla MGO- ja LNG-käytössä

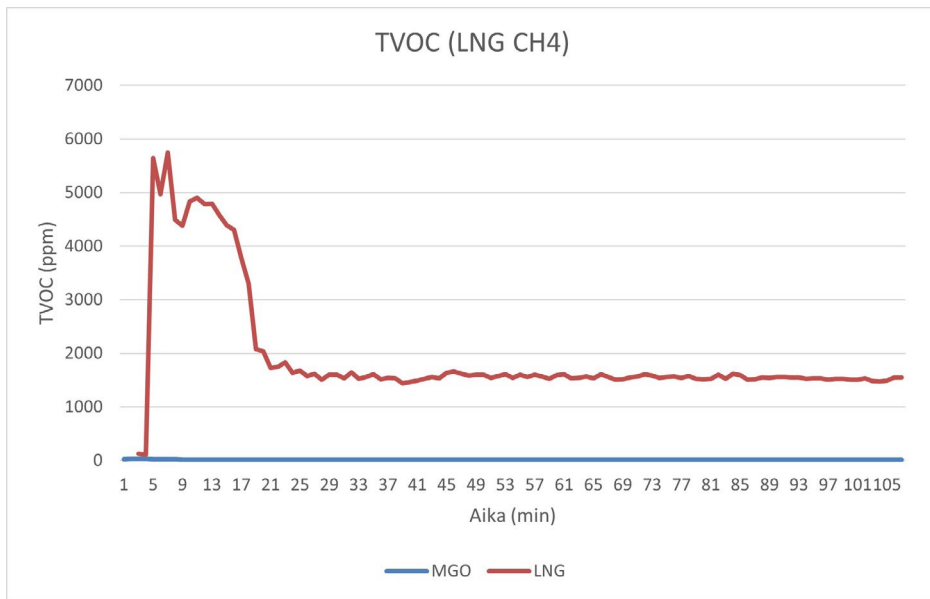
Kuvassa 8 näkyy häkäpäästöt samalta ajanjaksolta. Kun taulukon 8 käyriä verrataan taulukon 6 kuormituskäyriin, huomataan, että hiilimonoksidipäästöt ovat koholla molemmilla polttoaineratkaisuilla operoitaessa osakuormalla. Tämä ei sinänsä yllätä, sillä moottorit optimoidaan toimimaan yleensä noin 80–85 % kuormituksella hyvän polttoainetalouden mahdollistamiseksi marssivauhdissa. Tämä kuitenkin merkitsee myös sitä, että osakuormaoperoinnin aikana palaminen ei ole yhtä optimaalista. Käytännössä tämä ei useinkaan ole ongelma, sillä osakuormaoperointia tapahtuu yleensä lähinnä satamamanoveerauksessa, ellei alusta ole nimenomaan aikataulutettu slow steaming -operointiin. Tuolloinkin aluksen koneisto ratkaisee, miten koneita operoidaan. Dieselsähköinen voimansiirto antaa tähän joustavuutta etenkin sellaisissa tilanteissa, joissa alukseen on asennettu erikokoisia moottoreita.



**Kuva 8.** Hiilimonoksidipäästöjen muuttuminen ajan suhteen MGO- ja LNG-käytössä

Hiilimonoksidipäästöjä ei ole rajoitettu, ja dieselikäytössä niiden osuus kokonaispäästöistä on vähäinen. Hiilimonoksidin määrä savukaasuissa indikoi kuitenkin epätäydellistä palamista. Tämän seurauksena savukaasujen sisältämien palamattomien partikkeleiden, kuten mustan hiilen tai orgaanisten haihtuvien yhdisteiden, määrä on todennäköisesti koholla. Erityisesti LNG:llä operoitaessa niin osakuormalla kuin marssivauhdissakin hiilimonoksidipäästöt ovat selkeästi MGO:ta suuremmat. Siinä missä MGO:lla operoitaessa hiilimonoksidipäästöt ovat liki nollan (n. 10–20 ppm vaihdellen kuormitusolosuhteiden mukaan) luokkaa, nousee niiden osuus LNG:llä operoitaessa 200–250 ppm.

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (TVOC) päästöt on esitetty kuvassa 9. MGO:lla operoitaessa nämä ovat polttoaineen palamattomia hiilivetypäästöjä, ja niiden määrä on hyvin alhainen. Kaasulla operoitaessa suurin osa TVOC-päästöistä on palamatonta metaania, sillä polttoaineena käytetyn maakaasun ainemäärästä 90,3 % on metaania. Erityisesti osakuormalla operoitaessa metaanipäästöt ovat korkeita, mutta myös marssivauhdissa TVOC-päästöt ovat huomattavat verrattuna MGO:lla operointiin. Sinänsä metaanin absoluuttiset määrät ovat vähäisiä verrattuna vaikkapa savukaasujen sisältämään hiilidioksidiin, mutta metaanin ollessa voimakas kasvihuonekaasu sen haitallisuus ilmastonmuutoksen kehittymisen osalta on huomioitava.



**Kuva 9.** TVOC-päästöjen muuttuminen ajan suhteen MGO- ja LNG-käytössä

Taulukkoon 3 on koostettu laskennalliset tehoon suhteutetut päästöarvot hiilidioksidin, hiilimonoksidin, typen oksidien ja TVOC-päästöjen osalta. Kyseessä ovat 15 minuutin testijakson aikana mitatut keskiarvot. Taulukossa 3 näkyvät myös LNG:n ominaishiilidioksidipäästöt, jotka ovat selkeästi alhaisemmat verrattuna MGO:hon. Hiilimonoksidipäästöjen määrä on kuitenkin huomattava, samoin TVOC-päästöjen osuus. Mitatut TVOC-päästöt ovat huomattavan lähellä IMO:n raporteissa annettuja laskennallisia kertoimia kaasumootoreiden metaanipäästöille. Toisaalta typpioksidipäästöjen määrä on LNG:llä alhainen. Moottoriteknikan kehitykselläkin on tässä osansa, sillä MGO:llakin operoitaessa typen oksidipäästöt ovat alhaisemmat verrattuna vaikkapa ROPAX A:n vanhemman moottorityypin NO<sub>x</sub>-päästöihin.

**Taulukko 3.** MGO/LNG-vertailuarvoja päästöjen ja operointiolosuhteiden suhteen

	Yksikkö	MGO	MGO	LNG	LNG
Teho	kW	9127	9540	9654	10182
Kuormitus	%	81	84	85	89
Kulutus	kg/h	1787	1829	1655	1734
CO <sub>2</sub>	g/kWh	627,7	614,7	470,3	467,2
CO	g/kWh	0,16	0,13	1,47	1,51
NO <sub>x</sub>	g/kWh	9,81	9,82	0,66	0,62
NO <sub>x</sub> (kosteuskorjaus)	g/kWh	9,11	9,12	0,61	0,57
TVOC	g/kWh	0,05	0,04	5,55	5,63

## Pohdintaa

Erilaiset päästövähennysratkaisut johtavat erityyppisiin tuloksiin, ja tilanteesta riippuu, mikä ratkaisu kulloiseenkin ongelmaan on paras. Kaikkeen soveltuvia patenttiratkaisuja ei ole olemassa. Tämä on osittain johtanut tilanteeseen, missä etenkin julkisuudessa jokin ratkaisu nostetaan ensin suurin odotuksin tulevaisuuden airueksi. Kun kyseinen ratkaisu yleistyy, julkisuudessa sitten yllätetään vaihtoehdon haittapuolista ja unohdetaan nopeasti varsinaiset syyt, minkä vuoksi kyseistä ratkaisua alun perin tarjottiin käyttöön otettavaksi. Teknisesti orientoituneille tahoille nämä asiat harvoin ovat uusia, mutta tämän ilmiön takia etenkin ympäristöpoliittisesta keskustelusta tulee usein varsin tempoilevaa.

Hiilidioksidi on päästöistä monin tavoin ongelmallinen, kun poltetaan fossiilisia polttoaineita. Hiilidioksidipäästöt seuraavat varsin tarkasti poltetun polttoaineen määrää, ja niiden vähentäminen vaatii käytännössä fossiilisen polttoaineen kulutuksen vähentämistä. Tähän suuntaan kansainvälinen kehitys on edennyt niin IMO:n säädösten osalta (mm. EEDI, EE-XI, SEEMP) kuin myös markkinaehtoisestikin, sillä laivapolttoaineiden hinnat ovat olleet 2010-luvulla huomattavan kalliita verrattuna aikaisempiin vuosikymmeniin muutamaa poikkeusajankohtaa lukuun ottamatta. Tämän seurauksena myös laivojen kokonaisenergiatehokkuuteen on kiinnitetty enenevässä määrin huomiota. (IMO, 1997.)

LNG on yksi ratkaisu vähentää hiilidioksidipäästöjä polttoainekiloa kohden, mutta fossiilisenä kaasuna sekään ei sovellu vielä niin sanotuksi ”lopulliseksi” ratkaisuksi. Tätä kirjoittaessa erityisesti maakaasun hinta ja saatavuus ovat vaihdelleet voimakkaasti Ukrainan sodan seurauksena, ja tilanteen stabiloituminen kaasumarkkinoilla vaatii aikansa. Biokaasujen laajempi hyödyntäminen mahdollistaisi irrottautumisen fossiilisesta kaasusta, mutta niiden tuotantomäärät suhteessa kysyntään ovat vaatimattomia ja tuotannon kasvattaminen vaatisi koko kyseisen teollisuussektorin massiivista laajentamista. Lisäksi ympäristövaikutuksia arvioitaessa on huomioitava biokaasutuotannon vaikutukset maankäyttöön sekä tuotannonaikaiset päästöt.

Hiilidioksidin talteenotto savukaasuista on yksi vaihtoehto vähentää ilmakehään päätyvää hiilidioksidia. Näitä tekniikoita kehitellään parhaillaan ympäri maailmaa, ja jo käyttöön soveltuvia ratkaisujakin on olemassa. Parhaimmillaan talteen otettua hiilidioksidia voidaan hyödyntää teollisuusprosesseissa, jolloin järjestelmä voisi olla osa tuotantokoneistoa. Talteenottoratkaisu olisi parhaimmillaan kohteessa, missä syystä tai toisesta hiilidioksidia tuottavasta prosessista olisi muutoin haasteellista luopua. Laivaliikenne olisi periaatteessa tällainen, mutta todennäköistä on, että talteenottojärjestelmät yleistyvät ensin maateollisuuspuolella johtuen niiden vaatimasta tilasta ja talteen otetun hiilidioksidin määrästä.

Toisaalta, mikäli yleistyminen nopeutuisi maapuolella selkeästi, on periaatteessa mahdollista, että kompaktimpia laitteita olisi jossain vaiheessa saatavilla myös laivakäyttöön. (Fanchi & Fanchi, 2016.)

Typen oksidien päästöt on pitkään tunnustettu erityisesti merimoottoreille ominaiseksi, haitalliseksi päästökomponentiksi. Niiden vähentämiseen on vuosien saatossa kehitelty useita ratkaisuja: imuilman höyrynkostuttamisella tai suoralla vesiruiskutuksella sylintereihin palamislämpötilaa on laskettu, jolloin typen oksidien muodostuminen on vähentynyt. Nämä järjestelmät ovat teknisesti varsin yksinkertaisia, mutta erityisesti suoravesiruiskutusjärjestelmät ovat olleet herkkiä vikaantumaa. Tämän seurauksena myös niiden kyky vähentää typen oksidien päästöjä on käytännössä vaihdellut paljon. Toisaalta näiden järjestelmien etuna on suhteellisen hyvä tehokkuus osakuormalla operoitaessa, jolloin pakokaasujen lämpötila ei välttämättä ole riittävä katalyysaattoreille. (Schmid & Weisser, 2005, 1-12; Winnes et al., 2015, 7)

Katalyysaattorit ovat tehokas keino vähentää myrkkypäästöjä. Meriliikenteessä katalyysaattorityyppinä käytetään yleensä SCR-katalyysaattoreita, jotka vaativat urearuiskutusta pelkistysprosessin käynnistymiseksi. Parhaimmillaan kunnossa oleva, optimaalisessa toimintalämpötilassa toimiva ja oikein säädetty katalyysaattori on tehokas: typen oksidien päästöt voivat vähentyä jopa 80–90 %. Jos esimerkiksi tässä raportissa esitellyssä ROPAX B -aluksessa olisi katalyysaattori ja tuo 90 % vähennys saavutettaisiin, vähenisi MGO:lla operoitaessa typen oksidien määrä alle yhteen grammaan kilowattituntia kohden. Tällöin typen oksidien päästöt olisivat jo suhteellisen lähellä maakaasuoperoinnissa syntyviä lukemia. Vastaavasti myös ROPAX A:n typen oksidipäästöjä olisi mahdollista vähentää huomattavasti katalyysaattoreilla, jotka olisi asennettu moottorin ja rikkipesurin väliin. Tilankäyttöratkaisuihin tai kustannuksiin tässä ei oteta kantaa. (Lamas-Galdo et al., 2020, 1–14.)

Pakokaasujen takaisinkierätyjärjestelmä (EGR) voi yleistyä tulevaisuudessa myös merimoottoreissa. Maantieliikenteessä järjestelmää on käytetty erityisesti dieselmoottoreiden typen oksidien vähentämiseksi mutta laajasti myös ottomoottoreissa jo yli parin vuosikymmenen ajan. Kierrättämällä pakokaasuja osittain takaisin sylinteriin niiden sisältämä hiilidioksidi sitoo palamisessa syntyvää lämpöä, jolloin palamislämpötila laskee ja typen oksidien muodostuminen vähenee. EGR-järjestelmän tehokkuus riippuu järjestelmästä, moottorista, optimoinnista ja monesta muusta tekijästä. Järjestelmän avulla voidaan kuitenkin päästä osapuilleen noin 50 % tehokkuuteen typen oksidien vähentämiseksi. Monet merimoottorivalmistajat ovat esitelleet EGR-ratkaisuja niin kaksi- kuin nelitahtikonetyypeilleenkin. EGR-järjestelmän etuna on, että se vähentää typen oksidien muodostumista sisäsyntyisesti. Yhdessä SCR-katalyysaattorin kanssa voidaan typen oksidien vähentämisessä päästä jo todella hyviin tuloksiin. (Zu et al., 2019, 1–14.)

Hapetuskatalyysaattoreilla voidaan vähentää metaanipäästöjä. Toistaiseksi metaanipäästöjen vähentämistä ei ole säädöksiin vaadittu, joten metaanille soveltuvia katalyysaattoreita ei juurikaan ole ollut käytössä. Tulevaisuudessa tilanne saattaa muuttua muun muassa FuelEUMaritimien sisältämän metaanipäästöjen vähennysvaatimuksen takia (EU, 2021, 70-72). Myös IMO:ssa vastaavat rajoitukset ovat olleet esillä. Tämänhetkisesti energiakriisistä huolimatta dual-fuel-moottoreita kuitenkin asennetaan moniin uusiin aluksiin mahdollistamaan kaasukäyttö, minkä vuoksi hapetuskatalyysaattoreille voi tulevaisuudessa olla tarvetta. Erityisesti tämä koskee tilannetta, missä metaanipäästöjä ei saada kuriin moottoriteknikkaa kehittämällä. (Lehtoranta et al., 2021, 1–12.)

Biopohjaisten öljyjen tai synteettisten polttoaineiden mahdollinen yleistymisen tulevaisuudessa voi jonkin verran muuttaa savukaasupäästöjen koostumusta, mutta suuria muutoksia tuskin on luvassa. Näiden ratkaisujen selkeimmät edut ilmenevät sen sijaan mahdollisuuksissa irrottautua fossiilisista polttoaineratkaisuista ja näin hillitä hiilen siirtymistä maaperästä ilmakehään. Laboratorio-olosuhteissa voidaan eri polttoaineratkaisujen päästöjä analysoida tarkasti, mutta myös todellisissa olosuhteissa tehtäviä mittauksia tullaan tarvitsemaan: järjestelmät kuitenkin ikääntyvät ja niille toteutetut ylläpitohuollot vaihtelevat niin sisällöltään kuin laadultaankin. Erityisesti hiukkas- ja mustahiilipäästöihin on mahdollista vaikuttaa polttoprosessia optimoimalla. Tätä voidaan tavoitella muun muassa kehittämällä polttoaineiden ominaisuuksia, parantaa moottorin palamisolosuhteita käytönaikaisin säädöin tai muokkaamalla aluksen operointiprofiilia.

## LÄHTEET

European Commission, 2015. Regulation (EU) 2015/757 of the European parliament and of the council of 29 April 2015 on the monitoring, reporting and verification of carbon dioxide emissions from maritime transport, and amending Directive 2009/16/EC. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757&from=EL](http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32015R0757&from=EL)

European Commission, 2021. Proposal for a regulation of the European parliament and of the council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu\\_maritime\\_-\\_green\\_european\\_maritime\\_space.pdf](http://ec.europa.eu/info/sites/default/files/fueleu_maritime_-_green_european_maritime_space.pdf)

Euroopan unionin neuvosto, 2022. 55-valmiuspaketti. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/](http://www.consilium.europa.eu/fi/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/)

Fanchi, J.R., Fanchi, C.J. 2016. Energy in the 21<sup>st</sup> century. Singapore: World scientific publishing Co., Ltd.

IMCO. 1954. The international convention for the prevention of pollution of the sea by oil. International treaty signed in London on 12 May 1954 (OILPOL).

IMO. 1973. The international convention for the prevention of pollution from ships, 1973 as modified by the protocol of 1978. International treaty signed on 17 February 1973 (MARPOL 73/78).

IMO. 1997. Prevention of air pollution from ships. MARPOL Annex VI. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Air-Pollution.aspx)

IMO. 2011. Energy efficiency measures. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx](http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Technical-and-Operational-Measures.aspx)

IMO, 2020a. IMO 2020 – cutting sulphur oxide emissions. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx](http://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Sulphur-2020.aspx)



IMO, 2020b. IMO environment committee approves amendments to cut ship emissions. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx](http://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/42-MEPC-short-term-measure.aspx)

IMOnews, 2008. IMO: 60 years in the service of shipping. *The magazine of the International maritime organization*, nro. 3/2008, 27–48.

Korhonen, R., 2002. Merenkulun ominaissavukaasupäästöjen selvittäminen. Mobile M2T0026-hankkeen loppuraportti. Kotka: Kymenlaakson ammattikorkeakoulu.

Kymilabs – päästömittaus- ja polttoaineentestauspalvelut, 2022. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. WWW-dokumentti. Viitattu 2.11.2022. Saatavissa: [www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitystoiminta/kymilabs-i-xamk-i-paastomittauspalvelut/](http://www.xamk.fi/tutkimus-ja-kehitystoiminta/kymilabs-i-xamk-i-paastomittauspalvelut/)

Lamas-Galdo, M.I., Castro-Santos, L., Rodriguez-Vidal, C.G. 2020. Numerical analysis of NOx reduction using ammonia injection and comparison with water injection. *Journal of marine science and engineering*, 8(2), 1–14.

Lehtoranta, K., Koponen, P., Vesala, H., Kallinen, K., Maunula, T. 2021. Performance and regeneration of methane oxidation catalyst for LNG ships. *Journal of marine science and engineering*, 9(2), article 111.

UK Chamber of shipping. 2017. Understanding UK shipping. Witherby seamanship international Ltd.: Witherby publishing group.

Schmid, H., Weisser, G. 2005. Marine technologies for reduced emissions. Winterthur: Wärtsilä Switzerland Ltd., Wärtsilä corporation.

Winnes, H., Fridell, E., Yaramenka, K., Nelissen, D., Faber, J., Ahdour, S. 2015. NOx controls for shipping in EU seas. Stockholm: IVL Swedish environmental research institute.

Zu, X., Yang, C., Wang, Y. 2019. Experimental study on diesel engine exhaust gas recirculation performance and optimum exhaust gas recirculation rate determination method. *The royal society of open science*, 6, article 181907.

# PÄÄSTÖVÄHENNYSMENETELMIEN TALOUDELLISEN JA YMPÄRISTÖ- SUORITUSKYVYN VERTAILU

Sirpa Rahiala



© Elias Altarriba

Tässä artikkelissa on esitelty päästövähennysmenetelmien taloudellisen ja ympäristösuorituskyvyn vertailuun tarkoitettua työkalua. Sekä nykyisistä että uusista päästöjen vähentämistratkaisuista tarvitaan laajasti tietoa, jotta voidaan vertailla kustannustehokkuutta ja ympäristövaikutuksia sekä varautua tuleviin rajoituksiin. Aluksiin liittyvät investoinnit ja laivojen järjestelmien parantaminen ovat varustamoille taloudellisesti tärkeä sijoituskohte ja usein hyvin pitkäaikaisia valintoja; alusten käyttöikä on yleensä 30–40 vuotta ja erilaisten päästövähennystekniikoiden tekninen käyttöikä voi myös olla useita vuosikymmeniä. Nyt tehdyt investointipäätökset vaikuttavat siis meriliikenteeseen vielä pitkään.

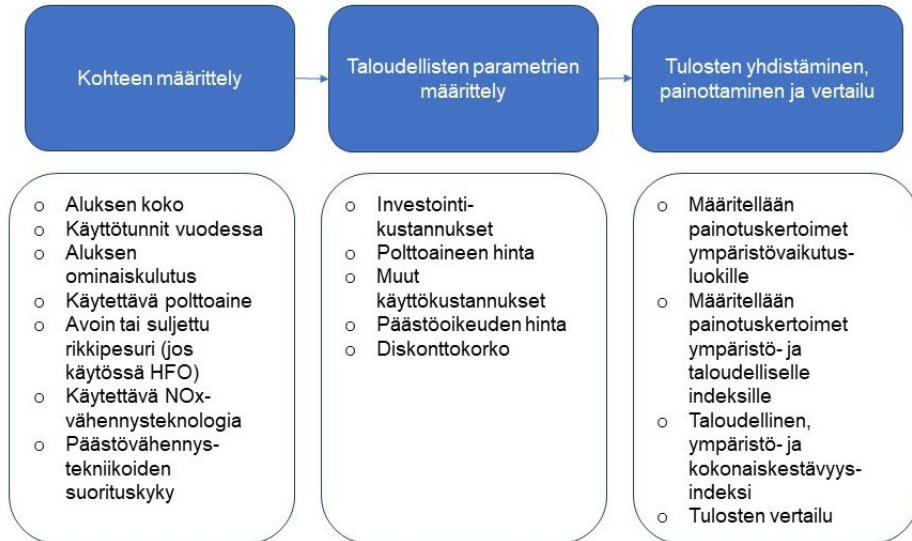
Merenkulun päästöjen vähentäminen on kuitenkin monimutkainen asia, jossa tulisi huomioida myös polttoainetuotannon ympäristövaikutukset sekä eri vaihtoehtojen kaikki ympäristövaikutukset käytön aikana. Lisäksi tällä hetkellä polttoaineiden hinnat ovat olleet ennätystasolla, kuten on kuvattu tarkemmin loppuraportin artikkelissa “Öljypohjaisten polttoaineiden hintakehitys”, joten taloudellisesta arvioinnista on tullut entistä haastavampaa.

Elinkaariarviointeja (LCA) on tehty useiden vuosien ajan erilaisille meriliikenteen päästöjen vähentämismenetelmille ja polttoaineille, ja niitä on tarkemmin kuvattu loppuraportin artikkelissa “Päästövähennysmenetelmien elinkaari- ja ympäristökustannusanalyysi”. Kokonaisvaltaiset elinkaaren perustuvat kestävä kehityksen arvioinnin lähestymistavat ovat herättäneet kiinnostusta viime vuosina muun muassa muun muassa energian ja liikkuvuuden aloilla (Wulf ym. 2019, 1–43). Tämä lähestymistapa yhdistää kestävä kehityksen kolme näkökohtaa: ympäristön (elinkaariarviointi), taloudellisen (elinkaarikustannuslaskenta) ja sosiaalisen (sosiaalinen elinkaariarviointi) kestävyuden. Esimerkiksi Iannaccone ym. (2020, 1–13) ovat käyttäneet kokonaiskestävyyttä vertaillen meriliikenteen vaihtoehtoja.

Tässä artikkelissa siis esitellään hankkeessa kehitetty Excel-pohjainen päästövähennystyökalu. Työkalu on eräänlainen kestävä kehityksen kokonaisindeksi, jossa on yhdistetty taloudellinen ja ympäristösuorituskyky. Työkalusta on jätetty tässä vaiheessa pois yksi kestävyuden osa-alue eli sosiaalinen aspekti. Artikkelin ensimmäisessä luvussa on kuvattu käytetty päästövähennystekniikoiden arviointityökalu ja kokonaisindeksin muodostaminen. Työkalu on esitelty myös artikkelissa Altarriba ym. (2022, 77–84). Artikkelin toisessa luvussa on esitelty työkalulla laskettuja tuloksia perustuen kirjallisuusarvoihin, ja arviointia on laajennettu aiemmin esitettyihin tuloksiin nähden (Altarriba ym. 2022, 78–81). Työkalun avulla on analysoitu erityisesti polttoaineiden hinnasta ja pesureiden hiukkaspäästöjen vähenemisestä johtuvia eroja.

## Arviointityökalun kuvaus

Päästövähennystekniikoiden arviointityökalun toimintaperiaate on esitelty kuvassa 1. Aluksi työkaluun syötetään kohteen tiedot eli aluksen käyttötiedot sekä käytetyt päästövähennystekniikat. Toisessa osassa määritellään päästövähennystekniikoihin liittyvät kustannusparametrit sekä käytetty diskonttokorko ja päästöoikeuden hinta. Lopuksi työkalu laskee eri polttoainevaihtoehtojen ympäristö- ja taloudelliset indeksit sekä kokonaiskestävyysindeksit.



**Kuva 1.** Arviointityökalun toimintaperiaate.

Arviointityökalun tuloksissa on eroteltu erikseen ympäristö-, taloudellinen- ja kestävyysindeksien antamat tulokset omille sivuilleen. Myös ympäristöindeksiin kuuluvien eri vaikutusluokkien tulokset on esitetty omalla tulossivullaan.

Työkalussa on mahdollisuus valita kolmesta polttoaineesta:

- raskas polttoöljy,
- MDO/MGO tai
- LNG.

Raskaaseen polttoöljyyn voidaan yhdistää joko suljetun tai avoimen kierron pesuri. NO<sub>x</sub>-vähennysmenetelmiksi voidaan yhdistää tällä hetkellä HFO- ja MDO/MGO-vaihtoehtoihin seuraavat:

- selektiivinen katalyyttinen vähennystekniologia (SCR),
- pakokaasun takaisinkierätyks (EGR).

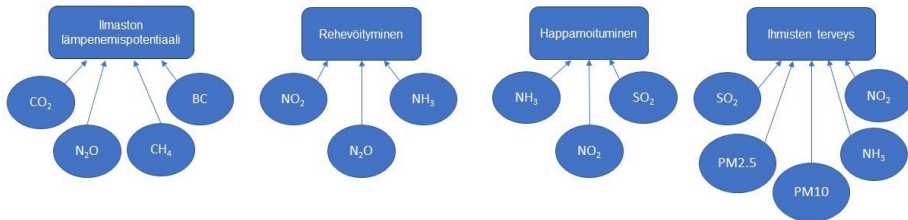
Työkaluun on syötetty oletusarvona kaikki tarvittavat tiedot, joita käyttäjä voi helposti muokata. Lisäksi joidenkin syöttötietojen viereen on kirjattu kirjallisuudessa esitettyjä arvoja ja niiden vaihtelua. Haluamansa polttoaineen ja päästövähennysteknologian käyttäjä valitsee valikosta. Tietojen syöttö tapahtuu Input- ja Input\_cost-välilehdillä. Tulokset löytyvät Result- ja Result\_index-välilehdiltä.

## Ympäristöindeksi

Ympäristöindeksissä yhdistetään eri ympäristövaikutusluokkien tulokset yhdeksi indeksiluvuksi. Kirjallisuudessa alusten merkittävimmiksi ympäristövaikutuksiksi on arvioitu esimerkiksi ilmaston lämpenemispotentiaali, happamoituminen, rehevöityminen, fotokemiallinen otsonin muodostuminen ja hiukkaset sekä energiankulutus ja terveysvaikutukset (Bengtsson ym. 2011, 19–20). Työkalussa ympäristöindeksi yhdistää seuraavat vaikutusluokat:

- rehevöitymispotentiaali (EP),
- happamoitumispotentiaali (AP),
- ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP) ja
- hiukkasten vaikutus ihmisten terveydelle (HHPA).

Ilmaston lämpenemispotentiaalille ilmoitetaan tulokset sekä 100 vuoden että 20 vuoden aikahorisontilla. Kuvassa 2 on esitetty jokaiseen vaikutusluokkaan vaikuttavat komponentit, jotka on huomioitu työkalussa.



**Kuva 2.** Valitut ympäristövaikutusluokat ja niihin vaikuttavat epäpuhtaudet.

Valitut karakterisointikertoimet eri vaikutusluokkien kullekin epäpuhtaudelle on esitetty taulukossa 1. Kertoimina on käytetty pääasiassa CML-metodissa esitettyjä kertoimia eri päästökomponenteille. Mustan hiilen (BC) kertoimet ovat lähteestä Comer ym. (2017, 35) ja ihmisten terveyteen vaikuttavat kertoimet on otettu TRACI-metodista. Vaikutusluokkaindikaattorin tulos saadaan kertomalla jokainen päästömäärä (E) asiaankuuluvalla kertoimella. Esimerkkinä ilmaston lämpenemispotentiaali (GWP):

$$GWP(100) = 1 \cdot E_{CO_2} + 265 \cdot E_{N_2O} + 28 \cdot E_{CH_4} + 900 \cdot E_{BC}$$

**Taulukko 1.** Valitut karakterisointikertoimet.

	GWP(100)	GWP(20)	AP	EP	HHPA
CO <sub>2</sub>	1	1	-	-	-
CH <sub>4</sub>	28	84	-	-	-
N <sub>2</sub> O	265	264	0,27	-	-
SO <sub>2</sub>	-	-	1,2	-	0,06
NH <sub>3</sub>	-	-	1,6	0,35	0,07
NO <sub>x</sub>	-	-	0,5	0,13	0,01
PM2.5	-	-	-	-	1,00
PM10	-	-	-	-	0,23
BC	900	3200	-	-	-

Jokaisen työkalussa huomioidun epäpuhtauden  $i$  vuotuiset toimintoperusteiset päästömäärät  $E_i$  [g/vuosi] arvioidaan seuraavasti:

$$E_i = e_{fi} \times C_t \quad (1)$$

Työkalussa oleva pakokaasupäästökerroin  $e_f$  [g/kWh] kullekin epäpuhtaudelle perustuu aluksen polttoaineen kulutukseen ja vastaavaan polttoaineen tuotantoon sekä kulutukseen päästöjä vähennysjärjestelmissä. Aluksen polttoaineen kokonaiskulutus  $C_t$  on arvioitu Åström ym. (2018, Appendix) esittämällä tavalla pää (ME) – ja apumoottorin (AE) koon [kW], kuormituskertoimien ja vuosittaisten tuntien avulla laiturissa ( $h_p$ ), merellä ( $h_s$ ) ja ohjailun aikana ( $h_m$ ). Siten vuotuinen kokonaiskulutus  $C_t$  [kWh/vuosi] saadaan seuraavasti:

$$C_t = 0,8 \times h_s \times ME + 0,2 \times h_m \times ME + 0,3 \times h_s \times AE + 0,5 \times h_m \times AE + 0,4 \times h_b \times AE \quad (2)$$

Polttoainetuotannon päästöjen osalta voidaan valita ilmaston lämpenemispotentiaalin osalta joko FuelEU Maritime -ehdotukseen tai Bengtsson ym. (2011, 19–38) esittämään dataan perustuvat arvot. Seuraavassa luvussa esittelyt laskelmat perustuvat FuelEU Maritime -ehdotukseen. (FuelEU Maritime 2021, Annex I–II.) Muiden vaikutusluokkien osalta käytetään vain Bengtsson ym. (2011, 5–14, Annex A–D) esittämään dataan perustuvia arvoja. SCR:ssä käytetyn urean ja suljetuissa pesureissa käytettävän NaOH:n tuotanto on koottu myös Bengtssonin ym. (2011) työstä.

Työkalussa on asetettu taulukossa 2 esitetyt oletusarvot ominaiskulutuksille. Käyttäjä voi kuitenkin halutessaan vaihtaa ne helposti tietojen syöttösivulla. Taulukossa 3 on esitetty työkalussa oletuksena olevat muuttujat liittyen päästövähennystekniikoihin. Näitäkin käyttäjä voi halutessaan muokata.

**Taulukko 2.** Työkalussa oletusarvona olevat ominaiskulutukset.

Polttoaine	Ominaiskulutus [g/kWh]
HFO	195
MDO/MGO	185
LNG	156

**Taulukko 3.** Päästövähennystekniikoihin liittyvät oletusarvot.

Päästövähennystekniikka	Lisä polttoaineen kulutukseen	Kemikaalikulutus	Oletukset
Avoin pesuri	2 %	-	Vastaa vähärikkistä polttoainetta
Suljettu pesuri	0,75 %	15 l/MWh NaOH	Vastaa vähärikkistä polttoainetta
SCR	-	15 g/kWh Urea	Tier III
EGR	0,3 %	-	Tier III

## Taloudellinen indeksi

Vaihtoehtoisten hankkeiden taloudellinen kannattavuus on arvioitu käyttäen nettonykyarvo-menetelmää. Projektin oletettu elinikä on 25 vuotta, vaikka ratkaisujen arvioitu tekninen käyttöikä vaihtelee 15 vuodesta (uudet pesurit) noin 25 vuoteen (LNG, SCR, EGR) (Åström ym. 2018, Appendix). Taloudellinen indeksi (Ecl) saadaan kertomalla nettonykyarvo -1:llä

Taulukko 4 näyttää työkalussa oletuksena olevat kustannusparametrit ja niiden hinta-arvioita eri vaihtoehdoille. Pääomakustannuksissa on huomioitu vain eri päästövähennysmenetelmien investointikustannukset, ja esimerkiksi polttoaineen syöttöjärjestelmien osalta ”perus” moottori-investointi, generaattorit ja sähköjärjestelmät jätetään vertailusta pois. Näin ollen LNG-vaihtoehdossa on huomioitu vain ”LNG-lisämaksu” normaalin moottori-investoinnin lisäksi täyden moottori-investoinnin sijaan. Käyttö- ja ylläpitokustannukset sisältävät eri vaihtoehtojen ylläpitokustannukset, polttoainekustannukset ja päästöoikeuden hinnan. Moottorityypin mukaiset huoltokustannukset on jätetty vertailun ulkopuolelle.

**Taulukko 4.** Kustannusparametrin oletusarvot ja vaihteluvälit.

Parametri	Oletus- arvo	Vaihtelu min	Vaihtelu max	Lähde
<b>Investointikustannus [€/kW]</b>				
Avoin pesuri	120	108	216	Åström ym. (2018)
Suljettu pesuri	278	216	433	
EGR	51	36	60	Winnes ym. (2016), Åström ym. (2018)
SCR	67	19	103	Winnes ym. (2016), Åström ym. (2018)
LNG (lisä normaaliin)	800	219	1500	Winnes ym. (2016), Åström ym. (2018)
<b>Käyttökustannukset (ei polttoainekustannusta mukana) [€/kWh]</b>				
Avoin pesuri	0,0022			
Suljettu pesuri	0,0200			
EGR	0,0010			
SCR	0,0035			

Diskontrauskorko voidaan valita halutuksi, ja työkalun oletusparametriksi on valittu 8 % samoin kuin Iannaccone ym. (2020, 4) työssä. Päästöoikeuden hinnan käyttäjä voi myös itse valita. Oletushinnaksi on arvioitu 100 €/t<sub>CO<sub>2</sub></sub>. Arviot päästöoikeuden hinnoista vuodelle 2030 Euroopassa vaihtelevat 65–130 dollarin välillä hiilidioksiditonnilta (IEA 2021). EU:n päästökaupan päästöoikeuksien hinta on kuitenkin ylittänyt 80 euron rajan vuoden 2021 aikana. Nousu ylittää kaikki ennusteet ja tarkoittaa, että päästöoikeuksien hinta on lähes kolminkertaistunut vuodessa.

Työkalussa polttoaineiden hinnoille on annettu kolme hintaskenaariota (taulukko 5), jotka Åström ym. (2018, Appendix) ovat esittäneet. Tällä hetkellä polttoaineiden hinnat ovat olleet erittäin korkeat ja muuttuneet nopeasti globaalin tilanteen vuoksi, ja vaihtelu on osittain ylittänyt hintaskenaariot, jotka on esitetty vuodelle 2030. Siksi pitkän aikavälin ennusteiden antaminen hinnoista on haastavaa. Käyttäjä voi kuitenkin valita itse polttoaineen hinnan, ja esim. sivustolta [www.shipandbunker.com](http://www.shipandbunker.com) löytyy nykyhetken hintoja.

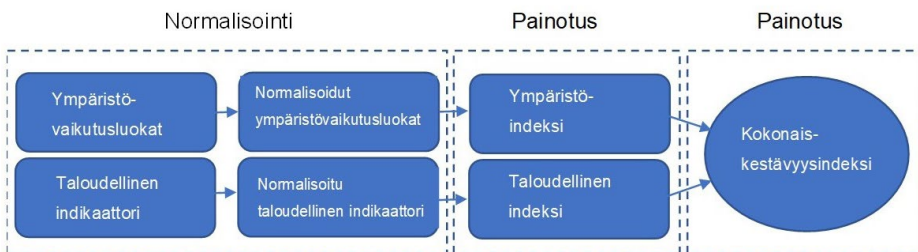


**Taulukko 5.** Polttoainelaaduille valitut hintakategoriat

Polttoaine	Matala [€/t]	Keski [€/t]	Korkea [€/t]
HFO	370	530	690
MGO/MDO	560	885	1210
LNG	485	610	740

## Indeksien normalisointi, yhdistäminen ja painotus

Tulosten normalisointi ja painottaminen tehdään kuvassa 3 esitetyllä tavalla. Aluksi jokainen ympäristövaikutusluokka sekä taloudellinen indikaattori lasketaan erikseen. Tämän jälkeen jokainen tekijä normalisoidaan valitulla kertoimella. Normalisoidut ympäristövaikutusluokat yhdistetään painottamalla yhdeksi ympäristöindeksiksi, minkä jälkeen ympäristö- ja taloudellinen indeksi yhdistetään myös painottamalla kokonaiskestävyysindeksiksi. Kaikille indekseille suurin arvo tarkoittaa huonointa vaihtoehtoa.



**Kuva 3.** Työkalussa tapahtuva painottaminen ja normalisointi.

Elinkaarianalysissä tulosten normalisointi tarkoittaa vaikutusluokan indikaattoritulosten suhteellisen suuruuden laskemista vertailutietoon nähden, jotta voidaan ymmärtää paremmin kunkin indikaattorituloksen suhteellista suuruutta (SFS-EN ISO 14044:2006, 29). Sekä ympäristövaikutusluokat että taloudellinen indeksi normalisoidaan taulukossa 6 esitetyillä viitearvoilla. Jokaisen ympäristövaikutusluokan osalta hyödynnetään Euroopan jäsenvaltioiden indikaattorikohtaisia kokonaispäästöjä viitevuoden aikana. Talousindeksi on normalisoitu OECD-Euroopan alueen bruttokansantuotteen summalla, joka sisältää työkorvaukset, bruttotoimintaylijäämän ja nettoverot (Laurent ym. 2013, 26).

**Taulukko 6.** Käytetyt normalisointikertoimet.

Normalisointikerroin		Lähde
Ilmaston lämpenemis-potentiaali	5,21E12 kgCO <sub>2,ekv</sub> /vuosi	Wegener Sleewijka ym.(2008)
Happamoitumis-potentiaali	2,36E10 kgSO <sub>2,ekv</sub> /vuosi	Wegener Sleewijka ym.(2008)
Rehevöitymis-potentiaali	1,85E10 kgPO <sub>4<sup>3-</sup>ekv/vuosi</sub>	Iannaccone ym. (2020)
Ihmisten terveys	1,074E9 kgPM2.5 <sub>ekv</sub> /vuosi	Crenna ym. (2019)
Taloudellinen indeksi	1,51E13 €	Laurent ym. (2013)

Ympäristöindeksin (EnvI) normalisoidut vaikutusluokat on painotettu alla olevilla tekijöillä. Painotustekijöinä voitaisiin hyödyntää asiantuntijoiden ja sidosryhmien mielipiteitä ja tutkimuksia, mutta työkaluun on valittu oletusarvoksi samat painokertoimet kuin Iannacconen ym. (2020, 6) työssä (GWP =0,3, AP=0,3, EP=0,2, HHPA=0,2). Käyttäjä voi halutessaan vaihtaa painotuskertoimia tai jättää jonkun vaikutusluokan kokonaan pois. Lineaarista aggregointia käytetään yhdistämään neljä vaikutusluokkaa ympäristöindeksiksi:

$$EnvI = 0,3 \times GWP + 0,3 \times AP + 0,2 \times EP + 0,2 \times HHPA \quad (3)$$

Taloudellisten ja ympäristövaikutusten kategoriat yhdistetään kestävä kehityksen indeksiksi, ja yhtäläisiä painotuksia käytetään molemmille kestävyuden ulottuvuuksille, eli taloudelliselle ja ympäristölle, alla olevan yhtälön mukaan. Käyttäjä voi itse halutessaan vaihtaa painotuskertoimia, jos katsoo esimerkiksi ympäristöindeksin tarvitsevan enemmän painotusta arvioinnissa kuin taloudellisen näkökulman.

$$Susi = 0,5 \times EnvI + 0,5 \times Ecl \quad (4)$$

## Päästövähennysmenetelmien vertailua työkalun avulla

Tässä luvussa esitetään esimerkkilaskentoja, joita työkalulla on tehty. Esimerkkilaskennoissa on käytetty vertailualuksena Itämeren alueella liikennöivää keskinopeaa RORO-alusta. Alus ei vastaa mitään todellista alusta vaan edustaa Itämerellä liikennöivien alusten tyyppiä. Taulukossa 7 on esitetty vertailualuksen toimintaprofiili ja tekniset tiedot.

**Taulukko 7.** Esimerkkialuksen toimintaprofiili ja tekniset tiedot.

Muuttuja	
Päämoottori [kW]	40 000
Apumoottori [kW]	4 000
Merellä olotuntia vuodessa [h]	7000
Vuosittaiset tunnit laiturissa [h]	1500
Vuosittainen manoveeraus [h]	250
(Bruttovetoisuus)	45 000
(Leveys) [m]	30
(Pituus) [m]	200
(Matkustajamäärä)	500

Laskentavertailuissa on huomioitu seitsemän erilaista yhdistelmää, joiden kaikkien oletetaan täyttävän rikki- ja NO<sub>x</sub>-rajoitukset. Polttoainevaihtoehtoina ovat raskas polttoöljy, MGO ja nesteytetty maakaasu (LNG).

Vaihtoehdot:

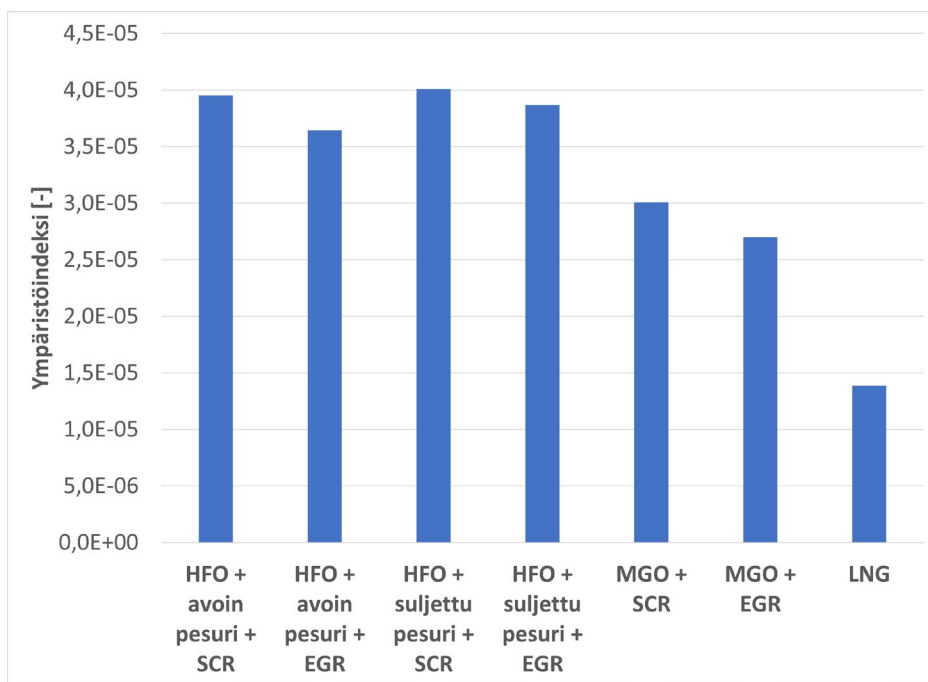
- 1: HFO + suljettu pesuri + SCR
- 2: HFO + suljettu pesuri + EGR
- 3: HFO + avoin pesuri + SCR
- 4: HFO + avoin pesuri + EGR
- 5: MGO + SCR
- 6: MGO + EGR
- 7: LNG-Otto

Seuraavaksi esitellään työkalun tuloksia edellä esitetyille vaihtoehdoille. Vertailuissa keskitytään ensin polttoaineiden hinnan vaikutukseen kokonaiskestävyyteen. Toisena ai-

heena vertailuissa on oletettu hiukkaspäästöjen väheneminen pesureissa ja sen vaikutus ympäristöindeksissä. Lopuksi työkalulla tutkitaan, kuinka tuloksiin vaikuttaa mustan hiilen huomioiminen tuloksissa, ja miten se suhteutuu metaanipäästöjen vaikutukseen eri tekniikoiden välisiä eroja selitettäessä.

## Polttoaineen hinnan vaikutus

Ensimmäiseksi työkalulla on vertailtu erilaisten hintaskenaarioiden vaikutusta kokonaiskestävyyksiin. Kuvassa 4 on esitetty edellä mainittujen vaihtoehtojen kokonaisympäristöindeksi, jossa on siis yhdistetty useampi ympäristövaikutusluokka kuten edellisessä luvussa on kuvattu. Tällöin voidaan vertailla vaihtoehtoja muidenkin ympäristövaikutusten osalta kuin esimerkiksi pelkästään ilmastovaikutusten. LNG-vaihtoehto antaa kaikista pienimmän ympäristöindeksin eli sen suorituskyky on vaihtoehtoista paras. Toiseksi tulevat vaihtoehdot, joissa polttoaineena on MGO ja huonoimpana näyttäytyvät HFO-vaihtoehdot.



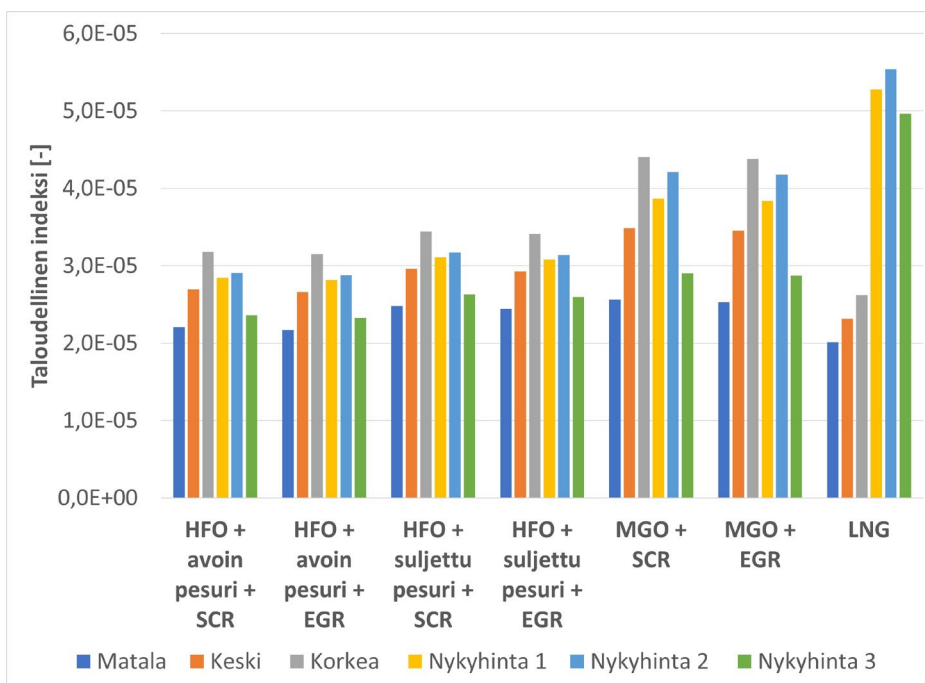
**Kuva 4.** Polttoaine- ja päästövähennysmenetelmävaihtoehtojen ympäristöindeksit.

Vaihtoehtojen taloudelliset indeksit on esitetty kuvassa 5. MGO-polttoainetta käyttävät vaihtoehdot suoriutuvat kaikissa perushintaskenaarioissa huonoiten ja sitä vastoin LNG parhaiten. MGO-vaihtoehtojen ero kasvaa muihin nähden hintaskenaarion muuttuessa kalliimpaan suuntaan.

Tällä hetkellä (vuonna 2022) polttoaineiden hinnat ovat kuitenkin muuttuneet rajusti ja ylittävät jopa vuodelle 2030 annetut korkean hinnan polttoaineskenaariot. Taulukkoon 8 on laskettu myös kolme ”nykyhinta”-vaihtoehtoa. Nykyhinta-vaihtoehdot on muodostettu (<https://www.shipandbunker.com/prices>) tietoja hyödyntäen eri aikajänteiden keskiarvoista. Näistä kaikista LNG antaa huomattavasti muita vaihtoehtoja korkeamman arvon ja ylittää huomattavasti jopa korkean hinnan skenaarion. Dieselvaihtoehdoissa nykyisen hinnan vaihtoehdot jäävät kuitenkin korkeimman hintaskenaarion alle ja nykyhinta 3 on lähellä matalimman hintaskenaarion tasoa. Polttoaineen hinnan vaikutus taloudelliseen suorituskykyyn tulee hyvin esille kuvasta 5. Nykyhinta-skenarioissa LNG:n taloudellinen indeksi on selkeästi muita vaihtoehtoja korkeampi, ja HFO-yhdistelmät näyttävät vaihtoehdoista parhaimpana.

**Taulukko 8.** Polttoaineiden nykyhintaskenaarit.

Polttoaine	Nykyhinta 1 [€/t]	Nykyhinta 2 [€/t]	Nykyhinta 3 [€/t]
HFO	580	600	420
MGO/MDO	1020	1140	680
LNG	1850	1960	1720

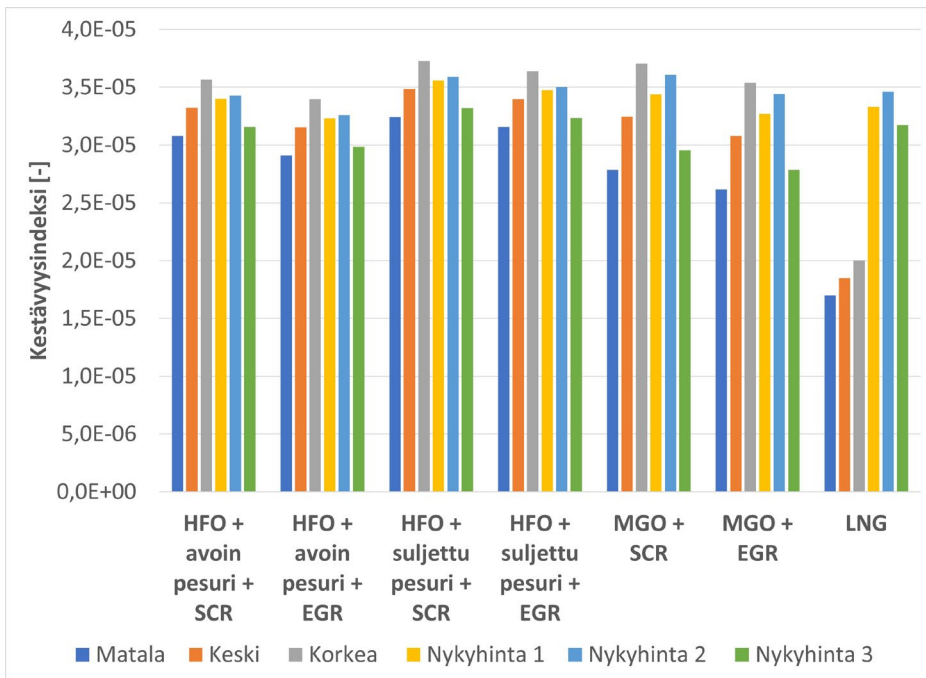


**Kuva 5.** Vaihtoehtojen taloudelliset indeksit eri hintaskenarioilla laskettuna.

Kuvassa 6 on esitetty kokonaiskestävyysindeksi, joka siis yhdistää ympäristö- ja taloudellisen indeksin tulokset eri vaihtoehdoille. LNG antaa perushintaskenaarioilla huomattavasti parempia kokonaiskestävyyden suorituskykyarvoja verrattuna muihin vaihtoehtoihin. HFO-vaihtoehdoista parhaimman suorituskyvyn saa vaihtoehto, jossa on yhdistetty avoin pesuri sekä EGR. Samoin MGO yhdistettynä EGR:n on hieman SCR-vaihtoehtoa parempi. Dieselvaihtoehdoista matalan hinnan skenaariossa paras vaihtoehto on nimenomaan MGO yhdistettynä EGR:n. Tilanne kuitenkin muuttuu hintaskenaarion muuttuessa eli kalliin hinnan skenaariossa HFO yhdistettynä avoimeen pesuriin ja EGR:n näyttäytyy parhaana dieselvaihtoehdoista.

Avoimen pesurin kaikkia ympäristövaikutuksia ei kuitenkaan ole tässä pystytty huomioimaan, sillä tutkimukset avoimien pesureiden vaikutuksista meriympäristöön ovat vielä kesken ja niiden käyttökieltoa on suunniteltu. Tässä vertailussa ja työkalussa on oletettu, että EGR yksinään täyttäisi tiukimmat Itämerelle asetetut NO<sub>x</sub>-vaatimukset (Tier III). Tästä ei kuitenkaan ole täyttä varmuutta, vaan EGR saattaa olla tarpeen yhdistää muihin teknologioihin tiukkojen vaatimusten täyttämiseksi. MAN B&W on kuitenkin osoittanut testiohjelmassa testimootorilla, että Tier III NO<sub>x</sub>-päästöstandardi on mahdollista täyttää pelkällä EGR:llä (IMO 2013, 16). Näin ollen näissä laskelmissa oletetaan, että EGR yksinään voisi täyttää Tier III -vaatimukset.

Kun vertaillaan tilannetta nykyhinta-skenaarioiden osalta, eri vaihtoehdot ovat hyvin lähellä toisiaan eikä LNG erottaudu muita parempana vaihtoehtona suuremmista ympäristöhyödyistä huolimatta. Nykyhinta 1 ja 2-skenaarioissa HFO yhdistettynä avoimeen pesuriin ja EGR:n on kaikista vaihtoehdoista paras ja nykyhinta 3-skenaariossa MGO yhdistettynä EGR:n on vastaavasti paras. Huonoimpana näyttäytyvät HFO yhdistettynä suljettuun pesuriin tai MGO yhdistettynä SCR:n. LNG jää vaihtoehtojen väliin näyttäytymättä huonoimpana tai parhaimpana missään nykyhinta-skenaariossa.



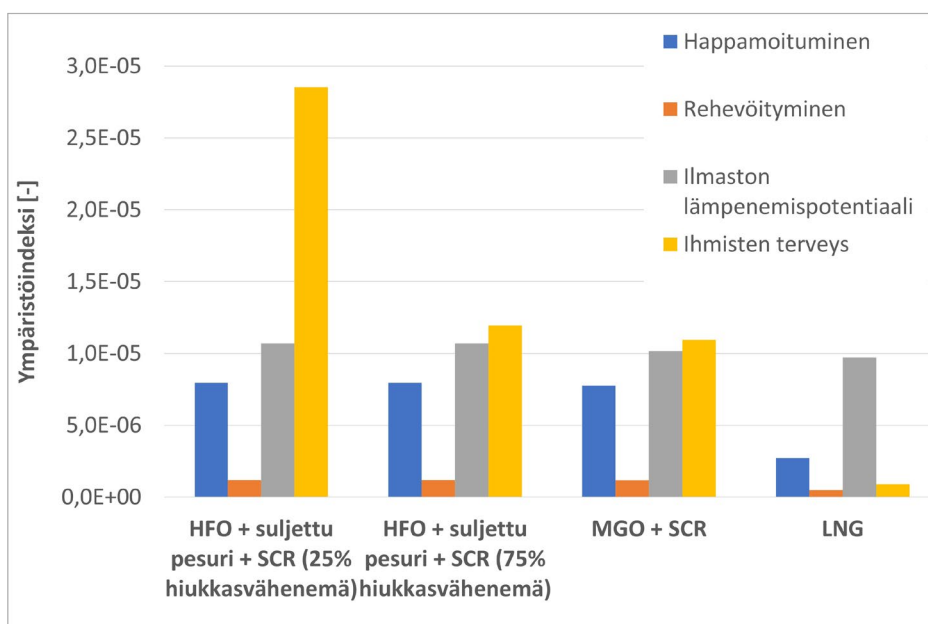
**Kuva 6.** Vaihtoehtojen kokonaiskestävyysindeksit eri hintaskenaarioilla laskettuna.

## Hiukkaspäästöjen, mustan hiilen ja metaanin vaikutus tuloksiin

Vaihtoehtoista 1–7 kaikki täyttävät oletetusti sekä tiukat rikki- että  $\text{NO}_x$ -rajoitukset, jotka on asetettu Itämerelle. Silti vaihtoehtojen välille syntyy selkeästi eroa ympäristöindeksi-tulosten perusteella (kuva 4). Tämä ero syntyy pääosin eri vaihtoehtoissa syntyvien hiukkaspäästöjen eroista ja niissä tehdyistä oletuksista. Tässä osuudessa on vertailtu tällä hetkellä ”rajoittamattomien” päästökomponenttien kuten hiukkaset, musta hiili ja metaani vaikutusta tuloksiin.

Ympäristöindeksissä ”ihmisten terveys” -vaikutusluokassa huomioidaan myös hiukkaspäästöt (PM 2.5 ja PM 10). Kirjallisuuden perusteella on arvioitu, että laivan käytössä syntyvät hiukkaspäästöt ovat suurimpia raskasta polttoöljyä käyttävissä aluksissa. LNG:n käytössä syntyvien hiukkaspäästöjen oletetaan taas olevan hyvin pienet. Raskasta polttoöljyä käyttävässä aluksessa käytettävä pesuri (avoin tai suljettu) voi myös vähentää hiukkaspäästöjä, ja mittauksissa saadut tulokset vaihtelevat paljon. (Winnes ym. 2020, 1–12)

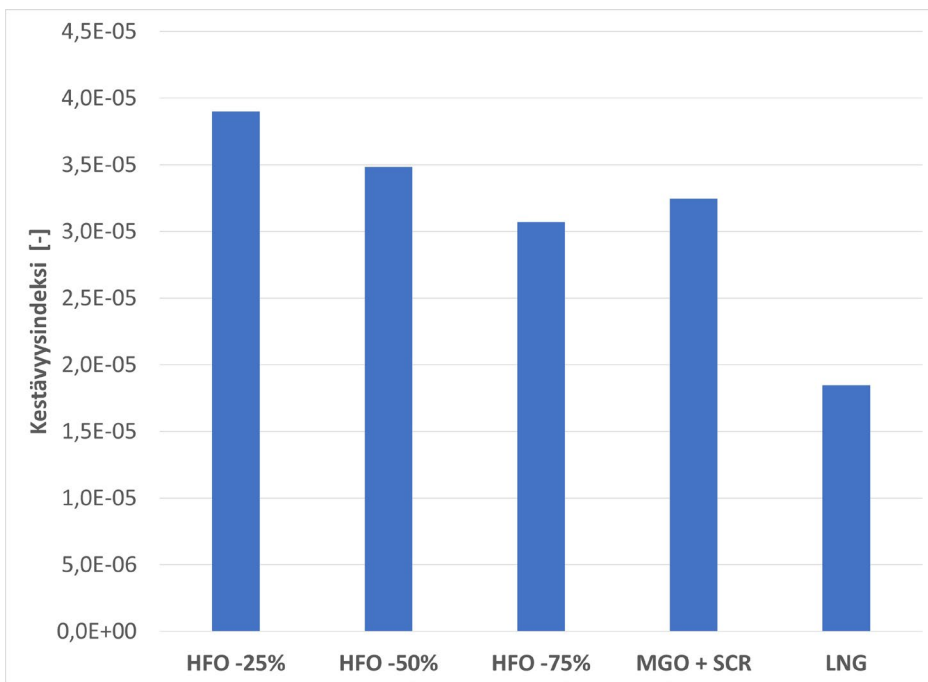
Kuvassa 7 on havainnollistettu, kuinka suuri vaikutus kullakin vaikutusluokalla on ympäristöindeksiin. Vertailuun on valittu päästövähennysmenetelmistä suljettu pesuri, joka ei päästä mereen kierrossa käytettyä nestettä toisin kuin avoin pesuri, jonka käyttökielto on ollut viime aikoina keskusteluissa kuten edellä on mainittu. SCR-teknologia on valittu vertailuun, sillä sen oletetaan pystyvän täyttämään yksin tiukatkin  $\text{NO}_x$ -rajoitukset suurella todennäköisyydellä. Jos suljetussa pesurissa oletetaan tapahtuvan 25 % vähenemä, ihmisten terveys -vaikutusluokka kasvattaa huomattavasti kokonaisympäristöindeksin tulosta verrattuna muihin vaihtoehtoihin. Dieselvaihtoehtojen tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan, jos oletetaan 75 % vähenemä pesurissa. LNG-vaihtoehdossa myös happamoituminen on selvästi muita pienempi.



**Kuva 7.** Vaikutusluokkien osuudet ympäristöindeksistä.

Työkalun avulla on myös havainnollistettu, kuinka paljon oletettu vähennys pesurissa vaikuttaa kokonaiskestävyydestulosten vertailuun. Oletettu vähennys HFO-vaihtoehdoissa, jotka on varustettu SCR:llä ja suljetulla pesurilla vaihtelee välillä 25-75 %. Kuva 8 esittää vertailun tulokset, joista huomataan, että 75 % hiukkasvähenemällä HFO näyttäytyy jopa MGO:ta parempana vaihtoehtona. Tässä on käytetty taloudellisen indeksin laskennassa ”keski”-hintaskenaariota.



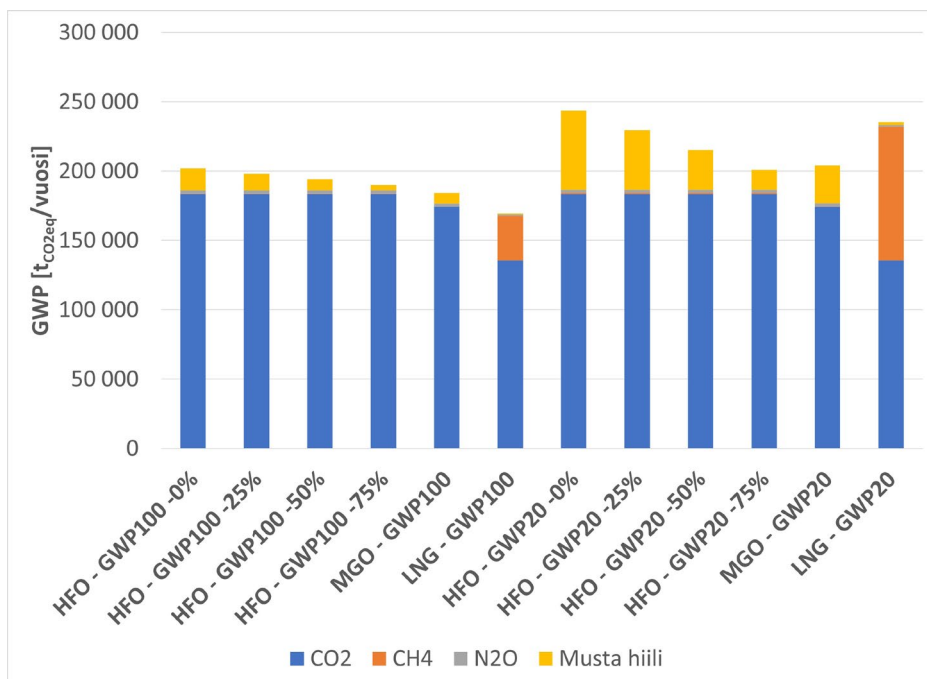


**Kuva 8.** Pesurissa tapahtuvan hiukkasvähenemän vaikutus kokonaiskestävyysindeksiin.

Viime aikoina on ollut paljon keskustelua alusten mustan hiilen ja metaanin päästöistä. Kummallekaan ei ole vielä asetettu sitovia rajoituksia, mutta niiden vaikutusta haluttaisiin voimakkaasti vähentää. Metaanipäästöjä syntyy LNG:tä käyttävissä laivoissa, ja mustan hiilen päästöt taas syntyvät dieselpolttoaineita, etenkin raskasta polttoöljyä, käytettäessä. Näiden vaikutusta ei kuitenkaan usein ole otettu huomioon, kun vaihtoehtojen kokonaisvaikutuksia on arvioitu. Kumpikin päästöluokka, sekä mustan hiilen että metaanin päästöt, vaikuttaa ilmaston lämpenemispotentiaali-vaikutusluokkaan. Mustan hiilen karakterisointitekijä vaihtelee huomattavasti GWP100 (900) ja GWP20 (3200) välillä (taulukko 1) (Comer ym. 2017, 35).

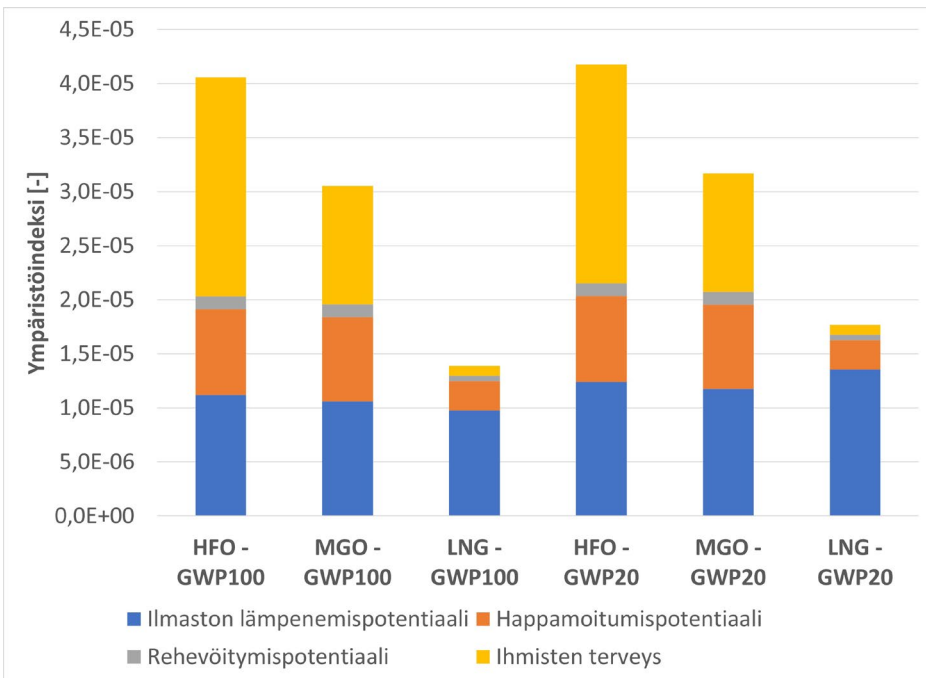
Aiemmissä tämän artikkelin tuloksissa mustaa hiiltä ei ole huomioitu ilmaston lämpenemispotentiaal tuloksissa. Seuraavissa laskelmissa (kuvat 9–11) aluksen mustan hiilen päästökertoimet on muodostettu neljännessä IMO:n kasvihuonekaasututkimuksesta (IMO 2020, 72-77). Vertailuun on otettu päästövähennysmenetelmistä SCR ja suljettu pesuri kuten edellisessä kappaleessa. Kirjallisuuden mukaan mustan hiilen väheneminen pesureissa vaihtelee jopa 10 % ja 80 % välillä (Comer ym. 2017, 7-8). Laskelmissa hiukkasten ja mustan hiilen oletettu vähenemä pesurissa vaihtelee välillä 0-75%.

Kuvassa 9 on esitetty ilmaston lämpenemispotentiaalin tulokset kahdella aikajänteellä, jotka ovat 20 ja 100 vuotta. Aikajänteellä 100 vuotta LNG:n ilmaston lämpenemispotentiaali jää selvästi muita vaihtoehtoja pienemmäksi, vaikka metaanin osuus tuloksesta on merkittävä (19 %). Raskaan polttoöljyn tuloksissa mustan hiilen osuus vaihtelee 2–8 % välillä, ja kokonaistulokset ovat vaihtoehtoista suurimmat. Jos tarkasteltua aikajännettä pienennetään 20 vuoteen, mustan hiilen vaikutus kasvaa merkittävästi ja vaihtelee raskaalla polttoöljyllä 7 ja 23 % välillä. Myös metaanin osuus kasvaa merkittävästi sen ollessa 41 % LNG:llä. LNG:n ilmaston lämpenemispotentiaali ylittää 20 vuoden aikajänteellä muiden vaihtoehtojen tulokset paitsi HFO-vaihtoehdon, jossa pesurissa ei tapahdu yhtään mustan hiilen vähenemää.

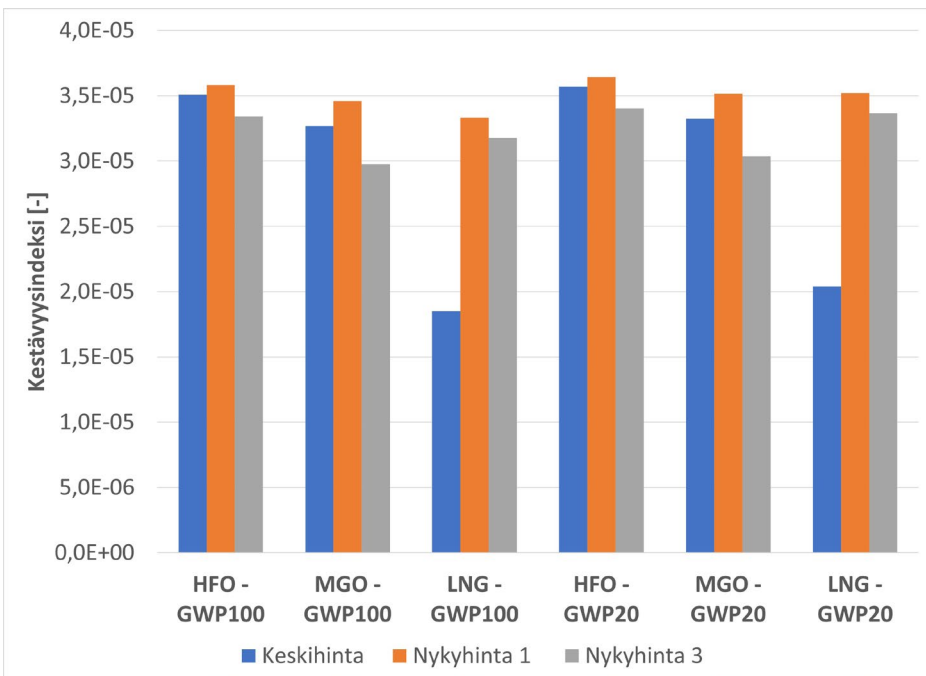


**Kuva 9.** Ilmaston lämpenemispotentiaali eri vaihtoehdoille, kun mustan hiilen päästöt on huomioitu laskelmissa.

Ympäristöindeksi- ja kestävyysindeksilaskelmissa hiukkasten ja mustan hiilen vähenemän pesurissa oletetaan olevan 50 %. Kuvasta 10 huomataan, kuinka molemmilla aikajänteillä (20 ja 100 vuotta) LNG:n ympäristöindeksi jää kaikista pienimmäksi. Näin olisi, vaikka ihmisten terveys -vaikutusluokka jätettäisiin huomioimatta tuloksissa. Kokonaiskestävyys-tulokset ovat kuitenkin hyvin lähellä toisiaan, jos hintaskenaarioina käytetään nykyhintoja (kuva 11).



**Kuva 10.** Eri vaikutusluokkien vaikutus ympäristöindeksiin, kun mustan hiilen päästöt on huomioitu laskelmissa.



**Kuva 11.** Kokonaiskestävyysindeksi valituille vaihtoehdoille, kun mustan hiilen päästöt on huomioitu laskelmissa.

## Yhteenveto

Työkalulla on vertailtu nykyisiä päästövähennystekniikoita ja polttoaineita niiden ympäristö-, taloudellisen ja kokonaiskestävyyden kannalta kuvitteellisen aluksen tiedoilla. Vertailuissa muuttujina on pyritty käyttämään tekijöitä, joiden on havaittu merkittävästi muuttavan vaikutuksista tehtäviä päätelmiä. Näitä tekijöitä ovat esimerkiksi polttoaineen hinta ja mustan hiilen päästöt sekä hiukkaspäästöt.

Kokonaiskestävyyden osalta LNG antaa parhaimman suorituskyvyn kaikilla aiemmin tehdyillä hintaskenaarioilla, sillä näissä taloudellinen indeksi antaa pienimmät tulokset aina LNG:lle. Vielä kun lisätään selkeästi parempi ympäristöindeksi, tulokset erottautuvat selkeästi LNG:n eduksi. LNG on siis vertailuissa ylivoimaisesti paras kokonaisympäristövaikutuksiltaan, ja vaihtoehto erottautuu etenkin vaikutusluokissa ihmisten terveys ja happamoituminen. Ympäristöindeksin osalta voidaan siis tehdä samanlaisia päätelmiä kuin loppuraportin artikkelissa ”Päästövähennysmenetelmien elinkaari- ja ympäristökustannus-analyysi” on tehty vaihtoehtojen ympäristökustannuksia vertailtaessa.

Vertailluista vaihtoehtoista raskaan polttoöljyn kanssa EGR ja avoin pesuri näyttävät hieman parempina vaihtoehtoina sekä taloudellisen että ympäristöindeksin kannalta verrattuna suljettuun pesuriin ja SCR:n. Erot ovat kuitenkin suhteellisen pieniä molemmissa indekseissä. Näiden tekniikoiden (EGR ja avoin pesuri) toimintaan ei kuitenkaan välttämättä voida täysin tukeutua, sillä avoimen pesurin käyttökielto voi olla edessä ainakin tietyillä alueilla johtuen rajoituksista, jotka koskevat mereen laskettavia poistovesiä. Lisäksi, jos tuloksissa voitaisiin huomioida myös nämä vaikutukset, voisi suljettu pesuri antaa edullisempia tuloksia ympäristöindeksin osalta.

EGR-tekniikan riittävästä toimintakyvystä ei ole täyttä varmuutta, vaan SCR näyttää vaihtoehtona, johon useat toimijat näyttävät luottavan. EGR voisi kuitenkin olla hieman edullisempi vaihtoehto taloudellisilta vaikutuksiltaan johtuen edullisemmista investointi- ja käyttökustannuksista. SCR-tekniikan käyttö vaatii myös enemmän kemikaaleja, jotka vaikuttavat myös ympäristöindeksiin, jos huomioidaan myös niiden valmistuksen aiheuttamat ympäristövaikutukset. Siten EGR:n osalta voidaan saavuttaa myös pienempi ympäristöindeksi, jos tekniikalla saadaan alennettua aluksen typenoksidien päästötasoa riittävästi.

Tutkimuksen aikana polttoaineiden hinnat ovat muuttuneet rajusti ja saavuttaneet uusia ennätyslukemia. Siten taloudellisen kestävyden arvioinnista on tullut entistä haastavampaa, sillä alusten päästövähennystekniikkaprojektien aikajänne on usein vuosikymmeniä, jonka ajalle polttoaineiden hinnat tulisi pystyä arvioimaan. Vuodelle 2030 tehdyt hintaennustukset

voivat näyttäytyä hyvin epäuskottavina, kun markkinatilanne muuttuu yllättäen. Siten tässä vertailuissa on käytetty sekä aiemmin tehtyjä hintaennusteita että nykyisiä polttoaineiden hintoja. Kaasun hinnan saavuttaessa uusia ennätyksiä viime aikoina (vuonna 2022), LNG:n ympäristövaikutuksissa saavuttama etu on kuroutunut kiinni. Nykyhinnoilla LNG:n kokonaiskestävyys on samalla tasolla muiden vaihtoehtojen kanssa ilman että yksikään vaihtoehto erottautuisi joukosta, etenkin kun laskelmiin sisältyy lukuisia epävarmuuksia.

Eräs tuloksiin epävarmuutta aiheuttava muuttuja on pesurissa tapahtuva hiukkasten vähenemä. Hiukkaset vaikuttavat ihmisten terveyteen aiheuttamalla haittaa verisuoni- ja hengityselimistöön terveydelle. Hiukkasista erityisen haitallisia ovat etenkin pienhiukkaset (kokoluokaltaan alle 2,5 µm). Tällä hetkellä esimerkiksi Suomessa ”merkittävimäksi ilman epäpuhtauksien aiheuttamaksi haitaksi tällä hetkellä arvioidaan pienhiukkasten aiheuttamat terveyshaitat” (Ympäristöministeriö 2019, 46–47). Muita merkittäviä ilman epäpuhtauksia, jotka aiheuttavat terveyshaittoja, ovat hengitettävät hiukkaset (kokoluokaltaan alle 10 µm) sekä typen oksidit. Nämä kaikki tekijät on huomioitu työkalun ihmisten terveys -ympäristövaikutusluokassa. Hiukkaset voivat kulkeutua myös pitkiä matkoja, ja esimerkiksi kaukokulkeuma Keski-Euroopasta aiheuttaa selvästi suuremmat taustapitoisuudet Suomen eteläosissa kuin pohjoisosissa. (Ympäristöministeriö 2019, 46–47.) Siten alusten aiheuttamat hiukaspäästöt vaikuttavat ihmisten terveyteen sekä kaukokulkeutumana että lähipäästöinä satamien läheisyydessä sekä laivareittien lähellä olevissa asutuksissa.

Tutkimuksessa on vertailtu, kuinka oletettu hiukkasvähenemä pesurissa vaikuttaa vaihtoehtojen kokonaiskestävyyden eroihin. Tulosten perusteella vähenemän pesurissa tulisi olla merkittävä, jotta raskaan polttoöljyn ympäristöindeksi sekä kokonaiskestävyys lähestyisivät MGO:n lukuja. Vähenemän tulisi olla noin 75 %:n luokkaa, jotta vaihtoehtoilta olisi samanlainen vaikutus ympäristöön. Tämän suuruisia vähenemiä on havaittu joissakin tutkimuksissa, mutta eri tutkimusten välillä on suuriakin eroja (Winnes ym. 2020, 1-12).

Tulokset osoittavat myös, kuinka tärkeää on huomioida sekä mustan hiilen että metaanin päästöt etenkin lyhyemmän aikavälin tarkastelussa ilmaston lämpenemispotentiaalissa. LNG-alusten metaanivuodot voivat olla merkittäviä, mutta laillisia rajoituksia ei ainakaan toistaiseksi ole. Viimeisimmässä IMO:n kasvihuonekaasuinventaariossa, vuodelta 2020, huomattiin selkeä kasvu alusten metaanipäästöissä; ne kasvoivat noin 150 % vuosina 2012–2018 (IMO 2020, 134). Kasvu johtui erityisesti LNG:n käytön lisääntymisestä ja moottorivalikoiman muutoksesta, koska monipolttoainemoottoreiden osuus on kasvanut merkittävästi (IMO 2020, 134).

Musta hiili on metaanin lisäksi toinen komponentti, jolla on hyvin voimakas vaikutus ilmaston lämpenemiseen erityisesti Arktisella alueella. Risteilyalukset ovat alusluokka, joka päästää eniten mustaa hiiltä aluksen käyttämää polttoainetonnia kohden vuodessa (Comer ym. 2017, VII), ja Itämeren liikenteessä on paljon risteilyaluksia. IMO:n komiteoissa yritetään tällä hetkellä myös sopia toimenpiteistä ja rajoituksista, joilla mustan hiilen päästöjä voitaisiin vähentää.

Jos LNG:n metaanipäästöt saadaan leikattua selvästi pienemmiksi, sen ilmaston lämpenemisvaikutukset ovat selkeästi dieselvaihtoehtoja pienemmät etenkin 100 vuoden aikajännteellä. 20 vuoden aikajännetarkastelussa tulisi myös huomioida dieselvaihtoehtojen mustan hiilen päästöt, jotta vertailusta tulisi tasapuolinen. Mustan hiilen päästöistä johtuen raskaan polttoöljyn 20 vuoden ilmaston lämpenemispotentiaali voi ylittää jopa LNG:n tulokset riippuen esimerkiksi vähennyksestä pesurissa.

Raskaan polttoöljyn käytössä siis hiukkas- ja mustan hiilen päästöt näyttäytyvät tekijöinä, joita vähentämällä voitaisiin merkittävästi vaikuttaa vaihtoehdon ympäristökuormaan. Jos LNG:n hintataso pysyy jatkossakin korkealla, viime vuosina Itämeren alueella saavutettu innostus panostaa kyseisen teknologian investointeihin voi vähentyä. Tällöin olisi tärkeää panostaa muiden nykyisten vaihtoehtojen ympäristövaikutusten, kuten pienhiukkaspäästöjen, minimointiin.

Työkalulla voidaan siis vertailla eri vaihtoehtoja sekä ympäristön että taloudellisen kestävyyskannalta. Työkalu ei pysty huomioimaan kaikkia mahdollisia tekijöitä ja vaikutuksia, mutta siihen on pyritty huomioimaan merkittävimpiä tekijöitä. Näin voidaan tehdä suuren linjan vertailuja vaihtoehtojen päästövähennysmenetelmien välillä. Tulevaisuudessakin tämän tyyppiseen vertailuun on suurta tarvetta, kun uusia hiilidioksidipäästöjen eliminointiin tähtääviä päästövähennysteknologioita ja polttoainevaihtoehtoja tulee markkinoille. Tällöin myös muiden ympäristövaikutusten kuin ilmaston lämpenemispotentiaalın merkitys vertailussa voi kasvaa. Lisäksi työkalussa olisi tärkeää tulevaisuudessa huomioida eri vaihtoehtojen sosiaaliset vaikutukset, jotka tässä työssä on jätetty pois.

## LÄHTEET

Altarriba, E., Rahiala, S., Tanhuanpää, T., Piispa, M. 2022. Developing sustainable shipping and maritime transport: multi-criteria analysis between emission abatement methods. Teoksessa Ergin & Guedes-Soares (toim.): Sustainable development and innovations in marine technologies. Proceedings of the 19th international congress of the international maritime association of the Mediterranean. London: CRC Press.

Bengtsson, S.K., Andersson, K.E., Fridell, E. 2011. Life cycle assessment of marine fuels. A comparative study of four fossil fuels for marine propulsion. Gothenburg: Chalmers University of Technology.

Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B., Rutherford, D. 2017. Black carbon emissions and fuel use in global shipping 2015. International Council on Clean Transportation.

Crenna, E., Secchi, M., Benini, L., Sala, S. 2019. Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalization factors for LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, 1851–1877.

FuelEU Maritime. 2021. Proposal for a regulation of the Euro-pean parliament and of the council on the use of renewable and low-carbon fuels in maritime transport and amending Directive 2009/16/EC.

Iannaccone, T., Landucci, G., Tugnoli A., Salzano, E., Cozzani, V. 2020. Sustainability of cruise ship fuel systems: Comparison among LNG and diesel technologies. *Journal of Cleaner Production*, 260, article 121069.

IEA. 2021. World Energy Outlook 2021. Paris: OECD Publishing.

IMO. 2020. Fourth IMO GHG Study 2020 – Final report 2020. London: IMO.

Laurent, A., Hauschild, M.Z., Golsteijn, L., Simas, M., Fontes, J., Wood, R. 2013. Deliverable 5.2: Normalisation Factors for Environmental, Economic and Socio-economic Indicators. Prosuite Deliverable 5.2: Normalisation factors for Environmental, Economic and Socio-economic Indicators.

SFS-EN ISO 14044. 2006. Ympäristöasioiden hallinta. Elinkaariarviointi. Vaatimukset ja suuntaviivoja

Wegener Sleswijk, A., van Oers, L. F.C.M., Guinée, J.B., Struijsd J., Huijbregts, M.A.J. 2008. Normalisation in product life cycle assessment: An LCA of the global and European economic systems in the year 2000. *Science of the total environment*, 390, 227–240.

Winnes, H., Fridell, E., Yaramenka, K., Nelissen, D., Faber, J., Ahdour, S. 2016. NO<sub>x</sub> controls for shipping in EU Seas. IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd. Report number: U 5552.

Winnes, H., Fridell, E., Moldanová, J. 2020. Effects of Marine Exhaust Gas Scrubbers on Gas and Particle Emissions. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8, 1–21.

Wulf, C., Werker, J., Ball, C., Zapp, P., Kuckshinrichs, W. 2019. Review of Sustainability Assessment Approaches Based on Life Cycles. *Sustainability*, 11, article 5717.

Ympäristöministeriö. 2019. Kansallinen ilmansuojeluohjelma 2030. WWW-dokumentti. Viitattu 28.10.2022. Saatavissa: [julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161467/Kansallinen%20ilmansuojeluohjelma%202030.pdf?sequence=4&isAllowed=y](https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161467/Kansallinen%20ilmansuojeluohjelma%202030.pdf?sequence=4&isAllowed=y)

Åström, S., Yaramenka, K., Winnes, H., Fridell, E., Holland, M. 2018. The costs and benefits of a nitrogen emission control area in the Baltic and North Seas. *Transportation Research Part D*, 59, 223–236.



## **KAAKKOIS-SUOMEN AMMATTIKORKEAKOULU**

- 1 *Srujal Shah – Kari Dufva: CFD modeling of airflow in a kitchen environment. Towards improving energy efficiency in buildings. 2017.*
- 2 *Elias Altarriba: Öljyn leviämisen estimointi arviointitaulukoiden avulla osana operatiivista öljyntorjuntatyötä Saimaalla. 2017.*
- 3 *Elina Havia – Jari Käyhkö (toim.): Fotoniikkasensori- ja korkean teknologian kuvantamisen demonstrointi metsäbiojalostamon hallintaan (FOKUDEMÖ). 2017.*
- 4 *Justiina Halonen – Emmi Rantavuo – Elias Altarriba: Öljyntorjuntakoulutuksen ja -osaamisen nykytila. SCAROIL-hankkeen selvitys öljyntorjunnan koulutus-tarpeista. 2017.*
- 5 *Veli Liikanen – Arto Pesola: Physical fun: exercise, social relations and learning in SuperPark. 2018.*
- 6 *Timo Hantunen – Petri Janhunen (toim.): Sote-alan videoneuvottelujärjestelmien käytettävyys ja käyttöönotto. 2018.*
- 7 *Pekka Turkki: Selluloosa ja selluloosajohdannaiset elintarvikkeissa. 2018.*
- 8 *Elias Altarriba – Minna Pelkonen – Jukka-Pekka Bergman: Laadullinen tapaus-tutkimus opetusresurssien nopean ja voimakkaan vähenemisen vaikutuksista korkeakouluopetukseen. 2018.*
- 9 *Sari Tuuva-Hongisto: Nuorten syrjäytyminen ja alueellisen eriytymisen vähentäminen. Tutkimuskirjallisuuteen ja -raportteihin pohjautuva kartoitus. 2019.*
- 10 *Susan Eriksson: Digitalisaatio nuorisotyön opetuksessa. 2019.*
- 11 *Susan Eriksson – Sari Tuuva-Hongisto: Nuorisotyön digitalisaatio 2030. ”Meidän tulisi osata tarjota nuorille työkaluja maailmaan, jota me emme vielä itse tunne.” 2019.*

- 12 *Susan Eriksson*: Digital applications in youth employment services. 2019.
- 13 *Hilla Sumanen – Jaakko Harkko – Jouni Lahti – Eeva-Leena Ketonen – Olli Pietiläinen – Anne Kouwonen*: Nuorten työntekijöiden työkyky ja työterveyshuollon palvelujen käyttö. 2020.
- 14 *Marja Moisala (toim.)*: Paikkariippumattomuus nuorten tulevaisuuden palveluissa maaseudulla. 2020.
- 15 *Hilla Sumanen*: Experiences and impacts of the post critical incident seminar among rescue and emergency medical service personnel. 2020.
- 16 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala (ed.)*: XAMK BEYOND 2020. At Your Service – Business Development, Co-operation and Sustainability. 2020.
- 17 *Mikhail Nemilentsev, Jarmo Kujanpää & Jan Kettula (eds.)*: Research on current and development needs in the automotive and motorsport industry. 2021.
- 18 *Vesa Tuomala*: Maritime cybersecurity. Before the risks turn into attacks. 2021.
- 19 *Jaana Poikolainen, Vappu Myllärinen & Ilari Salomaa (eds.)*: Mentoring needs in theory and practice. 2021
- 20 *Hilla Nordquist (toim.)*: MENTALFIREFIT: Tutkimusta mielenterveydestä ja jälkipurkukäytännöistä pelastuslalla. 2021.
- 21 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala – Cai Weaver (eds.)*: XAMK BEYOND 2021. Sustainable Development and Social Responsibility. 2021.
- 22 *Marja-Liisa Neuvonen-Rauhala – Cai Weaver (eds.)*: XAMK BEYOND 2022. Impacts. 2022.
- 23 *Ilkka Vanttaja, Mikko Nykänen ja Eetu Huttunen*: Materiaalia lisäävän valmistuksen laitteet ja sovellukset alueellisessa teknologiaklusterissa. 2022.
- 24 *Elias Altarriba (toim.)*: Meriliikenteen päästövähennysratkaisut. MEPTEK-hankkeen loppuraportti. 2022.



Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu