



Vaasan yliopisto
UNIVERSITY OF VAASA

Valtteri Iso-Mustajärvi

IMO Tier III -päästörajoitukset ja niiden vaikutukset merenkulussa

Tuotantotalouden ja
tietojärjestelmätieteiden
akateeminen yksikkö

Tuotantotalouden
kandidaatintutkielma

Vaasa 2025

VAASAN YLIOPISTO**Tuotantotalouden ja tietojärjestelmätieteiden akateeminen yksikkö**

Tekijä:	Valtteri Iso-Mustajärvi		
Tutkielman nimi:	IMO Tier III -päästörajoitukset ja niiden vaikutukset merenkulussa		
Tutkinto:	Kauppatieteiden kandidaatti		
Koulutusohjelma:	Tuotantotalouden kandidaattiohjelma		
Työn ohjaaja:	Tauno Kekäle		
Valmistumisvuosi:	2026	Sivumäärä:	50

TIIVISTELMÄ:

Kansainvälinen merenkulku on olennainen osa globaalia talousjärjestelmää, mutta merenkulkuun liittyy myös huomattavia terveys- ja ympäristöhaittoja. Etenkin alusten aiheuttamat typenoksidipäästöt (NOx) heikentävät ilmanlaatua ja aiheuttavat haittoja niin ihmisten terveydelle kuin ympäristölle, erityisesti satamakaupungeissa ja rannikkoalueilla. Haasteisiin on pyritty vastaamaan kansainvälisen sääntelyn avulla. Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO) on asettanut merenkululle NOx päästörajoituksia, jotka tunnetaan nimellä IMO Tier -päästörajoitukset. Rajoituksista tiukin tunnetaan nimellä IMO Tier III -päästörajoitus, joka koskee aluksia, jotka operoivat päästöjen kontrollointialueella (Emission Control Area, ECA).

Kandidaatintutkielman tarkoituksena on tutkia IMO:n Tier -päästörajoitusten vaikutuksia kansainväliseen merenkulkuun, painottuen Tier III -päästörajoitukseen. Tutkielma perustuu kirjallisuuskatsaukseen ja hyödyntää tutkimustietoa, viranomaislähteitä sekä merenkulkua käsitteleviä julkaisuja. Tutkielmassa käsitellään päästörajoitusten vaikutuksia teknologian kehitykseen, alusten suunnitteluun ja rakentamiseen, investointeihin ja kustannusrakenteisiin sekä terveys- ja ympäristövaikutuksiin.

Tutkielman keskeinen havainto on, että erityisesti Tier III -päästörajoituksen vaatiman tason täyttäminen on edellyttänyt toimialalta merkittäviä teknisiä ratkaisuja, kuten esimerkiksi pakokaasujen jälkikäsitelyjärjestelmiä ja vaihtoehtoisten moottoritekniikoiden ja polttoaineiden käyttöönottoa. Samalla rajoitukset ovat vaikuttaneet varustamoiden investointipäätöksiin, alusten kilpailukykyyn sekä rahoitus- ja vakuutusehtoihin. Ympäristönäkökulmasta tiukentuneet päästörajoitukset ovat parantaneet ilmanlaatua erityisesti päästöjen kontrollointialueilla, mutta samaan aikaan rajoitukset ovat lisänneet merenkulun teknisiä ja taloudellisia haasteita. Kokonaisuutena IMO Tier -päästörajoitukset ja etenkin Tier III -rajoitus on ohjannut merenkulkua kohti ympäristöystävällisempää operointia, mutta ratkaisut vaativat edelleen merkittäviä panostuksia toimialalta.

AVAINSANAT: Merenkulku, ympäristösääntely, typen oksidit, päästörajoitukset

Sisällys

1	Johdanto	6
2	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization, IMO)	8
2.1	IMO NOx Tier	10
2.1.1	IMO Tier I	11
2.1.2	IMO Tier II	12
2.1.3	IMO Tier III	12
2.2	Emission Control Area (ECA)	13
2.2.1	ECA tulevaisuus	13
3	IMO Tier säädösten ja ECA vaikutus	16
4	Teknologian kehitys ja innovaatiot	17
4.1	Selective Catalytic Reduction (SCR)	17
4.2	Dual fuel – ja LNG-moottorit	19
4.3	Kehittymässä olevat ratkaisut, metanoli-, ammoniakki-, ja vetymootorit	22
4.3.1	Metanoli	22
4.3.2	Ammoniakki	23
4.3.3	Vety	25
5	Aluksen rakennus ja suunnittelu	27
5.1	Tier III -päästörajoitusten vaikutus alusten suunnitteluun	27
5.2	SCR-järjestelmän integrointi: vaikutus rakenteeseen ja retrofittauksen haasteet	28
5.3	Ympäristötekijät kilpailuetuna	29
6	Investoinnit ja kustannusrakenne	31
6.1	Aluskustannukset ja uusien teknologioiden vaikutus	31
6.2	Käyttökustannukset	32
6.3	Rahoitus ja vakuutukset	34
7	Ympäristövaikutukset	36
7.1	Paikalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset	36
7.2	Globaalit ympäristövaikutukset	37

7.3 Ilmastovaikutukset	38
7.4 Vanhojen alusten käyttöikä ja romutus	40
8 Yhteenveto	42
Lähteet	44

Kuvat

Kuva 1 ECA:t ja todennäköisimmät tulevat kontrollialueet	15
Kuva 2 SCR havainnollistettuna	18
Kuva 3 Kuormituspisteiden suuntaa antavat vähennystavoitteet	19
Kuva 4 Wärtsilä 6L34DF	21
Kuva 5 MAN B&W 5G70ME-GI Mk10.5	21

1 Johdanto

Kansainvälinen merenkulku on oleellinen osa globaalia talousjärjestelmää, sillä suurin osa maailmankaupasta kulkee meriteitse. Merenkulku on kuljetusmuotona suhteellisen energiatehokas, mutta sen kokonaispäästöt ovat huomattavia toiminnan mittasuhteiden vuoksi. Ympäristön ja terveyden kannalta haitallisia ovat etenkin merenkulun aiheuttamat typenoksidipäästöt (NO_x), sillä ne vaikuttavat ihmisten terveyteen, vahingoittavat ilmanlaatua sekä osallistuvat kemiallisiin prosesseihin ilmakehässä, mikä vaikuttaa niin paikallisesti kuin globaalisti.

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on vastuussa kansainvälisestä sääntelystä merenkulun päästöjen suhteen toimien yhdistyneiden kansakuntien alaisuudessa. IMO:n ensisijainen tehtävä on laatia ja ylläpitää sääntelyitä merenkulun turvallisuuden ja ympäristösuojelun kehittämiseksi. IMO:n luomat merenkulun ilmastopäästöjä koskevat sääntelyt pohjautuvat MARPOL-yleissopimuksen kuudenteen liitteeseen, jossa asetetaan rajoituksia esimerkiksi alusten NO_x-päästöille. Kyseiset rajoitukset tunnetaan nimellä IMO Tier -päästörajoitukset, joiden vaatimukset ovat kiristyneet asteittain ja vaikuttaneet huomattavasti merenkulun teknologiseen kehitykseen sekä alusten operointiin ja suunnitteluun.

Erityisesti IMO:n tuorein sääntely Tier III on muodostunut merkittäväksi käännekohtaksi merenkulun päästörajoituksissa. Tier III -päästörajoitukset koskevat aluksia, jotka operoivat päästöjen kontrollointialueilla (Emission Control Area, ECA). ECA:t vaativat huomattavia NO_x-päästöjen leikkauksia verrattuna aikaisempiin IMO Tier -päästörajoituksiin. Tier III -rajoitusten täyttäminen ei ole mahdollista ainoastaan perinteistä dieselmoottoria jalostamalla, vaan se edellyttää joko päästöjen jälkikäsitteilyjärjestelmiä tai uuden generaation moottoreita, jotka hyödyntävät vaihtoehtoisia polttoaineita. Tier III -päästörajoitus on vaikuttanut alusten suunnitteluun, investointipäätöksiin ja kustannusrakenteisiin sekä rahoitus- ja vakuutusmarkkinoiden suhtautumiseen ympäristötehokkaisiin ratkaisuihin.

Tutkielman tarkoituksena on tutkia IMO:n laatimien NOx Tier -päästörajoitusten ja etenkin Tier III -rajoituksen vaikutuksia kansainväliseen merenkulkuun. Tutkielma perustuu saatavilla olevaan kirjallisuuteen, olemassa olevaan tutkimustietoon sekä kirjoittajan omaan tietotaitoon. Tutkielmassa tarkastellaan rajoitusten vaatimuksia, niiden taustalla olevia tavoitteita sekä siihen miten ne ovat vaikuttaneet merenkulun toimintaympäristöön.

Tutkielmassa tarkastellaan Tier III -päästörajoitusten vaikutuksia neljästä eri näkökulmasta. Ensimmäiseksi analysoidaan rajoitusten vaikutuksia teknologian kehitykseen ja innovaatioihin, painottuen päästöjen jälkikäsitteilyjärjestelmiin ja vaihtoehtoisiin polttoaineisiin. Toiseksi tutkitaan rajoitusten vaikutuksia alusten suunnitteluun ja rakentamiseen sekä miten rajoitukset ovat vaikuttaneet uudisrakentamiseen ja mahdollisiin retrofit-projekteihin. Kolmanneksi käsitellään vaikutuksia investointeihin, kustannusrakenteisiin ja rahoitus- ja vakuutusmarkkinoihin. Viimeiseksi analysoidaan rajoitusten vaikutuksia ympäristön ja ihmisten terveyden suhteen niin paikallisella kuin globaalilla tasolla.

Tutkielmassa on hyödynnetty tekoälyä ChatGPT 5.2. Työkalua käytin työn alkuvaiheessa, kun pohdin tutkielman rakennetta. Lisäksi työkalua olen hyödyntänyt lähteiden etsinnässä sekä tekstin oikolukemisessa. Oikolukemisessa hyödynsin työkalua erityisesti lauseenrakenteita kehittäessä. Lopullinen vastuu tekstin sisällöstä ja oikeaoppisuudesta on kuitenkin minulla.

2 Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization, IMO)

1800-luvun puolivälistä alkaen on hyväksytty useita merenkulun kansainvälisiä säädöksiä, joita kaikki merenkulkuvaltiot noudattivat, mutta niiden valvonta ja toimeenpano olivat hajanaisia. Useat valtiot esittivät toiveen pysyvämpään ratkaisuun kansainvälisen elimen perustamisesta, jotta meriturvallisuutta voitaisiin tehokkaammin edistää. Tavoite otti askelia toteutumista kohti vasta Yhdistyneiden kansakuntien (YK) perustamisen myötä. Vuonna 1948 Genevessä pidetyssä kansainvälisessä konferenssissa hyväksyttiin yleissopimus, jonka myötä Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization, IMO) sai alkunsa. Vuonna 1958 IMO:n yleissopimus astui voimaan ja ensimmäinen virallinen kokous pidettiin vuotta myöhemmin (International Maritime Organization, n.d.a). Nykyään IMO toimii Lontoosta, Iso-Britanniasta käsin ja vuonna 2024 jäsenvaltioita oli 176 kappaletta ja kolme toissijaista jäsentä.

Järjestön ensisijainen tehtävä on luoda hallitustenvälisiä yhteistyömekanismeja, jotka vaikuttavat kansainväliseen merenkulkuun, järjestön yleissopimuksen 1 artiklan (a) mukaisesti. Sääntelykehysten ylläpitämisen lisäksi järjestön toimialaan kuuluu nykyään muun muassa kansainvälinen meriturvallisuus, ympäristönsuojelu ja merenkulun oikeudelliset kysymykset. IMO on merkittävä toimija kansainvälisessä logistiikassa, sillä noin 90 % maailmankaupasta kulkee meriteitse (International Maritime Organization, n.d.b).

Vuonna 1987 IMO:n yleiskokouksen päätöslauselman A.600(15) (International Maritime Organization [IMO], 1987) mukaisesti otettiin käyttöön IMO-tunnus (IMO Identification number), joka on yksilöllinen ja pysyvä tunnistenumero alukselle sen koko elinkaaren ajan. Tunnuksen tarkoituksena on parantaa merenkulun turvallisuutta, ehkäisemään petoksia, sekä vähentämään ympäristön pilaantumista. Vajaa kymmenen vuotta myöhemmin vuonna 1994 IMO-tunnuksesta tuli SOLAS-yleissopimuksen (International Convention for the Safety of Life at Sea) pakollinen osa, ja kaksi vuotta myöhemmin

tunnus tuli pakolliseksi kaikille yli 100 bruttotonnin matkustaja-aluksille, sekä kaikille yli 300 bruttotonnin rahtialuksille. Vuoden 2002 loppupuolella tehdyn säädöksen mukaan kaikkien säädöksen mukaisten alusten on lisättävä IMO-tunnus alukseen näkyvälle paikalle. IMO-tunnus edesauttaa tehokasta seuranta alusten turvallisuuteen, ympäristövaikutuksiin sekä edistää laittomia toimia, kuten alusten uudelleennimeämistä petostarkoituksissa. Tunnus on täten merkittävä työkalu merenkulun valvonnassa ja hallinnassa, mahdollistaen alusten tietojen kirjaamisen yhdenmukaiseen ja luotettavaan kansainväliseen rekisteriin (International Maritime Organization, n.d.c).

IMO on sitoutunut tukemaan YK:n kestävän kehityksen linjauksia, erityisesti tavoitetta 13, joka käsittelee ilmastonmuutoksen torjuntaa. Merenkulku tuottaa noin 3 % maailmanlaajuisista kasvihuonepäästöistä, joten sillä voidaan todeta olevan tärkeä rooli ilmastonmuutoksen vastaisessa taistelussa (Prengaman, 2024). Sorsa Foundationin (2024) mukaan osuuden oletetaan kuitenkin kasvavan muiden alojen vähentäessä päästöjään enemmän suhteessa merenkulkuun, ellei suuret suunnitellut muutokset toteudu. IMO hyväksyi vuonna 2011 ensimmäiset globaalisti sitovat säännöt alusten energiatehokkuuden parantamiseksi. Säännöt sisälsivät energiatehokkuussuunniteluluvun (Energy Efficiency Design Index, EEDI) ja energiatehokkuussuunnitelman (Ship Energy Efficiency Management Plan, SEEMP), jotka astuivat globaalisti voimaan vuonna 2013. Ensimmäiseksi mainittu säädös asettaa vähimmäisvaatimukset uusien alusten energiatehokkuudelle. EEDI:n tavoitteena on parantaa 30 % alusten energiatehokkuutta vuoden 2025 jälkeen rakennetuissa aluksissa verrattuna 2000-luvun alkupuolella rakennettuihin aluksiin (Suuronen, 2018). Alustava strategia merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen laskemiseksi julkaistiin IMO:n toimesta vuonna 2018. Strategian tavoitteeksi asetettiin aluksi kansainvälisen merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen 50 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon nähden. Poliittisen painostuksen pakottamana IMO tarkisti strategiaansa vuonna 2023 ja kiristi tavoitteeksi ilmastoneutraalin kansainvälisen merenkulun vuoteen 2050 mennessä, täten tavoitteet asetettiin vuonna 2015 laaditun Pariisin ilmastopimuksen mukaiseksi (Sorsa Foundation, 2025).

Edellä mainittujen IMO:n asettamien tavoitteiden saavuttamiseksi vaaditaan merkittäviä muutoksia merenkulussa. Tämä koskee etenkin uusien teknologioiden kehittämisen ja käyttöönoton sekä vaihtoehtoisten nousevien polttoaineiden, kuten ammoniakkin, vedyn ja metanolin hyödyntämisen. Tässä tutkielmassa keskitytään IMO:n asettamien typenoksidipäästösäädösten eli NOx Tier -regulaatioiden vaatimuksiin, vaikutuksiin ja haasteisiin, sekä päästöjen kontrollointiin.

2.1 IMO NOx Tier

Vuonna 1973 hyväksyttiin MARPOL-yleissopimus (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships), joka on IMO:n hallinnoima ja sen tehtävänä on säädellä alusten aiheuttamaa ympäristön saastumista. Vuoden 1973 jälkeen sopimukseen on tehty useita muutoksia ja vuonna 1997 sopimuksen liite VI (Annex VI) otettiin käyttöön, astuen voimaan vuonna 2005. Liite keskittyy tavoittelemaan alusten aiheuttamaa ilman pilaantumista, joka vaikuttaa ihmisten terveyteen sekä ympäristöön. Huang ja muut (2018) mukaan kansainvälisestä merenkulusta johtuva vakava ilman saastuttaminen aiheuttaa merkittäviä haittoja ihmisten terveydelle. Arvioiden mukaan alusten pakokaasupäästöt aiheuttavat Euroopassa jopa 50 000 ennenaikaista kuolemaa vuosittain, mikä johtaa yhteiskunnalle yli 50 miljardin vuotuisiin kustannuksiin. Liite VI asettaa rajat pakokaasujen rikki- ja typenoksidipäästöille (SOx ja NOx) ja erikseen nimetyille päästöjen valvonta-alueille asetetaan vielä tiukemmat rajat SOx:lle, NOx:lle ja muille erilaisille pienhiukkasille. Vuonna 2011 hyväksyttiin jo aiemmin mainittu luku, mikä kattaa pakolliset toiminnalliset ja tekniset toimenpiteet energiatehokkuuden suhteen, joiden tavoitteena on vähentää alusten kasvikaasuhuonepäästöjä (International Maritime Organization, n.d.d).

Liite VI asetti ensimmäiset maailmanlaajuiset NOx-päästörajoitukset, joiden asettamisen taustalla oli kolme keskeistä painottavaa tekijää.

1. Ympäristönsuojelu: Ympäristöä haluttiin suojella rajoittamalla NOx-päästöjä, jotta happosateiden muodostumista voitaisiin ehkäistä. Happosateet

vahingoittavat vesistöjä, metsiä sekä maaperää. Päästöjä rajoittamalla pyrittiin suojelemaan luonnon ekosysteemejä ja hillitsemään ympäristön hapottumista.

2. Ihmiset: NO_x-yhdisteiden on todettu olevan haitallisia ihmisille aiheuttaen hengitystiesairauksia ja pahentaen jo olemassa olevia terveysongelmia, kuten esimerkiksi astmaa. Päästöjä rajoittamalla pyritään suojelemaan ihmisiä etenkin satamakaupungeissa ja rannikkoalueilla parantaen ilmanlaatua ja vähentäen tarpeettomia terveysriskejä.
3. Kansainvälinen paine ja sääntely: Maantie- ja lentoliikenteen jo aloitettu päästöjen tiukempi sääntely loi painetta merenkulun päästöjen sääntelyyn. Merenkulun tarvitsisi saavuttaa globaalit ympäristötavoitteet, jotta voitaisiin varmistaa tasapuolinen kilpailutilanne eri liikennemuotojen välillä.

2.1.1 IMO Tier I

Ensimmäisiä NO_x-päästörajoituksia kutsuttiin nimellä IMO Tier I. Regulaatioiden käyttöönotto merkitsi ensimmäisiä askelia kohti merenkulun NO_x-päästöjen hallintaa. IMO Tier I -regulaation rajoitukset koskivat aluksia, joiden rakentaminen aloitettiin kuivatelakalla 1. tammikuuta 2000 jälkeen, mutta myös vuoden 2000 jälkeen remontoituiden alukset asettuivat regulaation vaatimuspiirin alle. Regulaation NO_x-päästöjen vähentäminen koskee kaikkia aluksia, joihin asennettujen dieselmootoreiden teho on yli 130 kW riippumatta aluksen vetoisuudesta, pois sulkien hätätarkoituksiin käytetyt alukset. NO_x-päästöille asetettiin moottorin kierrosluvun mukaan määräytyvät seuraavat ylärajat (International Maritime Organization, n.d.e):

- Alle 130 RPM: 17,0 g/kWh (grammaa per kilowattitunti)
- 130 – 1999 RPM: $45 \cdot n^{(-0,2)}$ e.g. 720 RPM – 12,1 g/kWh
- Yli 2000 RPM: 9,8 g/kWh

IMO Tier I tavoitteena oli asettaa perusstandardi NO_x-päästöille.

2.1.2 IMO Tier II

Vuonna 2008 osana MARPOL liite VI:n muutoksia IMO hyväksyi tiukemmat NO_x-päästörajat ja täten IMO Tier II -regulaatio syntyi. Regulaatio astui voimaan 1. tammikuuta 2011, koskien aluksia, joiden rakentaminen aloitettiin kuivatelakalla kyseisen päivämäärän jälkeen. Muutos verrattuna IMO Tier I ei ollut massiivinen, mutta edellytti kuitenkin noin 20 % vähennystä NO_x-päästöissä (International Maritime Organization, n.d.e).

- Alle 130 RPM: 14,4 g/kWh
- 130 – 1999 RPM: $44 \cdot n^{(-0,23)}$ e.g., 720 RPM – 9,7 g/kWh
- Yli 2000 RPM: 7,7 g/kWh

2.1.3 IMO Tier III

Vuonna 2008 tehdyt MARPOL liite VI:n muutokset sisälsivät myös IMO Tier III -regulaation. Regulaatio koskee aluksia, joiden rakentaminen kuivatelakalla on aloitettu 1. tammikuuta 2016 jälkeen ja jotka operoivat tietyillä päästöjenkontrollintialueilla (Emission Control Area, ECA). ECA:n ulkopuolella operoidessa Tier II -regulaatiot ovat voimassa. IMO Tier III -regulaatio on huomattavasti tiukempi verrattuna edeltäjiinsä vaatien noin 80 % vähennystä NO_x-päästöissä verrattuna IMO Tier I -tasoon. Vaatimusten ollessa huomattavasti tiukempia (International Maritime Organization, n.d.e), joutuvat varustamot ja telakat pohtimaan, kuinka vaatimukset saadaan täyttymään. Yleisimpinä ratkaisukeinoina toimii SCR-järjestelmät (Selective Catalytic Reduction) ja vaihtoehtoiset polttoaineet kuten LNG eli Liquefied Natural Gas ja metanoli. Wärtsilän (n.d.) mukaan ammoniakki tuo uuden mahdollisuuden vaihtoehtoiseksi polttoaineeksi.

- Alle 130 RPM: 3,4 g/kWh
- 130 – 1999 RPM: $9 \cdot n^{(-0,2)}$ e.g., 720 RPM – 2,4 g/kWh
- Yli 2000 RPM: 2,0 g/kWh

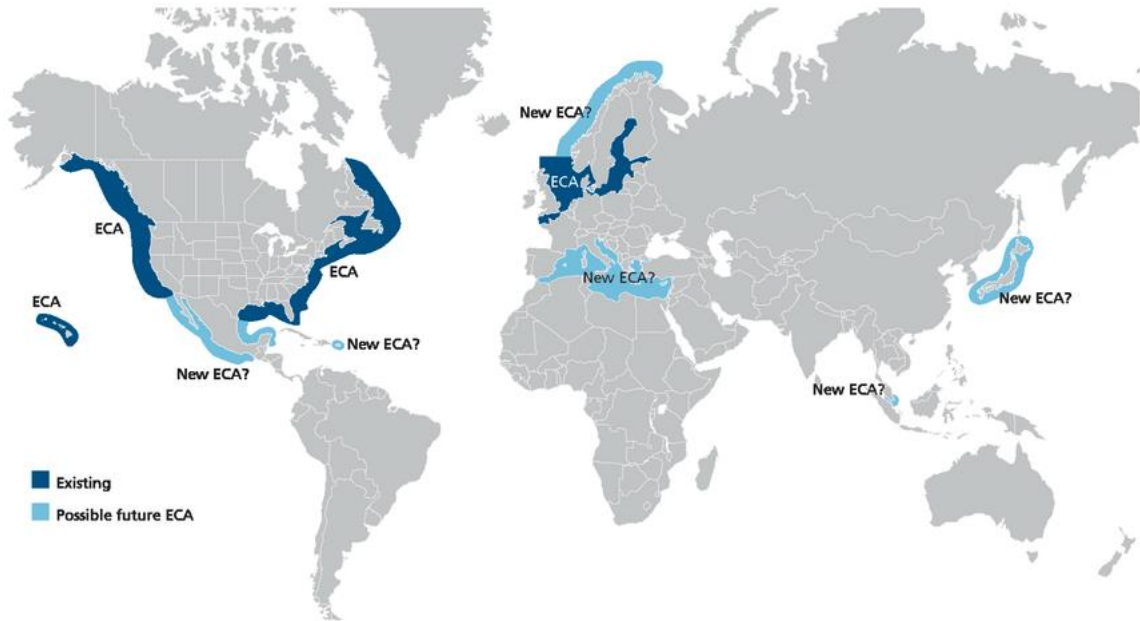
2.2 Emission Control Area (ECA)

Emission Control Area (ECA) eli päästöjenkontrollointialue on kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) linjaama spesifi merialue, jolla sovelletaan tyypillistä tiukempia päästörajoituksia aluksiin. Kyseiset tiukemmat rajoitukset ovat edellisessä kappaleessa esiteltyt IMO Tier III -päästörajoitukset. ECA:t perustuvat MARPOL-yleissopimukseen ja etenkin jo useasti mainittuun liitteeseen VI. Sun ja muut (2020) mukaan kasvava huoli merenkulun aiheuttamista päästöistä ja niiden aiheuttamista ilmanlaatuongelmista erityisesti rannikkoalueilla suurien kaupunkien läheisyydessä johti kansainvälisiin sopimuksiin, missä määriteltiin ensimmäinen ECA vuonna 1997, astuen voimaan vuonna 2005. Ensimmäinen ECA asetettiin Itämerelle ja pian Pohjanmeri lisättiin jo määritellyn Itämeren ECA:n jatkoksi. Vuonna 2010 IMO:n hyväksymät Pohjois-Amerikan itäiset ja läntiset rannikkovesistöt olivat suuri askel, astuen voimaan vuonna 2012. Alueiden hyväksyntä perustui yhdysvaltalaisen viranomaisten EPA:n (Environmental Protection Agency) tutkimuksiin, joiden mukaan potentiaalinen ECA voisi vähentää ennenaikaisia kuolemia vuosittain jopa lähes 15 000 kappaletta ja täten vähentää kustannuksia terveydenhuollossa sekä parantaa ilmanlaatua suurissa satamakaupungeissa, kuten New Yorkissa, Los Angelesissa ja Vancouverissa (Corbett ja muut, 2008). Vuoden 2016 huhtikuussa myös Kiinan hallitus nimesi kansalliset ECA:t. Säädökset koskevat Helmijoen ja Jangtsen suistoa sekä Bohai Rimin vesistöä (Huang ja muut, 2018). Kyseiset alueet eivät ole kuitenkaan virallisia IMO:n päästöjenkontrollointialueita, vaan ainoastaan kansallisia Kiinan laatimia.

2.2.1 ECA tulevaisuus

Tänä päivänä IMO on virallisesti hyväksynyt neljä päästöjenkontrollointialuetta, Itämeri, Pohjanmeri, Karibianmeri ja Pohjois-Amerikan rannikot. Mainittujen alueiden lisäksi useat alueet ovat selvitysten tai hakemusprosessin vaiheessa. Uuden ECA:n hyväksyminen vaatii jäsenvaltion laatiman hakemuksen IMO:lle ja luotettavaa tieteellistä näyttöä, että alusten päästöt vaikuttavat ehdotettujen alueiden ilmanlaatuun huomattavan negatiivisesti, sekä todisteen ehdotettujen päästörajoitusten

toimivuudesta ja tehokkuudesta. Vahvimmin ehdolla uudeksi alueeksi on Välimeren alue. Välimeri on yksi maailman vilkkaimmin liikennöidyistä merialueista, niin risteilyalusten kuin rahtialusten suhteen. Alue ja etenkin rannikot kärsivät merkittävästi meriliikenteen päästöistä heikentäen ilmanlaatua ja aiheuttaen suuren määrän ennen aikaisia kuolemia vuosittain, kuten aiemmin mainittiin. Välimerelle on jo hyväksytty IMO:n puolesta rajoitukset rikkioksidille (SO_x-ECA) joulukuussa 2022, mutta vielä ei ole asetettu rajoituksia typenoksidien suhteen. Euroopan ympäristökeskus (EEA) ja YK:n Välimeren suojelujärjestöt tukevat kehitystä NO_x-ECA:n käyttöönoton puolesta. Päätöksentekoa kuitenkin hidastuttaa niin tekniset kuin taloudelliset haasteet. Poliittinen paine arktisen alueen lisäämiseksi ECA:ksi kasvaa, koska jäiden sulaessa arktinen merireitti muuttuu houkuttelevaksi (Arctic Council, n.d.). Comer ja muut (2017) tekemä tieteellinen tutkimus osoittaa alusten päästöjen vaikuttavan arktisella alueella paitsi ilmanlaatuun, myös jäätiköiden sulamiseen. Myös alueen haavoittuva ekosysteemi altistuu täten yhä enemmän saasteille. IMO on asettanut alueille vuonna 2024 HFO-kiellon eli raskaiden polttoöljyjen käyttäminen aluksissa on jo kielletty. Paineen kasvaessa alueen ECA-statuksesta on keskusteltu, mutta IMO ei ole vielä virallisesti julistanut alueelle muita rajoitteita HFO-kiellon lisäksi. Jo mainittujen alueiden lisäksi tulevia mahdollisia virallisia päästöjenkontrollintialueita on pohdittu Japanin ja Etelä-Korean merialueille. Ehdotuksia ja tarkasteluita rajoitusten eteen on annettu myös esimerkiksi Meksikon rannikolla, mutta virallista aikataulua rajoituksille ei ole annettu. ECA:t ovat osoittautuneet tehokkaiksi välineiksi ilmanlaadun parantamisessa rannikkokaupungeissa, joten rajoitteita tullaan lisäämään uusille alueille.



Kuva 1 ECA:t ja todennäköisimmät tulevat kontrollialueet

3 IMO Tier säädösten ja ECA vaikutus

Kuten edeltävässä kappaleessa tuotiin esille, merenkulun päästöistä on oltu huolissaan viimeisten vuosikymmenten aikana ja päästörajoituksia on kiristetty kansainvälisellä tasolla merkittävästi näiden vuosien aikana erityisesti vedoten MARPOL-yleissopimuksen liitteeseen VI. Säädökset ovat vaikuttaneet edistyneempien ja ympäristöystävällisempien moottorien kehitykseen. IMO Tier III -päästörajoitusten tasolle ei kuitenkaan valitettavasti päästä vain ja ainoastaan edistyneellä ja ympäristöystävällisellä dieselmoottorilla. Seuraavissa kappaleissa tutkitaan rajoitusten vaikutusta monesta eri näkökulmasta niin teknologian kehityksen ja innovaatioiden ja näiden aiheuttamiin muutoksiin alusten rakennuksessa ja suunnittelussa. Kappaleissa käsitellään lisäksi vaikutusta alusten rakennukseen ja kustannusrakenteisiin sekä ympäristövaikutuksiin.

4 Teknologian kehitys ja innovaatiot

Tavanomaisilla dieselmootoreilla ei ole vielääkään mahdollista saavuttaa Tier III -regulaation NO_x -päästörajoja ilman erilaisia päästöjen jälkikäsittelyteknologioita (Ghosh, 2022). Tier III -päästörajoituksen ollessa niin tiukka, että NO_x -päästöjä on vähennettävä jopa 80-prosenttia verrattuna Tier I -rajoitukseen, pelkät moottoriin tehtävät muokkaustoimenpiteet eivät riitä. Edes kehittyneellä polttoaineen ruiskutuksella tai sen optimoidulla ajoittamisella ei dieselmoottori pysty saavuttamaan Tier III -vaatimuksia dieselpolttoaineen korkean palamislämpötilan luonnostaan aiheuttamien huomattavien NO_x -päästöjen vuoksi.

Tämän vuoksi ja ansiosta on jouduttu kehittämään vaihtoehtoisia keinoja säädösten saavuttamiseksi. Mahdollisia olemassa olevia tapoja päästä tavoiteltuihin päästörajoihin ovat moottoriin liitettävä Selective Catalytic Reduction -järjestelmä (SCR) ja Dual-fuel (DF) tai Liquefied Natural Gas (LNG) -moottoareiden valinta alukseen. Tulevaisuudessa on mahdollista hyödyntää vaihtoehtoisilla polttoaineilla, kuten metanolilla tai ammoniakilla toimivia moottoreita, toki hyödyntäen SCR:ää moottorin jatkeena.

4.1 Selective Catalytic Reduction (SCR)

Selective Catalytic Reduction -järjestelmä eli SCR on tällä hetkellä yleisimmin käytössä oleva tapa saada alukselle Tier III -status eli saavuttaa regulaation vaatimat päästörajoitukset. SCR on edistyksellinen päästöjen kontrollointijärjestelmä, mitä käytetään pääasiassa dieselmoottoareiden jatkeena vähentämään NO_x -päästöjä, mutta SCR on yhteensopiva myös DF-, metanoli- ja ammoniakkimoottoareiden kanssa. Kahden viimeisenä mainitun kohdalla SCR-järjestelmän reaktorin sisällä olevat katalyyttielementit vaativat kuitenkin tarkastelua ja mahdollisia lisäkerroksia tai spesifejä kyseisille polttoaineille tarkoitettuja elementtejä.

SCR tavoitteena on siis vähentää pakokaasun typpioksideja (NOx) muuttaen ne vaarattomaksi typeksi ja vedeksi. Prosessi tapahtuu erittämällä pelkistintä, tyypillisesti ureaa pakokaasun sekaan, kuljettaen kaasun katalyyttielementtien läpi.

Tyypillinen SCR-järjestelmä koostuu neljästä tai viidestä pääkomponentista valmistajasta ja kohderyhmästä riippuen.

Moottorista lähdettäessä pakoputkistoa pitkin liikuttaessa ensimmäisenä tulee vastaan 1. sekoitusyksikkö, jonka sisällä on 1.1 injektori. Sekoitussyksikön päätehtävänä on varmistaa pelkistävän aineen (urean) ja

pakokaasujen perusteellinen

sekoittuminen. Injektori on

annosteluyksikön päässä oleva laite mikä

suihkuttaa sekoitusyksikön sisälle ureaa

pakokaasuvirtaan. Kyseinen pakokaasujen

ja urean optimaalinen ja tasainen

sekoittuminen on koko SCR-järjestelmän

yksi tärkeimmistä yksittäisistä

tapahtumista. Seuraavaksi pakoputkea

pitkin edetessä on 2. reaktori. Reaktorin

sisällä on reaktorin koosta ja käytettävästä

polttoaineesta riippuen yleensä noin 2–3

kerrosta katalyyttielementtejä. Urean

kanssa sekoittuneen pakokaasun kulkiessa

katalyyttielementtien läpi urea reagoi

NOx:ien kanssa. Katalyyttielementti

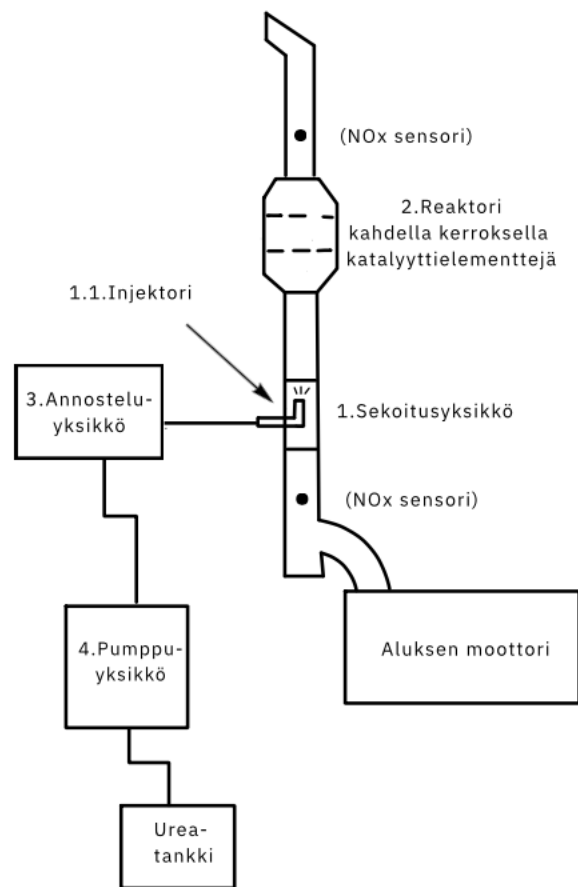
muodostaa aktiivisen pinnan, joka alentaa

reaktion vaatimaa aktivoitumisenergiaa. Elementin läpi kulkiessa suurin osa haitallisista

kaasuista muuttuu typeksi ja vedeksi, jotka ovat vaarattomia. Reaktorin jälkeen jäljelle

jäävä ”pakokaasu” vapautuu ilmakehään. Alla oleva kuva esittää moottorin eri

kuormituspisteiden suuntaa antavat NOx:in vähennystavoitteet prosenteissa.



Kuva 2 SCR havainnollistettuna

Engine Load (%)	100	75	50	25
Nox reduction target (%)	65 - 80	70 - 80	70 - 85	70 - 90

Kuva 3 Kuormituspisteiden suuntaa antavat vähennystavoitteet

Seuraava osa SCR-järjestelmää on 3. annosteluyksikkö, joka annostelee injektorilla ruiskutettavan urean määrää. Edistyneempien SCR-järjestelmien annosteluyksikkö on yhteydessä NOx sensoreihin eli antureihin, jotka mittaavat pakokaasun NOx-pitoisuutta. Tämän tiedon perusteella annosteluyksikkö osaa annostella reaaliaikaisen datan perusteella oikean määrän ureaa injektoria pitkin sekoitusyksikköön. NOx sensorien tehtävä on mitata pakokaasun NOx-pitoisuus ennen ja jälkeen prosessin SCR:n toimivuuden seuraamiseksi ja tietysti pakoputkesta ulospääsevien kaasujen päästömääräysten noudattamisen varmistamiseksi. Viimeinen pääkomponentti SCR-järjestelmästä on 4. pumppuyksikkö. Pumpun toimintaperiaate on hyvinkin yksinkertainen, sen tehtävä on toimittaa erillisestä ureatankista ureaa annosteluyksikköön.

SCR on siis johtava teknologia IMO Tier III -vaatimusten täyttämiseksi merenkulussa. Järjestelmä ei kuitenkaan ole täydellinen, vaan esimerkiksi injektorien tukkeutuminen on SCR:n tyypillinen ongelma. Puolestaan SCR:n korkea luotettavuus, tehokkuus ja mukautuvuus eri moottorityyppeihin ja kuormituspisteisiin tekevät siitä tehokkaimman valinnan aluksille, jotka liikkuvat ECA-alueilla ja maailmanlaajuisesti tulevaisuudessa hämmöttävien entistä tiukempien päästörajoitusten edessä (Deng ja muut, 2021).

4.2 Dual fuel – ja LNG-moottorit

Moottoreiden osalta johtavana teknologiana toimii Dual fuel -moottorit. Kuten nimestäkin voi jo päätellä, Dual fuel -moottorit ovat kahdella polttoaineella toimivia moottoreita, jotka käyttävät niin nestemäistä kuin kaasumaista polttoainetta, tyypillisesti dieselpolttoainetta ja nesteytettyä maakaasua (LNG). DF-moottorien kehitys alkoi 1990-luvun lopulla ja 2000-luvun alussa, kun suuret valmistajat kuten suomalainen

Wärtsilä ja saksalainen MAN Energy Solutions alkoivat käyttää kaasumoottoritekniologiaa merenkulussa (Dodge, 2014). Alun perin kyseistä tekniologiaa käytettiin pääasiassa nesteytettyä maakaasua kuljettavissa aluksissa, joissa kaasu oli helposti saatavilla osana lastia. DF-moottorien kehitys sai huomattavaa tuulta alleen, kun IMO:n päästörajat alkoivat tiukentua.

IMO Tier III -päästörajoituksen astuessa voimaan 2016, ei rajoituksen vaatimuksiin päästy enää perinteisellä dieselmoottorilla, eikä edes sen polttoaineen palamista säättämällä, joten tarvittiin dieselmoottorille korvaaja. Tässä kohtaa Dual fuel -moottori osoittautui oivaksi ratkaisuksi. Kaasu, erityisesti nesteytetty maakaasu tuottaa luonnostaan vähemmän NO_x -päästöjä kuin diesel, koska se palaa alemmassa lämpötilassa. Tämä tekee siitä erityisen sopivan polttoaineen alueille, joilla on päästörajoituksia (ECA) (Grönholm ja muut, 2021). Lisäksi LNG on käytännössä rikkivapaata, mikä on tehnyt siitä myös houkuttelevan vaihtoehdon myöhemmin voimaan tulleiden rikkipäästörajoitusten vuoksi. Kyseiset rajoitukset rajoittivat meriliikenteessä käytettävien polttoaineiden rikkipitoisuuden 0,5 prosenttiin maailmanlaajuisesti ja 0,1 prosenttiin päästörajoitusalueilla.

Teknisestä näkökulmasta katsottuna DF-moottorit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin niiden toimintaperiaatteen mukaan. Ensimmäinen tyyppi perustuu ottosyklin mukaiseen niin sanottuun lean-burn -tekniikkaan, jota esimerkiksi Wärtsilä käyttää omissa DF-moottoreissaan. Näissä moottoreissa pääpolttoaineena käytetään kaasua, kuten LNG:tä, ja sytytys tapahtuu ruiskuttamalla sylinteriin pieni määrä dieselpolttoainetta juuri ennen puristussyklin huippua. Tämä tekniikka mahdollistaa erittäin puhtaan palamisen ja alhaiset NO_x päästöt, minkä vuoksi se sopii erityisen hyvin päästöjenrajoitusalueilla liikennöiviin aluksiin ilman erillistä jälkikäsittelyä, sillä kaasulla ajettaessa Wärtsilän DF-moottorilla päästään alle IMO Tier III -vaatimusten (Wärtsilä, n.d.).



Kuva 4 Wärtsilä 6L34DF



Kuva 5 MAN B&W 5G70ME-GI Mk10.5

Toinen uuden teknologian moottorityyppi on dieselmoottorin sykliä hyödyntävä korkeapaineinen kaasumoottori, jota edustaa esimerkiksi MAN Energy Solutionsin ME-GI-moottori. Tässä moottorissa kaasu ruiskutetaan suoraan sylinteriin korkealla paineella ja palaminen alkaa ilman erillistä sytytyslähdettä, kuten dieselmoottorissa. Tämä tekniikka mahdollistaa erittäin tarkan polttoaineen annostelun ja sopii erityisen hyvin suurille pitkän matkan aluksille, jotka vaativat maksimaalista tehokkuutta ja luotettavuutta, jopa kaasun ja dieselin seoksella käydessään (MAN Energy Solutions, n.d.).

Näiden kahden teknologisesti kehittyneen moottorityypin ansiosta DF-moottoreita voidaan sovittaa erilaisiin aluksiin ja eri käyttötarkoituksiin. Lean-burn -teknologia on erityisen sopiva ja kilpailukykyinen matkustaja- ja risteilyaluksissa sekä alueilla, joille on asetettu päästöjenkontrollintialue ja joissa nestemäistä maakaasua on helposti saatavilla. Korkeapaineinen moottori puolestaan on suosittu pitkän matkan aluksissa, joissa alusten on toimittava luotettavasti vaihtelevissa olosuhteissa ja kaukana tankkausmahdollisuuksista. Tämä tyyppi sopii erityisesti kontti- ja säiliöaluksille.

Vaikka LNG on tällä hetkellä hallitseva kaasumainen polttoaine DF-moottoreissa, on katse jo pitkällä tulevaisuudessa. Vaihtoehtoiset polttoaineet kuten metanoli,

ammoniakki ja vety ovat mahdollisesti nousemassa tosissaan otettaviksi vaihtoehtoiksi. Esimerkiksi yksi hallitsevista konttialusoperaattoreista Maersk on tilannut ensimmäiset metanolilla toimivat konttialukset (Snyder, 2021). Aiemmin mainitut Wärtsilä ja MAN ovat molemmat kehittäneet metanoliyhteensopivia moottoreita. Ammoniakin ja vedyn ottaminen käyttöön vaatii vielä työtä, vaikka pilottihankkeet ovat jo käynnissä (Mandra, 2022).

Voidaan todeta, että DF-moottorien kehitys nykymalliin ei ole sattumaa, vaan IMO:n kiristyvän sääntelyn suora seuraus. Teknologian kehityksen vuoksi vaaditut päästötasot kyetään saavuttamaan myös ilman SCR-järjestelmää DF-moottorien ansiosta.

4.3 Kehittymässä olevat ratkaisut, metanoli-, ammoniakki-, ja vetymootorit

Merenkulun kehitys kohti hiilineutraaleja ja vähäpäästöisiä moottoreita on ajamassa perinteiset polttoaineet, kuten raskaan polttoöljyn, siirtymisen sivulle ja korvaamisen uusilla polttoaineilla. Kehityksen tärkeimpään asemaan vaihtoehtoina ovat nousseet metanoli-, ammoniakki ja vetymootorit, joissa mainitut polttoaineet toimivat pääasiallisena energianlähteenä, eikä vain osana hybridikäyttöä.

4.3.1 Metanoli

Metanoli on nestemäinen helposti syttyvä alkoholi, joka on nestemäisen maakaasun jälkeen nopeimmin kasvava vaihtoehtoinen polttoaine (Merilogistiikka, 2024). Metanoli toimii polttoaineena ominaisessa muodossaan, eikä sitä tarvitse muuntaa kaasumuotoon. Tämän ansiosta metanolia voidaan käsitellä ja varastoida sellaisenaan, aivan kuten perinteisiä polttoaineita.

Metanolia voidaan käyttää niin kaksitahtisissa kuin nelitahtisissa moottoreissa. Esimerkiksi MAN ES:n ja Wärtsilän metanolimoottoreissa metanoli toimii pääpolttoaineena, mutta metanolin syttymisen varmistamiseksi joukkoon sekoitetaan

pieni määrä sytytyspolttoainetta. Ulkoista sytytintä kuten kipinää, moottorit eivät tarvitse, vaan ne perustuvat dieselmoottorin tapaan puristussytytykseen. Fournas ja Wein (2022) mukaan metanolin käyttämisessä pääpolttoaineena etuna toimii sen puhdas ja yksinkertainen palamisprosessi. Metanoli ei sisällä rikkiä, joten palamisessa ei synny lainkaan rikkipäästöjä ja NO_x-päästötkin ovat hyvin maltilliset.

Metanolin käyttöä pääpolttoaineena tukee sen puhdas palaminen, joten puhtaasti metanolilla ajettaessa ei tarvita pakokaasun käsittelyjärjestelmiä, jotta päästäisiin IMO Tier III vaatimiin päästörajoituksiin (Jacotine, 2021). Martin (2021) kertoo, että metanoli on tällä hetkellä maailmanlaajuisesti saatavilla oleva hyödyke, jonka jakelu- ja varastointikapasiteetti on kattavalla tasolla. Maailman sadasta suurimmasta kansainvälisestä satamasta jo 88:lla on metanolin säilöntää varten infrastruktuuri valmiina. Vuonna 2024 tilatuista vaihtoehtoisella polttoaineella toimivista aluksista metanolilla toimivia aluksia oli 32 %, mikä tarkoittaa 166 kappaletta (DNV, 2025).

4.3.2 Ammoniakki

Toiseksi kehittynein teknologia mainituista polttoaineista on ammoniakki. Se on noussut viime vuosina yhdeksi mielenkiintoisimmista vaihtoehdoista pääpolttoaineeksi merenkulussa. Ammoniakin suurin valtti on se, että se on hiilivapaa polttoaine eli sen palamisessa ei synny lainkaan hiilidioksidia, mikä on merenkulun merkittävin päästöhaaste. Typen oksideja (NO_x) ammoniakki puolestaan tuottaa huomattavan paljon sen ollessa NO_x rikasta. Ammoniakin suurin haaste on sen myrkyllisyys, se on todella myrkyllistä niin ihmisille, merien ekosysteemeille kuin ylipäätään luonnolle (Duong ja Kang, 2025). Ammoniakilla on mahdollisuus toimia täysin fossiilivapaana polttoaineena, kun sitä käsitellään oikein, mikä tekee siitä erittäin tärkeän polttoaineen pitkän aikavälin ilmastotavoitteiden suhteen.

Ammoniakilla toimivien moottoreiden kehitystä ajaa tutut kaksi jättiläistä MAN ja Wärtsilä. MAN kehittää kaksitahtista moottoreita, jonka tarkoituksena on olla käyttövalmiita vuonna 2027 (Tan, 2024). Moottori perustuu korkeapaineiseen

ammoniakin ruiskutukseen dieselyyppisessä moottorissa. Ammoniakin erityispiirteet tuottavat kehityksessä kuitenkin haasteita ja vaatii erityistarkkailua, tarkkaa tuotekehitystä ja testausta. Wärtsilä puolestaan on mukana EU:n rahoittamassa Ammonia 2-4 -projektissa. Projektin tavoitteena on kehittää nelitahtimoottoria, joka toimii täysin ammoniakilla (Wärtsilä, 2022). Projektin pilottina toimii vanhan aluksen retrofittaus eli vanhan aluksen varustaminen uudella täysin ammoniakilla toimivalla moottorilla (Wärtsilä, 2024).

Vaikka ammoniakilla toimiva moottori onkin täysin fossiilivapaa, sillä ajettaessa tarvitaan lisäjärjestelmiä saavuttaakseen IMO Tier III -vaatimukset korkeiden NOx päästöjen takia. Ammoniakkimoottori tarvitsee siis esimerkiksi SCR-järjestelmän, jotta sillä voidaan saavuttaa IMO Tier III rajat. Ammoniakilla ajettaessa SCR-järjestelmä toimii täysin samalla periaatteella, mutta järjestelmän täytyy olla huomattavasti tarkempi ja tiukempi ammoniakin karkaamisen vuoksi. Ammoniakin karkaamiseksi kutsutaan tapahtumaketjua, missä ureaan reagoimatonta ammoniakkikaasua pääsee katalyyttielementtien läpi pakoputkesta ilmakehään.

Vuonna 2025 ammoniakki polttoaineena on siis vielä kehityksen alla, eikä laajamittainen kaupallinen käyttöönotto ole vielä tapahtunut. DNV:n eli merenkulun johtavan luokituslaitoksen ja asiantuntijan mukaan ammoniakille on sen hyötyjensä ansiosta jo konkreettista kiinnostusta, sillä heidän tietokantansa mukaan ammoniakkialuksia tilattiin vuonna 2024 27 kappaletta varustamoiden auttaessa kehityksessä (DNV, 2025).

Ammoniakki on merenkulun tulevaisuuden yksi lupaavimmista polttoaineista ja se nähdään erityisesti pitkän aikavälin ratkaisuna suurille rahtialuksille, joiden tarvitsee kulkea pitkiä matkoja. Ammoniakin energiasisältö on heikko tilavuuteen nähden, mutta puolestaan painoon nähden kilpailukykyinen, mikä tekee siitä oivan ratkaisun aluksiin, missä tilaa varastoille voidaan optimoida (Machaj ja muut, 2022). Ammoniakin uskotaan nousevan merkittäväksi polttoaineeksi 2030-luvun merenkulun polttoaineratkaisuissa,

kun turvallisuus ammoniakkin käsittelyssä ja ammoniakkin karkaaminen ilmakehään saadaan kontrolliin.

4.3.3 Vety

Viimeisenä käsiteltävistä vaihtoehtoisista polttoaineista on vety, jota pidetään erittäin lupaavana tulevaisuuden polttoaineena merenkulussa pitkällä aikavälillä. Atilhan ja muut (2021) mukaan mielenkiinto vetyyn polttoaineena liittyy sen mahdollisuuksiin, ennen kaikkea siksi, että sen käyttö ei aiheuta lainkaan hiilidioksidipäästöjä, edellyttäen sen olevan peräisin uusiutuvasta lähteestä, kuten aurinko- tai tuulienergiaa hyödyntävästä elektrolyysistä. Kyseisessä elektrolyysi prosessissa, uusiutuvasta energianlähteestä peräisin olevan sähköenergian avulla hajotetaan vettä sen alkuaineiksi eli hapeksi ja vedyksi, näin saadaan täysin hiilidioksiditonta "vihreää" vetyä, jota voidaan hyödyntää polttoaineena.

Toisin kuin ammoniakilla, vedyllä on korkea energiatiheys painoyksikköä kohden, mikä tekee siitä erinomaisen vaihtoehdon aluksille, joissa polttoaineen painolla on merkitys tai varastointimahdollisuudet ovat niukat. Vedyn energiatehokkuus painoyksikköä kohden on kaikista polttoaineista korkein 120 MJ/kg (Center for Sustainable Systems, 2021). Vedyn varastoiminen vaatii kuitenkin tiukkoja ratkaisuja, sillä merenkulun suunnitelmissa oleva nestemäinen vety vaatii varastoimiseen hyvin alhaisen alle -253 celsiusasteen lämpötilan (Hamedani ja muut, 2024).

Vedyn osalta tähdätään polttokennojen hyödyntämiseen ja se ei käytännössä ole edes moottori. Polttokenno on kemiallinen sähköntuottolaite eli käytännössä sähkögeneraattori, jonka avulla tuotetaan sähkömoottorin avulla potkureille tehoa. Melideo ja Desiri (2024) mukaan polttokennoteknologian etuna on se, ettei siinä ole lainkaan palamisprosessia, joten se ei tuota lainkaan NOx päästöjä. Teknologia on kuitenkin vielä kaukana laajamittaisesta kaupallisesta käyttöönotosta ja todennäköisemmin siirtymävaiheessa saatetaan hyödyntää vedyllä toimivia polttomoottoreita. Tällöin palamisprosessi tuottaa NOx päästöjä, mutta

jälkikäsitteilyjärjestelmillä, kuten SCR-järjestelmällä näitä saadaan neutralisoitua (Wrobel ja muut, 2022). Vedyllä toimivat polttomoottorit lisäävät vedyn houkuttelevuutta, koska se mahdollistaa puhtaampaa merenkulkua kohti siirtymän myös hyödyntämällä olemassa olevaa satamien infrastruktuuria.

Arvioidaan, että vedyn laajempi käyttöönotto voisi tapahtua 2030-luvulla, vetytuotannon ja jakeluverkoston kehittyessä, joten tulevaisuuden näkymät vedyn hyödyntämiselle merenkulussa ovat rohkaisevia. Nestemäisen vedyn hyödyntämisen esteenä merenkulussa on tällä hetkellä sen todella matala säilytyslämpötilavaatimus, joka aiheuttaa haasteita sen varastoinnin suhteen. Nestemäisen vedyn hyödyntäminen vaatii erityisen suunniteltuja säiliöitä, venttiilejä ja ylipäättään materiaalivalintoja, niin alusten kuin satamien suhteen.

5 Aluksen rakennus ja suunnittelu

Aluksen suunnittelu ja rakentaminen on moniosainen ja huomattavasti henkilötyötunteja ja aikaa vievä prosessi, mikä yhdistää eri alojen asiantuntijoiden osaamista. Prosessi sisältää monia vaiheita aluksen tilaajan tarpeiden kartoittamisesta, aluksen luovutukseen loppuasiakkaalle ja sen käyttöönottoon.

5.1 Tier III -päästörajoitusten vaikutus alusten suunnitteluun

Tilaajan tarpeita kartoittaessa selvitetään hyvin aikaisessa vaiheessa, millä alueilla aluksella aiotaan operoida (Lindstad ja Eskeland, 2016). Aluksen operointialueen kohdistuessa olemassa oleville ECA-alueille tai mahdollisille tuleville alueille, muuttuu aluksen suunnitteluprosessi haastavammaksi. Tier III -vaatimuksia noudattavat ECA-alueet ovat pakottaneet telakat ja varustamot pohtimaan suunnittelun varhaisessa vaiheessa, kuinka aluksesta saadaan yhteensopiva vaatimusten suhteen (IACCSEA, 2013).

Kuten aikaisemmin on mainittu, yleisin vaihtoehto vaatimusten täyttämiseen on jälkikäsitteilyjärjestelmä SCR (Deng ja muut, 2021). Järjestelmän sijoittaminen ahtaisiin kuiluihin aluksen sisällä vaatii tarkkaa suunnittelua ja optimointia. SCR:n komponentit saadaan sijoitettua aluksen tiloihin, kun tilasuunnittelu hoidetaan tarkkaavaisesti varhaisessa vaiheessa. Suunnittelussa tarvitsee ottaa huomioon, että moottoreiden ja SCR-järjestelmien sijoittelusta huolimatta aluksen painopiste säilyy optimaalisen stabiilina (Zhang ja muut, 2021). Järjestelmän integroinnista kerrotaan tarkemmin myöhemmässä vaiheessa tutkielmaa.

Tier III -vaatimukset täyttävä alus on vapaa operoimaan ECA-alueilla ilman lisäkustannuksia (International Maritime Organization, n.d.b). Jos alus ei ole Tier III -yhteensopiva, sen operointimahdollisuudet voivat olla rajatut vaikuttaen mahdollisesti aikataulujen joustavuuteen ja pahimmassa tapauksessa estää jopa pääsyn tiettyihin satamiin tarkoittaen markkinoiden pienentymistä. Voidaan siis todeta

yhteensopivuuden tuovan alukselle huomattavan edun kilpailukykyyn suhteessa yhteensopimattomiin aluksiin.

Monet suuret varustamot, kuten esimerkiksi Maersk on ottanut strategiakseen rakentaa ainoastaan aluksia, jotka täyttävät tiukimmat mahdolliset päästörajoitukset riippumatta siitä, missä niiden on suunniteltu aloittavan operoinnin (Snyder, 2021). Strategiaa tukee ympäristövastuullisuus, aluksen korkeampi jälleenmyyntiarvo ja taloudellinen tehokkuus. ECA-alueiden voidaan siis todeta toimivan tietynlaisena teknologisen kehityksen uranuurtajana luoden painetta varustamoiden suunnitteluun kohti ympäristöystävällisempiä aluksia myös kannustaen "liian" hyviin ratkaisuihin ennustettaessa tulevaisuuden suuntauksia.

5.2 SCR-järjestelmän integrointi: vaikutus rakenteeseen ja retrofittauksen haasteet

SCR:n sovittaminen uuteen alukseen vaatii optimointia sekä soveltamista, vaikuttaen merkittävästi aluksen tekniseen ja rakenteelliseen suunnitteluun. Järjestelmän käyttöönottoaminen vaatii lisätilaa aluksesta sen eri komponenteille, minkä vuoksi sovittaminen vaatii konehuoneen huolellista suunnittelua aluksen runkorakenteen mukaisesti (Zhang ja muut, 2021). Uuden aluksen kohdalla mainitut huomioitavat seikat ovat huomattavasti yksinkertaisempia kuin niin sanotuissa retrofit eli jälkiasennusprojekteissa, sillä SCR:n tilavaatimukset voidaan ottaa huomioon jo piirustusvaiheessa suunnittelupöydällä (IACCSEA, 2013). Täten varmistetaan järjestelmän sijoittaminen aluksen vakauden ja painopisteen suhteen edullisesti. Samalla on mahdollista varmistaa järjestelmän mahdollisimman helppo huollettavuus ja eristäminen lämpötilan siirtymisen estämiseksi. Huolellisella suunnittelulla saadaan eliminoidua mahdollisimman paljon järjestelmän mukanaan tuomia negatiivisia vaikutuksia aluksen vakauteen ja rahtikapasiteettiin.

Puolestaan vanhoihin aluksiin SCR:n jälkiasennus on usein huomattavasti haastavampaa, sillä alukset on alun perin suunniteltu operoivan ilman SCR:ää, joten konehuoneissa ja

pakokaasun poistopiipun kuiluissa tilasta on usein huomattavaa puutetta. Retrofittauksen onnistunut toteuttaminen saattaa edellyttää laskelmoituja rakenteellisia muutoksia alukseen ja huonoimmassa skenaariossa tilanpuute saattaa jopa toimia retrofittauksen toteuttamisen esteenä (IACCSEA, 2013). Retrofittausta suunniteltaessa on ensin tärkeä tehdä laskelmat, onko se ylipäättään kannattavaa, sillä suorat kustannukset laitteistosta ja mahdollisista muutostöistä suhteessa saataviin hyötyihin voivat nousta kannattamattomiksi. Tällöin aluksen loppu käyttöikä voidaan mahdollisesti toimia maksaen sakkomaksuja päästöistä, operoida yksinkertaisesti ECA-alueiden ulkopuolella tai romuttaa alus ennen suunniteltua aikaa (Lindstad ja Eskeland, 2016).

Voidaan siis todeta, että SCR-järjestelmän integrointi aluksiin jo aikaisessa vaiheessa suunnittelupöydällä on kustannustehokasta, koska retrofittaus tuo mukanaan niin rakenteellisia, teknisiä kuin taloudellisiakin riskejä. Tästä hyvin selkeästä syystä Tier III -vaatimusten täyttäminen varmistetaan tyypillisesti jo suunnittelupöydällä eikä aluksen käyttöä puolivälissä.

5.3 Ympäristötekijät kilpailuetuna

Ympäristönäkökulman merkitys meriliikenteessä on kasvanut huomattavasti viimeisen vuosikymmen aikana muun maailman mukana. Tietysti IMO:n asettamat päästörajoitukset ovat olleet suuressa roolissa, mutta markkinavoimat, asiakkaiden odottamat sekä alusten rahoittajien vaatimukset johtavat varustamot huomioimaan ympäristön ja kestävät ratkaisut entistä tarkemmin. Alukset, jotka ovat yhteensopivia tiukkojen ympäristövaatimusten, kuten Tier III suhteen, eivät ainoastaan noudata IMO:n ohjeita vaan voivat saada myös merkittävää kilpailuetua markkinoilla, joilla vastuullisuus on nousemassa entisestään suurempaan rooliin asiakkaiden valintakriteereissä.

Useat tutkimukset osoittavat, kuinka logistiikkapalveluiden asiakasryhmät suosivat entistä enemmän toimittajia, jotka osoittavat sitoutuneensa ympäristöystävällisempään logistiikkaan avoimesti ja uskottavasti. David ja muut (2021) tekemä tutkimus esittää, kuinka asiakkaat etenkin Euroopan ja Pohjois-Amerikan alueilta suosivat reittejä sekä

varustamoita, jotka panostavat vähäpäästöisiin ja ympäristöystävällisiin ratkaisuihin, vaikka se tarkoittaisi pidempiä toimitusaikoja tai mahdollisesti hieman korkeampia kustannuksia kuljetuksen osalta. Ympäristöystävällisyys ei ole enää ainoastaan vaatimusten täyttämistä, vaan myös tietoinen valinta asiakkaan näkökulmasta. Jameson ja muut (2024) tekemä tutkimus osoittaa, että yli 80 % merilogistiikan asiakkaista olisi valmiita maksamaan lisähintaa vihreästä kuljetuspalvelusta. Tutkimuksen mukaan vuonna 2023 keskimääräinen hyväksyttävä lisäkustannus olisi noin 4 %. Tutkimus osoittaa, että varustamot, jotka ovat kykeneväisiä tarjoamaan läpinäkyvästi ympäristöystävällisiä ratkaisuja, voivat erottua markkinoilla ja mahdollisesti alkaa kilpailemaan hinnan sijasta laadulla.

Ympäristöystävällisyyden rooli korostuu etenkin ECA-alueilla, joilla asiakaskunnat ovat keskimäärin ympäristötietoisempia. Ympäristöystävällisyyden merkitys ei esiinny ainoastaan kilpailuetuna, vaan esimerkiksi Pohjois-Euroopan satamat ovat ottaneet käyttöön päästöihin perustuvia hinnoittelumalleja, joissa alukset saavat alennuksia satamamaksuista aluksen ollessa vähäpäästöinen. Esimerkiksi Rotterdamin ja Tukholman satamissa käytetään vastaavia malleja. Kyseiset hinnoittelumallit luovat kannustimia varustamoille investoida ympäristötehokkuuteen, sillä säästöjä syntyy myös operointikustannusten suhteen alennusten ansiosta.

Ympäristöystävällisyys toimii siis myös aktiivisena kilpailukeinona merenkulun globaaleilla markkinoilla, eikä ainoastaan vastineena IMO:n sääntelyihin (Notteboom ja Haralambides, 2020). IMO:n sääntelyt täyttäessä ja läpinäkyvällä toiminnalla varustamot tukevat brändinsä uskottavuutta ja pitkällä aikavälillä myös kannattavuutta mahdollisten satama-alennusten ansiosta.

6 Investoinnit ja kustannusrakenne

IMO Tier III -vaatimusten noudattaminen edellyttää varustamoilta merkittäviä investointeja, jotka vaikuttavat suunnitellun aluksen hankintahintaan, sekä aluksen operointikustannuksiin sen koko elinkaaren ajan. Päätökset tehtävistä investoinneista koskevat niin teknisiä ratkaisuja, kuten SCR-järjestelmän asentamista kuin käytettävän polttoaineen valintaa, huolto- ja varaosaohjelmia sekä mahdollisia vakuutus- ja rahoitusjärjestelyjä.

6.1 Aluskustannukset ja uusien teknologioiden vaikutus

Aluksen lopullinen hankintahinta varustamolle muodostuu monista eri osa-alueista. Alkaen rungosta perusrakenteisiin, mukaan lukien koneistot, potkurijärjestelmät ja sähkö- ja automaatiotekniikat. Alusta varustaessa uusilla vähäpäästöisillä teknologioilla, kuten SCR-järjestelmä tai DF-moottoreilla aluksen rakentamisen kokonaiskustannukset kasvavat laitteistojen tai moottorien hankintahinnan ja niiden integrointiin liittyvien kustannusten vuoksi. Esimerkiksi SCR-järjestelmä vaatii aluksen suunnitteluvaiheessa tarkkaa konehuoneen ja pakokaasun kuilujen optimointia, mikä voi nostaa telakkakustannuksia. IACCSEA:n (2013) tutkimuksen mukaan keskikokoisen konttialuksen SCR-järjestelmän kustannus ja asentaminen maksaa noin 500 000 dollaria. 25 vuoden operointiajan aikana aluksen SCR-järjestelmän aiheuttamat kustannukset olisivat noin 1,8 miljoonasta dollarista 5,3 miljoonaan dollariin riippuen alueen operointialueesta. 5,3 miljoonan dollarin kohdalla alus operoisi koko elinkaarensa ajan ECA-alueella, jolloin urean kulutus olisi jatkuvaa ja järjestelmään kuuluvia katalyyttielementtejä jouduttaisiin vaihtamaan useammin SCR:n ollessa jatkuvassa käytössä. Laskelmat ovat vain suuntaa antavia, sillä vuodesta 2013 urean hinta on ollut hieman nousussa, joten kulutuksesta johtuvien todellisten kustannusten voidaan todeta olevan nykyhetkessä korkeammat. Kahdella eri polttoaineella toimivien DF-moottorien kohdalla polttoaineiden joustavuus tuo mahdollisuuden vaikuttaa aluksen operointikustannuksiin, mutta puolestaan moottoreiden hankintahinta on huomattavasti perinteistä moottoria korkeampi. DNV:n vuoden 2022 ennusteen mukaan

DF-moottorien kustannuslisä johtuu erityisesti kaksoispolttoainejärjestelmistä, turvallisuus- ja valvontajärjestelmistä, lisäsäiliöistä sekä tietysti suunnittelun ja integroinnin lisääntymisestä järjestelmän monimutkaisuuden vuoksi. DF-tekniikan aiheuttaman lisäkustannuksen suuruudeksi arvioidaan olevan yksinumeroisista prosenteista yli kymmeneen prosenttiin yksittäisen järjestelmän tasolla, mikä tarkoittaa useampi moottoristen suurempien alusten kohdalla merkittävää summaa (DNV, 2022).

6.2 Käyttökustannukset

Tier III -vaatimukset täyttävien teknologioiden käyttöönotto vaikuttaa huomattavasti alusten käyttökustannuksiin aluksen koko elinkaaren ajan. Käyttökustannukset muodostuvat jatkuvista operointiin liittyvistä tekijöistä, kuten kemikaalien kulutuksesta, järjestelmien valvonnasta ja huolto- ja kunnossapitotarpeista, toisin kuin investointikustannukset, jotka painottuvat pääosin rakennusvaiheeseen.

SCR-järjestelmän kohdalla keskeinen operatiivinen kustannuserä on urealiuoksen kulutuksesta johtuvaa. Urean kulutus on vahvasti sidoksissa moottorin kuormitustasoon ja polttoaineenkulutukseen. Tämän takia kustannukset vaihtelevat merkittävästi alusten välillä niiden koon, käyttöprofiilin ja reittivalintojen mukaan. Lisäksi SCR-järjestelmän katalyyttielementit kuluvat käytössä ja ne on vaihdettava kulumisen seurauksena aiheuttaen huolto- ja varaosakustannuksia. Itse järjestelmän energiankulutus on suhteellisen pientä verrattuna moottorin kokonaistehoon, joten huomattava osa SCR:n elinkaarikustannuksista johtuu nimenomaan urean hankinnasta ja katalyyttielementtien uusimisesta (Zhang ja muut (2021)).

Järjestelmien lisääntynyt valvonta- ja kunnossapitotarve vaikuttavat aluksen käyttökustannuksiin. Tier III -yhteensopivat ratkaisut kasvattavat epäsuoria operointikuluja jatkuvan seurannan tarpeen vuoksi. Automaatiojärjestelmät vaativat ylläpitoa ja henkilöstö vaatii koulutusta järjestelmien käyttöön. Vaikka yksittäiset kuluerät saattavat olla pieniäkin, niiden yhteisvaikutus aluksen koko elinkaaren aikana

saattaa nousta huomattaviksi ja ne tulee huomioida aluksen kokonaisvaltaisessa kustannusanalyysissä (Lindstad ja Eskeland, 2016).

Käyttökustannusten ja pitkän aikavälin taloudellisen kannattavuuden kannalta toinen keskeinen tekijä on polttoainevalinnat. Varustamoiden taloudellista epävarmuutta lisää fossiilisten polttoaineiden historiallinen alttius voimakkaalle hintojen vaihtelulle. Vaihtoehtoisten polttoaineiden puolelta esimerkiksi vihreän ammoniakkin kustannus on vielä toistaiseksi kohtuullisen korkealla, mutta hintaennusteet ennakoivat huomattavaa hinnan laskua tulevina vuosikymmeninä. Arvioidaan, että vihreän ammoniakkin tuotantokustannukset voisivat laskea merkittävästi vuoteen 2050 mennessä teknologioiden kehittyessä ja uusiutuvan energian kustannusten laskiessa vuosi vuodelta. Kehityksestä johtuen uskotaan, että pitkällä aikavälillä vaihtoehtoisten polttoaineiden kilpailukyky paranee myös operointikustannusten näkökulmasta (Valera-Medina ja muut, 2018).

Myös satamien soveltamat taloudelliset ohjaukeinot vaikuttavat aluksien käyttökustannuksiin. Nykypäivänä entistä useammat kansainväliset satamat hyödyntävät ympäristöperusteisia hinnoittelumalleja kannustaakseen varustamoita mahdollisimman matalapäästöiseen liikennöintiin. Erityisesti Pohjois-Euroopassa ja etenkin Norjassa kyseiset käytännöt ovat jo osa laajempaa ympäristö- ja liikennepoliittikkaa, jossa matalapäästöiset alukset voivat mahdollisesti saada alennuksia satamamaksuista tai korvaavasti muista operatiivisista eduista. Kyseisillä kannustimilla varustamot voivat osittain kompensoida kalliimpien DF-moottorien sekä SCR-järjestelmien korkeampia hankintahintoja ja käyttökustannuksia etenkin reiteillä, joilla satamakäyntien määrä on kohtuullisen suuri (Notteboom ja Haralambides, 2020).

Voidaan todeta, että kokonaiskuvassa Tier III -yhteensopivuuden käyttökustannukset ovat monitahoiset. Laitteiden hankinta, urean kulutus, huoltokustannukset ja järjestelmien valvonta korottavat operointikustannuksia lyhyellä aikavälillä, mutta puolestaan pitkällä aikavälillä polttoaineiden kehittyminen ja satamien asettamat

ympäristöperusteiset kannustimet mahdollisesti parantavat alusten kilpailukykyä markkinoilla. Tästä syystä Tier III -yhteensopivuuden käyttökustannusten arviointi vaatii perehtymistä elinkaarinäkökulmasta, jossa taloudelliset, teknologiset ja sääntelyihin liittyvät tekijät tutkitaan kokonaisuutena.

6.3 Rahoitus ja vakuutukset

Viime vuosina kiristyneet ympäristösäädökset ja merenkulun päästöjen vähennystavoitteet ovat huomattavasti vaikuttaneet miten rahoitus- ja vakuutusmarkkinat toimivat alusten osalta. Rahoitusriskiä arvioidessa huomioidaan yhä useammin keskeisenä tekijänä alusten ympäristösuorituskykyä ja yhteensopivuutta sääntelyjen suhteen. Tästä johtuen aluksien Tier III -yhteensopivuus sekä teknologisesti kehittyneiden alusten rahoitusehdot ovat suotuisampia ja edullisempia kuin vastaavasti alusten, joiden päästöprofiili ja ympäristösuorituskyky altistaa alukset mahdollisille tuleville kiristyneille rajoituksille tai mahdollisille lisäinvestointitarpeille rajoitusten vuoksi.

Useat tutkimukset ovat osoittaneet, että ympäristösääntely ja rajoitukset vaikuttavat epäsuorasti alusten rahoituskustannuksiin joko lisäämällä tai alentamalla koettua investointiriskiä. Lindstad ja Eskeland (2016) osoittavat tutkimuksessaan, että alukset, jotka eivät puolestaan täytä kiristyneitä ympäristövaatimuksia, altistuvat kasvaville riskeille operointirajoitusten, jälkiasennustarpeiden ja ennenaikaisen aluksen elinkaaren päättämisen eli romuttamisen suhteen. Rahoittajien näkökulmasta tämä sääntelyriski heijastuu korkeampina pääomakustannuksina ja varovaisempina sekä mahdollisesti tiukempina rahoitusehtoina.

Polttoaineen suhteen joustavat ratkaisut, kuten DF-moottorit sekä Tier III -yhteensopivuus nähdään aluksen kannalta korottavina tekijöinä aluksen niin sanotun future-proof-ominaisuuksien suhteen. Psaraftis ja Kontovas (2020) korostavat tutkimuksessaan, että alusten, joiden tekniset ratkaisut mahdollistavat sopeutumisen nykyisiin ja tuleviin muutoksiin sääntelyssä, saavan paremman asetelman

rahoitusmarkkinoilla riskialttiuden suhteen. Kyseiset tekijät vaikuttavat positiivisesti aluksen rahoituksen saatavuuteen ja alhaisempaan riskitasoon erityisesti pitkän näkymän uudisrakennusaluksissa. Ympäristötekijöiden vaikutus on kasvanut myös vakuutusmarkkinoilla. Poulsen ja muut (2021) esittävät tutkimuksessaan, kuinka rahdinantajat sekä vakuuttajat arvioivat kokonaisriskin hallinnassa entistä tarkemmin alusten ympäristösuorituskykyä. Vakuutusmaksut voivat olla korkeampia tai vakuutuskattavuus rajallista alusten kohdalla, joiden tekninen taso ei vastaa nykyisiä tai ennakoituja tulevia ympäristövaatimuksia. Puolestaan alukset, jotka vastaavat vaatimuksia tulevaisuuden näkymät huomioiden, voidaan nähdä huomattavasti matalamman riskin kohteina. Kaiken lisäksi ympäristösuorituskyky vaikuttaa osiltaan varustamoiden houkuttelevuuteen sijoituskohteina. Vastuullisuus ja ympäristöriskien huolellinen hallinta voivat parantaa varustamojen arvoa markkinoilla. Täten voidaan todeta, että tästä näkökulmasta aluksien Tier III -yhteensopivuus voi mahdollisesti tukea varustamon asetelmia pääoman saatavuudessa ja parantaa sen pitkän aikavälin kilpailukykyä rahoitusmarkkinoilla (Drobetz ja muut, 2014).

Viitattujen tutkimusten perusteella voidaan siis todeta, että niin rahoitus- kuin vakuutusehdot ovat entistä tiiviimmin sidoksissa alusten ympäristösuorituskykyyn. DF-moottorit sekä SCR-järjestelmät eivät siis pelkästään vastaa Tier III -vaatimukseen, vaan myös pienentävät vakuutus- ja rahoitusyhtiöiden mahdollisesti kokemia riskejä. IMO:n luomat säädökset ja vaatimukset toimivat siis mekanismina, mikä ohjaa tarkoituksellisesti pääomaa teknologisesti kehittyneempään ja sääntelyitä paremmin kestävään laivastoon.

7 Ympäristövaikutukset

IMO:n asettamien Tier III -päästörajoitusten ja niihin mahdollistavien teknologioiden käyttöönotto ei vaikuta ainoastaan alusten rakennukseen ja suunnitteluun, investointeihin ja kulurakenteeseen, vaan sillä on myös suuria vaikutuksia ympäristöön sekä terveyteen etenkin rannikkoalueilla. Merenkulun NO_x-päästöjen väheneminen kohdistuu niin paikallisiin kuin globaaleihin ympäristöongelmiin, kuten esimerkiksi rannikkoalueiden ilmanlaadun heikkenemiseen, vesistöjen rehevöitymiseen ja myöskin epäsuoriin ympäristövaikutuksiin. Tutkielman viimeisessä kappaleessa tarkastellaan asetettujen ympäristövaatimusten vaikutuksiin niin paikallisesti kuin globaalilla tasolla sekä vaatimusten mahdollisia pitkän aikavälin vaikutuksia alusten elinkaareen ja romutusmääriin.

7.1 Paikalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset

Merenkulun NO_x-päästöt ovat merkittävä paikallisen ilmanlaadun heikentäjä erityisesti satama- ja rannikkoalueilla, joissa alukset operoivat ihmisasutusten läheisyydessä ja päästöt kohdistuvat lähes suoranaisesti väestöön. Alailmakehässä NO_x-yhdisteet osallistuvat reaktioihin, missä muodostuu ihmisen hengitysteille haitallista otsonia sekä muun muassa muita pienhiukkasia. Kyseisten epäpuhtauksien on yleisesti todettu lisäävän sydän- ja verisuonitautien, hengitystieinfektioiden sekä myös ennenaikaisen kuolleisuuden riskiä etenkin tiheään asutettujen rannikkoalueiden parissa (World Health Organization, 2021). Corbett ja muut (2008) tarkentava analyysi osoittaa, että merenkulku on yksi keskeisimmistä liikenteen aiheuttamista NO_x-päästölähteistä monissa Aasian, Pohjois-Amerikan ja Euroopan satamakaupungeissa. Mainittujen seikkojen perusteella on erityisen tärkeää vähentää päästöjä satama- ja rannikkoalueilla, jotta alueiden paikallinen ilmanlaatu saataisiin paranemaan.

Tier III -päästörajoitusten käyttöönoton mahdollistaa NO_x-päästöjen merkittävän vähentämisen mainituilla herkeiksi luokitelluilla alueilla. Jonson ja muut (2019) tutkimuksen mukaan merenkulun tiukennetut päästörajoitukset voivat madaltaa

kyseisten rannikkoalueiden NO_x-pitoisuuksia jopa useita prosentteja, etenkin vilkkaasti liikennöidyillä ECA-alueilla. Luotujen päästörajoitusten on arvioitu johtavan huomattaviin terveyshyötyihin ja alentamaan hengitystieinfektioiden määrää sekä yleisesti vähentämään päästöihin liitännäisiä lääkärikäyntejä pitkällä aikavälillä. NO_x-päästöjen vähentäminen vaikuttaa epäsuorasti myös pienhiukkaspitoisuuksiin. Näin ollen Tier III -rajoitukset voivat mahdollisesti vähentää satamien lähialueilla ilman epäpuhtauksien määrää, mikä on erityisen tärkeää väestöryhmille, jotka ovat alttiita epäpuhtauksille, kuten lapset sekä ikääntynyt väestö.

Yleisesti voidaan todeta, että päästörajoitusten paikalliset ympäristö- ja terveysvaikutukset ovat yksi tärkeimmistä perusteista päästörajoitusten tiukentuneille ja entisestään tiukentuvalle sääntelylle merenkulussa. Rajoitukset satamissa ja rannikkoalueilla eivät ainoastaan parannat ilmanlaatua alueilla vaan myös tukevat alueellisia ilmastotavoitteita sekä parantaa elinalueiden laatua kaupunkialueille, joille merenkulku on suuri ja tärkeä osa taloudellista toimintaa.

7.2 Globaalit ympäristövaikutukset

Aikaisemmassa kappaleessa käsiteltyjen paikallisten ympäristö- ja terveysvaikutusten lisäksi merenkulun NO_x-päästöillä on huomattavia globaaleja ympäristövaikutuksia. Nämä vaikutukset liittyvät etenkin ilmakehän kautta tapahtuvaan typen kulkeutumiseen ja tämän vaikutukseen meri- ja maaekosysteemeissä. Ilmakehässä typen oksidit osallistuvat reaktioihin, minkä seurauksena reaktiivista typpeä kulkeutuu ja laskeutuu hyvin laajalle alueelle sateen ja kuivan laskeuman mukana. Tätä ilmakehän kautta tapahtuvaa toimintaa kutsutaan typpilaskeutumaksi, mikä vaikuttaa ympäristöön ja ekosysteemeihin myös kaukana itse päästölähteistä (Galloway ja muut, 2008).

Merenkulusta johtuvien päästöjen on todettu vaikuttavan typen kertymiseen etenkin vilkkaasti liikennöidyillä meriväylillä, joilla päästöjen lähde eli alus sijaitsee suoraan ekosysteemin yläpuolella. Tästä johtuen merenkulun NO_x-päästöt ovat poikkeuksellisen tehokas ravinnekuormituksen lähde verrattuna moniin muihin maalla sijaitseviin

päästölähteisiin (Duce ja muut, 2008). Vesistön rehevöitymisen on todettu olevan suoraan liitännäinen typpilaskeuman lisääntymiseen ja rehevöityminen on erityisen merkittävä ympäristöongelma suljetuilla merialueilla. Kaikki tämä voi johtaa hapenkulutuksen kasvuun sekä pohjaelimestön heikentymiseen, koska ilmakehän kautta kulkeva typpi toimii ravintona leville ja kasviplanktoneille, mikä puolestaan voi kiihdyttää perustuotantoa. Tutkimusten mukaan ilmakehän kautta kulkeva typpi on olennainen tekijä vesialueiden rehevöitymisessä ja vesistöjen tilaa ei voida parantaa tehokkaasti, ellei kyseisen typen lähteitä saada paremmin hallittua (Duce ja muut., 2008)

Typpilaskeuma vaikuttaa lisäksi myös maa- ja meriekosysteemien happamoitumiseen. Pitkäkestoinen typpilaskeuma voi muuttaa kemiallista tasapainoa, heikentää ekosysteemien puskurikykyä ja johtaa muutoksiin eliölajien koostumuksessa niin maaperässä kuin vesistöissä. Galloway ja muut (2008) osoittaa, kuinka ihmisten toiminnan aiheuttama typen kierroksen muutos on yksi keskeisimmistä globaaleista ympäristöpaineista, millä on pitkäkestoisia ja kauaskantoisia vaikutuksia ekosysteemien kestävyteen ja toimintaan.

Globaalilta kannalta Tier III -päästörajoitusten vaikutus perustuu siihen, että ne kohdistuvat suoraan NO_x-päästöjen synty lähteisiin eli merellä liikennöiviin aluksiin. Vaikka päästörajoitukset kohdistuvat ensisijaisesti rajatuille merialueille (ECA:t), ilmakehän kemialliset ja meteorologiset prosessit levittävät merenkulun NO_x-päästöjen vaikutuksia myös laajemmalle alueelle. Tästä syystä merenkulun NO_x-päästöjen hillitseminen voi vähentää ilmakehän kautta tapahtuvaa typen kulkeutumista ja täten tukea meri- ja maaekosysteemien pitkäaikaista kestävyttä (Seinfeld ja Pandis, 2016).

7.3 Ilmastovaikutukset

Vaikka NO_x:it eivät ole varsinaisesti kasvihuonekaasuja, niillä on huomattavia epäsuoria vaikutuksia ilmastoon ilmakehän kemian kautta. NO_x-päästöt vaikuttavat ilmaston kannalta negatiivisesti erityisesti troposfäärisen otsonin muodostumiseen ja positiivisesti metaanin hapettumiseen ilmakehässä, näiden tapahtumien kautta päästöt

kytkeytyvät ilmastojärjestelmään. Voidaan siis todeta, että merenkulun aiheuttamien NO_x-päästöjen hillitsemisellä saattaa olla vaikutuksia myös ilmastonmuutoksen hillitsemiseen, vaikka todelliset vaikutukset ovat monimutkaisia ja myös osin vastakkaisuuntaisia (Myhre ja muut, 2013).

Ilmakehässä NO_x-yhdisteet osallistuvat reaktioihin, mitkä lisäävät otsonipitoisuuksia alailmakehässä. NO_x-päästöt vaikuttavat troposfäärisen otsonin muodostumiseen ja kyseinen otsoni toimii kasvihuonekaasuna ja täten edistää ilmaston lämpenemistä. Puolestaan mahdollisesti ilmaston kannalta positiivinen vaikutus tulee NO_x-päästöjen metaanin hapettumisen nopeuttamisesta ilmakehässä, mikä lyhentää metaanin elinikää ja täten voi vähentää sen ilmastovaikutusta. Näiden kahden mainitun vastakkaisen tekijän vuoksi NO_x:n kokonaisvaikutus ilmastoon riippuu täysin päästöjen määrästä, sijainnista ja alueellisesta jakaumasta (Myhre ja muut, 2013) NO_x-päästöt syntyvät pääosin alueilla, joilla kemialliset olosuhteet ilmakehässä ovat suotuisia otsonin muodostumisen suhteen. Merenkulun NO_x-päästöt myös tapahtuvat pääosin alailmakehässä, missä päästöjen vaikutus on tehokasta otsonipitoisuuksiin. Näistä syistä NO_x-päästöjen minimointi ja vähentäminen voi vähentää troposfäärisen otsonin muodostumista ja täten vähentää osaa merenkulun epäsuorista ilmastovaikutuksista (Eyring ja muut, 2010).

IMO:n asettamien Tier III -päästörajoitusten ilmastovaikutukset ovat kuitenkin epäsuoria ja toissijaisia verrattuna esimerkiksi hiilidioksidipäästöjen vähentämiseen. NO_x-päästöjen minimointi ei suoraan vaikuta vähentäen merenkulun hiilijalanjälkeä, mutta se voi kuitenkin vaikuttaa ilmakehän säteilypakotteeseen metaanin ja otsonin kautta. Monissa ilmastomallinnuksiin perustuvissa tutkimuksissa on päädytty lopputulemaan, että NO_x-päästöjen vähentämisen nettovaikutus ilmastoon on kokonaisuudessaan lievästi viilentävä, vaikka epävarmuudet ovat edelleenkin merkittäviä (Myhre ja muut, 2013)

Yhteenvetona voidaan todeta, että Tier III -päästörajoitusten rooli ei ole ensisijainen ilmastopolitiikassa, mutta rajoituksilla on ilmastojärjestelmään kytkeytyviä sivuvaikutuksia. NO_x-päästöjen vähentäminen voi osaltaan tukea ilmastonmuutoksen hillintää, kun merenkulun päästöjen vähentyessä pienenee myös troposfäärisen otsonin muodostuminen. Merenkulun päästöjen vaikutuksia tarkastellessa yleisten ilmastovaikutusten rooli ei ole niinkään suuri, joten vaikutuksia tulisi tarkastella osana suurempaa kokonaisuutta, missä ilmanlaatu-, terveys- ja ilmastovaikutukset kytkeytyvät toisiinsa.

7.4 Vanhojen alusten käyttöikä ja romutus

Kiristyvät vaatimukset päästöjen suhteen vaikuttavat epäsuorasti alusten elinkaareen ja täten myös romutus päätöksiin. Alukset, jotka eivät täytä tiukkoja Tier III -vaatimuksia ja joiden retrofittaus ei ole taloudellisesti tai teknisesti välttämättä enää perusteltua, voivat kohdata ennenaikaisen käytöstä poistamisen. Tällöin varustamot joutuvat punnitsemaan retrofit-ratkaisujen kannattavuutta ja kustannuksia eri näkökulmista miettien etenkin aluksen jäljellä olevaa käyttöikää ja yleistä markkina-arvoa (Lindstad ja Eskeland, 2016)

Tutkimukset osoittavat, että päästövaatimusten kiristyminen voi nopeuttaa varustamojen laivastojen uusiutumista etenkin silloin, kun jo olemassa olevan vanhan kaluston päästöprofiili poikkeaa huomattavasti uusien alusten päästövaatimustasosta. Päästösääntelyihin liittyvä epävarmuus ja varustamoille tulevien uusien lisäinvestointien riski laskevat vanhojen alusten taloudellista houkuttelevuutta, mikä voi mahdollisesti johtaa aluksen teknisen käyttöiän suhteen ennenaikaiseen käytöstä poistamiseen (Cariou ja Wolff, 2011)

Alusten romuttaminen ei kuitenkaan ole yksinkertaista, eikä ympäristön kannalta täysin ongelmaton ratkaisu. Itse romutusprosessiin liittyy huomattavia terveys- ja ympäristöriskejä, mitkä riippuvat romutuspaikan käyttämisestä romutusmenetelmistä sekä heidän sääntely- ja valvontatasostaan. Vaikka alusten romuttaminen mahdollistaa materiaalien kierrätyksen ja uusiokäytön, romutustoiminnan ympäristövaikutukset

voivat olla merkittäviä etenkin alueilla ja toimipaikoissa, missä ympäristönsuojelun vaatimukset eivät ole vaaditulla tasolla (Chang ja muut, 2010). Romutusmäärien on arvioitu kasvavan etenkin tilanteissa, joissa useat ympäristöön ja energiatehokkuuteen liittyvät sääntelyt kohdistuvat samanaikaisesti jo olemassa olevaan laivastoon. Muut sääntelytoimet Tier III -vaatimusten ohella voivat yhdessä lyhentää vanhojen alusten taloudellista käyttöikää lisäten painetta alusten ennenaikaiseen romuttamiseen etenkin 2020-luvun loppua kohden (Lindstad ja Eskeland, 2016).

Kokonaisuutena voidaan tiivistää, että Tier III -päästörajoitukset mahdollisesti painostavat laivaston uusimiseen ja täten vähentää NO_x-päästöjä pitkällä aikavälillä, mutta samalla rajoitukset todennäköisesti lisäävät romutustoimintaa ja siihen liittyviä ympäristöhaasteita. Tästä syystä päästörajoitusten kiristämistä entisestään tulisi tarkastella osana laajempaa elinkaarinäkökulmaa, jossa huomioidaan myös aluksen elinkaaren loppuvaiheeseen liittyvät ympäristövaikutukset osana alusten käytön aikaisia ympäristövaikutuksia.

8 Yhteenveto

Tutkielman tarkoituksena oli analysoida IMO:n asettamien NO_x tier -rajoitusten, erityisesti Tier III -päästörajoituksen vaikutuksia kansainväliseen merenkulkuun. Tutkielma perustui kirjallisuuteen ja kirjoittajan omaan tietotaitoon ja se toteutettiin neljästä toisistaan täydentävästä näkökulmasta. Tutkielman perusteella voidaan havaita, että NO_x Tier III -päästörajoitus on toiminut merkittävänä ohjaajana merenkulun kehityksessä teknologisesti. Tiukentuneiden rajoitusten takia perinteiset dieselmoottorit eivät yksinään pysty täyttämään nykyisiä vaatimuksia, mikä on johtanut SCR-järjestelmien sekä DF-moottorien yleistymiseen hyödyntäen vaihtoehtoisia polttoaineita. Rajoitukset on siis ohjannut kansainvälisen merenkulun kehitystä kohti monimutkaisempia teknisiä ratkaisuja, mutta samalla ympäristötehokkaampia vaihtoehtoja.

Päästörajoitusten vaikutukset näkyvät selkeästi alusten suunnittelussa ja rakentamisessa. Tier III -rajoitusten huomioiminen aluksen suunnitteluvaiheessa on huomattavasti kustannustehokkaampaa, helpompaa ja teknisesti toimivampaa kuin mahdolliset jälkiasennukset. Rajoitusten takia telakoiden ja varustamoiden tulee huomioida sekä ennakoita nykyisiä ja tulevia sääntelyitä jo uutta alusta suunniteltaessa. Päästörajoitukset ovat myös vaikuttaneet alusten operointiin, etenkin ECA-alueilla, joissa Tier III -yhteensopivuus on muodostunut jopa kilpailutekijäksi.

Taloudelliselta näkökannalta Tier III -päästörajoitukset vaativat varustamoilta huomattavia investointeja, jotka korottavat alusten hankinta- ja käyttökustannuksia. Toisaalta rajoitusten noudattaminen parantaa alusten pitkän aikavälin kilpailukykyä ja rahoituksen saatavuutta sekä sopeutumiskykyä mahdollisiin tuleviin kiristyksiin sääntelyissä. Ympäristötehokkaat ja rajoituksia noudattavat alukset nähdään entistä useammin riskienhallintaa tukevinä tekijöinä rahoitus- ja vakuutusmarkkinoilla.

Ympäristö- ja terveysvaikutusten kannalta Tier III -päästörajoituksilla on huomattavia myönteisiä vaikutuksia etenkin satamien ja rannikkoalueiden ilmanlaatuun. NO_x-

päästöjen vähentäminen edistää ihmisten terveyttä sekä paikallisten ekosysteemien tilaa. Päästöjen vähentämisellä on myös laajempia ympäristövaikutuksia vesistöjen ja ilmakehän kautta.

IMO:n Tier III -päästörajoituksen voidaan todeta olevan tehokas ohjauskeino, joka on vaikuttanut laajasti merenkulun teknologisiin, ympäristöllisiin ja taloudellisiin ratkaisuihin. Tutkielmasta voidaan todeta, että rajoitukset eivät ainoastaan rajoita toimintaa, vaan ne toimivat myös innovaatiota ja kehitystä edistävinä tekijöinä kansainvälisessä merenkulussa.

Lähteet

Abbasian Hamedani, E., Alenabi, S. A. & Talebi, S. (2024). *Hydrogen as an energy source: A review of production technologies and challenges of fuel cell vehicles*. Energy Reports, 12, 3778-3794. Noudettu 2.7.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S2352484724006097>

Arctic Council. (n.d.). *Changing tides of Arctic shipping: How new fuels impact the Arctic*. Noudettu 18.5.2025 osoitteesta <https://arctic-council.org/news/changing-tides-of-arctic-shipping-how-new-fuels-impact-the-arctic/>

Atilhan, S., Park, S., El-Halwagi, M. M., Atilhan, M. ja muut (2021). *Green hydrogen as an alternative fuel for the shipping industry*. Current Opinion in Chemical Engineering, 31, artikkeli 100668. Noudettu 2.7.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S221133982030071X>

Cariou, P. & Wolff, F-C. (2011). *Do Port State Control Inspections Influence Flag- and Class-hopping Phenomena in Shipping*. Journal of Transport Economics and Policy, 45(2). Noudettu 9.1.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/41321546_Do_Port_State_Control_Inspections_Influence_Flag-_and_Class-hopping_Phenomena_in_Shipping

Center for Sustainable Systems. (2021). *Hydrogen factsheet*. University of Michigan. Noudettu 2.7.2025 osoitteesta <https://css.umich.edu/publications/factsheets/energy/hydrogen-factsheet>

Chang, Y-C., Wang, N. & Durak, O. S. (2010). *Ship recycling and marine pollution*. Marine Pollution Bulletin, 60(9), 1390-1396. Noudettu 9.1.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0025326X10002225>

Comer, B., Olmer, N., Mao, X., Roy, B & Rutherford, D. (2017). *Black Carbon Emissions and Fuel Use in Global Shipping 2015*. Noudettu 18.5.2025 osoitteesta https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/Global-Marine-BC-Inventory-2015_ICCT-Report_15122017_vF.pdf

Corbett, J. J., Winebrake, J. J., Green, E. H., Kasibhatla, P. ja muut (2008). *Mortality from Ship Emissions: A Global Assessment*. Environmental Science and Technology, 41(24), 8512-8518. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/5650440_Mortality_from_Ship_Emissions_A_Global_Assessment

David, A., Mako, P., Lizbetin, J. & Bohm, P. (2021). The Impact of an *Environmental Way of Customer's Thinking on a Range of Choice from Transport Routes in Maritime Transport*. Sustainability, 13(3). Noudettu 7.8.2025 osoitteesta <https://www.mdpi.com/2071-1050/13/3/1230>

Deng, J., Wang, X., Wei, Z., Wang, L., ja muut (2021). *A review of NOx and SOx emission reduction technologies for marine diesel engines and the potential evaluation of liquefied natural gas fuelled vessels*. Science of The Total Environment, 766, artikkeli 144319. Noudettu 8.6.2025 osoitteesta <https://www-sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0048969720378505>

de Fournas, N. & Wei, M. (2022). *Techno-economic assessment of renewable methanol from biomass gasification and PEM electrolysis for decarbonization of the maritime sector in California*. Energy Conversion and Management, 257, artikkeli 115440. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www-sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0196890422002369>

DNV. (2025). *LNG powers unprecedented year for orders of alternative-fuelled vessels*. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.dnv.com/news/lng-powers-unprecedented-year-for-orders-of-alternative-fuelled-vessels/>

DNV. (n.d.). *Maritime Forecast to 2050*. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta https://brandcentral.dnv.com/original/gallery/10651/files/original/0ca6e244-84ed-42d0-9788-a6739c70f84c.pdf?utm_id=&utm_campaign=MA_AUTO_25Q3_GLOB_PUBL_Martime_Forecast_DOWNLOAD_confirmation_incl_subscription&utm_medium=email&utm_source=Eloqua

Dodge, E. (2014). *Wärtsilä's Marine LNG Solutions*. Noudettu 28.6.2025 osoitteesta <https://www.edwardtdodge.com/2014/11/06/wartsilas-marine-lng-solutions/>

Drobetz, W., Merikas, A., Merika, A. & Tsionas, M. G. (2014). *Corporate social responsibility disclosure: The case of international shipping*. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 71, 18-44. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta <https://www-sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S136655451400146X>

Duce, R. A., Laroche, J., Altieri, K., Arrigo, K. R. ja muut (2008). *Impacts of Atmospheric Anthropogenic Nitrogen on the Open Ocean*. Science, 320(5878), 893-897. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/5363688_Impacts_of_Atmospheric_Anthropogenic_Nitrogen_on_the_Open_Ocean

- Duong, P. A. & Kang, H. (2025). *Ammonia as fuel for marine dual-fuel technology: A comprehensive review*. *Fuel Processing Technology*, 272, artikkeli 108205. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0378382025000293#s0040>
- Eyring, V., Köhler, H. W., Lauer, A. & Lemper, B. (2005). *Emissions from international shipping: 2. Impact of future technologies on scenarios until 2050*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 110(D17). Noudettu 9.1.2025 osoitteesta <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2004JD005620>
- Galloway, J., Townsend, A. R., Erisman, J. W., Bekunda, M. ja muut (2008). *Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions*. *Science*, 320(5878), 889-892. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta https://www.researchgate.net/publication/5363687_Transformation_of_the_Nitrogen_Cycle_Recent_Trends_Questions_and_Potential_Solutions
- Ghosh. (2022). *IMO Tier III nitrogen oxide (NOx) emission compliance*. UK P&I Club. Noudettu 18.5.2025 osoitteesta <https://www.ukpandi.com/news-and-resources/news/article/articles/2022/imo-tier-iii-nitrogen-oxide-nox-emission-compliance/>
- Grönholm, T., Mäkelä, T., Hatakka, J., Jalkanen, J-P. ja muut (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. Noudettu 28.6.2025 osoitteesta <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.est.1c03293>
- Huang, L., Wen, Y., Geng, X., Zhou, C. & Xiao, C. (2018). *Integrating multi-source maritime information to estimate ship exhaust emissions under wind, wave and current conditions*. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 59, 148-159. Noudettu 4.4.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920917306314>
- IACCSEA. (2013). *Marine SCR – Cost benefit analysis*. Noudettu 13.8.2025 osoitteesta <https://www.iaccsea.com/wp-content/uploads/2018/12/IACCSEA-Marine-SCR-Cost-benefit-analysis-2013.pdf>
- International Maritime Organization. (n.d.a). *Brief history of IMO*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/en/About/HistoryOfIMO/Pages/Default.aspx>
- International Maritime Organization. (n.d.b). *Convention on the International Maritime Organization*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/en/About/Conventions/Pages/Convention-on-the-International-Maritime-Organization.aspx>

International Maritime Organization. (n.d.c). *IMO identification number schemes*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/en/OurWork/IIS/Pages/IMO-Identification-Number-Schemes.aspx>

International Maritime Organization. (n.d.d). International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL). Noudettu 7.3.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-%28MARPOL%29.aspx>

International Maritime Organization. (n.d.e). *Nitrogen oxides (NOx) – Regulation 13*. Noudettu 7.3.2025 osoitteesta <https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29--Regulation-13.aspx>

International Maritime Organization. (1987). *Resolution A.600(15): IMO ship identification number scheme*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.600\(15\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/AssemblyDocuments/A.600(15).pdf)

Jacotine, M. (2021). *Methanol A Promising Solution*. Three Sixty Marine. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.threesixtymarine.com/methanol-a-promising-solution/>

Jameson, P., Sanders, U., Egloff, C., Krogsgaard, M. ja muut (2024). *The Real Cost of Decarbonizing in the Shipping Industry*. Boston Consulting Group. Noudettu 13.8.2025 osoitteesta <https://www.bcg.com/publications/2024/real-cost-of-shipping-decarbonization>

Jonson, J. E., Gauss, M., Jalkanen, J-P. & Johansson, L. (2019). *Effects of strengthening the Baltic Sea ECA regulations*. Atmospheric Chemistry and Physics, 19(21), 13469-13487. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta <https://acp.copernicus.org/articles/19/13469/2019/>

Lindstad, H. E. & Eskeland, G. S. (2016). *Environmental regulations in shipping: Policies leaning towards globalization of scrubbers deserve scrutiny*. Transport Research Part D: Transport and Environment, 47, 67-76. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta <https://www-sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S1361920916300955>

Machaj, K., Kupecki, J., Malecha, Z., Morawski, A. W. ja muut (2022). *Ammonia as a potential marine fuel: A review*. Energy Strategy Reviews, 44, artikkeli 100926. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www-sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S2211467X22001201>

<https://apnews.com/article/international-shipping-greenhouse-gas-emissionsinternational-maritime-organization-933147f1bba7f4851134f128b07e6917>

Psaraftis H. N. & Kontovas, C. A. (2020). *Influence and transparency at the IMO: the name of the game*. Maritime Economics & Logistics, 22, 151-172. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta <https://link.springer.com/article/10.1057/s41278-020-00149-4>

Seinfeld, J. H. (2016). *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta <https://ebookcentral-proquest-com.proxy.uwasa.fi/lib/tritonia-ebooks/reader.action?docID=7104487&c=UERG&ppg=4>

Snyder, J. (2021) *Maersk orders world's first carbon-neutral methanol-fuelled box ship*. Riviera Maritime Media. Noudettu 28.6.2025 osoitteesta <https://www.rivieramm.com/news-content-hub/news-content-hub/maersk-orderrsquos-worldrsquos-first-box-ship-to-be-fuelled-by-carbon-neutral-methanol-66383>

Sorsa Foundation. (2024). *Oikeudenmukainen siirtymä Suomessa 2025*. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta <https://sorsafoundation.fi/wp-content/uploads/oikeudenmukainen-siirtyma-suomessa-2025-raportti.pdf>

Sun, Y., Yang, L., & Zheng, J. (2020). *Emission control areas: More or fewer?* Transportation Research Part D: Transport and Environment, 84, artikkeli 102349. Noudettu 4.4.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1361920920305368>

Suuronen, H. (2018). *Uusien aluksien energiatehokkuuden suunnitteluindeksi ja energiatehokkuuden hallintasuunnitelma*. Kaakkois-Suomen ammattikorkeakoulu. Noudettu 4.3.2025 osoitteesta https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/150239/Suuronen_Hanna.pdf.pdf;jsessionid=24AF7292E73D6528BE18637533786EEB?sequence=1

Tan, F. (2024). *MAN Energy Solutions to offer ammonia-fuelled ship engines after 2027*. Reuters. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.reuters.com/business/energy/man-energy-solutions-offer-ammonia-fuelled-ship-engines-after-2027-2024-03-04/>

Valera-Medina, A., Xiao, H., Owen-Jones, M., David, W. I. F. & Bowen, P. J. (2018). *Ammonia for power*. Progress in Energy and Combustion Science, 60, 63-102. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect-com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0360128517302320>

Winebrake, J. J., Corbett, J. J., Green, E. H., Lauer, A. & Eyring, V. (2009). *Mitigating the Health Impacts of Pollution from Oceangoing Shipping: An Assessment of Low-Sulfur Fuel Mandates*. *Environmental Science & Technology*, 43(13), 4776-4782. Noudettu 4.4.2025 osoitteesta <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/es803224g>

World Health Organization. (2021). *WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM_{2.5} and PM₁₀), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide*. Noudettu 8.1.2025 osoitteesta <https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228>

Wróbel, K., Wróbel, J., Tokarz, W., Lach, J., Podsadni, K. & Czerwiński, A. (2022). *Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles: A review*. *Energies*, 15(23). Noudettu 2.7.2025 osoitteesta <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/23/8937>

Wärtsilä. (n.d.). *Dual fuel engines from Wärtsilä*. Noudettu 28.6.2025 osoitteesta <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/dual-fuel-engines-from-wartsila>

Wärtsilä. (n.d.). *Get to know the Wärtsilä 25 ammonia*. Noudettu 17.5.2025 osoitteesta <https://www.wartsila.com/about/190/article/get-to-know-the-wartsila-25-ammonia>

Wärtsilä. (2024). *Landmark deal between Wärtsilä and Eidesvik Offshore pioneers growing demand for ammonia in shipping*. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.wartsila.com/media/news/26-08-2024-landmark-deal-between-wartsila-and-eidesvik-offshore-pioneers-growing-demand-for-ammonia-in-shipping-3485578>

Wärtsilä. (2022). *Wärtsilä coordinates EU funded project to accelerate ammonia engine development*. Noudettu 29.6.2025 osoitteesta <https://www.wartsila.com/media/news/05-04-2022-wartsila-coordinates-eu-funded-project-to-accelerate-ammonia-engine-development-3079950>

Zhang, G., Yan, H., Li, T., Zhu, Y. ja muut (2021). *Relation analysis on emission control and economic cost of SCR system for marine diesels*. *Science of the Total Environment*, 788, artikkeli 147856. Noudettu 6.1.2025 osoitteesta <https://www.sciencedirect.com.proxy.uwasa.fi/science/article/pii/S0048969721029272>