

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT
School of Energy Systems
Energiatekniikka
Diplomityö

Merenkulun aluskannan energiatehokkuus, vaatimukset sekä tehokkuuden parantaminen

Turussa 15.6.2023
Pekka Ämmälä EnteDI

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

School of Energy Systems

Energiatekniikka

Pekka Ämmälä

Merenkulun aluskannan energiatehokkuus, vaatimukset sekä tehokkuuden parantaminen

Diplomityö 2023

Tarkastajat: Professori Teemu Turunen-Saaresti ja diplomi-insinööri Mia Elg

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Mia Elg

61 sivua, 27 taulukkoa, 30 kuvaa ja 6 liitettä

Hakusanat: EEXI, CII, hiili-intensiteetti

Työssä esitetään ilmastopoliittisia linjauksia ja niiden perusteella laadittuja määräyksiä. Määräysten soveltamista tutkitaan olemassa olevaan aluskantaan. Työssä tutkitaan, esitellään ja vertaillaan eri ratkaisuvaihtoehtoja alusten energiatehokkuuden parantamiseksi ja tutkitaan näiden ratkaisujen vaikutuksia energiatehokkuusindekseihin, tarkoitukseen laadittuja mittareita hyödyntäen. Työtä ohjaa vahvasti kansainvälisen merenkulkujärjestön, IMO:n ilmastostrategia ja siihen kehitetyt ja kehitteillä olevat mittarit. Työssä esitellään eri polttoaineita, niiden ominaisuuksia ja vertaillaan niitä perinteiseen raskaaseen polttoöljyyn. Työssä tarkastellaan myös erilaisia propulsio- ja energiantuotantoa tukevia energiatehokkuusratkaisuja, sekä tehonrajoitusta. Polttoaineiden ja energiatehokkuusratkaisujen vaikutuksia arvioidaan esimerkkialuksen avulla ja niille lasketaan energiatehokkuusindeksit ja hiili-intensiteetti arvot. Laskentatuloksia verrataan myös aiheesta löytyvään kirjallisuuteen. Työn tuloksena pystytään vertailemaan näiden eri ratkaisujen vaikutusta EEXI energiatehokkuusindeksiin ja CII hiili-intensiteetti-indeksiin. Työssä arvioidaan myös näiden eri ratkaisujen teknisiä vaikutuksia ja toteuttamiskelpoisuutta laivakonversioon, eli jälkiasennukseen.

ABSTRACT

Lappeenranta-Lahti University of Technology LUT
School of Energy Systems
Energy Technology

Pekka Ämmälä

Energy efficiency on existing marine vessels, requirements and ways to improve energy efficiency

Thesis 2023

Examiners: Professor Teemu Turunen-Saaresti and M.Sc. Mia Elg

Instructor: M.Sc. Mia Elg

Keywords: EEXI, CII, Carbon intensity

In this thesis climate policy guidelines and regulations related to maritime energy efficiency and maritime emissions are presented. The application of the regulations and the calculation of energy efficiency indexes are being studied for the ships. The work presents and compares different solutions to improve the energy efficiency of existing ships. Effects to energy efficiency indexes of presented solutions are studied. The work follows International maritime organization's climate strategy and the metrics which are developed to improve the energy efficiency of existing fleet. Different fuels are presented in the work. Alternative fuel properties and requirements are compared to traditional heavy fuel oil. Also other various energy efficiency solutions and solutions which are supporting propulsion and energy production are presented. Engine/shaft power limitations and their effects are also studied at the work. Fuels and energy efficiency solutions are examined, and effects compared with an example ship. Energy efficiency indexes and carbon intensities are calculated for different cases. As a result of the work, it is possible to compare the effect of these different solutions to the EEXI energy efficiency index and the CII carbon intensity index. Results are compared to available literature. Effects of different solutions to ship are studied, effects and scope of conversion of existing ship are evaluated.

SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ

ABSTRACT

SISÄLLYSLUETTELO

LYHENTEET

1	JOHDANTO.....	6
1.1	Tutkimuksen tavoitteet	6
1.2	Metodit.....	6
1.3	Rajaukset.....	7
2	Ilmastopoliittiset linjaukset	7
2.1	Merenkulun ilmastostrategia.....	8
3	Energiatehokkuusindeksit	9
3.1	Energiatehokkuusindeksien laskenta.....	9
4	Hiili-intensiteetti	14
4.1	Hiili-intensiteetin laskenta	15
5	Energiatehokkuusratkaisuvaihtoehtoja alusten energiatehokkuuden parantamiseen	17
5.1	Tehonrajoitus	17
5.2	Operatiiviset energiatehokkuustoimet	18
5.3	Runkoon tehtävät muutokset.....	19
5.4	Polttoaineet	19
5.5	Lisälaitteet, innovatiiviset energiatehokkuusteknologiat	24
5.5.1	Tuulipropulsio.....	25
5.5.2	Ilmavoitelu	31
5.5.3	Lämmöntalteenotto.....	31
5.5.4	Aurinkosähkö	33
5.5.5	Taajuusmuuntajakäyttöiset apulaitteet	33
6	Case study, esimerkkitapaus	33
6.1	Tietoa esimerkkitapauksesta	34
6.2	Esimerkkitaluksen EEXI laskenta.....	34
6.2.1	PCTC Case 1. HFO	34
6.2.2	PCTC Case 2 HFO & EPL	36
6.2.3	PCTC Case HFO & Innovatiiviset teknologiat.....	37
6.2.4	PCTC Case vaihtoehtoiset polttoaineet	39
6.3	Esimerkkitaluksen Hiili-intensiteetti	44
6.3.1	Hiili-intensiteetti, HFO.....	49
6.3.2	Hiili-intensiteetti, Metanoli (MeOH)	50
6.3.3	Hiili-intensiteetti, Ammoniakki	51

6.3.4 Hiili-intensiteetti LNG.....	53
7 Pohdinta & Johtopäätökset.....	54
7.1 PCTC EEXI	54
7.2 PCTC Hiili-intensiteetti	56
7.3 Yhteenveto	57

LIITTEET

Liite 1. EEXI laskelma HFO

Liite 2. EEXI laskelma EPL - Shapoli

Liite 3. EEXI laskelma Innovatiiviset energiatehokkuus teknologiat

Liite 4. EEXI laskelma Ammoniakki

Liite 5. EEXI laskelma Metanoli

Liite 6. EEXI laskelma LNG

Lyhenteet

AE Auxiliary engine, apukone

CII Carbon intensity index, Hiili-intensiteetti

DWT Dead weight tonnage, kuollutpaino

EEDI Energy Efficiency Design Index, Energiatehokkuus suunnittelu indeksi

EEXI Efficiency Existing Ship Index, Energiatehokkuus indeksi olemassa olevalle aluskannalle

EPL engine power limitation, moottoritehon rajoitus

GT Gross tonnage, aluksen bruttovetoisuus

HFO Heavy fuel oil, raskaspolttoöljy

IMO International Maritime Organization, Kansainvälinen merenkulkujärjestö

KC Kalina kierto

KHK Kasviuonekaasu

LNG, Liquefied natural gas, nesteytetty maakaasu

MCR Maximum continuous rating, Suurin sallittu jatkuva koneteho

ME Main engine, pääkone

MEOH Metanoli

MEPC Marine Environment Protection Committee, IMO:n meriympäristön suojelukomitea

MPP nimellisteho

NH₃ Ammoniakki

ORC Organic Ranking Cycle Orgaanisten kiertoaineiden käyttöön perustuva prosessi

PCTC Pure car and truck carrier, autonkuljetusalus

SEEMP Ship Energy Efficiency Management Plan, Laivan energiatehokkuuden hallintasuunnitelma

SHAPOLI Shaft power limitation, akselitehon rajoitus

SCBC Superkriittinen hiilidioksidi pohjainen Brayton kierto

YK Yhdistyneet kansakunnat

1 JOHDANTO

Ilmastonmuutos on koko ihmiskunnan huoli. Ilmastopoliittiset linjaukset ohjaavat merenkulkua kohti puhtaampaa tulevaisuutta. Ilmastomuutoksen hillitsemiseksi on välttämätöntä etsiä keinoja meriliikenteen päästöjen vähentämiseksi. Tämän työn tavoitteena on esittää ilmastopoliittisia taustoja, jotka vaikuttavat merenkulun päästöihin, sekä selvittää ja esittää alusten energiatehokkuuden mittaamiseen kehitettyjä mittareita. Työssä tutkitaan mittareiden kehitystä ja instrumentteja niiden ympärillä. Työn varsinaisessa tutkimusosuudessa esitetään teknisiä vaihtoehtoja energiatehokkuuden parantamiseksi olemassa olevan aluskannan osalta ja pohditaan suunnittelutoimiston mahdollisuuksia vaikuttaa tapauskohtaisesti oikeiden menetelmien valintaan energiatehokkuuden parantamiseksi ja määräysten täyttämiseksi. Työssä tutkitaan kiinnostavimpien vaihtoehtoisten polttoaineiden vaikutuksia energiatehokkuus ja hiili-intensiteetti-indekseihin ja pohditaan näiden tuomia vaikutuksia aluksiin. Myös muita propulsiota ja energiantuotantoa tukevia energiatehokkuusratkaisuja tutkitaan työssä. Tavoitteena on kartoittaa parhaita toisiaan poissulkemattomia vaihtoehtoja ja tapoja löytää parhaat ratkaisut tukemaan kehitystä kohti hiilineutraalia merenkulkua.

1.1 Tutkimuksen tavoitteet

Tämän työn tavoitteena on tutustua energiatehokkuusratkaisuihin ja niitä pisteyttäviin energiatehokkuus indekseihin, sekä kartoittaa laivasuunnittelutoimiston mahdollisuuksia energiatehokkaiden ratkaisujen kohdentamiseen jo olemassa olevaan aluskantaan. Tavoitteena on ymmärtää ilmastonmuutoksen vähentämiseen luotuja mekanismeja, uusia teknologioita ja tapoja soveltaa niitä olemassa olevaan aluskantaan. Tavoitteena on ymmärtää myös eri ratkaisujen teknisen toteutuksen vaatimukset ja vaikeustaso, ja tätä kautta ymmärtää mitä teknisiä haasteita eri ratkaisujen taustalla on ja miten suunnittelutoimisto voi edesauttaa ratkaisujen valinnassa ja toteutuksessa merenkulkualan toimijoita, telakoista varustamoihin.

1.2 Metodit

Tässä työssä tehdään kirjallisuustutkimus koskien aiheen taustoja, ilmastopoliittisia linjauksia, sekä kehitettyjä mittareita. Työssä tutkitaan IMO:n valmistelemia laskentatapoja,

ohjenuoria sekä korjauskertomia. Työssä käytetään pääasiassa IMO:n luomia yhtälöitä. Näiden tietojen perusteella lasketaan esimerkkitapauksille energiatehokkuus indeksit ja hiili-intensiteetti. Esimerkkitaapauksen avulla tutkitaan erilaisten teknisten ratkaisujen vaikutuksia indekseihin ja pohditaan eri energiatehokkuusratkaisuvaihtoehtojen taustoja, valmiutta, kehittyneisyyttä ja toteuttamismahdollisuuksia. Työssä tehtävät hinta-arvioinnit perustuvat Deltamarin Oy:n sisäiseen tietopankkiin, johon on kerätty valmistajilta saatuja hintaindikaatioita.

1.3 Rajaukset

IMO:n Energiatehokkuusindeksejä tutkitaan tehonrajoituksen, innovatiivisten teknologioiden sekä vaihtoehtoisten polttoaineiden osalta LNG:n, metanolin sekä ammoniakkin osalta, näitä siis verrataan raskaaseen polttoöljyyn. Muut polttoaineet ja esimerkiksi runkomuutokset rajataan varsinaisen tutkimuksen ja vertailun ulkopuolelle. Hiili-intensiteetti laskennassa keskitytään vertailemaan eri polttoaineiden vaikutukseen hiili-intensiteettiin, muut teknologiset ratkaisut on rajattu ulkopuolelle. Työ rajataan EEXI ja CII indekseihin. 2025 tulevat EU:n FuelEU Maritime asetukset, joita ovat muun muassa tuleva kasvihuonekaasuindeksi, ovat rajattu työn ulkopuolelle. Hintavertailu rajoittuu ainoastaan pääomainvestointiin, eli laitteiden ja asennuksen vertailuun, polttoaineiden hinnat tulevat kehittymään jakelu ja valmistus infrastruktuurin myös kehittyessä, joten käyttökustannuksia ei työssä arvioida.

2 Ilmastopoliittiset linjaukset

Ilmastopoliitiikan taustalla on 1994 voimaan tullut UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), eli YK:n ilmastonmuutosta koskeva puitesopimus (Ympäristöministeriö). Vuonna 1997 tehtiin Japanin Kietossa täydentävä sopimus. Kioton pöytäkirja on YK:n ilmastopoliittisen sopimuksen alainen sopimus joka ensimmäisenä ohjasi sitovasti kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamiseen ja vähentämiseen. Sopimus sitoo vain kehittyneitä teollisuusmaita ja mahdollisesti myös päästökaupan ja päästöjen monitoroinnin (United Nations Climate Change). Sopimusten tavoite on ilmakehän kasvihuonepitoisuuksien rajoittaminen ja vakauttaminen. Kioton pöytäkirjan ensimmäinen velvoite kausi oli 2008-2012 ja toinen kausi oli 2013-2020.

Pariisin ilmastopöimimus tuli voimaan vuonna 2016, se hyväksyttiin vuonna 2015 Pariisissa. Pariisin sopimus koskee vuoden 2020 jälkeistä aikaa ja ohjaa tulevaisuuden päästöjen rajoittamista ja vähentämistä. Se on sitova sopimus. Tavoitteena on pysäyttää ilmaston lämpeneminen selvästi alle 2:n celsiusasteen tasolle, mielellään 1,5:n celsius asteeseen (Paris Agreement art. 2). Toinen selkeä tavoite on saavuttaa päästöjen huippu mahdollisimman nopeasti ja pyrkiä ilmastoneutraalisuuteen (Paris Agreement art. 4). Sopimusmaiden pitää selvittää päästönsä ja ne pitää raportoida. Pariisin ilmastopöimimus myös velvoittaa hiilinielujen ja hiilivarastojen suojelua.

2.1 Merenkulun ilmastopöimimus

Kansainvälinen merenkulkujärjestö, International Maritime Organization eli IMO ohjaa ilmastonmuutoksen torjuntaa merenkulun osalta perustuen YK:n ilmastonmuutosta koskevaan puitesopimukseen. IMO:n tavoitteena on vähentää 50% merenkulun kasvihuonekaasupäästöjä vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon (IMO 2018). IMO:n meriympäristön suojelukomitea, Marine Environment Protection Committee eli MEPC: istunnoissa esitetään ja päätetään toimista ja keinoista vähentää merenkulun päästöjä. IMO:n MARPOL on kansainvälinen yleissopimus, jonka tarkoitus on estää aluksia aiheuttamasta ympäristön pilaantumista. MARPOL on alunperin luotu 1973, estämään tuhoisia öljyonnettomuuksia. Se on vuosien saatossa saanut lisää sisältöä ja se ohjaa osaltaan merenkulun päästöjä. MARPOL:ssa on kuusi annexia, jotka määrittävät merenkulun päästöjä. Annex I määrittää öljypäästöjä, Annex II määrittää haitallisen nesteiden aiheuttaman saastumisen hallintaa, Annex III määrittää pakattuja haitallisia aineita, Annex IV määrittää jäteveden päästöjä ja puhdistusta, Annex V määrittää roskien käsittelyä laivalla ja Annex VI asettaa muun muassa rajoituksia laivojen pakokaasujen rikkioksidi- ja typenoksidipäästöille ja kieltää otsonikerrosta heikentävien aineiden tahalliset päästöt (IMO 2023). MARPOL Annex VI sisältää myös muun muassa vaatimuksen Ship Energy Efficiency Management Plan, laivan energiatehokkuuden hallintasuunnitelmasta. Tämän tarkoitus on laivan energiatehokkaan operoinnin myötä vähentää CO₂ päästöjä. (MEPC 63/23 Annex 9 s.1-10, 2012). Myös energiatehokkuus säännöt ovat MARPOL:n alaisuudessa.

3 Energiatehokkuusindeksit

MEPC:n 76:ssa istunnossa 10-17.6.2021 tehtiin päätös ottaa olemassa oleville laivoille käyttöön indeksi, joka toimii laivan energiatehokkuuden mittarina. Tämä EEXI (Energy Efficiency Existing Ship Index) indeksoi laivan laskennallisia hiilidioksidipäästöjä [gCO₂/t.nm]. EEXI lasketaan laivoille, joiden bruttovetoisuus on tai ylittää 400 GT (IMO MEPC 76, 2021). Indeksit tuli voimaan 1. tammikuuta vuonna 2023. Tämä on siis MARPOL:n alainen kansainvälinen yleissopimus ja osa Annex VI:ta.

3.1 Energiatehokkuusindeksien laskenta

EEXI laskentakaava perustuu IMO:n jo aiemmin lanseeraamaan EEDI (Energy efficiency design index) indeksiin. EEDI laskenta on ollut pakollista 400 GT tai yli suuruisille uusille aluksille jo alkaen vuodesta 2011. EEDI:llä lasketaan uusien laivojen suunnitteluenergiatehokkuusindeksi. Indeksit kuvaa tuotettuja päästöjä jaettuna kuljetetulla rahdilla (gCO₂ / tonni x nm).

EEDI laskentakaava:

$$\frac{\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{i=1}^{nME} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} *) + \left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{nPTI} P_{PTI(i)} - \sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{AEeff(i)} \right) C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right) - \left(\sum_{i=1}^{neff} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right)}{f_i \cdot Capacity \cdot V_{ref} \cdot f_w} \quad (1)$$

(MEPC.1/Circ.681 ANNEX s.2-7, 2009)

Missä:

Capacity, laivan kapasiteetti [DWT] kuollutpaino, tonnia

C_{fme} käytetty polttoaine, kun määritetään pääkoneiden polttoaineen spesifinen kulutus

C_{fme_pilot} Käytetty pilottipolttoaine, kun määritetään pääkoneiden spesifinen kulutus

LNG:n kanssa

C_{fae} käytetty polttoaine kun määritetään apukoneiden polttoaineen spesifinen kulutus

C_{fae_pilot} käytetty pilottipolttoaine, kun määritetään apukoneiden spesifinen kulutus LNG:n kanssa

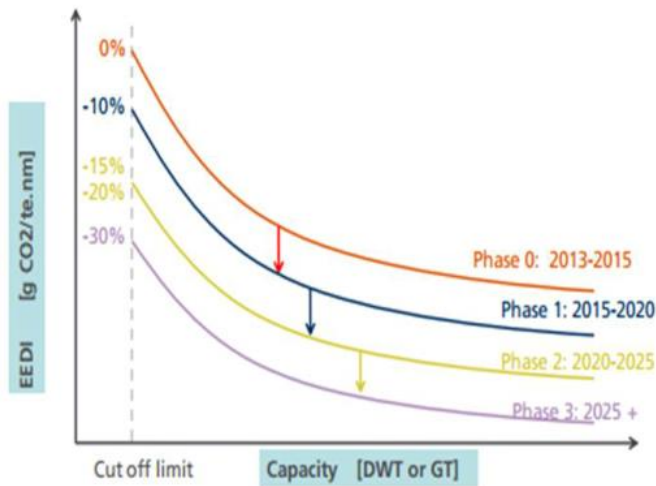
C_{eff} käytetyt innovatiiviset teknologiat [dimensioton]

f_i kapasiteetin korjauskerroin laivatyyppin suunnitteluelementille [dimensioton]

f_c kuutiokapasiteetin korjauskerroin [dimensioton]

f_w nopeuden vähennys vallitsevilla meriolosuhteissa [dimensioton]
 f_j laivan jääluokka [dimensioton]
 P_{eff} innovatiivisen mekaanisen energian teknologian vähennys [dimensioton]
 P_{aeff} innovatiivisen sähköisen energian teknologia vähennys [dimensioton]
 P_{ME} pääkoneen teho (MCR, suurin sallittu koneteho) [MW]
 P_{PTO} pääkoneen Akseligeneraattorin teho [MW]
 P_{PTI} akseligeneraattorin propulsioteho [MW]
 S_{FCME} pääkoneen spesifinen polttoaineen kulutus [g/kWh]
 S_{FCAE} apukoneen spesifinen polttoaineen kulutus [g/kWh]
 V_{ref} laivan nopeus [solmua]

Laskennalla aikaan saadaan laivalle laskettua oma referenssi käyrä, joka kuvaa EEDI:n referenssi arvoa laivan kokoon perustuen, esimerkkikäyrä on näytetty kuvassa 2.



Kuva 1 EEDI referenssikäyrä (IMO, 2021)

EEXI laskenta on siis hyvin samankaltainen kuin EEDI, mutta osa parametreista on erilaisia.

EEXI laskentakaava [$g/ton \cdot merimaili$]:

$$\frac{(\prod_{j=1}^M f_j) \sum_{l=1}^{n_{ME}} (\sum_{j=1}^{n_{ME}} P_{ME(l)} \cdot C_{FME(l)} \cdot S_{FCME(l)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot S_{FCAE}) + \{(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{l=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(l)} - \sum_{l=1}^{n_{eff}} f_{eff(l)} \cdot P_{AEff(l)}) \cdot C_{FAE} \cdot S_{FCAE}\} - (\sum_{l=1}^{n_{eff}} f_{eff(l)} \cdot P_{eff(l)} \cdot C_{FME} \cdot S_{FCME})}{f_i \cdot f_c \cdot f_j \cdot Capacity \cdot V_{ref}}$$

(2)

(MEPC 78/17/Add.1 Annex 12, page 4)

Eli

$$\left(\left(\prod_{j=1}^M f_j \right) \left(\sum_{j=1}^{n_{ME}} P_{ME(1)} \cdot C_{FME(1)} \cdot SFC_{ME(1)} \right) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}) + \left\{ \left(\prod_{j=1}^M f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(1)} - \sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(1)} \cdot P_{AE_{eff(1)}} \right) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE} \right\} - \left(\sum_{i=1}^{n_{eff}} f_{eff(1)} \cdot P_{eff(1)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME} \right) \right) / f_i \cdot f_c \cdot f_j \cdot Capacity \cdot V_{ref}$$

Yksinkertaistettuna:

$$EEXI [g/ton \cdot merimaili] = \frac{CO_2 \text{ muuntokerroin} \times SFC [g/kW \cdot h] \times \text{moottoriteho} [kW]}{Capacity [ton] \times EEXI \text{ nopeus} (V_{ref}) [solmua]} \quad (3)$$

EEXI arvo riippuu pääasiassa aluksen nopeudesta, kuolleestapainosta ja nimellistehosta. EEXI yhtälöiden osat voidaan jakaa karkeasti kahteen osaan, pää- sekä apumoottorien CO₂-päästöihin ja CO₂ päästöjen vähentämiseen ottamalla käyttöön uutta energiaa säästävää teknologiaa.

Seuraavaksi esitetään yhtälön 2 tekijät, jotka koskevat työssä esitettävää esimerkkialusta eli autonkuljetusalusta:

$P_{ME(i)}$ = Pääkoneiden teho -> 83% (asennettu teho MCR_{lim}) tai 75% (alkuperäisestä asennetusta tehosta MCR).

Capacity, Kuollut paino

$P_{AE(i)}$, Apukoneiden teho, IMO:n EEDI laskenta ohjeiston taulukon mukaisesti. Teho arvioidaan kulutetun sähkötehon mukaan. Tapauksissa jossa sähköteho taulukkoa ei ole saatavilla P_{AE} voidaan arvioida käyttämällä vuotuista keskiarvoa P_{AE} merellä, laivanpäältä monitoroituna (ennen EEXI sertifiointia)

V_{ref} , Laivan nopeus. Laivan nopeus 75% MCR teholla syväys tilanteessa vetoisuuden mukaan.

$$V_{ref} = V_{S,EEDI} \times \left[\frac{P_{ME}}{P_{S,EEDI}} \right]^{\frac{1}{3}} [solmua] \quad (4)$$

$V_{S,EEDI}$ = merikoeajo nopeus EEDI syväyksellä

$P_{S,EEDI}$ = Pääkoneen teho vastaten $V_{S,EEDI}$

Jos nopeus-teho (speed-power) käyrää ei ole saatavilla tai merikoeajoraportti ei sisällä EEDIä tai suunnittelu syväyttä, laivan nopeus V_{ref} voidaan arvioida. $V_{ref,app}$ lasketaan

yhtälön 5 mukaisesti:

$$V_{ref,app} = (V_{ref,avg} - m_V) \times \left[\frac{\Sigma P_{ME}}{0,75 \times MCR_{avg}} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ [solmua]} \quad (5)$$

$V_{ref,avg}$ = tilastollinen keskiarvo laivan nopeuden jakautumisesta tietyssä laivatyyppissä ja -koossa:

$$V_{ref,avg} = A \times B^C \quad (6)$$

A, B ja C ovat taulukossa 2 annettuja parametrejä

m_V on aluksen suorituskyky marginaali, minkä tulee olla 5% $V_{ref,avg}$:sta tai 1 solmu, kumpi tahansa on matalampi.

MCR_{avg} on päämoottoreiden MCR-jakauman tilastollinen keskiarvo. MPP_{avg} on moottoreiden MPP-jakauman tilastollinen keskiarvo tietyssä laivatyyppissä ja aluskossa, lasketaan yhtälöllä 7:

$$MCR_{avg} \text{ tai } MPP_{avg} = D \times E^F \quad (7)$$

D, E ja F ovat taulukossa 3 annettuja parametreja

Tapauksissa, joissa akselin/moottorin tehorajoitus on asennettu, aluksen nopeus V_{ref} , joka on likimääräinen $V_{ref,app}$ tulee laskea yhtälön 8 mukaisesti:

$$V_{ref,app} = (V_{ref,avg} - m_V) \times \left[\frac{\Sigma P_{ME}}{0,75 \times MCR_{avg}} \right]^{\frac{1}{3}} \text{ [solmua]} \quad (8)$$

SFC = sertifioitu spesifinen polttoaineen kulutus

$$SFC_{ME,app} = 190 \text{ [g/kWh]}$$

$$SFC_{AE,app} = 215 \text{ [g/kWh]}$$

CF = Konversiokerroin polttoainekulutuksen ja CO₂ päästöjen välillä.

Niille moottoreille, joilla ei ole NOx-tekniiseen tiedostoon sisällytetty testiraporttia ja joissa ei ole valmistajan määrittelemää SFC:tä, SFCapp-arvoa vastaava CF on laskettava yhtälön 9 mukaisesti:

$$C_F = 3.114[t \cdot CO_2/t \cdot Fuel] \quad (9)$$

Kaava 9 pätee vain diesel laivoille. muulloin tulee käyttää EEDI laskennan ohjeita pääkoneiden tehoon.

Korjauskerroin ro-ro rahtialuksille ja ro-ro matkustaja-aluksille (f_{RoRo})

$$f_{jRoRo} = \frac{1}{F_{nL}^\alpha \cdot \left(\frac{L_{pp}}{B_S}\right)^\beta \cdot \left(\frac{B_S}{d_S}\right)^\gamma \cdot \left(\frac{L_{pp}}{\sqrt{1/3}}\right)^\delta} ; jos f_{jRoRo} > 1 niin f_j = 1 \quad (10)$$

Froude numero:

$$F_{nL} = \frac{0.5144 \cdot V_{ref,F}}{\sqrt{L_{pp} \cdot g}} \quad (11)$$

$V_{ref,F}$ on laivan suunnittelunopeus joka vastaa 75% of MCR_{ME}

Taulukko 1 Roro alustyyppien eksponentit (MEPC 78, 2021 s.8)

Alustyyppi	Eksponentti			
	α	β	γ	δ
Ro-ro rahtialus	2,00	0,5	0,75	1
Ro-ro matkustajaalus	2,50	0,75	0,75	1

Kuutiotilavuus korjauskerroin ro-ro rahtialuksille (autonkuljetusaluksille) ($f_{cVEHICLE}$)

Ro-ro rahtialuksille joiden DWT/GT suhde on alle 0,35 tulee laskea:

$$f_{cVEHICLE} = \left(\frac{DWT/GT}{0,35}\right)^{-0,8} \quad (12)$$

Taulukko 2 Parametrit laivan tilastollisen keskinoupeuden laskentaan (MEPC 76)

APPENDIX

Parameters to calculate $V_{ref,avg}$

Ship type	A	B	C
Bulk carrier	10.6585	DWT of the ship	0.02706
Gas carrier	7.4462	DWT of the ship	0.07604
Tanker	8.1358	DWT of the ship	0.05383
Containership	3.2395	DWT of the ship where DWT ≤ 80,000 80,000 where DWT > 80,000	0.18294
General cargo ship	2.4538	DWT of the ship	0.18832
Refrigerated cargo carrier	1.0600	DWT of the ship	0.31518
Combination carrier	8.1391	DWT of the ship	0.05378
LNG carrier	11.0536	DWT of the ship	0.05030
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	16.6773	DWT of the ship	0.01802
Ro-ro cargo ship	8.0793	DWT of the ship	0.09123
Ro-ro passenger ship	4.1140	DWT of the ship	0.19863
Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	5.1240	GT of the ship	0.12714

Taulukko 3 Parametrit on päämoottoreiden MCR- ja MPP-jakaumien tilastollinen keskiarvon laskentaan (MEPC 76)

Gas carrier	21.4704	DWT of the ship	0.59522
Tanker	22.8415	DWT of the ship	0.55826
Containership	0.5042	DWT of the ship where DWT ≤ 95,000 95,000 where DWT > 95,000	1.03046
General cargo ship	0.8816	DWT of the ship	0.92050
Refrigerated cargo carrier	0.0272	DWT of the ship	1.38634
Combination carrier	22.8536	DWT of the ship	0.55820
LNG carrier	20.7096	DWT of the ship	0.63477
Ro-ro cargo ship (vehicle carrier)	262.7693	DWT of the ship	0.39973
Ro-ro cargo ship	37.7708	DWT of the ship	0.63450
Ro-ro passenger ship	9.1338	DWT of the ship	0.91116
Cruise passenger ship having non-conventional propulsion	1.3550	GT of the ship	0.88664

4 Hiili-intensiteetti

Toinen merkittävä MEPC 76:ssa istunnossa tehty päätös on alusten hiili-intensiteetin (CII) vuosittainen indikointi ja sen luokitus. Hiili-intensiteetti yhdistää kuljetetun rahdin ja kuljetun matkan kasvihuonekaasupäästöihin, eli sillä määritetään vertailukelpoisesti, kuinka paljon rahdin kuljettaminen tuottaa kasvihuonekaasupäästöjä. Hiili-intensiteetillä määritetään alukselle vuosittainen vähennyskerroin. Tällä kertoimella pyritään varmistamaan aluksen hiili-intensiteetin jatkuva parantaminen. Todellista operatiivista hiili-intensiteettiä verrataan vuotuisen vähennyskertoimeen. CII tulokset jakaa alukset viiteen eri luokkaan parhaaseen A luokkaan, sekä B, C, D, ja E luokkiin. Luokat on määritetty MEPC.354(78) Annex 16:ssa päivätty 10. kesäkuuta 2022.. Parhaimmille luokille luodaan

kannustimia hallintojen, satamaviranomaisten sekä muiden sidosryhmien osalta. Nämä kannustimet toimivat myös markkina ja rahoitus ajureina. Jos alus saa E-luokituksen, tai kolmena peräkkäisenä vuotena D luokituksen tulee sen toimittaa korjaussuunnitelma, jolla vähintään C tai korkeampi indeksi saavutetaan (DNV webinar, 2022). MEPC 78:ssa istunnossa 6-10. kesäkuuta 2022 vahvistettiin korjauskertoimet, jotka IMO:n työryhmä valmisteli kahdennessatoista istunnossaan. Kertoimet ja ohjenuorat ovat esitetty resoluutiossa MEPC.355(78), päivätty 10. kesäkuuta 2022.

4.1 Hiili-intensiteetin laskenta

Laskenta perustuu alukselle tehtyyn vuotuisen hiili-intensiteetti-indikkaattoriin.

Yksinkertaistettuna vuotuinen hiili-intensiteetti-indeksi esitettynä alla:

$$\text{Hiili-intensiteetti-indeksi} = \frac{\text{Vuositainen polttoaineenkulutus} \times \text{CO}_2 \text{ kerroin}}{\text{Vuositainen kuljettu matka} \times \text{Kapasiteetti}} \times \text{Korjauskertoimet}$$

Todellinen laskukaava kertoimeen on seuraavanlainen (IMO MEPC.355(78), 2022):

$$\frac{\sum_j C_{Fj} \left\{ FC_j - \left(FC_{Voyage,j} + TF_j + (0.75 - 0.03\gamma_i) \cdot (FC_{electrical,j} + FC_{boiler,j} + FC_{others,j}) \right) \right\}}{f_i \cdot f_m \cdot f_c \cdot f_{iVSE} \cdot Capacity \cdot (D_t - D_x)} \quad (13)$$

Missä:

j on polttoainetyyppi;

C_{Fj} kuvaa polttoaineen massaa CO2 korjauskertoimeen polttoainetyypille j 2018 EEDI laskentametodin mukaisesti kuten esitetty päätöslauselmissa MEPC.308(73), MEPC.322(74) ja MEPC.332(76):ssa

FC_j on kulutetun polttoaineen j totaalimassa kalenterivuodessa, kuten esitetty IMO DCS:n mukaisesti, muunnettuna grammoiksi.

$FC_{voyage,j}$ on tyypin j polttoaineen massa (grammoina), joka on kulutettu kalenterivuoden aikana kuljettuna matkana, ja joka voidaan vähentää kohdan 4.1 mukaisesti tämän ohjeen mukaan.

$TF_j = (1 - AFTanker) \cdot FCS_j$ kuvaa polttoaineen määrää j joka on poistettu STS tai sukkulasäiliöalus käytöstä, jossa $FCS_j = FC_j$ sukkulasäiliöaluksille ja FCS_j on STS-alusten STS-matkoilla käytetyn polttoaineen kokonaismäärä j . Jos $TF_j > 0$ niin

$$FC_{electrical,j} = FC_{boiler,j} = FC_{others,j} = 0;$$

AFTanker edustaa sukkulasäiliöaluksiin tai STS:iin sovellettavaa korjauskerrointa näiden ohjeiden kohdan 4.2 mukaiset matkat;

y_i on peräkkäinen numerointijärjestelmä, joka alkaa numerosta $y_{2023} = 0$, $y_{2024} = 1$, $y_{2025} = 2$, jne.

$FC_{electrical,j}$ on polttoainetyypin j massa grammoina, joka kuluu sähkötehon tuotantoon ja joka voidaan vähentää kohdan 4.3 mukaisesti

$FC_{boiler,j}$ on kattilan kuluttaman polttoainetyypin j massa (grammoina). vähennetään näiden ohjeiden kohdan 4.4 mukaisesti;

$FC_{others,j}$ on muiden vastaavien 4.5 kohdan mukaisten kuluttajien polttoainetyypin j massa (grammoina)

f_i on jääluokiteltujen alusten kapasiteetin korjauskerroin vuoden 2018 mukaisesti Ohjeet uusien alusten saavutetun EEDI:n laskentamenetelmästä. (resoluutiot: MEPC.308(73) MEPC.322(74) ja MEPC.332(76))

f_m on kerroin jääluokitelluille aluksille, joiden IA Super ja IA on määritelty sopimuksessa 2018 Ohjeistus uusien alusten saavutetun EEDI:n laskentamenetelmästä (resolution MEPC.308(73) sellaisena kuin se on muutettuna resoluutioissa MEPC.322(74) ja MEPC.332(76), ja kuten jatkossa muutetaan)

f_c on kemiallisten säiliöalusten kuutiotilavuuden korjauskerroin 2018 EEDI:n mukaan (resoluutio MEPC.308(73), sellaisena kuin se on muutettuna

resoluutiossa MEPC.322(74) ja MEPC.332(76), sellaisina kuin niitä voidaan edelleen muuttaa);

$f_{L\text{VSE}}$ on laivakohtaisten vapaaehtoisten rakenteiden korjauskerrointa parannus vuoden 2018 ohjenuoran 2.2.11.2 kohdan mukaisesti uusien alusten saavutetun EEDI:n laskentamenetelmä (resoluutio MEPC.308(73), sellaisena kuin se on muutettuna päätöslauselmilla MEPC.322(74) ja MEPC.332(76), sellaisena kuin se voidaan edelleen muuttaa), jota sovelletaan vain itsepurkaviin irtolastialuksiin

Capacity on kantavuus tai bruttotonnit kullekin laivatyyppille vuoden 2022 ohjeiden mukaisesti vertailulinjojen mukaan operatiiviselle hiili-intensiteettiindikaattorille ((CII Reference lines Guidelines, G2) MEPC.353(78));

D_t on kuljettu kokonaismatkaa merimaileina kun ten raportoitu IMO DCS:ssä

D_x edustaa kuljettua matkaa merimaileina matkajaksoille, jotka voidaan vähentää CII-laskelmasta näiden ohjeiden kohdan 4.1 mukaisesti (MEPC.355(78))

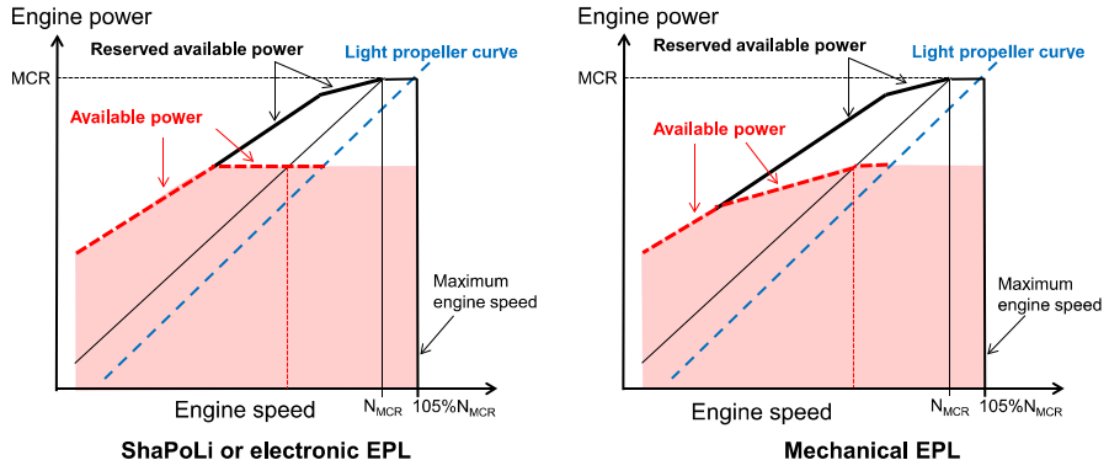
5 Energiatehokkuusratkaisuvaihtoehtoja alusten energiatehokkuuden parantamiseen

Olemassa olevien laivojen energiatehokkuutta voidaan koittaa parantaa monin tavoin. Yksinkertaisin tapa parantaa laivan energiatehokkuutta ja indeksejä on tehon rajoittaminen. Energiatehokkuus indekseissä konetehto on yksi määrittävä tekijä. Myös muita tapoja parantaa energiatehokkuutta on varsin paljon. Erilaisia menetelmiä ja teknologisia ratkaisuja esitellään tässä kappaleessa.

5.1 Tehonrajoitus

Tehoja voidaan rajoittaa rajoittamalla moottoritehoa (EPL) ja akselitehoa (SHAPOLI). Näillä toimilla siis rajoitetaan aluksen tehoa sekä nopeutta. Tehoa voidaan rajoittaa joko elektronisesti tai mekaanisesti kontrolloimalla polttoaineen syöttöä (IMO MEPC 76/15

add.2, s 5.). Akselitehon rajoittaminen tulee kyseeseen ei-konventionaalisissa propulsio systeemeissä, joissa polttoaineen syöttöä säätämällä tehoa ei voida rajoittaa. Tällöin laite/systemitoimittaja tekee tarvittavat laitteistot/ohjelmiston, joilla tehoa rajoitetaan



Kuva 2 Akseli- ja moottoritehon rajoitus (IMO MEPC 76/15 Add.2 annex 9. s5)

Kuvassa 2 kuvataan tehon rajoitusta. Jos alukselle on asennettu tai asennetaan EPL/SHaPoLi niin EEXI:ssä P_{ME} on joko 75% alkuperäisestä asennetusta tehosta (MCR) tai 83% rajoitetusta asennetusta tehosta (MCR_{lim}), riippuen siitä kumpi on pienempi.

EPL/SHaPoLi asennuksen myötä alus saa rajoitetun tehon (MCR_{lim}), uuden P_{ME} :n sekä uuden nopeuden. EPL tai SHaPoLiä tarjotaan usein ensimmäisenä vaihtoehtona laivoille, koska se on nopea, helppo sekä halpa asennuttaa olemassa olevaan laivaan. Suuressa kuvassa tämä tapa ei ole kuitenkaan kovin kattava ratkaisu, koska nopeuden laskeminen heijastuu rahtikapasiteettiin ja tulee näin ollen johtamaan tilanteeseen, jossa laivakapasiteettia tarvitaan lisää. Eli tällä ratkaisulla saadaan yksittäinen laiva mahdollisesti täyttämään EEXI kriteerit, mutta tarvitaan uusia aluksia kattamaan mahdollisesti tarvittava rahtikapasiteetti.

5.2 Operatiiviset energiatehokkuustoimet

Muita operatiivisia energiatehokkuutta parantavia toimia ovat myös reitti / matkaoptimointi, sääreititys, rungonpesun ja potkurin kiillotusvälin optimointi. Operointia ohjaa SEEMP eli Ship Energy Efficiency Management Plan, eli energiatehokkuuden hallintasuunnitelma. SEEMP tuli pakolliseksi vuonna 2013. SEEMP ohjaa ja auttaa tunnistamaan tapoja miten laivaa operoidaan mahdollisimman energiatehokkaasti ja siten vähentää CO₂ päästöjä. SEEMP pyrkii huomiomaan tuomaan esille mm. trimmin sekä syväyden optimoinnin, optimi

kuormituksen apumoottoreille, hukkalämmön käytön optimointi yms. SEEMP seuraa kehitystä, asettaa tavoitteita ja luo painetta toimintatapojen kehittämiseksi edelleen. (MEPC 63/23 Annex 9. s1-10, 2012)

5.3 Runkoon tehtävät muutokset

Muita mahdollisia vaihtoehtoja laivan energiatehokkuuden parantamiseen on muun muassa runkomuodon optimointi, esimerkiksi bulbikeula, ”ductail”, interseptorit, peräsin päivitykset, runkopinnan laadun parantaminen, keulapotkuritunnelin aukon ja ritilikön optimointi sekä merivesikaivojen ritilöiden optimointi

5.4 Polttoaineet

Polttoaineen vaihto ympäristöystävällisempään, on myös yksi mahdollisuus, jota tutkitaan valtavasti nykyään. Nykyiset säädökset huomioivat vain ”tank to wake” päästöt, eli laivan suoraan tuottamat päästöt. Polttoaineen alkuperällä ei vielä ole merkitystä indekseihin, mutta tähänkin on tulevaisuudessa tulossa muutos, esimerkiksi valmisteilla olevat FueLEU vaatimukset tulevat sisältämään koko polttoainetuotantoketjun huomioimisen kasvihuonekaasuindeksin laskennassa (DNV, 2023, s.1). Taulukossa 4 esitetään vaihtoehtoisia polttoaineita.

Taulukko 4 Vaihtoehtoiset polttoaineet (Ämmälä 2021)

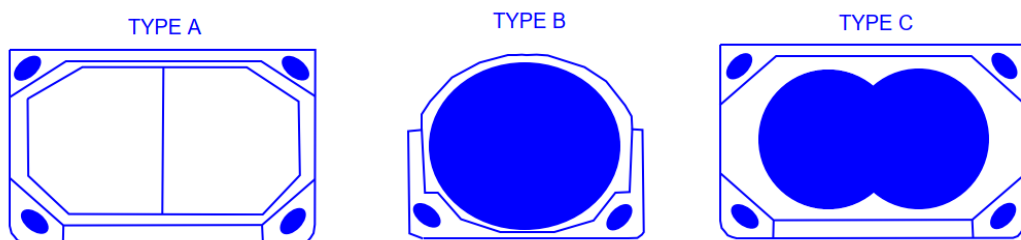
	FO	Diesel	Metaani	Propaani	Vety	Metanoli	Ammoniakki
Fossiiliset polttoaineet	VLSFO	MGO	LNG	LPG		Metanoli (fossiilinen)	
Sähkölpolttoaineet		e-MGO	e-LNG	e-LPG	e-LH2	e-Metanoli	e-Ammoniakki
Biopolttoaineet		Bio-MGO	Bio-LNG			Bio-metanoli	
"Blue fuels"					"Blue" LH2		"Blue" Ammoniakki

Blue fuels = Jalostettu fossiilisista hiilidioksidin talteenottoa käyttäen.

Polttoaineen vaihtoa mietittäessä on käytävä läpi useita asiaan vaikuttavia asioita. Ensinnäkin vaikutukset laivanmoottoreihin, onko niitä mahdollista muuttaa jälkiasennuksena toimimaan erityyppisillä polttoaineilla ja mitä lisälaitteita ja tuuletus yms. vaatimuksia vaihtoehtoiset polttoaineet tuovat mukanaan. Osa vaihtoehtoisista polttoaineista, kuten esimerkiksi metanoli on myrkyllistä (Moiraghtem, 2016, s.14) Toinen

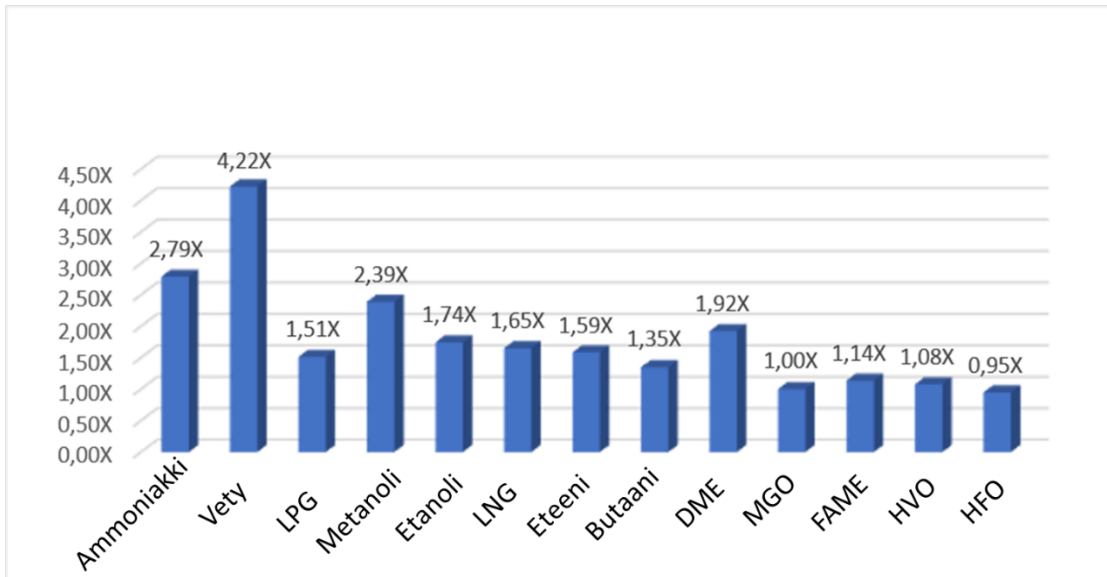
suuri tekninen kysymys on tilavaatimus. Eri polttoaineet vaativat erilaisia tilavuus ja varastointi tapoja, riippuen höyrystymispisteestä eli tiheydestä ja varastointi lämpötilasta sekä paineesta. Kun vertaillaan vaihtoehtoisten polttoaineiden säiliömahdollisuuksia, voidaan todeta että metanoli olisi helpoin polttoaine ja nestemäinen vety hankalin toteutettava. Metanolia voitaisiin laittaa vaikka olemassa oleviin painolastitankkeihin. Nestemäinen Vety vaatisi taas tyhjiöeristetyn säiliön taikka erittäin tehokkaan kiehumiskaasun käsittelyn. Nestemäisen maakaasun (LNG) käyttö polttoaineena on kasvattanut suosiotaan, ja sitä myötä on siirrytty suurista säiliömalleista pienempiin LNG-polttainesäiliöihin. LNG:n säiliöille löytyy jo useita eri valmistajia ja erilaisia säiliöteknologiaa on nykyään saatavilla kattavasti. Kun verrataan ammoniakkia LNG:hen, suurin haaste on ammoniakin myrkyllisyys ja sen sopimattomuus useiden käytettyjen materiaalien kanssa. LNG:lle ja ammoniakille voidaan käyttää samoja säiliötyyppejä. Ammoniakin kanssa tulee huomioida materiaalirajoitukset, toisaalta ammoniakki ei ole niin kylmää ja kaikkia määräyksiä ei välttämättä tarvitse soveltaa. Säiliön materiaalit voidaan kuitenkin valita niin, että sama tankki soveltuu sekä LNG:lle että ammoniakille.

Lisääntyvä tilantarve helposti vähentää rahtikapasiteettia. Kuvassa 3 esitetään eri tyyppisiä LNG tankkityyppejä:

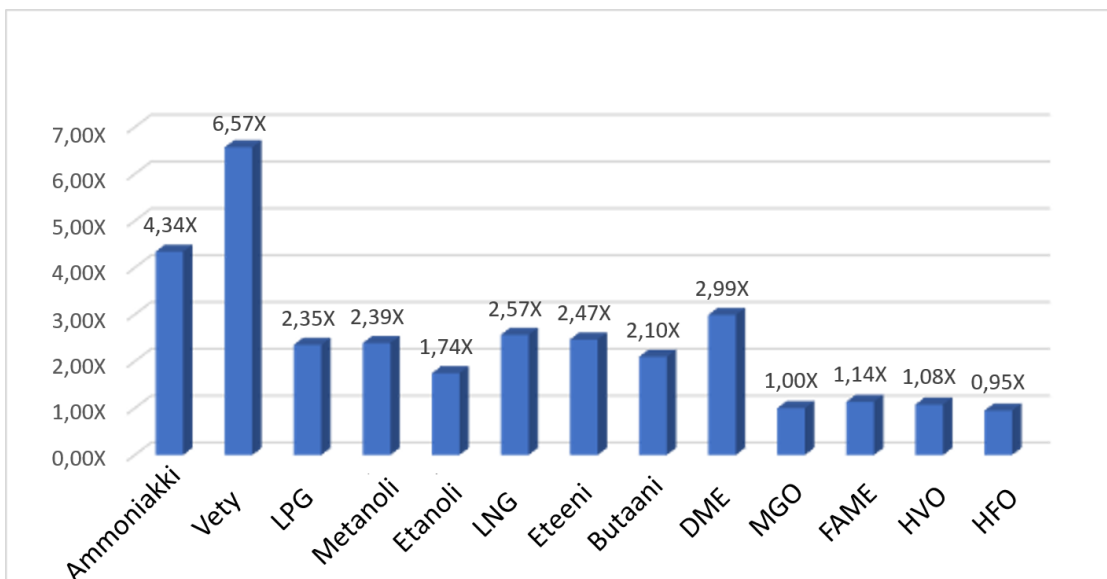


Kuva 3 LNG tankki tyyppit (muokattu Kim et al. 2018 table 1)

Myös säännöt tuovat tankeille mahdollisia lisävaatimuksia ja esimerkiksi metanoli polttoaineelle vaaditaan silti tyhjä suljettu tila tankin ympärille (DNV RU-SHIP Part 6, 2021, s 173). Eli eri polttoaineiden vaatimat tilavuudet eivät ole suoraan verrannollisia toisiinsa. Kuvissa 4 ja 5 esitetään eri polttoaineiden vaatimia tankkikapasiteetteja ja tilavuusvaatimuksia verrattuna tyyppillisesti käytettyyn MGO:hon. Vety, ammoniakki ja kaasut ovat esitetty nestemäisessä muodossa.



Kuva 4 Polttoaineiden vaatimia tankkikapasiteetteja verrattuna MGO:hon (Deltamarin Oy projekti arkisto)



Kuva 5 Polttoaineiden tilavuusvaatimuksia verrattuna MGO:hon (Deltamarin Oy projekti arkisto)

Kuvista 4 ja 5 nähdään, että esimerkiksi ammoniakkin tilantarve on yli nelinkertainen perinteiseen MGO:hon verrattuna. Tämä johtuu siitä, että normaaleja runkotankkeja ei voida käyttää. Lisäksi todettakoon, että esimerkiksi ammoniakkimoottorin hinta on jopa 67% enemmän per kilowatti, kuin konventionaalisen raskaalla polttoöljyllä käyvän moottorin (Kim et al. 2022 s.22).

Suuri haaste vaihtoehtoisissa polttoaineissa on jakeluinfrastruktuurin puute, sekä kokonaisympäristöystävällinen tuotantoketjun varmistaminen. Tässä työssä tutkitaan vain laivan suoria päästöjä (tank to wake), kokonaispolttoainepäästöjä ei tutkita (well to wake).

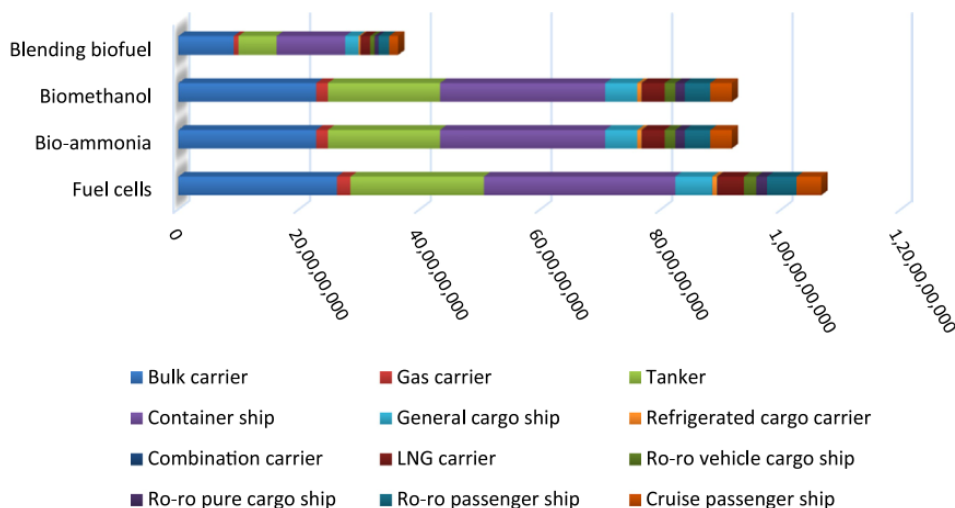
Vetyä voidaan pitää vihreänä polttoaineena, koska siitä ei käytännössä tule päästöjä. Vety vaatii nestemäisessä muodossakin, missä sen tilavuusenergiatiheys on tehokkain, paljon tilaa perinteisiin polttoaineisiin verrattuna. Nestemäinen vety on erittäin kylmää ja vaatii siis huomattavasti enemmän tilaa kuin tavanomaiset polttoaineet ja vielä esimerkiksi LNG:hen verrattuna yli kaksi kertaa enemmän tilaa, puhtaasti energiantiheydellä verrattuna. Vetyä ei tässä työssä huomioida, koska se on vaikeasti toteutettavissa konversio aluksiin.

Ammoniakkia pidetään hyvänä vaihtoehto vedylle, koska se vaatii vähemmän tilaa kuin vety ja säilytettäessä lämpötila vaatimus ei ole yhtä kylmä kuin nestemäisellä vedyllä. Kuten aiemmin mainittu ammoniakkikin vie enemmän tilaa kuin perinteiset polttoaineet, se on erittäin syövyttävää monille materiaaleille ja erittäin haitallinen ihmiselle. Se on matkustaja-aluksiin siis toistaiseksi hyvin varauksellinen polttoaine. Toistaiseksi ammoniakkin tuotanto perustuu fossiiliin polttoaineisiin, mutta myös vihreä ammoniakki on mahdollista. Ammoniakkia voidaan käyttää polttokennoissa tai polttomoottoreissa. MAN Energy Solutiosilla on testauksessa ensimmäinen ammoniakki kaksitahtilaivamoottori. Ensimmäiset moottorit, jotka pystyvät käyttämään ammoniakkia odotetaan olevan laivakäytössä vuonna 2024 (MAN 2021). Testaus on pitkäjänteistä ja turvallisuus aspektien kanssa ei haluta tehdä kompromisseja, vaikka markkinat selvästi haluaisivat nopeammin tuotteita.

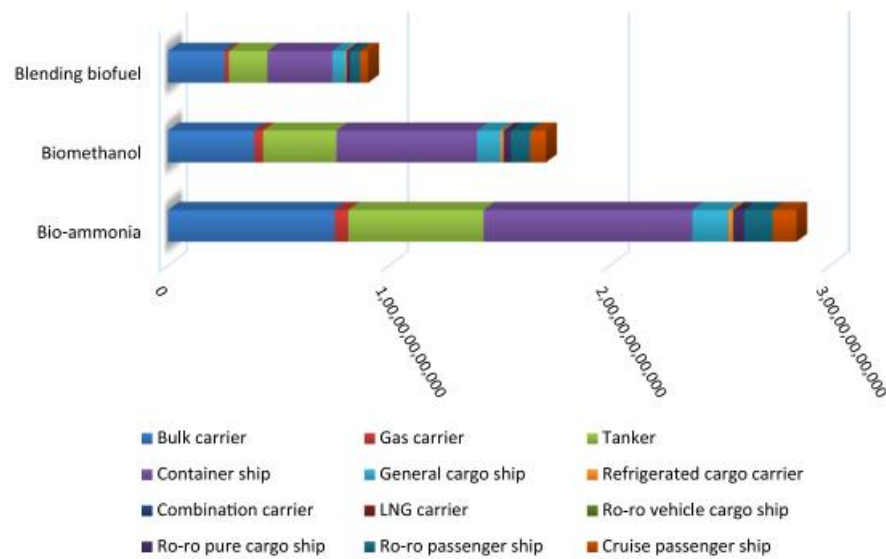
Metanoli on polttoaine, joka on ollut jo muutaman vuoden koekäytössä useammalla laivayhtiöllä. MAN energy solutionin kaksitahtimoottoreiden tilauskannassa on jo 33% uusista moottoreista metanoli käyttöisiä (MAN 2023). Metanoliakin voidaan käyttää polttokennossa tai polttomoottorissa. Metanolin haasteita ovat hinta ja saatavuus. Metanoli kohtaa samanlaisia haasteita kuin vety ja ammoniakki, tällä hetkellä sitä tuotetaan pääasiassa maakaasulla. Uusista vaihtoehtoisista polttoaineista metanoli on lähimpänä perinteisiä polttoaineita, sitä voidaan varastoida normaaleissa pinnoitetuissa runkosäiliöissä. Alhaisen leimahduspisteensä vuoksi tarvitaan tyhjiä tiloja säiliön ympärillä, mikä huonontaa tilankäyttöä hieman.

MAN energy solutions kertoo, että heidän kaksitahtimoottori ME-GI pelkän moottorikonversion hinta diesel käyttöisestä LNG käyttöiseen maksaa moottorityypistä riippuen 3,5 miljoonasta viiteen miljoonaan euroon. Tämän hinnan päälle tulee siis, tankkikustannukset, suunnittelukustannukset, apulaitekustannukset, kuten esimerkiksi bunkkeriasemat jne. Samalla MAN energy solutions arvio, että vastaavan moottorin metanoli konversio on 0,5 miljoonasta kahteen miljoonaan kalliimpi kuin LNG konversio. Kuitenkin kokonaisuutena MAN energy solutions arvio metanoli konversion hinnan olevan noin 30 % pienempi kuin LNG konversion, johtuen edullisemmista apulaitteista ja tankeista. (MAN 2022) Tämä luku siis kuvaa vain pääkone konversiota. Kun mukaan otetaan apukoneet ja kattila, nousee kokonaiskustannus LNG konversion tasolle.

Czermanski et. al (2022) on tutkinut vaihtoehtoisten polttoaineiden mahdollisuuksia koko laivakannan hiilidioksidi päästöjen pienentämiseen. Kuvissa 6 ja 7 osoitetaan, millaisiin kokonaisvaltaisiin tavoitteisiin eri polttoaineilla on mahdollista päästä ja minkä tällaisten investointien hinta olisi. Koko laivaston laskettu hiilidioksidi päästö määrä on n. 115 000 000 t ja täydelliseen tulokseen päästäisiin koko laivueen osalta vetypolttokeinoilla. Tästäkin tutkimuksesta voidaan todeta, että järkevästi kohti tavoitteita päästään erilaisilla biopolttoaine sekoituksilla. Czermanski et. al on jättänyt hinta-arvion vetyyn siirtymisestä kokonaan pois, koska tämän päivän tuotantomenetelmillä hinta kasvaa äärettömäksi.



Kuva 6 CO₂ vähennys mahdollisuudet vaihtoehtoisilla polttoaineilla [t] (Czermanski et al 2022)



Kuva 7 laivaston polttoainevaihdos hinta [USD] (Czermanski et al. 2022)

Bayraktar & Yuksel (2023) laskivat energiatehokkuus indeksin ja hiili-intensiteetin 7:lle eri esimerkkitapaukselle. Laskennassa käytettiin samoja IMO:n määrittämiä EEXI laskentakaavoja. Bayraktar & Yuksel tutkivat HFO:n ja MDO:n vaihtoehtoina LNG:tä, metanolia ja näiden lisäksi moottoritehonrajoituksen vaikutuksia EEXI:in ja hiili-intensiteettiin. Alustyypeistä tutkimuksessa mukana oli kuivarahtialus, Kaasutankkeri, öljytankkeri, konttilaiva sekä yleislastialus. Bayraktarin & Yukselin laskentatuloksista voidaan todeta, että nykyisellään HFO ja MDO polttoaineella tutkitut alukset ovat hyvin lähellä jo nyt indeksien referenssitason ylärajaa, mutta käyttämällä vaihtoehtoisia polttoaineita, kuten LNG:tä tai metanolia voidaan EEXI ja hiili-intensiteetti arvoja saada laskemaan alaspäin (Bayraktar & Yuksel 2023, s. 12)

5.5 Lisälaitteet, innovatiiviset energiatehokkuusteknologiat

Energiatehokkuutta parantavat myös laivaan jälkiasennettavat tuulipropulsioratkaisut monine muotoineen, kuten esimerkiksi siipipurjeet, roottoripurjeet, leijapurjeet ja ilmatäytteiset purjeet.

Lisälaitteiden tuomaa energiansäästöä laskettaessa voidaan tukeutua IMO:n MEPC.1/Circ.896 liitteisiin. Liitteen kohdassa 1&2 kuvataan miten purjeiden ja muiden energiaratkaisujen vaikutus energia tehokkuus indekseihin tulee laskea. Kyseisissä liitteissä esitetään laskentatapa ilmavoitelulle, tuulipropulsiolle, lämmön talteenotolle sekä

aurinkosähköratkaisuille. Ohjeistuksessa teknologiat jaetaan viiteen kategoriaan A, B-1, B-2, C-1, C-2. A ja B kategoriat vaikuttavat pääkoneen tehontarpeen vähenemiseen, kun taas C kategoria apukonetehton vähenemiseen (MEPC.1/Circ.896 Annex s.3, 2021). Taulukossa 5 esitetään mihin kategorioihin erilaiset teknologiset ratkaisut jakautuvat. A kategorian ratkaisuja ei voida erottaa aluksen kokonaistehokkuudesta, nämä ovat aina siis läsnä ja vähentävät pääkonetehoa. B-kategorian ratkaisut voidaan erottaa aluksen kokonaistehokkuudesta ja ne myös vähentävät aluksen pääkonetehton tarvetta. B-1 kategoria vähentää vastusta ja B-2 kategoria luo lisää propulsiotehoa. C kategorian ratkaisut vähentävät aluksen apukonetehoa. C-1 kategorian ratkaisut ovat aina käytössä (esimerkiksi lämmöntalteenotto) kun taas C-2 kategorian ratkaisut riippuvat ympäristötekijöistä esimerkiksi auringosta saatava teho.

Taulukko 5 Innovatiiviset energiatehokkuusteknologia kategoriat (Muutettu MEPC.1/Circ.896 Annex s.3 2013)

Pääkonetehton vähennys			Apukonetehton vähennys	
Kategoria A	Kategoria B-1	Kategoria B-2	Kategoria C-1	Kategoria C-2
Ei voida erottaa aluksen kokonaistehokkuudesta	Voidaan erottaa aluksen kokonaistehokkuudesta		Aina käytössä	Riippuu ympäristötekijöistä
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
Rungon matalavastus pinnoitus Rungon vastuksen optimointi Peräsimen vastuksen optimointi Potkuri suunnittelu	Rungon ilmavoitelu	Tuulipropulsio	Lämmöntalteenotto	Aurinkosähkö

5.5.1 Tuulipropulsio

Purjeita mietittäessä tulee ottaa huomioon useita asioita, kuten vakavuus, näkyvyys, laivanrakenteet ja väsyminen, tarvittavat vahvistukset sekä liittyvät järjestelmät. Näitä ovat esimerkiksi sähköjärjestelmät, sekä hydraulikkajärjestelmät jotka mahdollistavat purjeiden ohjaamisen / trimmaamisen sekä mahdollisen kaatamisen ja tai kokoon taittamisen. Purjeita

valittaessa sopivan kombinaation toimivuus ja tehokkuus on määritettävä ja erityisesti reitin/reittien keskimääräiset tuuliolosuhteet tulee huomioida suunnittelussa. Kuvissa 8 ja 9 esitetyt leijapurje ja roottori purje kuvaavat tuulipropulsio ratkaisujen monimuotoisuutta. Leijapurje vaatii miehistöltä huomattavaa työpanosta, kun taas roottoripurjeen operointi hoituu pääosin automaation toimesta.

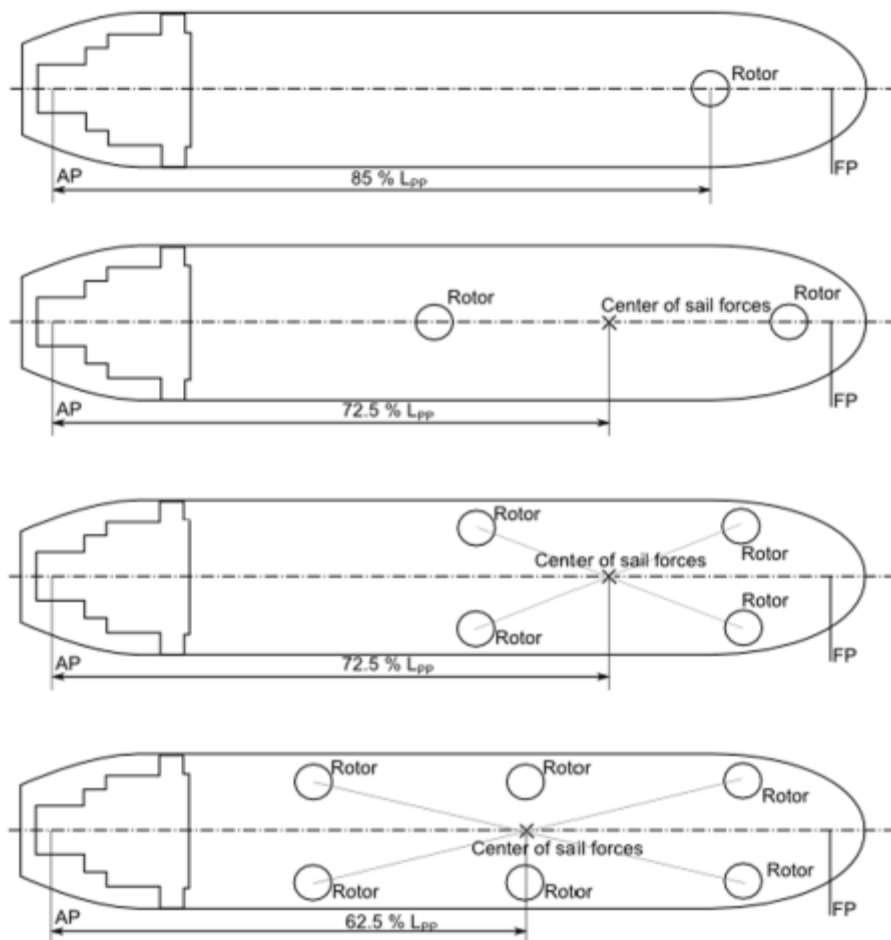


Kuva 8 Leijapurje (Flickr / Tidewater Muse 2007)



Kuva 9 Roottoripurjeet (Wikimedia commons / Wilsca 2008)

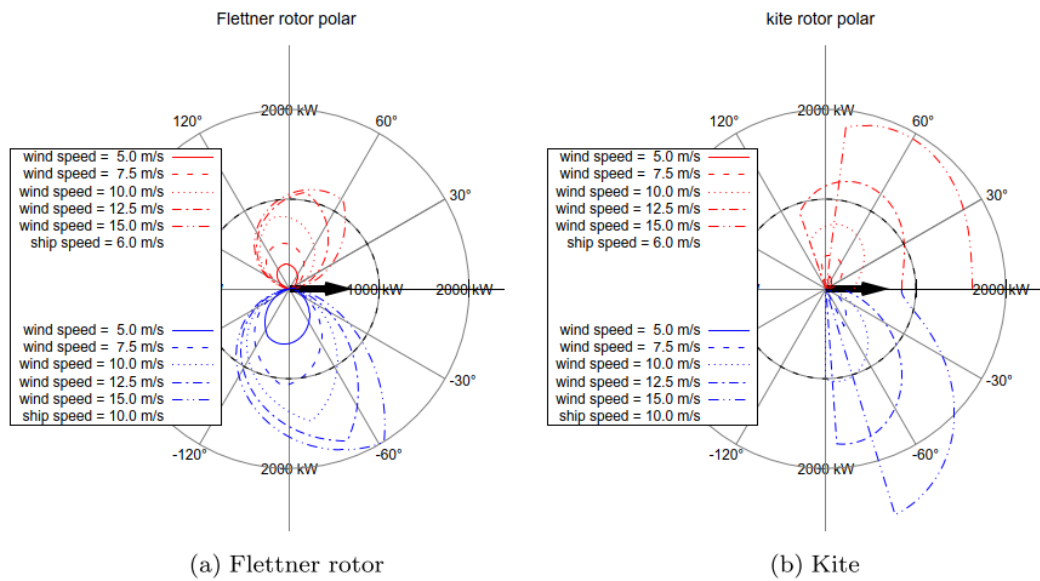
Tuuliolosuhteilla, tuulennopeudella ja suunnalla on valtava merkitys purjeista saatavaan hyötyyn. Tillig et al. tutkivat MR-tankkeriin asennettavia roottoripurjeita ja totesivat tuulen voimakkuuden nousun 12 solmusta 16 solmuun lisäävän voimia roottoripurjeessa jopa 40 % (Tillig et al. 2020 s.16). Kuvassa 10 on esitetty erilaisia vaihtoehtoisia roottoripurje asennusjärjestyksiä kuivarahahti alukseen.



Kuva 10 Erilaisia roottoripurje järjestelyjä MR tankkerissa (Tillig et al. 2020 s. 12)

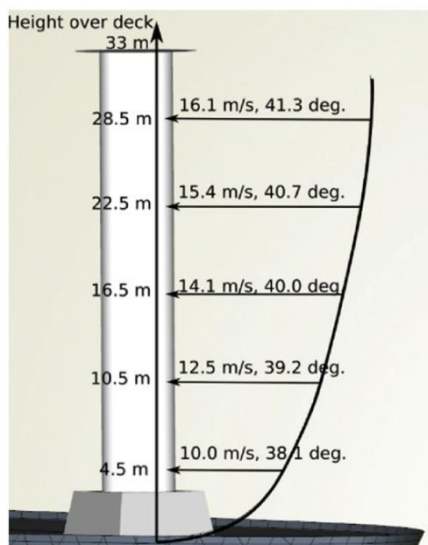
Erilaiset purjetyypit toimivat erilaisissa olosuhteissa ja sen vuoksi valittaessa sopivaa purjetyyppiä on reitin olosuhteet selvitettävä tarkasti. Kuvassa 11. Traut et al. esittää polaarikäyrät flettner roottorille sekä leija purjeelle. Kuvasta nähdään, kuinka erityyppiset purjeet ovat ominaisuuksiltaan. Leijapurje toimii vain myötäisillä tuulilla, kun taas roottoripurje toimii myös tehokkaasti vastaisilla tuulilla. Roottoripurje sallii siis reitillä suuremman tuulensuuntavaihtelun. Punaiset käyrät kuvaavat purjeen tuomaa tehoa aluksen nopeuden

ollessa 6 m/s ja siniset nopeuden ollessa 10 m/s. Vain puolet käyrästä on näytetty, koska ne ovat identtiset styyrpuurin ja paapurin puoleisilla tuulilla.



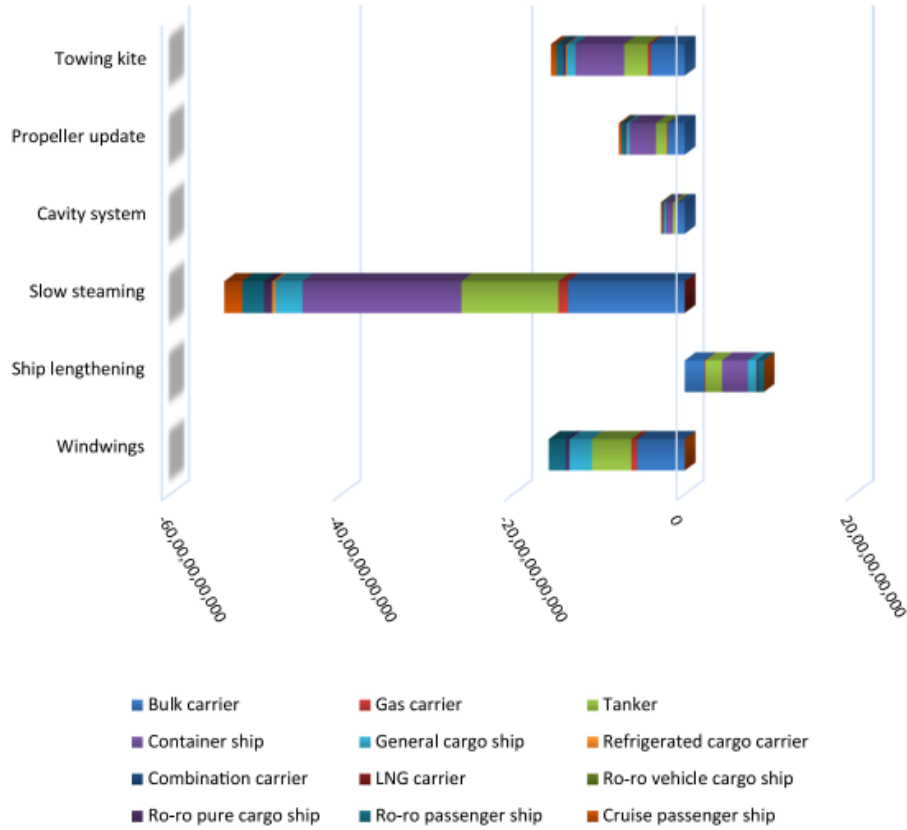
Kuva 11 Purjeiden polaarikäyrät (Traut et al. 2014 s. 367)

Traut et al. tutkielmassa tutkittiin purjeista saatavaa propulsiotehoa viidellä eri alustyyppillä ja viidellä eri reitillä. Tulokset vaihtelivat välillä 1 % ja 32 % saavutetulla tehohyödyllä (Traut et al. 2014 s. 366). Purjeiden tuomat polttoaineen säästöt riippuvat siis hyvin paljon laivan reitistä sekä kulloisistakin sääolosuhteista. Roottoripurjeen koko vaikuttaa myöskin laitteen tehokkuuteen. Kuten tiedetään erikorkeuksissa tuulen nopeus on erilainen. Korkeammalla tuulee aina enemmän, veden pinta hidastaa virtausta. Kuvassa 12 on visualisoitu nopeutta erikorkeuksilla:



Kuva 12 Tuulen nopeus eri korkeuksilla (F. Tillig and J.W. Ringsberg s.4, 2020)

Cermanski et al. on tutkinut lisälaitteiden vaikutusta koko laivaston hiilidioksidi päästöihin. Kuvasta 13 voidaan todeta, että heidänkin tutkimuksen mukaan kone-/ akselitehon rajoitus on tehokkaimpia keinoja pienentää olemassa olevan aluskannan hiilidioksidi päästöjä, tuulipropulsio he osoittava myös tehokkaana vaihtoehtona.



Kuva 13 Teknologien vaikutus hiilidioksidi päästöihin (Cermanski et al. 2022)

Tuulipropulsio kuuluu kategoriaan B-2 innovatiivisissa energiatehokkuus teknologia kategoroinnissa. Saavutetun hyödyn laskemiseen voidaan käyttää MEPC.1.Circ.896 liitteessä sivulla 11 määriteltyä laskentakaavaa:

$$(f_{eff} \cdot P_{eff}) = \left(\frac{1}{\sum_{k=1}^q W_k} \right) \cdot \left(\left(\frac{0.5144 \cdot V_{ref}}{\eta_D} \sum_{k=1}^q F(V_{ref})_k \cdot W_k \right) - \left(\sum_{k=1}^q P(V_{ref})_k W_k \right) \right)$$

$$\text{kun, } F_1 - F_k \geq 0 \wedge F_{k-1} - F_k \geq 0 \quad \text{ja} \quad \sum_{k=1}^{q-1} W_k < \frac{1}{2} \wedge \sum_{k=1}^q W_k \geq \frac{1}{2}$$

(14)

jossa,

$(f_{\text{eff}} * P_{\text{eff}})$ = käytettävissä oleva tehollinen teho kW:na määritellyn tuulipropulsio järjestelmästä. f_{eff} ja P_{eff} yhdistetään laskelmassa, koska saatavuus ja teho on matriisioperaation tulos, joka käsittelee tuuliolosuhteiden todennäköisyyttä ja järjestelmästä saatavaa tehoa.

0.5144 = on konversio kerroin solmuista metreihin sekunnissa (m/s)

V_{ref} = on laivan referenssinopeus solmuissa.

η_D = on pääpropulsiohyötysuhde 75 prosentin pääkoneen(/koneiden) MCR:stä. η_T tulee olla [0.7], jos muuta ei ole määritetty.

$F_{(V_{\text{ref}})_k}$ = vallitsevan tuulen propulsiojärjestelmän voimamatriisi laivan annetulle nopeudelle

W_k = globaali tuuliolosuhteiden todennäköisyys matriisi.

$P(V_{\text{ref}})_{i,j}$ = matriisi, jolla on sama yksikkö kuin $F(V_{\text{ref}})_{i,j}$ ja $W_{i,j}$ ja se kuvaa tuulivoimajärjestelmän tehoa kilowatteina

$F_{(V_{\text{ref}})_k}$ voidaan määrittellä kolmella eri tavalla (MEPC.1.Circ.896 s. 12, 2021)

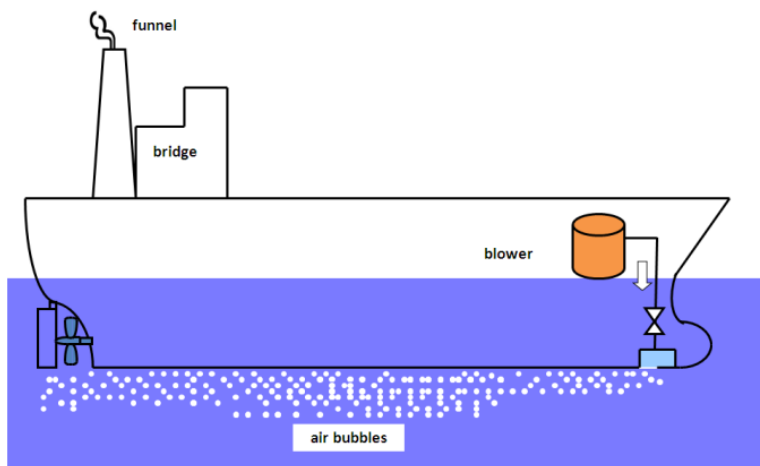
1. tuulitunnelimallikoe
2. CFD / numeerinen tietokonelaskenta
3. täydenmittakaavanmallikoe

Eli voimamatriisin määrittäminen vaatii mittavat mallijärjestelyt tai tietokonesimulaation.

Esimerkkinä Lindstad et al. (2022) ovat tutkineet tuulipropulsiota 229 m supramax aluksessa. Tutkimuksessa he valitsivat 5 kappaletta 26 metriä korkeaa ja 4 metriä halkaisijaltaan olevaa roottoria. He ovat ja käyttäneet jokaiselle roottoripurjeelle netto tehoa 100 kW ja maksimi tehona 250 kW, eli yhteen laskettu propulsioteho olisi tällöin 500 kW - 1250 kW. Tällaisella konfiguraatiolla voitaisiin päästä jopa 40% säästöihin kyseisen tyyppisessä aluksessa (Lindstad et al. 2022 s.3)

5.5.2 Ilmavoitelu

Purjeiden lisäksi aluksen rungon energiatehokkuutta voidaan lisätä myös asentamalla alukseen ilmavoitelu. Ilmavoitelu järjestelmällä siis puhalletaan ilmakuplia aluksen pohjaan. Tämä vähentää rungon kitkavastusta ja näin ollen tekee aluksesta energiatehokkaamman. Polttoaineen kulutus pienenee ja päästöt vähenevät. Ilmavoitelun toteuttamiseksi aluksiin tulee asentaa paineilmakompressoreita, joiden teho on merkittävä sekä aluksen pohjaan lisättävät eräänlaiset suutinkaivot. Suuttimista puhalletaan mikroilmakuplia aluksen tasaisen pohjan alueelle. Ilmavoitelu järjestelmä kuulu innovatiivisten B-1 kategoriaan ja sen vaikutus eeksi laskentaan ja kaavat on esitetty MEPC.1Circ.896 annexissa alkaen sivulta 5. Kuvassa 14 esitetään yksinkertaistetusti ilmavoitelun toimintaperiaate.

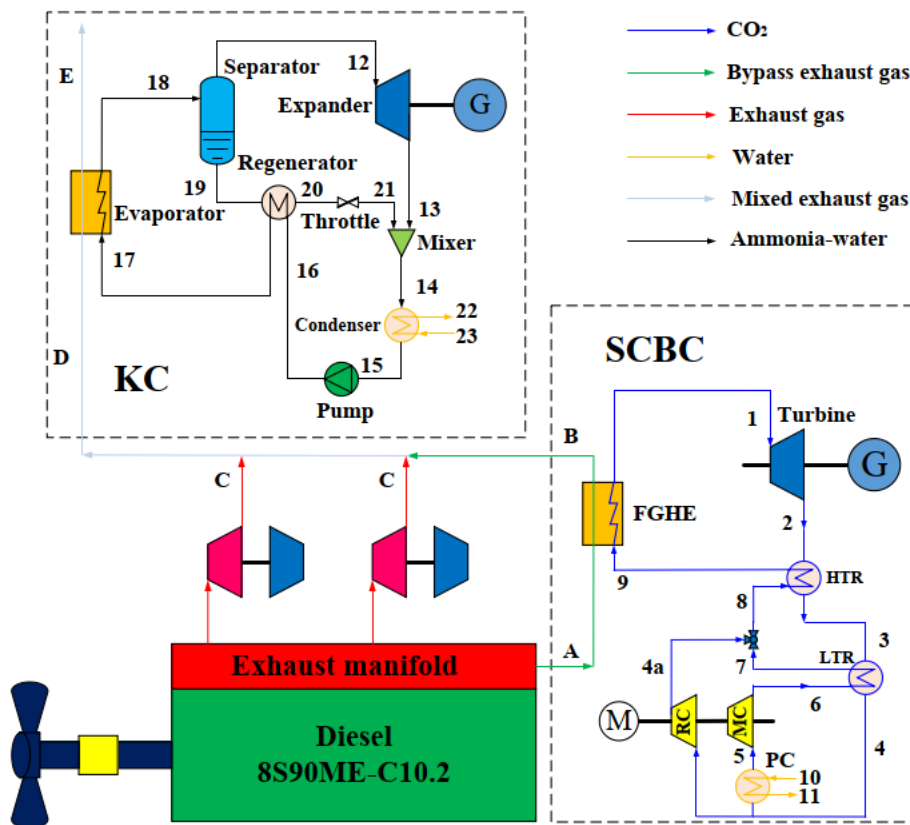


Kuva 14 Ilmavoitelu (MEPC/Circ.896 Annex 1 s. 5, 2021)

5.5.3 Lämmöntalteenotto

Lämmöntalteenotto kuuluu IMO:n innovatiivisten teknologioiden C1-kategoriaan. Mahdollista aluksella syntyvää ylimääräistä lämpöä voidaan hyödyntää erilaisilla teknologioilla. Esimerkiksi risteilijöissä joissa on paljon jäähdytystehoa, voidaan lämpöä hyödyntää käyttämällä absorptio jäähdyttimiä perinteisten kompressorin jäähdyttimien sijaan. Lisäksi makeaveden tuotantoa voidaan vaihtaa evaporaattoreista käänteisosmoosiin, jolloin vapautuu lämpöä käytettäväksi mahdollisesti muihin tarkoituksiin. Ylimääräistä lämpöä voidaan hyödyntää esimerkiksi orgaanisten kiertoaineiden käyttöön perustuvalla kierto prosessilla (ORC) tehtävään sähköön, tai ylimääräisestä höyrystä voidaan tehdä sähköä höyryturbiinilla. Muita teknologisia hukkalämmön talteenotto mahdollisuuksia ovat myös superkriittisen hiilidioksidiin Brayton kierto prosessi (SCBC) sekä Kalina prosessi (KC).

Erilaisten prosessien yhdistelmällä voidaan saavuttaa entistä parempia tehokkuuksia. (Feng et al. 2020). Esimerkkinä yhdistelmä kierrosta kuvassa 15 Feng et al esittää lämmöntalteenotto kierto yhdistelmän, jossa SCBC kierto on liitetty pakokaasujen ohituslinjaan. Moottoritehon ollessa yli 85 %MCR ohitus aukeaa (A) ja pakokaasu virtaa suoraan SCBC piiriin. KC kierto on mukana aina, myös pienemmillä moottoritehoilla ahtimien (C) jälkeen. Laskenta ja vaikutukset EEXI laskentaan on esitetty MEPC.1Circ.896 annexissa alkaen sivulta 24.



Kuva 15 Yhdistetty Kalina ja superkriittinen hiilidioksidipohjainen Brayton kierto prosessi (Feng et al. 2020. s 5). ”

Lämmöntalteenottojärjestelmissä on kuitenkin pitkä takaisinmaksuaika, eli ne eivät ole kovinkaan kustannustehokkaita (Schoer et al 2022 s.12). Kuitenkin yhdistettynä taajuusmuuntajilla toimivaan jäähdytysjärjestelmään laitteistoista voidaan saada enemmän irti. Lämmöntalteenottojärjestelmien vaikutus ja menetit EEXI laskentaan on kuvattu MEPC.1-Circ896 annexissa alkaen sivulta 24.

5.5.4 Aurinkosähkö

Viime vuosina myös yksityisessä rakentamisessa hyvinkin paljon yleistynyt uusiutuvan energian tuotanto muoto, aurinkopaneelit sopivat myös laivakäyttöön. Alustyyppistä riippuen aurinkopaneeleille löytyy paljonkin tilaa. Alusten kuitenkin liikkuesa käytännössä jatkuvasti, optimista tulokulmaa ei paikalleen asennettaville paneeleille saada. Paneelit tulee käytännössä asentaa vaakatasoon, jolloin hyötysuhde ei pysy parhaimmillaan. Aurinkopaneelien vaikutus EEXI laskentaan ja menetit on myös esitetty MEPC.1-Circ896 annexissa sivulla 27 alkaen.

5.5.5 Taajuusmuuntajakäyttöiset apulaitteet

Energian kulutusta voidaan pienentää aluksilla merkittävästi, jos niiden apulaite järjestelmiä päivitetään älykkäästi säätyviksi. Esimerkiksi jatkuvasti käyvät järjestelmät, kuten moottoreiden jäähdytysvesi pumput voidaan muuttaa taajuusmuuttaja käyttöisiksi, samoin kuin konehuoneen tuuletus. Lämpötila ja paine antureiden avulla käyntinopeudet ja virtaukset saadaan muutettua tarvetta vastaaviksi. Nykypäivänä taajuusmuuntajien hinnat ovat laskeneet. Tämä tapa säästää energiaa on hyvin kustannus tehokas (Schoer et al. 2022 s. 12). Toki tehokkuuden paranemiseen vaikuttavat myös ulkoiset tekijät, kuten meriveden ja ulkoilman lämpötilat. Kylmässä vedessä jäähdytysvettä tarvitaan huomattavasti vähemmän, kuin yleisessä mitoitus lämpötilassa (32 C °) ja pumppujen kapasiteettia voidaan vähentää merkittävästi.

6 Case study, esimerkkitapaus

Esimerkkinä ratkaisuvaihtoehtoja vertaillessa käytetään eräästä 6500 CEU autonkuljetusalusta (PCTC), josta Deltamarin Oy:llä on tiedossa päämitat, kuvaus laivankoneistosta sekä operointitietoa reitistä. Tämän esimerkin ympärillä tutkitaan erilaisten ratkaisujen vaikutusta aluksen energia tehokkuuteen ja sitä määrittäviin indekseihin. Aluksessa on mekaaninen propulsio ja se kuuluu EEXI kategoriaan ro-ro cargo vehicle carrier, eli kyseisen kategorian parametrejä käytetään EEXI arvon laskentaan. Laskennassa käytetään excel ohjelmistoon syötettyjä aikaisemmissa kappaleissa esiteltyjä IMO:n EEXI kaavoja. Kyseinen ohjelmisto on kehitetty Deltamarin Oy:n sisäiseen käyttöön.

6.1 Tietoa esimerkkialuksesta

Taulukko 6 Case aluksen päämitat

Leveys	32	m
Pituus	190	m
Syväys (kesävesilinja)	10	m
Kuollutpaino (kantavauus kesä syväydessä)	17525	DWT
Laivan kevytpaino	20400	LWT
Bruttovetoisuus	57400	GT
Uppouma volumetrinen	37000	m ³
Asennettu pääkoneteho	13500	kW

Taulukko 7 Case aluksen nopeus-teho (speed-power) taulukko

nopeus [solmua]	akseliteho P [kW]	korjauskerroin	akseliteho, 0% S.M. PS [kW]
18,0	7 650	1,00	7650
19,0	9 200	1,00	9200
20,0	11 200	1,00	11200
21,0	13 200	1,00	13200

6.2 Esimerkkialuksen EEXI laskenta

Jotta työssä saadaan määriteltyä erilaisten energiatehokkuus ratkaisujen vaikutuksia aluksen saavuttamaan EEXI arvoon, lasketaan lähtökohdaksi aluksen nykytilanne. Kaikissa laskelmissa käytetään pohjana taulukon 6. ja 7. tietoja laivasta. Nämä tiedot syötetään yhtälöön 2. Energiatehokkuusratkaisuja verrataan lähtötilanteen laskelmaan. Laskelmat löytyvät työn liitteenä.

6.2.1 PCTC Case 1. HFO

Aluksen polttoaineena käytetään raskasta polttoöljyä eli HFO:ta. Laskennassa käytetään taulukon 8 arvoja:

Taulukko 8 Raskaanpolttoöljyn parametrit

HFO kapasiteetti aluksella	2700	m ³
HFO tiheys ρ_{HFO}	991	kg/m ³
HFO tankkien täyttöaste K_{HFO}	0,95	(dimensioton)
alempi lämpöarvo HFO	40200	kJ/kg
Spesifinen polttoaineenkulutus pääkoneet (75% MCR + toleranssi)	189,5	g/kWh
Spesifinen polttoaineenkulutus apukoneet (50% MCR toleranssi)	218,0	g/kWh

Sijoitetaan laivan arvot yhtälöön 2 ja lasketaan arvot käyttämällä taulukon 8 arvoja HFO polttoaineelle. Laskennan tulokset esitetään kuvassa 16 ja taulukossa 9.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME\ emissions] + [AE\ \&/OR\ PTO\ emissions] + [PTI\ emissions - Innovative\ electric\ energy\ generation\ (reduced\ CO2)] - [Innovative\ mechanical\ energy\ generation\ (reduced\ CO2)]}{Transport\ Work}$		
ME_CO ₂ (primary) -	$f_j \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	5974588	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) -	$f_j \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) -	$f_j \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} + SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) -	$(0,75 \cdot PPTO \cdot fDF + (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0,75 \cdot PPTO) \cdot fC$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE -	$(0,75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} + SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0,75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (C$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot PPTI \cdot feff \cdot PAE_{eff}) - (CFAE + SFCAE + CFAE_{pilot} + SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5974588\ gCO_2 + 0\ gCO_2 + 398741 + 0\ gCO_2 + 0\ gCO_2 - 0\ gCO_2}{341942\ t\cdot nm} = \frac{6373329\ gCO_2}{341942\ t\cdot nm} = 18,639\ gCO_2/t\cdot nm$		

Kuva 16 EEXI laskenta, lähtötilanne

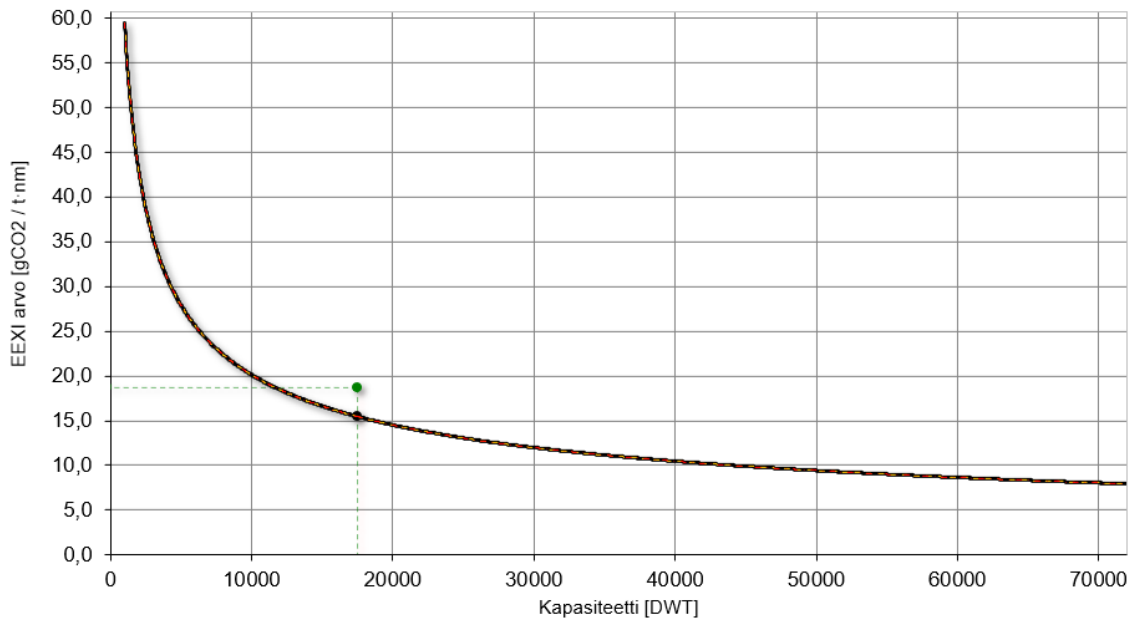
Laivan EEXI tulokseksi HFO:lla saadaan siis 18,639 gCO₂/t·nm, vaaditun EEXI arvon ollessa alukselle 15,451 gCO₂/t·nm. Vaadittu referenssi taso määräytyy IMO:n EEDI säännön 21.3 säännön mukaan. Referenssikäyrä lasketaan kyseisen tyyppisille autonkuljetus aluksille yhtälöllä 15:

$$\text{Referenssikäyrä} = 1812,63 \cdot DWT^{0.471} \quad (15)$$

Numeroarvot ovat vakiota ja DWT on aluksen kapasiteetti. Alus ei siis saavuta vaadittua EEXI arvoa, vaan ylittää sen noin 20,6 %:lla ja 3,167 yksiköllä. Aluksen nopeus V_{ref} 19,51 solmua.

Sijoitetaan kyseinen tulos laivan EEXI referenssikäyrälle:

Taulukko 9 EEXI referenssikäyrä, Lähtötilanne



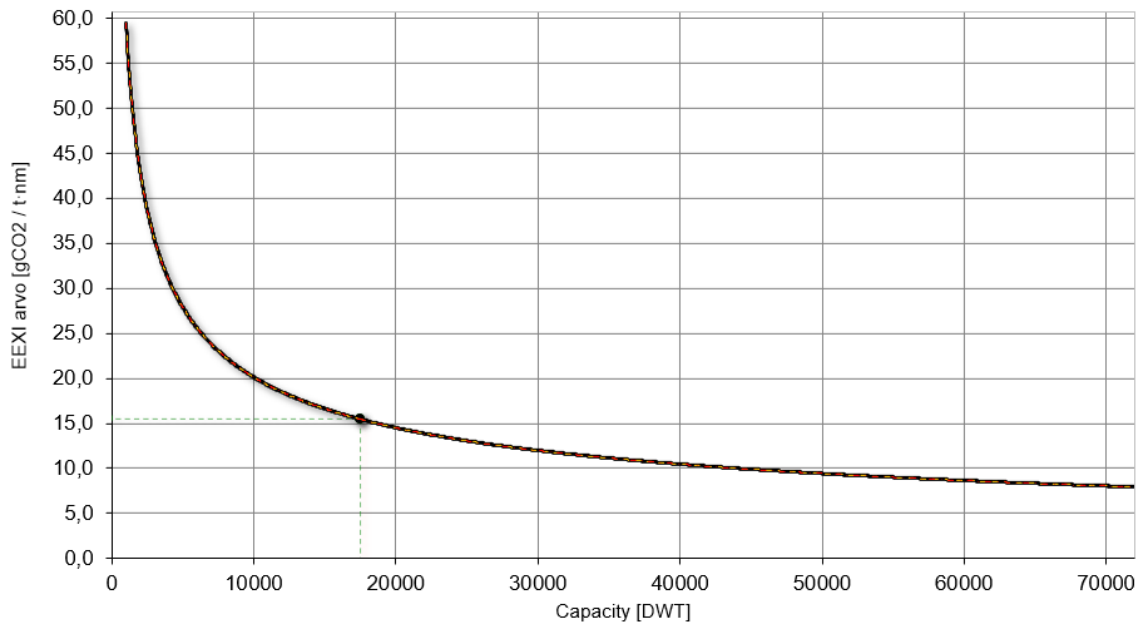
6.2.2 PCTC Case 2 HFO & EPL

Seuraavassa case tilanteessa käytetään samoja lähtökohtia, kuin Case 1:ssä. Ainoana erona on, että lisätään laskelmaan EPL, eli moottoritehon rajoitus. Interpoloimalla etsitään vaadittava EPL %, jolla alus saavuttaa vaaditun EEXI tason. Eli pienennetään laskennallista moottoritehoa yhtälössä 2, kunnes EEXI arvo alittaa referenssikäyrän. Jotta päästään vaaditulle tasolle pitää moottori tehoa rajoittaa noin 33%, jolloin päästään vaaditulle EEXI tasolle. Aluksen nopeus V_{ref} 17,91 solmua, eli laskennallinen nopeus putoaa lähtötilanteesta 1,6 solmua, joka on 8 %:n vähennys verrattuna rajoittamattomaan nopeuteen / moottoritehoon. Kuvassa 17 näytetään laskennan välitulokset. Taulukossa 10 esitetään EEXI piste referenssikäyrällä.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME \text{ emissions}] + [AE \&/OR \text{ PTO emissions}] + [PTI \text{ emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] \cdot [Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot f_{DF} \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	4458389	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$f_j \cdot PME \cdot f_{DF} \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot f_{DF} \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot f_l$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (C$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot PPTI \cdot feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	314348	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{4458389 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 398741 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{314348 \text{ t-nm}} = \frac{4857130 \text{ gCO}_2}{314348 \text{ t-nm}} = 15,451 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$		

Kuva 17 EEXI laskenta, EPL

Taulukko 10 Eexi referenssikäyrä, EPL



6.2.3 PCTC Case HFO & Innovatiiviset teknologiat

Tässä case tapauksessa tutkitaan innovatiivisten teknologioiden vaikutusta EEXI arvoon. Kuten jo aiemmassa kappaleessa todettiin purjeiden tehoon vaikuttaa monta asiaa. Tuulen nopeus ja suunta ovat tekijöitä, joita voidaan tarkastella historiaan perustuen. Case tapauksessa määritetään millainen määrä innovatiivisia teknologioita tulisi asentaa alukseen, jotta alitetaan EEXI referenssitaso. Jotta lähtökohdasta päästäisiin referenssi tason alle, pitää C_{eff} käytettyjen innovatiivisten teknologioiden arvo laskea 1091653 verran. Tämä vastaa kilowatteina noin 1850 kW:n innovatiivisten teknologioiden A & B kategorioiden, eli pääkoneiden vähennettävää tehoa. Tämä tehon vähennys voi siis koostua esimerkiksi purjeiden ja ilmavoitelun yhdistelmästä.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME \text{ emissions}] + [AE \&/OR \text{ PTO emissions}] + [PTI \text{ emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO}_2\text{)] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO}_2\text{)]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot f_{DF} \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	5974588	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$f_j \cdot PME \cdot f_{DF} \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} + SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO - f_{DF} \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot f_{E}) =$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO - (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} + SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (C_{eff} - C_{ref})) =$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot PPTI - f_{eff} \cdot PAE_{eff}) \cdot (C_{FAE} + SFC_{FAE} + C_{FAE_{pilot}} + SFC_{FAE_{pilot}}) =$	1091653	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$f_{eff} \cdot P_{eff} \cdot (CFME + SFCME + CFME_{pilot} + SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5974588 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 398741 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 1091653 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{5281676 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 15,446 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$

Kuva 18 EEXI tulokset HFO + innovatiiviset teknologiat

Tässä esimerkkitapauksessa arvioidaan, millaisella roottoripurje konfiguraatiolla vaadittu tehon vähennys voitaisiin saavuttaa. IMO:lla on dokumentti joka kuvaa tuulitietoa (MEPC 62/INF.34). Deltamarin Oy on kehittänyt roottoripurjeille laskentaohjelman joka perustuu MEPC 62/INF.34 ja MEPC.1.Circ.896 annex:iin. Laskentaohjelma laskee suuntaa antavasti roottoripurjeen tuottamaa tehoa, laivan määritetyssä kulkunopeudessa. Laskentaohjelmaa on jatkossa tarkoitus kehittää edelleen, jotta sillä voidaan laskea myös muita tuulipropulsio sovelluksia, kuten siipipurjeiden tuottamaa tehoa. Laskentaohjelmaan syötettiin lähtötilanteen tiedot, aluksen nopeus ja sen jälkeen lähdettiin kokeilemaan sopivia roottoripurje konfiguraatioita, joilla saavutettaisiin vaadittu 1850 kW:n innovatiivinen mekaaninen teho, joka siis laskisi EEXI arvon hyväksytylle referenssitasolle. Taulukossa 11 esitetään konfiguraatio joka laskennallisesti arvioituna täyttäisi tavoitellun teho vaatimuksen:

Taulukko 11 Roottoripurje konfiguraation arviointi

Laivan nopeus	19,51	solmua
Roottorin halkaisija	5	m
korkeus	31	m
Lukumäärä	8	kpl
Varjostus, %	75	%
η_D , %	70	%
propulsio (η_D, 70%)	1850	kW

Tässä suuntaa antavassa laskelmassa käytettiin 75% varjostusta, eli häiriötä, mitä purjeet aiheuttavat toisilleen. Tuloksena 1850 kW vaatisi esimerkiksi 8 kappaletta halkaisijaltaan 5 metriä ja korkeudelta 31 metristä roottoripurjetta. Jos varjostusta ei laskelmassa huomioida riittäisi 6 roottoripurjetta. Hinta-arvio 8:lle roottoripurjeelle on arvioitu olevan luokkaa 3,5 - 4 miljoonaa euroa, poislukien laivaan vaadittavat suunnittelu, luokitus ja muutostyöt ja materiaalit. Arvio perustuu purjevalmistajan pienemmän mallin toimitushintaan. Vastaavan PCTC alusten rakenne on haasteellinen tuulipropulsiota ajatellen. Sen ylin kansi on tavanomaisesti asumiskäytössä ja rakenne yksinkertaistettuna kuori, joka on kuitenkin osa laivapalkkia. Erityisesti jälkiasennus vaatii tähän alustyyppiin paljon muutostöitä, jotta esimerkiksi roottoripurjeen alustat saadaan riittävän vahvoiksi. Toinen rajoittava tekijä on korkeus, alus on jo itsessään korkea, jolloin purjeiden lisäys nostaisi korkeutta entisestään. Kriittisenä asiana voidaan pitää myös tämäntyyppisen aluksen vakavuutta. Laitteiden lisäys

aluksen korkeimpaan kotaa nostaa painopistettä ja lisäksi tuulen vaikutuksesta tuleva kallistava voima heikentää laivan vakavuusarvoja. Joten tuulipropulsion jälkiasennusta en pidä kovinkaan varteenotettavan vaihtoehtona tämän tyyppisiin aluksiin esitetyssä laajuudessa. Vertailun vuoksi Viking Grace aluksella oli asennettuna 1 kpl 4 metrin halkaisijalta oleva ja 24 metriä korkea roottoripurje.

6.2.4 PCTC Case vaihtoehdot polttoaineet

Tässä kappaleessa esitellään eri polttoaineiden vaikutuksia EEXI laskentaan.

Ensimmäisessä tapauksessa aluksen polttoaineena käytetään Ammoniakkia. Ammoniakkia käytetään esimerkkitapauksessa pääkoneen sekä apukoneiden polttoaineena. Laskennassa käytetään taulukon 12 arvoja ja sijoitetaan ne yhtälöön 2:

Taulukko 12 Ammoniakin parametrit

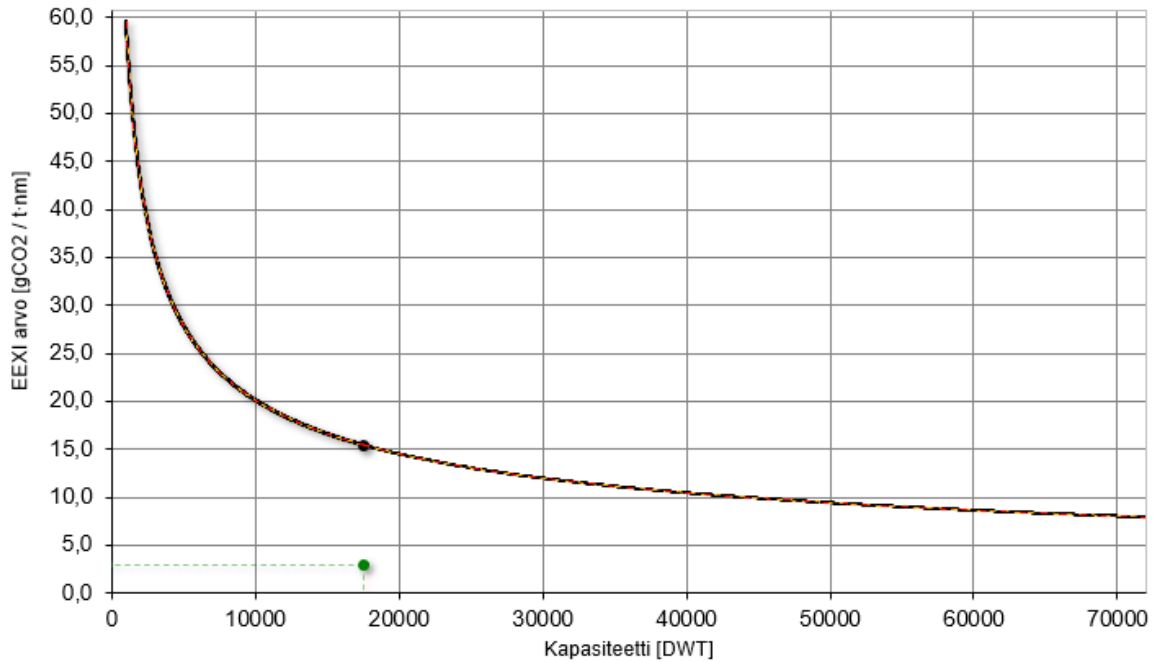
Ammoniakki		
tiheys ρ_{NH_3}	791	kg/m ³
Tankkien täyttöaste K_{NH_3}	0,95	(dimensioton)
alempi lämpöarvo	18600	kJ/kg
Spesifinen polttoaineen kulutus pääkoneet (75% MCR + toleranssi)	371,8	g/kWh

Ammoniakki vaatii kuitenkin myös pilottipolttoaineen, joka laskennassa on MDO ja jonka alempi lämpöarvo on 42700 kJ/kg ja moottorinen spesifinen pilottipolttoaineen kulutus on 16,5 g/kWh. Kuvassa 19 esitetään laskenta ammoniakki polttoaineena. Taulukossa 13 nähdään EEXI arvo referenssikäyrällä.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO}_2\text{)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO}_2\text{)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot \text{PME} \cdot \text{fdf} \cdot (\text{CFME} + \text{SFCME} + \text{CFME}_{\text{pilot}} + \text{SFCME}_{\text{pilot}}) =$	585219	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$f_j \cdot \text{PME} \cdot \text{fdf} \cdot (\text{CFME} + \text{SFCME} + \text{CFME}_{\text{pilot}} + \text{SFCME}_{\text{pilot}}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot \text{PME} \cdot (1 - \text{fdf}) \cdot (\text{CFME}_{\text{liquid}} + \text{SFCME}_{\text{liquid}}) =$	410521	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot \text{PPTO} \cdot \text{fdf} \cdot (\text{CFME} + \text{SFCME} + \text{CFME}_{\text{pilot}} + \text{SFCME}_{\text{pilot}})) + ((\text{PAE} - 0.75 \cdot \text{PPTI}) \cdot (\text{CFME}_{\text{liquid}} + \text{SFCME}_{\text{liquid}})) =$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot \text{PPTO} \cdot (1 - \text{fdf}) \cdot (\text{CFME}_{\text{liquid}} + \text{SFCME}_{\text{liquid}})) + ((\text{PAE} - 0.75 \cdot \text{PPTI}) \cdot (1 - \text{fdf}) \cdot (\text{CFME}_{\text{liquid}} + \text{SFCME}_{\text{liquid}})) =$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot \text{PPTI} - \text{feff} \cdot \text{PAE}_{\text{eff}}) \cdot (\text{CFAE} + \text{SFCFAE} + \text{CFAE}_{\text{pilot}} + \text{SFCFAE}_{\text{pilot}}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$\text{feff} \cdot \text{Peff} \cdot (\text{CFME} + \text{SFCME} + \text{CFME}_{\text{pilot}} + \text{SFCME}_{\text{pilot}}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{585219 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410521 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{995740 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 2,912 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$

Kuva 19 EEXI laskenta Ammoniakki

Taulukko 13 EEXI ammoniakikäytöllä referenssikäyrällä



Laskenta kertoo, että ammoniakilla voidaan saavuttaa erinomainen EEXI laskenta tulos, joka on selkeästi referenssikäyrän alapuolella. Kokonaisuutena olemassa olevaan alukseen asia ei kuitenkaan ole näin yksiselitteinen, vaan ammoniakki vaatii selkeästi suurimmat muutokset alustyyppiin. Polttoaine tankkikapasiteettia tulee lisätä huomattavasti, jotta vastaava toiminta-alue saavutetaan. Tämä johtaa lastikapasiteetin pienenemiseen sekä suuriin muutostöihin. Pääkone vaatii konversion ja todennäköisesti apukoneet tulisi uusia kokonaan. Muutos vaatisi siis valtavan suuret muutosinvestoinnit. Lisäksi huomioitavaa, että ammoniakki polttoaineena on vasta pilotti asteella useilla moottorivalmistajalla. Hintaraviota ammoniakki konversiosta on vaikea koostaa, koska useimmilla valmistajilla ei ole vielä tuotteita eikä hintatietoja olemassa. Ammoniakkia kuitenkin verratessa LNG:hen tulee lisä vaatimuksia turvallisuuteen sekä selkeänä erona myös lisääntynyt tankki kapasiteetin tarve.

Seuraavaksi lasketaan EEXI arvo alukselle kun polttoaineena käytetään metanolia. Laskennassa käytetään taulukossa 14 esitettyjä arvoja.

Taulukko 14 Metanoli parametrit

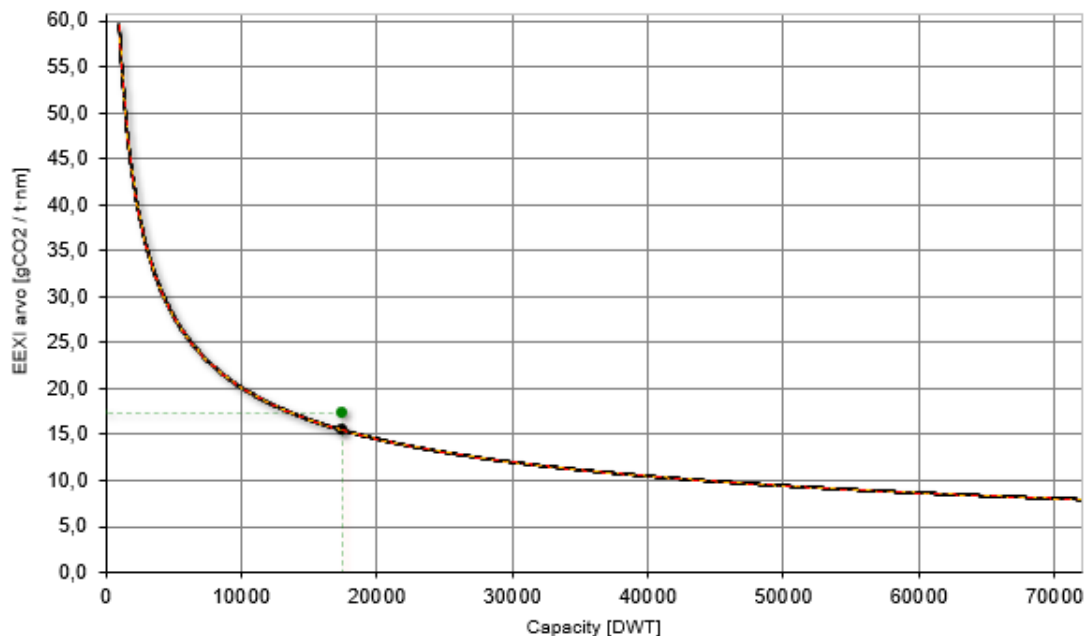
Metanoli		
tiheys ρ_{MeOH}	791	kg/m ³
Tankkien täyttöaste K_{NH3}	0,98	(dimensioton)
alempi lämpöarvo	19900	kJ/kg
Spesifinen polttoaineen kulutus pääkoneet (75% MCR + toleranssi)	351,51	g/kWh

Laskennassa käytetään metanolia, mutta myös metanoli vaatii pilottipolttoaineeksi MDO:ta. Metanoli tapauksessa laskennassa käytetään spesifistä pilottipolttoaineen kulutus arvoa 10,6 g/kWh. Kuvassa 20 esitetään laskenta metanoli polttoaineena. Taulukossa 15 nähdään EEXI arvo referenssikäyrällä.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME \text{ emissions}] + [AE \&/OR PTO \text{ emissions}] + [PTI \text{ emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO}_2)] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO}_2)]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot IDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	5503497	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$f_j \cdot PME \cdot IDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot PME \cdot (1 - IDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	410571	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0,75 \cdot PPTO \cdot IDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0,75 \cdot PP$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0,75 \cdot PPTO \cdot (1 - IDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) + ((PAE - 0,75 \cdot PPTO) \cdot (1 - IDF) \cdot$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot PPTI \cdot feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCFAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCFAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5503497 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410571 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ tnm}}$	=	$\frac{5914068 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ tnm}} = 17,296 \text{ gCO}_2/\text{t nm}$

Kuva 20 EEXI laskenta Metanoli

Taulukko 15 EEXI Metanoli käytöllä referenssikäyrällä



Metanoli ei vaadi erillistä tankkia, vaan se voidaan säilöä runkotankkeihin. Sillä on kuitenkin erityisvaatimuksia, koska sillä on matala leimahdus piste (11 °C), se palaa näkymättömällä liekillä, sitä ei voida sammuttaa vedellä, vaan vaatii erityisen sammutusvaahdon. Metanoli on myös myrkyllistä hengitettynä, iholla sekä nieltynä. Metanoli polttoaineena vaatii erillisen pilssijärjestelmän sekä tuuletusratkaisut.

Polttoainekonversio nesteytetyllä maakasulla (LNG). Seuraavaksi lasketaan EEXI arvot alukselle, käyttäen laskennassa sen polttoaineena nesteytettyä maakaasua. Sijoitetaan taulukon 16 LNG:n arvot yhtälöön 2.

Taulukko 16 LNG parametrit

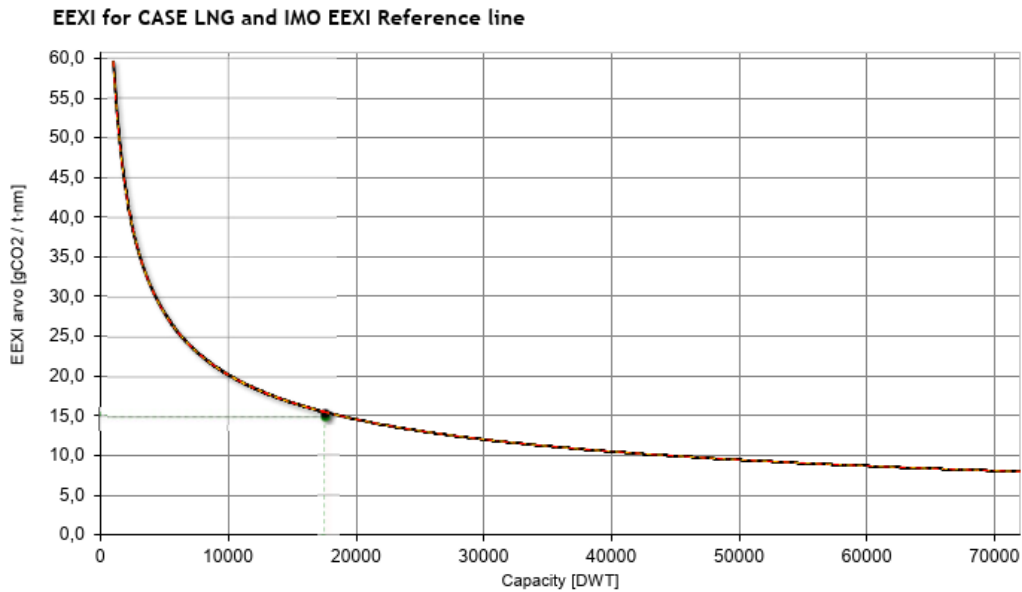
LNG		
tiheys ρ_{LNG}	790	kg/m ³
Tankkien täyttöaste K_{NH3}	0,95	(dimensioton)
alempi lämpöarvo	48000	kJ/kg
Spesifinen polttoaineen kulutus pääkoneet (75% MCR + toleranssi)	157,7	g/kWh

Laskennassa siis käytetään LNG:tä, mutta myös LNG vaatii pilottipolttoaineeksi MDO:ta. LNG tapauksessa laskennassa käytetään spesifistä pilottipolttoaineen kulutus arvoa 3,6 g/kWh. Kuvassa 21 esitetään laskenta metanoli polttoaineena. Taulukossa 17 nähdään EEXI arvo referenssikäyrällä.

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME \text{ emissions}] + [AE \&/OR PTO \text{ emissions}] + [PTI \text{ emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot P_{ME} \cdot f_{DF} \cdot (CFME - SFCME + CFME_{pilot} - SFCME_{pilot}) =$	4733209	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$f_j \cdot P_{ME} \cdot f_{DF} \cdot (CFME - SFCME + CFME_{pilot} - SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$f_j \cdot P_{ME} \cdot (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} - SFCME_{liquid}) =$	410571	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot P_{PTO} - f_{DF} \cdot (CFME - SFCME + CFME_{pilot} - SFCME_{pilot})) + ((P_{AE} - 0.75 \cdot P_{PTO}) - f_{DF}) =$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot P_{PTO} - (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} - SFCME_{liquid})) + ((P_{AE} - 0.75 \cdot P_{PTO}) - (1 - f_{DF}) \cdot (CFME_{liquid} - SFCME_{liquid})) =$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(f_j \cdot P_{PTI} - f_{eff} \cdot P_{AE_eff}) \cdot (C_{FAE} - S_{FAE} + C_{FAE_pilot} - S_{FAE_pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$f_{eff} \cdot P_{eff} \cdot (CFME - SFCME + CFME_{pilot} - SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{4733209 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410571 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = \frac{5143780 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 15,043 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$		

Kuva 21 EEXI laskenta LNG

Taulukko 17 EEXI LNG käytöllä referenssikäyrällä



Laskenta osoittaa, että konvertoimalla alus LNG käyttöiseksi, päästään EEXI referenssi käyrän alapuolelle. LNG konversio on huomattavasti ammoniakki konversiota helpompi toteuttaa, toki sekin on vaativa konversio. LNG:n alempi lämpöarvo on huomattavasti korkeampi, kuin ammoniakkin ja myös moottoreiden spesifinen polttoainenkulutus on huomattavasti pienempi kuin ammoniakilla. Tämä siis tarkoittaa sitä, että esim tankkien vaatima tila on pienempi ja lastitilavuutta menetetään vähemmän. Tekniikka on myös jo yleistä ja siihen löytyy useita ratkaisuja.

Polttoaine konversioiden hinta-arvio vertailu esitetään taulukossa 18. Arviot perustuvat Deltamarin Oy:n sisäiseen tietopankkiin, johon on kerätty valmistajilta saatuja hintaindikaatioita. Osa teknologiasta ei ole vielä käytössä ja hintatietoja ei ole julkaistu, joten arviot ovat hyvinkin viitteellisiä. Työn ja materiaalin kokonaisuutta on arvioitu työn laajuuden mukaisesti. Ammoniakissa tankkien hinta korostuu, suuremman tilantarpeen vuoksi. Metanolitankkien hinta sisältyy materiaaleihin ja työhön, oletuksena on, että olemassa olevia tankkeja voidaan hyödyntää osittain.

Taulukko 18 Polttoaine konversioiden hinta-arviointi

	Ammoniakki	Metanoli	LNG
Suunnittelu, Luokitus, projektijohto	1,85	1,85	1,65
Pääkone konversio	6	4,5	3,5
Apukoneet	3	3	1,5
Kattila	0,3	0,3	0,2
Tankit	4,3	-	2,1
Tukevat järjestelmät	2	1	1,5
Materiaalit ja työ	3,3	2	2
kustannus yhteensä Milj. €	20,75	12,65	12,45

6.3 Esimerkkialuksen Hiili-intensiteetti

Tarkastellaan ja yksin kertaistetaan IMO:n kaavaa esimerkkialuksen hiili-intensiteetin laskennalle (IMO MEPC.355(78), 2022):

$$\frac{\sum_j C_{Fj} \left\{ FC_j - \left(FC_{Voyage,j} + TF_j + (0.75 - 0.03\gamma_i) \cdot (FC_{electrical,j} + FC_{boiler,j} + FC_{others,j}) \right) \right\}}{f_i \cdot f_m \cdot f_c \cdot f_{iVSE} \cdot Capacity \cdot (D_t - D_x)} \quad (18)$$

TF_j -tekijä liittyy säiliöaluksiin ja polttoaineen korjaus voidaan jättää tässä tapauksessa huomioimattam, jolloin myös $FC_{boiler,j} + FC_{others,j}$ ovat 0. $FC_{electrical,j}$ on sähkön tuotantoon jäädytetytjä kontteja varten, sekä lastin pumppaamiseen / jäädyttämiseen tarkoitettu vähennyskerroin, joka voidaan myös kyseisessä tapauksessa tulkita tarpeettomiksi. f_i ja f_m ovat aluksen jääluokaan liittyvät korjauskertoimet, jotka tässä tapauksessa antavat tässä tapauksessa 0 % vähennyksen. f_c ja f_{iVSE} ovat korjauskertoimet itsepurkaville irtolastialuksille ja kapasiteetin korjauskertoimet säiliöaluksille, nämä voidaan myös tulkita tässä tapauksessa antavan 0% vähennyksen. Laskelmista jätetään myös huomioimatta matka vähennys $FC_{Voyage,j}$, jolloin navigoidaan jäissä, sekä matka joka tehty turvallisen navigoinnin varmistamiseksi, kuten kuten merirosvo- ja myrskyalueiden kierto.

$$\text{Aluksen CII: } \frac{\sum_j C_{Fj} FC_j}{Capacity \cdot D_t} \quad (19)$$

Eli kaavaan jää vuotuisen käytetyn polttoaineen massojen summa $\sum_j C_{Fj}$ korjauskertoimiseen ja vuodessa kulutetun polttoaineen (/aineden) kokonaismassa. Nämä jaetaan laivan lastikapasiteetillä ja kuljetulla matkalla.

Hiili intensiteetin laskennassa käytetään taulukossa 19 esitettyjä polttoaineen spesifisiä kulutus lukemia:

Taulukko 19 Polttoaineiden spesifiset kulutus lukemat

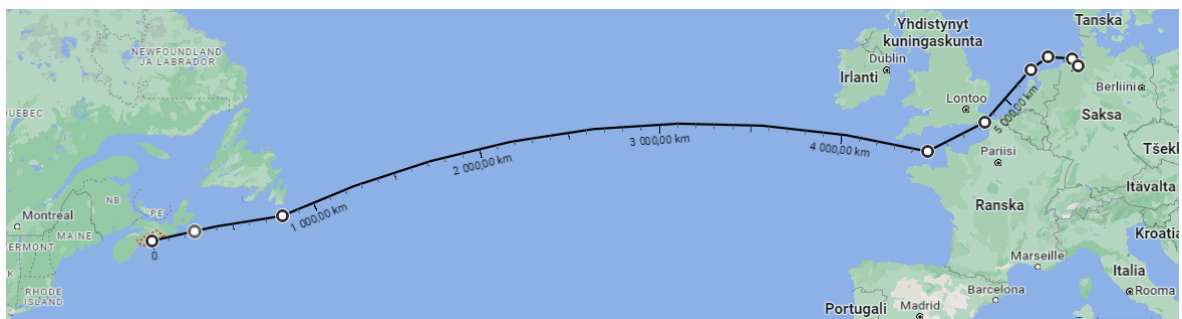
Pääkoneen Kuorma (%)		10	25	30	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
HFO	SFOC (g/kWh)	200,5	197,2	195,2	191,6	188,6	185,8	184,8	186,8	189,5	190,4	191,8	193,3	194,4	195,8
MeOH	SFOC (g/kWh)	405,0	398,4	394,3	387,1	380,9	375,4	373,2	377,3	382,8	384,7	387,4	390,5	392,6	395,5
LNG	SFOC (g/kWh)	165,6	163,0	161,5	158,9	156,5	154,4	153,6	155,3	157,7	158,5	159,6	161,0	161,9	163,1
	Pilotti SFOC (g/kWh)	2,6	2,5	2,2	1,8	1,5	1,4	1,3	1,2	1,2	1,1	1,1	1,0	1,0	1,0
Ammoniakki	SFOC (g/kWh)	368,3	368,0	366,1	363,1	360,9	359,2	358,9	364,7	371,8	375,5	379,9	384,8	388,8	393,5
	Pilotti SFOC (g/kWh)	28,3	25,4	24,3	22,3	20,3	18,5	17,6	17,0	16,5	15,7	15,0	14,4	13,6	12,9

Taulukon 19 kulutus arvot HFO:lle on otettu MAN 6S60MC-C8.2 moottorin projektioppaasta (MAN, 2014). Muut kulutus arvot on laskettu eri polttoaineiden alemman lämpöarvon perusteella. Eli HFO:n lämpöarvon ja kulutuksen avulla laskettiin kulutussuhde, jota hyödyntämällä laskettiin muiden polttoaineiden laskennalliset kulutukset niiden alemman lämpöarvon avulla. Lisäksi laskelmassa otettiin huomioon ammoniakkin ja LNG:n vaatimat pilottipolttoaineet. Laskennassa käytettiin taulukon 20 mukaisia pilottipolttoaineen kulutuksia prosentteina. Pilottipolttoaineen prosentuaalinen määrä on laskettu taulukon 19 arvoilla.

Taulukko 20 Pilottipolttoaineen suhteellinen kulutus.

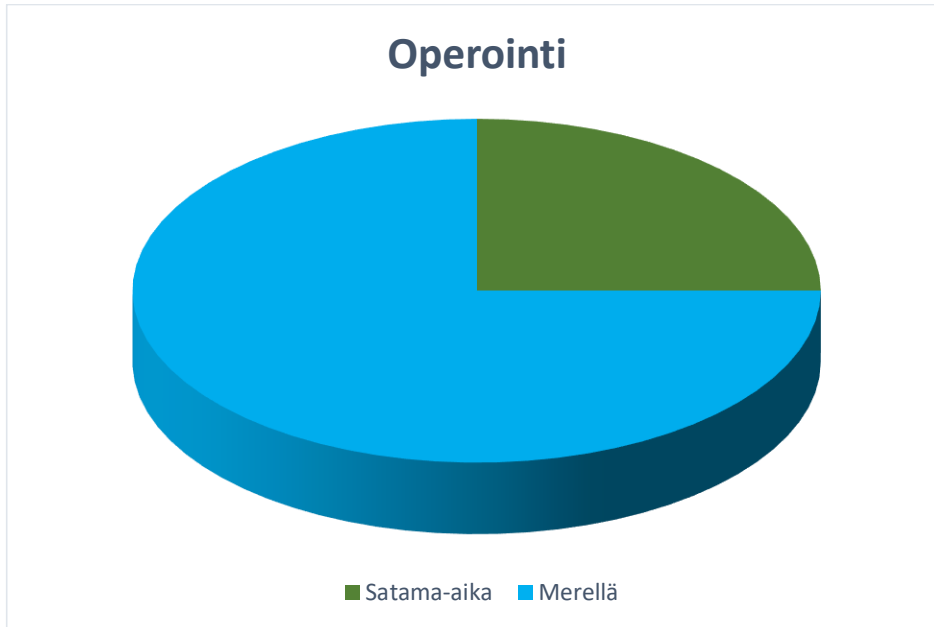
Pääkoneen Kuorma (%)	10	25	30	40	50	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Ammoniakki pilotti	15 %	14 %	13 %	12 %	11 %	11 %	10 %	10 %	9 %	9 %	8 %	8 %	7 %	7 %
LNG Pilotti	1,4 %	1,3 %	1,2 %	1,0 %	0,9 %	0,8 %	0,7 %	0,7 %	0,7 %	0,6 %	0,6 %	0,6 %	0,6 %	0,5 %

Oletetaan aluksen reitiksi Halifax Kanada – Bremerhaven Saksa. Matkaa reitille syntyy 2970 merimailia. Reitti kartalla näytetään kuvassa 22.



Kuva 22 Aluksen Reitti (Google maps)

Esimerkkinä käytettävän aluksen operointiprofiili on seuraavanlainen. Satamassa laiva on noin 25 prosenttia vuodenkokonaisajasta ja merellä siis 75 prosenttia, kuva 23 kuvaa operointiprofiilia.



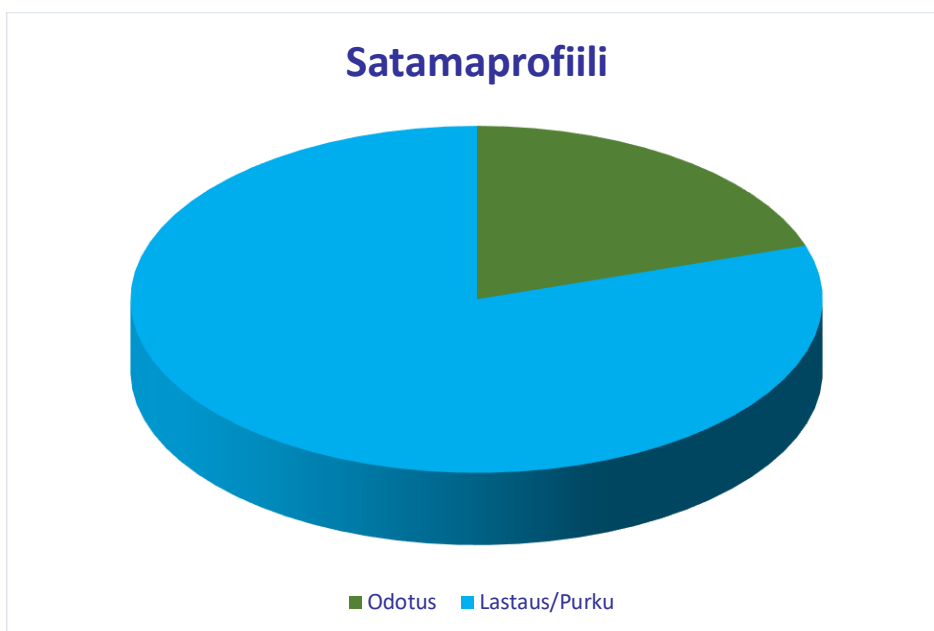
Kuva 23 Oletettu operointi profiili

Merellä oltaessa 97 prosenttia ajasta ajetaan matkanopeudella ja loppu 3 prosenttia on manoveerausta, kuva 24. Laskennassa käytetään matkanopeutta 16,5 solmua 88 % matkanopeusajasta ja 11 % 16 solmua, sekä 11 prosenttia 17 solmua. Vuoden operoinnilla, kuljetuksi kokonais matkaksi tulee noin 104000 merimailia, joka vastaa 35 matkaa Bremerhavenin ja Halifaxin välillä.



Kuva 24 Operointi merellä

Satamassa oloajan profiili on esitetty kuvassa 25.



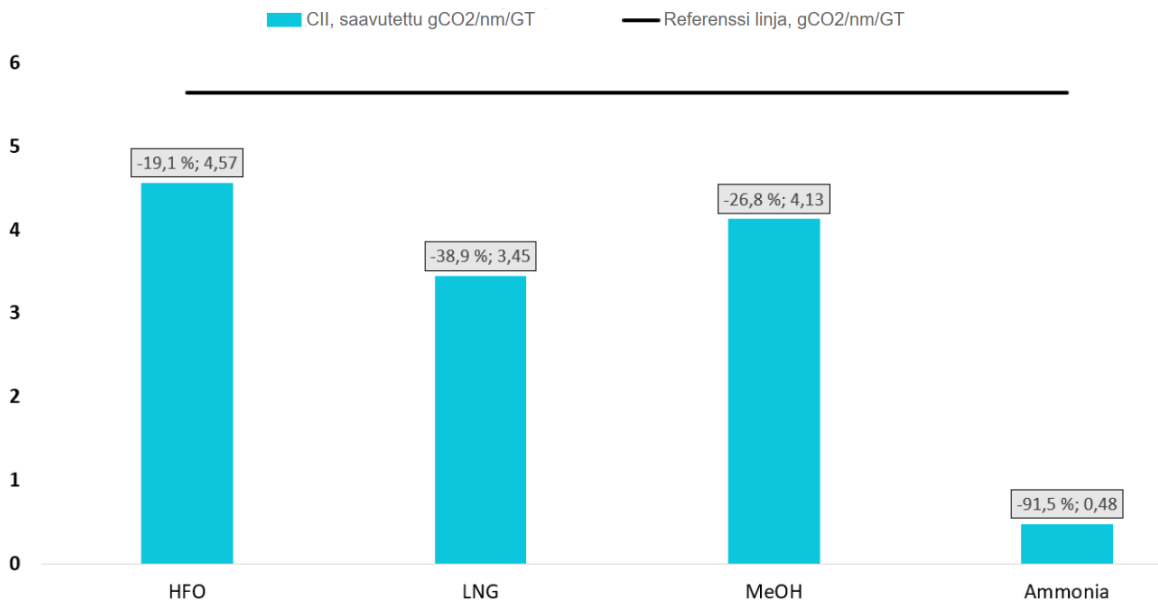
Kuva 25 Satama operointi

Keskimääräiset konetehot edellä mainitulle operointi tilanteille on esitetty taulukossa 21, tehot ovat tyypilliset tämän tyyppisen aluksen operoinnissa. CII laskentaa yksinkertaistettiin niin, että käytettiin apukoneiden polttoaineiden kulutukselle samoja arvoja kuin pääkoneen polttoaineille.

Taulukko 21 Konetehot operoinnissa (Deltamarin projektiarkisto)

	Teho kW
Pääkone (ME) merellä	6300
Pääkone (ME) manoveeratessa	1450
Apukoneet (AE) merellä	850
Apukoneet (AE) manoveeratessa	2400
Apukoneet (AE) Lastaus/Purku	1800
Apukone (AE) odotus	610

Nämä lähtötiedot haettiin Deltamarin Oy:n kehittämään excel taulukkoon, Josta Deltamarinin kehittämällä systeemistason energiasimulointimallilla laskettiin aluksen energiankulutus, CII kaavan mukaisesti ja laskettiin CII tulokset eri polttoaineille. Deltamarinin energiasimulointityökalu on toteutettu Matlabilla ja Simulinkillä. Kuvassa 26 esitetään CII laskentatulokset, vuoden 2019 tasosta laskien. Vuoden 2019 tasolla kaikilla polttoaine vaihtoehdoilla päästää alle referenssilinjan tuloksiin. Selkeästi parhaimman tuloksen antaa Ammoniakki, toiseksi parhaan tuloksen antaa LNG ja kolmanneksi parhaan Metanoli.



Kuva 26 CII tulokset Eri polttoaine vaihtoehdoilla, % referenssilinjasta

Referenssilinja on määritetty vuoden 2019 IMO-DCS:n keräämien tietojen perusteella

Vertailuviiva kuvaa kyseisten tyyppisten alusten lasketun suorituskyvyn "maailman keskiarvoa".

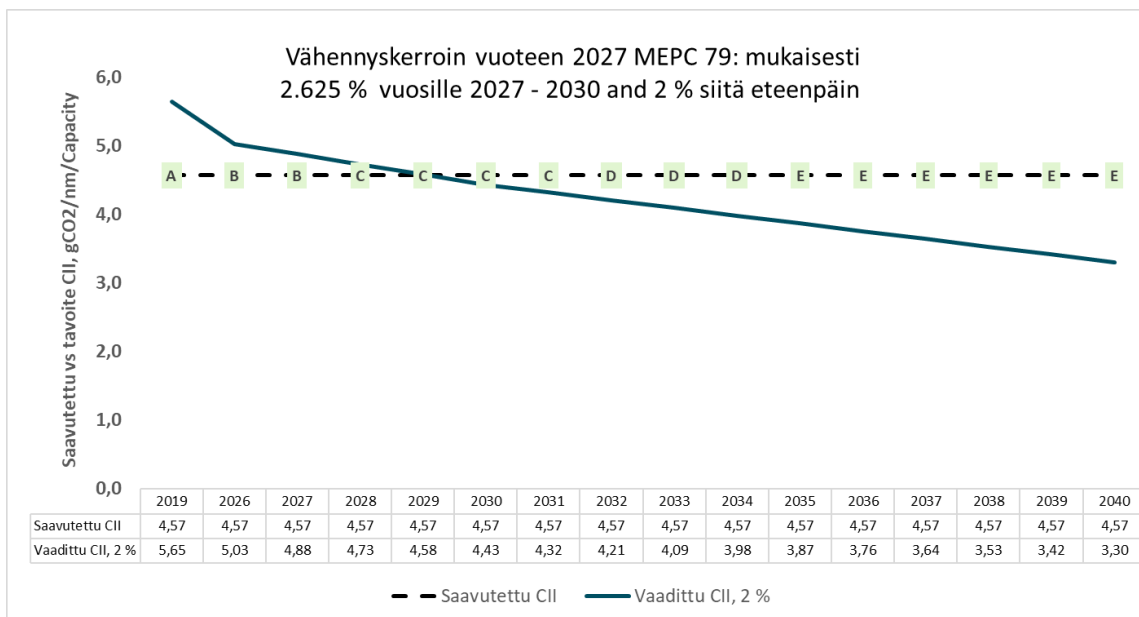
6.3.1 Hiili-intensiteetti, HFO

Ensimmäiseksi laskettiin aluksen hiili-intensiteetti HFO polttoaineella. Laskennasta voidaan todeta, että alus kuuluisi vielä A luokitukseen vuonna 2023, mutta heti seuraavasta vuodesta alkaen luokitus putoaa B kategoriaan. 3:s D luokitus tälle polttoaineelle tulisi vuonna 2034. Taulukossa 22 esitetään laskentatulokset HFO polttoaineena, sekä esitetään vuosittainen referenssi taso sekä luokitus tasot. Taulukko alkaa vuodesta 2019 joka on IMO:n referenssi linja aloitusvuosi ja kertoimet näytetään vuoteen 2040 saakka, johon linja päättyy.

Taulukko 22 CII HFO, laskentatulokset

Vuosi	Vähennys kerroin, 1 %	Vähennys kerroin, 2 %	Vähennys kerroin, 3 %	CII korjaus elec	Attained CII	Vaadittu CII, 1 %	Vaadittu CII, 2 %	Vaadittu CII, 3 %	Luokitus, 1 %	Luokitus, 2 %	Luokitus, 3 %
2019	0%	0,0%	0%	0%	4,57	5,65	5,65	5,65	A	A	A
2020	1%	1,0%	1%	3%	4,57	5,59	5,59	5,59	A	A	A
2021	1%	1,0%	1%	6%	4,57	5,53	5,53	5,53	A	A	A
2022	1%	1,0%	1%	9%	4,57	5,48	5,48	5,48	A	A	A
2023	2%	2,0%	2%	12%	4,57	5,36	5,36	5,36	A	A	A
2024	2%	2,0%	2%	15%	4,57	5,25	5,25	5,25	B	B	B
2025	2%	2,0%	2%	18%	4,57	5,14	5,14	5,14	B	B	B
2026	2%	2,0%	2%	21%	4,57	5,03	5,03	5,03	B	B	B
2027	1%	2,6%	3%	24%	4,57	4,97	4,88	4,86	B	B	C
2028	1%	2,6%	3%	27%	4,57	4,91	4,73	4,69	B	C	C
2029	1%	2,6%	3%	30%	4,57	4,86	4,58	4,52	C	C	C
2030	1%	2,6%	3%	33%	4,57	4,80	4,43	4,35	C	C	C
2031	1%	2,0%	3%	36%	4,57	4,74	4,32	4,18	C	C	D
2032	1%	2,0%	3%	39%	4,57	4,69	4,21	4,01	C	D	D
2033	1%	2,0%	3%	42%	4,57	4,63	4,09	3,84	C	D	E
2034	1%	2,0%	3%	45%	4,57	4,57	3,98	3,67	C	D	E
2035	1%	2,0%	3%	48%	4,57	4,52	3,87	3,50	C	E	E
2036	1%	2,0%	3%	51%	4,57	4,46	3,76	3,33	C	E	E
2037	1%	2,0%	3%	54%	4,57	4,40	3,64	3,16	C	E	E
2038	1%	2,0%	3%	57%	4,57	4,35	3,53	2,99	C	E	E
2039	1%	2,0%	3%	60%	4,57	4,29	3,42	2,82	D	E	E
2040	1%	2,0%	3%	63%	4,57	4,23	3,30	2,65	D	E	E
Summa	25%	42%	53%								

Kuvassa 27 on esitetty, että miten HFO käytössä aluksen luokitus muuttuu referenssitason tiukentuessa. Aluksen luokitus siis laskee, kun vaadittu hiili-intensiteetin referenssitaso tiukentuu vuosittain.



Kuva 27 Saavutettu CII HFO vs. Referenssi linja

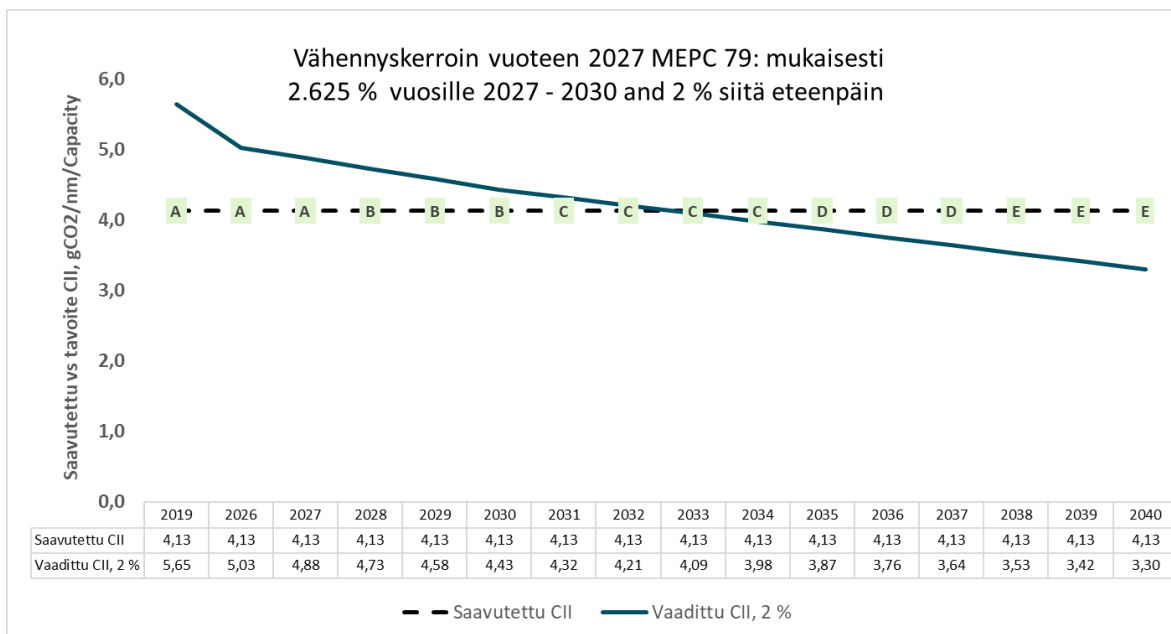
6.3.2 Hiili-intensiteetti, Metanoli (MeOH)

Taulukossa 23 esitetään laskentatulokset metanoli polttoaineena, sekä esitetään vuosittainen referenssi taso sekä tulevaisuuden luokitus tasot.

Taulukko 23 CII Metanoli, laskentatulokset

Vuosi	Vähennys kerroin, 1 %	Vähennys kerroin, 2 %	Vähennys kerroin, 3 %	CII korjaus elec	Attained CII	Vaadittu CII, 1 %	Vaadittu CII, 2 %	Vaadittu CII, 3 %	Luokitus,		
									Luokitus, 1 %	2%	Luokitus, 3 %
2019	0%	0,0%	0%	0%	4,13	5,65	5,65	5,65	A	A	A
2020	1%	1,0%	1%	3%	4,13	5,59	5,59	5,59	A	A	A
2021	1%	1,0%	1%	6%	4,13	5,53	5,53	5,53	A	A	A
2022	1%	1,0%	1%	9%	4,13	5,48	5,48	5,48	A	A	A
2023	2%	2,0%	2%	12%	4,13	5,36	5,36	5,36	A	A	A
2024	2%	2,0%	2%	15%	4,13	5,25	5,25	5,25	A	A	A
2025	2%	2,0%	2%	18%	4,13	5,14	5,14	5,14	A	A	A
2026	2%	2,0%	2%	21%	4,13	5,03	5,03	5,03	A	A	A
2027	1%	2,6%	3%	24%	4,13	4,97	4,88	4,86	A	A	A
2028	1%	2,6%	3%	27%	4,13	4,91	4,73	4,69	A	B	B
2029	1%	2,6%	3%	30%	4,13	4,86	4,58	4,52	A	B	B
2030	1%	2,6%	3%	33%	4,13	4,80	4,43	4,35	B	B	C
2031	1%	2,0%	3%	36%	4,13	4,74	4,32	4,18	B	C	C
2032	1%	2,0%	3%	39%	4,13	4,69	4,21	4,01	B	C	C
2033	1%	2,0%	3%	42%	4,13	4,63	4,09	3,84	B	C	D
2034	1%	2,0%	3%	45%	4,13	4,57	3,98	3,67	B	C	D
2035	1%	2,0%	3%	48%	4,13	4,52	3,87	3,50	B	D	E
2036	1%	2,0%	3%	51%	4,13	4,46	3,76	3,33	B	D	E
2037	1%	2,0%	3%	54%	4,13	4,40	3,64	3,16	B	D	E
2038	1%	2,0%	3%	57%	4,13	4,35	3,53	2,99	C	E	E
2039	1%	2,0%	3%	60%	4,13	4,29	3,42	2,82	C	E	E
2040	1%	2,0%	3%	63%	4,13	4,23	3,30	2,65	C	E	E
Summa	25%	42%	53%								

Kuvassa 28 on esitetty, että miten metanoli käyttöisen aluksen luokitus muuttuu referenssitason tiukentuessa vuosittain.



Kuva 28 Saavutettu CII Metanoli vs. Referenssi linja

Metanolilla alus täyttäisi A luokituksen vuoteen 2027 saakka. 3:s D luokitus tulisi vuonna 2037. Tässä kohtaa on hyvä pohtia, että metanolin oletaan tulevan uusiutuvaksi/biopolttoaineeksi jolloin kokonais päästötaso laskee, vaikka well to tank CO2 päästöt ovat huomattavasti korkeammat, kuin esimerkiksi LNG:llä.

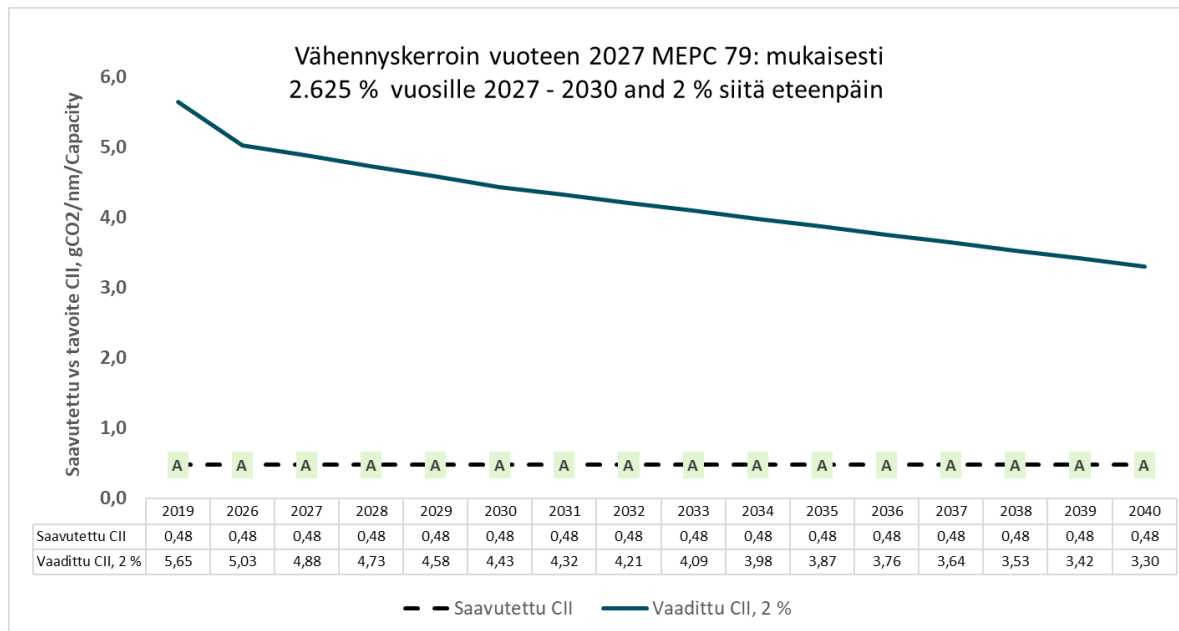
6.3.3 Hiili-intensiteetti, Ammoniakki

Taulukossa 24 esitetään laskentatulokset ammoniakki polttoaineena, sekä esitetään vuosittainen referenssi taso sekä tulevaisuuden luokitus tasot.

Taulukko 24 CII Ammoniikki, laskentatulokset

Vuosi	Vähennys kerroin, 1 %	Vähennys kerroin, 2 %	Vähennys kerroin, 3 %	CII korjaus elec	Attained CII	Vaadittu			Luokitus, 1 %	Luokitus, 2 %	Luokitus, 3 %
						CII, 1 %	CII, 2 %	CII, 3 %			
2019	0%	0,0%	0%	0%	0,48	5,65	5,65	5,65	A	A	A
2020	1%	1,0%	1%	3%	0,48	5,59	5,59	5,59	A	A	A
2021	1%	1,0%	1%	6%	0,48	5,53	5,53	5,53	A	A	A
2022	1%	1,0%	1%	9%	0,48	5,48	5,48	5,48	A	A	A
2023	2%	2,0%	2%	12%	0,48	5,36	5,36	5,36	A	A	A
2024	2%	2,0%	2%	15%	0,48	5,25	5,25	5,25	A	A	A
2025	2%	2,0%	2%	18%	0,48	5,14	5,14	5,14	A	A	A
2026	2%	2,0%	2%	21%	0,48	5,03	5,03	5,03	A	A	A
2027	1%	2,6%	3%	24%	0,48	4,97	4,88	4,86	A	A	A
2028	1%	2,6%	3%	27%	0,48	4,91	4,73	4,69	A	A	A
2029	1%	2,6%	3%	30%	0,48	4,86	4,58	4,52	A	A	A
2030	1%	2,6%	3%	33%	0,48	4,80	4,43	4,35	A	A	A
2031	1%	2,0%	3%	36%	0,48	4,74	4,32	4,18	A	A	A
2032	1%	2,0%	3%	39%	0,48	4,69	4,21	4,01	A	A	A
2033	1%	2,0%	3%	42%	0,48	4,63	4,09	3,84	A	A	A
2034	1%	2,0%	3%	45%	0,48	4,57	3,98	3,67	A	A	A
2035	1%	2,0%	3%	48%	0,48	4,52	3,87	3,50	A	A	A
2036	1%	2,0%	3%	51%	0,48	4,46	3,76	3,33	A	A	A
2037	1%	2,0%	3%	54%	0,48	4,40	3,64	3,16	A	A	A
2038	1%	2,0%	3%	57%	0,48	4,35	3,53	2,99	A	A	A
2039	1%	2,0%	3%	60%	0,48	4,29	3,42	2,82	A	A	A
2040	1%	2,0%	3%	63%	0,48	4,23	3,30	2,65	A	A	A
Summa	25%	42%	53%								

Kuvassa 29 on esitetty, että miten ammoniikki käyttöisen aluksen luokitus muuttuu refenssitason tiukentuessa vuosittain.



Kuva 29 CII Ammoniikki vs. Referenssi linja

Käytetyillä pilottipolttoaine määrällä, ammoniikki polttoaineena alus täyttäisi A luokituksen koko seuranta jakson ajan. Ammoniikki itsessään on hiilivapaata. On huomioitavaa, että laskennassa ei huomioitu lastikapasiteetin pudotusta, johtuen merkittävästi suurentuneesta

tankki kapasiteetti lisäyksestä, jonka ammoniakki vaatisi selkeästi matalamman alemman lämpöarvonsa vuoksi.

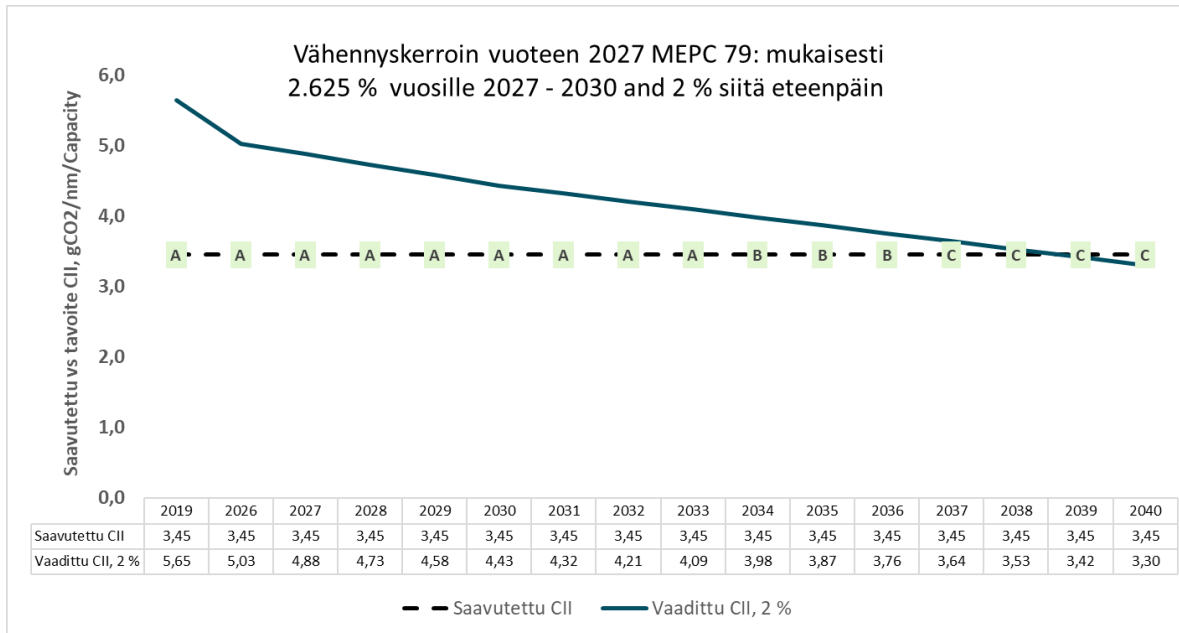
6.3.4 Hiili-intensiteetti LNG

Taulukossa 25 esitetään laskentatulokset LNG polttoaineena, sekä esitetään vuosittainen referenssi taso sekä tulevaisuuden luokitus tasot.

Taulukko 25 CII LNG, laskentatulokset

Vuosi	Vähennys kerroin, 1 %	Vähennys kerroin, 2 %	Vähennys kerroin, 3 %	CII korjaus elec	Attained CII	Vaadittu CII, 1 %	Vaadittu CII, 2 %	Vaadittu CII, 3 %	Luokitus, 1 %	Luokitus, 2 %	Luokitus, 3 %
2019	0 %	0,0 %	0 %	0 %	3,45	5,65	5,65	5,65	A	A	A
2020	1 %	1,0 %	1 %	3 %	3,45	5,59	5,59	5,59	A	A	A
2021	1 %	1,0 %	1 %	6 %	3,45	5,53	5,53	5,53	A	A	A
2022	1 %	1,0 %	1 %	9 %	3,45	5,48	5,48	5,48	A	A	A
2023	2 %	2,0 %	2 %	12 %	3,45	5,36	5,36	5,36	A	A	A
2024	2 %	2,0 %	2 %	15 %	3,45	5,25	5,25	5,25	A	A	A
2025	2 %	2,0 %	2 %	18 %	3,45	5,14	5,14	5,14	A	A	A
2026	2 %	2,0 %	2 %	21 %	3,45	5,03	5,03	5,03	A	A	A
2027	1 %	2,6 %	3 %	24 %	3,45	4,97	4,88	4,86	A	A	A
2028	1 %	2,6 %	3 %	27 %	3,45	4,91	4,73	4,69	A	A	A
2029	1 %	2,6 %	3 %	30 %	3,45	4,86	4,58	4,52	A	A	A
2030	1 %	2,6 %	3 %	33 %	3,45	4,80	4,43	4,35	A	A	A
2031	1 %	2,0 %	3 %	36 %	3,45	4,74	4,32	4,18	A	A	A
2032	1 %	2,0 %	3 %	39 %	3,45	4,69	4,21	4,01	A	A	B
2033	1 %	2,0 %	3 %	42 %	3,45	4,63	4,09	3,84	A	A	B
2034	1 %	2,0 %	3 %	45 %	3,45	4,57	3,98	3,67	A	B	C
2035	1 %	2,0 %	3 %	48 %	3,45	4,52	3,87	3,50	A	B	C
2036	1 %	2,0 %	3 %	51 %	3,45	4,46	3,76	3,33	A	B	C
2037	1 %	2,0 %	3 %	54 %	3,45	4,40	3,64	3,16	A	C	D
2038	1 %	2,0 %	3 %	57 %	3,45	4,35	3,53	2,99	A	C	D
2039	1 %	2,0 %	3 %	60 %	3,45	4,29	3,42	2,82	A	C	E
2040	1 %	2,0 %	3 %	63 %	3,45	4,23	3,30	2,65	A	C	E
Summa	25 %	42 %	53 %								

Kuvassa 30 on esitetty, että miten LNG käyttöisen aluksen luokitus muuttuu referenssitason tiukentuessa vuosittain.



Kuva 30 CII LNG vs. Referenssi linja

LNG polttoaineella A luokitus saataisiin pidettyä vuoteen 2031 saakka ja 3:s D luokitus tulisi seuranta jakson jälkeen.

7 Pohdinta & Johtopäätökset

Tässä kappaleessa pohditaan laskennan tuloksia, verrataan niitä kirjallisuudesta löytyviin tuloksiin ja pohditaan vaadittavien energiatehokkuus ratkaisujen toteutus mahdollisuuksia. Laskennan lopputulemat vaihtoehtoisten polttoaineiden ja pääkonetehon rajoituksen suhteen ovat hyvin saman kaltaiset, kuin Bayraktar & Yukselin (2023) tutkimuksessa, huomioiden toki, että tutkimusten alustyyppit poikkesivat toisistaan ja näin ollen osatuloksissa on käytetty toisia IMO:n laskukaavoja. Innovatiivisten teknologioiden osalta laskennassa käytetty tuulipropulsion maksimiteho oli suhteessa hyvin saman suuntainen kun Lindstad et al. (2022) tutkimuksessa, huomioiden siis, että roottorit olivat korkeudeltaan ja halkaisijaltaan erikokoiset. Koko vaikuttaa suoraan roottorin tehoon.

7.1 PCTC EEXI

Laskentatuloksia vertailemalla on selvää, että kun katsotaan tuloksia, antaa ammoniakki polttoaineena selkeästi parhaimman tuloksen EEXI laskennassa. Kuitenkin, kuten aiemmin jo todettu, helpoin tapa saavuttaa EEXI vaatimustaso on asentaa EPL, eli moottoritehon rajoitus. Taulukossa 26 esitetään esimerkkialuksen EEXI laskennan tulokset.

Taulukko 26 EEXI tulosityhteenveto

	Vaadittu	Saavutettu	Ero	EEXI läpi?
HFO	15,451	18,642	-3,188	EI
HFO & EPL	15,451	15,451	0,00	KYLLÄ
HFO + Innovatiiv.	15,451	15,446	0,05	KYLLÄ
LNG	15,451	15,043	0,408	KYLLÄ
Ammoniakki	15,451	2,921	12,53	KYLLÄ
Metanoli	15,451	17,296	-1,845	EI

Ammoniakki vaatii suurimmat muutokset alukseen ja toistaiseksi teknologia on hyvin kallis ja monella toimijalla toistaiseksi vasta kehitysasteella. Lisäksi ammoniakkin kohdalla on huomioitava, että jakeluverkosto polttoainekäyttöön on vielä toistaiseksi kehittymätön ja harva. LNG:llä päästään myös EEXI käyrän alle ja se on varteenotettava keino varsinkin siirtymäkaudeksi. Metanoli on CO₂ päästöjen osalta laskennallisesti korkealla tasolla, mutta kun otetaan huomioon, että tulevaisuudessa sitä tuotettaisiin uusiutuvasti, niin sen kokonaisympäristövaikutukset jäisivät pieneksi. Muilla teknologioissa ratkaisulla voidaan tukea aluksen energiatehokkuutta. Ja kuten työssä todettiin, on purjeiden käyttäminen on varsin varteenotettava vaihtoehto tukevaksi ratkaisuksi ja se onkin valtavasti yleistymässä. Purjeratkaisut eivät yksinään kuitenkaan tule ratkaisemaan tilannetta, vaan tavoitteisiin päästäksemme on todennäköisesti polttoaine puolella myös tehtävä muutoksia. Tuuli olosuhteet vaihtelevat reiteillä ja vuodenaikoina paljonkin, joten pelkästään niiden varaan ei voida laskea. Innovatiivisia teknologioita voidaan toki yhdistää, jolloin voidaan saada ratkaisusta toisiaan tukeva kokonaisuus. Ratkaisut eivät myöskään sulje pois toisiaan ja alukseen voidaan asentaa useampia eri ratkaisuja, kuten purjeet, aurinkopaneelit, ilmavoitelu, lämmöntalteenottoa jne. Näiden yhteisvaikutus voidaan summata ja saadaan alusta energiatehokkaammaksi. Lisäksi investointeja voidaan näin ollen hajauttaa myös pidemmälle ajanjaksolle. Polttomoottori tulee kuitenkin pysymään valtameri alusten pääpropulsiona, tulevaisuudenpolttoaineet ovat laajasti tutkittu aihe ja ne ohjaavat alusten moottoreiden ja niiden käyttämien polttoaineiden kehitystä. Tässä moottorivalmistajilla on suuri vastuu ja koko maailma seuraa, näitä teknisiä ratkaisuja. Suuret toimijat, kuten MAN ja Wärtsilä ohjaavat kehityksen suuntaa omilla tuotteillaan. Ennen kuin varsinaisia teknisiä ratkaisuja on olemassa, on valintoja vaikea tehdä. Suurimpana asiana aiheen taustalla on uusien polttoaineiden valmistus- ja jakeluinfrastruktuuri joka tulee vaatimaan tulevaisuudessa valtavia investointeja – sekä runsaasti uutta uusiutuvaa energiantuotantoa.

7.2 PCTC Hiili-intensiteetti

Työssä tutkitulla polttoaineen vaihdolla on mahdollista saavuttaa hiili-intensiteetin pienentyminen ja pysyminen määritetyssä A-luokassa. Taulukossa 27 esitetään hiili-intensiteetti tulokset yhteenvetona.

Taulukko 27 Hiili-intensiteetti tulosten yhteenveto

	Saavutettu	A-luokka	ensimmäinen 3:s D luokitus vuosi
HFO	4,57	2023	2034
LNG	3,45	2031	*
Ammoniakki	0,48	*	*
Metanoli	4,13	4,13	2037

Polttoaineen vaihto vaatii kuitenkin muutoksia laivan moottoreihin, lisälaitteisiin ja erityisesti tankki kapasiteettiin. Monessa tapauksessa tämä vaatii siis vaativan konversion ja useimpiin käytettyihin apumoottoreihin ei ole edes saatavilla tai tulossakaan konversio mahdollisuutta. Tämä siis tarkoittaa, että apukoneet tulisi polttoaine konversiossa vaihtaa kokonaan uusiin. Moottorit ovat arvokkaita ja vaihtotyö monimutkainen, toki aluksesta riippuvainen. Useisiin kaksitahti päämoottoreihin on jo saatavilla tai kehitteillä jälkiasennus konversio muutospaketti. Tällaisella sarjalla päämoottori voidaan konvertoida esimerkiksi LNG tai metanoli käyttöiseksi. LNG konversio sarjat ovat jo yleisiä ja metanoli sarjoista on jo pilotteja asennettu. Ammoniakki versiot ovat kehitteillä. Kaikki LNG, metanoli, sekä ammoniakki vaativat myös putkistolta erityis vaatimuksia. Kaikille näistä polttoaineista luokituslaitokset vaativat tuplaputkituksen. Koska LNG:tä on jo monissa satavissa saatavilla ja se on melko nopeasti yleistynyt, on sen valinta polttoaineeksi melko looginen päätös tähän hetkeen, mutta kun katsotaan pidemmällä tähtäimellä on ammoniakki nykyisillä mittareilla mitattuna ylivoimainen puhtaasti päästömielessä. Toki tässä kohtaa tulee myös huomioida ammoniakin myrkyllisyys ja sen vaatima suuri tankkikapasiteetti. Polttoaineen kulutusta on myös mahdollista pienentää nopeutta hidastamalla, hiili-intensiteetti laskennassa tämä toki osaltaan vaikuttaa myös kuljetettuun lastikapasiteettiin, joten sen vaikutus ei ole suoraviivainen. Hiili-intensiteettiä pystytään parantamaan myös optimoimalla operointi ja esimerkiksi lastaus / purku logistiikka parantamalla – jolloin vuotuista kuljetettua lastimäärää ja kuljettua matkaa saadaan kasvatettua. Hiili-intensiteetin ratkaisun takana on myöskin polttoaineiden valmistus ja jakelu infrastruktuurin ja uusiutuvien energialähteiden kehittyminen.

7.3 Yhteenveto

Työssä tutustuttiin tavoitteeseen tehdä merenkulusta hiilineutraalia. Työ perustui pitkälti IMO:n linjauksiin ja kehitettyihin mittareihin. Työn aikana huomattiin, että mittarit ovat vielä vahvasti kehitysasteella ja säännöstö muuttuu ja kehittyy jatkuvasti. Työssä verrattiin polttoaineita ja päästöjä ainoastaan ”tank to wake” periaatteen mukaisesti, eli niitä päästöjä joita laivan tuottaa kulkiessaan. Tulevaisuudessa myös polttoaineiden tuotanto ja jakelu päästöt tulee ottaa huomioon mittareissa. Ohjaava säännöstö kehittyy myös jatkuvasti ja aihetta tulee jatkaa. Elinkaarta kuvaava LCA-analyysi on tulossa sekä EU:ssa että IMO:ssa. Eli tulevaisuudessa vaihtoehtoiset, myös hiilineutraalit, polttoaineet tulevat olemaan tärkeä osa ratkaisua. Tämä muutos nähtäneen jo kesän MEPC kokoontumisessa. Tämä tulee ohjaamaan kehitystä kokonaisvaltaisesti puhtaampiin ratkaisuihin. Vety, ammoniakki ja metanolikin ovat hiilineutraaleja ainoastaan jos tuotanto perustuu uusiutuvaan energiaan. Työn aikana myös todettiin että oikean energiatehokkuusratkaisun valinta riippuu vahvasti operointiprofiilista ja reiteistä. Ympäristöolosuhteet, kuten tuuliolosuhteet ja polttoaineiden jakeluverkosto vaikuttaa valintoihin. Suunnittelutoimiston näkökannasta kehitys on valtavan mielenkiintoista ja on hienoa nähdä kun muutos ympäristöystävälliseen merenkulkuun on pääsemässä vauhtiin. Lopuksi voidaan todeta, että yksiselitteistä voittajaratkaisua ei ole selkeästi olemassa, vaan tulevaisuuden energiatehokkuusratkaisut tulevat olemaan yhdistelmä erilaisia tekniikoita.

LÄHTEET

Ernest Czermański, Aneta Oniszczyk-Jastrzębek, Eugen F. Spangenberg, Łukasz Kozłowski, Magdalena Adamowicz, Jakub Jankiewicz, Giuseppe T. Cirella,
Implementation of the Energy Efficiency Existing Ship Index: An important but costly step towards ocean protection, Marine Policy, Volume 145, 2022, 105259, ISSN 0308-597X

Murat Bayraktar, Onur Yuksel,

A scenario-based assessment of the energy efficiency existing ship index (EEXI) and carbon intensity indicator (CII) regulations, Ocean Engineering, Volume 278, 2023, 114295, ISSN 0029-8018

Deltamarin Oy: Projekti arkistot ja tietopankki 2023

DNV, IMO update: Marine Environment Protection Committee – MEPC 76 [verkkoaineisto]. [viitattu 2022-1-24].

Saatavissa: <https://www.dnv.com/news/imo-update-marine-environment-protection-committee-mepc-76-203128>

Polku: dnv.com; News, Statutory

DNV, On demand Webinar - The Carbon Intensity Indicator (CII) – A closer look [viitattu 2022-8-29].

Katsottavissa: <https://www.dnv.com/maritime/webinars-and-videos/on-demand-webinars/access/carbon-intensity-indicator-cii.html>

DNV, Rules for Classification, July 2021, Part 6 additional class notations, Chapter 2 Propulsion, power generation and auxiliary systems (RU-SHIP)

DNV Technical and regulatory news No. 10/2023 – statutory

Marine Environment Committee MEPC.213(63) ANNEX 9 2012 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)

Moirangthem, K, European Commission, Joint Research Centre, Alternative fuels for marine and inland waterways, Baxter, D.(editor), Publications Office, 2017,
Saatavissa: <https://data.europa.eu/doi/10.2790/227559>

IMO: Further shipping GHG emission reduction measures adopted [verkkoaineisto].
[viitattu 2022-1-24].

<https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/MEPC76.aspx>

Polku: imo.org; Home, Media Centre, Latest News

IMO, Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI and EEXI, (MEPC/Circ.896, 2021)

IMO, 2018. IMO initial strategy to reduce GHG emission from shipping, MEPC. IMO, 72/17/add.1 annex 11

IMO, Interim guideline on the method of calculation the energy efficiency design index for new ships. MEPC.1/Circ.691, 2009

IMO, Interim guideline on correction Factors and Voyage adjustments for CII calculation (CII Guidelinens, G5). MEPC.355(78), 2022

IMO International Convention for the Prevention of Pollution from Ships (MARPOL)
[verkkoaineisto], [viitattu 2023-7-1].

Saatavissa: [https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-\(MARPOL\).aspx](https://www.imo.org/en/about/Conventions/Pages/International-Convention-for-the-Prevention-of-Pollution-from-Ships-(MARPOL).aspx)

Kim, K., Roh, G., Kim, W., Chun, K., 2020a.

A preliminary study on an alternative ship propulsion system fueled by ammonia: environmental and economic assessments.

J. Mar. Sci. Eng. 8 (3) <https://doi.org/10.3390/jmse8030183>.

Kim, Tae-Wook, Seul-Kee Kim, Seong-Bo Park and Jae-Myung Lee. “Design of Independent Type-B LNG Fuel Tank: Comparative Study between Finite Element Analysis and International Guidance.” *Advances in Materials Science and Engineering* 2018 (2018)

Elizabeth Lindstad, Tor Stokke, Anders Alteskjær, Henning Borgen, Inge Sandaas, *Ship of the future – A slender dry-bulker with wind assisted propulsion*, *Maritime Transport Research*, Volume 3, 2022, 100055, ISSN 2666-822X

Marine Environment Committee MEPC.213(63) ANNEX 9 2012 GUIDELINES FOR THE DEVELOPMENT OF A SHIP ENERGY EFFICIENCY MANAGEMENT PLAN (SEEMP)

United Nation Climate Change [verkkoaineisto]. [viitattu 2022-1-17].

Saatavissa: https://unfccc.int/kyoto_protocol

Polku: unfccc.int; process and meetings, The Cyoto Protocol

United Nation Climate Change [verkkoaineisto]. [viitattu 2022-1-17].

Saatavissa: <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement>

Polku: unfccc.int; process and meetings, The Paris Agreement

Ympäristöministeriö [verkkoaineisto]. [päivitetty 2015-06-15] [viitattu 2022-1-7].

Saatavissa: <https://ym.fi/kansainvaliset-ilmastoneuvottelut>

Polku: ym.fi; vastualueet, ilmasto, kansainväliset ilmastoneuvottelut

Paris Agreement 2015, United Nations

Maximilian Schroer, George Panagakos, Michael Bruhn Barfod,

An evidence-based assessment of IMO's short-term measures for decarbonizing container shipping,

Journal of Cleaner Production,

Volume 363, 2022, 132441, ISSN 0959-6526

Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg, Harilaos N. Psaraftis, Thalys Zis,

Reduced environmental impact of marine transport through speed reduction and wind assisted propulsion, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 83, 2020, 102380, ISSN 1361-9209,

Fabian Tillig, Jonas W. Ringsberg,
Design, operation and analysis of wind-assisted cargo ships, Ocean Engineering, Volume 211, 2020, 107603, ISSN 0029-8018

MAN B&W S60MC-C8.2-TII Project Guide, 2015

MAN Energy Solutions Ammonia engine presentation V2 may 2021

MAN Energy Solutions Retrofits & Upgrades presentation June 2022

Michael Traut, Paul Gilbert, Conor Walsh, Alice Bows, Antonio Filippone, Peter Stansby, Ruth Wood,

Propulsive power contribution of a kite and a Flettner rotor on selected shipping routes, Applied Energy, Volume 113, 2014, Pages 362-372, ISSN 0306-2619

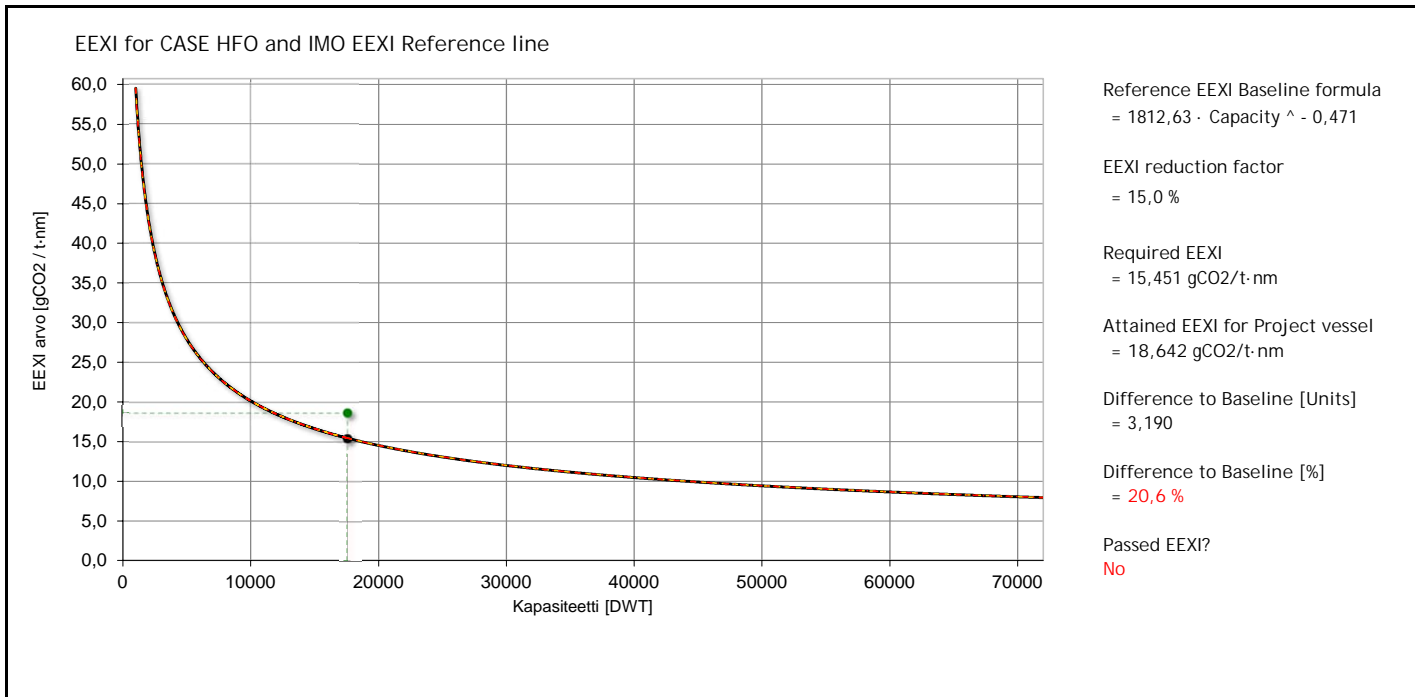
Yongming Feng, Zhiqiang Du, Majed Shreka, Yuanqing Zhu, Song Zhou, Wenping Zhang, 2020, Thermodynamic analysis and performance optimization of the supercritical carbon dioxide Brayton cycle combined with the Kalina cycle for waste heat recovery from a marine low-speed diesel engine,
Energy Conversion and Management, Volume 206, 2020, 112483, ISSN 0196-8904,

Ämmälä Pekka 2021, Energiatekniikan erikoistyöt: Laivapolttoaineet

ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) DIPLOMITYÖ CASE HFO			EEXI Parameters
1.	ALUSTYYPPI		
1.1.	Alustyypin (Ship type)	Ro-ro cargo vehicle carrier	$Baseline = 1812,63 \cdot Capacity^{-0,471}$
1.2.	Koneisto (Machinery type)	Mechanic	
1.3.	Aluksen status (EEDI / EI-EEDI)	EEDI-applied ship	
2.	POLTTOAINE		
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Heavy fuel oil (HFO)	$C_{FME} = 3,114$
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)	$C_{FME_pilot} = 3,206$
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Heavy fuel oil (HFO)	$C_{FAE} = 3,114$
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)	$C_{FAE_pilot} = 3,206$
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	1,000	$f_{DF} = 1,000$
3.	SHIP SPEED		
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	19,51 kn	$V_{ref} = 19,51$
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn	$V_{ref,app} = 0,00$
			$V_{ref,avg} = 19,89$
4.	CAPACITY		
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT	$Capacity = 17\ 525$
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT	$Lightweight = 20\ 400$
4.3.	GT of ship	57400 GT	$GT = 57\ 400$
5.	POWERING		
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW	$P_{ME} = 10\ 125$
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW	$P_{PTD} = 0$
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW	$P_{PTI} = 0$
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %	
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	0 kW	$P_{eff} = 0$
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P_{ME}	0 kW	$P_{aeff} = 0$
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW	$P_{AE} = 588$
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW	
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / Pae calculations)	96,0 %	$P_{prop} = 10\ 125$
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (PAE,app)	0 kW	$P_{AE,app} = 0$
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	75 %	$MCR_{avg} \text{ or } MPP_{avg} = 13\ 058$
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPlim	13500 kW	
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION		
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	189,5 g/kWh	$SFC_{ME} = 189,5$
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	$SFC_{ME_pilot} = 0,0$
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	$SFC_{AE} = 218,0$
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	$SFC_{AE_pilot} = 0,0$

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative technologies (Peff)	0,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 0,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_i	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 0 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	0 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	790 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	48000 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	0 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 102184,98 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	2700 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{0 \text{ GJ (Gas)}}{0 \text{ GJ MDO} + 102184,98 \text{ GJ HFO}}$	$= 1,000$

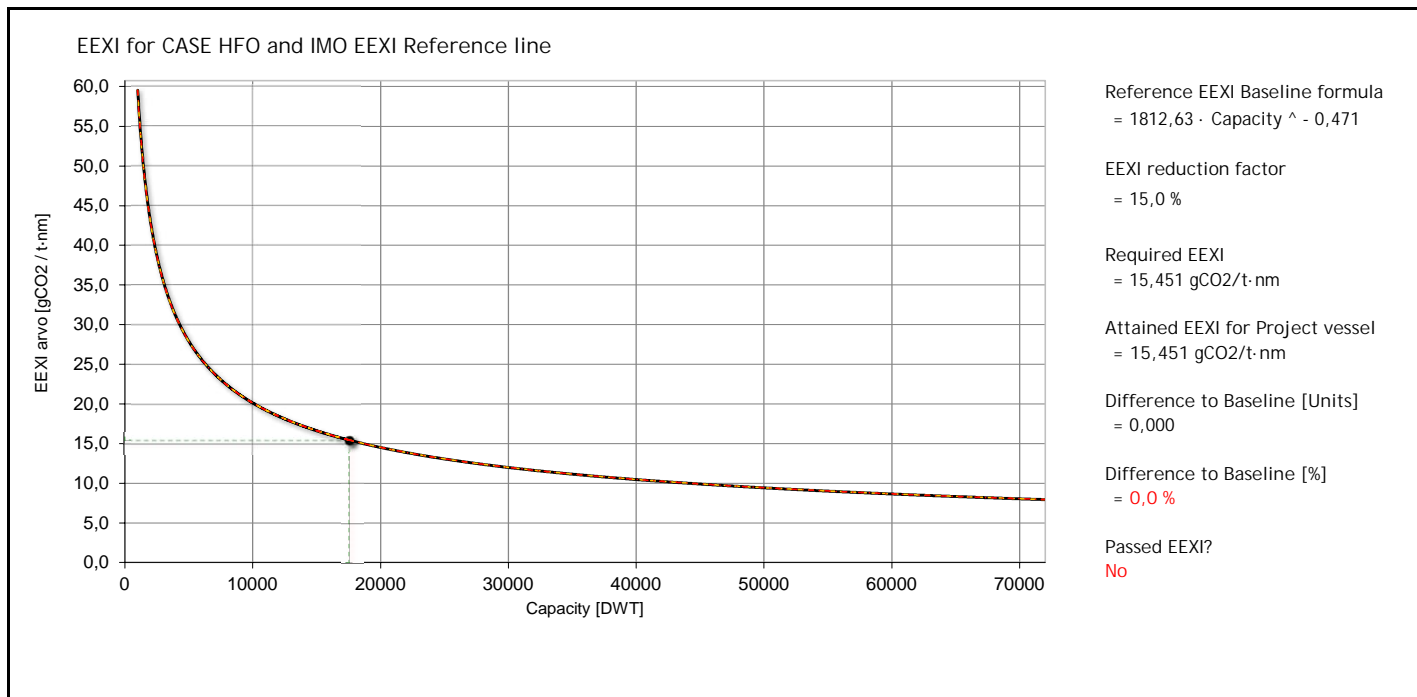
EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[ME \text{ emissions}] + [AE \text{ \&/OR PTO emissions}] + [PTI \text{ emissions} - \text{Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	5975581	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5975581 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 398741 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{6374322 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 18,642 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$



ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) DIPLOMITYÖ CASE HFO			EEXI Parameters
1.	ALUSTYYPPI		
1.1.	Alustyypin (Ship type)	Ro-ro cargo vehicle carrier	<i>Baseline</i> = 1812,63 · Capacity ^{-0,471}
1.2.	Koneisto (Machinery type)	Mechanic	
1.3.	Aluksen status (EEDI / EI-EEDI)	EEDI-applied ship	
2.	POLTTOAINE		
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Heavy fuel oil (HFO)	<i>C_{FME}</i> = 3,114
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FME_pilot}</i> = 3,206
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Heavy fuel oil (HFO)	<i>C_{FAE}</i> = 3,114
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FAE_pilot}</i> = 3,206
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	1,000	<i>f_{DF}</i> = 1,000
3.	SHIP SPEED		
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	17,94 kn	<i>V_{ref}</i> = 17,94
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn	<i>V_{ref,app}</i> = 0,00
			<i>V_{ref,avg}</i> = 19,89
4.	CAPACITY		
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT	<i>Capacity</i> = 17 525
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT	<i>Lightweight</i> = 20 400
4.3.	GT of ship	57400 GT	<i>GT</i> = 57 400
5.	POWERING		
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW	<i>P_{ME}</i> = 7 556
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW	<i>P_{PTD}</i> = 0
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW	<i>P_{PTI}</i> = 0
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %	
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	0 kW	<i>P_{eff}</i> = 0
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P _{ME}	0 kW	<i>P_{aeff}</i> = 0
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW	<i>P_{AE}</i> = 588
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW	
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / Pae calculations)	96,0 %	<i>P_{prop}</i> = 7 556
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (PAE,app)	0 kW	<i>P_{AE,app}</i> = 0
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	83 %	<i>MCR_{avg} or MPP_{avg}</i> = 13 058
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPlim	9103 kW	
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION		
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	189,5 g/kWh	<i>SFC_{ME}</i> = 189,5
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	<i>SFC_{ME_pilot}</i> = 0,0
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	<i>SFC_{AE}</i> = 218,0
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	<i>SFC_{AE_pilot}</i> = 0,0

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative technologies (Peff)	0,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 0,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_l	1,000 (dimensionless)	$f_l = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 0 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	0 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	790 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	48000 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	0 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 102184,98 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	2700 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{0 \text{ GJ (Gas)}}{0 \text{ GJ MDO} + 102184,98 \text{ GJ HFO}}$	$= 1,000$

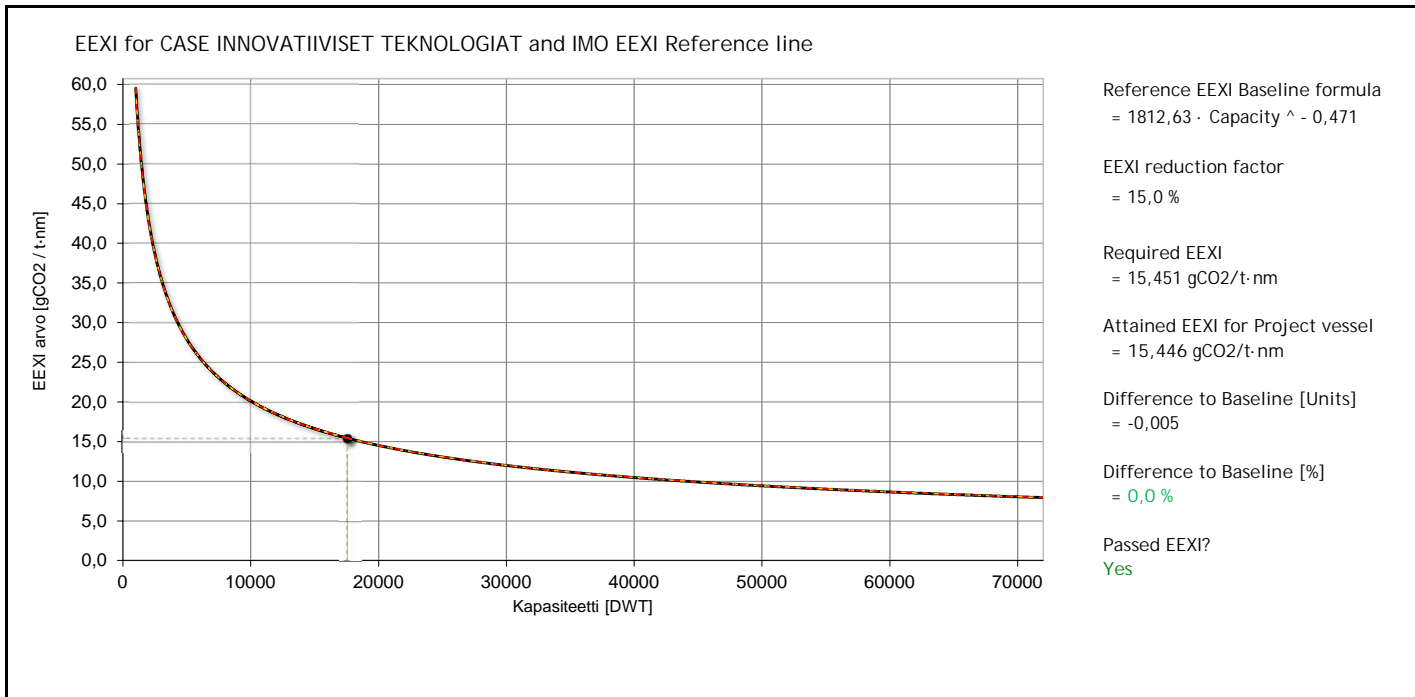
EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions - Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	4458389	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	314348	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{4458389 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 398741 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{314348 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{4857130 \text{ gCO}_2}{314348 \text{ t-nm}} = 15,451 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$



ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) DIPLOMITYÖ CASE INNOVATIIVISET TEKNOLOGIAT			EEXI Parameters
1.	ALUSTYYPPI		
1.1.	Alustyyppi (Ship type)	Ro-ro cargo vehicle carrier	$Baseline = 1812,63 \cdot Capacity^{-0,471}$
1.2.	Koneisto (Machinery type)	Mechanic	
1.3.	Aluksen status (EEDI / EI-EEDI)	EEDI-applied ship	
2.	POLTTOAINE		
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Heavy fuel oil (HFO)	$C_{FME} = 3,114$
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)	$C_{FME_pilot} = 3,206$
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Heavy fuel oil (HFO)	$C_{FAE} = 3,114$
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)	$C_{FAE_pilot} = 3,206$
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	1,000	$f_{DF} = 1,000$
3.	SHIP SPEED		
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	19,51 kn	$V_{ref} = 19,51$
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn	$V_{ref,app} = 0,00$
			$V_{ref,avg} = 19,89$
4.	CAPACITY		
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT	$Capacity = 17\ 525$
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT	$Lightweight = 20\ 400$
4.3.	GT of ship	57400 GT	$GT = 57\ 400$
5.	POWERING		
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW	$P_{ME} = 10\ 125$
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW	$P_{PTO} = 0$
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW	$P_{PTI} = 0$
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %	
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	1850 kW	$P_{eff} = 1\ 850$
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P_{ME}	0 kW	$P_{aeff} = 0$
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW	$P_{AE} = 588$
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW	
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / Pae calculations)	96,0 %	$P_{prop} = 10\ 125$
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (PAE,app)	0 kW	$P_{AE,app} = 0$
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	75 %	$MCR_{avg} \text{ or } MPP_{avg} = 13\ 058$
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPlim	13500 kW	
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION		
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	189,5 g/kWh	$SFC_{ME} = 189,5$
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	$SFC_{ME_pilot} = 0,0$
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	$SFC_{AE} = 218,0$
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	$SFC_{AE_pilot} = 0,0$

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative tehnologies (Peff)	1,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 1,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_i	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 0 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	0 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	790 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	48000 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	0 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 102184,98 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	2700 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{0 \text{ GJ (Gas)}}{0 \text{ GJ MDO} + 102184,98 \text{ GJ HFO}}$	$= 1,000$

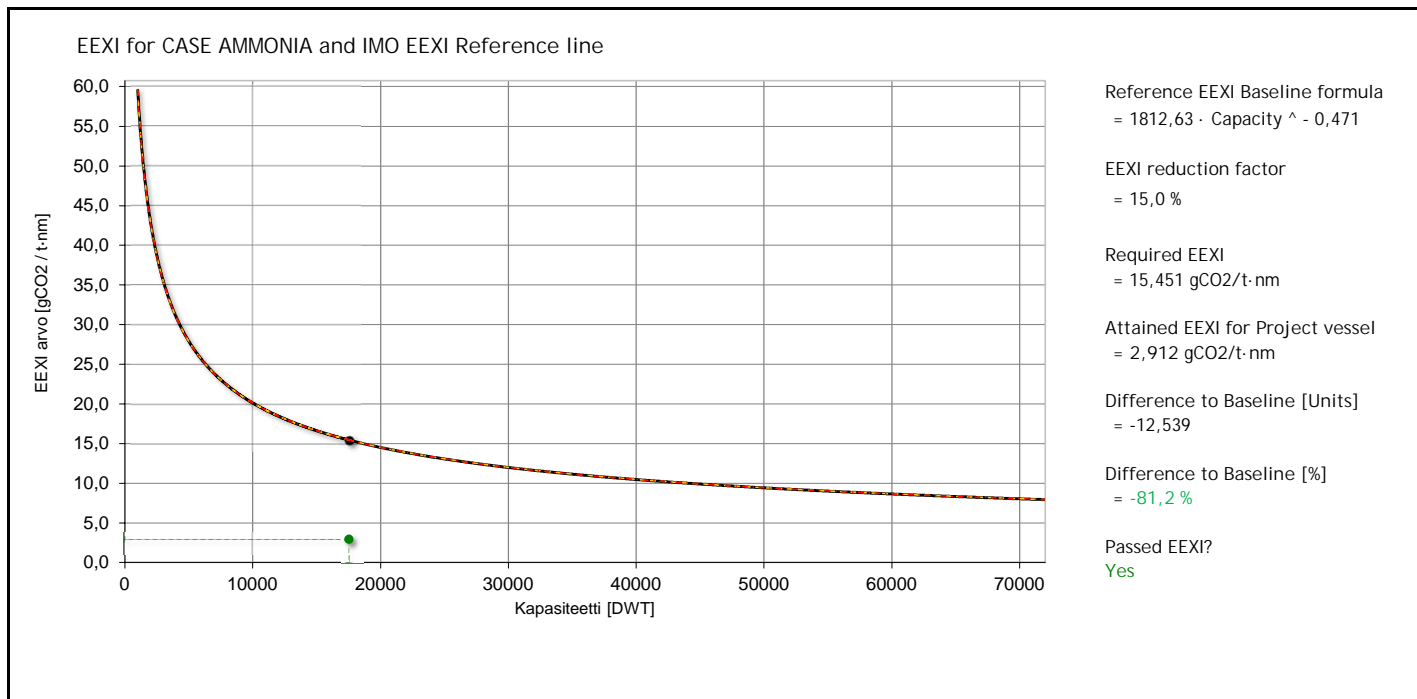
EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions - Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	5974588	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	398741	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	1091653	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5974588 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 398741 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 1091653 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = \frac{5281676 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 15,446 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$		



ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) for DIPLOMITYÓ CASE AMMONIA		EEXI Parameters
1.	SHIP TYPE	
1.1.	Ship type	Ro-ro cargo vehicle carrier
1.2.	Machinery type	Mechanic
1.3.	Ship status	EEDI-applied ship
2.	FUEL	
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Ammonia
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Ammonia
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	0,629
3.	SHIP SPEED	
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	19,51 kn
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn
4.	CAPACITY	
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT
4.3.	GT of ship	57400 GT
5.	POWERING	
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	0 kW
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P _{ME}	0 kW
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / P _{ae} calculations)	96,0 %
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (P _{AE,app})	0 kW
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	75 %
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPIim	13500 kW
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION	
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	368,2 g/kWh
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	18,0 g/kWh
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh
6.x.x.	Specific MDO consumption of main engine running in liquid mode (at 75% MCR + tolerance)	178,4 g/kWh
6.x.x.	Specific MDO consumption of auxiliary engine running in liquid mode (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh
		$Baseline = 1812,63 \cdot Capacity^{-0,471}$ $C_{FME} = 0$ $C_{FME_pilot} = 3,206$ $C_{FAE} = 0$ $C_{FAE_pilot} = 3,206$ $f_{DF} = 1,000$ $V_{ref} = 19,51$ $V_{ref,app} = 0,00$ $V_{ref,avg} = 19,89$ $Capacity = 17\,525$ $Lightweight = 20\,400$ $GT = 57\,400$ $P_{ME} = 10\,125$ $P_{PTO} = 0$ $P_{PTI} = 0$ $P_{eff} = 0$ $P_{aeoff} = 0$ $P_{AE} = 588$ $P_{prop} = 10\,125$ $P_{AE,app} = 0$ $MCR_{avg} \text{ or } MPP_{avg} = 13\,058$ $SFC_{ME} = 368,2$ $SFC_{ME_pilot} = 18,0$ $SFC_{AE} = 0,0$ $SFC_{AE_pilot} = 218,0$ $SFC_{ME\ DF\ liq} = 178,4$ $SFC_{AE\ DF\ liq} = 218,0$

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative technologies (Peff)	0,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 0,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_i	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 61998,9 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	4300 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	791 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	18600 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 36508,5 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	1000 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	0 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{61998,9 \text{ GJ (Gas)}}{36508,5 \text{ GJ MDO} + 0 \text{ GJ HFO}}$	$= 0,629$

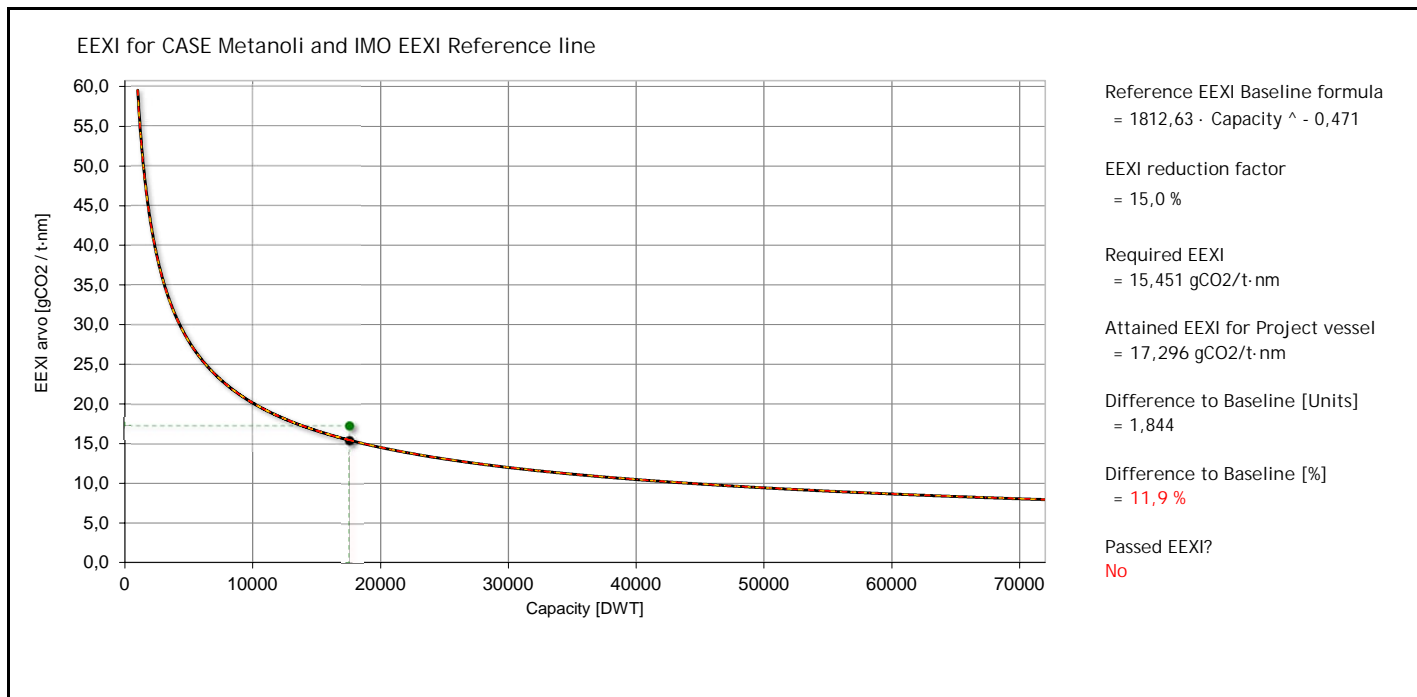
EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions - Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	585219	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	410521	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{585219 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410521 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{995740 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 2,912 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$



ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) DIPLOMITYÖ CASE Metanolli			EEXI Parameters
1.	ALUSTYYPPI		
1.1.	Alustyyppi (Ship type)	Ro-ro cargo vehicle carrier	<i>Baseline</i> = 1812,63 · Capacity ^{-0,471}
1.2.	Koneisto (Machinery type)	Mechanic	
1.3.	Aluksen status (EEDI / EI-EEDI)	EEDI-applied ship	
2.	POLTOAINE		
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Methanol	<i>C_{FME}</i> = 1,375
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FME_pilot}</i> = 3,206
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Methanol	<i>C_{FAE}</i> = 1,375
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FAE_pilot}</i> = 3,206
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	1,000	<i>f_{DF}</i> = 1,000
3.	SHIP SPEED		
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	19,51 kn	<i>V_{ref}</i> = 19,51
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn	<i>V_{ref,app}</i> = 0,00
			<i>V_{ref,avg}</i> = 19,89
4.	CAPACITY		
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT	<i>Capacity</i> = 17 525
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT	<i>Lightweight</i> = 20 400
4.3.	GT of ship	57400 GT	<i>GT</i> = 57 400
5.	POWERING		
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW	<i>P_{ME}</i> = 10 125
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW	<i>P_{PTO}</i> = 0
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW	<i>P_{PTI}</i> = 0
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %	
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	0 kW	<i>P_{eff}</i> = 0
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P _{ME}	0 kW	<i>P_{aeff}</i> = 0
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW	<i>P_{AE}</i> = 588
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW	
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / Pae calculations)	96,0 %	<i>P_{prop}</i> = 10 125
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (PAE,app)	0 kW	<i>P_{AE,app}</i> = 0
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	75 %	<i>MCR_{avg} or MPP_{avg}</i> = 13 058
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPlim	13500 kW	
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION		
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	369,1 g/kWh	<i>SFC_{ME}</i> = 369,1
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	11,2 g/kWh	<i>SFC_{ME_pilot}</i> = 11,2
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	<i>SFC_{AE}</i> = 0,0
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	<i>SFC_{AE_pilot}</i> = 218,0
6.x.x.	Specific MDO consumption of main engine running in liquid mode (at 75% MCR + tolerance)	180,1 g/kWh	<i>SFC_{ME DF liq}</i> = 180,1
6.x.x.	Specific MDO consumption of auxiliary engine running in liquid mode (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	<i>SFC_{AE DF liq}</i> = 218,0

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative technologies (Peff)	0,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 0,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_l	1,000 (dimensionless)	$f_l = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 1540,66 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	100 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	790 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	19900 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	0 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	0 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{1540,66 \text{ GJ (Gas)}}{0 \text{ GJ MDO} + 0 \text{ GJ HFO}}$	$= 1,000$

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions - Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	5503497	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	410571	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{5503497 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410571 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{5914068 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 17,296 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$



ENERGY EFFICIENCY EXISTING SHIP INDEX (EEXI) DIPLOMITYÖ CASE LNG			EEXI Parameters
1.	ALUSTYYPPI		
1.1.	Alustyyppi (Ship type)	Ro-ro cargo vehicle carrier	<i>Baseline</i> = 1812,63 · Capacity ^{-0,471}
1.2.	Koneisto (Machinery type)	Mechanic	
1.3.	Aluksen status (EEDI / EI-EEDI)	EEDI-applied ship	
2.	POLTOAINE		
2.1.a	Fuel used when determining SFOC, main engines	Liquefied natural gas (LNG)	<i>C_{FME}</i> = 2,75
2.1.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, main engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FME_pilot}</i> = 3,206
2.2.a	Fuel used when determining SFOC, auxiliary engines	Liquefied natural gas (LNG)	<i>C_{FAE}</i> = 2,75
2.2.b	Pilot fuel used with LNG when determining SFOC, auxiliary engines	Diesel/gas oil (MGO)	<i>C_{FAE_pilot}</i> = 3,206
2.3.	Calculated fDF factor for ships equipped with dual fuel engines	1,000	<i>f_{DF}</i> = 1,000
3.	SHIP SPEED		
3.1.	Ship speed (consistent to 75% MCR+PTI and summer draft, disregard seamargins)	19,51 kn	<i>V_{ref}</i> = 19,51
3.2.	Approximated ship speed	0,00 kn	<i>V_{ref,app}</i> = 0,00 <i>V_{ref,avg}</i> = 19,89
4.	CAPACITY		
4.1.	Capacity of ship (tonnage at summer draft)	17525 DWT	<i>Capacity</i> = 17 525
4.2.	Lightweight of ship	20400 LWT	<i>Lightweight</i> = 20 400
4.3.	GT of ship	57400 GT	<i>GT</i> = 57 400
5.	POWERING		
5.1.	Total installed main engine MCR power	13500 kW	<i>P_{ME}</i> = 10 125
5.2.	Installed power take out from main engine (100% of rated electrical output power of installed shaft generators)	0 kW	<i>P_{PTO}</i> = 0
5.3.	Installed power take in on propeller shaft(s)	0 kW	<i>P_{PTI}</i> = 0
5.4.	Efficiency, Shaft Motor (PTI only)	91,3 %	
5.5.	Innovative mechanical energy efficient technology reduction @ 75% MCR	0 kW	<i>P_{eff}</i> = 0
5.6.	Innovative electrical energy efficient technology reduction @ P _{ME}	0 kW	<i>P_{aeff}</i> = 0
5.7.	Calculational auxiliary engine power	588 kW	<i>P_{AE}</i> = 588
5.8.	Required AE power to supply normal maximum sea load (Excluding reefer sockets, cargo pumps, etc.)	0 kW	
5.9.	Generator Efficiency (PTI / DE / Pae calculations)	96,0 %	<i>P_{prop}</i> = 10 125
5.10.	Approximated power of auxiliary engines (PAE,app)	0 kW	<i>P_{AE,app}</i> = 0
5.11.	Engine load point for EEXI calculation (83% or 75%)	75 %	<i>MCR_{avg} or MPP_{avg}</i> = 13 058
5.12.	Limited installed shaft/engine power, MCRlim or MPPlim	13500 kW	
6.	SPECIFIC FUEL CONSUMPTION		
6.1.a	Specific fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	165,6 g/kWh	<i>SFC_{ME}</i> = 165,6
6.1.b	Specific pilot fuel consumption of main engines (at 75% MCR + tolerance)	3,8 g/kWh	<i>SFC_{ME_pilot}</i> = 3,8
6.2.a	Specific fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	0,0 g/kWh	<i>SFC_{AE}</i> = 0,0
6.2.b	Specific pilot fuel consumption of auxiliary engines (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	<i>SFC_{AE_pilot}</i> = 218,0
6.x.x.	Specific MDO consumption of main engine running in liquid mode (at 75% MCR + tolerance)	180,1 g/kWh	<i>SFC_{ME DF liq}</i> = 180,1
6.x.x.	Specific MDO consumption of auxiliary engine running in liquid mode (at 50% MCR + tolerance)	218,0 g/kWh	<i>SFC_{AE DF liq}</i> = 218,0

7. POWER CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
7.1.	Ship ice class (Finnish-Swedish)	No ice class	$f_j = 1,000$
7.2.	Ship length between perpendiculars (required for ice class or RoRo calculations)	190,0 m	
7.3.	Shuttle tankers between 80 000 - 160 000 DWT & with propulsion redundancy Parameters required for Ro-Ro cargo and passenger ships correction factor, f_{jRoRo} :	Not effective	$f_m = 1$
7.4.	Breadth, B_s	32,0 m	
7.5.	Summer load line draught, d_s	10,0 m	
7.6.	Volumetric displacement, ∇	37000 m ³	
8. CAPACITY CORRECTION FACTOR FOR SHIP SPECIFIC DESIGN ELEMENTS			
8.1.	Bulk carriers or tankers built in accordance with Common Structural Rules (YES or NO)	Not effective	
8.2.	Capacity factor for any technical/regulatory limitation on capacity (Calculated for ice-classed vessels)	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
9. DECREASE OF SPEED IN REPRESENTATIVE SEA CONDITIONS			
9.1.	Coefficient for decrease of speed in representative sea conditions	1,000 (dimensionless)	$t_w = 1,000$
10. AVAILABILITY OF INNOVATIVE TECHNOLOGIES			
10.1.	Availability factor for innovative technologies (Peff)	0,000 (dimensionless)	$t_{eff} = 0,000$
11. CUBIC CAPACITY CORRECTION FACTOR			
11.1.	Cubic capacity correction factor	1,000 (dimensionless)	$f_c = 1,000$
12. GENERAL CARGO SHIPS : CRANES & CARGO RELATED GEAR CORRECTION FACTOR			
12.1.	Cranes and cargo-related gear correction factor for GenCargo ships, f_i	1,000 (dimensionless)	$f_i = 1,000$
13. PRIMARY FUEL CORRECTION FACTOR FOR SHIPS EQUIPPED WITH DUAL FUEL ENGINES (ME & AE), f_{DF}			
13.2.	Gas fuel parameters		$E_{GAS} = 3716,16 \text{ GJ}$
	Total net gas fuel capacity V_{gas}	100 m ³	
	Density of gas fuel ρ_{gas}	790 kg/m ³	
	Filling rate for gas fuel tanks K_{gas}	0,980 (dimensionless)	
	Low calorific value of gas fuel in kJ/kg	48000 kJ/kg	
13.3.	MDO fuel parameters		$E_{MDO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net MDO fuel capacity V_{MDO}	0 m ³	
	Density of MDO fuel ρ_{MDO}	900 kg/m ³	
	Filling rate for MDO fuel tanks K_{MDO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of MDO	42700 kJ/kg	
13.4.	HFO fuel parameters		$E_{HFO} = 0 \text{ GJ}$
	Total net HFO fuel capacity V_{HFO}	0 m ³	
	Density of HFO fuel ρ_{HFO}	991 kg/m ³	
	Filling rate for HFO fuel tanks K_{HFO}	0,950 (dimensionless)	
	Low calorific value of HFO fuel	40200 kJ/kg	
$f_{DF} = \frac{(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}{\sum(V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{LIQUID} + (V \cdot \rho \cdot K \cdot LCV)_{GAS}}$		$= \frac{3716,16 \text{ GJ (Gas)}}{0 \text{ GJ MDO} + 0 \text{ GJ HFO}}$	$= 1,000$

EEXI LASKENTA (ENERGY EFFICIENCY DESIGN INDEX)			
EEXI =	$\frac{[\text{ME emissions}] + [\text{AE \&/OR PTO emissions}] + [\text{PTI emissions - Innovative electric energy generation (reduced CO2)}] - [\text{Innovative mechanical energy generation (reduced CO2)}]}{\text{Transport Work}}$		
ME_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	4733209	[ME emissions from primary fuel]
ME_CO ₂ (liquid) =	$fj \cdot PME \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	0	[ME emissions from secondary fuel]
AE_CO ₂ (primary) =	$fj \cdot PME \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid}) =$	410571	[AE + PTO emissions, primary fuel]
AE_CO ₂ (liquid) =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot fDF \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot fDF$	0	[AE + PTO emissions, secondary fuel]
PTI - AE_EEE =	$(0.75 \cdot PPTO \cdot (1 - fDF) \cdot (CFME_{liquid} \cdot SFCME_{liquid})) + ((PAE - 0.75 \cdot PPTO) \cdot (1 - fDF) \cdot (CF$	0	[PTI emissions & Innovative electric energy generation]
ME_EEE =	$(fj \cdot PPTI - feff \cdot PAE_{eff}) \cdot (CFAE \cdot SFCAE + CFAE_{pilot} \cdot SFCAE_{pilot}) =$	0	[Innovative mechanical energy generation]
Transport work =	$feff \cdot Peff \cdot (CFME \cdot SFCME + CFME_{pilot} \cdot SFCME_{pilot}) =$	341942	[Transport work & correction factors]
EEXI =	$\frac{4733209 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 + 410571 + 0 \text{ gCO}_2 + 0 \text{ gCO}_2 - 0 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}}$	=	$\frac{5143780 \text{ gCO}_2}{341942 \text{ t-nm}} = 15,043 \text{ gCO}_2/\text{t-nm}$

