

Insinöörیتieteiden kandidaattiohjelma

Meriliikenteen päästölainsäädännön kehitys

IMO-regulaation historia, nykytila ja tulevaisuuden näkymät

Santeri Dawant

Kandidaatin tutkielma
2025

Copyright ©2025 Santeri Dawant

Tekijä Santeri Dawant

Työn nimi Meriliikenteen päästölainsäädännön kehitys – IMO-regulaation historia, nykytila ja tulevaisuuden näkymät

Koulutusohjelma Insinööritieteiden kandidaattiohjelma

Pääaine ENG4000 Energia- ja konetekniikka

Valvoja Vanhempi yliopistonlehtori Henrik Holmberg

Työn ohjaaja(t) Apulaisprofessori Ossi Kaario

Päivämäärä 05.12.2025 **Sivumäärä** 30+4 **Kieli** suomi

Tiivistelmä

Globaali meriliikenne on murroksessa. Suurimmaksi osaksi kansainvälisillä merialueilla tapahtuvaan liikenteeseen on historiallisesti ollut vaikea puuttua laajamittaisesti ja koordinoitusti. Koherentin regulaation kehittyminen on 2000-luvulle tultaessa ottanut kuitenkin merkittäviä askeleita eteenpäin ja 2010-luvulla ilmastotietoisuuden kasvu, ja Pariisin sopimus tekivät globaalisti velvoittavan kasvihuonepäästöjä rajoittavan sopimisen entistä kriittisemmäksi. Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) nettonollakehys (NZF) edustaa uranuurtavaa yritystä saada globaalia meriliikennettä mukaan Pariisin sopimuksen mukaisiin ilmastotavoitteisiin. Kehys yhdessä alueellisten säädösten kanssa luovat monimutkaisen, hankalasti hahmotettavan ja jatkuvasti muuttuvan regulaatioympäristön, joka voimaan tullessaan tulee muuttamaan koko sektoria merkittävästi. Tämän fragmentoituneen ja dynaamisen säädännön ymmärtäminen ja siinä ajan tasalla pysyminen on ehto tulevaisuuden merenkulussa pärjäämiseksi.

Tutkielmassa tutkitaan meriliikenteen päästölainsäädännön kehitystä sen alkumetreiltä 1950-luvulta nykypäivään ja arvioidaan todennäköisiä suuntia sen kehitykselle tulevaisuudessa. Huomiota kohdennetaan myös regulaation sisältämiin ristiriitoihin, päällekkäisyyksiin ja tulevaisuuden haasteisiin. IMO NZF:n tavoitteisiin pääsemiseksi laivaliikenteen polttoaineketju tulisi uudistaa täysin ja tulevaisuuden energianlähteenä käyttää vaihtoehtoisia hiilivapaalla sähköllä tuotettuja sähköpolttoaineita tai toisen sukupolven biopolttoaineita.

NZF:n kunnianhimoisista tavoitteista huolimatta sen nopea toimeenpano on välttämätöntä, jos ilmaston lämpeneminen halutaan rajoittaa alle 2 °C:een. Tavoitteiden saavuttaminen edellyttää sääntelyssä johdonmukaisuutta ja pitkäjänteisyyttä, joita nykyinen poliittinen epävarmuus kuitenkin heikentää. Viimeaikainen NZF:n implementoinnin lykkääminen voi tulevaisuudessa lisätä jo käytössä olevan EU-sääntelyn (sekä muiden alueellisten regulaatioiden) merkitystä globaalissa kontekstissa.

Avainsanat IMO, meriliikenteen päästöt, nettonollakehys, merenkulun dekarbonisaatio, polttoaineet ja energiatehokkuus

Author	Santeri Dawant		
Title of thesis	Development of Maritime Emission Legislation – History, Current Status and Future Prospects of IMO Regulation		
Programme	Bachelor’s Programme in Engineering		
Major	Energy and Mechanical Engineering		
Thesis supervisor	Sr. Lect. Henrik Holmberg		
Thesis advisor(s)	Assoc. Prof. Ossi Kaario		
Date	05.12.2025	Number of pages	30+4
		Language	Finnish

Abstract

Maritime shipping is undergoing a major transformation in its regulatory landscape. Coordinating policies across international ocean trade has long been a complex challenge, but the past decade has brought steady progress toward more unified global regulations. The growing environmental awareness of the 2010s, especially after the Paris Agreement, intensified the need for coordinated action to reduce greenhouse gas emissions. The International Maritime Organization’s Net Zero Framework stands out as a key initiative aligning global shipping with international climate goals. Together with regional regulations, it forms a dense and fast-evolving system that is set to reshape the future of the maritime sector. Staying informed about these developments is now essential for maintaining competitiveness in the industry

This research examines how maritime emission regulations have evolved from the mid-twentieth century to the present, while outlining possible directions for future policy. It highlights internal inconsistencies, overlapping frameworks, and emerging implementation challenges. Achieving the targets set under the IMO Net Zero Framework will require fundamental reshaping of maritime fuel systems, with a shift toward carbon-neutral energy sources such as synthetic fuels derived from renewable electricity and advanced biofuels.

While the Net Zero Framework represents ambitious goals, its swift execution is essential for constraining global temperature rise to below 2 degrees Celsius. Meeting these targets depends on regulatory consistency and sustained commitment, elements threatened by contemporary political instability. Current postponements in Net Zero Framework adoption may elevate the role of established European Union regulations and other regional frameworks in shaping global maritime policy standards in coming years.

Keywords IMO, shipping emissions, net-zero framework (NZF), maritime decarbonization, fuels and energy efficiency

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Päästölainsäädännön kehitys 1950-luvulta nykypäivään.....	3
2.1	Typen oksidien päästörajoitukset.....	4
2.2	Polttoaineiden rikki- ja hiilipitoisuus	6
2.3	Päästöalueet	7
3	Regulaatio tulevaisuudessa	9
3.1	IMO:n uusi nettonollakehys	9
3.1.1	Lyhyen aikavälin toimenpiteet.....	11
3.1.1.1	EEDI	11
3.1.1.2	EEXI.....	13
3.1.1.3	CII	13
3.1.2	Keskipitkän aikavälin toimenpiteet	14
3.1.2.1	GFS-polttoainestandardi.....	14
3.1.2.2	Nolla- ja lähes nollapäästöisten polttoaineiden raja-arvot.....	16
3.1.2.3	Päästöhinnointelumekanismi	16
3.2	EU:n säädökset	18
3.2.1	EU ETS.....	18
3.2.2	FuelEU Maritime	19
3.2.3	Eroavaisuudet IMO:n ja EU:n säädöksissä.....	20
3.2.4	Päällekkäisyydet IMO:n ja EU:n säädöksissä	20
4	Regulaation vaikutukset ja toteutumisen ongelmat	22
4.1	Implementoinnin haasteet.....	22
4.2	Teknologisen siirtymän riskit	23
4.3	Oikeudenmukaisuus	23
4.4	Regulaatiomuutosten riittävyys.....	24
5	Yhteenveto	26
	Lähteet	27

Lyhenteet

CII	Hiili-intensiteetti-indikaattori (Carbon Intensity Indicator)
CO ₂	Hiilidioksidi
CO _{2e}	Hiilidioksidi ekvivalentti
DCS	Tiedonkeruujärjestelmä (Data Collection System)
DPF	Dieselhiukkassuodatin (Diesel Particulate Filter)
DWT	Kuollut paino (Deadweight Tonnage)
ECA	Päästörajoitusalue (Emission Control Area)
EEDI	Energiatehokkuuden suunnitteluindeksi (Energy Efficiency Design Index)
EEXI	Energiatehokkuusindeksi olemassa oleville aluksille (Energy Efficiency Existing Ships Index)
EGCS	Savukaasupesuri (Exhaust Gas Cleaning System, scrubber)
ETS	Päästökauppajärjestelmä (Emissions Trading System)
EUA	Euroopan unionin päästöoikeudet (European Union Allowances)
GFI	Polttoaineen kasvihuonepäästöintensiteetissä (Greenhouse Gas Fuel Intensity)
GFS	Globaali polttoainestandardi (Global Fuel Standard)
GHG	Kasvihuonekaasu (Greenhouse Gas)
GT	Bruttovetoisuus (Gross Tonnage)
HFO	Raskas polttoöljy (Heavy Fuel Oil)
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
LDC	Vähiten kehittyneet maat (Least Developed Countries)
LFO	Kevyt polttoöljy (Light Fuel Oil)
LNG	Nesteytetty maakaasu (Liquefied Natural Gas)
LSFO	Matalarikkinen polttoöljy (Low Sulphur Fuel Oil)
VLSFO	Erittäin matalarikkinen polttoöljy (Very Low Sulphur Fuel Oil)
MAR-POL	Kansainvälinen sopimus alusten aiheuttaman saastumisen ehkäisemisestä (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships)
MEPC	Meriympäristön suojelukomitean (Marine Environment Protection Committee)
MGO	Meridieselöljy (Marine Gas Oil)
NECA	Typen oksidien päästörajoitusalue (NO _x Emission Control Area)
NO _x	Typen oksidit
NZF	Nettonollakehys (Net-Zero Framework)
PM	Pienhiukkaset (Particulate Matter)
RU	Korjausyksiköt (Remedial Units)
SCR	Selektiivinen katalyyttinen pelkistäminen (Selective Catalytic Reduction)
SECA	Rikkipäästörajoitusalue (Sulphur Emission Control Area)
SIDS	Pienet saarivaltiot (Small Island Developing States)
SO _x	Rikin oksidit

SU	Ylijäämäyksiköt (Surplus Units)
TtW	Polttoaineen poltosta aiheutuneet päästöt (Tank-to-Wake)
WtT	Polttoaineen ylävirran päästöt aina laivalle lastaamiseen saakka (Well-to-Tank)
WtW	Polttoaineen kokonaispäästöt (Well-to-Wake)
ZNZ	Nolla- ja lähes nollapäästöinen (Zero and Near-Zero)

1 Johdanto

Merikuljetus on kustannustehokkain tapa kuljettaa tavaroita maailmanlaajuisesti. Yli neljä viidesosaa maailmankaupan volyymistä kuljetetaan meriteitse, joten se toimii maailmankaupan selkärankana [1]. Vaikka meriliikennettä yleisesti pidetään maantie- ja lentoliikenteeseen verrattuna ympäristöystävällisenä kuljetusmuotona, sen osuus globaalien kasvihuonepäästöjen lähteenä on kasvussa. Kansainvälinen merikuljetus on yksi suurimmista kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavista sektoreista noin 3 %:n osuudella. CO₂-päästöjen lisäksi 13 % globaaleista rikkidioksidi- ja 15 % globaaleista typen oksidipäästöistä (NO_x) aiheutuivat hyödykkeiden kuljetuksesta meriteitse [2]. Rahdin kasvavan kysynnän takia CO₂-päästöjen arvioidaan kasvavan 50 % vuoteen 2050 mennessä, jolloin meriliikenteen päästöt olisivat globaalisti 15 % [3].

Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization, IMO) on asettanut kunnianhimoisia tavoitteita päästöjen vähentämiseksi mukaan lukien tavoitteen hiilineutraaliudesta vuoteen 2050 mennessä [4]. Tarve näiden päästöjen kattavalle sääntelylle johtuu niiden valtion rajat ylittävästä luonteesta ja tarpeesta sovittaa merenkulun toiminta yhteen globaalin kestävän kehityksen tavoitteiden kanssa. Alan sääntely-ympäristö on kehittynyt varhaisten öljypäästöjen rajoituksista monimutkaisiin viitekehyksiin, jotka kattavat laajan kirjon saastuttavia aineita heijastaen teknologisia edistysaskelia ja laajentuvaa juridista toimivaltaa.

Nykyinen lainsäädäntö on pirstaleinen. Säädöksissä on päällekkäisyyksiä, ja alueelliset erot yhdessä jatkuvasti päivittyvän regulaation kanssa luovat monimutkaisen ja vaikeasti sisäistettävän kokonaisuuden. Tulevien sääntelysuuntausten ja vaikutusten ymmärtäminen edellyttää jatkuvaa ennakoivaa analyysiä, erityisesti kun ympäristöhaasteet ja teknologinen kehitys nopeuttavat lainsäädännön muutosta.

Kirjallisuustutkimuksessa tarkastellaan meriliikenteen päästölainsäädännön kehitystä, historiallisista lähtökohdista nykypäivän sääntelykäytäntöihin, sekä ennakoitaan tulevia kehityskulkuja ja niihin liittyviä ristiriitoja. Tutkimuksessa arvioidaan, kuinka muuttuva sääntely, erityisesti IMO:n MARPOL-liitteen VI päivitykset, ohjaavat teknologioiden käyttöönottoa (esim. LNG ja vaihtoehtoiset polttoaineet) sekä edistää tai rajoittaa kansainvälistä meriliikennettä erilaisten sääntelymallien vuoksi.

Tutkimuskysymykset ovat:

- Miten kansainvälisen meriliikenteen päästöjen sääntely on kehittynyt 1950-luvulta nykypäivään?
- Mikä on IMO:n uuden nettonollakehyksen vaikutus ja onko tavoitteet riittäviä tarvittaviin kansainvälisen meriliikenteen päästövähennyksiin?
- Mitkä ovat keskeisimmät implementoinnin haasteet ja ristiriidat globaalin ja alueellisen (EU) sääntelyn välillä?

Tutkielman keskiössä on kansainvälinen päästölainsäädäntö, mutta myös EU:n säädöksiä sivutaan. Toisessa luvussa tutkitaan meriliikenteen päästöregulaation kehitystä nykypäivään saakka ja sitä, miten se on luonut pohjan moderneille säädöksille. Kolmas luku keskittyy regulaation nykyiseen tilaan, tuleviin suuntiin ja alueellisiin eroavaisuuksiin. Neljännessä luvussa tutkitaan minkälaisia haasteita ja riskejä regulaation muutos luo varustamoille ja meriliikenteestä riippuvaisille kehittyville maille sekä onko muutokset riittäviä.

2 Päästölainsäädännön kehitys 1950-luvulta nykypäivään

Tässä luvussa tarkastellaan globaalin meriliikenteen päästölainsäädännön kehitystä sen alkumetreiltä aina nykypäivään saakka. Pääpaino on typen ja rikin oksidien päästörajoituksissa. Vaikka osa IMO:n kasvihuonepäästöjen vähennysstrategian keinoista on jo käytössä, käsitellään niitä vasta luvussa 4. Tämä johtuu niiden kytkeytymisestä oleellisesti IMO:n nettonollakehykseen.

Nykyinen merenkulun päästöjä koskeva lainsäädäntö kehittyi vähitellen eri onnettomuuksien yhteydessä esiin nousseiden epäkohtien seurauksena. Ennen 1950-lukua meriliikenne oli suurelta osin vailla kattavia kansainvälisiä ympäristömääräyksiä. Kansainvälinen merenkulkujärjestö (IMO), joka on YK:n alainen kansainvälinen merenkulun turvallisuusasioita hallinnoiva järjestö, perustettiin virallisesti Geneven konferenssin seurauksena vuonna 1948, ja siitä tuli aktiivinen 1958 (järjestön nimi oli vuoteen 1982 saakka Maritime Consultative Organization tai IMCO). Tämä merkitsi alkua koordinoitulle kansainvälisen merenkulun ohjeistukselle. Ensimmäinen merkittävä kansainvälinen ympäristönsuojelusopimus merenkulun alalla oli *International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil* (OILPOL), joka hyväksyttiin vuonna 1954 ja astui voimaan 1958. Se keskittyi öljypäästöjen rajoittamiseen ja muodosti perustan myöhemmälle MARPOL-sopimukselle [5].

Kattavan saastumisen ehkäisyä koskevan lainsäädännön liikkeellepanevaksi voimaksi muodostui Torrey Canonyn onnettomuus vuonna 1967, jolloin öljytankkeri ajoi karille Englannin kanaalissa ja 130 000 tonnia raakaöljyä pääsi mereen [6]. Tapaus paljasti merenkulun ympäristönsuojelukeinojen riittämättömyyden ja vauhditti kansainvälisiä pyrkimyksiä kehittää sitovia säädöksiä saastuttamisen ehkäisemiseksi.

Vuonna 1973 hyväksytty, 1978 laajennettu ja 1983 voimaan tullut (liitteet I ja II) MARPOL 73/78 (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) loi perustan merenkulun ympäristönlainsäädännölle. Se käsitti aluksi viisi osa-aluetta:

- Liite I: Öljy- ja öljytuotteet
- Liite II: Irtolastina kuljetettavat vaaralliset nestemäiset aineet
- Liite III: Meriympäristölle vaaralliset pakatut aineet
- Liite IV: Alusten käymäläjätevedet
- Liite V: Kiinteät jätteet

Vuonna 1997 yleisopimusta laajennettiin ”1997 protokollalla”, joka sisälsi kuudennen liitteen otsikolla ”ilman pilaantuminen”. Liite VI asetti ensimmäiset maailmanlaajuiset rajat NOx- ja SOx-päästöille alusten savukaasuista sekä kielsi tarkoitukselliset otsonia heikentävien aineiden päästöt aluksilta,

joiden bruttovetoisuus on 400 tonnia tai enemmän ja jotka tekevät matkoja satamiin tai merellä sijaitseviin terminaaleihin valtioiden lainkäyttöalueella, jotka ovat ratifioineet liitteen [7]. Liite VI tuli voimaan vuonna 2005. Lisäksi perustettiin päästöjen valvonta-alueet (ECA), joissa sovelletaan tiukempia normeja.

IMO otti käyttöön kolmitasoisen NO_x-päästöjärjestelmän (tier I...III). Tier I -standardit määriteltiin vuoden 1997 versiolla liite VI:sta, kun taas tier II ja III julkaistiin liitteen VI päivityksessä vuonna 2008. Vaikka liite VI tuli voimaan vasta 2005, 1997 versiossa määritettiin tier 1 -standardit, jota sovellettiin takautuvasti vuoden 2000 jälkeen rakennettuihin laivoihin, joissa on yli 130 kW:n moottori [8]. Liite VI ratifiointia ennakoivasti useammat laivanmoottorivalmistajat rakensivat standardin täyttäviä moottoreita jo vuodesta 2000. Tier II ja III lisäykset toivat mukanaan tiukempia päästörajoja [8].

2000-luvulla hyväksyttiin myös Ballast Water Management -yleissopimus (2004) painovesilasteihin liittyen ja laivojen myrkyllisten pohjamaalien käytön kieltävä yleissopimus koskeva AFS-yleissopimus (2001), laajentaen merenkulun ympäristölainsäädäntöä biologisen ja kemiallisen saastumisen estoon

Ensimmäiset toimet laivojen kasvihuonekaasupäästöjen (GHG) vähentämiseksi keskittyivät alusten energiatehokkuuden parantamiseen. Tätä seurasi suorat alenevat tavoitetasot päästöille. Vuonna 2011 IMO otti käyttöön ensimmäiset pakolliset toimet kasvihuonepäästöjen vähentämiseksi, jolloin liitteeseen VI lisättiin luku 4 ”säännökset alusten energiatehokkuudesta”. Vuonna 2018 IMO hyväksyi alustavan strategian laivojen GHG-päästöjen vähentämiseksi asettamalla tavoitetasoja ja vuonna 2023 tavoitteita tiukennettiin [9].

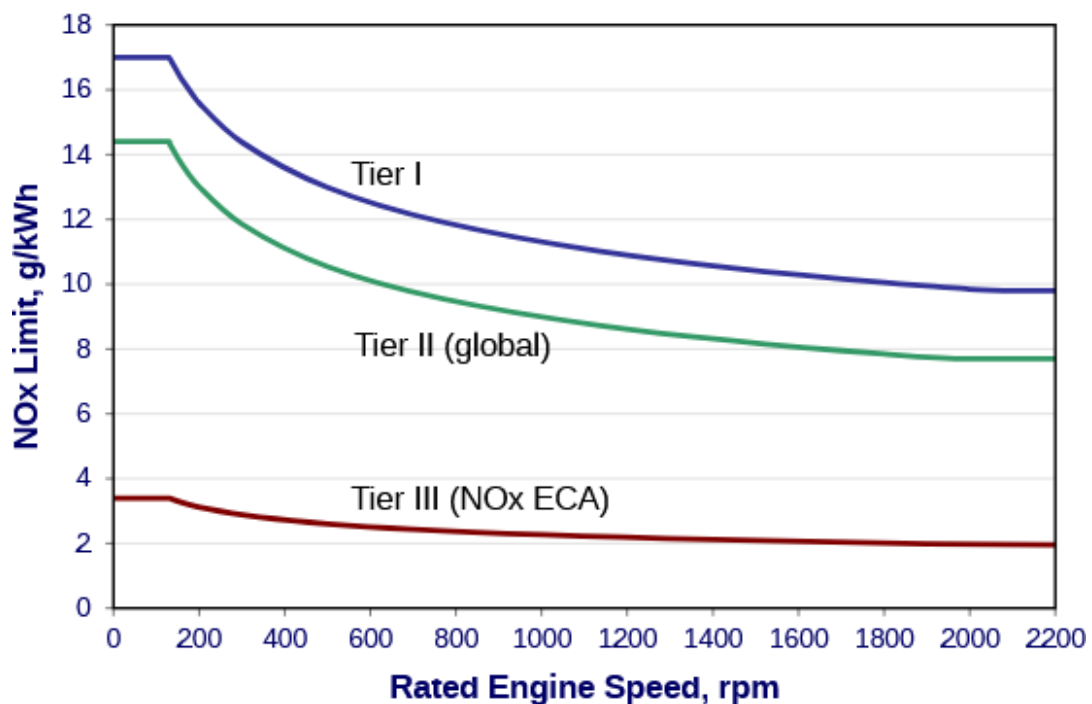
2.1 Typen oksidien päästörajoitukset

Typen oksidien (NO_x) päästörajoitukset koskevat MARPOL liitteen VI säännöksen 13 mukaisesti kaikkia yli 130 kW dieselmoottoreita, jotka toimivat nestemäisellä- tai kaksoispolttoaineelle. Päästörajat on annettu suhteessa moottorin suurimpaan kierrosnopeuteen [10].

Tier	Laivan rakennusvuosi	n < 130 (g/kWh)	n = 130–1999 (g/kWh)	n ≥ 2000 (g/kWh)
I	1.1.2000	17.0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9.8
II	1.1.2011	14.4	$44 \cdot n^{-0.23}$	7.7

Tier	Laivan rakennusvuosi	n < 130 (g/kWh)	n = 130–1999 (g/kWh)	n ≥ 2000 (g/kWh)
III*	1.1.2016 1.1.2021	3.4	$9 \cdot n^{-0.2}$	2.0

Taulukko 1: MARPOL liite VI NOx päästöraajat [8]



Kuvaaja 1: MARPOL liite VI NOx päästöraajat [11]

Tier III -vaatimukset ovat voimassa 1. tammikuuta 2016 tai sen jälkeen rakennetuille aluksille, jotka toimivat Pohjois-Amerikan ja Yhdysvaltain Karibianmeren ECA:ssa, tai 1. tammikuuta 2021 tai sen jälkeen rakennetuille aluksille, jotka toimivat Itämeren tai Pohjanmeren ECA:ssa. Muuten sovelletaan tier II:n rajoja [8].

Tier II standardeihin odotetaan päästävän polttoprosessia optimoimalla. Optimoinnin kohteena olevia parametreja ovat polttoaineen ruiskutuksen ajoitus, paine ja virta, polttoainesuuttimen virtausalue, pakoventtiilin ajoitus sekä sylinterin puristustilavuus [11]. Tier III standardien täyttäminen odotetaan edellyttävän erilaisia NOx-päästöjen hallintateknologioita, kuten erilaisten veden syöttömenetelmiä palamisprosessiin (polttoaineen tai huuhteluilman kanssa tai sylinteriin), savukaasun takaisinkiertäystä tai selektiivinen katalyyttistä pelkistystä (SCR).

varustamoilla on siis käytännössä kolme mahdollisuutta päästä vaadittuihin rajoihin, matalarikkipitoinen polttoaine (LSFO/VLSFO), savukaasupesurit tai vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten nesteytetty maakaasu (LNG). Vaihtoehtoisista yleisin on matalarikkisen polttoaineen käyttö. VLSFO on myös investointina taloudellisesti ja päästövähennyksen suuruuden kannalta kannattavin. Rahtilaivaan asennettuna VLSFO päästövähennys pesuriin verrattuna on 9% SO_x ja 25% pienhiukkasten osalta, taloudellisesti se muodostuu kannattavammaksi 3,3 vuoden jälkeen [12].

EU on myös säädellyt polttoaineen enimmäisrikkipitoisuuksia omilla direktiiveillään. Vuonna 2000 se asetti 0,2 % rajan MGO:lle, 2003 1,0 % rajan HFO:lle, 2008 0,1 % rajan DMA-laatuselle MGO:lle ja 1,5 % raja DMB- ja DMC-laatusille tisleille aluksille, jotka toimivat EU:n aluevesillä ja sisävesillä. Vuonna 2010 direktiivillä 2005/33/EC EU asetti yleisen 0,1 % polttoaineen rikkirajan laiturissa ja sen sisävesissä operoiville aluksille. [13]

2.3 Päästöalueet

ECA:t ovat ilmapäästöalueita, joissa sovelletaan tiukempia päästömääryksiä. Sääntöjen 13 (tier III) ja 14 (rikkipäästöt) soveltamiseen kuuluu seitsemän nimettyä päästöaluetta, jotka on esitetty alla olevassa taulukossa. Lokakuun 2025 MEPC-kokouksessa on lisäksi tarkoitus nimetä Koillis-Atlantti uudeksi ilmapäästöjen rajoitusalueeksi [14].

ECA:t	Kontrollidut yhdisteet	Hyväksytty IMO:ssa	Voimaantulopäivä	Sovelletaan alkuaen
Itämeri	SO _x	26.09.1997	19.05.2005	19.05.2006
Itämeri	NO _x	07.07.2017	01.01.2019	01.01.2021*
Pohjanmeri	SO _x	22.07.2005	22.11.2006	22.11.2007
Pohjanmeri	NO _x	07.07.2017	01.01.2019	01.01.2021*
Pohjois-Amerikan merialue	SO _x , PM	26.03.2010	01.08.2011	01.08.2012
Pohjois-Amerikan merialue	NO _x	26.03.2010	01.08.2011	01.01.2016*
USA Karibi-ameri	SO _x , PM	26.07.2011	01.01.2013	01.01.2014

ECA:t	Kontrolloidut yhdisteet	Hyväksytty IMO:ssa	Voimaantulopäivä	Sovellaan alkaen
USA Karibi- anmeri	NOx	26.07.2011	01.01.2013	01.01.2016*
Arktinen Ka- nada ja Nor- janmeri	SOx, PM	10.2024	1.3.2026	1.3.2027
Arktinen Ka- nada	NOx	10.2024	1.3.2026	1.1.2025*
Norjanmeri	NOx	10.2024	1.3.2026	2026/2030*
Välimeri	SOx, PM	12.2022	1.5.2025	1.5.2025

Taulukko 3: MARPOL-liitteen VI ECA-alueiden käyttöönotto-, täytäntöönpano- ja voimaantulopäivät valvottujen päästöjen osalta [10], [11], [15].

Pohjois-Amerikan, Yhdysvaltojen Karibianmeren, arktisen Kanadan ja Norjanmeren päästöalueet kattavat SO_x-, NO_x- ja PM-päästöjen reguloinnin, kun taas Pohjanmeren ja Itämeren alueet koskevat ainoastaan SO_x- ja NO_x-päästöjä. Välimeren ECA koskee SO_x- ja PM-päästöjä. Kunkin ECA:n vaatimukset ovat eriteltynä tarkemmin MARPOL liitteessä VI. Kaikki NO_x rajoittavat ECA:t vaativat tier III-vaatimusten noudattamista ja koskettavat useimmissa tapauksissa taulukossa asteriksilla merkittyjen päivien jälkeen rakennettuja laivoja [10]. Osa ECA:sta poikkeaa kuitenkin implementoinnin aikataulun ja vaatimusten suhteen tästä [11]. Rikkipäästörajoituksia sovelletaan kaikkiin ECA:lla liikkuviin aluksiin.

Norjanmeren NECA noudattaa yleisesti MARPOL liitteessä 1 käytettyä kolmiosaista järjestelmää voimaantulon suhteen. Siinä alukset, joiden rakennussopimus on tehty 1. maaliskuuta 2026 tai sen jälkeen, tai joilla ei ole rakennussopimusta mutta joiden köli lasketaan 1. syyskuuta 2026 tai sen jälkeen, tai jotka toimitetaan 1. maaliskuuta 2030 tai sen jälkeen, on varustettava Tier III-sertifioituilla meridieselmoottoreilla toimiessaan Norjanmeren ECA-alueella. Tällä taataan, ettei alukset voi enää kiertää NECA-vaatimuksia aloittamalla kölinlaskua ennen soveltamispäivää

3 Regulaatio tulevaisuudessa

Vuonna 2018 vastauksena vuoden 2015 Pariisin sopimukselle IMO esitteli alkuperäisen laivojen kasvihuonepäästöjen vähentämistä koskevan strategian, jossa esiteltiin visio IMO:n sitoutumisesta kansainvälisen merenkulun CO₂ päästöjen vähentämiseen ja niiden asteittaiseen poistamiseen mahdollisimman pian [16]. Alkuperäisen esityksen tavoitteena oli vähentää kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 50 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon. Välietappina tavoitteeksi asetettiin vähintään 40 %:n vähennys päästöintensiteetissä vuoteen 2030 mennessä suhteessa vuoden 2008 tasoon. Ennusteet kasvavasta meriliikenteen kysynnästä tulevina vuosikymmeninä tarkoittaa kuitenkin sitä, ettei absoluuttista päästövähennystä saavutettaisi vuoteen 2030 mennessä [17]. Absoluuttisten päästöjen pysyessä samalla tasalla tarkoittaisi, ettei strategia olisi yhteensopiva Pariisin sopimuksen kanssa. Kun tarkastelun perustana käytetään IPCC:n raporteissa keskeisenä ilmastomittarina toimivaa hiilibudjettia, meriliikenteen kumulatiiviset päästöt olisivat alkuperäisen IMO:n strategian mukaisella kehityksellä noin kaksinkertaiset verrattuna Pariisin sopimuksen tavoitteiden mukaisessa skenaariossa sallittuun hiilibudjettiin [18]. Pysyäkseen 50 % todennäköisyydellä Pariisin 1,5 asteen tavoitteessa, tulisi meriliikenteen päästöjen vähentyä lineaarisesti hiilineutraaliuteen vuoteen 2040 mennessä [18], [19].

3.1 IMO:n uusi nettonollakehys

Pariisin tavoitteisiin pääsemiseksi tarvitaan siis kunnianhimoisempi strategia päästöjen vähentämiseksi. IMO:n nettonollakehys (net-zero framework, NZF) on kattava sääntelyjärjestelmä, jonka tarkoituksena on mahdollistaa IMO:n 2023 päivittämän kasvihuonekaasujen vähentämisstrategian mukaisiin raameihin. Sen tavoitteena on saavuttaa hiilineutraalius noin vuoteen 2050 mennessä. Kehyksen luonnos hyväksyttiin huhtikuussa 2025, ja se edustaa ensimmäistä maailmanlaajuista järjestelmää, joka yhdistää pakolliset päästörajat ja kasvihuonepäästöhinnonnoittelun koko teollisuussektorille [20].

Nettonollakehys sisältyy MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI uuteen lukuun 5 [21]. Kehys koskee ≥ 5000 bruttotonnin aluksia, jotka harjoittavat kansainvälistä kauppaa ja vastaavat noin 85 % kansainvälisen merenkulun hiilidioksidipäästöistä [20]. Mikäli sen implementointi olisi vahvistettu MEPC:n ylimääräisessä istunnossa lokakuussa 2025, määräykset olisivat tulleet voimaan 1. maaliskuuta 2027 ja ensimmäinen noudattamiskausi olisi alkanut 1. tammikuuta 2028 [20], [22]. Saudi-Arabian esityksestä ja Yhdysvaltojen voimakkaan vastustuksen takia NZF:n virallista hyväksymistä lykätettiin vuodella. Uusi kokous kehyksen hyväksymiseksi pidetään lokakuussa 2026 ja mikäli se hyväksytään, tulee se voimaan maaliskuussa 2028 [23].

Keskeistä uudessa nettonollakehyksessä on ottaa käyttöön niin sanottu well-to-wake-lähestymistapa päästölaskentaan, joka kattaa meriliikenteen polttoaineiden koko elinkaaren hiilijalanjäljen tuotannosta palamiseen saakka. Menetelmä muuttaa sääntely-ympäristöä, sillä se estää näennäiset päästövähennykset, joilla siirrettäisiin päästöjä vain ylöspäin polttoaineketjussa. Strategia asettaa myös tavoitteet, joiden mukaan nolla- ja lähes nollapäästöisten teknologioiden, polttoaineiden ja/tai energianlähteiden tulisi kattaa vähintään 5 %, tavoitetasolla 10 % kansainvälisen meriliikenteen energiankulutuksesta vuoteen 2030 mennessä. Tavoite luo sääntelyperusteista kysyntävarmuutta vaihtoehtoisten polttoaineiden kehittämiseksi ja näin pyrkii vähentämään siirtymävaiheen epävarmuuksia.

Tavoite- vuosi	2018 GHG-strategia	2023 GHG-strategia
2030	Vähentää CO ₂ -päästöjä kuljetustyötä kohden vähintään 40 %	Vähentää CO ₂ -päästöjä kuljetustyötä kohden vähintään 40 % Vähentää vuotuisia kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 20 % (tavoitteena 30 %) Hiilineutraalia polttoaineita käytetään vähintään 5 % energiasta (tavoitteena 10 %)
2040		Vähentää vuotuisia kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 70 % (tavoitteena 80 %)
2050	Vähentää CO ₂ -päästöjä kuljetustyötä kohden vähintään 70 %. Vähentää vuotuisia kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 50 %	Saavuttaa hiilineutraalius viimeistään vuonna 2050
2100	Saavuttaa hiilineutraalius	

Taulukko 4: IMO:n kasvihuonepäästövähennysstrategioiden vertailu (vertailuvuosi on 2008) [4], [11]

GHG-vähennystrendiä ”vähintään” lukujen mukaan kutsutaan IMO minimi skenaarioksi (minimum scenario) ja ”tavoitteen” lukujen mukaan IMO tavoiteskenaarioksi (striving scenario).

3.1.1 Lyhyen aikavälin toimenpiteet

Keskeisenä osana vuoden 2023 GHG-strategian tavoitteisiin pääsemisessä on jo hyväksytyt ja voimassa olevat SEEMP, EEDI, EEXI ja CII. Näitä kutsutaan IMO:n lyhyen aikavälin GHG-toimenpiteiksi.

3.1.1.1 EEDI

Ensimmäinen globaali ja pakollinen meriliikenteen kasvihuonepäästöjä vähentävä järjestelmä on vuonna 2013 voimaan tullut energiatehokkuuden suunnitteluindeksi, EEDI (energy efficiency design index) ja laivojen energiatehokkuuden hallintasuunnitelma, SEEMP (ship energy efficiency management plan). Järjestelmää on myöhemmin laajennettu tuomalla EEDI:n rinnalle toinen teknisen suunnittelun standardi EEXI (energy efficiency existing ships index) ja suorituskyvyn seurantaan CII (carbon intensity indicator). Menetelminä ne ovat tavoitteisiin perustuvia ja teknologianeutraaleja.

SEEMP, joka luo rakenteen laivojen energiatehokkuuden operatiiviselle hallinnalle, on ollut pakollinen vuodesta 2013 MARPOL liitteen VI mukaisille aluksille, joiden bruttovetoisuus on vähintään 400 GT. Se tarjoaa systemaattisen plan-do-check-act -syklin energiatehokkuuden jatkuvaan parantamiseen. SEEMP koostuu kolmesta osasta:

- Osa 1 määrittää alukselle erityiset toimenpiteet energiatehokkuuden suunnittelua, toteutusta, seuranta ja itsearviointia varten.
- Osa 2 (tiedonkeruujärjestelmä, DCS) on ollut pakollinen $\geq 5\,000$ GT aluksille vuodesta 2018 alkaen (ensimmäinen raportointijakso 2019). Se edellyttää vuosittaista polttoaineenkulutuksen ilmoittamista IMO:n polttoöljytietokantaan, joka muodostaa perustan operatiivisten CII-luokkien laskennalle [24].
- Osa 3, joka otettiin käyttöön vuonna 2023 samanaikaisesti CII-sääntelyn kanssa edustaa kehityksen tuoreinta vaihetta. Tämä osa määrittää aluksen hiili-intensiteettisuunnitelman eli menetelmät aluksen saavutetun vuosittaisen operatiivisen CII:n laskemiseksi, raportointimenetelyt hallintoviranomaisille sekä vaaditut kolmen seuraavan vuoden vuosittaiset CII-tavoitteet. Olennaista on, että korjaavia toimenpiteitä edellytetään aluksilta, joiden luokitus kolmena peräkkäisenä vuotena on D tai minä tahansa vuotena E [24].

Energiatehokkuuden suunnitteluindeksi (EEDI), joka on ollut pakollinen uusille aluksille vuodesta 2013 (aluksi rajatulle alustyyppistölle, laajennettiin myöhemmin koskemaan lähes kaikkia ≥ 400 GT aluksia), määrittää aluksen tyyppin ja koon perusteella vähimmäisenergiatehokkuuden tason. Indeksillä mitataan suunnittelun tehokkuutta ilmaisemalla hiilidioksidipäästöt (ei GHG-päästöjä) grammoina kuljetuskapasiteettia ja matkaa kohden (esim. tonni-merimailia kohti). Vaatimukset kiristyvät asteittain.

EEDI-laskentakaava määrittää pää- ja apumoottoreiden hiilidioksidipäästöjen suhteen aluksen hyödykkeiden kuljetuskykyyn sen suunnittelunopeudella. Jotta alus olisi vaatimusten mukainen, sen tulee saavuttaa EEDI-arvo mikä on vaaditun mukainen. Vaadittu arvo määritellään soveltamalla vähennyskertoimia vertailukäyrään, joka on laadittu tilastollisesti vuosien 1999-2009 rakennettujen alusten perusteella [25].

Päästövähennyspolku etenee neljässä (viidessä) vaiheessa:

- Vaihe 0 (2013–2015): ei vähennystä (0 %) useimmille alustyypeille
- Vaihe 1 (2015–2020): 10 % vähennys.
- Vaihe 2 (2020–2025): 20 % vähennys.
- Vaihe 3 (vuodesta 2022 tai 2025 eteenpäin, riippuen alustyyppistä): yleisesti 30 % vähennys verrattuna vertailutasoon. [26] Konttialuksille vähennys on 30–50 % riippuen aluksen kuolleesta painosta (DWT \geq 200 000 = 50 %, DWT \geq 120 000 = 45 %, DWT \geq 80 000 = 40 %, DWT \geq 40 000 = 35 %, DWT \geq 15 000 = 30 %, DWT 10 000 – 15 000 = 15–30 % lineaarisesti kasvaen) [27].
- Vaihe 4 määrittämisestä on keskusteltu MEPC 79:ssa (joulukuussa 2022), mutta keskustelun jatkamista päädyttiin siirtämään tulevaisuuteen.

Yksityiskohtaisemmat taulukot EEDI-vaatimuksista eri vaiheissa ja eri aluksille löytyvät liitteinä 1 ja 2.

Yleisesti vaiheen 0 ja 1 vaatimukset voidaan yleisesti saavuttaa rungon ja potkurien suunnittelun optimoinnilla sekä päämoottorin hyötysuhteen tehostamisen avulla vain vähäisin lisäkustannuksin. Konkreettisina ratkaisuinä nämä tarkoittavat esimerkiksi rungon muodon optimointia, uusien rungon puhtaana pitävien pinnoitteiden käyttöä, potkuri-runko-peräsin – vuorovaikutuksen optimointia sekä moottorin tehon rajoittamista ja pitkäikäisten hitaasti pyörivien moottorien suosimista [27], [28].

Vaiheiden 2 ja 3 vaatimustenmukaisuuden saavuttaminen edellyttää yleensä merkittävämpiä toimenpiteitä. Hukkalämmön talteenottojärjestelmät, vaihtoehtoiset polttoaineet (erityisesti LNG), hybridipropulsioratkaisut ja suunnittelunopeuden alentaminen ovat keskiössä näiden tiukempien vaatimusten täyttämässä. Matemaattisesti varma tapa saavuttaa EEDI-vaatimustenmukaisuus on alentaa suunnittelunopeutta, koska EEDI-luku laskentakaavansa takia riippuu voimakkaasti laivan propulsioon vaadittavasta tehosta. Suhde tehon ja nopeuden välillä on kuutiollinen [27]. EEDI-vaatimukset ovat johtaneet energiatehokkaampien laivojen suunnitteluun, mutta huolia on esitetty mahdollisista turvallisuusheikennyksistä ankarissa sääolosuhteissa. Tämä on johtanut lisäohjeiden luomiseen pienimmästä tarvittavasta moottoritehosta ohjailukykyyn säilyttämiseksi sääolosuhteista riippumatta.

3.1.1.2 EEXI

Energiatehokkuusindeksi olemassa olevilla aluksille (EEXI) on vuonna 2023 voimaan tullut asetus laajentaa energiatehokkuusvaatimukset koskemaan olemassa olevia, ≥ 400 GT kokoisia aluksia. Asetus korjaa merkittävän alkuperäisessä EEDI-kehyksessä olleen aukon. EEDI:n koskiessa ainoastaan uusia laivoja, se ei aseta pakollisia teknillisiä tehokkuusstandardeja olemassa oleviin aluksiin. EEXI perustuu laskentamenetelmään, joka on lähes yhdenmukainen EEDI:n kanssa. Siihen on kuitenkin tehty muutoksia huomioimaan laivan jälkivarusteluun liittyvien haasteiden ja alkuperäisten suunnittelutietojen rajoitetun saatavuuden huomioimiseksi. Vaadittu EEXI-arvo määritetään samoin kuin EEDI, mutta vähennyskertoimet on sovittu vastaamaan vuoden 2022 tasoja (vaihe 2 tai 3 riippuen alustyypistä) [29].

Poiketen EEDI:stä, joka tarkastetaan aluksen rakentamisen yhteydessä, EEXI edellyttää kertaluonteista hyväksymistodistusta ensimmäisen International Air Pollution Prevention (IAPP) -sertifikaatin vuosi-, väli- tai uusintatarkastuksen yhteydessä 1. tammikuuta 2023 jälkeen [30]. Tämä sertifiointi johtaa päivitettyyn International Energy Efficiency (IEE) -todistukseen, jota on ylläpidettävä aluksen käyttöänsä ajan.

EEXI-vaatimusten täyttymistä olemassa olevissa tankkereissa tarkasteleva tutkimus osoittaa merkittäviä haasteita, erityisesti vanhemmissa ja pienemmissä aluksissa. Vasilev ym. (2025) tekemästä tutkimuksesta käy ilmi, että vain 14,8 % tankkereista täytti EEXI-vaatimukset ilman muutoksia. Pienemmät laivat joutuivat käyttämään suhteellisesti suurempien tehorajoituksia. Tutkimus osoittaa myös, että tarkasteltava laivasto operoi keskimäärin noin 60 %:lla käytettävissä olevasta moottoritehosta ja 8 % suunnittelunopeutta hitaammin, mikä viittaa siihen, että operatiiviset käytännöt olivat jo mukautuneet hitaampaan kulkuun taloudellisten paineiden seurauksena. [31]

Pääasiallinen vaatimustenmukaistamiskeino aluksille, jotka eivät saavuta vaadittua EEXI-tasoa rakenteellisesti on rajoittaa niiden tehoa (joko suoraan moottorin tai potkuriakselin välittämää tehoa). Tämä muodostaa institutionaalisen perustan hitaalle kululle (slow streaming), joka yleistyi matalien rahtihintojen ja korkeiden polttoainehintojen aikaan. Ennen EEDI aikaa rakennetut vanhat alukset, joita rajoitetaan hitaammille nopeuksille kärsivät kuitenkin tehokkuustappioista verrattuna jo suunnitteluvaiheessa hitaammille nopeuksille optimoituihin laivoihin.

3.1.1.3 CII

Samaan aikaan EEXI:n kanssa voimaan astui hiili-intensiteetti-indikaattori, CII. Se luo vuosittaisen operatiivisen energiatehokkuusluokitusjärjestelmän $\geq 5 000$ GT aluksille. Toisin kuin kertaluonteisiin suunnitteluperusteisiin EEDI- ja EEXI-sertifiointeihin perustuvat järjestelmät, CII luo

dynaamisen jatkuvasti päivittyvän arviointimekanismin. Se mittaa aluksen toteutunutta suorituskykyä hiilidioksidipäästöinä kuljetustyötä kohti kalenterivuoden ajalta.

CII käyttää useimmille alustyypeille ensisijaisena mittarina vuosittaista tehokkuussuhdetta (annual efficiency ratio, AER), joka lasketaan jakamalla aluksen vuoden CO₂-päästöt sen kantavuudella ja kuljetetulla etäisyydellä (gCO₂/dwt*nm). Toinen vaihtoehtoinen mittari on cgDIST, jolloin laivan kantavuuden sijaan laskussa käytetään bruttovetoisuutta. Tätä tapaa käytetään yleisesti matkustajalaivoissa. Muita vaihtoehtoisia kokeellisia mittaustapoja on EEPI, cbDIST, clDIST ja EEOI, mutta niiden perusteella ei ole velvoitetta antaa virallista luokitusta [32].

CII-järjestelmä jakaa alukset luokkiin A-E vertaamalla niiden vuosittaista toteutunutta CII-arvoa vaadittuun tasoon. Luokkarajojen määrittämisessä käytetään funktiota, jonka vuosittainen vähennyskerroin (Z) on määritetty vuoteen 2030 asti. MEPC 83 -kokouksessa huhtikuussa 2025 asetetut vähennyskertoimet vuosille 2027–2030 ovat 13,625 %, 16,250 %, 18,875 %, 21,500 %. Korjaavia toimenpiteitä edellytetään aluksilta, joiden luokitus kolmena peräkkäisenä vuotena on D tai minä tahansa vuotena E [24].

CII:stä on esitetty kritiikkiä sen luomasta paineesta matkanopeuksien hidastamisen ja täsmällisyys- ja liikennöintiä vaatimusten välillä. Lisäksi vaikka EEXI ja CII mittaavat molemmat liikennöinnin taloudellisuutta, niiden laskentatavan eroavaisuuden vuoksi saattaa esiintyä merkittävää eroa nopeusrajoitusvaatimuksissa.

3.1.2 Keskipitkän aikavälin toimenpiteet

IMO:n nettonollakehys (jonka virallista voimaantumisen hyväksymistä on nyt lykätty vuoteen 2026) muodostuu kahdesta pääelementistä: tavoitteisiin perustavasta polttoainestandardista (Global Fuel Standard, GFS), joka säätelee polttoaineiden kasvihuonekaasuintensiteetin vaiheittaista alenemista, sekä päästöhinnointimekanismista. Näitä toimenpiteitä kutsutaan IMO:n keskipitkän aikavälin GHG-toimenpiteiksi. Päästöhinnointimekanismin on sidottu net-zero fund (NZF), jonka avulla hallitaan päästöhinnointelusta syntyneitä tuottoja ja tuetaan hiilineutraalien polttoaineiden ja teknologioiden kehittämistä sekä kehittyviä ja pieniä saarivaltioita siirtymisessä matalahiiliseen meriliikenteeseen [20].

3.1.2.1 GFS-polttoainestandardi

GFS (Global Fuel Standard) on tavoitepohjainen standardi, joka edellyttää vaiheittaista vähennystä $\geq 5\ 000$ GT alusten kuluttaman polttoaineen *well-to-wake* (WtW) kasvihuonepäästöintensiteetissä (eli Greenhouse Gas Fuel Intensity, GFI). Se rakentuu Data Collection System (DCS) -järjestelmän päälle, joka on osa SEEMP osan 2 vaatimuksia. GFS asettaa

suorituskykytavoitteita, jotka mitataan hiilidioksidiekvivalentteina grammaa aluksella käytettyä energiayksikköä kohti (gCO₂e/MJ), mukaan lasketaan siis esimerkiksi maa- ja aurinkosähkö sekä akuista käytetty sähköenergia. Tämä tarjoaa varustamoille toiminnanvapautta käytettyjen teknologioiden ja polttoaineiden suhteen.

Standardin WtW-laskentamenetelmä kattaa sekä polttoaineen tuotanto-, jalostus- ja kuljetusvaiheista aiheutuvat ylävirran päästöt (well to tank, WtT) että itse aluksella tapahtuvan polton päästöt (tank to wake, TtW). Elinkaari-perusteinen lähestymistapa ehkäisee toimintaa, jossa rajoituksia pyrittäisiin kiertämään siirtämällä päästöjä polttoaineketjun eri vaiheeseen.

GFS asettaa kaksitasoiset vähennysurat 93,3 gCO₂/MJ lähtötasosta, joka vastaa vuoden 2008 globaalin laivaston polttoaineiden keski-intensiteettiä [33].

- Perustaso (tier 2): määrittää vähimmäisvähennyksen, jotka kaikkien alusten on saavutettava. Edellytyksenä on 4 % vähennys vuoteen 2028, 8 % vuoteen 2030, 30 % vuoteen 2035 ja 65 % vuoteen 2040 mennessä.
- Suora vaatimustenmukaisuustaso (tier 1): asettaa tiukemmat vähennysvaatimukset. Edellytyksenä on 17 % vähennys vuoteen 2028, 21 % vuoteen 2030 ja 43 % vuoteen 2035 mennessä. Vuoden 2035 jälkeiset tavoitteet määritellään myöhemmin perustuen teknologisiin valmiuksiin ja markkinatilanteeseen.

International Council on Clean Transportation (ICCT) mallituksen mukaan IMO:n vähimmäispäästövähennystavoitteiden saavuttaminen edellyttää suoran vaatimustenmukaisuustason edellyttämää trendiä [34], [35]. Noin 90 % vuosien 2020–2050 kokonaispäästövähennyksistä olisi saavutettava korvaamalla fossiiliset polttoaineet hiilineutraaleilla vaihtoehdoilla. Käytön tehokkuusparannukset voivat tuoda vain noin 10 % vaadituista vähennyksistä, mikä korostaa polttoainemuutosprosessin keskeistä merkitystä hiilineutraaliuden saavuttamisessa [34]. Kuitenkin vaikka hyväksytyt GFI:n vähennysurat ovat tavoitteina kunnianhimoisia, ne eivät välttämättä riitä 1,5 °C lämpenemisrajassa pysymiseksi. ICCT:n analyysin mukaan nykyisellä trendillä meriliikenne käyttää oman 1,5 °C rajaan vaadittavan hiilibudjetin loppuun vuoteen 2030 mennessä, 1,7 °C budjetin 2037 ja 2 °C budjetin vuoteen 2047 mennessä. IMO:n keskipitkän aikavälin GHG-toimenpiteillä yhdistettynä minimi- tai tavoiteskenaarioon voisi saavuttaa kumulatiiviset päästöt, jotka vastaisivat lämpenemisen rajoittamista 1,7 °C [34]. 1,5 °C rajan saavuttaminen vaatisi siis lisätoimenpiteitä.

3.1.2.2 Nolla- ja lähes nollapäästöisten polttoaineiden raja-arvot

NZF-kehys määrittelee elinkaaripäästöihin perustuvat raja-arvot, jotka määrittelevät hyväksyttävät nolla- ja lähes nolla (ZNZ) kasvihuonekaasupäästöt polttoaineet, teknologiat ja energialähteet.

- Alkuvaiheen raja (2028–2034): enintään 19,0 gCO₂e/MJ
- Tiukennettu raja (2035 alkaen): enintään 14,0 gCO₂e/MJ

Molemmat rajat mitataan well-to-wake-perusteisesti. Mukana on siis suorat päästöt (esim. CO₂, CH₄, N₂O) ja ylävirran päästöt (tuottaminen, kuljetus ym.)

Raja-arvot määrittävät tukikelpoisuuden NZF-rahaston taloudellisille kannustimille ja luovat selkeän markkinasignaalin varustamoille, polttoainekehittäjille ja sijoittajille pitkän aikavälin sääntelyodotuksista. Ajoitus on kriittinen, koska selkeää kysyntäsignaalia tarvitaan pian mikäli asetetuissa päästötavoitteissa pysyttäisiin [36]. Järjestelmän kiristynyt mekanismi kannustaa myös innovaatioon ja ehkäisee siirtymävaiheen polttoaineisiin lukitautumista.

ZNZ-rajat tukevat uusiutuvaan vetyyn perustuvia sähköpolttoaineita (e-fuel), kuten e-metanoli ja e-ammoniakki, ja sulkevat pois fossiiliset polttoaineet. Myös nesteytetty maakaasu (LNG), jonka GFI on tyypillisesti 75–105 gCO₂e/MJ, ylittää vaatimusrajat [36].

3.1.2.3 Päästöhinnoittelumekanismi

GFI-maksu toimii taloudellisena ohjauskeinona, joka yhdistää hiiliveron ja suoritusperusteisen palkio- ja sanktiojärjestelmän (feebate) piirteitä. Alukset, jotka ylittävät vuotuiset GFI-tavoitteet, joutuvat hyvittämään ylityksen ostamalla korjausyksiköitä (remedial units, RU), joiden hinta määräytyy tavoitepoikkeaman suuruuden mukaan.

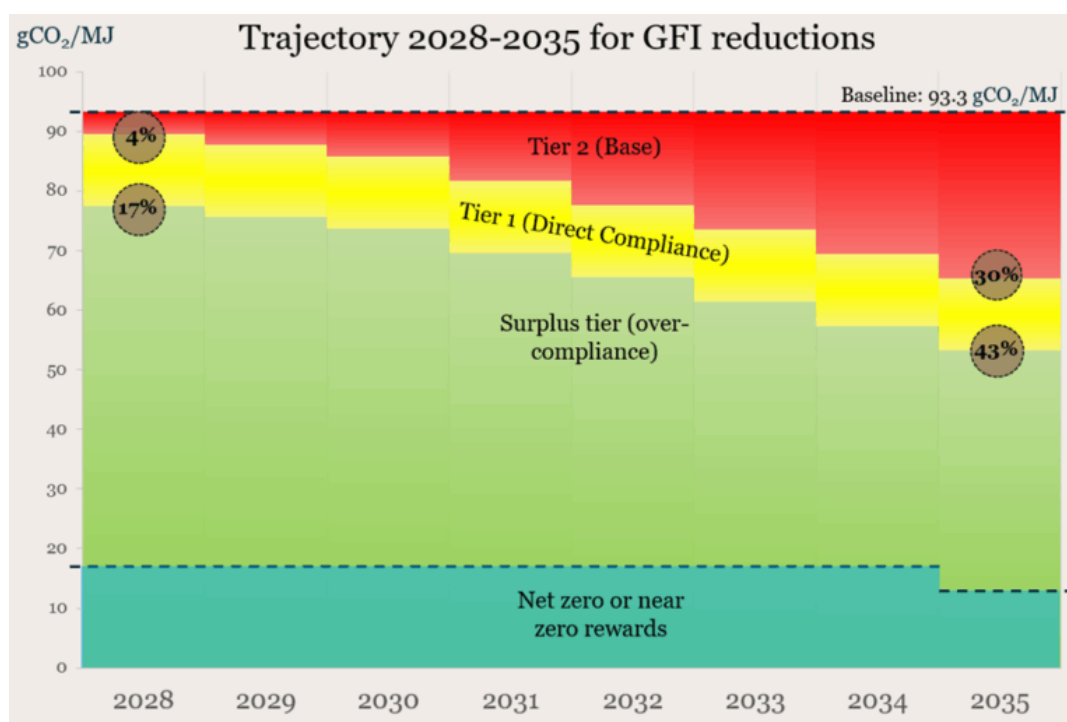
- Taso 2 (RU₂): Hinta on 380 USD tonnilta CO₂e joudutaan maksamaan laivan GFI-arvon ja perustason välisestä erotuksesta. Asetettu hintataso on lähellä eroa matalahiilisten ja perinteisten polttoaineiden välillä. Tällä pyritään insentivoimaan polttoaineen vaihtoa [37].
- Taso 1 (RU₁): Hinta 100 USD tonnilta CO₂e joudutaan maksamaan perustason ja suoran vaatimustenmukaisuustason välisestä erotuksesta. Hinta on asetettu tasolle, joka on alle vähähiilisempään polttoaineeseen siirtymisen hintaa, ja näin pyritään takaamaan tulot NZF:lle [37].

Mikäli aluksen GFI on siis yli perustason, joutuu se ostamaan RU₂:sta perustason ylityksen verran, jonka lisäksi vielä RU₁ perustason ja suoran tavoitteenmukaisuustason erotuksen verran. Vastaavasti jos aluksen GFI sijoittuu perustason ja suoran tavoitteenmukaisuustason väliin, joutuu se ostamaan

ainoastaan RU1:stä toteutuneen GFI:n ja suoran tavoitteenmukaisuustason erotuksen verran. Kaksitasoinen järjestelmä helpottaa transitiota aikana, jolloin ZNZ-polttoaineiden saatavuus on maantieteellisesti rajoittunutta. Nykyiset RU:n hintatason on määritelty vuosille 2028-2030, jonka jälkeen MEPC tulee luomaan mekanismin millä hintoja päivitetään vuodesta 2031 eteenpäin [37].

Alukset, joiden GFI alittaa suoran tavoitteenmukaisuustason puolestaan ansaitsevat yhden ylijäämäyksikön (surplus units, SU) per alitettu tonni CO_{2e} ja joita voidaan hyödyntää kolmella tavalla:

- Siirtää (myydä) vaatimustenmukaisuuden alittaville aluksille, jotka voivat olla joko saman varustamon laivoja tai toisen yhtiö omistuksessa. Ylijäämäyksiköitä voi kuitenkin siirtää vain kerran spekulointia ja liika kaupankäynnin estämiseksi. Lisäksi SU-yksiköitä voi käyttää ainoastaan RU2 korvaamiseen, jolloin taataan tulovirta NZF-rahastoon.
- Säilöä enimmillään kahden vuoden ajaksi operoinnin ja vähähiilisen polttoaineen saatavuuden vaihtelun hallitsemiseksi. Mikäli SU:ta ei käytetä kahden vuoden aikana, ne mitätöidään.
- Vapaaehtoinen mitätöinti, jolla varustamot voivat osoittaa vihreitä arvojaan



Kuvaaja 3: Päästöhinnonmekanismin feebate-järjestelmän toiminta [38].

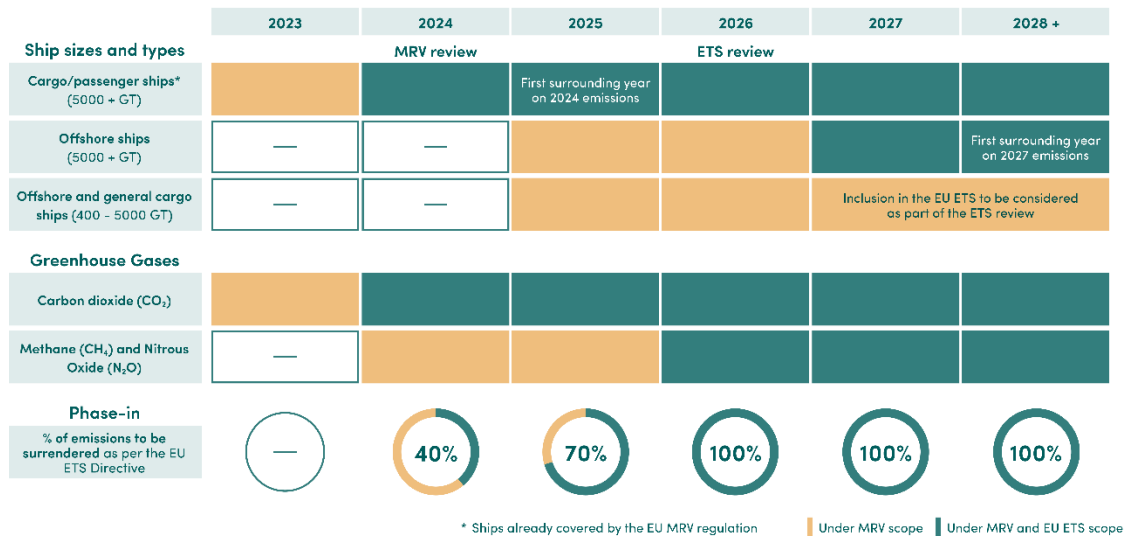
3.2 EU:n säädökset

Tutkielma fokus on kansainvälisessä regulaatiossa. Koska kuitenkin EU:n päästökauppajärjestelmän ja kansainvälisessä meriliikenteen sääntelyssä on toisiaan sivuavia elementtejä, käsitellään eurooppalaista regulaatiota ja sen eroavaisuuksia IMO:iin lyhyesti. Työn kannalta EU-sääntelystä keskeisimmät ovat EU ETS- ja FuelEU Maritime -järjestelmät. Näitä täydentää EU:n MRV-valvontajärjestelmä (Monitoring, Reporting and Verification), joka vastaa toiminnaltaan IMO:n DCS-järjestelmää. MRV-järjestelmä on koskenut vähintään 5 000 GT:n matkustaja- ja rahtialuksia, mutta 1.1.2025 alkaen vaatimukset laajenivat koskemaan myös vähintään 400 GT:n offshore-tukija rahtialuksia [39].

3.2.1 EU ETS

EU:n päästökauppajärjestelmä (emission trading system, ETS) on ollut toiminnassa meriliikenteelle porrastetusti vuodesta 2024, sen vaiheittainen laajeneminen on esitetty tarkemmin alla olevassa taulukossa. Toisin kuin polttoaineiden laatuvaatimukseen perustuvat säädökset, jotka rajoittavat päästöintensiteettiä, ETS edellyttää varustamoilta Euroopan unionin päästöoikeuksien (EUA) ostamista ja luovuttamista jokaista järjestelmän piiriin kuuluvaa CO₂-tonnia kohden. Päästöjä lasketaan tank-to-well-periaatteella ja vain CO₂-päästöt huomioidaan (2026 alkaen CH₄ ja N₂O sisältyy) [40]. Maantieteellisesti järjestelmä kattaa kaikki EU/ETA-alueen sisäiset matkat ja 50 % EU:n ja kolmansien maiden välillä [40]. EU ETS luo siis hiilimarkkinan, jossa päästöoikeuksien hinnat vaihtelevat kysynnän ja tarjonnan mukaan. Varustamot voivat käydä päästöoikeuksilla kauppaa, mikä tuo joustavuutta mutta myös altistavat suurille hintavaihteluille ja haastavalle ennakoitavuudelle. Vaatimusten kiristyessä päästöoikeuksien hinta tulee todennäköisesti kasvamaan merkittävästi. Varustamot mitkä eivät täytä vaatimuksia ostamalla ja luovuttamalla vaaditun määrän päästöoikeuksia, saavat rangaistuksia ja kerryttävät päästöoikeusvelkaa.

EU ETS Extension to Maritime Transport Introduction Timeline



Taulukko 5: EU ETS käyttöönotto meriliikenteessä [39].

3.2.2 FuelEU Maritime

FuelEU Maritime on osa Euroopan komission Fit for 55 -lainsäädäntöpaketia, jonka tavoitteena on saavuttaa EU:n hiilineutraalius vuoteen 2050 mennessä. Sen ensisijainen tavoite on lisätä uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden osuutta kansainvälisen meriliikenteen polttoainevalikoimassa IMO:n järjestelmän tapaan. FuelEU:ta sovelletaan vuoden 2025 alusta alkaen kaikkiin aluksiin joiden bruttovetoisuus on yli 5000 t niiden EU lainkäyttövaltaan kuuluvassa satamassa oleskelun ajan, matkoilla EU-satamasta toiseen ja 50 % matkoilla, jotka lähtevät EU-satamasta tai saapuvat sinne kolmannelta maasta [41]. Asetus on teknologianeutraali, mutta se sulkee pois ruoka- ja rehukasveihin perustuvien polttoaineiden tukemisen maankäytön lisäpaineen vähentämiseksi.

FuelEU rakentuu kahden velvoitteen ympärille, joista ensimmäinen asettaa GFI-rajan, jota aluksen vuotuinen keskiarvo ei saa ylittää. Arvo lasketaan well-to-wake-periaatteella ja raja vaatimustenmukaisuuden raja kiristyy viiden vuoden välein vuodesta 2025 vuoteen 2050 [41]. Ensimmäisellä viiden vuoden jaksolla vähennystavoite on 2 % vuoden 2020 tasoon verrattuna ja kiristyy progressiivisesti niin, että vuonna 2050 vähennystavoite on jo 80 % [42]. Toisena on maasähkön tai nollapäästöteknologian käyttövelvoite EU-satamissa vuodesta 2030 alkaen. Mikäli alus ei pääse tavoitteisiin, tulee sen maksaa jokaisen satamakäynnin yhteydessä sakko, mikä lasketaan asetuksessa annetun kaavan mukaan. Sakkomaksuista kertynyttä varallisuutta käytetään NZF-rahaston tapaan uusiutuvien ja vähähiilisten polttoaineiden käyttöönoton tukemiseen [41]. Äärimmäisessä tapauksessa, jos varustamo ei esitä pätevää FuelEU vaatimustenmukaisuustodistusta kahtena tai

useampana peräkkäisenä raportointikautena, voidaan alukselta evätä pääsy kaikkiin EU-satamiin [41].

3.2.3 Eroavaisuudet IMO:n ja EU:n säädöksissä

Vaikka IMO:n päästöhinnoittelumekanismissa on yhtäläisyyksiä EU ETS:n kanssa, eroaa se rakenteellisesti merkittävästi. Toisin kuin perinteisessä päästökauppajärjestelmässä (ETS), jossa kokonaiskiintiö on rajoitettu, IMO:n järjestelmässä SU-yksiköiden luonti on rajatonta. Mikä tahansa alus, joka ylittää suoran vaatimustenmukaisuustavoitteen, tuottaa uusia SU-yksiköitä. Järjestelmä kuitenkin säilyttää perustason tavoitteet, koska kaikki alitukset pitää korvata SU- tai RU-yksiköillä. Eroja on lisäksi EU ETS-alaluvussa ilmi tulleet maantieteelliset erot ja erot päästöjen määritelmässä (TtW vs. WtW, GFI vs. absoluuttinen CO₂-päästö) sekä rajoitukset kaupankäynnissä (SU-yksiköllä voi tehdä kaupan vain kerran).

FuelEU Maritime ja IMO:n järjestelmä ovat toimintaperiaatteiltaan lähellä toisiaan, yhteisiä elementtejä ovat mm. päästömääritelmät (TtW, GFI). Suurin ero maantieteellisen rajoittuvuuden lisäksi on kuitenkin päästöyksiköiden kaupattavuudessa jälkimarkkinoilla. FuelEU:ssa yli- ja alijäämäyksiköitä voidaan vaihtaa keskenään ennalta määrättyssä joukossa laivoja (pooling). Joukon määrittämiseen ja vaatimukseen sen sisällä liittyy lukuisia sääntöjä (mm. joukon yksiköiden summan tulee olla positiivinen ja sääntöjä, miten yksiköitä saa vaihtaa joukon jäsenten välillä) eikä alus saa olla useamassa joukossa samanaikaisesti. Lisäksi ylijäämäyksiköitä voi myös lainata tulevalta vuodelta, mikä monimutkaistaa järjestelmää. IMO:n SU-yksikköjärjestelmä tarjoaa hallittavamman ja joustavamman tavan käydä kauppaa, koska niiden siirto ei edellytä vaatimustenmukaisuusjoukkojen (em. joukko) muodostamista ja kauppaa voi käydä siten vapaammin eri tahojen välillä.

3.2.4 Päällekkäisyydet IMO:n ja EU:n säädöksissä

Mikäli IMO:n NZF hyväksytään ja FuelEU pysyy voimassa, kaikki $\geq 5\ 000$ GT alukset, jotka pysähtyvät EU:n satamissa, joutuvat sääntelyn kohteeksi kahdesti. Tämä aiheuttaa riskin päästöjen kaksinkertaisesta laskennasta. FuelEU-asetukseen on kuitenkin sisäänrakennettu mahdollinen itsetuhomekanismi kaksoissääntelyn varalta. Asetuksen johdanto-osan kappale 69 ja artikla 30 säätelevät, että IMO:n globaali lähestymistapa GHG-intensiteetin rajoittamiseksi olisi toivottavampi ja tehokkaampi sen laajemman soveltamisalan vuoksi. Asetuksen mukaan komission tulee viipymättä tarkastella asetusta ja IMO:n toimea, mikäli IMO hyväksyy maailmanlaajuisen polttoainestandardin tai maailmanlaajuiset kasvihuonekaasuintensiteettirajat aluksilla käytettävälle energialle [43]. Komission tulee tarkastella asetuksen ja maailmanlaajuisen toimenpiteen mahdolliseen nivoutumiseen tai

yhdenmukaistamiseen liittyviä kysymyksiä ja mahdollisesti antaa asiasta lainsäädäntöehdotus [43].

Euroopassa toimivilla aluksilla on siis tulevaisuudessa riski joutua kolmen eri vaatimustenmukaisuusjärjestelmän piiriin. Samankaltaisten FuelEU- ja IMO:n GFI-järjestelmien lisäksi päästömaksuja edellytetään EU ETS -järjestelmän kautta. EU:n järjestelmien välisessä vertailussa on arvioitu, että ETS aiheuttaa valtaosan kustannusrasitteesta vuoteen 2030–2035 saakka, minkä jälkeen FuelEU:n kiristyvät GFI-tavoitteet ohittavat päästökauppajärjestelmän vaikutukseltaan.

4 Regulaation vaikutukset ja toteutumisen ongelmat

Tuleva sääntely-ympäristö tulee olemaan kunnianhimoinen ja haastava. IMO:n ja EU:n laajentuva ja monimutkaistuva regulaatio johtaa käytännön haasteisiin, joita käsitellään tässä luvussa lyhyesti. Tarkastelu tehdään kolmesta näkökulmasta: implementoinnin haasteet, teknologisen siirtymän riskit ja oikeudenmukaisuus. Lopuksi tarkastellaan vielä työssä esiteltyjen regulaatiomuutosten riittävyttä ja yhteensopivuutta ilmaston lämpenemisen rajoittamistavoitteiden kanssa

4.1 Implementoinnin haasteet

Regulaation monimutkaisuus kasvaa jatkuvasti. IMO:n MARPOL-liitteen VI neljä mittausstandardia (EEDI, EEXI, CII, GFI), joilla kaikilla on omat laskentamenetelmät ja tavoitevuodet, luovat fragmentoituneen regulaatioympäristön. Lisäksi kuten edellisessä luvussa käsiteltiin, FuelEU Maritime ja EU ETS toimivat päällekkäin samoilla aluksilla, joita IMO:n regulaatio tulee tulevaisuudessa koskemaan luoden riskin päästöjen kaksinkertaiselle laskennalle.

Säädösten muutokset tapahtuvat nopeasti, MARPOL-liitteen VI päivitykset ja niiden voimaantulopäivät vaativat jatkuvaa seurantaa ja saumatonta organisaation sisäistä viestintää. Varustamoiden sopeutumiseen käytettävissä oleva aika on usein riittämätön, erityisesti jo valmistuneiden ja operatiivisessa käytössä olevan laivaston osalta. EEXI-vaatimukseen sopeutuminen on edellyttänyt monilta olemassa olevilta aluksilta nopeita muutoksia ja tehorajoituksia, jotka heikentävät operatiivista joustavuutta. Pienten varustamoiden resurssit ovat rajallisemmat eikä isoihin toimijoihin verrattavia mitatakaavaetuja ole, mikä vaikeuttaa nopeasti muuttuvan regulaation vaatimustenmukaisuudessa pysymistä.

Ylimääräinen lokakuun MEPC:n kokous IMO NZF:n implementoinnin hyväksymisellä piti olla muodollisuus ja läpimeno varmaa. Yhdysvallat Trumpin johdolla sai kuitenkin kaadettua NZF:n läpimenon, Financial Timesin mukaan, uhkaamalla maita lisätulleilla ja tekemällä henkilökohtaisia uhkauksia muiden maiden neuvottelijoita kohtaan [44]. Vaikka nettonollakehyksen käyttöönoton hyväksymistä nyt virallisesti siirrettiin vuodelle, nähdään sen läpimeno epätodennäköisenä nykyisen Yhdysvaltojen hallinnon aikana.

Poliittinen epävakauden luoma epävarmuus NZF:n implementoinnille asettaa alan toimijat vaikeaan tilanteeseen tulevaisuuden strategioiden ja investointien suunnittelussa. Laivan elinkaari on pitkä, joten väärän regulaatioympäristöoletuksen pohjalta tehdyt päätökset voivat koitua varustamoille kalliiksi.

4.2 Teknologisen siirtymän riskit

Meriliikenteen siirtymisen onnistuminen kohti vähähiilisempää tulevaisuutta riippuu oleellisesti vaihtoehtoisten polttoaineiden ja teknologioiden markkinakehityksestä, saatavuudesta sekä globaalista tuotantoinfrastruktuurista. Vaikka ZNZ-polttoaineiden raja-arvot luovat sääntelylle perustuvaa kysyntää, liittyy niiden laajaan adaptointiin paljon haasteita. Vaihtoehtoiset polttoaineet, kuten ammoniakki, e-metanoli ja vety, ovat vielä varhaisessa kehitysvaiheessa ja niiden tuotantoon ja jakeluun tarvitaan merkittäviä investointeja.

Kuten poliittisten päätösten luoma epävarmuus, luo myös teknologisen evoluution suunta epävarmuutta ja riskejä varustamoiden investoinneissa. Väärään propulsio- tai polttoainetekniikkaan lukittautuminen voi koitua kohtaloksi. Esimerkiksi LNG:n WtW-päästöt ovat 71–105 gCO₂/MJ [33]. Vaihteluvälin ylärajaa käyttäen GFI on jopa 20 % suurempi, kuin perinteisillä polttoaineilla (HFO, LFO, MGO) ja ylittää selvästi IMO:n ZNZ-rajan (19 gCO₂/MJ ja myöhemmin 14 gCO₂/MJ) [36]. Juridisen lisähaasteen strategiseen suunnitteluun lisää EU ETS:n mahdollisin siirtyminen TtW-laskennasta WtW-laskentaan. Koska LNG:n WtT-osuus on perinteisiä polttoaineita suurempi, muutoksen myötä LNG:n GFI-arvo voi muuttua aiemmin perinteisiä polttoaineita paremmasta tasosta niitä heikommaksi.

Vaihtoehtoisten sähköpolttoaineiden kustannustehokkaan ja laajamittaisen tuotannon keskeisin edellytys on hiilineutraalin sähköntuotantokapasiteetin kasvattaminen, mikä mahdollistaa vihreän vedyn tuotannon skaalaimisen ja luo pohjan muille e-polttoaineiden valmistusta tukeville infrastruktuuri-investoinneille.

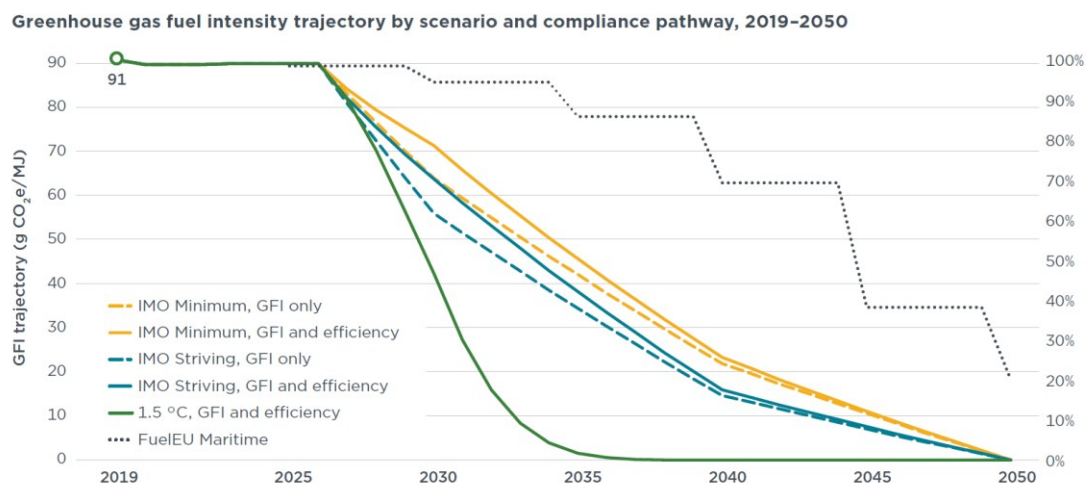
4.3 Oikeudenmukaisuus

Uuden nettonollakehyksen (NZF) mukanaan tuomat muutokset ovat herättäneet huolta myös oikeudenmukaisuuden toteutumisesta. Pienten varustamoiden kilpailukyvyn lisäksi erityistä huomiota on herättänyt vähiten kehittyneiden maiden (LDC) ja pienten saarivaltioiden (SIDS) asema muuttuvassa sääntely-ympäristössä. Nämä maat ovat vahvasti riippuvaisia merikapasta, mutta niiden vaikutusvalta omaa laivastoaan koskevissa päätöksissä on rajallinen, sillä suurinta osaa aluksista operoivat ulkomaiset varustamot. NZF:n tavoitteisiin pääseminen edellyttää mittavia investointeja, jotka ulkomaiset toimijat suuntaavat todennäköisesti taloudellisesti kannattavimmille reiteille. Tämän seurauksena LDC- ja SIDS-maiden käyttöön saattaa jäädä teknologisesti vanhentunut kalusto, mikä pidentäisi kuljetusaikoja ja nostaisi rahtikustannuksia. Vaikka NZF-rahaston tukimekanismi on suunniteltu

tukemaan näitä haavoittuvimpia maita, sen aikaansaama konkreettinen vaikutus jää vielä epävarmaksi.

4.4 Regulaatiomuutosten riittävyys

IMO:n absoluuttisten päästövähennystavoitteiden saavuttaminen tulee olemaan haastavaa. Niihin pääsemiseksi tarvitaan tiukkoja GFS-vaatimuksia ja taloudellisia ohjauskeinoja, jotka varmistavat tehokkaan hiilen hinnoittelun ja mahdollistavat taloudellisesti kannattavat investoinnit polttoaineisiin ja infrastruktuuriin, jotka tukevat merenkulun energiasiirtymää. Toteutessaan IMO:n päästövähennystavoitteet eivät kuitenkaan riitä Pariisin sopimuksen mukaiseen lämpenemisen rajaamiseen 1,5 °C:seen. Tällöin GFI:n olisi alennuttava yli 50 % vuoteen 2030 mennessä (vertailuvuosi 2009), ja alan saavutettava nettonolla vuoteen 2038 mennessä [34].



Kuvaaja 4: GFI:n kehitys eri tavoitteissa pysymiseksi [34].

IMO:n tavoite NZN-polttoaineiden käytön lisäämisestä (5 % perus- ja 10 % tavoiteskenaario) vuoteen 2030 mennessä ei myöskään riitä sen omaan GHG 2023 -strategian mukaiseen kasvihuonekaasupäästövähennykseen. Jopa perusskenaarion mukaan olettaen tehokkuusparannuksia, NZN-polttoaineiden osuus tulisi olla 20 %, jotta meriliikenne saavuttaisi vaaditun GFI-polttoaineintensiteetin [34]. IMO:n toimenpiteiden tulisi siis edistää skaalautuvien ja laajasti käyttöön otettavien NZN-polttoaineiden, kuten vihreällä sähköllä tuotettujen e-polttoaineiden käyttöä.

Biopolttoaineiden roolista tulevaisuuden polttoaineena on esitetty ristiriitaisia näkemyksiä. FuelEU Maritime -aloitteessa elintarvike- ja rehupohjaiset biopolttoaineet on rajattu kokonaan pois hyväksyttävien vaihtoehtojen joukosta [36]. Biopolttoaineiden arviointia hankaloittaa niiden kasvihuonekaasupäästöjen määrittäminen, sillä sekä suorat että epäsuorat maankäytön muutokset vaikuttavat merkittävästi päästöihin. Toisen sukupolven

biopolttoaineet (jotka valmistetaan jätteistä ja tähteistä) täyttävät ZNZ-polttoainevaatimukset, mutta niiden laajamittaiseen käyttöönottoon liittyy epävarmuutta valmistuksessa tarvittavien raaka-aineiden riittävydestä. Liitteessä 3 on esitetty Ricardon ja DNV:n IMO:n toimeksiannosta laatima yhteenveto eri polttoaineiden GFI-arvoista.

5 Yhteenveto

Globaali meriliikenne on murroksessa. Suurimmaksi osaksi kansainvälisillä merialueilla tapahtuvaan liikenteeseen on historiallisesti ollut vaikea puuttua laajamittaisesti ja koordinoitusti. Koherentin regulaation kehittyminen on 2000-luvulle tultaessa ottanut kuitenkin merkittäviä askeleita eteenpäin ja 2010-luvulla ilmastotietoisuuden kasvu, ja Pariisin sopimus tekivät globaalisti velvoittavan kasvihuonepäästöjä rajoittavan sopimisen entistä kriittisemmäksi. Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) nettonollakehys (NZF) edustaa uranuurtavaa yritystä saada globaalia meriliikennettä mukaan Pariisin sopimuksen mukaisiin ilmastotavoitteisiin. Kehys yhdessä alueellisten säädösten kanssa luovat monimutkaisen, hankalasti hahmotettavan ja jatkuvasti muuttuvan regulaatioympäristön, joka voimaansa tulee muuttamaan koko sektoria merkittävästi. Tämän fragmentoituneen ja dynaamisen säädännön ymmärtäminen ja siinä ajan tasalla pysyminen on elinehto tulevaisuuden merenkulussa pärjäämiseksi.

Tutkielmassa tutkittiin meriliikenteen päästölainsäädännön kehitystä sen alkumetreiltä 1950-luvulta nykypäivään ja arvioitiin kirjoitushetken tiedon pohjalta todennäköisiä suuntia sen kehitykselle tulevaisuudessa. Huomiota kohdistettiin myös regulaation sisältämiin ristiriitoihin, päällekkäisyyksiin ja tulevaisuuden haasteisiin. IMO NZF:n tavoitteisiin pääsemiseksi laivaliikenteen polttoaineketju tulisi uudistaa täysin ja tulevaisuuden energianlähteenä käyttää vaihtoehtoisia hiilivapaalla sähköllä tuotettuja sähköpolttoaineita tai toisen sukupolven biopolttoaineita.

NZF:n kunnianhimoisuudesta huolimatta sen toimeenpano on kiireellinen, mikäli ilmaston lämpeneminen halutaan rajoittaa alle 2 °C:n. Tämä edellyttäisi sääntelyltä ennakoitavuutta ja pitkäjänteisyyttä, jota nykyinen poliittinen epävakaus heikentää. NZF:n implementointipäätöstä on nyt lykätty lokakuulle 2026, mutta sen läpimenemistä pidetään epätodennäköisenä nykyisen Yhdysvaltojen hallinnon kaudella. Tämä kehitys saattaa entisestään korostaa jo toimeenpannun EU-sääntelyn (ja muiden alueellisten regulaatioiden) merkitystä myös globaalissa mittakaavassa. Nopeasti muuttuvan päästölainsäädännön dynamiikan ja sen vaikutuksien ymmärtäminen edellyttää jatkuvaa tutkimusta myös tulevaisuudessa.

Liitteenä 4 löytyy koonnos työssä käsitellyistä regulaatioista ja niiden keskeisimmistä ominaisuuksista.

Lähteet

- [1] K. Lim, "Maritime communications – safeguarding the spectrum for maritime services", *ITU News*, vol. 2019, nro 5, s. 68–71, 2019.
- [2] M. B. Othman, N. P. Reddy, P. Ghimire, M. K. Zadeh, A. Anvari-Moghaddam, ja J. M. Guerrero, "A Hybrid Power System Laboratory: Testing Electric and Hybrid Propulsion", *IEEE Electrification Mag.*, vol. 7, nro 4, s. 89–97, 2019, doi: 10.1109/MELE.2019.2943982.
- [3] R. A. Halim, L. Kirstein, O. Merk, ja L. M. Martinez, "Decarbonization pathways for international maritime transport: A model-based policy impact assessment", *Sustain. Switz.*, vol. 10, nro 7, 2018, doi: 10.3390/su10072243.
- [4] International Maritime Organization, "Resolution MEPC.377(80): 2023 IMO Strategy on Reduction of GHG Emissions from Ships", International Maritime Organization, MEPC 80/WP.12, heinä 2023.
- [5] Y. Sasamura, "Implementation of MARPOL 73/78", teoksessa *Int. Oli Spill Conf.*, 2005, s. 3724.
- [6] R. Law, "The Torrey Canyon Oil Spill, 1967", teoksessa *Oil Spill Science and Technology*, M. Fingas, Toim., Elsevier Inc., 2011, s. 1103–1106. doi: 10.1016/B978-1-85617-943-0.10033-4.
- [7] *MARPOL - Annex VI*. Viitattu: 7. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: https://www.marpoltraininginstitute.com/MMSKO-REAN/MARPOL/Annex_VI/
- [8] "Nitrogen Oxides (NOx) – Regulation 13". Viitattu: 7. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: [https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-\(nox\)-%E2%80%93regulation-13.aspx](https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/nitrogen-oxides-(nox)-%E2%80%93regulation-13.aspx)
- [9] "IMO's work to cut GHG emissions from ships". Viitattu: 7. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/media-centre/hottopics/pages/cutting-ghg-emissions.aspx>
- [10] L. Čampara, N. Hasanspahić, ja S. Vujičić, "Overview of MARPOL ANNEX VI regulations for prevention of air pollution from marine diesel engines", *SHS Web Conf.*, vol. 58, 2018, doi: 10.1051/shsconf/20185801004.
- [11] "Emission Standards: IMO Marine Engine Regulations". Viitattu: 7. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- [12] P.-C. Wu ja C.-Y. Lin, "Cost-Benefit Evaluation on Promising Strategies in Compliance with Low Sulfur Policy of IMO", *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 9, nro 1, s. 3, joulu 2020, doi: 10.3390/jmse9010003.
- [13] "25 years of air pollution regulations - BUNKER INDEX". Viitattu: 16. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.bunkerindex.com/articles/article.php?a=21501&h=25-years-of-air-pollution-regulations>
- [14] "Valtioneuvoston kirjelmä LVM/2025/68", Valtioneuvosto. Viitattu: 22. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/paatokset/paatos?decisionId=4505>

- [15] "New ECAS for the Canadian Arctic, Norwegian Sea and North-East Atlantic Ocean". Viitattu: 22. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.dnv.com/news/2025/new-ecas-for-the-canadian-arctic-norwegian-sea-and-north-east-atlantic-ocean/>
- [16] "Initial IMO GHG Strategy". Viitattu: 17. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/pages/reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx>
- [17] P. Gilbert ja A. Bows, "Exploring the scope for complementary sub-global policy to mitigate CO₂ from shipping", *Energy Policy*, vol. 50, s. 613–622, marras 2012, doi: 10.1016/j.enpol.2012.08.002.
- [18] S. Bullock, J. Mason, ja A. Larkin, "The urgent case for stronger climate targets for international shipping", *Clim. Policy*, vol. 22, nro 3, s. 301–309, maaliskuu 2022, doi: 10.1080/14693062.2021.1991876.
- [19] S. Bullock, J. Mason, J. Broderick, ja A. Larkin, "Shipping and the Paris climate agreement: a focus on committed emissions", *BMC Energy*, vol. 2, nro 1, s. 5, kesä 2020, doi: 10.1186/s42500-020-00015-2.
- [20] "IMO approves net-zero regulations for global shipping". Viitattu: 17. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/mediacentre/pressbriefings/pages/imo-approves-netzero-regulations.aspx>
- [21] T. E. Team, "MMMCZCS: What we know so far about the IMO Net-Zero Framework", SAFETY4SEA. Viitattu: 17. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://safety4sea.com/mmmczcs-what-we-know-so-far-about-the-imo-net-zero-framework/>
- [22] Ship & Bunker News Team To contact the editor responsible for this story email us at editor@shipandbunker.com, "INSIGHT: How Will The EU React to the IMO Net-Zero Framework?", Ship & Bunker. Viitattu: 17. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://shipandbunker.com/news/world/442674-insight-how-will-the-eu-react-to-the-imo-net-zero-framework>
- [23] "IMO Postpones Adoption of Net Zero Framework | Insights | Vinson & Elkins LLP". Viitattu: 28. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.velaw.com/insights/imo-postpones-adoption-of-net-zero-framework/>
- [24] International Maritime Organization (IMO), "2022 Guidelines for the Development of a Ship Energy Efficiency Management Plan (SEEMP)", kesä 2022. [Verkossa]. Saatavissa: [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346\(78\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Air%20pollution/MEPC.346(78).pdf)
- [25] The International Council on Clean Transportation (ICCT), "The Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships", The International Council on Clean Transportation, Policy Update 15, loka 2011. [Verkossa]. Saatavissa: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/ICCTpolicyupdate15_EEDI_final.pdf
- [26] Faig Abbasov; Transport & Environment, "Statistical analysis of the energy efficiency performance (EEDI) of new ships built in 2013–2017", Transport & Environment, Brussels, syys 2017.

- [27] International Towing Tank Conference (ITTC), "Group Discussion on EEDI Phase 4 2017-2021", 2021, [Verkossa]. Saatavissa: <https://ittc.info/media/9516/groupdiscussion-on-eedi-phase-4.pdf>
- [28] H. Ren, Y. Ding, ja C. Sui, "Influence of EEDI (Energy Efficiency Design Index) on Ship-Engine-Propeller Matching", *J. Mar. Sci. Eng.*, vol. 7, nro 12, s. 425, joulu 2019, doi: 10.3390/jmse7120425.
- [29] "Improving the energy efficiency of ships". Viitattu: 25. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.imo.org/en/ourwork/environment/pages/improving%20the%20energy%20efficiency%20of%20ships.aspx>
- [30] "EEXI regulation | ClassNK - English". Viitattu: 25. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/activities/statutory/eexi/>
- [31] M. Vasilev, M. Kalajdžić, ja N. Momčilović, "On energy efficiency of tankers: EEDI, EEXI and CII", *Ocean Eng.*, vol. 317, s. 120028, helmi 2025, doi: 10.1016/j.oceaneng.2024.120028.
- [32] Marine Environment Protection Committee (MEPC), International Maritime Organization (IMO), "2022 Guidelines for Administration Verification of Ship Fuel Oil Consumption Data and Operational Carbon Intensity (MEPC.348(78))", International Maritime Organization / ClassNK (hosting location), MEPC.348(78). [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.classnk.or.jp/hp/pdf/activities/statutory/seemp/seemp-mepc78-348.pdf>
- [33] "IMO MEPC 83: New GHG requirements approved", DNV. Viitattu: 28. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.dnv.com/news/2025/imo-mepc-83-ghg-requirements-approved-taking-effect-from-2028/>
- [34] H. J. Cho, G. Alvarez, ja B. Comer, "Vision 2050: Fuel standards to align international shipping with the Paris Agreement", *Int. Counc. Clean Transp.*, maaliskuu 2025, [Verkossa]. Saatavissa: <https://theicct.org/publication/vision-2050-fuel-standards-to-align-international-shipping-with-the-paris-agreement-mar25/>
- [35] D. Scott, "Four changes would make the IMO Net-Zero Framework more effective", International Council on Clean Transportation. Viitattu: 28. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://theicct.org/four-changes-would-make-the-imo-net-zero-framework-more-effective-apr25/>
- [36] Michael Campbell *ym.*, "Study on the Readiness and Availability of Low and Zero-Carbon Ship Technology and Marine Fuels: Full Report", Lontoo, Iso-Britannia (IMO pääkonttori), huhti 2023. [Verkossa]. Saatavissa: <https://greenvoyage2050.imo.org/wp-content/uploads/2023/08/Readiness-of-Low-Zero-Carbon-Marine-Fuels-Technology-Full-Report-v1.pdf>
- [37] "IMO Net-Zero Framework", Maersk Zero Carbon Shipping. Viitattu: 31. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.zerocarbonshipping.com/www.zerocarbonshipping.com/imo-net-zero-framework>

- [38] R. Barsøe, "FuelIMO? The IMO approves a historic Net Zero Framework", Gorrissen Federspiel. Viitattu: 31. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://gorrissenfederspiel.com/en/fuelimo-the-imo-approves-a-historic-net-zero-framework/>
- [39] "Which ships and emissions are covered?", Miljødirektoratet/Norwegian Environment Agency. Viitattu: 10. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.environmentagency.no/areas-of-activity/eu-emissions-trading-system/guide-to-maritime-transport-in-mrv-and-the-eu-ets/the-scope-of-the-eu-ets-and-the-mrv-regulation/>
- [40] "FAQ – Maritime transport in EU Emissions Trading System (ETS) - Climate Action". Viitattu: 31. lokakuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport-decarbonisation/reducing-emissions-shipping-sector/faq-maritime-transport-eu-emissions-trading-system-ets_en
- [41] L. Finska ja H. Ringbom, *Regulation of GHGs from Ships: On the available discretion for regulatory solutions in a European and Finnish perspective*. Merenkulun säätiö, 2022.
- [42] European Maritime Safety Agency, "Fuel EU Maritime Regulation". Viitattu: 5. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://emsa.europa.eu/reducing-emissions/fuel-eu-maritime-regulation.html>
- [43] Hokkanen, Eero; Sarlin, Laura, "Kansainvälisessä merenkulkujärjestössä käytävät neuvottelut maailmanlaajuisista päästövähennystoimista kansainvälisessä merenkulussa", Liikenne- ja viestintäministeriö, E-jatkokirje EU/27/2024-LVM9, helmi 2024. [Verkossa]. Saatavissa: <https://valtioneuvosto.fi/documents/10616/202602535/Kansainv%C3%A4lisess%C3%A4+merenkulkuj%C3%A4rjest%C3%B6ss%C3%A4+k%C3%A4yt%C3%A4v%C3%A4t+neuvottelut+maailmanlaajuisista+p%C3%A4st%C3%B6v%C3%A4hennystoimista+kansainv%C3%A4lisess%C3%A4+merenkulussa+-+E-jatkokirje.pdf/a38b6cc2-f0bc-96be-82f7-d3bcfc8105d6/Kansainv%C3%A4lisess%C3%A4+merenkulkuj%C3%A4rjest%C3%B6ss%C3%A4+k%C3%A4yt%C3%A4v%C3%A4t+neuvottelut+maailmanlaajuisista+p%C3%A4st%C3%B6v%C3%A4hennystoimista+kansainv%C3%A4lisess%C3%A4+merenkulussa+-+E-jatkokirje.pdf?version=1.0&t=1708083648931&download=true>
- [44] K. Wiggins, P. Foster, ja A. Mooney, "US accused of 'bully-boy' tactics to sink climate deal", *Financial Times*, 2. marraskuuta 2025. Viitattu: 6. marraskuuta 2025. [Verkossa]. Saatavissa: <https://www.ft.com/content/4e0a9a30-b014-4745-afe5-c841e36b41da>

Liitteet

Liite 1: EEDI-vaatimukset 1/2 [27]

6 The existing table 1 (Reduction factors (in percentage) for the EEDI relative to the EEDI reference line) and the associated footnotes are replaced by the following:

"

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Mar 2022	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Apr 2022 and onwards	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
Bulk carrier	20,000 DWT and above	0	10		20		30
	10,000 and above but less than 20,000 DWT	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
Gas carrier	15,000 DWT and above	0	10	20		30	
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	0	10		20		30
	2,000 and above but less than 10,000 DWT	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
Tanker	20,000 DWT and above	0	10		20		30
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
Containership	200,000 DWT and above	0	10	20		50	
	120,000 and above but less than 200,000 DWT	0	10	20		45	
	80,000 and above but less than 120,000 DWT	0	10	20		40	
	40,000 and above but less than 80,000 DWT	0	10	20		35	
	15,000 and above but less than 40,000 DWT	0	10	20		30	

Liite 2: EEDI-vaatimukset 2/2 [27]

Ship Type	Size	Phase 0 1 Jan 2013 – 31 Dec 2014	Phase 1 1 Jan 2015 – 31 Dec 2019	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Mar 2022	Phase 2 1 Jan 2020 – 31 Dec 2024	Phase 3 1 Apr 2022 and onwards	Phase 3 1 Jan 2025 and onwards
	10,000 and above but less than 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-20*		15-30*	
General Cargo ships	15,000 DWT and above	0	10	15		30	
	3,000 and above but less than 15,000 DWT	n/a	0-10*	0-15*		0-30*	
Refrigerated cargo carrier	5,000 DWT and above	0	10		15		30
	3,000 and above but less than 5,000 DWT	n/a	0-10*		0-15*		0-30*
Combination carrier	20,000 DWT and above	0	10		20		30
	4,000 and above but less than 20,000 DWT	n/a	0-10*		0-20*		0-30*
LNG carrier***	10,000 DWT and above	n/a	10**	20		30	
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)***	10,000 DWT and above	n/a	5**		15		30
Ro-ro cargo ship***	2,000 DWT and above	n/a	5**		20		30
	1,000 and above but less than 2,000 DWT	n/a	0-5**,**		0-20*		0-30*
Ro-ro passenger ship***	1,000 DWT and above	n/a	5**		20		30
	250 and above but less than 1,000 DWT	n/a	0-5**,**		0-20*		0-30*
Cruise passenger ship*** having non-conventional propulsion	85,000 GT and above	n/a	5**	20		30	
	25,000 and above but less than 85,000 GT	n/a	0-5**,**	0-20*		0-30*	

* Reduction factor to be linearly interpolated between the two values dependent upon ship size.

The lower value of the reduction factor is to be applied to the smaller ship size.

** Phase 1 commences for those ships on 1 September 2015.

*** Reduction factor applies to those ships delivered on or after 1 September 2019, as defined in

Liite 3: Yhteenveto päästöistä WtT, TtW, TtW sisältäen biogeenisen las-
tin ja DAC:sta (suoraan ilmasta talteen otettu hiili) peräisin olevan hiilidi-
oksidin päästöt (TtW') sekä WtW fossiilisille ja vaihtoehtoisille polttoai-
neille. Arvot yksikössä gCO_{2e}/MJ. [36]

Fuel	Description	Possible fuel types/energy carriers	GHG emissions factors			
			WtT	TtW	TtW'	WtW
<i>Fossil fuels (reference)</i>	<i>Fossil fuels</i>	<i>HFO, LNG, LSFO, MGO</i>	10-20	55-85	55-85	71-105
Biofuels	Fuels made from conventional biomass feedstocks (food and feed crops)	biomethanol	20-112	0-28	55-85	20-116
	Fuels made from advanced biomass feedstocks (e.g. waste, algae)	biomethane biodiesel				2-25
E-fuels	Fuels based on hydrogen produced by electrolysis using renewable or nuclear electricity, with no carbon content	e-hydrogen e-ammonia	0-41	0-14	0-14	0-55
	Fuels based on hydrogen produced by electrolysis using renewable or nuclear electricity, combined with carbon from biogenic sources or direct air capture	e-methanol e-methane e-diesel	0-58	0-28	55-85	0-79
Blue fuels	Fuels based on hydrogen made from fossil energy sources with carbon capture and storage (>90% capture rate)	blue hydrogen blue ammonia	28-41	0-14	0-14	28-55
Electricity	Electricity from grid, produced from a mix of fossil and renewable sources	Electricity provided as shore power	0-200	0	0	0-200
Fossil fuels and onboard CCS	Fossil fuels with onboard CCS.	HFO, LNG, LSFO, MGO	12-24	20-54	20-54	41-65
Fossil fuels blended with biofuels or e-fuels and onboard CCS	Fossil fuels blended with 30% advanced biofuels or e-fuels with onboard CCS.	HFO, LNG, LSFO, MGO – blended with biodiesel, biomethane, e-diesel or e-methane	9-26	0-33	20-54	12-59

Liite 4: koonnos työssä esitellyistä regulaatioista ja niiden ominaisuuksista.

Regulaatio	Päästö-tyypit	Soveltamisala	Voimaantulo vuosi	Tavoite tai vaatimus	Alue/järjestö
OILPOL 1954	Öljy	Kaikki alukset	1958	Öljypäästöjen rajoitus	IMO
MARPOL liite I	Öljy	Kaikki alukset	1983	Öljypäästöjen rajoitus (tahalliset/onnettomuus)	IMO
MARPOL liite II	Kemikaalit	Kaikki alukset	1987	Myrkyllisten bulkkina kuljetettujen nestemäisten aineiden päästöjen rajoitus	IMO
MARPOL liite VI	SO _x , NO _x , CO ₂	Kaikki alukset	2005	Kansanvälisten raja-arvojen asetus	IMO
NO _x Tier I/II/III	NO _x	Uudet alukset	2000/2011/2016	Raja-arvojen asetus uusille laivoille	IMO
Rikkiraja (global sulphur cap)	SO _x	Kaikki alukset	2005–2020	Uusin globaali raja 2020, 0,5 %	IMO
SECA-alueet	SO _x	Alueellinen	2006–2027	SO _x -päästöjen erityisrajoitukset	IMO ja alueelliset viranomaiset
NECA-alueet	NO _x	Alueellinen	2016–2030	NO _x -päästöjen erityisrajoitukset	IMO ja alueelliset viranomaiset
SEEMP	CO ₂	Kaikki ≥ 400 GT	2013/2023	Energiatehokkuussuunnitelma	IMO
EEDI vaiheet 0–3	CO ₂	Uudet alukset	2013/2015/2020/2022	Suunnittelun energiatehokkuusindeksi	IMO
EEXI	CO ₂	Olemassa olevat alukset	2023	Energiatehokkuuden parannus	IMO
CII	CO ₂	Kaikki ≥ 5 000 GT	2023	Jatkuva hiili-intensiteetin seuranta	IMO
GFS	GHG	Kaikki ≥ 5 000 GT	2026?	Nettonollatavoite 2050	IMO
ZNZ	GHG	Kaikki ≥ 5 000 GT	2026?	Osa NZF:ää, johon myös GFS kuuluu	IMO
EU ETS	CO ₂ (2026 -> GHG)	≥ 5 000 GT (rahti- ja matkustajalaitvat)	2024→	Meriliikenteen päästökauppaan sisällytys. Koskee EU-aluetta. Tulevaisuudessa mukaan lisää laivatyyppisiä ja mahdollisesti 400–5000 GT	EU
FuelEU Maritime	GHG	Kaikki ≥ 5 000 GT	2025	GHG-päästövähennys ja vähähiilisten polttoaineiden vaatimus	EU
DCS	CO ₂ /GHG	Kaikki ≥ 5 000 GT	2018	Polttoainekulutuksen raportointi. Ei mittaa suoraan CO ₂ - tai GHG-päästöjä	IMO
MRV	GHG	≥ 400 GT EU alueella	2025	Raportointivelvoite, mittaa savukaasuja. Ennen vuotta 2025 vaatimus oli rajatumpi.	EU