

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma
Kandidaatintyö

**RAHTILAIVALIIKENTEEN
KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖJEN VÄHENTÄMINEN**

Reducing greenhouse gas emissions in cargo shipping

Työn tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka
Työn ohjaaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo

Lappeenrannassa 13.12.2018
Henri Mikkonen

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
LUT School of Energy Systems
Ympäristötekniikan koulutusohjelma

Henri Mikkonen

Rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentäminen

Kandidaatintyö

2018

39 sivua, 7 taulukkoa, 11 kuvaa ja 2 liitettä.

Tarkastaja: Professori, TkT Risto Soukka

Ohjaaja: Apulaisprofessori, TkT Ville Uusitalo

Hakusanat: kasvihuonekaasu, laivaliikenne, päästöt, rahti
Keywords: greenhouse gas, shipping, emissions, cargo

Tämän työn tavoitteena on tunnistaa potentiaalisia ratkaisuja rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseen nyt ja tulevaisuudessa. Aiheen ymmärtämiseksi selvitetään rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen lähteet sekä niihin vaikuttavat tekijät. Työssä esitellään erilaisia energiatehokkuuden parantamiskeinoja ja vaihtoehtoisia polttoaineita, ja empiirissä osassa niitä verrataan case – esimerkin avulla. Välittömiä päästövähennyksiä voidaan saavuttaa matkanopeutta hidastamalla, sääreititystä käyttämällä sekä optimoimalla alusten moottoria ja muuta voimalinjaa. Alusten koolla ja alustyyppillä on selvä vaikutus rahtiyksikkökohtaisiin päästöihin, ja rahtiliikenteessä tulisi pyrkiä mahdollisimman suuriin ja maksimaalisella täyttöasteella operoitaviin laivoihin. Siirtymällä raskaasta polttoöljystä puhtaampiin fossiilisiin polttoaineisiin kuten nesteytettyyn maakaasuun, voidaan leikata alusten rikki-, typpi- ja hiukkaspäästöjä mutta kasvihuonekaasupäästöt pysyvät nykyisellä tasolla. Biomassasta tuotetuilla polttoaineilla voidaan vähentää merkittävästi kasvihuonekaasupäästöjä, mikäli biomassa on kestävästi tuotettua. Merkittävämmät päästövähennykset vaativat vaihtoehtoisten polttoaineiden kehittämistä ja investointeja infrastruktuuriin. Regulaatiolla voidaan ohjata kohti vähähiilisempiä ja energiatehokkaampia ratkaisuja.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO	4
1 JOHDANTO.....	5
2 LAIVALIIKENTEEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT	7
2.1 Rahtilaivaliikenteen päästöt	8
2.2 Laivaliikenteen päästöjen kehitys tulevaisuudessa	10
3 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN RAHTILAIVOISSA.....	12
3.1 Matkanopeuden vähentäminen.....	13
3.2 Sääreititys	17
3.3 Laivakoon vaikutus päästöihin.....	19
4 VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET LAIVALIIKENTEESSÄ	22
5 CASE: LAIVARAHTIKONTIN KULJETTAMISEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT SHANGHAISTA ROTTERDAMIIN.....	26
5.1 Case – vertailun lähtötilanne	26
5.2 Case – vertailun tulokset	28
6 JOHTOPÄÄTÖKSET	32
7 YHTEENVETO	34
LÄHTEET	37

LIITTEET

Liite 1. Case – vertailun lähtötiedot

Liite 2. Case – vertailun tulokset

SYMBOLILUETTELO

Lyhenteet

GWP	Global Warming Potential, lämmityspotentiaalikerroin
HFO	Heavy Fuel Oil, Raskas polttoöljy
ICAO	International Civil Aviation Organization, kansainvälinen siviili-ilmailujärjestö
IMO	International Maritime Organization, kansainvälinen merenkulkujärjestö
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change, hallitustenvälinen ilmastonmuutos-paneeli
EEDI	Energy Efficiency Design Index
EU	Euroopan Unioni
KHK	kasvihuonekaasu
LBG	Liquified Biogas, nesteytetty biokaasu
LNG	Liquified Natural Gas, nesteytetty maakaasu
MEPC	Marine Environment Protection Committee, merellisen ympäristön suojelukomitea

Yksiköt

CO ₂ -ekv	hiilidioksidiekvivalentti
MJ	megajoule

Alkuaineet ja yhdisteet

CH ₄	metaani
CO ₂	hiilidioksidi
NO _x	typen oksidi
SO ₂	rikkidioksidi
SO _x	rikin oksidi

1 JOHDANTO

Viimeisten vuosikymmenien aikana globaali väestönkasvu ja vaurastuminen on johtanut tuontitavaran kulutuksen kasvuun, ja merikuljetukset ovat yhä merkittävämmässä osassa globaalissa taloudessa. Esimerkiksi Euroopan Unionissa lähes neljä viidesosaa tuontitavarasta kuljetetaan meriteitse. Tulevaisuudessa globaali talouskasvu ja erityisesti kehittyvien maiden bruttokansantuotteiden kehittyminen ajaa kaupan kasvua ja rahdin välimatkojen pidentymistä. (European Environment Agency (EEA) 2017, 11, 13–14.) Laivaliikenne tuottaa tällä hetkellä 2,5–3,5 % globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä. Laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöt ovat kuitenkin kasvaneet EU-alueella 22 % vuosien 1990 ja 2017 välillä, ja lentoliikenteen jälkeen kyseessä on suurin sektori päästöjen kasvulla mitattuna. Laivaliikenne tuottaa hiilidioksidipäästöjen lisäksi myös lukuisia lyhytikäisiä päästöjä ilmaan, kuten rikin ja typen oksideja. (EEA 2017, 33–34.)

Rahtilaivat käyttävät tyypillisesti polttoaineenaan raskasta polttoöljyä. Vaikka energiatehokkuuteen pyrkiviä kansainvälisiä standardeja on asetettu, paljon niitäkin tehokkaampia päästövähennyksiä voitaisiin saavuttaa. Laivojen verrattain pitkän käyttöiän takia siirtyminen energiatehokkaampiin ja ympäristöystävällisempiin ratkaisuihin on kuitenkin hidasta. Laivaoperaattorien siirtymistä uudempaan teknologiaan hidastaa vaihtoehtoisten polttoaineiden rajoittunut infrastruktuuri, ja infrastruktuurin kehittymistä hidastaa vaihtoehtoisten polttoaineiden kysynnän hidastuminen. Kiristyvien normien myötä tavoitteita päästöjen vähentämiseksi on, mutta ei vielä tiedetä, miten vähennyksiä voitaisiin laajamittaisesti toteuttaa. Alalla tarvitaan lisää tietoa uusista energiatehokkuutta ja ympäristöystävällisyyttä edistävästä ratkaisusta, jotta laivaoperaattorit kohdistavat investointejaan päästöjä vähentäviin ratkaisuihin. (EEA 2017, 6–7.)

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan keinoja rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen. Työn tavoitteena on tunnistaa potentiaalisia ratkaisuja rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen pienentämiseen tulevaisuudessa. Työn tutkimuskysymyksinä ovat, millä keinoilla nykyteknologialla on vähentää rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä, ja kuinka tehokkaita keinot ovat. Tutkimusmenetelminä käytetään kirjallisuuskatsausta sekä case-

tarkastelua, joiden avulla voidaan vastata tutkimuskysymyksiin. Kirjallisuuskatsauksella tunnistetaan erilaiset päästöjen vähennyskeinot ja tarkastellaan niiden vaikuttavuutta kilometrillä kuljetettua rahtitonnia kohti. Case-tarkastelussa vertaillaan kasvihuonekaasupäästöjen vähennyskeinoja esimerkkitapauksen avulla.

Teoriaosassa selvitetään rahtilaivaliikenteen aiheuttamat kasvihuonekaasupäästöt ja niiden lähteet sekä rahtilaivaliikenteen osuus kasvihuonekaasupäästöistä globaalilla tasolla. Tämän jälkeen tunnistetaan keinoja kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen erilaisilla teknisillä ratkaisuilla ja tarkastellaan niiden edellytyksiä. Empiirisessä osassa lähestytään aihetta case-tarkastelun kautta. Case-tarkastelussa tutkitaan, kuinka paljon eri ratkaisuilla voidaan vaikuttaa rahtiyksikön päästöihin, kun rahti kuljetetaan Kiinasta Eurooppaan. Lopuksi vertaillaan tuloksia ja pohditaan, mitä keinoja kannattaisi käyttää rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen.

2 LAIVALIIKENTEEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT

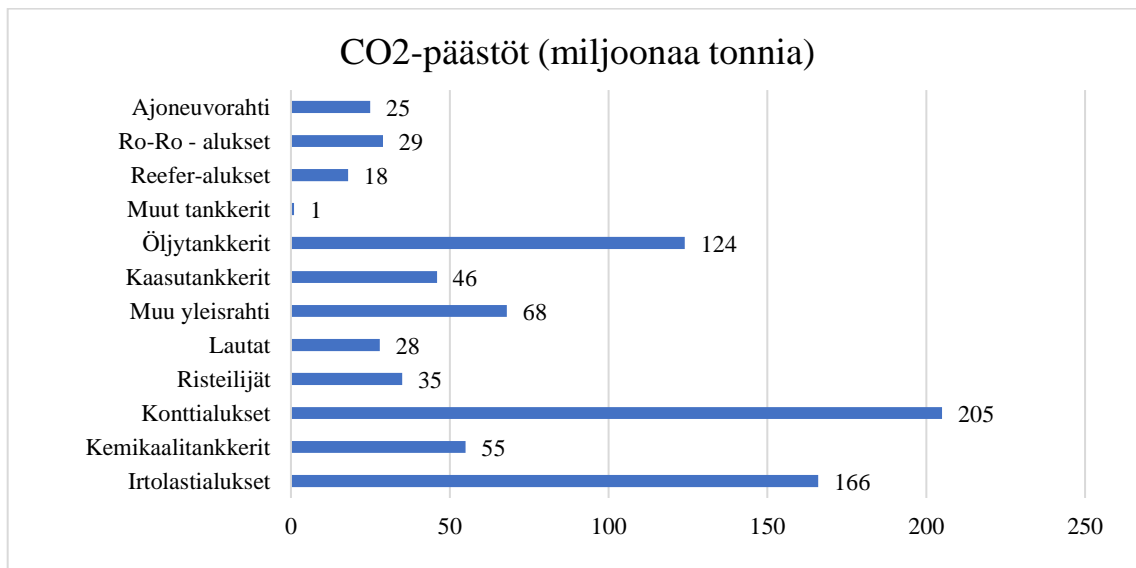
Laivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöt ovat vuosittain noin miljardi tonnia hiilidioksidiekvivalentteina mitattuna. Vuosien 2007 ja 2012 väliltä arvioitu keskiarvo laivaliikenteen hiilidioksidipäästöille ilmakehään oli 1 015 miljoonaa tonnia vuodessa kaikelle laivaliikenteelle, arviolta 3,1 % ihmisen aiheuttamista globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Kansainvälisen laivaliikenteen osuus päästöistä oli 846 miljoonaa tonnia, joka oli 2,6 % globaaleista hiilidioksidipäästöistä. Globaaleista kasvihuonekaasupäästöistä laivaliikenne tuotti noin 2,8 % mitattuna hiilidioksidiekvivalentteina, käyttäen 100 vuoden lämmityspotentiaalikerroimia kasvihuonekaasuille, jotka koostuivat pääosin hiilidioksidista, metaanista ja dityppioksidista. Hiilidioksidiekvivalentteina arvioituna laivaliikenteen päästöt olivat 1 036 miljoonaa tonnia, josta kansainvälisen laivaliikenteen osuus oli 866 miljoonaa tonnia. (Smith et al. 2015, 32.)

Laivaliikenteessä suosituksen raskaan polttoöljyn käytöstä aiheutuu hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasupäästöjen ohella myös huomattavia typpi- ja rikkipäästöjä ilmaan niiden eri oksidienä. Vuosien 2007-2012 datasta arvioidut vuosittaisen päästöt ovat noin 21 miljoonaa tonnia typpidioksidia ja 11 miljoonaa tonnia rikkidioksidia. Laivaliikenteen typpi- ja rikkipäästöt ilmaan edustavat arviolta noin 12 prosenttia maailmanlaajuisista ihmisen aiheuttamista typpi- ja rikkipäästöistä. Rikin ja typen oksidien päästöt aiheuttavat paikallisia vaikutuksia kuten happamoitumista ja negatiivisia terveysvaikutuksia, sekä epäsuoria vaikutuksia alailmakehän otsonin muodostumisessa. (Smith et al. 2015, 33.)

Laivaliikenteen suurista rikki-, typpi- ja hiukkaspäästöistä huolimatta kasvihuonekaasupäästöjen osalta rahtia kannattavinta kuljettaa meriteitse (Brynolf et al. 2014, 86). Kilometrillä kuljetettua rahtitonnin kohti rahtilaivoilla on pienimmät CO₂ – päästöt, keskimäärin 5 - 15 g CO₂/t km. Rautateillä kuljetettuna päästöt ovat rahtitonnin kohti keskimäärin kaksi kertaa suuremmat. Maanteillä kuljetettu rahti aiheuttaa viisi kertaa suuremmat CO₂ – päästöt tonnilta. Lentorahti on ylivoimaisesti suurin kasvihuonekaasupäästöjen aiheuttaja rahtitonnilta. Lentorahdin päästöt ovat noin 600 g CO₂/t km. (McKinnon & Piecyk 2010, 20.)

2.1 Rahtilaivaliikenteen päästöt

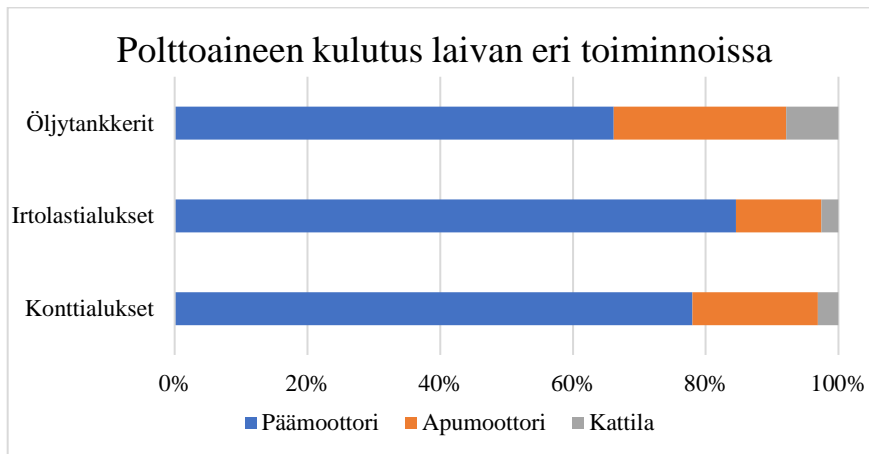
Laivaliikenteen päästöistä valtaosa aiheutuu rahtiliikenteestä. Kuvassa 1 on esitetty kansainvälisen laivaliikenteen arvioidut hiilidioksidipäästöt vuonna 2012 laivatyypeittäin, Smith et al. (2015, 41) raportin mukaisesti. Suurimmat päästöt aiheuttavat konttialukset, ns. bulkkirahtia eli irtolastia kuljettavat alukset sekä öljytankkerit. Nämä kolme alustyyppiä aiheuttavat yli 60 %, kansainvälisen laivaliikenteen päästöistä. Konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit toisaalta toimittavat noin 85 % kaikesta laivaliikenteen kuljetuksista rahtitonneina mitattuna. Kuvassa 1 ei ole esitetty joitain alustyyppiä, kuten kalastusaluksia tai huoltoaluksia (esimerkiksi hinaajat). Näiden alustyyppien päästöt ovat kuitenkin verrattain pieni osuus koko laivaliikenteen päästöistä, ja polttoaineen kulutuksen perusteella verrattavissa lauttojen ja risteilijöiden päästöihin. Rahtilaivaliikenne kokonaisuudessaan vastaa yli 90 prosentista sektorin päästöistä, matkustajaliikenteen ja kalastuksen jäädessä kukin muutamaan prosenttiin. (Smith et al. 2015, 42.)



Kuva 1. Kansainvälisen laivaliikenteen päästöt laivatyypeittäin vuonna 2012 (Smith et al. 2015, 41).

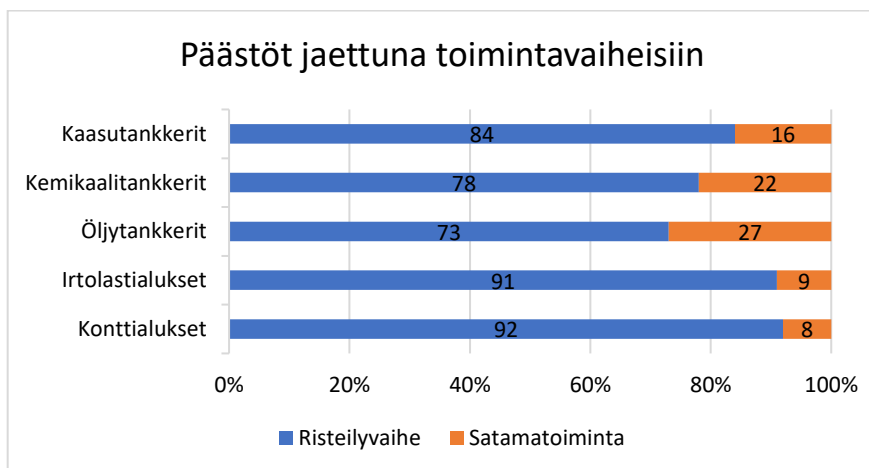
Rahtilaivojen päästöjen lähteitä etsiessä voidaan tarkastella dataa polttoaineen kulutuksesta laivojen eri toimintoihin. Polttoaineen kulutus voidaan jakaa suhteessa päämoottorin (laivan päävoimanlähde), apumoottorien (laivan sähköntuotanto) ja kattiloiden (höyryn tuotanto) välille. Jokaisella kuvassa 1 esitetystä laivatyyppistä päämoottori kuluttaa valtaosan polttoaineesta.

Kuvassa 2 esitetään polttoaineen kulutus laivan eri toimintojen suhteen kolmen tärkeimmän laivatyyppin osalta, käyttäen vuoden 2012 IMO:n keräämää dataa aktiivisista aluksista. (Smith et al. 2015, 41-42.)



Kuva 2. Polttoaineen kulutuksen suhde aluksen eri toimintojen välillä (Smith et al. 2015, 42).

Rahtilaivojen päästöt voidaan jakaa myös kuljetusoperaation eri toimintavaiheisiin, itse matkantekoon eli risteilyyn ja satamatoimintoihin kuten luotsaukseen, ankkurointiin, lastaukseen ja purkuun. Kuvassa 3 esitetään CO₂-päästöjen suhde risteily- ja satamatoimintavaiheen välillä. Tankkereiden merkittävämät päästöt satamatoimintavaiheessa selittyvät suuremmalla apumoottorien tarpeella rahdin purkuvaiheissa. (Olmer et al. 2017, 14-15.)



Kuva 3. Päästöjen suhde operaation eri toimintavaiheiden välillä (Olmer et al. 2017, 15).

Rahtilaivojen energiatehokkuuteen vaikuttavat laivatyypin, sekä erityisesti sen kokoluokan, moottorien teho ja operatiiviset parametrit kuten risteilynopeus. Todelliseen energiatehokkuuteen matkayksikössä kuljetettuja rahtitonnetta kohti vaikuttaa kapasiteetin ohella aluksen täyttöaste. Toisin sanoen, täydellä kapasiteetilla kulkeva alus on kuljetettuun rahtiin nähden energiatehokkaampi kuin vajaasti lastattu laiva. (Olmer et al. 2017, 18.) Aluksen kokoluokan ja matkanopeuden merkitystä energiatehokkuuteen käsitellään tarkemmin kappaleessa 3.

2.2 Laivaliikenteen päästöjen kehitys tulevaisuudessa

Kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO:n skenaariot ennustavat, että ilman päästöjä rajoittavia toimenpiteitä laivaliikenteen hiilidioksidipäästöt kasvaisivat 50 – 250 %. Näihin skenaarioihin vaikuttavat tulevaisuuden talouskasvun sekä energiankäytön kehitys. Laivaliikenteen muiden päästöjen odotetaan kasvavan samassa suhteessa hiilidioksidipäästöjen kanssa, joitain poikkeuksia lukuun ottamatta. Metaanipäästöjen odotetaan kasvavan johtuen todennäköisesti lisääntyvästä nesteytetyn maakaasun (LNG) käytöstä polttoaineena. Typen oksidien päästöjen odotetaan kasvavan hiilidioksidipäästöjä vähemmän johtuen uudempien moottorityyppien kasvavasta osuudesta liikenteessä, ja hiukkas- sekä rikkipäästöjen odotetaan vähenevän johtuen tiukentuvista määräyksistä. (Smith et al. 2015, 4.)

Vuonna 2020 asettuu voimaan IMO:n asetus polttoaineen rikkipitoisuuden rajoittamisesta. Asetuksen tavoitteena on merkittävästi rajoittaa laivojen SO_x – päästöjä, jolla olisi positiivisia ympäristö- ja terveysvaikutuksia erityisesti satamien läheisyydessä. Vuodesta 2020 lähtien laivojen on käytettävä polttoainetta, jonka rikkipitoisuus on korkeintaan 0,5 massaprosenttia. Vaihtoehtoisesti rikkipitoisempaa polttoainetta käyttävien laivojen voivat poistaa pakokaasuistaan rikki-dioksidia tarkoitukseen kehitetyillä rikkipesureilla, jotta SO_x – päästöt putoisivat vaaditulle tasolle. (IMO 2018.)

Yhdistyneiden Kansakuntien ilmaston lämpenevistä käsittelevän sopimuksen vuoden 1997 Kioton pöytäkirjassa IMO:lle osoitettiin vastuu kasvihuonekaasupäästöjen rajoittamisesta

kansainvälisessä laivaliikenteessä. IMO esitti kuitenkin vasta vuonna 2011 käyttöön ensimmäiset pakolliset vaatimukset khk – päästöjen rajoittamiselle lanseerattuaan EEDI – nimisen työkalun. (ICCT 2018, 1.) EEDI (Energy Efficiency Design Index) eli energiatehokkuuden suunnitteluindeksi on IMO:n asettama työkalu päästöjen vertailuarvojen luomiseksi uusille aluksille. Indeksi on laskettu laivan päästöjen ja kantavuuden suhteen. Yleisesti päästöt ilmoitetaan grammaa hiilidioksidipäästöjä merimaililla tai kilometrillä kuljetettua rahtitonnia kohti. Indeksien laskennassa otetaan huomioon monia ominaisuuksia kuten laivan moottorien kokoja, kantavuutta ja laivan energiajärjestelmiä kuten generaattoreita. (Walsh & Bows 2012, 129.) Indeksi tuli pakolliseksi uusille laivoille vuodesta 2013 lähtien (EEA 2017, 11).

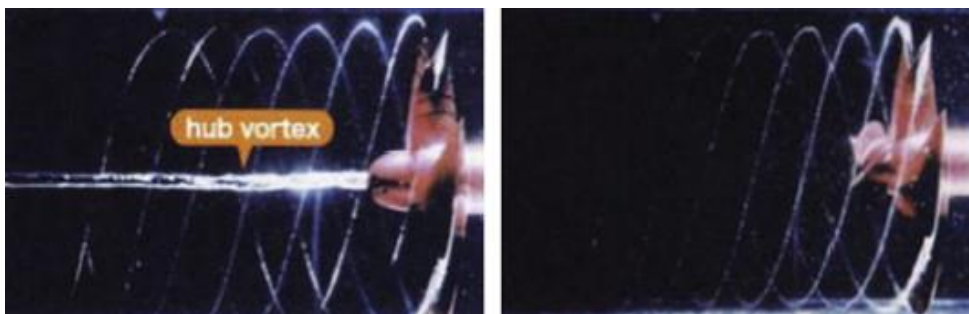
Vuonna 2015 kansainvälinen laiva- ja lentoliikenne jätettiin pois Pariisin ilmastosopimuksen piiristä. Lentoliikenteelle luotiin oma sopimus IMO:n sisärjestö ICAO:n toimesta, jolloin laivaliikenteestä tuli ainoa merkittävä sektori, joka ei ollut kansainvälisten ilmastosopimusten piirissä. Vuonna 2018 hyväksyttiin IMO:n ensimmäinen strategia kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Strategian tavoitteena on vähentää sektorin hiili-intensiteettiä 70 % sekä kasvihuonekaasupäästöjä vähintään 50 % vuoteen 2050 mennessä verrattuna vuoden 2008 tasoon. (ICCT 2018, 1–2.)

IMO:n strategia sisältää keinoja, joita implementoimalla päästövähennystavoitteet voitaisiin saavuttaa. Eri keinot voidaan jakaa lyhyelle, pitkälle ja keskipitkälle aikavälille. Lyhyen aikavälin keinoihin kuuluvat esimerkiksi EEDI:n uudet vaiheet, energiatehokkuuden mittausjärjestelmät ja matkanopeuden vähentäminen. Lyhyen aikavälin keinot on tarkoitus implementoida vuosien 2018 ja 2023 välillä. Keskipitkän (2023 – 2030) aikavälin mahdollisina keinoina ovat vaihtoehtoisten, vähähiilisempien polttoaineiden käyttöönotto-ohjelmat, markkinaehtoiset keinot sekä laajemmat energiatehokkuusstandardit. Pitkän aikavälin keinoina vuoden 2030 jälkeen on mainittu hiilivapaiden ja uusiutuvien polttoaineiden kehittäminen ja säädökset niiden käytölle. (ICCT 2018, 4.)

3 ENERGIATEHOKKUUDEN PARANTAMINEN RAHTILAIVOISSA

Tässä kappaleessa käsitellään rahtilaivaliikenteessä käytettäviä, energiatehokkuutta parantavia ratkaisuja. Matkanopeuden vähentäminen ja sääreititys ovat yleistyneet alalla vuoden 2008 finanssikriisin jälkeen taloudellisten syiden takia, ja ne ovat olleet merkittävässä roolissa tähän asti alalla tehdyistä energiatehokkuusparannuksista (Armstrong 2013, 1–2). Kappaleessa 3.3 tarkastellaan laivatyyppien eri kokoluokkien vaikutusta rahtiyksikkökohtaisiin päästöihin. Energiatehokkuutta pystytään parantamaan lisäksi laivan voimalinjaan vaikuttavin teknisin ratkaisuin, joita on toteutettu alhaisillakin investointikustannuksilla tehokkaasti (Armstrong 2013, 3).

Energiatehokkuutta parantaviin teknisiin ratkaisuihin kuuluvat esimerkiksi päämoottorin säätäminen puristussuhdetta tai turbohdinta muuttamalla sekä potkurin vaihtaminen paremmin työntövoimaa tuottavaan. Päämoottorin toimintaa voidaan seurata moottorinohjausjärjestelmillä lähes reaaliaikaisesti ja näin optimoida eri parametrejä pyrkien parhaaseen mahdolliseen hyötysuhteeseen. Laivan potkurin tehokkuutta voidaan parantaa esimerkiksi potkurin päätykappaleeseen asennettavilla ”evillä”, joka ehkäisee potkurin navan aiheuttamaa pyörrettä muuttaen sen työntövoimaksi. Potkurin päätykappaleen muuttaminen voi parantaa polttoainetehokkuutta jopa 3-5 %. Kuvassa 4 on havainnollistettu potkurin päätykappaleen vaikutusta, jossa vasemmalla on perinteisen mallinen päätykappale, joka aiheuttaa pyörrettä (hub vortex), sekä oikealla evillä varustettu potkuri. (Armstrong 2013, 4.)



Kuva 4. Propellin päätykappaleen suunnittelun vaikutus (Armstrong 2013, 4).

3.1 Matkanopeuden vähentäminen

Matkanopeuden vähentäminen on yleisesti käytössä oleva tapa vähentää rahtialusten polttoaineen kulutusta ja siten myös kasvihuonekaasupäästöjä. Nopeuden hidastaminen on myös yksi harvoista keinoista vaikuttaa lyhyellä tähtämellä laivaliikenteen hiilidioksidipäästöihin. Polttoaineen kulutus vähenee, koska laivan moottorien energian tarve laskee. Nyrkkisääntönä voidaan pitää, että laivan vaadittu teho kasvaa nopeuden suhteen kuutioissa. Esimerkiksi 10 % nopeuden vähentäminen laskee tehon tarvetta 27 %. Tehon tarpeen lasku johtuu laivan liikettä vastustavien voimien, kuten kitkavastuksen pienenemisestä. Koska nopeuden laskiessa laiva kulkee lyhyemmän välimatkan aikayksikössä, vaadittu energia matkaa kohti lasketaan neliöissä, esimerkkitapauksessa 19 %. (Faber et al. 2017, 5.)

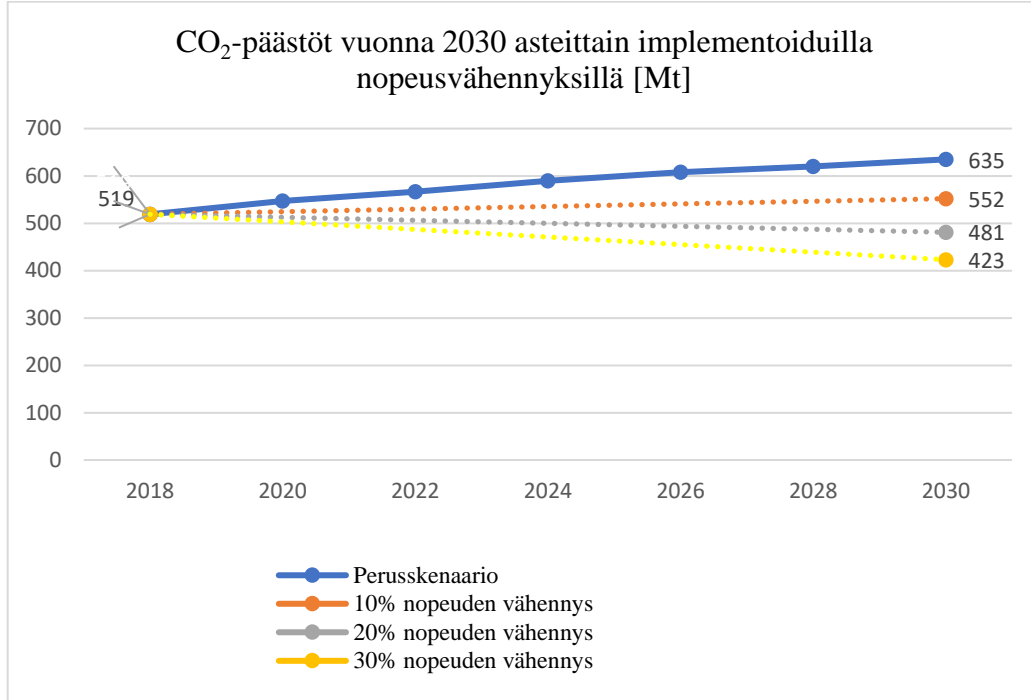
Laivojen vaaditulle teholle on olemassa meriympäristön suojelukomitea MEPC:n (Marine Environment Protection Committee) määrittelemät alarajat, jotta laivat pystyisivät selviytymään huonoista sääoloista. Moottorien tehorajoitukset eivät liity suoraan matkanopeuteen, sillä laivat voivat käyttää moottorejaan vajaalla teholla. Keskimääräiset matkanopeudet ovatkin usein alle laivojen rakenteellisen suunnittelunopeuden. Matkanopeuden vähentämisessä voidaan tehdä oletus, että laiva täyttää minimirajat moottorien tehon suhteen, ja että matkanopeuden vähentäminen tapahtuu moottorien kuormitusta alentamalla. (Faber et al. 2017, 6.)

Vajaalla kuormituksella ajaessa moottorit toimivat usein huonommalla hyötysuhteella, jolloin polttoainetta kuluu enemmän suhteessa tuotettuun tehoon. Faber et al. (2017, 6) esittävät tutkimuksessaan esimerkin dieselmoottorista, jolla ajetaan suunnittelunopeutta 33 % hitaammalla nopeudella. Moottori toimii hitaammalla nopeudella 25 % nimellisteholla, normaalin 85 % nimellistehon sijaan. Alempi nimellisteho aiheuttaa 12 % laskun moottorin hyötysuhteessa, jolloin esimerkissä polttoainesäästö per aikayksikkö olisi 67 %. Ilman moottorin hyötysuhteen laskua polttoainetta säästyisi 71 %. Moottorien hyötysuhdetta alemmalla kuormituksella voidaan parantaa monin tavoin, kuten muuttamalla polttoaineen syöttöä tai moottorin puristussuhdetta. Uudemmat moottorit ovatkin vanhoja paremmin optimoituja alemmille kuormituksille. Yleisesti voidaan kuitenkin todeta, että alemmilla kuormituksilla moottorin tehon tarve vähenee kuitenkin

huomattavasti hyötysuhdetta enemmän, joten moottorien kuormitusten vähentäminen on perusteltua. (Faber et al. 2017, 6–7.)

Teoriassa rahtilaivaliikenteen matkanopeuden vähentäminen ei vaadi uutta teknologiaa tai erityisiä investointeja, mutta aktiivisessa käytössä olevien alusten määrää pitää lisätä, jos halutaan suorittaa sama määrä kuljetustyötä kuin lähtötilanteessa. Faber et al. (2017, 7) selvittivät tutkimuksessaan päästövähennyspotentiaalia laivaliikenteen nopeuden vähentämisessä lyhyellä ja keskipitkällä aikavälillä. Laskelmissa on otettu huomioon alusten määrän lisääntyessä alusten käytön aikaiset päästöt, mutta ei alusten rakentamisen päästöjä, niiden ollessa verrattain pieni osuus laivan elinkaaren päästöistä. Laskelmissa oletettiin, että kuljetusmäärät pysyvät lähtötilanteen tasolla ja laivojen satamissa vietetty aika ei muutu. Lisäksi apumoottorien tehokkuuteen nopeuden vähentämisen ei arvioitu vaikuttavan. (Faber et al. 2017, 8.) Analyysi katsoi järjestyksessä kolme suurinta laivatyyppiä sekä kuljetusmäärien että päästöjen suhteen; konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit. Tutkijat esittävät, että nopeuden vähentäminen globaalisti voisi kääntää koko rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöt laskuun nopealla tähtäimellä. (Faber et al. 2017, 3.)

Nopeuden vähentämisen päästövaikutuksia verrataan talousvetoiseen perusskenaarioon, jonka laskenta perustuu siihen, että tulevaisuuden päästökehitys jatkuu aiempien vuosien kaltaisena, eikä uusia päästönormeja aseteta (IPCC 2018). Mikäli konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit maailmanlaajuisesti hidastaisivat vauhtiaan 10, 20 tai 30 %, niiden hiilidioksidipäästöt voisivat keskimäärin laskea järjestyksessä 13, 24 tai 33 %. Kuvassa 5 kuvataan hiilidioksidipäästöjen vähennyspotentiaalia, mikäli nopeuden hidastaminen toteutettaisiin maailmanlaajuisesti ja asteittain vuoteen 2030 mennessä (Faber et al. 2017, 9.)



Kuva 5. Tutkittujen laivatyyppien CO₂-päästöt eri nopeusskenaarioilla vuonna 2030 (Faber et al. 2017, 9).

Tutkittujen laivatyyppien potentiaali rajoittaa hiilidioksidipäästöjään nopeutta vähentämällä eroavat toisistaan. Konttialuksilla ja irtolastialuksilla on suurempi päästöjen vähennyspotentiaali verrattuna öljytankkereihin. Öljytankkereiden pienempi potentiaali päästöjen vähentämiseen selittyy verrattain suurella apumoottorien ja kattiloiden osuudella polttoainenkulutuksessa ja keskimäärin pidemmällä satamassaoloajalla. Taulukossa 2 on eritelty laivatyyppien keskimääräiset globaalit päästövähennyspotentiaalit eri nopeusskenaarioilla. (Faber et al. 2017, 9-10.)

Taulukko 2. CO₂-päästöjen suhteelliset vähennyspotentiaalit (Faber et al. 2017, 10).

Laivatyyppi	Nopeuden vähennys [%]		
	10%	20%	30%
Konttialukset	13%	23%	32%
Irtolastialukset	15%	28%	38%
Öljytankkerit	10%	18%	24%
Yhteensä	13%	24%	33%

Mikäli maailmanlaajuisesti rahtilaivaliikenteessä halutaan suorittaa sama määrä kuljetustyötä hitaammilla kuljetusnopeuksilla, olisi aktiivisessa käytössä olevien laivojen määrää lisättävä 6, 13 tai 23 % riippuen vähennetäänkö nopeutta 10, 20 vai 30 %. Laivatyyppien ja niiden eri kokoluokkien välillä uusien alusten tarve vaihtelee suuresti. Uusien alusten tarve on arvioitu taulukossa 3, jossa esitetään alusten määrän kasvun tarve eri laivatyypeille eri nopeusskenaarioilla. Lisäystarpeen vaihtelu aluskokojen välillä on esitetty suluissa. (Faber et al. 2017, 10–11.)

Taulukko 3. Laivojen määrän vaadittu kasvu vuoteen 2018 nähden (Faber et al. 2017, 11).

	10% nopeuden vähennys	20% nopeuden vähennys	30% nopeuden vähennys
Konttialukset	7% (6-8%)	15% (14-18%)	26% (23-30%)
Irtolastialukset	6% (5-6%)	13% (12-14%)	22% (21-25%)
Öljytankkerit	5% (5-8%)	12% (11-17%)	21% (18-29%)
Yhteensä	6%	13%	23%

Jos pois aktiivikäytöstä olevat laivat otetaan rahtiliikennekäyttöön, tarve uusille aluksille vähennee taulukon 3 laivatyypeille yhteenlasketuista arvoista noin kaksi prosenttia (Faber et al. 2017, 10). Välittömiä päästövähennyksiä, globaali kuljetuskysyntä täyttäen, voitaisiin saavuttaa ottamalla käyttöön olemassa olevia aluksia, jotka eivät ole aktiivikäytössä. Tilanteessa, jossa aktiiviseen rahtilaivastoon otetaan seisonnassa olevat kontti- ja irtolastialukset sekä öljytankkerit, voisivat saman kokoluokan laivat hidastaa matkanopeuttaan. Kesällä 2017 noin 3,5 % konttialuksista, prosentti irtolastialuksista ja 2,5 % öljytankkereista oli ollut seisonnassa, osuuksien riippuessa alusten kokoluokasta. Mikäli edellä mainitut alukset tuotaisiin aktiiviseen käyttöön, voisivat saman tyyppiset alukset hidastaa vauhtiaan kuljetuskapasiteetin muutoin kasvaessa täyttämään kuljetuskysyntää. Taulukossa 4 on arvioitu tutkittujen laivatyyppien globaaleja, välittömiä päästövähennyspotentiaaleja ottamalla seisonnassa olevat alukset aktiivikäyttöön. Nopeuden vähennyspotentiaali on esitetty skaalalla, joka riippuu aluksen kokoluokasta. Välittömästi voitaisiin vähentää arvioiden mukaan 20 megatonnia hiilidioksidipäästöjä tutkitut alustyypit globaalisti yhteenlaskettuna. (Faber et al. 2017, 8.)

Taulukko 4. Välittömät päästövähennyspotentiaalit (Faber et al. 2017, 8.)

	2018 CO ₂ -päästöt BAU- skenaariolla [Mt]	2018 CO ₂ -päästöt seisonnassa olevia aluksia käyttämällä nopeuden hidastamiseen	Nopeuden vähennys- potentiaali	CO ₂ -päästöjen vähennyspotentiaali	
Konttialukset	227	215	0-8%	12 Mt	12%
Irtolastialukset	190	186	0-3%	4 Mt	4%
Öljytankkerit	112	108	1-22%	4 Mt	4%
Yhteensä	529	509		20 Mt	4%

Tilastoista nähdään, että rahtialusten matkanopeutta hidastamalla voidaan saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, joiden toteuttamiseen ei tarvita uutta teknologiaa. Päästövähennysten taso riippuu kuitenkin monesta tekijästä, kuten matkan ja aluksen ominaispiirteistä sekä kuljetuksessa mukana olevien osapuolien, kuten tilaajan ja satamien, vaatimuksista. (Faber et al. 2017, 10.)

3.2 Sääreititys

Sääreititys tai reitin optimointi tarkoittaa merimatkan suunnittelua säätilojen ja merivirtojen mukaan. Tarkoituksena on suunnitella reitti ottaen huomioon matkan turvallisuus, kustannukset ja päästöt. Sääreititys optimoi matkan pituuden ja käytetyn ajan reititysjärjestelmien avulla. Onnistuneesti optimoitu reitti säästää polttoainetta, estää sään aiheuttamia vahinkoja alukselle ja pitää matkan aikataulussa. Säästämällä polttoaineen kulutuksessa, voidaan myös matkan kasvihuonekaasupäästöjä vähentää. Sääreitityksen onnistumista arvioidaan vertaamalla sääreitityksen perusteella suunniteltua reittiä lyhimmän mahdollisen matkan reittiin laivan operointikustannusten perusteella. Mitatut operointisäästöt voivat olla jopa 3%, johtuen säästetyistä polttoainekuluista. (Armstrong 2013, 4.)

Sääreititys pohjautuu laivojen suorituskyvyn heikkenemiseen huonoissa sääolosuhteissa johdun aluksen rungon vastuksesta ja ei-toivotuista aluksen liikkeistä. Laivan toivottua liikettä vastustavat tekijät voidaan jakaa kitkavastukseen, jäännösvastukseen, aaltojen aiheuttamaan vastukseen ja tuulen aiheuttamaan vastukseen. Kitkavastus riippuu laivan nopeudesta, rungon vesirajan alapuolisesta koosta ja rungon pinnan ominaisuuksista. Jäännösvastus riippuu veden virtausprofiilista laivan ympärillä. Aallot aiheuttavat laivan liikkeeseen vaikuttavia voimia, ja tuuliolosuhteet vaikuttavat laivan pinnan yläpuoliseen osaan, aiheuttaen lisää vastusvoimia. Vastusvoimat aiheuttavat lisääntyvää tehontarvetta, joka johtaa polttoaineen kulutuksen kasvuun. Sääreitityksellä pyritään minimoimaan matkan polttoaineen kulutus, ottaen kuitenkin huomioon esimerkiksi matkan aikatauluihin liittyvät vaatimukset ja niiden kustannukset. (Perera & Soares 2017, 2.)

Sääreititysjärjestelmiä käytetään integroituna aluksen komentosiltajärjestelmään, jotka hyödynävät elektronisia kartta- ja informaatiojärjestelmiä (ECDISs) navigointiin. Sääreitityksessä hyödynnetään ennen matkaa kerättyjä sääennustetietoja, matkan aikana kerättyjä säätietoja sekä reitin laivaliikenteen tilannetietoja. Säätietoihin vaikuttavat sekä lyhyen aikavälin sääennusteet että pitkän aikavälin tiedot ilmasto-olosuhteista. Datamäärän lisääntyessä myös ennusteiden odotetaan tarkentuvan, vaikkakin säätilatietoihin liittyy aina epävarmuustekijöitä. Järjestelmä kerää sääennustetiedot kaupallisilta toimijoilta. Laivan kapteenilla on vastuu aluksen operoinnista, ja sääreititysjärjestelmät toimivat tukena matkan suorittamisessa. Sääreititystä on suositeltu pidemmille, yli 1500 merimailin matkoille avoimella merialueella. (Perera & Soares 2017, 1, 3.)

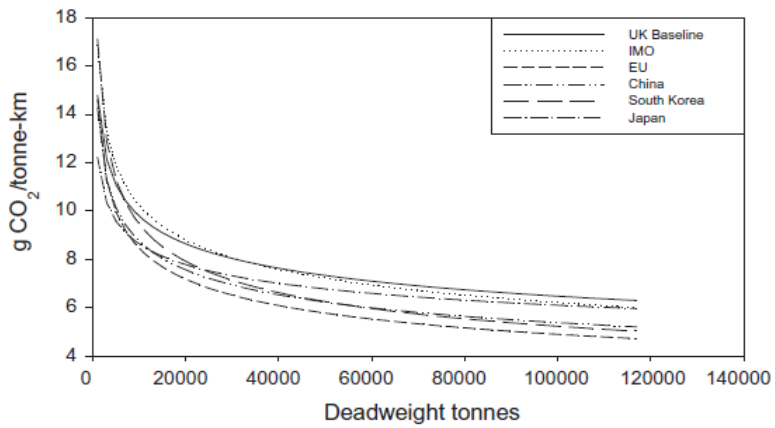
Sääreititysjärjestelmiä käytetään myös lähtö- ja saapumisaikojen säätelyyn, jotta matka voitaisiin suorittaa mahdollisimman hyvissä olosuhteissa. Alusten ja satamien välisessä kommunikaatiossa järjestelmiä voidaan hyödyntää välttämään päällekkäisyyksiä ja optimoimaan kustannuksia, kun useampien alusten optimaaliset reitit saadaan osapuolien tietoon. Tulevaisuudessa sääreititysjärjestelmien voidaan odottaa kehittyvän kohti sekä aluksen operatiivisen toiminnan että satamatoiminnan optimointia siten, että liikenne voidaan suorittaa turvallisesti ja halvemmalla, vähentäen polttoaineenkulutusta, viivästyksiä, riskejä ja kustannuksia. Optimaalisia

reititysjärjestelmiä voitaisiin käyttää päästöjen hallinnassa, jotta laivat pystyisivät toimimaan kiristyvien päästörajojen ja muiden säännösten puitteissa. (Perera & Soares 2017, 7.)

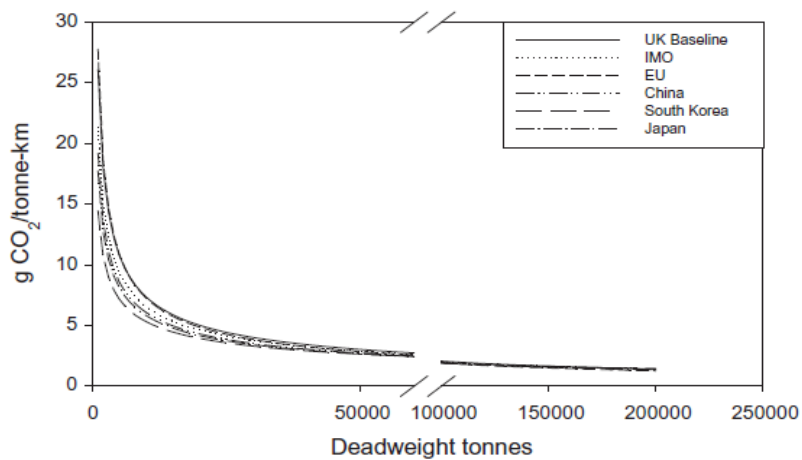
3.3 Laivakoon vaikutus päästöihin

Laivatyyppillä ja aluksen koolla on merkittävä vaikutus päästöihin. Eri laivatyyppien päästöjä esitetään yleisimmin merimaililla tai kilometrillä kuljetettua rahtitonnia kohti. IMO esittää päästökertoimia monille eri kokoisille ja tyyppisille aluksille. Kertoimet vaihtelevat isojen irtolastialusten 1,5 g CO₂/t km ja pienempien lauttatyyppisten alusten 55.2 g CO₂/t km välillä. Päästökertoimet vaihtelevat laajalti lähteestä ja elinkaarimallinuksissa tehdyistä rajauksista riippuen, ja käytettyjen tietokantojen eroista johtuen arvot ovat enemmän suuntaa-antavia kuin täysin keskenään vertailtavia. Ne kuitenkin kertovat laivatyyppin ja kokoluokan vaikutuksesta rahtikuljetusten päästöihin. (Walsh & Bows 2012, 128-129.)

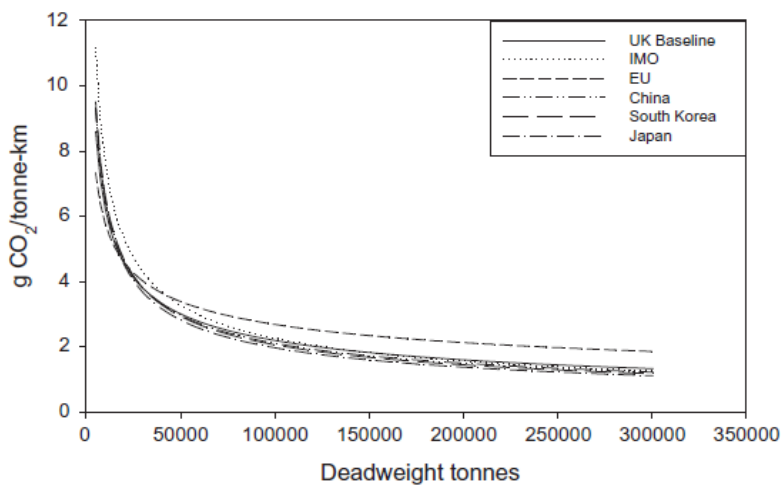
Walsh & Bows tutkimuksessaan (2012, 129) vertailivat globaalia dataa ja olemassa olevia tietokantoja Iso-Britannian satamista saatuihin rahtien päästötietoihin. Vertailussa käytettiin IMO:n EEDI-työkalua vertailuarvojen luomiseksi. Kuvissa 6, 7 ja 8 on esitetty laivatyyppi-kohtaisesti vertailun tuloksia. Iso-Britannian peruskäyrä (UK Baseline) kuvaa maan satamista saatujen tietojen perusteella laskettuja päästöjä eri kapasiteetin (deadweight tonnes) aluksille. IMO:n vertailukäyrä perustuu sen globaaleihin tilastoihin, ja lisäksi vertailukäyriä on esitetty uudempien, vuoden 2007 jälkeen rakennettujen alusten mukaan, valmistusmaihin jaoteltuna. (Walsh & Bows 2012, 129-130.)



Kuva 6. Konttialusten päästöjen suhde kapasiteettiin (Walsh & Bows 2012, 130).



Kuva 7. Irtolastialusten päästöjen suhde kapasiteettiin (Walsh & Bows 2012, 130).



Kuva 8. Öljytankkerien päästöjen suhde kapasiteettiin (Walsh & Bows 2012, 130).

Tässä työssä esitettäväksi valittiin suurimmat globaalit päästöt aiheuttavat laivatyytit; konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit. Näillä, kuten muillakin laivatyyteillä, sekä CO₂-päästöt kilometrillä kuljetettua rahtitonnia kohti, että laivan koon vaikutus niihin eroavat toisistaan. Trendi on kuitenkin kaikilla laivatyyteillä vastaavan tyyppinen, isommilla laivoilla yksikkökohtaiset päästöt ovat pienemmät. Laivojen koon kasvaessa ylimpiin kokoluokkiin päästöt pienenevät enää marginaalisesti, kun taas pienempien kokoluokkien välillä erot ovat suuria. Käyrän tasaantumiskohta, eli se kokoluokka, josta suurempaan kokoluokkaan siirtyessä rahtiyksikkökohtaiset päästöt pienenevät enää marginaalisesti, riippuu laivatyytistä. Konttialuksilla edellä mainittu kokoluokka on noin 30 000, irtolastialuksilla 40 000 ja öljytankkereilla 100 000 tonnia kapasiteettia. Päästöjen hallintaa tutkiessa laivan koolla on siis merkitystä, ja laivojen tulisi olla riittävän suuria. Laivatyyppikohtaiset ominaispiirteet ja kuljetettu matka pitää kuitenkin ottaa huomioon, rahdin laatu ja lähtö- sekä määränpääsatamat suurimpina rajoittavina tekijöinä. Lisäksi laivakokojen yläpäässä päästöjen pienentäminen aluskokoa kasvattamalla tuottaa vain marginaalista hyötyä. (Walsh & Bows 2012, 133-134.)

4 VAIHTOEHTOISET POLTTOAINEET LAIVALIIKENTEESSÄ

Rahtilaivaliikenteen polttoaineena on tyypillisesti käytetty raskasta polttoöljyä (HFO, Heavy Fuel Oil), jonka käytöstä aiheutuu sekä huomattavia kasvihuonekaasupäästöjä, että SO_2 - ja NO_x – päästöjä. IMO:n kiristyvien khk- sekä NO_x – päästövaatimusten myötä laivaliikennealan odotetaan siirtyvän vaihtoehtoisten polttoaineiden käyttöön. Pääosin siirtymää odotetaan puhtaammin palaviin fossiilisiin polttoaineisiin, kuten metaani- ja metanolituotteisiin. Polttoaineen käytön ympäristövaikutuksia arvioitaessa pitää ottaa huomioon sen käytön aiheuttamien päästöjen lisäksi sen koko elinkaaren aikaiset päästöt raaka-aineen hankinnasta ja jalostuksesta lähtien. (Brynolf et al. 2014, 86-87.)

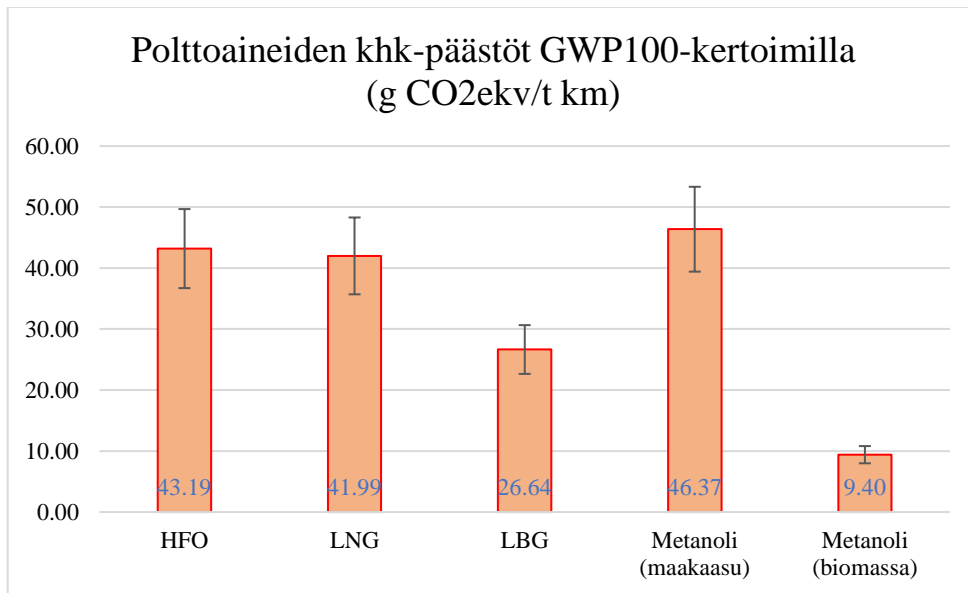
Vaihtoehtona raskaalle polttoöljylle on merikuljetusalalla erityisesti ollut kiinnostusta nesteytetyn maakaasun (LNG) käyttöön. LNG koostuu pääosin metaanista ja sitä on suosittu sen alhaisemman rikki- ja hiilipitoisuuden takia. Alhaisempien palamislämpötilojen takia LNG myös tuottaa raskasta polttoöljyä vähemmän NO_x -päästöjä. LNG:n käyttöä laivoissa on jo testattu, ja maailmalla on käytössä sillä kulkevia aluksia. Metanoli on myös potentiaalinen polttoaine meriliikenteeseen. Metanolia voidaan tuottaa syntetisoimalla maakaasusta tai biomassasta. Metanolilla on hyvin matala rikkipitoisuus ja sillä on myös erittäin alhaiset NO_x -päästöt. Metanoli on myös nesteytetyistä kaasuista poiketen standardiolosuhteissa nestemäistä, joten sitä on helppompaa käsitellä ja varastoida. Nesteytetty biokaasu (LBG) käyttäytyy polttoaineena nesteytetyn maakaasun tavoin ja sitä voidaan tuottaa puhdistettua biokaasua nesteyttämällä. (Brynolf et al. 2014, 87.)

Sähkömoottoreihin siirtyminen on nähty yleisesti tapana vähentää päästöjä muissa liikennemuodoissa, kuten maantieliikenteessä. Rahtilaivaliikenteen sähköistämistä estää kuitenkin laivojen massiivinen energiantarve, jonka täyttävät akut veisivät liikaa tilaa ja painoa pois rahtikapasiteetista. Uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön avulla valmistetuista synteettisistä polttoaineista odotetaan tulevaisuudessa käyttökelpoisia ratkaisuja rahtilaivaliikenteeseen. Näitä synteettisiä polttoaineita kuten synteettistä, nesteytettyä maakaasua tai vetyä voidaan käyttää esimerkiksi polttokennoteknologian avulla. (Horvath 2017, 11.) Polttokennot ovat vielä

kehitysvaiheessa, ja niiltä odotetaan hinnan laskua ja käyttöä parantamista, ennen kuin niitä voidaan käyttää laajemmin laivaliikenteessä. Polttokekkoteknologian kehittyessä ja kustannuksien laskiessa siitä odotetaan vartenotettavaa vaihtoehtoa fossiilisille polttoaineille tulevina vuosikymmeninä. (Horvath 2017, 15, 32.)

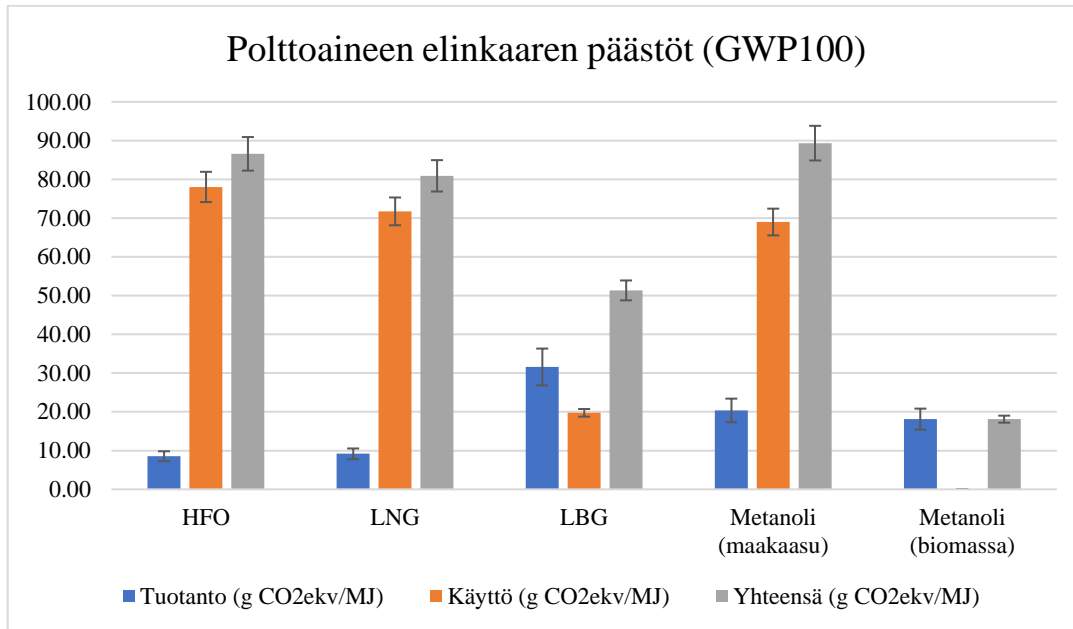
Brynolf et al. (2014, 88–89) vertailivat tutkimuksessaan elinkaari-inventaarion avulla raskasta polttoöljyä (HFO), nesteytettyä maakaasua (LNG), nesteytettyä biokaasua (LBG) ja metanolia. Metanoli jaettiin kahden tyyppiseen tuotteeseen, maakaasusta tuotettuun fossiiliseen sekä biomassasta tuotettuun uusiutuvaan polttoaineeseen. Polttoaineiden aiheuttamat päästöt jaettiin polttoaineen tuotannon (well-to-tank) ja käytön (tank-to-propeller) aikaansaamiin päästöihin. Päästöt laskettiin raaka-aineen hankinnasta polttoaineen jalostukseen, jakeluun ja varastointiin sekä lopulta palamiseen laivan polttomootorissa. Vertailun tuloksia tarkastellessa on huomiotava, että biopolttoaineiden päästöihin ei ole huomioitu mahdollisia maankäytön muutoksista aiheutuvia päästöjä ja biomassan polttamisesta aiheutuvien CO₂ – päästöjen päästökerroin on laskettu nollassa. Vertailun biopolttoaineiden tuotannossa on käytetty pajua ja metsäsektorin sivuvirtoja. (Brynolf et al. 2014, 93.) Toiminnallisena yksikkönä polttoaineiden vertailussa käytettiin kilometrin matkalla kuljetettua rahtitonnia ja alustyyppinä ro-ro-alusta (Roll-on/roll-off) eli ilman nosturia lastattavaa lauttaa, ja analyysin tulokset ovat Brynolf et al. (2014, 89) mukaan vertailukelpoisia myös muille alus- ja moottorityypeille marginaalisin eroin.

Kuvassa 9 vertailun tulokset on esitetty käyttämällä IPCC:n määrittämiä 100 vuoden lämmityspotentiaalikerroimia (GWP100) hiilidioksidille, metaanille ja typpioksidille (IPCC 2007). Khk-päästöt koostuvat vertailupolttoaineilla valtaosin hiilidioksidista. LNG- ja LBG – polttoaineiden päästöihin vaikuttavat kuitenkin merkittävästi myös CH₄ – päästöt, sillä sen lämmityspotentiaalikerroin on 25-kertainen hiilidioksidiin nähden. Näiden polttoaineiden CH₄ – päästöt johtuvat polttoprosessissa palamattomasta metaanista, joka vapautuu ilmaan. Laskettuihin päästöihin liittyy moottoritekniikasta ja polttoaineen tuotantotavoista sekä -alueesta riippuvaa vaihtelua, joka on havainnollistettu kuvassa virhemarginaaleilla. LBG:n korkeammat päästöt biometanoliin verrattuna selittyvät CH₄ – päästöjen lisäksi suuremmalla sähköenergian käytöllä kaasun tuotannossa ja nesteytyksessä. Sähköntuotannon päästöt on vertailussa laskettu eurooppalaisen keskiarvon mukaisesti. (Brynolf et al. 2014, 88.)



Kuva 9. Vertailun polttoaineiden khk-päästöt GWP100-kertoimilla. (Brynolf et al. 2014, 88).

Kuvassa 10 vertailun polttoaineiden elinkaaren päästöt on esitetty jaettuna tuotanto- (well-to-tank) ja käyttövaiheisiin (tank-to-propeller). Biopohjaisille polttoaineille tuotannon päästöt ovat suuremmassa roolissa, kun taas fossiilisilla polttoaineilla merkittävimmät päästöt tuotetaan käytön, eli polttomoottorin käynnin aikana. Biopohjaisilla polttoaineilla fossiilisista lähteistä syntyviä khk-päästöjä syntyy esimerkiksi raaka-aineen hankinnasta, käsittelystä ja tuotteen kuljetuksesta. (Brynolf et al. 2014, 92.) Biopolttoaineiden palaminen aluksen polttomoottorissa tuottaa myös CO₂ – päästöjä ilmaan, mutta niiden osalta lämmityspotentialikerroin on tässä vertailussa nolla, sillä Brynolf et al. (2014, 93) mukaan maankäytön muutosten vaikutuksesta hiilinieluihin ja polttoaineiden elinkaaren päästöjen laskentaan ei ole yhtenäistä linjaa. Mikäli biopolttoaineiden osalta biomassasta peräisin olevat CO₂ – päästöt laskettaisiin vertailuun mukaan päästökertoimella 1, olisivat sekä LBG:n että biometanolin päästöt jopa yli 200 g CO₂ekv/MJ. (Brynolf et al. 2014, 91).



Kuva 10. Polttoaineiden khk-päästöt jaettuna tuotanto- ja käyttövaiheeseen. (Brynolf et al. 2014, 91).

Vertailun tuloksien perusteella voidaan todeta, että nesteytettyllä maakaasulla tai maakaasusta tuotetulla metanolilla ei saavuteta tarpeellisia kasvihuonekaasupäästöjen leikkauksia. Näiden hyöty raskaaseen polttoöljyyn verrattuna koostuukin paikallisesti vaikuttavien ilmapäästöjen, kuten pienhiukkasten ja SO_x – päästöjen vähenemisestä. Biopohjaisia polttoaineita käyttämällä on kuitenkin potentiaalista saavuttaa myös kasvihuonekaasupäästöihin leikkauksia, joiden suuruus riippuu biomassan polttamisesta aiheutuvien hiilidioksidipäästöjen laskentatavasta ja todellisuudessa biomassan tuotannon kestävydestä. Metanolia voidaan tuottaa myös muilla menetelmillä, kuten hiilimonoksidista hydraamalla. Metanoli- ja nestekaasupohjaisia ratkaisuja verrattaessa suositeltavampi polttoainetyyppi riippuu valittavan moottoritekniikan hyötysuhteesta sekä käytettävissä olevasta polttoaineen jakeluinfrastruktuurista. On esimerkiksi harkittava nesteytettyjen kaasujen vaatimien suurien infrastruktuuri-investointien kannattavuutta, mikäli kasvihuonekaasupäästöjä voitaisiin leikata myös biometanolipohjaisilla polttoaineilla. (Brynolf et al. 2014, 93.)

5 CASE: LAIVARAHTIKONTIN KULJETTAMISEN KASVIHUONEKAASUPÄÄSTÖT SHANGHAISTA ROTTERDAMIIN

Tässä kappaleessa tarkastellaan rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistä case-esimerkin avulla. Tarkoituksena on vertailla Kiinasta Eurooppaan kuljetetun laivarahdin kasvihuonekaasupäästöjä eri skenaarioilla. Saapumissatamaksi on valittu Rotterdam, joka on EU:n ruuhkaisin rahtisatama sekä rahtitonneissa että konttiliikenteessä mitattuna (Euroopan komissio 2017, 67). Lähtösatamaksi asetettiin Kiinan ja samalla maailman ruuhkaisin rahtisatama, Shanghai (Slater, 2016). Laivatyyppi on valittu konttialus, sillä se edustaa yli puolta globaalia merikuljetuskapasiteetista ja on yleisin alustyyppi. (Euroopan komissio 2017, 98). Eri alustyyppijä ei tässä osiossa vertailla keskenään, sillä niiden kuljettamat tuotetyypit ovat hyvin erilaisia ja laivatyyppin valinta perustuu pääosin kuljetettavaan tuotteeseen (Walsh & Bows, 133).

5.1 Case – vertailun lähtötilanne

Lähtötilanteena vertailussa on käytetty GaBi-ohjelmistolla laskettua tilannetta, jossa rahtia kuljetetaan täyteen lastatulla konttialuksella, jonka kapasiteetti on 27 500 tonnia. Polttoaineenaan rahtialus käyttää EU:n alueella tuotettua raskasta polttoöljyä, jonka rikkipitoisuus on 1 %. Kasvihuonekaasupäästöt on laskettu 40-jalkaiselle merikontille, jota kuljetetaan 100 km. Merikontin paino on 3 084 kg ja siihen on lastattu 10 000 kg kulutustavaraa. Laivan täyttöaste on 100 %. Kokonaispäästöt tälle skenaariolle ovat 8,99 kg CO₂-ekvivalenttia. Tällainen perusskenaario edustaa kutakuinkin tyypillistä rahtikontin kansainvälistä merikuljetusta. (Uusitalo, sähköpostiviesti 23.11.2018.)

Vertailuskenaarioina käytetään kappaleessa 4 esitettyjen tulosten perusteella laskettuja elinkaaren kasvihuonekaasupäästöjä vaihtoehtoisille laivaliikenteen polttoaineille. Lisäksi arvioidaan päästöjä matkanopeutta hidastamalla kappaleessa 3.1 esitetyn perustein ja tarkastellaan laivan täyttöasteen vaikutusta case-tilanteeseen. Skenaarioiden khk-päästöt on laskettu sekä grammoina CO₂-ekvivalenteja kilometrillä kuljetettua rahtitonnia kohti, että case-tilanteen rahtikontille matkalla Shanghaista Rotterdamiin. Vertailun lähtötietoja on koottu taulukkoon 5, jossa

vertailuskenaarioiden vaikutus on esitetty perusskenaarioon verrattavina prosentteina. Tarkemmin case-laskennassa käytettyjä arvoja esitetään liitteessä I.

Taulukko 5. Case-vertailun lähtötilanne.

Case - vertailun lähtötilanne	
Perusskenaarion khk-päästöt [kg CO ₂ -ekv/100 km]	8.99
Rahtikontin kokonaispaino [kg]	13084
KHK-päästöt suhteessa raskaaseen polttoöljyyn [%]	
Raskas polttoöljy (HFO)	100
Nesteytetty maakaasu (LNG)	97
Nesteytetty biokaasu (LBG)	62
Metanoli (maakaasusta)	107
Metanoli (biomassasta)	22
KHK-päästöt suhteessa matkanopeuteen raskaalla polttoöljyllä [%]	
Normaalinopeudella	100
10% hitaammalla nopeudella	87
20% hitaammalla nopeudella	77
30% hitaammalla nopeudella	68

Rahti Itä-Aasian ja Euroopan välillä kulkee tyypillisesti Suezin kanavan kautta, jolloin matkan pituus on noin 19 500 kilometriä. Vaihtoehtoinen reitti kulkee Afrikan mantereeseen eteläpuolelta Hyväntoivonniemen kautta, ja sen pituus on noin 25 600 kilometriä. (Sea-distances.org 2018.) Vertailussa lasketaan kasvihuonekaasupäästöt molemmille reiteille. Suezin kanavan kautta voivat kulkea kaikki alle 240 000 tonnin kapasiteetilla varustetut alukset, joten ainoastaan suurimmat öljytankkerit ja harvat irtolastialukset eivät voi kulkea sen kautta (Suez Canal Authority 2017).

Vertailun polttoaineita käytetään voimanlähteenä polttomoottoreissa, jotka ovat tietyistä teknisistä eroavaisuuksistaan huolimatta pääperiaatteeltaan samanlaisia (Brynolf et al. 2014, 87). Nopeuden hidastamisen oletetaan vaikuttavan konttialuksen energiatehokkuuteen positiivisesti vertailun kaikilla polttoaineilla. Kasvihuonekaasupäästöjä vertaillessa on kuitenkin huomiotava, että eri polttoaineilla elinkaaren päästöt jakautuvat eri suhteessa polttoaineen tuotannon ja käytön kesken. Nesteytettyllä maakaasulla, fossiilisella metanolilla ja nesteytettyllä biokaasulla polttoaineen tuotannon osuus elinkaaren kasvihuonekaasupäästöistä on suurempi, joten

nopeuden hidastamisella on pienempi vaikutus laskettuihin kasvihuonekaasupäästöihin kuin raskasta polttoöljyä käytettäessä. Biokaasusta tuotetulla metanolilla käytön aikaiset kasvihuonekaasupäästöt ovat laskennallisesti nolla, joten nopeuden hidastaminen ei näin vaikuta tämän vertailun tuloksiin.

5.2 Case – vertailun tulokset

Vertailussa tarkastellaan ensimmäisenä polttoaineiden yksikkökohtaisia khk-päästöjä. Raskaan polttoöljyn yksikkökohtainen päästö on laskettu lähtötietojen perusteella jakamalla peruske-
naarion khk-päästöt rahtikontin kokonaispainolla ja muuttamalla yksiköt, jolloin saadaan tu-
lokseksi 6.87 g CO₂-ekvivalenttia kilometrillä kuljetettua tonnia kohti. Muiden polttoaineiden
khk-päästöt on saatu lähtötilanteen prosentiosuuksien avulla, ja tulokset esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6. Vertailun polttoaineiden yksikkökohtaiset khk-päästöt.

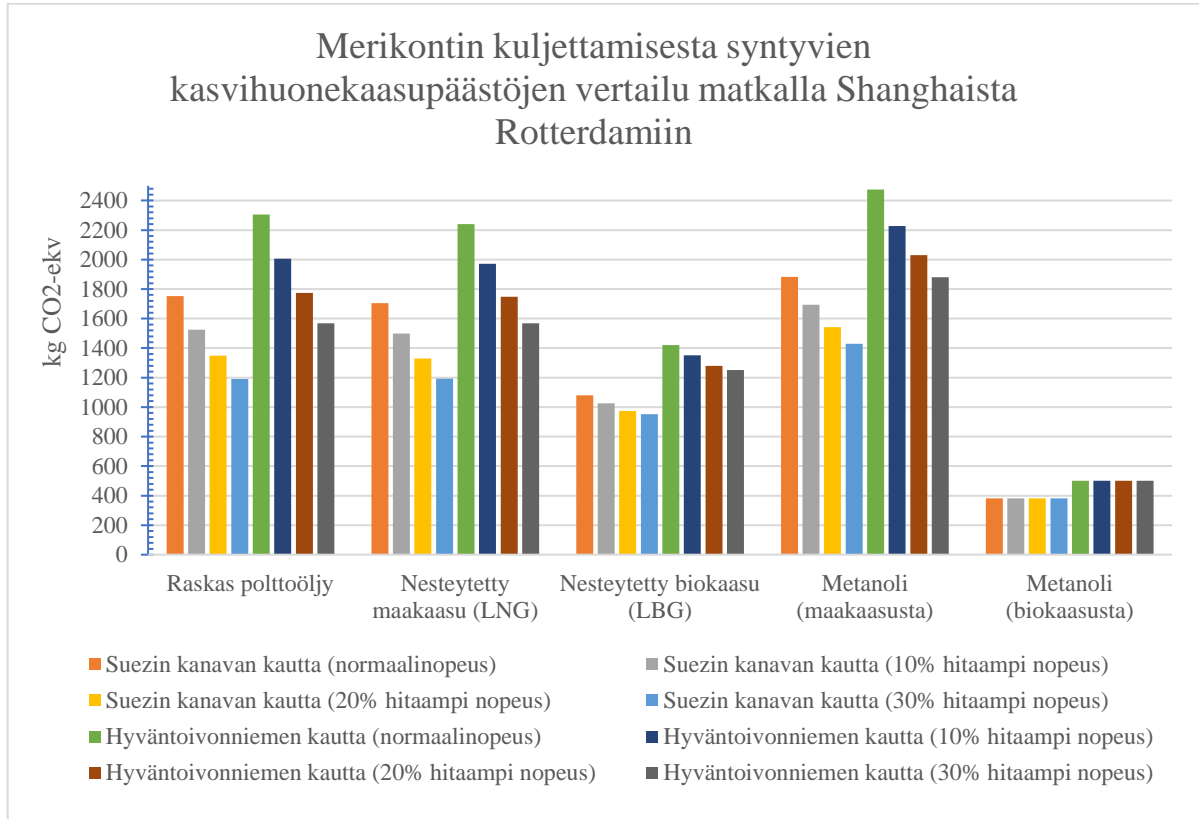
Case-esimerkin konttialuksen khk-päästöt	g CO ₂ -ekv/t km
Raskas polttoöljy (HFO)	6.87
Nesteytetty maakaasu (LNG)	6.68
Nesteytetty biokaasu (LBG)	4.24
Metanoli (maakaasusta)	7.38
Metanoli (biomassasta)	1.50

Vajaalla täyttöasteella rahtia kuljetettaessa yksikkökohtaiset päästöt kasvavat, kun polttoaineen
kulutus jakautuu pienemmälle rahtimäärälle. Täyttöasteen vaikutusta yksikkökohtaisiin päästöi-
hin havainnollistetaan taulukossa 7, jossa aiemmin lasketut yksikkökohtaiset päästöt on jaettu
täyttöasteella. Todellisuudessa myös polttoaineen kulutus todennäköisesti laskisi hieman joh-
tuen pienemmästä liikutettavasta massasta, mutta sen vaikutusta ei tässä tarkastelussa otettu
huomioon. Tuloksista voidaan kuitenkin todeta, että yksikkökohtaisia päästöjä voidaan pien-
tää tehokkaasti, kun täyttöastetta kasvatetaan.

Taulukko 7. Täyttöasteen vaikutus laivan rahtiyksikkökohtaisiin khk-päästöihin

Laivan täyttöaste	100%	75%	50%
	g CO ₂ - ekv/t km	g CO ₂ - ekv/t km	g CO ₂ - ekv/t km
Case-esimerkin konttialuksen khk-päästöt			
Raskas polttoöljy (HFO)	6.87	9.16	13.74
Nesteytetty maakaasu (LNG)	6.68	8.91	13.36
Nesteytetty biokaasu (LBG)	4.24	5.65	8.48
Metanoli (maakaasusta)	7.38	9.84	14.75
Metanoli (biomassasta)	1.50	1.99	2.99

Yksikkökohtaisia khk-päästöjä käytettiin pohjana laajemmalle eri skenaarioiden vertailulle. Kuvassa 11 on esitetty case-esimerkin rahtikontin kuljettamisesta syntyviä kasviuonekaasupäästöjä eri polttoaineille, eri matkanopeuksille sekä kahdelle esitetylle reitille 100 % täyttöasteella. Perusskenaariossa käytetään raskasta polttoöljyä, ja alusta kuljetetaan normaalilla matkanopeudella. Kasviuonekaasupäästöt on esitetty rahtikontin kuljetuksesta syntyvinä matkan kokonaispäästöinä CO₂-ekvivalentteina mitattuna. Matkanopeuden vaikutus päästöihin eri polttoaineilla on laskettu perustuen siihen, miten suuri osuus polttoaineen käytöllä on sen elinkaaren päästöistä ja miten suuri osuus konttialuksen polttoaineen kulutuksesta menee päämoottorille. Tulokset esitetään kokonaisuudessaan taulukoituna liitteessä II.



Kuva 11. Merikontin kuljettamisesta syntyvät khk-päästöt eri polttoaineilla ja matkanopeuksilla.

Perusskenaariossa raskaalla polttoöljyllä ja tavanomaisella matkanopeudella kuljettaessa kasvihuonekaasupäästöiksi rahtikontille saadaan noin 1800 kg CO₂-ekvivalenttia, Suezin kanavan kautta kuljettaessa. Pidempää reittiä käytettäessä perusskenaariossa kasvihuonekaasupäästöt ovat noin 2300 kg. Vertailun paras tulos saadaan biokaasusta tuotetulla metanolilla, jolla khk-päästöt ovat noin 380 kg CO₂-ekvivalenttia lyhyemmällä reitillä, kaikilla matkanopeuksilla. Fossiilisilla polttoaineilla nopeuden hidastamisella voidaan vähentää päästöjä parhaimmillaan jopa 700 kg perusskenaariosta. Raskaalla polttoöljyllä ja nesteytettyllä maakaasulla tulokset ovat hyvin lähellä toisiaan ja maakaasusta tuotetulla metanolilla päästöt ovat noin 150 – 300 kg suuremmat. Nesteytettyllä biokaasulla päästään nopeutta hidastamalla alle tuhannen kilon CO₂ – ekvivalenttipäästöjen. Reittejä vertaillen havaitaan, että Suezin kanavan kautta on suositeltavaa kulkea. Afrikan mantereen kiertäminen aiheuttaa skenaariosta riippuen 100 – 500 kg ylimääräiset kasvihuonekaasupäästöt pidentyneen matkan takia.

Tuloksia tarkastellessa on huomioitava niihin vaikuttavat monet muuttujat, kuten matkan aikaiset olosuhteet ja käytetyn polttoaineen tuotantopaikka ja -tapa. Erityisesti biopolttoaineilla päästöihin vaikuttavat käytetty laskentatapa sekä todellisuudessa se, miten ja minkälaista biomassaa on tuotettu. Lisäksi laivan tekniset ratkaisut vaikuttavat matkan päästöihin. Esimerkiksi moottorin ja voimalinjan energiatehokkuutta parantamalla sekä sääreititystä käyttämällä voidaan saavuttaa parempia tuloksia. Laivoja tulisi myös operoida mahdollisimman korkealla täyttöasteella. Tämän case-verailun tuloksia voidaankin pitää lähinnä suuntaa-antavina, ja niihin tulisi suhtautua tietyin varauksin.

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä voidaan vähentää useilla eri tavoilla. Kansainväliset regulaatiot, kiristyvät päästörajoitukset sekä kuluttajien kasvava ympäristötietoisuus ja huoli ilmastonmuutoksen vaikutuksista ajavat laivayhtiöitä leikkaamaan päästöjään tulevaisuudessa. Valtaosa rahtilaivaliikenteestä käyttää vielä raskasta polttoöljyä. Suurin osa laivayhtiöiden operatiivisista kustannuksista koostuu polttoainekustannuksista, joten kalliimpiin polttoaineisiin siirtyminen on vaikeaa ilman siihen kannustavaa regulaatiota. IMO:n tulevat rajoitukset polttoaineiden rikkipitoisuudelle vuonna 2020 ohjaavat kohti vähärikkisimpiin polttoaineisiin siirtymistä.

Välittömiä vähennyksiä rahtilaivojen päästöihin voidaan saavuttaa erilaisilla energiatehokkuuden parannuskeinoilla, kuten matkanopeuden hidastamisella, sääreitityksellä sekä täyttöasteen optimoinnilla. Työn havaintojen perusteella rahtilaivoja tulisikin operoida hitaalla matkanopeudella, sääolosuhteet reittisuunnittelussa huomioon ottaen sekä mahdollisimman suurella täyttöasteella. Energiatehokkuuden parantamiseksi laivojen tulisi myös olla mahdollisimman suuria, ottaen kuitenkin huomioon reitin kysyntä, jotta alukset saadaan lastattua täyteen toistuvasti. Laivojen tulisi myös kyetä kulkemaan lyhintä reittiä, kanavien ja satamien kokorajoitukset huomioiden. Laivojen moottoreita tulisi myös optimoida toimimaan paremmin alemmilla kierroksilla, ja muutkin tekniset ratkaisut suunnitella energiatehokkuuden kannalta. Polttoaineen hinnan nousut ovatkin aiemmin jo ajaneet laivayhtiöitä käyttämään edellä mainittuja keinoja energiatehokkuuden parantamiseksi, jotta yhtiöt säästäisivät kustannuksissaan. Yhtiöiden halukkuus säästää polttoainetta riippuu kuitenkin vielä yleisestä taloustilanteesta ja öljyn hinnan kehityksestä, eikä niinkään kunnianhimoisista päästötavoitteista.

Nesteytettyä maakaasua on jo käytössä laivaliikenteen polttoaineena, ja sen käyttö on lisääntymässä IMO:n rikkipitoisuusrajoitusten myötä. Nesteytettyyn maakaasuun siirtyminen ei kuitenkaan leikkaisi merkittävästi rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjä. Metanolipolttoaineet ovat yksi vaihtoehto rikkipitoisuusrajoitusten kannalta, mutta esimerkiksi maakaasusta tuotetulla metanolilla ei tämän työn havaintojen perusteella saavuteta kasvihuonekaasu-

päästöjen vähennyksiä. Biopohjaisilla polttoaineilla kuten nesteytettyä biokaasulla tai biomassasta tuotetulla metanolilla voidaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä. Biopolttoaineiden tuotantoon ja päästöjen laskentatapaan liittyy kuitenkin epävarmuuksia, ja ei ole selvyyttä siitä, voidaanko biopolttoaineita tuottaa laajamittaisesti kestäväällä tavalla, maankäyttö ja hiilinielut huomioon ottaen. Biopolttoaineiden käyttöön siirtyessä olisikin selvitettävä biomassan alkuperä ja sen tuotannon vaikutukset.

Rahtilaivaliikenteen sähköistäminen tulevina vuosina on epätodennäköistä ilman akkuteknologian ja akkujen energiatiheyden merkittävää kehittymistä. Polttokennoteknologiassa ja synteettisten polttoaineiden kehittämisessä on potentiaalia laivaliikennekäyttöön hyvän energiatiheyden ja uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön hinnan laskun myötä, ja tulevina vuosikymmeninä voitaisiin saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, jos polttokennotekniikkaa ja muita synteettisiä polttoaineita saadaan kaupalliseen käyttöön suurissakin rahtilaivoissa, ja polttoaineet tuotetaan uusiutuvalla energialla. Rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi satamien tulisi myös investoida vaihtoehtoisten polttoaineiden vaatimaan infrastruktuuriin, jotta laivayhtiöiden olisi helpompi siirtyä käyttämään erilaisia polttoaineita. Satamissa voitaisiin myös tarjota aluksille verkosta syötettävää sähköenergiaa, jolloin alusten ei tarvitsisi käyttää apumoottoreitaan laivan sähköntuotantoon satamassa vietettynä aikana.

Rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen ei ole yksiselitteistä lähestymistapaa. Päästöjä voidaan rajoittaa monin eri tavoin, ja alan toimijoiden tulisi käyttää monia eri toimia parhaimman tuloksen saavuttamiseksi. Lisäksi kansainvälisten järjestöjen kuten IMO:n sekä valtioiden tulee kehittää päästövähennyksiin tehokkaasti ohjaavaa regulaatiota, kuten päästöihin perustuvia maksuja ja rajoituksia. Rahdin kuljettaminen meriteitse on kuitenkin tois-taiseksi selvästi tehokkain liikennemuoto sekä kustannusten, että päästöjen kannalta. Kysynnän odotetaan kasvavan alalla edelleen, joten toimia tarvitaan, mikäli rahtilaivaliikenteen päästöjä voitaisiin vähentää IMO:n tavoitteiden mukaisesti 50 % vuoteen 2050 mennessä.

7 YHTEENVETO

Laivaliikenne aiheuttaa noin kolme prosenttia ihmisen aiheuttamista kasvihuonekaasupäästöistä, noin miljardi tonnia vuodessa. Laivaliikenteen päästöistä yli 90 % aiheutuu rahtilaivaliikenteestä. Kasvihuonekaasupäästöjen lisäksi laivaliikenne aiheuttaa huomattavia rikin ja typin oksidien sekä pienhiukkasten päästöjä ilmaan. Kolme yleisintä rahtilaivatyyppiä – konttialukset, irtolastialukset ja öljytankkerit – aiheuttavat yli 60 % laivaliikenteen päästöistä. Eri liikenne-
muotoja vertailtaessa laivaliikenne aiheuttaa kuitenkin vähiten kasvihuonekaasupäästöjä kuljetettua rahtitonniä kohti. Rahtilaivat käyttävät tyypillisesti polttoaineenaan raskasta polttoöljyä, ja polttoaineen kulutuksesta valtaosan kuluttaa laivan päämoottori. Polttoainetta kuluu aluksilla myös sähkön ja höyryn tuotantoon.

Kansainvälisen merenkulkujärjestö IMO valvoo kansainvälistä laivaliikennettä ja asettaa säännöksiä alalle. IMO pyrkii laivojen energiatehokkuuden paranemiseen lanseeraamansa energiatehokkuuden suunnitteluindeksi EEDI:n avulla. Lisäksi IMO on asettanut polttoaineiden rikkipitoisuudelle rajoitteita, jotka kiristyvät vuoden 2020 alusta lähtien. Polttoaineen rikkipitoisuuden rajoittaminen 0,5 massaprosenttiin ohjaa laivayhtiöitä siirtymään vähärikkisempiin polttoaineisiin lähitulevaisuudessa. Vuonna 2018 IMO lanseerasi ensimmäisen strategiansa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseksi. Tavoitteena on vähentää sektorin kasvihuonekaasupäästöjä vuoteen 2050 mennessä 50 % vuoden 2008 tasosta. Lyhyen aikavälin toimina mainitaan erilaiset energiatehokkuuden parantamiskeinot ja pidemmällä aikavälillä halutaan kehittää hiilivapaita polttoaineita laivaliikenteeseen.

Rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinot voidaan jakaa energiatehokkuuden parantamiseen ja vähäpäästöisempien polttoaineiden käyttöönottoon. Yleisiä keinoja energiatehokkuuden parantamiseksi ovat matkanopeuden hidastaminen, sääreitityksen käyttöönotto sekä laivan teknisten ratkaisujen kuten moottorin ja voimalinjan optimointi. Laivatyyppien välillä on suuriakin eroja yksikkökohtaisissa päästöissä, ja isommilla laivoilla päästöt ovat yleisesti ottaen pienemmät kuljetettua rahtitonniä kohti. Laivoja pitäisi myös pyrkiä

kuljettamaan mahdollisimman suurella täyttöasteella, jolloin päästöt rahtiyksikköä kohti ovat pienimmillään.

Matkanopeuden hidastamisella voidaan säästää tehokkaasti polttoainetta ja näin pienentää kasvihuonekaasupäästöjä. Polttoaineen säästö aiheutuu vastusvoimien pienenemisestä hitaammilla nopeuksilla ja moottorin tehon tarpeen laskusta. Esimerkiksi hidastamalla matkanopeutta 30 % voitaisiin rahtilaivan aiheuttamia hiilidioksidipäästöjä vähentää kokonaisuudessaan 25 – 35 % laivatyyppistä riippuen. Maailmanlaajuisilla nopeusrajoituksilla olisi mahdollista saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä. Laivoja olisi kuitenkin valmistettava lisää, jotta voidaan vastata nykyiseen kuljetuskysyntään hitaammilla matkanopeuksilla. Säätö tarkoittaa suotuisien sääolojen ja merivirtojen hyödyntämistä sekä riskialttiiden olosuhteiden välttämistä. Säätöityksen tavoitteena on optimoida reitti matkan pituuden, ajan ja polttoainekustannusten suhteen. Onnistuneesti optimoitu reitti säästää matkan operointikustannuksia muutamia prosentteja. Polttoaineen säästämällä vähennetään näin myös matkan kasvihuonekaasupäästöjä.

Kirjallisuuskatsauksessa havaittiin, että laivojen kapasiteetilla on selvä vaikutus rahtiyksikkökohtaisiin päästöihin. Kapasiteettia kasvattaessa saavutettu energiatehokkuushyöty kuitenkin muuttuu marginaaliseksi suurimpia kokoluokkia lähestyttäessä. Pienempien kokoluokkien välillä erot ovat toisaalta suuret, ja energiatehokkuuden kannalta suositeltava vähimmäiskoko riippuu laivatyyppistä. Konttialuksilla energiatehokkuus on noin 30 000 tonnin kapasiteetista ylöspäin hyvällä tasolla, kun taas öljytankkereiden kapasiteetin suositellaan olevan vähintään 100 000 tonnia.

Meriliikenteeseen soveltuvia polttoaineita vertaillessa havaittiin, että vaikka IMO:n rikkidirektiivit voivat suosia alusten siirtymistä LNG:n käyttöön, varsinaisia kasvihuonekaasupäästöjen leikkauksia ei LNG:llä saavuteta raskaaseen polttoöljyyn verrattuna. Nesteytetyn maakaasun lisäksi metanoli on potentiaalinen vaihtoehto laivaliikenteeseen. Samoin kuin LNG:n tapauksessa, metanolilla voidaan vähentää rikki-, typpi- ja hiukkaspäästöjä, mutta maakaasusta tuotettuna sillä ei ole positiivista vaikutusta sen elinkaaren kasvihuonekaasupäästöihin. Sen sijaan biomassasta tuotetuilla LBG:llä ja metanolilla voitaisiin saavuttaa merkittäviä päästövähennyksiä, joiden suuruus riippuu kuitenkin biomassan alkuperästä ja tuotantotavasta sekä biomassan

polttamisesta syntyvien hiilidioksidipäästöjen laskentatavasta. Meriliikenteen sähköistämisen todettiin olevan epätodennäköistä akkuteknologian rajoitteiden takia. Polttokennoteknologialla ja sähköenergian avulla valmistetuilla synteettisillä polttoaineilla on potentiaalia korvata fossiilisia polttoaineita laivaliikenteessä tulevana vuosikymmeninä. Laajamittainen käyttöönotto vaatii kuitenkin teknologian kehittymistä ja kustannusten laskua.

Työn empiirisessä osuudessa selvitettiin rahtikontin keskimääräiset päästöt Shanghaista Rotterdamiin kuljetettuna ja verrattiin niitä eri polttoaine- ja nopeusskenaarioihin. 10 000 kg tavaraa rahtikontissa kuljetettuna täydellä laivalla aiheuttaa matkalla noin 1800 kg CO₂ – ekvivalentin päästöt lyhyemmällä, Suezin kanavan kautta kulkevalla reitillä. Pienimmät kasvihuonekaasupäästöt saatiin vertailun mukaan biopohjaisella metanolilla, jonka päästöt olivat alle 400 kg. Nesteytetyllä biokaasulla matkanopeutta hidastamalla päästiin alle tuhannen kilogramman päästöihin, ja biopohjaista metanolia lukuun ottamatta matkanopeuden hidastaminen vähensi päästöjä kaikilla vertailun polttoaineilla. Nopeuden hidastamisen vaikutus tuloksiin riippui polttoaineen käytön osuuden suuruudesta polttoaineen elinkaaren päästöissä.

Työssä havaittiin, että rahtilaivaliikenteen kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiseen on monta lähestymistapaa, ja alusten energiatehokkuutta voidaan parantaa merkittävästi nykyisissäkin aluksissa. Raskaan polttoöljyn korvaaminen vähemmän kasvihuonekaasupäästöjä aiheuttavilla polttoaineilla ei kuitenkaan ole yksiselitteistä, ja laajamittaisesti kaupallisessa käytössä toimivaa ratkaisua ei vielä ole. Vähähiilisten tai hiilivapaiden polttoaineiden käyttöönotto meriliikenteessä vaatii vielä tutkimusta ja tekniikan kehittymistä niin polttoaineiden, moottoreiden kuin infrastruktuurinkin osalta. Biopolttoaineilla saavutettava todellinen hyöty ilmastonmuutoksen torjunnassa vaatii myös lähempää tarkastelua polttoaineiden raaka-aineiden ja tuotantomenetelmien osalta.

LÄHTEET

Armstrong, Victor N. 2013. Vessel optimization for low carbon shipping. *Ocean Engineering*, Volume 73. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 9.8.2013. [viitattu 16.11.2018]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0029801813002643#f0060>

Brynolf, Selma, Fridell, Erik & Andersson, Karin. 2014. Environmental assessment of marine fuels: liquefied natural gas, liquefied biogas, methanol and bio-methanol. *Journal of Cleaner Production* 74 (2014). [verkkodokumentti]. Päivitetty: 26.3.2014. [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614002832?via%3Dihub>

Horvath, Stephen. 2017. Techno-economic analysis of a decarbonized shipping sector: technology suggestions for a fleet in 2030 and 2040. Lappeenranta University of Technology. LUT School of Energy Systems. Diplomityö. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.12.2018]. Saatavissa: <http://lutpub.lut.fi/handle/10024/140032>

IMO. International maritime organization. 2018. Sulphur 2020 – cutting sulphur oxide emissions. [internet-sivu.] [viitattu 1.12.2018]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/mediacentre/hot-topics/pages/sulphur-2020.aspx>

ICCT. International Council on Clean Transportation. 2018. International maritime organization's greenhouse gas strategy. Policy update. [verkkodokumentti]. Päivitetty 1.4.2018. [viitattu 7.10.2018]. Saatavissa: https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/IMO_GHG_StrategyFinalPolicyUpdate042318.pdf

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2018. Baseline Scenario Concepts. [internet-sivu]. [viitattu 29.10.2018]. Saatavissa: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/tar/wg3/index.php?idp=286#fig72>

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. 2007. Direct Global Warming Potentials. [internet-sivu]. [viitattu 19.11.2018]. Saatavissa: https://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html

European Environment Agency (EEA). 2017. Aviation and shipping – impacts on Europe’s environment. TERM 2017: Transport and Environment Reporting Mechanism (TERM) report. Luxembourg. Publications Office of the European Union. ISSN 1977-8449.

Euroopan komissio, Eurostat. 2017. Statistical Pocketbook 2017, EU Transport in figures. [verkkodokumentti]. [Viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/pocketbook2017.pdf>

Faber, Jasper, Huigen, Thomas & Nelissen, Dagmar. 2017. Regulating speed: a short-term measure to reduce maritime GHG emissions. CE Delft. [verkkodokumentti]. Päivitetty: 18.10.2017. [viitattu 7.10.2018]. Saatavissa: <http://www.cleanshipping.org/download/Slow-steaming-CE-Delft-final.pdf>

McKinnon, Alan & Piecyk, Maja. 2010. Measuring and managing CO2 emissions of European chemical transport. Edinburgh: European Chemical Industry Council. [verkkodokumentti]. [viitattu 2.12.2018]. Saatavissa: <http://www.cefic.org/Documents/Media%20Center/News/McKinnon-Report-Final-230610.pdf>

Olmer, Naya et al. 2017. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015. The International Council on Clean Transportation. [verkkodokumentti]. Päivitetty 17.10.2017. [viitattu 22.11.2018]. Saatavissa: <https://www.theicct.org/publications/GHG-emissions-global-shipping-2013-2015>

Perera, Lokukaluge P. & Soares, C. Guedes. 2017. Weather routing and safe ship handling in the future of shipping. Ocean Engineering, Volume 130. [verkkodokumentti]. Päivitetty 15.1.2017. [viitattu 16.11.2018]. Saatavissa: <https://www-sciencedirect-com.ezproxy.cc.lut.fi/science/article/pii/S0029801816303808?via%3Dihub>

Sea-distances.org. 2018. Port distances. [internet-sivu]. [viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: <https://sea-distances.org/>

Slater, Matt. 2016. The 8 Busiest China Shipping Ports. China checkup. [internet-sivu]. Päivitetty 22.12.2016. [viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: <https://www.chinacheckup.com/blogs/articles/china-shipping-ports>

Suez Canal Authority. 2017. Canal Characteristics. [internet-sivu]. [viitattu 28.11.2018]. Saatavissa: <https://www.suezcanal.gov.eg/English/About/SuezCanal/Pages/CanalCharacteristics.aspx>

Smith, T. W. P. et al. 2015. Third IMO GHG Study 2014. International Maritime Organization (IMO). [verkkodokumentti]. Päivitetty: 1.4.2015. [viitattu 3.10.2018]. Saatavissa: <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Green-house%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>

Uusitalo, Ville. 2018. TkT; apulaisprofessori, Lappeenrannan teknillinen yliopisto. Sähköposti-viesti 23.11.2018.

Walsh, Conor & Bows, Alice. 2012. Size Matters: Exploring the importance of vessel characteristics to inform estimates of shipping emissions. Applied Energy. Elsevier Ltd. The University of Manchester, Oxford Road, Manchester.

Case-vertailun lähtötietoja		
Kontin kokonaispaino	13084 kg	
Matkan pituus (sea-distances.org)	merimailia	km
Suezin kanavan kautta	10525	19492.30
Hyväntoivonniemen kautta	13843	25637.24
Panaman kanavan kautta	13411	24837.17
Perusskenaarion päästöt	kg CO ₂ -ekv	g CO ₂ -ekv/t km
100km 2 TEU kontille (laivan täyttö 100%)	8.99	6.87
Polttoöljyn tuotannon osuus	1.08	0.83
Polttoöljyn käytön osuus	7.91	6.05
Matkan kokonaispäästöt	kg CO ₂ -ekv/t	kg CO ₂ -ekv/kontti
Suezin kanavan kautta	133.93	1752.36
Hyväntoivonniemen kautta	176.15	2304.79
Panaman kanavan kautta	170.66	2232.86

Polttoaineiden vertailu Brynolf et al. (2014, 88) tulosten perusteella

Ro-ro - aluksen khk-päästöt (Brynolf et al. 2014, 88)	g CO₂-ekv/t km	osuus HFO:sta
Raskas polttoöljy (HFO)	43.19	1.00
Nesteytetty maakaasu (LNG)	41.99	0.97
Nesteytetty biokaasu (LBG)	26.64	0.62
Metanoli (maakaasusta)	46.37	1.07
Metanoli (biomassasta)	9.4	0.22
Case-esimerkin konttialuksen khk-päästöt	g CO₂-ekv/t km	osuus HFO:sta
Raskas polttoöljy (HFO)	6.87	1.00
Nesteytetty maakaasu (LNG)	6.68	0.97
Nesteytetty biokaasu (LBG)	4.24	0.62
Metanoli (maakaasusta)	7.38	1.07
Metanoli (biomassasta)	1.50	0.22

Nopeuden vähentäminen Faber et al. (2017, 9-10) tulosten perusteella

Case-esimerkin perusskenaariolla	g CO₂-ekv/t km	Päästöjen vähennys-%
Normaalinopeudella	6.87	0
10% hitaammalla nopeudella	5.98	13
20% hitaammalla nopeudella	5.29	23
30% hitaammalla nopeudella	4.67	32

Case – vertailun tulokset	Raskas polttoöljy	Nesteytetty maakaasu (LNG)	Nesteytetty bio-kaasu (LBG)	Metanoli (maakaasusta)	Metanoli (biokaasusta)
Matkan kokonaispäästöt merikontille	kg CO ₂ -ekv	kg CO ₂ -ekv	kg CO ₂ -ekv	kg CO ₂ -ekv	kg CO ₂ -ekv
Suezin kanavan kautta (normaalinopeus)	1752	1704	1081	1881	381
Suezin kanavan kautta (10% hitaampi nopeus)	1525	1499	1027	1693	381
Suezin kanavan kautta (20% hitaampi nopeus)	1349	1329	973	1543	381
Suezin kanavan kautta (30% hitaampi nopeus)	1192	1193	951	1430	381
Hyväntoivonniemen kautta (normaalinopeus)	2305	2241	1422	2474	502
Hyväntoivonniemen kautta (10% hitaampi nopeus)	2005	1972	1351	2227	502
Hyväntoivonniemen kautta (20% hitaampi nopeus)	1775	1748	1279	2029	502
Hyväntoivonniemen kautta (30% hitaampi nopeus)	1567	1569	1251	1881	502