

UUPO – Merilogistiikan uudet polttoaineet vihreän
siirtymän ja sinisen kasvun vauhdittajina

Merenkulun Päästöt Tietopaketti



samk

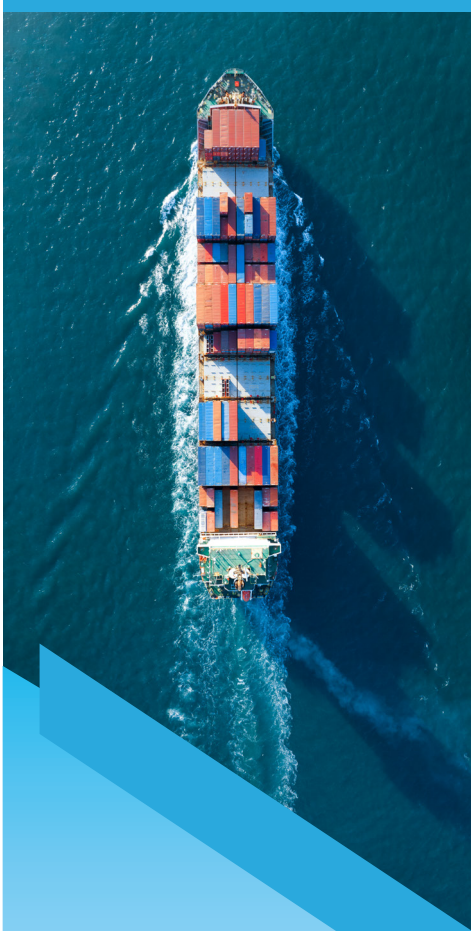
Satakunnan ammattikorkeakoulu



SATAKUNTALIITTO
Regional Council of Satakunta

2024

Merenkulun päästöt



Tärkeät näkökohdat:

1. Kasvihuonekaasupäästöjä tarkastellessa on tärkeä huomioida muutkin kasvihuonekaasut kuin hiilidioksidi
2. Uudet polttoaineet tulevat olemaan keskeisessä osassa kasvihuonekaasupäästöjen vähentämisessä merenkulun osalta
3. Merenkulku tuottaa paljon typen- ja rikin oksideja, sekä pienhiukkaspäästöjä
4. Polttoaineen valinnalla on ratkaiseva merkitys alusten päästöjen tyypin ja määrän suhteen
5. Alusten moottorista syntyviä savukaasuja voidaan käsitellä erilaisilla laitteilla ja näin vähentää syntyvien päästöjen määrää

Iso osa maailman tavarankuljetuksesta tapahtuu meriteitse, mikä tekee merilogistiikasta keskeisen ja välttämättömän osan kansainvälistä toimitusketjua. Suuret rahtilaivat kuljettavat erilaisia raaka-aineita, polttoaineita, elintarvikkeita ja valmiita tuotteita ympäri maailmaa. Nämä kuljetukset eivät kuitenkaan tapahdu ilman haittavaikutuksia, sillä merenkulku tuottaa huomattavan määrän erilaisia päästöjä.

Aluksissa käytetyt polttoaineet aiheuttavat merkittäviä määriä kasvihuonekaasupäästöjä, jotka nopeuttavat ilmastonmuutosta. Merenkulku tuottaa myös suuren määrän typen- ja rikin oksideja, sekä pienhiukkaspäästöjä. Esimerkiksi vuonna 2018 meriliikenne vastasi 24 % EU:n kaikista typen ja rikin oksidien päästöistä sekä 9 % kaikista alle 2,5 mikrometrin pienhiukkaspäästöistä. [1] Merenkulun tuottamien rikin oksidien, sekä pienhiukkaspäästöjen määrä on kuitenkin laskenut vuoden 2018 luvuista, sillä vuonna 2020 astui voimaan Kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO) uusin rikkipäästörajotus, joka vaatii aluksia käyttämään polttoaineita, joissa on alhaisempi rikkipitoisuus. Tämä säädös, joka tunnetaan myös nimellä IMO 2020, pyrkii vähentämään merenkulun aiheuttamia ilmanlaatuongelmia ja parantamaan ihmisten terveyttä maailmanlaajuisesti. [2]

Vaikka tällaiset säädökset ovat askel oikeaan suuntaan, haasteita on yhä paljon. Erityises-

ti rannikoiden läheisyydessä asuvat yhteisöt ovat alttiita merenkulusta syntyville ilmaansaasteille ja niiden aiheuttamille sairauksille. Arvioiden mukaan merenkulku aiheuttaa edelleen vuosittain maailmanlaajuisesti noin 250 000 ennenaikaista kuolemaa ja yli 6 miljoonaa lasten astmatapausta. Ennen IMO 2020 säädöstä nämä luvut olivat arvioiden mukaan noin 400 000 ja 14 miljoonaa. [3]

Ilmastonmuutoksen ja ihmisten terveysvaikutusten lisäksi merenkulun päästöillä on merkittäviä vaikutuksia sekä ekosysteemeihin että ilmakehään. Typen- ja rikin oksidit lisäävät muun muassa happosateiden määrää, mikä voi aiheuttaa lukuisia vakavia seurauksia. Happosateet esimerkiksi vahingoittavat metsien ja vesistöjen ekosysteemejä, heikentävät maaperän laatua ja alentavat veden pH-arvoa, mikä uhkaa kalakantoja ja muita vesieliöitä. Ilmakehässä typen oksidit saattavat myös lisätä alailmakehän otsonin määrää. [4]

Merenkulun ollessa haastavampi sähköistää kuin maantiiliikenne, energiatehokkaat alukset ja vaihtoehtoiset polttoaineet tulevat olemaan keskeisessä roolissa näiden päästöjen vähentämisessä. Erilaisilla säännöksillä on myös oma roolinsa markkinoiden ohjaamisessa, sillä ne voivat kannustaa innovaatioihin ja edistää kestävästä kehityksestä tavoitteita meriliikenteessä.

Kasvihuonekaasupäästöt

Kasvihuoneilmiö

Auringon säteily mahdollistaa elämän maapallolla, mutta se ei yksinään riitä elämän kuoistamiseen. Ilman ilmakehässä olevia kasvihuonekaasuja elämä olisi mahdotonta. Kasvihuonekaasut, kuten hiilidioksidi, metaani ja vesihöyry, vangitsevat osan auringon säteilystä ja säilyttävät lämmön ilmakehässä. Tätä ilmiötä kutsutaan kasvihuoneilmiöksi. ^[5]

Säilyvän lämmön määrä riippuu vahvasti kasvihuonekaasujen pitoisuudesta ilmakehässä. Kun näiden kaasujen pitoisuudet kasvavat, myös säilyvän lämmön määrä kasvaa. ^[6]

Ilmastomuutos

Ihmisen toiminta on lisännyt erilaisten kasvihuonekaasujen määrää ilmakehässä, joka on johtanut ilmaston lämpenemiseen. Ilmaston lämpeneminen itsessään aiheuttaa vakavia haasteita ihmiskunnalle, mutta sillä on myös vaikutuksia muuhun ilmastoon ja ympäristöön monin eri ta-

voin. Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa esimerkiksi sääilmiöihin, lisäten ääri-ilmiöiden, kuten hirmumyrskyjen, rankkasateiden ja kuivuuksien, esiintymistä ja voimakkuutta. ^[7]

Yksi merkittävimmistä ilmaston lämpenemisen vaikutuksista on jäätiköiden ja jäämassojen sulaminen. Tämä prosessi nostaa merenpintaa maailmanlaajuisesti, mikä uhkaa matalalla sijaitsevia alueita, kuten saaria ja rannikkoalueita. Sulaminen vaikuttaa myös makean veden saatavuuteen, mikä voi heikentää paikallisia vesivaroja ja ekosysteemejä. ^[8]

Ilmastomuutoksella on valtavat vaikutukset eläin- ja kasvilajeihin, sillä useat elinympäristöt muuttuvat nopeasti. Monet lajit eivät välttämättä kykene sopeutumaan riittävän nopeasti uusiin olosuhteisiin, mikä voi johtaa lajien vähenemiseen ja jopa sukupuuttoihin. Tämä heikentää ekosysteemien toimintaa ja monimuotoisuutta. ^[9]

Ilmaston lämpeneminen vaikuttaa merkittävästi myös ihmisten terveyteen, altistaen ihmiset lämpöaaltojen ja vesivarojen vähenemisen aiheuttamille riskeille. Ilmastomuutoksen myötä ruoantuotanto ja ruokaturva voivat heikentyä, kun muuttuvat sääolosuhteet vaikuttavat viljelysatoihin ja karjankasvatukseen eri puolilla maailmaa. Terveysriskien lisäksi ilmastomuutoksella on merkittäviä sosiaalisia vaikutuksia, jotka vaikeuttavat monien ihmisten elämää. Talouden heikkeneminen voi lisätä työttömyyttä, mikä puolestaan pahentaa ruoan hinnan nousun vaikutuksia. ^[10]

Ilmastomuutoksen vaikutukset ovat kauaskantoiset ja vakavat, ja niiden hillitsemiseksi tarvitaan nopeita ja laaja-alaisia toimia. Kansainvälinen yhteistyö ja yhteiset ponnistelut ovat välttämättömiä, jotta voidaan löytää kestäviä ratkaisuja ja vähentää kasvihuonekaasupäästöjä.



Kasvihuonekaasupäästöt

Erilaiset kasvihuonekaasut

Ihmiskunnan toiminnasta syntyviä kasvihuonekaasuja on lukuisia, mutta keskeisimmässä roolissa ovat hiilidioksidi (CO₂), metaani (CH₄), dityppioksidi (N₂O), fluoridikaasut, sekä musta hiili. Näiden kaasujen vaikutus ilmastomuutokseen riippuu suuresti niiden yksilöllisistä ominaisuuksista. Ihmisen tuottamista kasvihuonekaasuista hiilidioksidi aiheuttaa merkittävimmät vaikutukset ilmastomuutokseen, koska sitä syntyy eniten. Hiilidioksidi ei kuitenkaan ole voimakkain kasvihuonekaasu, kun tarkastellaan eri kaasujen ilmastonlämpenemispotentiaalia massayksikköä kohden. ^[11]

Kun eri kasvihuonekaasuja vertaillaan, niin tyypillisesti niitä vertaillaan GWP-kertoimella (engl. Global Warming Potential), joka kertoo, että kuinka paljon enemmän kyseinen kasvihuonekaasu aiheuttaa ilmastonlämpenemistä verrattuna hiilidioksidiin. ^[12]

Lisäksi GWP-kertoimeen vaikuttaa olennaisesti se, että minkä aikavälin vaikutuksia tarkastellaan, koska eri kasvihuonekaasut viipyvät ilmakehässä eri ajan ennen hajoamistaan tai poistumistaan. Yleisimmät aikavälit, joille GWP-kertoimet raportoidaan ovat 20 ja 100 vuotta. ^[13] Aikavälien huomioimisen tärkeys näkyy esimerkiksi metaanin osalta, sillä yksi kilogramma metaania aiheuttaa yli 80 kertaa enemmän ilmastonlämpenemistä 20 vuoden aikavälillä verrattuna samaan määrään hiilidioksidia. Vastaavasti 100 vuoden aikavälillä metaanin vaikutus on noin 30 kertaa voimakkaampi kuin hiilidioksidin. ^[14]

GWP-kertoimet myös mahdollistavat sen, että eri kasvihuonekaasujen yhteisvaikutus ilmaston lämpenemiseen voidaan arvioida ja muuntaa hiilidioksidiekvivalentiksi (CO₂e). ^[15] Maailmanlaajuiset kasvihuonekaasupäästöt olivat vuonna 2022 noin 53,8

Gt CO₂e. Hiilidioksidin osuus näistä päästöistä oli 71,8 %, metaanin 21 %, dityppioksidin 4,8 % ja fluoridikaasujen 2,6 %. ^[16]

Merilogistiikan kasvihuonekaasupäästöt

Vuonna 2018 EU-maissa tuotettiin yhteensä noin 3,8 Gt CO₂e kasvihuonekaasuja, joista liikenteen osuus oli noin 29 %. Liikenteen päästöistä suurin osa, tarkalleen 69 %, johtui tieliikenteestä, kun taas meri- ja lentoliikenne vastasivat kumpikin noin 14 % päästöistä. Loput liikenteen päästöistä syntyivät moottori- ja raidekuljetuksista ja muusta liikenteestä. ^[17]

Meriliikenteen osuus vuonna 2018 kaikista EU:n päästöistä oli siis noin 4 %. Luku on lähes samansuuruinen, kun tarkastellaan maailmanlaajuisia päästöjä ja vertaillaan sitä meriliikenteen osuuteen, joka tuottaa noin 3 % kaikista maailman kasvihuonekaasupäästöistä. ^[18]

Eri kasvihuonekaasujen ilmaston ominaislämmitysvaikutus

Kaasu	Kemiallinen kaava	Viipymä ilmakehässä (a)	Ominaislämmitysvaikutus (GWP)		
			20 vuotta	100 vuotta	500 vuotta
Hiilidioksidi	CO ₂		1	1	1
Metaani	CH ₄	11,8	83	30	10
Metaani*	CH ₄	11,8	81	27	7,2
Dityppioksidi	N ₂ O	109,0	273	273	130
HFC-32	CH ₂ F ₂	5,4	2693	771	220
HFC-134a	CF ₃ CH ₂ F	14,0	4144	1526	436
CFC-11	CCl ₃ F	52,0	8321	6226	2093
PFC-14	CF ₄	50 000,0	5301	7380	10587
Musta hiili			3200	910	280

* = Fossiilittomat lähteet

Kasvihuonekaasupäästöt

Merilogistiikan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämistavoitteet EU:n alueella

Eri yhteisöt ja organisaatiot ovat asettaneet lukuisia tavoitteita ja toimintatapoja merilogistiikasta syntyvien päästöjen hillitsemiseksi.

Vuoden 2024 alussa meriliikenne otettiin osaksi EU:n päästökauppajärjestelmää. Tämän muutoksen myötä alusten omistajat ja operaattorit joutuvat ostamaan päästöoikeuksia kompensoidakseen hiilidioksidipäästönsä, mikä kannustaa heitä vähentämään päästöjään ja investoimaan puhtaampiin teknologioihin. Päästökauppa otetaan kuitenkin käyttöön asteittain, ja vasta vuodesta 2027 alkaen meriliikenteen alusten on täytettävä täydet päästökauppajärjestelmän ehdot. Tämä vaiheittainen käyttöönotto antaa toimijoille aikaa sopeutua uusiin sääntöihin ja tehdä tarvittavat investoinnit päästöjen vähentämiseksi. ^[19]

EU:lla on myös tavoitteena vähentää jäsenvaltioiden päästöjä 55 % vuoteen 2030 mennessä osana Fit for 55-valmiuspakettia. Paketissa on huomioitu merenkulusta

syntyvät päästöt ja näitä pyritään hillitsemään FuelEU Maritime-aloitteella. Aloitteen tarkoitus on vähentää alusten polttoaineiden kasvihuonekaasupäästöjä asteittain 2 %:sta vuonna 2025 jopa 80 %:iin vuoteen 2050 mennessä, esimerkiksi ottamalla käyttöön vaihtoehtoisia polttoaineita. ^[20]

EU:n tavoin Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO on asettanut lukuisia päästövähennystavoitteita. Viimeisimmän strategian mukaan jäsenvaltiot ovat sitoutuneet saavuttamaan nettonolla tilanteen vuoteen 2050 mennessä. Lisäksi kokonaispäästöjen määrää on tarkoitus vähentää 20 % vuoteen 2030 mennessä ja pyrkiä 30 %:in vähennykseen, sekä 70 % vähennykseen vuoteen 2040 mennessä, tavoitellen jopa 80 % vähennystä vuoden 2008 tasosta. ^[21]

Merilogistiikan kasvihuonekaasupäästöjen vähentämiskeinot

Merenkulusta syntyviä kasvihuonekaasupäästöjä on mahdollista vähentää usealla eri tavalla. Yksi keskeisimmistä tavoista on siirtyä käyttämään

energiatehokkaampia aluksia, sekä työkoneita. Lisäksi polttoaineen käytön optimointi ja vaihtoehtoisten polttoaineiden, sekä akkuteknologioiden käyttöönotto ovat keskeisiä askelia kohti kestävämpää merikuljetusten tulevaisuutta. ^[22]

Logististen prosessien tehostaminen on myös ratkaisevassa asemassa, kun tarkastellaan merilogistiikan kasvihuonekaasupäästöjen kokonaiskuvaa. Tehokkaampi reittisuunnittelu, parannettu lastinkäsittely ja kuljetusvirtojen optimointi voivat vähentää turhia päästöjä ja tehostaa resurssien käyttöä. Digitaaliset teknologiat ovat avain roolissa logististen prosessien tehostamisessa, sillä niiden avulla eri toimijoiden välinen yhteistyö ja tiedon jakaminen paranevat. ^[23]

Tulevaisuudessa hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen talteen ottaminen savukaasuista voi myös vakiintua tavalliseksi käytännöksi ja sillä voi olla merkittävä rooli ilmastotavoitteiden saavuttamisessa. ^[24]

Typen oksidien (NOx) päästöt

Typen oksidien syntyminen

Typen oksideja syntyy palamisprosessien yhteydessä esimerkiksi polttomoottoreissa, kun ilmassa oleva typpi ja happi reagoivat keskenään korkean lämmön vaikutuksesta. Lisäksi jotkut polttoaineet, kuten ammoniakki, sisältävät typpeä, mikä voi lisätä typen oksidien määrää savukaasuissa. Pääsääntöisesti palamisprosesseissa syntyy vain typpimonoksidia (NO), mutta myös pieniä määriä typpidioksidia (NO₂) voi syntyä. Ilmakehässä typpimonoksidi reagoi otsonin (O₃) kanssa muodostaen haitallisempaa typpidioksidia. Tämä reaktio voi myös toimia vastakkaiseen suuntaan UV-säteilyn vaikutuksesta, jolloin typpidioksidi hajoaa takaisin typpimonoksidiksi ja vapaaksi happiatomiksi. Vapautunut happiatomi voi sitten reagoida ilmassa olevan hapen (O₂) kanssa muodostaen otsonia. Näin ollen NOx-päästöt voivat, sekä kuluttaa, että tuottaa otsonia riippuen ympäristöolosuhteista, kuten valon määrästä. ^[25]

NOx-päästöillä on lukuisia haittavaikutuksia ympäristölle, eläimille, sekä ihmisten terveydelle. Muiden päästöjen lailla, typen oksidien päästöt heikentävät ilmanlaatua johtaen erilaisiin oireisiin ja sairauksiin ihmisillä. NOx-päästöt ovat myös osallisia happosateiden muodostumisessa, joilla on suora vaikutus vesistöjen ja maaperän ekosysteemien tasapainoon. Lisäksi NOx-päästöt voivat

lisätä alailmakehän otsonin määrää, jolla itsessään on monia haittavaikutuksia. ^[26]

Typen oksidien vaikutukset ihmisterveydelle

NOx-päästöjen suurimmat terveysvaikutukset ilmenevät hengityselimissä. Ne liittyvät erityisesti erilaisten hengityselinsairauksien, kuten keuhkohtaumataudin, yleistymiseen. Lisäksi heikentynyt ilmanlaatu voi pahentaa astmaa ja laukaista sen oireita. NOx-päästöillä on vaikutuksia myös sydämen ja verisuonten toimintaan, sekä ne voivat lisätä diabeteksen ja syövän riskiä. ^[27] Alailmakehän otsonin lisääntyminen NOx-päästöjen takia pahentaa myös hengityselinsairauksia ja astmaoireita. Lisäksi otsoni voi ärsyttää silmiä ja lisätä tulehdusten määrää. ^[28]

Typen oksidien vaikutukset ympäristöön ja eläimiin

Typen oksidien molekyylit reagoivat veden kanssa ilmakehässä muodostaen typpihappoa (HNO₃). ^[29] Tämä typpihappo päättyy maanpinnalle happosateiden muodossa, mikä aiheuttaa lukuisia vaikutuksia maaperälle, vesistöillä, eläimille ja kasveille. Happosateet voivat vahingoittaa kasvien ja puiden lehtiä, mikä heikentää niiden fotosynteesiä. ^[30] Lisäksi lisääntynyt alailmakehän otsoni voi edelleen heikentää kasvien fotosynteesiä. ^[31] Happosateet voivat myös liuottaa maaperästä haitallisia kemikaaleja, kuten alumiinia,

lisäten niiden esiintyvyyttä ja haittavaikutuksia. Osa kasveille välttämättömistä ravinteista saattaa myös liueta syvemmälle maaperään, minkä seurauksena kasvit eivät pysty enää hyödyntämään niitä. Happosateiden muihin vaikutuksiin lukeutuu mukaan muun muassa maaperän, sekä vesistöjen happamoitumista. Nämä pH-muutokset ja happosateet yleisesti vaikuttavat lukuisilla tavoilla eri organismeihin. Esimerkiksi vesistöissä happamoituminen voi haitata kalojen lisääntymiskykyä tai poikasten kykyä kuoriutua munista. Maaperässä sen sijaan muuttunut pH voi vaikuttaa mikro-organismien toimintaan. Typpipitoiset happosateet voivat myös lisätä vesistöjen rehevöitymistä. ^[32]

Typen oksidien muut vaikutukset

Lisääntynyt otsonin määrä alailmakehässä edistää savusumun muodostumista. ^[33] Savusumulla on itsessään erilaisia terveysvaikutuksia ja se heikentää näkyvyyttä ympäristössä. NOx-päästöistä johtuva vahinko materiaaleihin on myös huomioitava seikka. Happosateet ja typen oksidit voivat reagoida muiden ilmansaasteiden kanssa ja vaikuttaa negatiivisesti rakennusten ja muiden materiaalien kestävyys- ja kuntoon. Ajan myötä tämä voi johtaa rakenteellisiin vaurioihin, sekä lisäkustannuksiin ylläpidossa. ^[34]

Typen oksidien (NOx) päästöt

Merenkulun NOx-päästöjen lainsäädäntö

Useita lakeja on laadittu typen oksidien haittavaikutusten takia. Kansainvälinen merenkulkujärjestö on muun muassa määrittänyt erilaisia päästötasovaatimuksia NOx-päästöille MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI säännön 13 mukaisesti merenkulun osalta. Päästötasovaatimukset pätevät vain diesel koneille, joiden teho on yli 130 kW. Nämä päästötasovaatimukset jaetaan kolmeen eri luokkaan (engl. Tier) riippuen aluksen rakennusajankohdasta tai siitä, onko moottoriin tehty huomattavia muutostöitä, kuten koneen vaihto tai modifiointi. Päästötasoluokkaan vaikuttaa myös, mikäli alus purjehtii määritellyllä typen oksidien päästöjen valvonta-alueella (engl. NOx Emissions Control Area (NECA)).

NOx-päästöjen valvonta-alueisiin lukeutuu kuusi eri aluetta: Itämeren alue, Pohjanmeren alue, Pohjois-Amerikan itä ja länsi alueet, Havaijin alue, sekä Yhdysvaltojen Karibianmeren alue. [35]

IMO MARPOL liite VI NOx-päästöjen päästötasoluokat

NOx-päästöjen raja-arvo eri päästötasovaatimuksissa on määritelty moottorin nimelliskierrosluvun (n) avulla ja ne riippuvat myös siitä, koska alukset ovat rakennettu. NOx-päästöt ovat tyypillisesti suurimmillaan pienillä kierros-
luvuilla. [36]

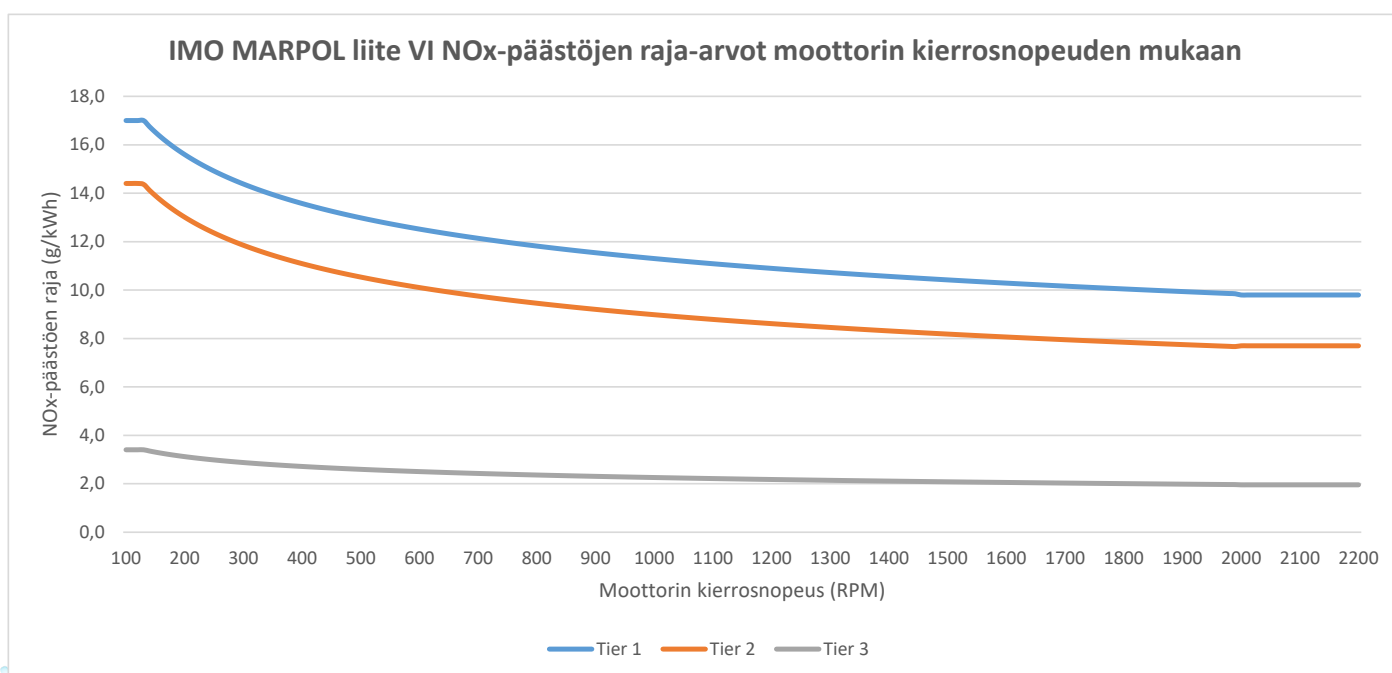
NOx-päästöjen päästötasoluokat:

Tier 1 päästötasovaatimukset pätevät aluksille, jotka ovat rakennettu vuodesta 2000 eteenpäin.

Tier 2 päästötasovaatimukset pätevät aluksille, jotka ovat rakennettu vuodesta 2011 eteenpäin.

Tier 3 päästötasovaatimukset pätevät aluksille, jotka ovat rakennettu vuodesta 2016 eteenpäin, sekä purjehtivat päästöjen valvonta-alueella. Mikäli alus purjehtii päästöjen valvonta-alueen ulkopuolella, niin Tier 2 vaatimukset pätevät. [37]

IMO MARPOL Liite VI NOx-päästöjen raja-arvot				
Päästötasoluokka	Vuosi	NOx-päästöjen rajat kierrosnopeuden mukaan		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier 1	2000	17,0	45 * (n ^{-0,2})	9,8
Tier 2	2011	14,4	44 * (n ^{-0,23})	7,7
Tier 3	2016	3,4	9 * (n ^{-0,2})	1,96



Typen oksidien (NOx) päästöt

NOx-päästöjen hallinta

Typen oksidien päästöjen määrään voidaan vaikuttaa monella eri tavalla jo ennen kuin niitä pääsee syntymään. NOx-päästöt ovat vahvasti linkittynyt siihen, että mitä polttoainetta käytetään, esimerkiksi metanoli tuottaa huomattavasti vähemmän NOx-päästöjä verrattuna raskaaseen polttoöljyyn tai FAME biodieseliin. ^[38]

Laivan moottorin palamisreaktioihin vaikuttavilla säädöillä on myös suuri merkitys typen oksidien syntymiseen. Esimerkiksi polttoaineen ruiskutuksen ajoituksen ja jäähdytetyn imuilman avulla voidaan alentaa palamispainetta, jonka vaikutuksesta polttokam-

miossa on matalampi lämpötila palamisreaktion aikana. Alhaisemman lämpötilan ansiosta NOx-päästöjä syntyy vähemmän, mutta samalla muiden päästöjen määrä voi kasvaa. Matalampi palamislämpötila voidaan saavuttaa myös pakokaasun takaisin kierrätys-, eli EGR-järjestelmällä (engl. Exhaust Gas Recirculation), jossa osa pakokaasuista ohjataan takaisin imuilmaan. EGR-järjestelmä saattaa kuitenkin lisätä pienhiukkaspäästöjen määrää. ^[39]

Palamiskammioissa syntyneitä NOx-päästöjä voidaan estää pääsemästä ilmakehään selektiivisen katalyyttisen pelkistämisen, eli SCR-järjestelmän (engl. Se-

lective Catalytic Reduction) avulla. SCR-järjestelmän tulokanavassa typen oksideja sisältävään savukaasuun ruiskutetaan ammoniakkia, jonka jälkeen se ohjataan SCR kammioon. Kammiossa ammoniakki, sekä savukaasujen typen oksidit reagoivat katalyytin vaikutuksesta muodostaen typpikaasua, sekä vettä. Tämän jälkeen puhdistetut savukaasut ohjataan ulos järjestelmästä ja ne päätyvät lopulta ilmakehään. ^[40]

SCR-järjestelmät laivoissa ovat tutkimusten mukaan pystyneet vähentämään NOx-päästöjä joissakin tapauksissa jopa yli 90 %. ^[41]



Rikin oksidien (SOx) päästöt

Rikin oksidien syntyminen

Rikin oksideja muodostuu, kun palamisen yhteydessä polttoaineeseen sitoutunut rikki reagoi hapen kanssa. Tämä tarkoittaa, että rikin oksidien määrä savukaasuissa on suoraan verrannollinen polttoaineessa olevaan rikkiin. Suurin osa syntyneistä SOx-päästöistä on rikkidioksidia (SO_2), mutta myös pieniä määriä rikkitrioksidia (SO_3) ja sulfaattia (SO_4) voi syntyä palamisreaktioissa. ^[42] Ilmakehässä rikkidioksidi hapettuu rikkitrioksidiksi. ^[43]

SOx-päästöillä on lukuisia haittavaikutuksia ympäristölle, eläimille, sekä ihmisten terveydelle. Muiden päästöjen lailla, rikin oksidit heikentävät ilmanlaatua johtaen erilaisiin oireisiin ja sairauksiin ihmisillä. SOx-päästöt ovat myös osallisia happosateiden muodostamisessa, joilla on suora vaikutus vesistöjen ja maaperän ekosysteemien tasapainoon. Lisäksi SOx-päästöt voivat reagoida ilmakehässä muiden yhdisteiden kanssa luoden erilaisia pienhiukkasia, joilla on lukuisia haittavaikutuksia ihmisterveydelle. ^[44]

Rikin oksidien vaikutukset ihmisterveydelle

Suurimmat vaikutukset SOx-päästöillä ihmisten terveyteen ilmenevät hengityselimissä.

SOx-päästöt ovat yhdistetty erilaisten hengityselinsairauksien yleistymiseen, kuten keuhkoahtaumatautiin. Heikentynyt ilmanlaatu voi myös pahentaa tai laukaista astmaoireita. Hengityselin vaikutusten lisäksi SOx-päästöt voivat lisätä allergioiden, verisuonisairauksien, syöpien sekä aivohalvausten määrää. Jotkut tutkimukset ovat myös osoittaneet, että rikin oksidit voivat vaikuttaa lisääntymiselimiin ja sikiöiden kehittymiseen. ^[45] Lisäksi SOx-päästöistä lisääntyneet pienhiukkaspäästöt aiheuttavat lukuisia terveysriskejä hengityselimille ja lisäävät sydän- ja verisuonisairauksien määrää. ^[46]

Rikin oksidien vaikutukset ympäristöön ja eläimiin

Ilmakehässä rikkitrioksidi reagoi veden kanssa muodostaen rikkihappoa (H_2SO_4). Tämä rikkihappo päätyy maanpinnalle happosateiden muodossa, mikä aiheuttaa lukuisia vaikutuksia maaperälle, vesistöillä, eläimille ja kasveille. Happosateet voivat vahingoittaa kasvien ja puiden lehtiä, mikä vaikeuttaa niiden fotosynteesiä. Lisäksi happosateet voivat liuottaa maaperästä haitallisia kemikaaleja, kuten alumiinia, lisäten niiden esiintyvyyttä ja haittavaikutuksia. Osa

kasveille välttämättömistä ravinteista saattaa myös liueta syvemmälle maaperään, minkä seurauksena kasvit eivät pysty enää hyödyntämään niitä. Happosateiden muihin vaikutuksiin lukeutuu mukaan muun muassa maaperän, sekä vesistöjen happamoitumista. Nämä pH-muutokset ja happosateet yleisesti vaikuttavat lukuisilla tavoilla eri organismeihin. Esimerkiksi vesistöissä happamoituminen voi haitata kalojen lisääntymiskykyä tai poikasten kykyä kuoriutua munista. Maaperässä sen sijaan muuttunut pH voi vaikuttaa mikro-organismien toimintaan. ^[47]

Rikin oksidien muut vaikutukset

Rikin oksidien lisäämät pienhiukkaset ilmakehässä edistävät aurinkosavun, eli auerin syntyä, joka heikentää yleistä näkyvyyttä ympäristössä. ^[48] SOx-päästöistä johtuva vahinko materiaaleihin on toinen huomioitava seikka. Happosateet ja rikin oksidit voivat reagoida muiden ilmansaasteiden kanssa ja vaikuttaa negatiivisesti rakennusten ja muiden materiaalien kestävyys- ja kuntoon. Ajan myötä tämä voi johtaa rakenteellisiin vaurioihin, sekä lisäkustannuksiin ylläpidossa. ^[49]

Rikin oksidien (SOx) päästöt

Merilogistiikan SOx-päästöjen lainsäädäntö

Useita lakeja on laadittu rikin oksidien lukuisten haittavaikutusten takia. Kansainvälinen merenkulkujärjestö on määrittänyt erilaisia polttoaineen rikkipitoisuuden vaatimuksia MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI säännön 14 mukaisesti merenkulun osalta. Säännöksellä pyritään estämään SOx-päästöjen, sekä niistä aiheutuvien pienhiukkasten määrää. Polttoaineen rikkipitoisuus raja-alueella vaikuttaa myös vahvasti se, että liikkuuko alus rikin oksidien päästöjen valvonta-alueella (engl. SOx Emissions Control Area (SECA)). Rikin oksidien valvonta-alueisiin lukeutuu kuusi eri aluetta: Itämeren alue, Pohjanmeren alue, Pohjois-Amerikan itä ja länsi alueet, Havaijin alue, sekä Yhdysvaltojen Karibianmeren alue. [50] Näiden alueiden lisäksi Väli-meren alue tulee myös olemaan rikin oksidien valvonta-alue vuoden 2025 toukokuusta eteenpäin. [51]

IMO MARPOL liite VI polttoaineiden rikkipitoisuus raja-arvot

Rikin oksidien päästöjen valvonta-alueilla polttoaineiden rikkipitoisuus saa olla korkeintaan 0,1 % polttoaineen massasta, kun vastaava luku muilla merialueilla on 0,5 %. [52]

IMO MARPOL liite VI polttoaineiden rikkipitoisuus raja-arvot

SOx ECA	Yleinen
0,10 %	0,50 %

SOx-päästöjen hallinta

On tärkeä huomioda, että vaikka IMO:n asetuksissa on määritelty rajoitukset polttoaineen rikkipitoisuudelle, laivayhtiöt voivat silti käyttää polttoaineita, jotka ylittävät nämä rajat, mikäli aluksissa on käytössä savukaasupesuri tai muu laite SOx-päästöjen vähentämiseksi. Tämä mahdollisuus on myös huomioitu MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI säännöksessä 4. [53]

Tyypillisesti savukaasupesureiden toimintaperiaate jae-

taan joko kuiva- tai märkämenetelmiin. Käytännössä kaikki pesurit kuitenkin toimivat samalla tavalla, eli savukaasujen sekaan ruiskutetaan erilaisia aineita, jotka reagoivat savukaasujen rikin oksidien kanssa, sitoen niitä, jolloin ne voidaan ottaa talteen savukaasuista. [54] Savukaasupesurin käyttö mahdollistaa esimerkiksi raskaan polttoöljyn (HFO) käytön, jonka rikkipitoisuus on tyypillisesti 3,5 %. [55]

Yksinkertaisempi tapa hallita SOx-päästöjä on valita polttoaine, jonka rikkipitoisuus on IMO:n asetuksen raja-arvojen sisällä. Esimerkiksi marine diesel oil (MDO) ja marine gas oil (MGO) sisältävät huomattavasti vähemmän rikkiä kuin raskas polttoöljy. [56] Myös LNG ja metanoli sisältävät erittäin pieniä määriä rikkiä, jonka vaikutuksesta SOx-päästöt näillä polttoaineilla ovat käytännössä olemattomat. [57]



Muut päästöt

Laivat ja merilogistiikka yleisestikin tuottavat kasvihuonekaasujen, sekä typen ja rikin oksidien lisäksi myös muita haitallisia päästöjä.

Pienhiukkaspäästöt

Pienhiukkaspäästöt (engl. Particulate Matter (PM)) koostuvat erittäin pienistä hiukkasista ja tyypillisesti ne luokitellaan eri luokkiin niiden koon mukaan. Partikkelikoko vaikuttaa, sekä hiukkasten ilmakehässä kulkemaan etäisyyteen, että niiden potentiaaliin terveysvaikutuksiin. ^[58] Pienhiukkaset jaetaan yleensä seuraaviin luokkiin:

PM 10: Pienhiukkaset, joiden halkaisija on alle 10 mikrometriä. Nämä voivat kulkeutua keuhkoihin ja aiheuttaa erilaisia terveysongelmia, kuten astmakohtauksia ja keuhkohtaumatautia, erityisesti altistuttaessa pitkäaikaiselle tai suurille pitoisuuksille. ^[59]

PM 2,5: Pienhiukkaset, joiden halkaisija on alle 2,5 mikrometriä. Näiden hiukkasten pienen kokonsa ansiosta ne pystyvät tunketumaan keuhkorakkuloihin aiheuttaen vakavia sairauksia. ^[60] Näihin lukeutuu erilaiset krooniset sydän-, verisuoni- ja hengityssairaudet. ^[61]

Ilmakehässä SO_x-päästöt voivat reagoida muiden yhdisteiden kanssa muodostaen pienhiukkasia. ^[62] Tämä tarkoittaa, että MARPOL-yleissopimuksen liitteen VI säännön 14 asettamat polttoaineen rikkipitoisuuden rajat vähentävät

myös pienhiukkaspäästöjä.

VOC-päästöt

VOC-päästöihin (engl. Volatile Organic Compounds) kuuluu monia erilaisia kaasumaisia orgaanisia yhdisteitä. Näitä päästöjä syntyy polttoaineiden polttoprosesseissa, mutta niitä syntyy myös polttoaineiden kuljetuksen ja jakelun aikana, kun osa polttoaineesta haihtuu ja vapautuu ilmakehään. Tämä haihtuminen voi tapahtua esimerkiksi tankkereissa ja jakeluinfrastruktuurissa, kuten säiliöautoissa ja varastoissa. ^[63] ^[64]

Lisäksi laivojen ylläpidossa ja korjauksissa käytettävät kemikaalit, kuten liuottimet ja maalit, sisältävät usein haihtuvia orgaanisia yhdisteitä, jotka voivat vapautua ympäristöön. ^[65] Rakennusmateriaalit, kuten eristeet, tiivisteet ja lattiapinnoitteet, voivat myös olla VOC-päästöjen lähteitä erityisesti uusissa tai juuri remontoituissa aluksissa, kun materiaalit vapauttavat yhdisteitä kuivumisen ja kovettumisen aikana. ^[66] ^[67]

Koska VOC-päästöihin lukeutuu niin monia eri yhdisteitä, niiden aiheuttamat vaikutukset ovat erittäin laaja-alaisia ja vaihtelevia. Ihmisille VOC-päästöt voivat aiheuttaa muun muassa hengityselinsairauksia, syöpiä ja keskushermoston toimintahäiriöitä. Ilmakehässä sen sijaan VOC-päästöt saattavat lisätä alailmakehän otsonin määrää. ^[68]

MARPOL-yleissopimuksen

liitteen VI säännöksessä 15 on asetettu erilaisia ehtoja säiliöaluksille, joiden tarkoituksena on estää näiden alusten VOC-päästöjä. ^[69]

Musta hiili

Mustaa hiiltä eli nokea syntyy hiilipohjaisten polttoaineiden epätäydellisen polton yhteydessä. Musta hiili lukeutuu pienhiukkasten PM 2,5 luokkaan, tarkoittaen että sillä voi olla erittäin haitallisia terveysvaikutuksia ihmisille. ^[70] Noki on myös erittäin voimakas kasvihuonekaasu, sillä 20 vuoden aikana kilogramma mustaa hiiltä aiheuttaa yli 3 000 kertaa enemmän ilmastonlämpenemistä kuin kilogramma hiilidioksidia. ^[71] Musta hiili on erityisen merkittävä kasvihuonekaasu merenkulussa. Vuosina 2013–2015 mustan hiilen osuus kansainvälisen merenkulun kasvihuonekaasupäästöjen ilmaston lämpenemistä aiheuttavasta vaikutuksesta oli noin viidennes. ^[72]

Musta hiili ei viivy ilmakehässä kuin 4–12 päivää ennen kuin se palaa takaisin maan pinnalle. Maan pinnalla sillä voi olla vakavia vaikutuksia, esimerkiksi jäätiköiden sulamiseen. Kun musta hiili laskeutuu jäätiköille ja lumipeitteille, se vähentää niiden heijastavuutta eli albedoa. Tämä tarkoittaa, että auringon säteily ei heijastu takaisin avaruuteen, vaan imeytyy tummuneeseen pintaan, jonka seurauksena alueen lämpötila nousee ja jäätiköt sulavat nopeammin. ^[73]

Lähteet

- [1] European Environment Agency. (2021). Facts and figures: the EMTER report. (s. 3-4). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.emsa.europa.eu/about/financial-regulations/items.html?cid=14&id=4515>
- [2] International Maritime Organization. (n.d.). IMO 2020 - cleaner shipping for cleaner air. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.imo.org/en/MediaCentre/PressBriefings/pages/34-IMO-2020-sulphur-limit-.aspx>
- [3] Sofiev, M., Winebrake, J. J., Johansson, L., Carr, E. W., Prank, M., Soares, J., Vira, J., Kouznetsov, R., Jalkanen, J., & Corbet, J. J. (2018). Cleaner fuels for ships provide public health benefits with climate tradeoffs. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.nature.com/articles/s41467-017-02774-9>
- [4] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [5] Ilmasto-opas. (n.d.). Kasvihuoneilmiö ja ilmakehän koostumus. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kasvihuoneilmio-ja-ilmakehan-koostumus>
- [6] Ilmasto-opas. (n.d.). Kasvihuoneilmiö ja ilmakehän koostumus. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/kasvihuoneilmio-ja-ilmakehan-koostumus>
- [7] NASA. (n.d.). Extreme Weather and Climate Change. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://science.nasa.gov/climate-change/extreme-weather/>
- [8] Ilmasto-opas. (n.d.). Jäätiköt ja valtameret. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ilmasto-opas.fi/artikkelit/jaatikot-ja-valtameret>
- [9] Euroopan komissio. (n.d.). Ilmastonmuutoksen seuraukset. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_fi
- [10] Euroopan komissio. (n.d.). Ilmastonmuutoksen seuraukset. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://climate.ec.europa.eu/climate-change/consequences-climate-change_fi
- [11] United States Environmental Protection Agency. (2024). Overview of Greenhouse Gases. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [12] United States Environmental Protection Agency. (2024). Overview of Greenhouse Gases. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases>
- [13] Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. (s. 1017). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf

Lähteet

- [14] Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. (s. 1017). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf
- [15] European Environment Agency. (n.d.). Carbon dioxide equivalent. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.eea.europa.eu/help/glossary/eea-glossary/carbon-dioxide-equivalent>
- [16] European Commission. (2023). GHG emissions of all world countries. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://edgar.jrc.ec.europa.eu/report_2023
- [17] Buysse, C., & Miller, J. (2021). Transport could burn up the EU's entire carbon budget. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://theicct.org/transport-could-burn-up-the-eus-entire-carbon-budget/>
- [18] King, A. (2022). Emissions-free sailing is full steam ahead for ocean-going shipping. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/horizon-magazine/emissions-free-sailing-full-steam-ahead-ocean-going-shipping>
- [19] European Commission. (n.d.). Reducing emissions from the shipping sector. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://climate.ec.europa.eu/eu-action/transport/reducing-emissions-shipping-sector_en
- [20] Euroopan unionin neuvosto. (2023). FuelEU Maritime -aloite: neuvostolta uusi laki merenkulkualan vähähiilistymisestä. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.consilium.europa.eu/fi/press/press-releases/2023/07/25/fueleu-maritime-initiative-council-adopts-new-law-to-decarbonise-the-maritime-sector/>
- [21] Comer, B., & Carvalho, F. (2023). IMO's newly revised GHG strategy: What it means for shipping and the Paris Agreement. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://theicct.org/marine-imo-updated-ghg-strategy-jul23/>
- [22] Rantanen, A., Berg, N., & Kanto, E. (2019). Digitalisaation hyödyntäminen merenkulun päästövähennyksissä. (s. 7). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Traficom_maritime_digitalization_CO2_20190927_AB-STRACTS.pdf
- [23] Rantanen, A., Berg, N., & Kanto, E. (2019). Digitalisaation hyödyntäminen merenkulun päästövähennyksissä. (s. 2). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.traficom.fi/sites/default/files/media/publication/Traficom_maritime_digitalization_CO2_20190927_AB-STRACTS.pdf
- [24] DNV. (n.d.). Onboard carbon capture and storage on ships. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.dnv.com/focus-areas/ccs/onboard-carbon-capture-and-storage-on-ships/>
- [25] Air Pollution Information System. (n.d.). Nitrogen Oxides (NOx). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.apis.ac.uk/overview/pollutants/overview_nox.htm

Lähteet

- [26] United States Environmental Protection Agency. (2023). Basic Information about NO₂. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/no2-pollution/basic-information-about-no2>
- [27] United States Environmental Protection Agency. (2016). Integrated Science Assessment (ISA) for Oxides of Nitrogen – Health Criteria (Final Report, Jan 2016). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=310879>
- [28] United States Environmental Protection Agency. (2024). Health Effects of Ozone Pollution. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/health-effects-ozone-pollution>
- [29] Government of Nova Scotia. (n.d.). Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://novascotia.ca/nse/air/acidrain.asp>
- [30] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [31] Iowa Department of Natural Resources. (n.d.). Effects of Ground Level Ozone. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.iowadnr.gov/Environmental-Protection/Air-Quality/Air-Pollutants/Effects-Ozone>
- [32] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [33] United States Environmental Protection Agency. (2024). Ground-level Ozone Basics. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/ground-level-ozone-pollution/ground-level-ozone-basics#effects>
- [34] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [35] Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea. (2020). MARPOL Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.rempec.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/3-zb-l01-marpol-annex-vi-regulations-final.pdf>
- [36] DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- [37] DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- [38] Zhou, Y., Pavlenko, N., Rutherford, D., Osipova, L., & Comer, B. (2020). The potential of liquid biofuels in reducing ship emissions. (s. 31). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://the-icct.org/wp-content/uploads/2021/06/Marine-biofuels-sept2020.pdf>

Lähteet

- [39] Aakko-Saksa, P. T., Lehtoranta, K., Kuittinen, N., Järvinen, A., Jalkanen, J. P., Johnson, K., Jung, H., Ntziachristos, L., Gagné, S., Takahashi, C., Karjalinen, P., Rönkkö, T., & Timonen, H., (2023). Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines. (s. 9). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/71984607/1_s2.0_S0360128522000624_main.pdf
- [40] Sinzenich, H. (2014). How does Selective Catalytic Reduction work?. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.mtu-solutions.com/eu/en/stories/technology/research-development/how-does-selective-catalytic-reduction-work.html>
- [41] Aakko-Saksa, P. T., Lehtoranta, K., Kuittinen, N., Järvinen, A., Jalkanen, J. P., Johnson, K., Jung, H., Ntziachristos, L., Gagné, S., Takahashi, C., Karjalinen, P., Rönkkö, T., & Timonen, H., (2023). Reduction in greenhouse gas and other emissions from ship engines. (s. 9). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/71984607/1_s2.0_S0360128522000624_main.pdf
- [42] Aakko-Saksa, P. T., & Lehtoranta, K. (2019). Ship emissions in the future. (s. 18, 24). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24205607/VTT_R_00335_19.pdf
- [43] Unacademy. (n.d.). Conversion of Sulphur Dioxide. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://unacademy.com/content/jee/study-material/chemistry/conversion-of-sulphur-dioxide/>
- [44] United States Environmental Protection Agency. (2024). Sulfur Dioxide Basics. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- [45] United States Environmental Protection Agency. (2017). Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides – Health Criteria. (s. 1) Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://cfpub.epa.gov/ncea/isa/recordisplay.cfm?deid=338596>
- [46] United States Environmental Protection Agency. (2024). Particulate Matter (PM) Basics. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/pm-pollution/particulate-matter-pm-basics>
- [47] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [48] United States Environmental Protection Agency. (2024). Sulfur Dioxide Basics. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/so2-pollution/sulfur-dioxide-basics>
- [49] United States Environmental Protection Agency. (2024). Effect of Acid Rain. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.epa.gov/acidrain/effects-acid-rain>
- [50] Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea. (2020). MARPOL Annex VI - Prevention of Air Pollution from Ships. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.rempec.org/en/knowledge-centre/online-catalogue/3-zb-l01-marpol-annex-vi-regulations-final.pdf>

Lähteet

- [51] ClassNK. (n.d.). SOx - PM regulations. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.classnk.or.jp/hp/en/activities/statutory/soxpm/index.html>
- [52] DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- [53] International Maritime Organization. (n.d.). Equivalents (SOx scrubber, etc.) – Regulation 4. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Equivalents-\(Sox-scrubber,-etc.\)---Regulation-4.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Equivalents-(Sox-scrubber,-etc.)---Regulation-4.aspx)
- [54] Sethi, S. (2021). A Guide To Scrubber System On Ship. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.marineinsight.com/tech/scrubber-system-on-ship/>
- [55] Senmatic. (n.d.). The 5 most relevant marine fuel types. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.senmatic.com/sensors/knowledge/the-5-most-relevant-marine-fuel-types>
- [56] Aura Marine. (n.d.). MDO/MGO. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.auramarine.com/marine-industry/mdo-mgo/>
- [57] Aakko-Saksa, P. T., & Lehtoranta, K. (2019). Ship emissions in the future. (s. 18). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://cris.vtt.fi/ws/portalfiles/portal/24205607/VTT_R_00335_19.pdf
- [58] GOV.UK. (2024). Particulate matter (PM10/PM2.5). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.gov.uk/government/statistics/air-quality-statistics/concentrations-of-particulate-matter-pm10-and-pm25>
- [59] Canu, I. G., Wild, P., Charreau, T., Freund, R., Toto, A., Pralong, J., Sakthithasan, K., Jouan-nique, V., Debatisse, A., & Suarez, G. (2023). Long-term exposure to PM10 and respiratory health among Parisian subway workers. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38159498/>
- [60] Xing, Y., Xu, Y., Shi, M., & Lian, Y. (2015). The impact of PM2.5 on the human respiratory system. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://jtd.amegroups.org/article/view/6353/html>
- [61] Basith, S., Manavalan, B., Shin, T. H., Park, C. B., Lee, W., Kim, J., & Lee, G. (2022). The Impact of Fine Particulate Matter 2.5 on the Cardiovascular System: A Review of the In-visible Killer. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC9370264/>
- [62] Clean Arctic Alliance. (2024). Clean Arctic Alliance Response: Shipping's SOx Emissions and the Climate. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://cleanarctic.org/2024/06/04/clean-arctic-alliance-response-shippings-sox-emissions-and-the-climate/>
- [63] Xiao, Q., Li, M., Liu, H., Fu, M., Deng, F., Lv, Z., Man, H., Jin, X., Liu, S., & He, K. (2018). Characteristics of marine shipping emissions at berth: profiles for particulate matter and volatile organic compounds. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://acp.copernicus.org/articles/18/9527/2018/>

Lähteet

- [64] Wankhede, A. (2021). What is Volatile Organic Compound (VOC)? Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.marineinsight.com/tech/what-is-volatile-organic-compound-voc/>
- [65] Malherbe, L., & Mandin, C. (2007). VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1352231007001367>
- [66] American Lung Association. (2024). Volatile Organic Compounds. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds>
- [67] Girman, J. R., Hodgson, A. T., Newton, A. S., & Winkes, A. W. (2024) Emissions of volatile organic compounds from adhesives with indoor applications. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0160412086900450>
- [68] American Lung Association. (2024). Volatile Organic Compounds. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.lung.org/clean-air/indoor-air/indoor-air-pollutants/volatile-organic-compounds>
- [69] International Maritime Organization. (n.d.). Volatile organic compounds (VOC) – Regulation 15. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: [https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Volatile-organic-compounds-\(VOC\)-%E2%80%93Regulation-15.aspx](https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/Volatile-organic-compounds-(VOC)-%E2%80%93Regulation-15.aspx)
- [70] Climate & Clean Air Coalition. (n.d.). Black Carbon. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/black-carbon>
- [71] Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Bernsten, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Ballouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50171>
- [72] Olmer, N., Comer, B., Roy, B., Mao, X., & Rutherford, D. (2017). Greenhouse Gas Emissions From Global Shipping, 2013–2015. (s. 25). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://the-icct.org/wp-content/uploads/2021/06/Global-shipping-GHG-emissions-2013-2015_ICCT-Report_17102017_vF.pdf
- [73] Climate & Clean Air Coalition. (n.d.). Black Carbon. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://www.ccacoalition.org/short-lived-climate-pollutants/black-carbon>

Kaavioiden, kuvioiden ja taulukoiden lähteet

- s.4** Taulukko 1:
Forster, P., Storelvmo, T., Armour, K., Collins, W., Dufresne, J.-L., Frame, D., Lunt, D. J., Mauritsen, T., Palmer, M. D., Watanabe, M., Wild, M., & Zhang, H. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks and Climate Sensitivity. (s. 1017). Haettu 09.07.2024 osoitteesta: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07.pdf
- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Bernsten, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Kärcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Balouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., & Zender, C. S. (2013). Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/jgrd.50171>
- s.7** Kaavio 1:
DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- Taulukko 2:
DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>
- s.10** Taulukko 3:
DieselNet. (n.d.). IMO Marine Engine Regulation. Haettu 09.07.2024 osoitteesta: <https://dieselnet.com/standards/inter/imo.php>

Kuvien lähteet

- s.1** Adobe Stock: Federico Aliaksandr Siamko. (n.d.). Haettu 30.08.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/container-cargo-ship-in-the-ocean-at-sunset-blue-sky-back-ground-with-copy-space-nautical-vessel-and-sea-freight-shipping-international-global-business-logistics-transportation-import-export-concept/756026306>
- s.2** Adobe Stock: Yellow Boat. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/aerial-top-view-of-cargo-ship-carrying-container-and-running-for-export-goods-from-cargo-yard-port-to-custom-ocean-concept-technology-transportation-customs-clearance/483855922>
- s.3** Adobe Stock: Alexander. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: <https://stock.adobe.com/images/polar-bear-and-golbar-warming/15356288>
- s.8** Adobe Stock: apichat. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/a-large-cargo-ship-releases-thick-black-smoke-into-the-sky-against-the-backdrop-of-a-stunning-ocean-sunset/744938346?asset_id=744938346
- s.10** Adobe Stock: Yellow Boat. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/smoke-exhaust-gas-emissions-from-cruise-ship-cruise-liners-beautiful-white-cruise-ship-above-luxury-cruise-diesel-engine-exhaust-gas-from-combustion-gas-emission-air-pollution-from-transportation/775724647?asset_id=775724647
- s.2-19** Adobe Stock: Steves Artworks. (n.d.). Haettu 09.05.2024 osoitteesta: https://stock.adobe.com/images/blue-watercolor-sea-wave-texture-design-on-transparent-background/773410060?asset_id=773410060