

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

Merenkulun koulutusohjelma

Taavi Lukin

ALUSLIIKENTEEN AIHEUTTAMAT RIKIN JA TYPEN OKSIDIPÄÄSTÖT  
ITÄMERELLÄ JA NIIDEN VAIKUTUKSET YMPÄRISTÖLLE SEKÄ IHMISEN  
TERVEYDELLE

Opinnäytetyö 2010

## TIIVISTELMÄ

### KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

#### Merenkulun koulutusohjelma

LUKIN, TAAVI

Alusliikenteen aiheuttamat rikin ja typen oksidipäästöt Itämerellä ja niiden vaikutukset ympäristölle sekä ihmisen terveydelle

Opinnäytetyö  
Työn ohjaajat

57 sivua + 3 liitesivua  
Tutkimusjohtaja Jorma Rytönen, Merenkulun ylitarkastaja Jorma Kämäräinen ja Dosentti Anita Mäkinen

Toimeksiantaja

Liikenteen turvallisuusvirasto Trafi  
Dosentti Anita Mäkinen

Marraskuu 2010  
Avainsanat

Typen oksidit, rikin oksidit, Itämeri, ympäristövaikutukset, päästöt, laivaliikenne

Euroopassa laivaliikenne on vastuussa n. 30 %:sta rikin ja typen oksidipäästöistä. Itämerellä liikennöi jokainen hetki noin 2000 alusta jolta saadaan AIS-tieto. Kuukaudessa Itämerellä liikennöi 4000–5800 alusta riippuen vuodenajasta. Näiden alusten aiheuttamat NO<sub>x</sub>-päästöt ovat yli 390 000 tonnia vuodessa ja SO<sub>x</sub>-päästöt 135 000 tonnia vuodessa. Itämerellä ovat astuneet voimaan uudet päästömääräykset 1.7.2010. Niissä rikin määrää polttoaineessa on rajoitettu yhteen prosenttiin. Typen päästöille on tulossa rajoituksia vuonna 2011, jolloin päästöjä rajoitetaan Tier II:n mukaan. EU yrittää vähentää oksidipäästöjä rajoittamalla satamassa käytettävän polttoaineen rikki- ja otsonipitoisuutta.

Päästöistä aiheutuu haittaa niin ympäristölle kuin ihmisen terveydelle. Oksidipäästöjen ympäristövaikutuksia ovat rehevöityminen, happamoituminen ja alailmakehän otsoni. Terveydellisiä haittoja ovat yskä, pinnallinen hengitys, liman erityys yms. Herkimpiä vaikutuksille ovat astmaatikot, lapset ja vanhukset. Alailmakehän otsonin typen oksidit aiheuttavat arviolta n. 20 000 ihmisen ennenaikaisen kuoleman EU:n alueella vuosittain.

Itämerellä liikennöi eniten yleisrahtilaivoja, n. 34 %. Vertailtaessa alusmääriä ja typen päästöjä keskenään eniten päästöjä aiheutuu ro-ro-tyyppisten alusten liikenteestä. Määrällisesti saastuttavin alustyyppi on matkustajalautta. Matkustajalautan suhteellisen runsas päästömäärä selittyy runsailla satamakäynneillä sekä sillä, että aluksiin on sijoitettu suhteellisen isot koneet niiden kokoon nähden.

Liikennemuotoja vertailtaessa keskenään kaksi kertaa pidemmällä matkalla rekan päästöt olivat reilusti pienemmät. Ero oli merkittävä rikin oksidipäästöjä vertailtaessa, jolloin ero oli melkein viisisatakertainen. Typen päästöissä puoliperävaunuyhdistelmä oli myös saastuttava liikennemuoto, mutta päihitti laivan. Laivan ainoa etu oli polttoaineen kulutuksessa. Korkearikki- ja otsonipitoista polttoainetta kului vähemmän kuin puoliperävaunuyhdistelmällä.

## ABSTRACT

KYMENLAAKSON AMMATTIKORKEAKOULU

University of Applied Sciences

Maritime Technology

LUKIN, TAAVI

Nitrogen and sulfur oxide emissions in Baltic Sea region by shipping, impacts on environment and to human health

Bachelor's Thesis

57 pages + 3 pages of appendices

Supervisor

Jorma Rytönen, Research Director

Commissioned by

Jorma Kämäräinen, Senior Maritime Inspector, TraFi

Anita Mäkinen, Docent, TraFi

October 2010

Keywords

Sulfur oxide, nitrogen oxide, Baltic Sea, environment, human health, emissions

International shipping is responsible for approximately 30% of sulfur and nitrogen oxide deposition in Europe. Vessel traffic growth is about 5% per year. In the Baltic Sea area there is about 2000 sailing vessels every given moment. Number of sailing vessels in area is around 4000-5800 each month, depending on the season. NO<sub>x</sub> emissions in the area are more than 390 kton, and SO<sub>x</sub> emissions 135 kton per year. In the Baltic Sea region new regulations have entered into force since 1.7.2010 in which the amount of sulfur in the fuel is limited to one per cent. In year 2011 limitation to nitrogen emissions sets in to force. NO<sub>x</sub> emissions are restricted to Tier II.

Emissions are harmful to environment and also to human health. Effects of NO<sub>x</sub> and SO<sub>x</sub> oxides to environment are eutrophication, acidification and ground-level ozone. Health problems are cough, shallow breathing, mucus secretion etc. More sensitive to the effects are children, the elderly and people with asthma. Ground-level ozone with nitrogen related cases in the European Union, caused by a rough estimation, about 20,000, premature death yearly.

In Baltic Sea region, most vessels are general cargo ships. Ro-Ro-vessels deposition in the area is biggest when amount of vessels and deposition are compared. Passenger vessels deposition is largest overall. Passenger vessels large deposition is attributable to highly frequent harbor visits and to large engine size.

When comparing tow transport, vessel and semitrailer, result is in to favor of truck. The difference was significant especially to emissions of sulfur oxides. Difference was almost five hundred times. Semitrailer truck was polluting form of transport but outlasted the ship. Ship's only advantage was lower fuel consumption.

## ALKUSANAT

Tämä opinnäytetyö on tehty Kymenlaakson ammattikorkeakoulun merenkulun koulutusohjelman päättötyönä. Opinnäytetyön toimeksiantajana on toiminut Liikenteen turvallisuusvirasto TraFi. Työn työstäminen aloitettiin toukokuussa 2010. Työn ohjaajana toimi tutkimusjohtaja Jorma Rytönen Kymenlaakson ammattikorkeakoulusta. Asiantuntijoina toimivat Jorma Kämäräinen ja Anita Mäkinen TraFi:sta.

Kiitokset työn ohjaajalle Jorma Rytöselle, jolta sain apua ja tukea sekä työn aiheen että asiantuntijoiden löytämisessä. Kiitos hyvistä neuvoista ja kärsivällisestä ohjaamisesta opinnäytetyön prosessin aikana.

Haluan osoittaa kiitokseni Jorma Kämäräiselle TraFi:sta jolta olen saanut tutkittavaa materiaalia ja aiheeseen liittyvää asiantuntijatieta. Kiitokset Anita Mäkiselle TraFi:sta joka on ollut asiantuntijana ja neuvojana tämän työn edistymisessä.

Helsingissä 24.11.2010

Taavi Lukin

## Sisältö

ALKUSANAT	4
MERKIT, LYHENTEET JA TERMIT	6
1 JOHDANTO	9
2 TYPPI JA RIKKI	11
2.1 Typen oksidit	12
2.2 Rikin oksidit	14
2.3 Typen ja rikin oksidipäästöjen vaikutukset	16
2.3.1 Rikin oksidipäästöjen ympäristövaikutukset	17
2.3.2 Typen oksidien ympäristövaikutukset	18
2.3.3 Rikin oksidien terveysvaikutukset	24
2.3.4 Typen oksidien terveysvaikutukset	24
2.3.5 Alailmakehän otsoni	26
2.3.6 Hapossateiden vaikutus ihmisen terveydelle	29
3 ILMANSUOJELU: ORGANISAATIOT JA SÄÄDÖKSET	30
3.1 Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO	30
3.2 MARPOL 73/78 -yleissopimuksen historia	30
3.3 MARPOL 73/78 Ilmansuojeluliite, Annex VI	31
3.3.1 Ilmansuojeluliitteen uudistus	32
3.4 EU-säädökset	34
3.5 Itämeren suojelusopimus	34
4 ITÄMEREN LAIVALIIKENTEEEN PÄÄSTÖT	36
4.1 Itämerellä liikennöivät alustyypit	37
4.2 Laivaliikenne Itämerellä	39
5 LIIKENNEMUOTOJEN VERTAILU	45
5.1 Esimerkki 1	46
5.2 Esimerkki 2	48
6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET	51
LÄHTEET	53
LIITTEET	58
LIITE 1	58
LIITE 2	59
LIITE 3	60

## MERKIT, LYHENTEET JA TERMIT

AIS	alusten automaattinen tunnistusjärjestelmä (Automatic Identification System)
CFC - yhdisteet	kloorifluorihiihivedyt (Chlorine-Fluorine-Carbon)
CH <sub>4</sub>	metaani
EPA	Yhdysvaltojen ympäristönsuojelujärjestö (U.S Environmental Protection Agency)
FEV1	ulospuhalluksen sekuntikapasiteetti eli ilmamäärä jonka henkilö pystyy puhaltamaan sekunnissa ulos (Forced expiratory volume in one second)
GRT	bruttovetoisuus (Gross Registered Tonnage)
H <sub>2</sub> O	vesi
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	vetyperoksidi
HNO <sub>2</sub>	typpihapoke
HNO <sub>3</sub>	typpihappo
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	rikkihappo
Helcom	Itämeren suojelusopimus
IMO	Kansainvälinen merenkulkujärjestö (International Maritime Organization)
J	joule, SI-järjestelmän työn ja energian yksikkö

MARPOL 73/78	yleissopimus merellisen ympäristön suojelemiseksi (International Convention for the Prevention of Marine Pollution from Ships)
MEPC	meriympäristön suojelua käsittelevä komitea (Marine Environment Protection Committee)
MMSI	laivakohtainen radiotunnistenumero (Maritime Mobile Service Identity)
NH <sub>4</sub>	ammoniumioni
nm	merimaili (1852 m)
NO <sub>x</sub>	typen oksidit
NO	typpioksidi
NO <sub>2</sub>	typpidioksidi
NECA	typpipäästöjen kontrollialue (NO <sub>x</sub> Emission Control Area)
O <sub>2</sub>	happi
O <sub>3</sub>	otsoni
OH	hydroksyyli-radikaali
PAN	peroksisetyylinitraattia
PJ	petajoule (10 <sup>15</sup> Joule)
PM	pienihiukkanen (Particulate Matter)
ppm	miljoonasosa (Parts Per Million)

rpm	pyörimisnopeus, kierrosta minuutissa
SECA	rikkipäästöjen kontrollialue (SO <sub>x</sub> Emission Control Area)
SO <sub>x</sub>	rikin oksidit
SO <sub>2</sub>	rikkidioksidi
SO <sub>3</sub>	rikkitrioksidi
sRaw	ilman vastusta keuhkoissa mittaava yksikkö (Specific Airway Resistance)
TraFi	Liikenteen turvallisuusvirasto
VTT	Valtion teknillinen tutkimuslaitos
VOC	haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compound)
WHO	Maaailman terveysjärjestö (World Health Organization)
µg	mikrogramma (10 <sup>-6</sup> g)



## 1 JOHDANTO

Opinnäytetyön aiheeksi on valittu alusliikenteen aiheuttamat rikin ja typen oksidipäästöt Itämerellä ja vaikutukset ympäristölle sekä ihmisen terveydelle. Valitsin aiheeni yhdessä ohjaavan opettajan Jorma Rytkösen kanssa sen ajankohtaisuuden ja mielenkiintoisuuden takia. Työn aineiston keruun aloitin keväällä 2010.

Opinnäytetyön tarkoituksena on ollut kerätä yhteen eri lähteiden ja tietokantojen informaatio rikin ja typen oksidipäästöistä Itämeren alueella. Tarkoituksena on ollut selvittää alusliikenteen päästöjen osuutta Itämeren alueella sekä kertoa lukijalle päästöjen vaikutuksista ympäristölle ja ihmisen terveydelle.

Työssä esitellään rikin ja typen oksideja yleisesti. Yksityiskohtaisemmin käsitellään laivaliikenteen kaasupäästöjen yhteydessä eniten muodostuvia SO<sub>x</sub>-ja NO<sub>x</sub>-kaasuja: rikkidioksidi, rikkitrioksidi, typenoksidi ja typendioksidi.

Itämeren alueella laivaliikenne on tutkitusti runsasta ja tietyissä kohdissa myös hyvin tiheää. Erityisesti satama-alueilla ja kapeikoissa, joissa aluksen ohjailuun tarvitaan enemmän tehoa, rikin ja typen oksidipäästöjä syntyy runsaammin. Jokainen alus on erilainen ja käyttäytyy eri tavalla. Laivaliikenteessä ei ole kahta täysin samanlaista alusta, kuten muissa liikennemuodoissa, ja tämä tekee päästöjen laskennasta, arvioinnista ja vertailusta hankalamman. Työssä käytetään tilastoituja päästömääriä, jotka on saatu Itämeren suojelukomission Helcomin (The Helsinki Commission) tilastoista AIS-järjestelmällä kerättyjen tietojen perusteella. Onkin todennäköistä, että todelliset päästömäärät ovat korkeammat kuin työssä tuodaan esille.

Laivojen päästöt eivät rajoitu pelkästään alueelle, jossa pakokaasupäästöt tapahtuvat, vaan kulkeutuvat ilmapirtausten mukana laajalle alueelle. Alusliikenteen määrän kasvaessa jatkuvasti ovat myös päästöjen määrät olleet kasvussa. Työssä pohditaan uusien päästörajoitusten merkitystä Itämeren laivaliikenteen edelleen kasvaessa. On mahdollista, että laivaliikenteen päästömäärät ylittävät muun liikenteen päästömäärät jossain vaiheessa ja niistä koituu enemmän haittaa ympäristölle ja ihmiselle. Työssä tarkastellaankin rikin ja typen oksidien vaikutuksia ympäristön ja ihmisen kannalta.

Merialueen suojeleminen on ollut Itämeren rantavaltioille tärkeää jo vuosia. Työssä tuodaan esille merialuetta koskevat suojelusopimukset ja kerrotaan vähän näiden historiasta. Työssä käydään läpi rikin ja typen oksideille voimassa olevat päästörajoitukset ja kerrotaan myös tulevista rajoituksista.

Lopuksi vertaillaan laivaliikennettä ja maantieliikennettä keskenään. Kohteeksi on otettu matka, jonka pystyy kulkemaan sekä laivalla että autolla, ja vertaillaan rikin ja typen oksidipäästöjä liikennemuotojen välillä. Vertailuun on otettu kaksi erilaista laivatyyppiä sekä puoliperävaunuyhdistelmä. Tarkoituksena selvittää minkälaiset erot vallitsevat liikennemuotojen pakokaasupäästöjen välillä, kun kyseessä on rikin ja typen oksidipäästöt.

## 2 TYPPI JA RIKKI

Euroopassa alusliikenne aiheuttaa merkittävän osan ihmisperäisistä päästöistä ilmaan. Vuonna 2000 Euroopan rikin ja typen oksidipäästöistä alusliikenteen osuus oli 30 % maalla tapahtuvaan päästömäärään verrattuna (1: 5). Itämeren alueelle tulevasta typestä ilmakehän kokonaistyyppilaskeuman osuus oli n. 20 – 30 % (2: 4). Rikin oksidipäästöt eivät Itämeren alusliikenteessä ole yhtä korkeat kuin typen, mutta kuormitus Itämerelle ja sen ranta-alueille on silti suuri (Kuva 9). Alusliikenteelle tulee jatkuvasti tiukempia päästörajoituksia (3), mutta liikenteen kasvaessa näyttää kuitenkin siltä, että uusilla rajoituksilla ainoastaan kompensoidaan kasvavan alusliikenteen kokonaispäästöjä. Jos alusliikenteen kasvu jatkuu yhtä kiivaasti kuin tähän asti, on odotettavissa kokonaispäästöjen lisääntymistä. Jos tämä jatkuu, tämänhetkisiä tietoja ja laskentamalleja hyväksi käyttäen, alusliikenteen kokonaispäästöt saavuttavat maalla tapahtuvat päästöt ja jopa ylittävät nämä (1: 5).

Tämä ennakoitu päästöjen kasvu tulee vaikuttamaan kustannuksiin kontrolloida päästöjen suuruutta Itämeren alueella. Vaikka tällä hetkellä alukset ovat vastuussa 10 - 20 prosentin rikin oksidipäästöistä, on tämän arvon oletettu nousevan seuraavien kymmenen vuoden aikana kolmeenkymmeneen prosenttiin ja rannikoilla jopa viiteenkymmeneen, kerrotaan IISA:n raportissa (1).

Alusliikenteen päästöjen kontrolloimiseksi on olemassa teknologioita, jotka mahdollistavat päästöjen vähentämisen vielä pienemmälle tasolle, kuin tämän hetkinen lainsäädäntö vaatii. Tutkimukset ovat osoittaneet, että jos näitä teknologioita käytettäisiin täysin hyödyksi, pystyttäisiin kymmenessä vuodessa vähentämään rikin oksidipäästöjä 80 %:lla ja typen oksidipäästöjä jopa 90 %:lla. Kustannuksien on arvioitu olevan n. 5,5 miljardia euroa vuodessa (1: 5, 71).

Kansainväliseltä merenkululaitokselta IMO:lta on tulossa uusia määräyksiä, jotka koskevat MARPOL -73/78 yleissopimuksen ilmansuojeluliitettä, Annex VI. Uusista määräyksistä ensimmäiset ovat astuneet voimaan 1.7.2010. Ilmansuojelussa on otettu tehtäväksi vähentää merkittävästi rikin oksidipäästöjä. Myös typen oksidipäästöihin on tulossa vähennyksiä vuonna 2011. IMO:n määräämillä erityisalueilla, kuten typpi-päästöjen kontrollialueella (NECA) ja rikki-päästöjen kontrollialueella (SECA), pääs-

tömääräykset ovat tiukemmat. Itämeri kuuluu SECA-alueeseen 19.5.2005 alkaen, siirtymäajaksi annettiin 12 kuukautta, eli varsinaiset rajoitukset astuivat voimaan 19.5.2006 alkaen. (3.) Tarkemmin päästömääräyksiä käsitellään luvussa 3.

Uusien määräyksien mukaan rikin pitoisuutta alusten käyttämässä raskaassa polttoaineessa on määrä vähentää 1.1.2012. Tämän jälkeen on otettu tavoitteeksi vähentää rikin pitoisuutta progressiivisesti 0,5%:iin vuoteen 2020 mennessä. IMO:n SECA-alueilla uudet rikin pitoisuusrajoitukset astuivat voimaan 1.7.2010. SECA-alueilla on tavoitteena päästä 0,1%:iin vuoteen 2015 mennessä. (4.) Yle uutisoi 15.9.2010, että Suomi pyrkii lykkäämään päätöstä laivojen rikkipäästöjen vähentämisen osalta. Ylen mukaan siirtyminen vähärikkisiin polttoaineisiin vaikuttaisi Suomen merirahdikustannuksiin peräti jopa kolmellakymmenellä prosentilla, ja näin ollen rahtihinnat eivät pysyisi kilpailevalla tasolla (5).

## 2.1 Typen oksidit

Typpi on inertti kaasu jota on troposfäärissä, maanpinnan läheisyydessä olevassa ilmassa n. 78 %. (6: 107) Typen ja hapen yhdisteitä kutsutaan typen oksideiksi. Tyypellä on seitsemän erilaista oksidia: typpioksiduuli eli dityppioksididi ( $N_2O^+$ ), ilokaasu; typpioksididi ( $NO^+$ ), typpimonoksididi, typpi(II) oksididi (väritön kaasu); dityppitrioksididi ( $N_2O_3^+$ ), typpi(III) oksididi; typpidioksididi ( $NO_2^+$ ) (ruskea kaasu), typpi(IV) oksididi; dityppitetraoksididi ( $N_2O_4^+$ ); dityppipentoksididi ( $N_2O_5^+$ ) ja nitraatti ( $NO_3^-$  eli nitraatti-ioni) (7: 235.).

Tässä työssä puhutaan  $NO_x$ -kaasuista, jolloin tarkoitetaan typpioksididia ( $NO^+$ ) ja typpidioksididia ( $NO_2^+$ ). Ihmisperäisistä typen oksidipäästöistä suurin osa muodostuu liikenteen päästöistä, kivihiilen poltosta ja teollisuuden kaasupäästöistä korkeissa lämpötiloissa (500 – 1000 °C). Palamisprosessi tuottaa n. 95 %  $NO$ :a ja pienen määrän  $NO_2^+$ :a. Muodostunut typpioksididia,  $NO^+$  voi ilman hapen vaikutuksesta muuttua edelleen typpidioksidiksi ( $NO_2^+$ ). Typpioksididin ( $NO^+$ ) muodostuminen suhteessa typpidioksidisiin ( $NO_2^+$ ) lisääntyy lämpötilan noustessa. Kun taas lämpötila laskee, typpidioksididin ( $NO_2^+$ ) osuus kasvaa. (8: 3-2.)

Kun typen oksideja pääsee alailmakehään, ne joutuvat hapetus-pelkistysreaktioihin, jolloin ilmanlaatu heikkenee. Alailmakehän ilmanlaatua heikentää myös otsonin muodostuminen, mitä typen oksidit edesauttavat. Suurin osa troposfäärin otsonista syntyy, kun typen oksidit ( $\text{NO}_x$ ), häkä eli hiilimonoksidi (CO), metaani ( $\text{CH}_4$ ) ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) reagoivat auringon säteilyn vaikutuksesta. Pakokaasupäästöt ja teollisuuden päästöt ovat näiden suurimmat ihmisperäiset lähteet. Aiheesta kerrotaan tarkemmin luvussa 2.3.5 Alailmakehän otsoni. (9.)(10.)

#### Typpioksidi, typpimonoksidi ( $\text{NO}$ )

Typpioksidi eli typpimonoksidi on yksi tärkeimmistä typen oksidipäästöjen kaasuista. Laivaliikenteessä typpioksidia muodostuu runsaasti polttoaineiden palamisprosessissa. Typpioksidi toimii esiasteena monelle reaktiolle yläilmakehässä. Yhdiste reagoi kii-vaasti mm. yläilmakehän otsonin kanssa muodostaen typpidioksidia ( $\text{NO}_2$ ). Veden kanssa tekemisiin jouduttaessa typpioksidi muodostaa typpihapoketta, ( $4\text{HNO}_2$ ) (11). Typpioksidi on mukana myös rehevöitymisprosessissa, jossa typpilaskeuman mukana ekosysteemiin kulkeutuu liiallinen määrä typpeä. NO hapettuu nopeasti ilmakehässä ja osallistuu muiden kaasujen kanssa otsonia ja aerosolihiukkasia muodostaviin reaktioihin (10).

Typpioksidi on muutakin kuin pelkkä haitallinen päästö, esimerkiksi ihmisen elimistölle se on välttämätön. Typpimonoksidin tärkeimpiä tehtäviä ihmisen elimistössä on verisuonien laajeneminen, auttaa se pienentämään verenpainetta, ruoansulatuksessa se välittää relaksaatiota. (12.)

#### Typpidioksidi ( $\text{NO}_2$ )

Typpidioksidi eli typpiperoksidi on merkittävä ilmansaaste. Typpidioksidia muodostuu laivaliikenteen päästöistä suhteellisen vähän. Lämpötilan laskiessa  $\text{NO}_2$ :a muodostuu typpioksidista. Sitä muodostuu tyypillisesti hapettumisesta typpioksidin hapen kanssa ilmassa (13: 144–145).

Typpidioksidi on syövyttävä aine, ja sille voi altistua hengitysteitse tai ihon kautta. Hengitysteitse altistuminen on ihmiselle vaarallisempaa, ja pitkäaikainen tai runsas al-

tistuminen voikin aiheuttaa keuhkosityöpää. Merkittävämät typpidioksidin lähteet ovat teollisuuspäästöt, energiantuotanto sekä liikenne. Typpidioksidin ( $\text{NO}_2^-$ ) kaasupäästöt ilmaan aiheuttavat kuormitusta ekosysteemille happosateiden ja rehevöitymisen myötä. Typpidioksidi on mukana myös otsonin muodostumisessa. (14.)

## 2.2 Rikin oksidit

Kun rikki on sitoutunut happeen, kutsutaan tätä kemiallista yhdistettä rikin oksidiksi. Rikillä on kahdeksan oksidia. Merkittäviä oksideja työni kannalta ovat rikkidioksidi ( $\text{SO}_2^-$ ) ja rikkitrioksidi ( $\text{SO}_3^-$ ). Muilla rikin yhdisteillä ei ole niin suurta merkitystä, kun puhutaan rikin oksidipäästäistä ilmaan alusliikenteen yhteydessä. Työssäni puhun  $\text{SO}_x$  -kaasuista, joilla tarkoitan rikkidioksidia ( $\text{SO}_2^-$ ) ja rikkitrioksidia ( $\text{SO}_3^-$ ).

Rikin oksideja muodostuu mm. fossiilisten polttoaineiden käytössä ja teollisissa prosesseissa, n. 70 – 80 % rikin koko päästömäärästä. Luonnossa rikkioksideja muodostuu esim. tulivuorenpurkauksissa. Mitä korkeampirikkisiä polttoaineita käytetään, sitä enemmän rikin oksideja muodostuu. Polttoaineen sisältämästä rikistä lähes 100 % muuttuu rikin oksideiksi. Tämä johtuu palamisreaktion kinetiikasta, jossa oksidit ovat rikille termodynaamisesti edullisin muoto (15). Korkearikkipitoisia polttoaineita käytetään teollisuudessa lämpövoimaloissa. Tällaisia polttoaineita ovat hiili ja öljy. Kauppa-alusliikenteessä raskas polttoöljy on merkittävä rikin oksidien lähde. Alusliikenteen polttoaineen rikkipitoisuus saa Itämerellä olla enintään 1 % 1.7.2010 alkaen tai vastaavasti on käytettävä rikkipesuria, jolla päästään vastaavanlaiseen lukuarvoon (4). Maissa käytettävissä polttoaineissa, joissa on siirrytty vuonna 2008 ns. rikittömiin polttoaineisiin, rikkipitoisuus saa olla enintään 10 mg/kg (0,01 %). Neste Oilin mukaan rikkipitoisuuden vähentäminen polttoaineessa vähentää rikkipäästöjen lisäksi myös hiilimonoksidi- ja hiilivetypäästöjen sekä typen oksidien päästöjä. Samankaltaisiin päästövähennyksiin tähdätään myös alusliikenteessä, kun rajoituksia tiukennetaan. (16.)

### Rikkidioksidi ( $\text{SO}_2^-$ )

Rikkidioksidi ( $\text{SO}_2^-$ ) on olomuodoltaan väritön, pistävänhajuinen, ärsyttävä ja syövyttävä kaasu (17). Ihminen pystyy havaitsemaan rikkidioksidin hajun perusteella konsentraation ollessa 1-3 ppm. (18) Luonnossa rikkidioksidia ( $\text{SO}_2^-$ ) muodostuu vulkaanisissa toiminnoissa, korkeissa lämpötiloissa, joissa rikki oksidoituu. Ihminen tuottaa rikkidioksidia teollisissa prosesseissa, kivihiilen poltossa, poistaessa metallia malmista sekä liikenteen pakokaasupäästöissä. (17)

Rikkidioksidi on reaktiivinen erityisesti silloin, kun se joutuu reaktioon veden kanssa, jolloin muodostuu rikkihapoketta. Rikkihapoke voi taas hapettua herkästi muodostaen rikkihappoa. Tämä reaktio on happosateiden ja maaperän happamoitumisen pääasiallinen aiheuttaja (11). Rikkidioksidi onkin yksi ongelmallisimmista ilmansaastuttajista. Rikkidioksidin puhdistusmenetelmät pakokaasupäästöissä ovat kehittyneet vuosikymmenten aikana, ja nykyisin suurin osa rikistä pystytään poistamaan. Ongelmaksi on muodostunut laivaliikenne, jossa edelleen käytetään korkearikkipitoisia raskaita polttoaineita. Laivaliikenteen rikkipäästöt ovatkin verrattaessa muihin liikennemuotoihin paljon korkeampia. Yksinkertaisilla menetelmillä pystyttäisiin laivaliikenteessäkin vähentämään näitä päästöjä. (1.) Itämerellä onkin otettu ensiaskel päästöjä vähentämistavoitteessa. Alueella on voimassa rikkipitoisuuden uudet päästörajoitukset, jotka astuivat voimaan 1.7.2010. Näitäkin päästörajoja olisi tarkoitus tiukentaa edelleen vuonna 2015. (3) Laivaliikenne pysyy ainakin toistaiseksi kuitenkin merkittävänä rikin oksidipäästöjen aiheuttajana uusista määräyksistä huolimatta.

### Rikkitrioksidi ( $\text{SO}_3^-$ )

Rikkitrioksidi ( $\text{SO}_3^-$ ) on rikkidioksidin ohella tärkeimpiä rikin oksideista. Polttoprosessissa syntyneestä rikkidioksidista ( $\text{SO}_2^-$ ) osa reagoi edelleen muodostaen rikkitrioksidia ( $\text{SO}_3^-$ ). Reaktio tapahtuu korkeissa lämpötiloissa ( $> 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ) happiatomien kanssa. Katalyyttisesti rikkitrioksidia syntyy matalissa lämpötiloissa ( $500 \text{ }^\circ\text{C} \dots 800 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Alusten käyttämä raskas polttoöljy sisältää vanadiinia, joka vauhdittaa  $\text{SO}_2^-$ :n hapettumista  $\text{SO}_3^-$ :ksi. Matalissa lämpötiloissa rikkitrioksidi on erittäin reaktiivinen kaasu ja se reagoi kiivaasti veden kanssa muodostaen rikkihappoa (19: 6-7.).

Olomuodoltaan rikkiatrioksidei on väritön neste, kiinteässä olomuodossa se on valkoisina kiteinä, kaasuna väritön. Rikkiatrioksidin ollessa kaasumaisessa olomuodossa se on ilmaa raskaampaa. Teollisuudessa rikkiatrioksidia käytetään lähinnä rikkihapon valmistamiseen. Rikkiatrioksidei on haitallinen saaste, joka aiheuttaa mm. happamia sateita. (20.)

### 2.3 Typen ja rikin oksidipäästöjen vaikutukset

Kaasumaisten ja hiukkasmaisten aineiden kulkeutumiselle ilma on tehokas tie. Ilman kautta kaasumaiset ja hiukkasmaiset aineet voivat levitä jopa toiselle puolelle maapalloa olosuhteiden ollessa suotuisat. Ilmaan päästetyt pakokaasut eivät näin ollen rajoitu paikalliseen ympäristöön, vaan päästöt kuormittavat yleensä isoja alueita. Ilmaa kuormittavat mm. kasvihuonekaasut, yläilmakehän otsonin hajottajat, happamoittavat yhdisteet, rehevöittävät yhdisteet, raskasmetallit, pienhiukkaset (PM), orgaaniset yhdisteet (VOC) ja radioaktiiviset aineet. Ilmakehässä lähinnä kasvihuonekaasut ja otsonikerrosta tuhoavat aineet vaikuttavat suoraan. Muut haitalliset yhdisteet aiheuttavat ympäristöongelmia maanpinnalla ja vesistöissä. Päästöt voivat ilmetä kuiva- tai märkälasseumana. Märkälasseumiin lasketaan vesisade, lumisade, räntäsade, rakeet, pilvet ja sumu. Kuivalasseumia ovat kaasu- ja pölylasseumat. (21: 3-13)



*Kuva 1 Laivan pakokaasu on mustaa moottorin käynnistyksessä ja nokituksessa(22)*

Haitallisten aineiden vaikutukset voivat olla paikallisia, alueellisia tai jopa maailmanlaajuisia. Maailmanlaajuisiin vaikutuksiin lasketaan kasvihuoneilmiö ja yläilmakehän



otsonikato. Maaperän ja vesistöjen happamoituminen sekä alailmakehän kohonneet otsonipitoisuudet lasketaan alueellisiin vaikutuksiin. Paikallisia vaikutuksia ovat haitat ihmisen terveydelle, vaikutukset lähiympäristölle sekä erilaiset viihtyvyys- ja materiaalihaitat. (23.)

Suomessa ilmaaasteiden paikalliset vaikutukset ovat vähäisiä, ja siitä johtuen ilmanlaatu on keskimäärin hyvä, Lukuun ottamatta talvisin ja keväisin kun pitoisuudet kaupungeissa voivat kohota Keski-Euroopan vastaavan kokoisten kaupunkien tasolle. (23.)

### 2.3.1 Rikin oksidipäästöjen ympäristövaikutukset

Kun puhutaan rikin oksidipäästöistä alusliikenteen päästöjen yhteydessä, tarkoitetaan sillä yleensä rikkidioksidi ( $\text{SO}_2^-$ )-päästöjä. Tämä johtuu siitä, että öljyn palamisprosessissa muodostuvasta rikin oksidipäästöstä suurin osa on rikkidioksidipäästöjä, n. 98 % (19: 4). Puhuttaessa rikin oksidipäästöjen terveysvaikutuksista puhutaan  $\text{SO}_2^-$  vaikutuksista, sillä rikkitrioksidi ( $\text{SO}_3^-$ )-päästöt tässä yhteydessä jäävät minimaalisiksi.

Rikin oksidipäästöt aiheuttavat haitallisia vaikutuksia metsille, viljelykasveille sekä vesistöjen eliöstölle. Ensisijainen vaikutus rikin oksidipäästöillä ympäristöön on happamoituminen. Rikin oksidipäästöt ovat typen oksidipäästöjen ja ammoniakki päästöjen ohella happamia sateita ja sitä seuraavaa vesistöjen ja maaperän happamuutta aiheuttavat päästöt. (24) Happosateet muodostuvat pääosin fossiilisten polttoaineiden käytöstä, esim. liikennöivät alukset. Rikin oksidien kulkeutuessa yläilmakehään vesipisarat absorboivat itseensä rikkioksideita ( $\text{SO}_2^-$ ). Veden happamuusaste (pH) alenee ja ilmakehässä olevasta vedestä tulee happo. Tämä laskeutuu sateen mukana maanpinnalle tai vesistöön aiheuttaen happamuutta. (11) Ympäristön happamoitumista käsitellään omassa kappaleessa 3.3.2.2 Happamoituminen ja happosateet.

Tutkimukset eri puolilla maapalloa ovat osoittaneet, että kun kasvillisuus altistuu korkeina pitoisuuksina rikin oksideille, voivat ne menettää tuottavuuden ja lopulta kuolla jos altistuminen pitoisuuksille on liian pitkäaikaista. Kasvillisuudessa on myös lajeja jotka ovat altistumiselle herkempiä kuin toiset. Tutkimukset ovat osoittaneet, että her-

kimmät lajit alkavat osoittaa näkyviä merkkejä vammoista pitoisuuksien ollessa n.  $1850 \mu\text{g}/\text{m}^3$  tunnissa,  $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$  8 tunnissa, ja  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  kasvukaudella. (25: 232.)

Vesistöissä herkempiä rikin oksidipäästöistä johtuvalle happamoitumiselle ovat kalkkikuoriset eliöt, kasvi- ja eläinplankton ja pieneliöt. Kun ympäristörasitteet kasvavat liian suuriksi, näitä eläinlajeja vähenee vesistössä. Erityisesti planktonin väheneminen vesistössä aiheuttaa muiden eläinlajien vähenemisen. Plankton toimii ravinteena monille kalalajeille, ja kun ravinto vähenee myös kalakannat vähenevät. (26.)

Kanadassa suoritetuissa tutkimuksissa mäntymetsän kasvun kroonisia vaikutuksia alkoi ilmetä merkittävästi kun rikin oksidipitoisuudet ilmassa olivat keskimäärin  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kymmenen vuoden mittausjakson aikana krooniset vaikutukset olivat vähäisiä kun vuotuinen rikin oksidin keskimääräinen pitoisuus jäi n.  $21 \mu\text{g}/\text{m}^3$ :aan tai alle. Rikin oksidipäästöjen vaikutus metsien ekosysteemille riippuu mm. maaperästä, kasvillisuudesta, atmosfäärisistä tekijöistä, hyönteispopulaatiosta. Siksi on vaikeata laskea lyhyellä aikavälillä tietyn alueen päästöjen haitallisten vaikutusten laajuutta. (25: 232.)

### 2.3.2 Typen oksidien ympäristövaikutukset

Laivaliikenne on suuri typen oksidien lähde Itämeren alueella. Typen oksidit voivat kulkeutua ilmassa mukana tuhansia kilometrejä koska oksidit saattavat viipyä ilmassa monia päiviä. Tästä syystä vaikutukset eivät rajoitu pelkästään päästölähteen lähetyville vaan, ilmavirtauksista riippuen, laajalla alueella.

Ilmakehässä typen oksidit kulkeutuvat ilmavirtausten mukana ja palaavat biosfääriin typpilaskeumana. Typpilaskeuma vesistöön kuormittaa ekosysteemiä aiheuttaen rehevöitymistä. Vaikutukset voivat olla paikallisia ja rajoittua tietylle alueelle tai ne voivat kulkeutua valuma-alueilla laajallekin alueelle kuormittaen ekosysteemiä laajassa mittakaavassa. Ilmatieteen laitoksen mukaan neljännes rehevöitymisestä aiheutuu juuri typpikuormasta ilman kautta kulkeutuneena. (24)

Typpioksidi voi palata maanpinnalle myös happosateen muodossa. Typen oksidin reagoimassa veden kanssa, esim. ilmankosteuden, saattaa syntyä typpihappoa. Happosateet vahingoittavat kasvillisuutta happamoittamalla maaperän kosteuden, jolloin

kasvien ravinnonotto kärsii. Vesistöjen happamoituminen taas tappaa vedessä eläviä eläinlajeja. (24.)

Typhen oksidien haittavaikutuksia kuten alailmakehän otsoni, happamoituminen, rehevöityminen, ja savusumu käsitellään tarkemmin luvuissa 2.3.2.1, 2.3.2.2 ja 2.3.5. (27:7)

### 2.3.2.1 Rehevöityminen

Rehevöitymisellä tarkoitetaan kasviraavinteiden joutumista liian suurina määrinä ekosysteemiin ja siitä johtuvia haitallisia vaikutuksia (Kuva 2). Näitä ravinteita leviää luontoon ilmasta tulevana laskeumana (typpi ja fosfori), maa- ja metsätaloudesta, teollisuudesta, haja-asutuksesta ja myös jätevesien mukana. (28.)

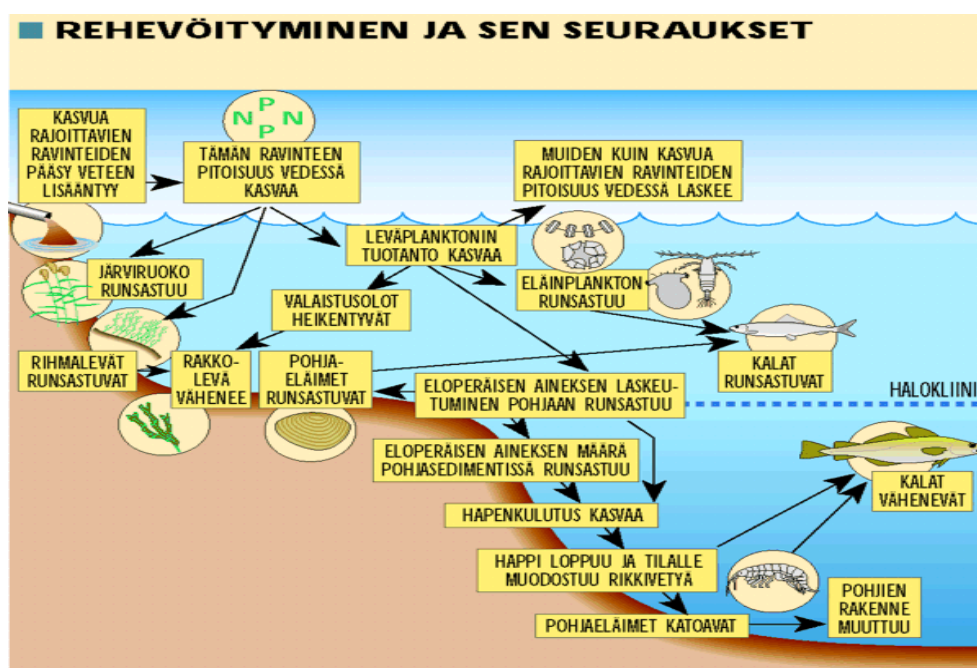
Rehevöitymistä tapahtuu sekä maalla että vesissä. Typpilaskeuma ja ilmakehän kohonnut hiilidioksidipitoisuus tehostavat maalla ekosysteemin rehevöitymistä, joka näkyy mm. metsien ja kasvien kasvun kiihtymisessä. Vesistöissä rehevöityminen näkyy planktonlevien kasvusta johtuvana veden samenessena, vesikasvillisuuden lisääntymisenä ja levien liiallisena kasvuna. Kasvit kykenevät hyödyntämään typen nitraatteja omien valkuaisaineiden muodostamiseen. Liiallinen tuotanto voi johtaa vesistöjen happikatoon ja edelleen kalastomuutoksiin. (28.)

Itämerellä ravinteiden kertyminen veteen ja sitä seuraava rehevöityminen on suuri pilaantumisongelma. Mereen maalta kulkeutuvat ravinteet lisäävät leväkukintoja, jotka levittäytyvät rantaveteen laajoina levämattoina. Seuraa veden pilaantuminen, samentuminen sekä hajuhaitta. Runsas ravinto vedessä tappaa eliöitä jotka eivät ole tottuneet rehevöityneeseen veteen. Hajottajabakteerit alkavat hajottaa lisääntyneiden ravinteiden ansiosta kuolleita eliöitä nopeammin johtaen kasvavaan hapen kulutukseen. Hapen vähentyessä elämä vedessä vähentyy merkittävästi. Itämeri on erittäin herkkä rehevöitymiselle johtuen laajasta valuma-alueesta, matalasta vedestä ja rajoittuneesta vedenvaihdosta. Rehevöitymisen myötä myös myrkkylevälajit lisääntyvät. Viime vuosina on erityisesti kesäisin havaittu varsin runsaasti sinileväkukintoja laajoilla alueilla. Sinilevä on nopeakasvuista ja sen myrky saattaa aiheuttaa tuhoja veden eliöille. Sini-

levän myrky aiheuttaa ihmisellä ihon ärtymistä ja oraalisesti nautittuna pahoinvointia. (29.)

Rehevöitymisen torjuminen ja hillintä on vaikeaa. Vesien rehevöityessä monet ei-toivotut elomuodot lisääntyvät, kuten tiivis rantakasvillisuus tai myrkylliset sinilevät. Vuosien kuluessa vesistöön ja maaperään on kertynyt ravinteita ja vaikka kuormitus loppuisi saattaa rehevöityminen jatkua varastoituneiden ravinteiden yhä liuetessa takaisin veteen kasvien käyttöön. Jossain määrin voidaan rehevöityneen vesistön palautumista nopeuttaa poistamalla siitä ravinteita kasvillisuuden, kalojen tai simpukoiden mukana. Simpukoista apu Itämeren puhdistukseen – artikkelissa (30) kerrotaan miten simpukoita viljelemällä voitaisiin vähentää Itämeren rehevöitymistä. Artikkelissa ilmoitetaan, että tämä saataisi olla jopa kustannustehokas tapa. Rehevöitymistä voidaan myös vähentää pohjalietettä peittämällä tai ruoppaamalla pois. (28.)

Rehevöitymisongelma on Itämeren maissa tunnustettu ja toimia ravinnekuormituksen vähentämiseksi on toteutettu. Itämeren suojelusopimuksessa (Helcom) on asettanut omat suositukset Itämeren rantavaltioille rehevöitymisen vähentämiseksi. WWF:n seurantaraportista käy ilmi, että valitettavasti Itämeren tilanne ei ole parantunut ja lisätoimia rehevöitymisen torjumiseksi tarvitaan edelleen. (31)

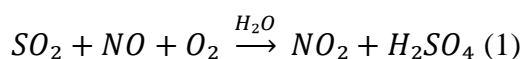


Kuva 2 Rehevöityminen ja sen seuraukset(32)

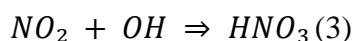
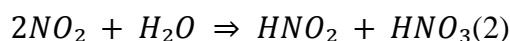
### 2.3.2.2 Happamoituminen, happosateet

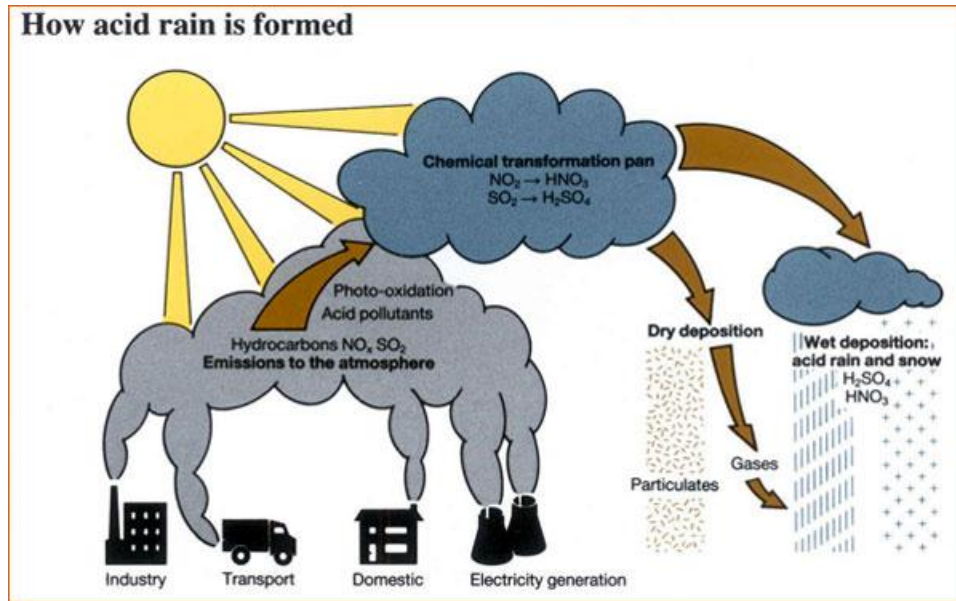
Kun vesistöjen kyky vastustaa eli neutraloida hapanta laskeumaa heikkenee, kutsutaan sitä happamoitumiseksi. (24) Happamoittavia yhdisteitä ovat typen oksidit ja rikkidioksidi sekä ammoniakki. (33) Yhdisteitä, jotka happamoittavat maanperää ja vesistöjä, laskeutuu maan pinnalle sateen mukana märkälasseumana tai hiukkasina (Kuva 3). Happamoittavat yhdisteet voivat laskeutua myös kaasuissa kuivalasseumana. Kun ekosysteemi altistuu happamille laskeumille liian pitkäksi aikaa tai laskeuma on liian suuri, voidaan neutraloimiskyky menettää kokonaan. (24)

Rikin oksidit eivät itse aiheuta sadeveden happamuutta. Rikin oksidipäästöt reagoivat ilmakehässä kemiallisesti jonka seurauksena syntyy happoja. Rikkidioksidista n. 50 % hapettuu hiukkasmaiseksi sulfaatiksi. Tämä reaktio saa ilmakehän veden happamoitumaan. Loput päästöistä laskeutuvat suoraan kuivalasseumana takaisin maaperään ja vesistöihin. Ilmakehään jäävä hapottunut vesi viipyy ilmakehässä tyypillisesti muutamia päiviä ja leviää laajalle alueelle (Kuva 4). Lopulta hapokas vesi huuhtoutuu maanpinnalle sateen mukana aiheuttaen ympäristön happamoitumista. Sadeveden mukana muodostuvaa rikkihappoa ( $H_2SO_4$ ) on kuvattu alla olevassa reaktioyhtälössä. (1) Rikkidioksidi ( $SO_2$ ) on ilmakehässä tapahtuvassa reaktiossa hapettajana. Rikkidioksidista ilmakehässä vain pieni osa hapettuu, loput palaa ilmakehästä maanpinnalle kuivalasseumana ennen alla kuvattavaa reaktiota. (11.)



Fossiilisten polttoaineiden käytössä vapautuvat typen oksidit voivat myös palata maanpinnalle happosateina. Typen oksidien happamoituminen perustuu siihen, että oksidit muuntautuvat ilmakehässä vähitellen typpihapoksi ( $HNO_3$ ) reagoidessaan ilmakehässä olevan kosteuden kanssa. Typpihappo on ilmakehän typpidioksidin hapettumistuote, happona se on vahva ja veteen runsasliukoinen. Happamoitumisreaktiossa tarvittava typpidioksidi ( $NO_2$ ) muodostuu ilmakehässä typpioksidin ( $NO$ ) hapettuessa. Pieni määrä typpidioksidia, n. 2-5 %, muodostuu suoraan polttoprosessin yhteydessä. Alla on kuvattu kaksi todennäköisintä reaktioyhtälöä. (11.)





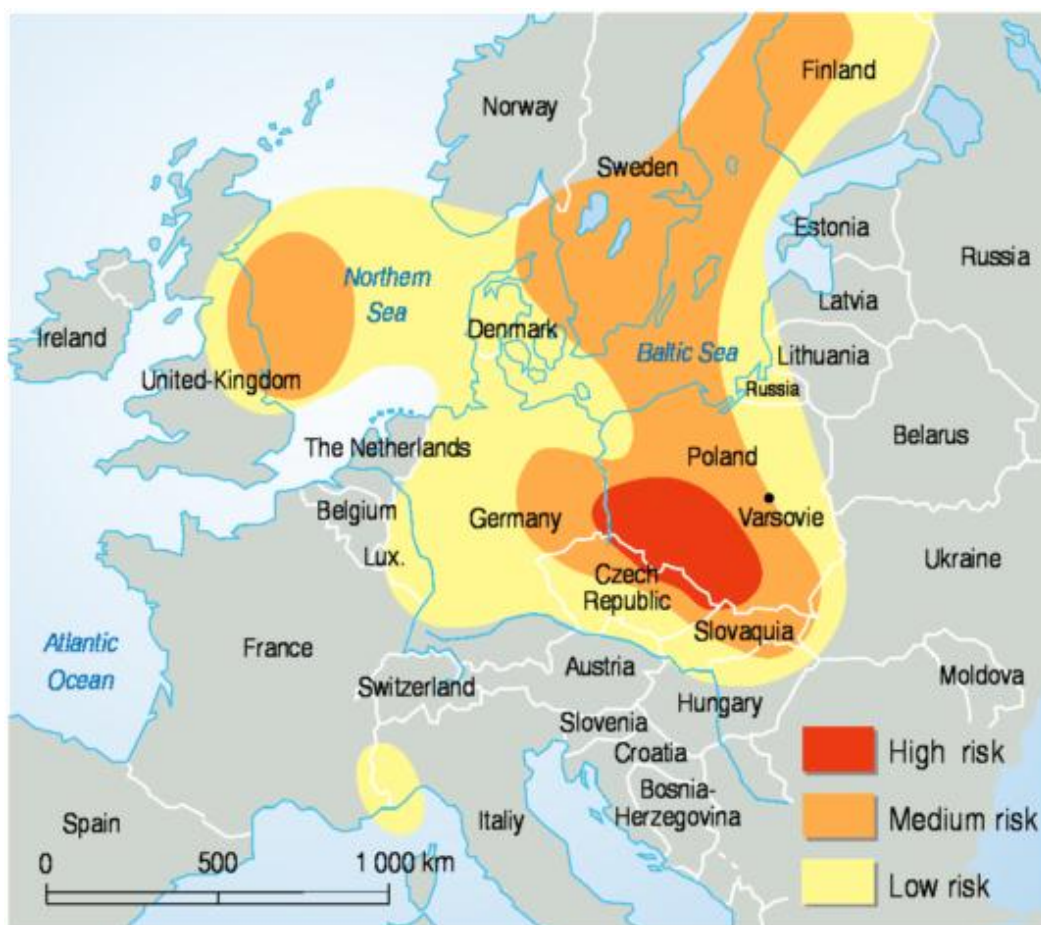
Kuva 3 Happosateiden kiertokulku(34)

Typen ja rikin oksidien lisäksi happamoittavia yhdisteitä ilmakehässä on ammoniakki (NH<sub>3</sub>). Ammoniakin liuetessa sadeveten muodostuu ammoniumioneja (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) jotka puolestaan voivat myöhemmässä vaiheessa hapettua nitraatti-ioneiksi (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) vapauttaen protoneja ja aiheuttaen happamoitumista. (11)

Ympäristölle happamoitumien on monella tavalla haitallista. Happamissa oloissa kasveille ja eliöille liukenee maaperästä myrkyllisiä alumiini- ja raskasmetalli-ioneja, kun samalla tärkeitä ravinteita huuhtoutuu pois. Happamoituminen voi aiheuttaa kasvi- ja eläinlajistossa mutaatioita. Itämeren alueella pohjoiset seudut ovat herkempiä happamoitumiselle, erityisesti tundrat, karut vesistöt ja metsämaat. Tämä johtuu siitä, että pohjoisten alueiden maaperässä ja kivilajeissa ei ole paljon kalkkia toisin kuin alueilla jossa on rehevä kasvillisuus. Kalkki on kasveille tärkeä, koska se parantaa puskurikykyä ja ehkäisee happamoitumista. Happamoitumisesta voi koitua haittaa myös puiden neulasille ja lehdille kun hapan laskeuma liottaa niistä tärkeitä aineita kuten magnesiumia ja kalsiumia. (24.)

Vesistöissä hapan laskeuma vaurioittaa kalakantoja. Herkemmät kalalajit happamoitumiselle ovat lohikalat ja särkikalat. Vesistöjen happamoituminen vaikuttaa myös vesistöjen muihin eliöihin kuten toukka- tai aikuisvaiheessa vedessä eläviin hyönteisiin aiheuttaen niiden häviämisen. Kun hyönteiset katoavat, niin sitä mukaa häviävät myös

niitä syövät lintulajit. Happamissa vesistöissä on yleensä enemmän raskasmetalleja ja happamoitumisen jatkuessa vesistön pH alenee vapauttaen pohjalle jo kertyneitä raskasmetalleja. (35.) Tämä on tyypillistä juuri matalille vesistöille. Itämeri kuuluu myös tähän kategoriaan, koska se on keskisyvyydeltään vain 54 m syvä. (36) Suomen ympäristökeskuksen ja YK:n Euroopan talouskomission (ECE) mukaan kriittisenä raja-arvona happamoitumiselle pidetään pH-lukua 5,5. (35) Tämän luvun alittuessa elämä vesistössä laskee huomattavasti.



*Kuva 4 Happamien sateiden vaikutusalueet Euroopassa ja Itämeren alueella(37)*

Happamien sateiden vaikutus näkyy muuallakin kuin luonnossa. Hapan sade on syövyttävä yhdiste, joka aiheuttaa vahinkoa myös metallille. Haposateet voivat vahingoittaa mm. silloille, rautateille ja jopa autoille. Koska happo reagoi hiiliyhdisteiden kanssa, sade vahingoittaa myös rakennuksia, jotka on tehty marmorista, sementistä tai kalkkikivistä. Patsaat, rakennukset ja tiet ovatkin osoittaneet merkkejä haposateiden vahinkojen vaikutuksesta. (38)

### 2.3.3 Rikin oksidien terveysvaikutukset

Ihmisen altistuessa  $SO_x^-$  kaasuille tyypillinen vaikutus näkyy ensisijaisesti hengitysteissä. Tämä johtuu siitä, että altistuminen tapahtuu hengitysteiden kautta. Hengittäessä  $SO_x^-$  kaasuja keuhkot ja keuhkoputket ovat ensisijaisesti vaarassa. Kaasu tunkeutuu hengityselimissä keuhkoputken ja keuhkojen reseptoreihin aiheuttaen refleksiä keskushermostossa. Altistuminen rikin oksideille aiheuttaa ensin ärtymystä, yskää jota seuraa nopea pinnallinen hengitys, liman eritystä, limakalvojen vesodilaatiota eli limakalvojen verisuonien laajentumista, tulehdusreaktiota ilman infektiotakin ja hermoston kautta välittyvä reflektorinen keuhkoputkien supistuminen. Altistumisen riskiryhmänä ovat lapset, vanhukset sekä astmaatikoita. Rikkidioksidi on hyvin vesiliukoista ja sisään hengittäessä suurin osa siitä jää ylähengitysteiden kosteisiin limakalvoihin. Pitoisuuksien ollessa korkeat osa rikkidioksidista pääsee keuhkorakkuloihin aiheuttaen kudosaivautta.  $SO_x^-$  altistuminen korostaa astmaatikolla yllä mainittuja oireita. Tulehduksessa tämä voi johtaa muutoksiin autonomisessa hermostossa, sekä myös mahdollistaa herkistymistä reseptoreissa. (39: 5-2.)

Laboratoriotutkimuksissa jossa on tutkittu ihmisten altistumista  $SO_x$ :lle, missä vaikutuksia seurattiin 5-10 minuutin altistusjakson aikana.  $SO_x$  pitoisuuksien ollessa 0.2 ppm tai alle, on havaittu astmaatikoilla altistumisen aiheuttavan vastaamaan kohtalaista tai raskasta fyysistä harjoitusta. Näissä tutkimuksissa 5-30 % tervettä kuntoilevaa astmaatikkoa osoitti kokevansa kohtalaista tai runsasta keuhkojen toiminnan heikkenemistä. Tutkimuksessa havaittiin yli 100 % nousu keuhkojen ilman vastuksessa (sRaw) ja vastaavasti 15 % lasku ulospuhalluksen sekuntikapasiteetissä (FEV1). Altistus oli hetkellistä ja pitoisuudet olivat 0.2-0.3 ppm:n välillä. Pitoisuuden ollessa 0.3-0.4 ppm:n välillä suurin osa astmaatikoista koki  $SO_x$ :n aiheuttavan keuhkojen vajaa toimintaa joka liittyi hengitysteiden oireisiin. Selkeimmät reaktiot laboratorio olosuhteissa hengitys vaikeuksiin saatiin kun pitoisuus oli 0.2-1.0 ppm:n välillä. (39: 5-3.)

### 2.3.4 Typen oksidien terveysvaikutukset

Typen oksidit ovat vaarallisia ihmisen terveydelle, jos altistuminen on runsasta. Typen oksideille altistuminen hengitysteitse, kuivalaskeumana, voi aiheuttaa mm. polttavaa tunnetta, kurkkukipua, yskää, huimausta, päänsärkyä, hikoilua, vaikeutunutta hengi-



tystä, pahoinvointia, oksentelua. Runsas määrä iholle tai silmään aiheuttaa punoitusta, kipua sekä iho- ja silmävaurioita (40.)(41.).

Ihmisen terveydelle haitallisia vaikutuksia aiheutuu typenoksideista muodostuva alailmakehän otsoni. Euroopan alueelta Itämeren valtioiden tiheimmin asutetuimmissa kaupungeissa otsonin pitoisuudet saattavat ylittää jopa 40 % EU:n asettamat standardi arvot. Altistuminen suurina pitoisuuksina alailmakehän otsonille sekä pienhiukkasille (PM<sub>2.5</sub>) aiheuttaa Euroopassa n. 370 000 ihmisen ennenaikaisen kuoleman vuosittain. Suurin osa, n. 350 000 tapauksista, aiheutuu pienhiukkasista ja n. 20000 aiheutuu alailmakehän otsonista. (29: 8.) Laivaliikenteen NO<sub>x</sub> päästöjen kasvaessa siitä on tulossa merkittävä ennen aikaisten kuolemien aiheuttaja Euroopan alueella. (42)

Maailman terveysjärjestö WHO arvioi vuonna 2003 typpidioksidin (NO<sub>2</sub><sup>-</sup>) vaikutusta ihmisen terveyteen. Tutkimuksessa olivat mukana myös otsonin ja pienhiukkasten (PM) terveydelliset vaikutukset. Typen oksideista tarkkailussa oli erityisesti typpidioksidi. WHO päättelikin tutkimuksien perusteella, että NO<sub>2</sub><sup>-</sup> altistuminen ei pitäisi näkyä pelkästään yhden aineen tuloksena vaan enemmänkin eri kaasujen yhdisteenä NO<sub>2</sub><sup>-</sup>:iin. Kaasujen muodostuminen käy ilmakehässä läpi kemiallisen muodonmuutoksen ja tuloksena syntyy myrkyllisiä yhdisteitä ihmisen terveydelle. NO<sub>2</sub><sup>-</sup> on myös esiasteena toissijaisille yhdisteille ilmakehässä, kuten typpihapolle, ja sillä onkin suuri vaikutus valokemian päivittäiselle kiertokululle. Tämä yhdiste edesauttaa otsonin muodostusta alailmakehässä ja johtaa myös muiden valokemiallisten oksidenttien muodostukseen. Toissijaiset ilmansaastuttajat voivat olla erittäin myrkyllisiä. NO<sub>x</sub> kaasujen päästömäärät ovat lisääntyneet runsaasti 2000-luvulla, johtuen osittain myös laivaliikenteen lisääntyvästä määrästä. Nykyisillä ja tulevilla päästömääräyksillä on kuitenkin yritetty rajoittaa typen oksidipäästöjä ja näin ollen myös edistää ihmisen hyvinvointia ja vähentää ympäristösaasteita. (43.)

Terveysvaikutukset voivat ilmetä eri tavalla riippuen altistuksen aikavälistä typen oksideille ja muiden vaarallisten kaasujen läsnäolosta yhtälössä. Yleisesti nykyiset NO<sub>x</sub> pitoisuudet Euroopassa eivät ylitä useimmiten vaarallisia rajoja liittyen lyhyeen altistukseen, jotta haitalliset vaikutukset olisivat konkreettisesti mitattavissa. Muutamista tutkimuksista lyhyen aikavälin altistumiseen NO<sub>x</sub> kaasuille on ilmennyt, että haitat ovat pääosin kohdistuneet ihmisille jotka sairastavat astmaa. (43)

Pitkän aikavälin altistumista on tutkittu lyhyttä altistumista enemmän ja tuloksia on saatu ympäri maapalloa. Pitkän aikavälin altistuminen voi heikentää keuhkojen toimintaa ja sitä erityisesti kasvuiässä olevilla lapsilla. Aikuisilla altistuminen voi johtaa keuhkojen heikentyvään hapenottokykyyn ja hengitysteiden sairauksiin. Vaikutukset ovat pahemmat, jos altistumisessa on mukana muitakin vaarallisia yhdisteitä. Monen vaarallisen yhdisteen vaikutuksia on tutkittu vähemmän koska, tutkimus on monimutkaisempi verrattuna yhden yhdisteen tutkimiseen. (43)

Eniten terveyshaittoja aiheuttava typen oksidi on typpidioksidi, joka tunkeutuu syvään hengitystiehen. Se lisää hengitysoireita erityisesti lapsilla ja astmaatikoilla ja korkeina pitoisuuksina se supistaa keuhkoputkia. Typpidioksidin haitallisuus perustuu sen kykyyn muodostaa veden kanssa typpihappoa. Näin ollen se aiheuttaa ärsytystä silmissä, keuhkoissa, limakalvoilla ja iholla. Typpidioksidi voi lisätä hengitysteiden herkkyyttä myös muille ärsykeille, kuten kylmälle ilmalle ja siitepölyille. (43)

Typen oksidien terveysvaikutukset:

- lyhytaikainen altistuminen yli 3 ppm heikentää keuhkojen toimintaa
- alle 3 ppm pitoisuus voi ärsyttää keuhkoja
- 0.1 ppm tai alle ärsyttää keuhkoja ja aiheuttaa keuhkojen vajatoimintaa erityisesti astmaatikoilla
- pitkäaikainen altistuminen voi tuhota keuhkokudosta johtaen emphyseemaan eli keuhkolaajentumaan

WHO on antanut omat suosituksensa koskien altistumista typpidioksidille. Altistuminen ei saisi ylittää 200  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  tunnin ajan ja 40  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  vuodessa. Yhden tunnin altistuminen ei saisi ylittyä vuodessa 18 kertaa. Nämä suositukset on otettu myös Euroopan unionin lainsäädäntöön, EU:n direktiivi 2008/50/EC. (44.)

### 2.3.5 Alailmakehän otsoni

Troposfäärin eli alailmakehän otsonia syntyy typen oksideista, häästä ja hiilivedyistä. Typen oksidit ovat keskeisessä asemassa otsonin muodostamisessa. Otsonia muodostuu valokemiallisessa reaktioketjussa. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) hapettu-

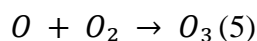
vat auringon valossa typpioksidin (NO) ja typpidioksidin (NO<sub>2</sub>) läsnä ollessa. Reaktiossa syntyy muitakin hapettimia ja toissijaisia ilmansaasteita kuten vetyperoksidia (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) ja peroksisetyylinitraattia (PAN). (10) Pakokaasupäästöt ja teollisuuden päästöt ovat näiden suurimmat ihmisperäiset lähteet. Ilmavirtausten takia päästöt eivät pelkästään rajoitu lähteen lähetyville vaan kulkeutuvat jopa satojen kilometrien päähän.

Alailmakehän otsonia muodostuu monimutkaisista kemiallisista reaktioista. Yksi otsonin muodostusta kuvaava reaktio on alla olevassa reaktioyhtälössä.

Typpidioksidi hajoaa auringon säteilyn vaikutuksesta ja syntyy vapaa happiatomi



Vapaa happiatomi reagoi happimolekyylin kanssa muodostaen otsonia



Alailmakehän otsonin haittavaikutukset perustuvat otsonin kykyyn reagoida eri aineiden kanssa. Elimistössä otsoni kykenee hapettamaan entsyymejä, proteiineja ja rasvahappoja. Otsoni tehostaa mm. karsinogeenien haittavaikutuksia ja voi aiheuttaa syöpää. Haittavaikutusta lisää fyysinen rasitus, jolloin hengitetyn ilman määrä on suurempi ja haitallista otsonia pääsee elimistöön enemmän. Terveyshaitoille herkemmat ovat ihmiset, joilla on jo ennestään heikentynyt tai heikko keuhkojen toiminta. Tähän ryhmään kuuluvat mm. astmaatit, vanhukset ja lapset. (10.) (45.)

Keuhkojen ärtymystä voi ilmetä pitoisuuden ollessa 160 µg/m<sup>3</sup>. Ensimmäiset ilmenevät oireet ovat muutokset keuhkojen toiminnassa sekä tulehdustyyppiset reaktiot keuhkokudoksessa. Pitoisuuden ollessa 200 µg/m<sup>3</sup> oireina voi olla silmien kirvelyä, vuotamista ja punoitusta. Myös päänsärky, huonovointisuus ja hengitysvaikeudet ilmenevät. Pitoisuuden kasvaessa 240 µg/m<sup>3</sup> on havaittu fyysisen suorituskyvyn heikkenemistä. Oireina voi myös olla astman ja siitepölyallergian paheneminen sekä hengitysteiden ärsytys. Pitkäaikainen altistuminen voi aiheuttaa pysyviä vaurioita keuhkokudokseen. Äkilliset haitat häviävät yleensä altistuksen loputtua. Euroopan unioni alueella otsonipitoisuuden tiedotuskynnys on 180 µg/m<sup>3</sup>h ja varoituskynnys 240 µg/m<sup>3</sup>. (46.)

Ala-ilmakehän otsonin muodostuksesta on haittaa myös kasveille. Kasvillisuudelle vaikutukset on huomattavissa alhaisimmilla pitoisuuksilla kuin ihmisellä esiintyvät terveyshaitat. Otsoni vaurioittaa kasvien solukkoa ja häiritsee fotosynteesiä. Tätä seuraa heikentynyt kasvu. Kudoksen kuolema eli nekroosi on tyypillinen otsonin aiheuttama kasvioire. Määrällisesti haittojen arviointi on vaikeaa johtuen kasvien vaihtelevasta herkkydestä lajeittain ja kasvuolosuhteiden takia. (46.)

Alailmakehän otsoni on myös suurissa kaupungeissa, ns. metropoleissa (Kuva 5), nähtävän savusumun aiheuttaja. Savusumua muodostuu valokemiallisessa reaktiossa alailmakehän otsonin ja haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kanssa (VOC). Savusumun ensisijaiset vaikutukset ihmiseen ovat silmien ja limakalvojen ärsytys. Se aiheuttaa vahinkoa myös näiden alueiden kasvillisuudelle. (10)(47)



*Kuva 5 Alailmakehän otsonin aiheuttama savusumu, kuva New York City (9)*

### 2.3.6 Happosateiden vaikutus ihmisen terveydelle

Happosade näyttää, tuntuu ja maistuu aivan kuin tavallinen sade. Happosateen vaikutus ihmiselle ei ole suora. Edes kävely happosateessa tai jopa uiminen happosateisessa järvessä ei aiheuta suoraan ihmiselle sen suurempia haittoja.

Happosateiden aiheuttaja, typen ja rikin oksidit, sen sijaan ovat haitallisia ihmisen terveydelle. Nämä kaasut ovat vuorovaikutuksessa ilmakehän kanssa muodostaen hienoja sulfaatteja ja nitraatteja, jotka voivat kulkeutua ilmakehässä pitkiä matkoja. Näitä yhdisteitä ihminen voi hengittää sisäänsä ns. kuivalaskeumana tietämättä ja tällöin hän altistuu kyseisille oksideille. Olosuhteiden salliessa nämä hiukkaset voivat kulkeutua jopa sisätiloihin. Altistuminen kyseisille hiukkasille saattaa aiheuttaa ennenaikaisia kuolemia sydän ja keuhkotauteihin. (48.)

### 3 ILMANSUOJELU: ORGANISAATIOT JA SÄÄDÖKSET

#### 3.1 Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO

Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO (International Maritime Organization) on perustettu vuonna 1948. IMO toimii Yhdistyneiden kansakuntien (YK) alaisuudessa, kansainvälistä merenkulkua hallinnoivana turvallisuusjärjestönä.

IMO:n pääkonttori sijaitsee Lontoossa, josta järjestö hallinnoi jäsenmaiden hallitusten ja merenkulkualan yhteistyötä. Kansainvälisen merenkulkujärjestön tehtävä on merenkulun turvallisuuden kehittäminen ja alusliikenteestä aiheutuvan merien saastuttamisen ehkäiseminen. IMO:a johtaa jäsenmaiden edustajien muodostama elin, joka muodostaa talousasioista vastaavan neuvoston. Järjestö on jaettu viiteen pääkomiteaan ja niiden työtä tukeviin alakomiteoihin. (49.)

#### 3.2 MARPOL 73/78 -yleissopimuksen historia

Ennen merellisen ympäristön suojelusopimuksen MARPOL yleissopimuksen voimaantuloa 2.10.1983 voimassa oli OILPOL-yleissopimus (International Convention for the Prevention of Pollution of the Sea by Oil), joka otettiin käytäntöön vuonna 1954. Siinä oli säädetty tankkereiden öljyisten painolastivesien tyhjentämisestä rantojen läheisyydessä. Ennen OILPOL-yleissopimusta öljyiset painolastivedet, tankkien pesuvedet ja muut öljyä sisältävät vedet päästettiin mereen jopa satamissa. Vuonna 1954 asetettiin rajoitukset öljypitoisille vesille; alle 100 ppm sisältävän öljyisen veden laskeminen mereen oli sallittua yli 50 merimailin (nm) etäisyydellä lähimmästä maasta. Tämä tarkoitti kuitenkin, että yli 50 nm:n päässä lähimmästä maasta kaikkien öljyisten vesien päästäminen oli sallittua. Vuonna 1969 tätä sopimusta tiukennettiin niin, että öljyistä vettä ei saanut päästää lainkaan mereen, kun aluksen etäisyys lähimpään maahan oli alle 50 nm. Samaisessa sopimuksessa asetettiin myös pilssivedelle 100 ppm:n rajoitus. Pari vuotta tämän sopimuksen tiukentamisen jälkeen vuonna 1971 säädettiin öljysäiliöalusten lastitankkien koolle yläraja. (50)

1960-luvun lopulla OILPOL-yleissopimusta ei enää pidetty riittävänä, mikä johtui öljyn ja kemikaalien laivakuljetusten kasvusta sekä öljysäiliöalusten koon suuresta kas-

vusta. MARPOL 73 –yleissopimus (International Convention for the Prevention of Pollution from Ships) sai vuonna 1973 Lontoossa pidetyssä konferenssissa tuulta purjeisiin, mutta valitettavasti tämä sopimus ei koskaan astunut sellaisenaan voimaan. Syynä oli sopimusvaltioiden tekniset syyt hyväksyä Annex II liite, vaarallisia neste-mäisiä aineita koskevat määräykset. (50.)

Vuonna 1976 pieni säiliöalus Argo Merchant ajoi karille Yhdysvaltojen rannikolla joulukuussa. Se kuljetti 26000 tonnia raakaöljyä. Tämä katastrofi sai aikaan kohua median ja väestön keskuudessa. Yhdysvallat pyysikin IMO:a kokoontumaan touko-kuussa 1977. Komitea suostui pyyntöön ja järjesti kokouksen helmikuussa 1978. Silloin pidetyssä kansainvälisessä öljysäiliöalusten turvallisuus- ja ympäristösuojeluasioita käsittelevässä konferenssissa laadittiin pöytäkirja, jolla MARPOL 73 -yleissopimuksen liitettä I muutettiin ja jäsenvaltioille annettiin mahdollisuus lykätä liitteen II hyväksymistä. Tästä johtuen MARPOL-yleissopimusta kutsutaan MARPOL 73/78-yleissopimukseksi. Sopimus tuli voimaan 2.10.1983, jolloin aikaisempi OILPOL sopimus lakkasi olemasta voimassa. (50.)

Nykyisin Kansainvälinen merenkulkujärjestö IMO pitää vuodessa 1-2 kokousta, jossa MARPOL-yleissopimuksen säännöstöä jatkuvasti kehitetään. (50.)

### 3.3 MARPOL 73/78 Ilmansuojeluliite, Annex VI

IMO:n vuonna 1997 pidetyssä konferenssissa MARPOL -yleissopimukseen hyväksyttiin ilmansuojelua koskeva uusi liite, Annex VI. Liite asettaa päästörajoituksia typen oksideille, rikin oksideille, haloneille, CFC - yhdisteille sekä VOC - yhdisteille (haihtuvat orgaaniset yhdisteet). Tämä liite astui voimaan 19.5.2005 (51.).

Tämän liitteen mukaan alusten pakokaasupäästöjä rajoitetaan mm. typen ja rikin oksidipäästöjä vähentämällä. Dieselmoottorin kierroslukua säätelemällä optimaaliseksi voidaan rajoittaa typen oksidipäästöjä. Dieselmoottoreita koskevat säännöt eivät edellytä katalysaattorin käyttöä vaan päästöjen vähentäminen on tarkoitus saada aikaan moottoriteknisin keinoin. Polttoaineen rikkipitoisuutta alentamalla tai rikkipesuria käytettäessä vähennetään rikin oksidipäästöjä. Polttoaineiden toimittajien on annettava aluksille polttoainetta koskeva laatutodistus johon merkitään mm. polttoaineen rikki-

pitoisuus. Lisäksi alusten tulee säilyttää polttoainetta koskevat näytteet vähintään vuoden ajan (51.).

### 3.3.1 Ilmansuojeluliitteen uudistus

IMO:n meriympäristösuojelukomitean (MEPEC) kokouksessa 6-10.10.2008 hyväksyttiin MARPOL -yleissopimuksen ilmansuojelua koskevan Annex VI liitteen kokonaisuudistus. Liite astuu vaiheittain voimaan 1.7.2010 alkaen. (3)

Liitteen mukaan typen oksidipäästäjä rajoitetaan vaiheittain. Dieselmootoreiden jotka on asennettu aluksiin 1.1.2011 jälkeen, päästöjä vähennetään 20 % nykytasosta. Kun alus liikennöi IMO:n NECA kontrollialueilla, NO<sub>x</sub> päästöjä tulee vähentää 80 % nykytasosta, mikäli alusten dieselmootorit on rakennettu vuonna 2016 tai sen jälkeen. Vanhempien alusten dieselmootoreiden NO<sub>x</sub> päästöille tulee myös rajoituksia. 1990-luvulla rakennettujen alusten, jotka käyttävät dieselmootoreita, joiden teho yli 5000kW ja sylinteritilavuus yli 90 l, tulee täyttää nykyiset typen oksidipäästäjä koskevat päästömääräykset. (51.)

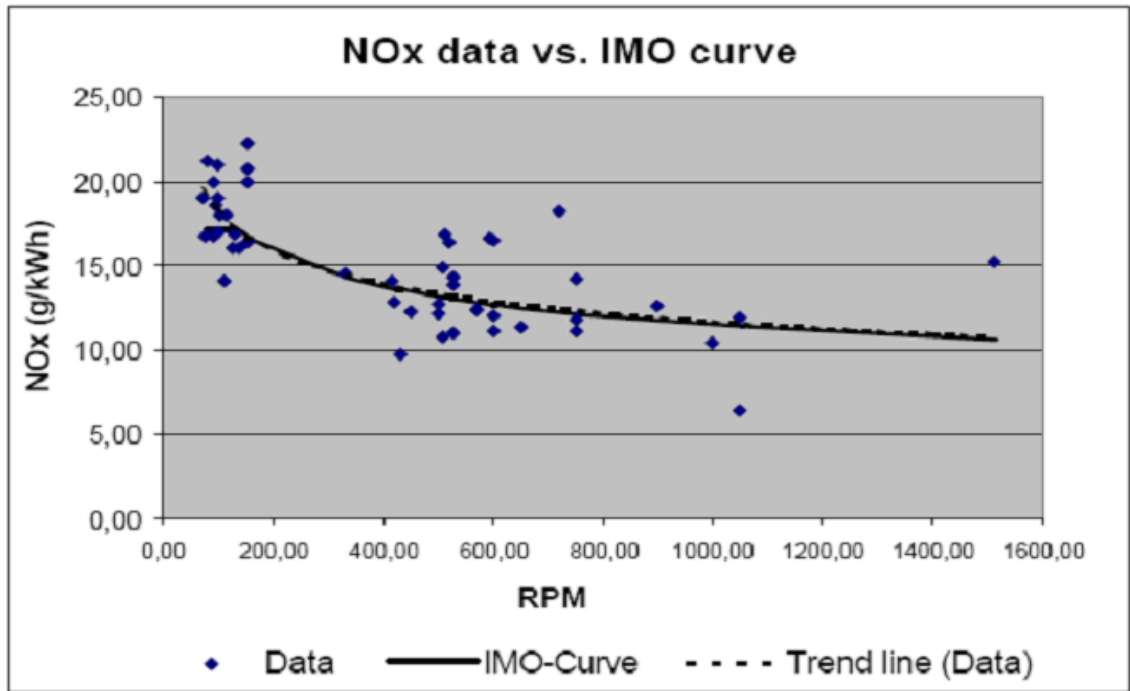
NO<sub>x</sub> päästöjen rajat on määritelty dieselmootoreille riippuen moottorien kierrosnopeuden (rpm) mukaan. Tier I ja Tier II ovat globaalisia rajoituksia, Tier III rajoitukset ovat voimassa ainoastaan typen oksidipäästöjen kontrollialueilla. Alla olevassa taulukossa 1 on esitelty MARPOL Annex VI liitteen mukaiset NO<sub>x</sub> päästörajat. Kuvassa 6 Tier I suositukset on havainnollistettu päästö mittauksien kanssa. (4.)

*Taulukko 1 NO<sub>x</sub> päästörajat Tier I-III alueilla kierrosluvun mukaan (4)*

Tier	Aika	NO <sub>x</sub> rajat, g/kWh		
		n < 130	130 ≤ n < 2000	n ≥ 2000
Tier I	2000	17,0	$45 \cdot n^{-0.2}$	9,80
Tier II	2011	14,40	$44 \cdot n^{-0.23}$	7,70
Tier III	2016*	3,40	$9 \cdot n^{-0.2}$	1,96

\* NECA (Tier II standartit ECA alueiden ulkopuolella)  
n = kierrosten lukumäärä





Kuva 6 esitetty IMO:n NO<sub>x</sub> suositukset viivana sekä mittauksista saadut arvot pisteinä (51)

Rikin oksidipäästöjä tullaan rajoittamaan globaalilla tasolla vuoden 2012 alussa. Maailmanlaajuisesti polttoaineen rikkipitoisuutta tiputetaan 4,5 %:sta 3,5 %:iin. IMO:n SECA kontrollialueella rikkipitoisuutta laskettiin 1,5 %:sta 1,0 %:iin 1.7.2010. IMO:n tavoitteena on vähentää rikin pitoisuutta progressiivisesti 0,5 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Kontrollialueella rajaa lasketaan 1.1.2015 edelleen 0,1 %:iin. Alla olevassa taulukossa 2 päästöjen vähennystavoitteet esitetty vuositasolla. (3.)(4.)

Taulukko 2 SO<sub>x</sub> päästörajat (4)

Aika	Rikin rajat polttoaineessa (% m/m)	
	SO <sub>x</sub> ECA	Maailmanlaajuinen
2000	1.5 %	4.5 %
2010 (1.7.2010)	1.0 %	
2012		3.5 %
2015	0.1 %	
2020 <sup>a</sup>		0.5 %

a - vaihtoehtoinen vuosi 2025, päätetään vuoden 2018 kokouksessa

### 3.4 EU-säädökset

Euroopan unioni on ryhtynyt toimiin ilmasaasteista johtuvien terveys- ja ympäristöhaittojen vähentämiseksi EU:n alueella. Vuonna 1997 julkaistiin ilmanlaatustrategia, jossa asetettiin tavoitteeksi, ettei terveydelle ja kasvillisuudelle haitallisia maanpintatason otsonipitoisuuksia tai happaman laskeuman tasoja enää esiinny EU:n alueella. Ensimmäiset lainsäädäntötoimet valmistuivat vuonna 2001. Päästökattodirektiivi rajoittaa EU-maiden typen ja rikin oksidipäästöjä sekä, VOC -yhdisteiden ja ammoniakkin päästöjä. Direktiivit ovat maakohtaiset. Jokaisella valtiolla on vapaat kädet päättää, millä keinoilla tavoitteisiin päästään. EU:n direktiivit eivät koske merellä tapahtuvia päästöjä, vaan ainoastaan maissa tapahtuvaa. (53: 20.)

Vuoden 2010 alusta astui voimaan EU:n rikkidirektiivin 2005/33/EY muutos, jonka perusteella yli kaksi tuntia sataman laiturissa viipyvän aluksen on joko käytettävä korkeintaan 0,1 % rikkiä sisältävää polttoainetta tai kytkettävä alus maasähköverkkoon. Laiturissa olevalla aluksella tarkoitetaan alusta, joka on asianmukaisesti kiinnitettyä tai ankkuroituna satamassa, kun sitä lastataan tai puretaan, taikka joka odottaa satamassa. Kaikki EU:n jäsenmaihin saapuvat alukset eivät ole vielä tehneet turvallisen polttoaineenvaihdon edellyttämiä teknisiä uudistuksia. Aluksille annetaan siirtymäaikaa teknisiin muutoksiin. (54.)

### 3.5 Itämeren suojelusopimus

Itämeren suojelusopimus Helcom on maailman vanhin alueellinen mertensuojelusopimus. Se on vuodelta 1974. Nykyinen suojelusopimus on vuodelta 1992 ja se on Itämeren alueen merellisen ympäristön suojelua koskeva yleissopimus. Sopimuksen tarkoituksena on ihmisen toiminnasta johtuvien haitallisten päästöjen valvonta sekä Itämeren valuma-alueiden jokien mukana tulevan kuormituksen rajoittaminen. Helcom MARITIME käsittelee kokouksissaan merenkulkua koskevia ympäristösuojelua ja siihen liittyviä ongelmia. Tarvittaessa laaditaan ehdotuksia koskien meriympäristön suojelua. Yksi Helcomin saavutuksista on sen vuonna 1996 IMO:lle tekemä ehdotus jossa polttoaineen rikkipitoisuuden rajaa laskettiin SECA alueilla 1,5 %:iin. Helcom julkaisee suosituksia, joita sopimusvaltiot noudattavat. Helcomin on ratifioinut Itämeren alueen yhdeksästä valtiosta kahdeksan. Helcomin heikkous on siinä, että tehdyt

päätökset ovat suosituksia eivätkä ole laillisesti sitovia. Jäsenvaltioiden on odotettu noudattavana suosituksia, mutta vierailevien valtioiden lipun alla liikennöivät alukset voivat koitua ongelmaksi. (55.)

Vuoden 2007 marraskuussa hyväksyttiin Helcomin BSAP (Baltic Sea Action Plan) -toimenpideohjelma. Ohjelman tarkoituksena on parantaa Itämeren ekologista tilaa vuoteen 2020 mennessä. Hyväksytyssä ohjelmassa asetettiin tavoitteet mm. rehevöitymisen vähentämiseksi. (55)

#### 4 ITÄMEREN LAIVALIIKENTEN PÄÄSTÖT

Helcomin mukaan kasvava laivaliikenne edistää merkittävästi ilmaasaasteiden määrää Itämeren alueella. Alusliikenteessä käytetään yleisesti raskaita polttoaineita, joiden rikkipitoisuudet ovat korkeat. Tämä saa aikaan palamisprosessissa suuria määriä rikin oksideja, jotka ovat haitallisia sekä ympäristölle että ihmiselle, erityisesti rannikolla ja satamissa. (56: 2.)

Alusten typen oksidipäästöt, kuten myös rikin oksidipäästöt, käyvät ilmakehässä läpi kemiallisia reaktioita muodostaen happoja, jotka aiheuttavat ympäristölle vahinkoja happosateina. Typen oksidipäästöt aiheuttavat lisäksi rehevöitymistä, alilmakehän otsonia sekä savusumua metropolialueilla. Itämeren ja Pohjanmeren laivaliikenne on suurimpia typen oksidipäästöjen aiheuttajista Itämeren alueella. Pohjanmeren laivaliikenteen päästöjen vaikutukset näkyvät Itämerellä suotuisine tuulten vuoksi, jotka kuljettavat oksidipäästäjä tälle alueelle. Sen takia on vaikeaa arvioida laivaliikenteen oksidipäästöjä sekä niiden vaikutusta Itämeren alueella 100 %:n tarkkuudella. Arvioiden mukaan Itämeren laivaliikenteen typen oksidipäästöt ovat vuoden 2008 saatujen tietojen perusteella yli 390 000 tonnia vuodessa ja SO<sub>x</sub> päästöt 135 000 tonnia vuodessa. (56: 2)

Typen ja rikin oksidipäästöjen lisäksi laivaliikenteessä muodostuu kasvihuonekaasuja, pääasiassa hiilidioksidia (CO<sub>2</sub>), otsonia vähentäviä aineita, orgaanisia haihtuvia kaasuja (VOC) joita muodostuu pääasiassa tankkereiden lastausoperaatioissa satamissa (21: 100-101).

Tämänhetkiset voimassa olevat IMO:n maailmanlaajuiset määräykset ovat olleet voimassa 19.5.2005 alkaen. MARPOL 73/78:n ilmansuojeluliite, Annex VI, ilmaasaasteita rajoittavat määräykset kattavat typen ja rikin oksidipäästöjen lisäksi myös otsonia vähentävät aineet ja orgaaniset haihtuvat yhdisteet (VOC). Ilmansuojeluliite määrittelee Itämeren SECA erityisalueeksi, jossa ovat voimassa tiukemmat päästörajoitukset. Nykyiset rajoitukset ovat astuneet voimaan 1.7.2010. Liitteessä on asetettu polttoaineen rikkipitoisuuksille rajoitukseksi 1,0 % tai rikkipesurille, joka pääsee samoihin lukuarvoihin korkeampirikkipitoisella polttoaineella. (3) (4)

Muilla alueilla uusien rajoitusten tullessa voimaan 1.1.2012 rikin oksidipäästöjä on määrä vähentää seuraavin keinoin: rikkipitoisuus aluksien käyttämässä polttoaineessa lasketaan 4,5 %:sta 3,5 %:iin, tai vaihtoehtoisesti on asennettava rikkipesuri, joka pysyy vastaaviin lukuarvoihin korkearikkipitoisella polttoaineella. (4)

Itämeren laivaliikenne on viimeisempien vuosikymmenien aikana kasvanut poikkeuksetta lineaarisesti ja sen kasvun on arvioitu olevan n. 5 %:in vuodessa. Itämerellä liikennöi kuukausittain 3500–6000 alusta, riippuen vuodenajasta. Alukset voidaan karkeasti jakaa kahteen ryhmään: rahtilaivoihin ja matkustajalaivoihin. Laivatyypejä on kuitenkin paljon enemmän, ja lisäksi saman tyyppin laivoja käytetään eri tarkoituksiin ja kuljetetaan erilaisia lasteja. Suurin osa aluksista on kaupallisessa käytössä, murto osa aluksista on matkustajaliikenteessä. (57: 2.)

#### 4.1 Itämerellä liikennöivät alustyyppit

Tässä luvussa esitellään Itämerellä eniten liikennöivät alustyyppit. Samalla tuodaan esille aluksen käyttötarkoitus ja oleelliset lastia koskevat tiedot.

##### Ro-ro-alus

Ro-ro-aluksissa (roll on – roll off) lasti kuljetetaan alukseen ja aluksesta pois yleensä käyttäen vetomestaria. Lasti on yleensä käsittely-yksikköinä lauttavaunuissa, suurlaivoilla, konteissa tai trailereissa. Alustyyppin lastikapasiteetti ilmoitetaan trailereina eli montako yhden yksikön mittaista traileria alukseen mahtuu. Itämerellä liikennöivien ro-ro-alusten kapasiteetti vaihtelee 100:sta 300:aan traileriin. (58.)

##### Ropax-alus

Ropax on ro-ro-matkustaja-alus, joka kykenee kuljettamaan satoja matkustajia. Alustyyppin pääasiallinen tehtävä on kuitenkin lastin kuljettaminen. (59)

##### Säiliöalus (raakaöljy/tuote/kemikaali)

Säiliöalus kuljettaa nestemäisiä irtolasteja. Alukset on jaoteltu eri tyyppihin riippuen lastityypistä. Raakaöljyalukset ovat yleensä isoja ja kuljettavat pelkästään raakaöljyä. Tuotetankkeri kuljettaa yleensä öljynjalostustuotteita, esim. dieseliä ja bensiiniä. Tuotetankkerit voivat tarvittaessa kuljettaa muutakin nestemäistä lastia, kuten esim. etano-

lia, joskus kemikaaleiksi luokiteltuja tuotteita, mutta eivät niin erikoistuneita tuotteita kuin kemikaalialukset. Kemikaalialukset kuljettavat vaikeasti käsiteltäviä aineita, joilla on erityisvaatimuksia lastitilojen suhteen. (59)

#### Irtolastialus (bulk/monikäyttö)

Alukset kuljettavat irtolastia, kuten esim. hiiltä, malmia ja viljaa. Bulkkerin tunnistaa yleensä suurista kansiluukuista ja mahdollisista lastinkäsittelyssä käytettävistä nostureista. Monikäyttöiset irtolastialukset voivat kuljettaa kappaletavaran lisäksi puutavaraa, kontteja jne. (59)

#### Konttialus

Konttialus kuljettaa rahtia merikuljetuskontteihin pakattuna. Kontit lastataan rahtitilaan, sekä kannelle. Kerroksia aluksissa voi olla useita riippuen rahtikapasiteetista. Konttialuksessa rahtimäärä ilmoitetaan TEU:na (Twenty-foot Equivalent Unit). Tällä tarkoitetaan kahdenkymmenen jalan (6 m) konttia, joka toimii perusyksikkönä. Tyypillisimpiä konttikokoja on kolme, 20, 40 ja 45 jalan kontit. (59)

#### Autokuljetusalus

Alukset kuljettavat autotehtaalta vastaanottajanmaan satamiin enimmäkseen henkilöautoja (58).

#### Jäähdytysalukset (Reeferit)

Reeferi on elintarvike kuljetuksiin tarkoitettu laiva. Aluksen ruumiin on asennettu jäähdytyskoneistot, jotta voidaan kuljettaa herkästi pilaantuvaa lastia kuten lihaa, kaalia, hedelmiä jne. (59)

#### Autolautta

Autolautta kuljettaa enimmäkseen matkustajia, mutta myös rahtia. Autokannet ovat suurimmaksi osaksi matkustajien henkilöautojen käytössä, ja rahdille on jätetty 20 %:n tila (59).

#### Pika-alus

Pika-alukset kuljettavat pelkästään matkustajia eivätkä lainkaan rahtia. Pika-aluksia on kahden tyyppisiä, katamaraanit ja kantosiipialukset. Alukset kykenevät jopa n. 40

solmun nopeuteen. Jotkut alukset pystyvät kuljettamaan matkustajien lisäksi myös henkilöautoja. (59)

Suurimmat Itämerellä liikennöivät alukset ovat yleensä tankkereita. Ne saattavat olla jopa 250 metriä pitkiä ja aluksen kuollut paino (DWT) saattaa olla jopa 90 000 tonnia. Matkustaja-alukset ovat polttoainekulutukseltaan suurimpia, mikä johtuu monista satamavierailuista lyhyellä aikavälillä ja isoista koneistoista suhteessa aluksen kokoon. Matkustaja-aluksilla onkin toiseksi suurimmat typen oksidien päästöt Itämeren alueella. (57: 13)

Suomen Itämeri-instituutin julkaiseman raportin ” Background paper for a project initiative on ship emissions in the BSR” 2009, mukaan pelkästään Suomen aluevesillä typpipäästöt ovat suuremmat kuin Suomen maaliikenteessä. Typpipäästöt ovat verrattavissa Ruotsin ja Tanskan yhteenlaskettuihin maaliikenteen typen oksidipäästöihin. Raportti paljastaa, että päästöjen kokonaismäärä on aiempia tehtyjä tutkimuksia suurempi. (2.)

## 4.2 Laivaliikenne Itämerellä

Itämerellä liikennöi vuonna 2006–2007 kuukausittain noin 3500–5000 alusta riippuen vuodenajasta. Alusliikenteen kasvun arvioitiin tuolloin olevan eri lähteiden mukaan 3–5 % vuodessa. Vuonna 2008 alustiheyden arvioitiin olevan noin 4000–6000 kuukausitasolla. Laivaliikenteen oksidipäästöjä tutkittiin vuosina 2006–2008 kahdessa eri tutkimuksessa. Hyväksi käytettiin Helcomilta saatuja alusten automaattisen tunnistusjärjestelmän (AIS) tietoja. Joka ikinen hetki Itämerellä oli mittauskaudella n. 2000 alusta jonka AIS tiedot analysoitiin tutkimusta varten. (56.) Tutkimuksista saatua tietoa käsitellään tarkemmin 4 luvusta eteenpäin.

Alusten määrän kasvaessa myös alusten koko on ollut kasvussa. Tämä tarkoittaa koko päästö määrän kasvua. Itämerellä liikennöi nykyisin entistä enemmän aluksia, jotka eivät ole säännöllisessä liikenteessä Itämeren alueella. Toistaiseksi suurin osa meriliikenteestä tapahtuu EU-maiden välillä. Suurin osa Itämerellä liikennöivistä aluksista on rahtilaivoja. Matkustaja-aluksen päästöt taas ovat rahtilaivoja korkeammat. Tämä johtuu lähinnä satamakäyntien tiheydestä; aluksen manoveeraus kuluttaa enemmän

polttoainetta. Myös väylä-ajoissa, jossa aluksen käsittelyssä tarvitaan enemmän resursseja, polttoainetta kuluu enemmän ja päästöjä syntyy runsaasti.

Itämeren rahtikuljetusten määrän on arvioitu olevan n. 190 miljoonaa tonnia kuukaudessa, josta öljyn osuus on n. 18 miljoonaa tonnia. Polttoainetta kulutettiin vuosien 2006 - 2008 välisenä aikana 6 000 000-6 200 000 tonnia vuodessa, joka vastaa energiankulutukseltaan 260-265 PJ:a. Kuljetusmääriä lisäävät jatkuvasti myös Venäjän uudet ja uudistuvat satamat. Tämä lisää myös riskiä öljyonnettomuuksille. (56: 2)(57: 2)(60: 3.)

Laivaliikenteen aiheuttamia typen oksidipäästöjä tutkittiin ShipNOEm-hankkeessa 1.3.2006 – 28.2.2007. Siinä käytettiin mm. Helcomlta saatuja AIS-tietoja hyväksi. Tutkimuksen tavoitteena oli määrittää eri alusten ja alustyyppien NO<sub>x</sub>-päästömäärä ja samalla selvitettiin Itämeren laivaliikenteen tiheyttä. Tutkimuskauden aikana Itämerellä esiintyi 8510 eri alusta, jotka pystyttiin tunnistamaan käyttämällä alusten automaattisen tunnistusjärjestelmän (AIS) tietoja tai radiotunnistenumeron (MMSI) avulla. MMSI-numeroa käytettiin vaihtoehtoisena tunnistusmenetelmänä kun AIS tiedoista ei saatu IMO numeroa tai aluksessa ei ollut käytössä automaattista tunnistusjärjestelmää. Karkeasti joka neljäs alus oli sellainen josta ei saatu AIS tietoja jolloin käytettiin MMSI menetelmää. Silti joka viides alus ei ollut tunnistettavissa. Tästä johtuen onkin syytä epäillä, että todelliset päästömäärät Itämerellä ovat suuremmat mitä tilastoihin on kirjattu. (57: 6.)

*Taulukko 3 Liikenteen jakautuminen maaliskuussa 2006 alustyypeittäin (57)*

Alus tyyppi	Lukumäärä	% laivoista
Matkustaja	201	5,8
Ro-ro	121	3,5
Konttialus	103	3,0
Säiliöalus (raakaöljy/tuote/kemikaali)	539	15,5
Yleisrahti	1152	33,1
Autolautta	68	2,0
Reeferi	115	3,3
Bulkkeri	247	7,1
Jäänmurtaja	29	0,8
Puskuproomu	4	0,1
Hinaaja, luotsi, tuntematon	812	23,3
Muu	89	2,6
<b>Yhteensä</b>	<b>3480</b>	<b>100</b>



Taulukosta 3 selviää, miten laivaliikenne on jakautunut eri alustyyppien kesken. Taulukosta näkyy, että rahtikuljetuksissa olevia aluksia on suuri enemmistö. Suhteellisen pieni osa aluksista, alle 10 %, on matkustajaliikenteessä. Kun tarkastellaan tutkimuskauden 1.3.2006 – 28.2.2007 yhteenlaskettuja typen oksidipäästöjä (Taulukko 4) huomataan, miten iso merkitys pienellä matkustajaliikenteellä on kokonaispäästöjen määrissä. Vaikka matkustaja-alusten määrä on n. 6 % koko Itämeriliikenteen laivamäärästä, kuormittavat sen typenoksidipäästöt ympäristöä n. 76 000 tonnilla vuodessa, joka on 20 % koko päästö määrästä. Tämä on eniten muihin alustyyppisiin verrattuna (Taulukko 4). Toinen alustyyppi, joka kuormittaa Itämeren runsailla päästö määrillä suhteessa laivojen lukumäärään, on ro-ro-alus. Noin kolme prosenttia alusmäärästä tuottaa n. 61 000 tonnia NO<sub>x</sub> päästöjä vuodessa, joka on 17 % vuotuisista typen oksidipäästöistä. Se on eniten suhteutettuna laivojen lukumäärään. (57.)

*Taulukko 4 Vuoden 2006 NO<sub>x</sub>-päästöt Itämerellä laivatyyppin mukaan jaoteltuna(57)*

<b>Alustyyppi</b>	<b>NO<sub>x</sub>-päästöt yht. (kt)</b>	<b>% laivoisista</b>	<b>% NO<sub>x</sub>-päästöistä</b>
Matkustaja	75,96	5,9	20,5
Ro-ro	61,01	3,1	16,5
Konttialus	22,94	2,8	6,2
Säiliöalus (raakaöljy/tuote/kemikaali)	61,85	14,1	16,7
Yleisrahti	65,44	34,4	17,7
Autolautta	14,41	1,5	3,9
Reeferi	6,10	2,4	1,7
Bulkkeri	16,72	4	4,5
Jäänmurtaja	3,59	0,6	1
Proomu	0,06	0,1	<0,1
Hinaaja, luotsi, tunnistamaton	38,50	28,5	10,4
Muu	3,44	2,5	0,9
<b>Yhteensä</b>	<b>~370</b>	<b>100 %</b>	<b>100 %</b>

Tarkastellaan vielä päästöjen jakautumista kokoluokittain (Taulukko 5). Lukumääräisesti ylivoimaisesti suurimmat ryhmät tässä ovat alukset, joiden bruttovetoisuus on 1000–4500 tonnia. Näiden alusten osuus koko laivamäärästä on 35 %. Kun katsotaan näiden kokoluokkien päästö määriä, huomataan niiden kuitenkin jäävän aika pieniksi. Tämän ryhmän yhteenlaskettu typen oksidien päästö määrä oli marraskuussa 2006 n. 44000 tonnia ja prosentuaalisesti se on vain 13,5 % kokonaispäästöistä. Ylivoimaisesti suurimmat päästöt jakautuvat aluksille, joiden bruttovetoisuus asettuu 21000 tonnin ja

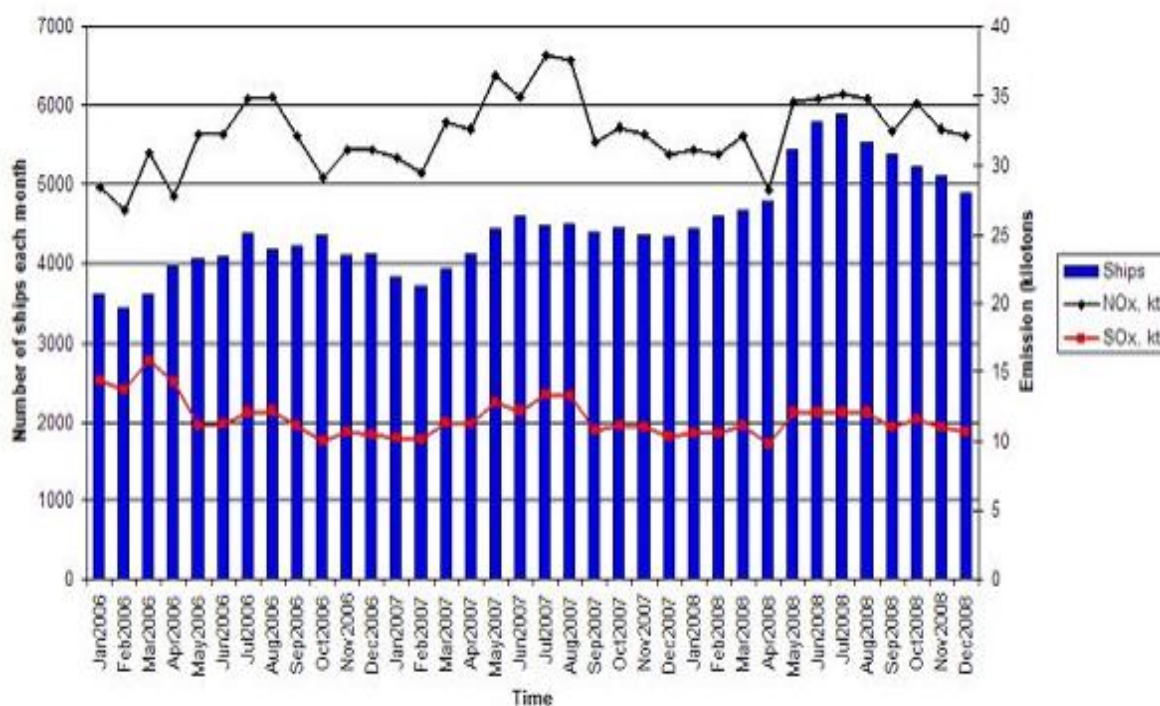
50000 tonnin väliin. Näiden osuus on 9 % koko alusten määrästä ja niiden aiheuttamat typenoksidipäästömäärät olivat n. 86 000 tonnia. Lukuarvoltaan se on kaksinkertainen verrattuna siihen mitä 1000–4500 tonnin alukset päästivät ja yhteenlasketuista NO<sub>x</sub>-päästöistä kyseisellä aikavälillä se on peräti neljäsosa. Tähän kategoriaan kuuluvat säiliöalukset, erityisesti tuotetankkerit, kuten esim. m/t Neste. Myös keskisuuret autolautat, jotka liikennöivät esim. Tallinnan ja Helsingin väliä, sekä ropax-alustyypit jotka kulkevat Saksan ja Suomen väliä, kuuluvat tähän kategoriaan. Todennäköistä on, että juuri autolauttojen ja ropaxien suuret päästömäärät ovat nostaneet tämän kategorian laivat tilastojen kärkeen. (57: 1-8.)

*Taulukko 5 Marraskuun 2006 päästöjen jakautuminen kokoluokittain(57)*

Aluksen koko, GRT	Lukumäärä	NO <sub>x</sub> päästömäärä yht. (t)	% kok. päästöistä
GRT < 300	76	262	0,8 %
300 < GRT < 1000	293	829	2,6 %
<b>1000 ≤ GRT &lt; 2500</b>	<b>661</b>	<b>1480</b>	<b>4,6 %</b>
<b>2500 ≤ GRT &lt; 4500</b>	<b>566</b>	<b>2887</b>	<b>8,9 %</b>
4500 ≤ GRT < 8000	328	3798	11,8 %
8000 ≤ GRT < 12000	209	3840	11,9 %
12000 ≤ GRT < 21000	279	6364	19,7 %
<b>21000 ≤ GRT &lt; 50000</b>	<b>313</b>	<b>8578</b>	<b>26,5 %</b>
GRT < 50000	108	2429	7,5 %
Tuntematon	647	1854	5,7 %
<b>Yhteensä</b>	<b>3480</b>	<b>32321</b>	<b>100,0 %</b>

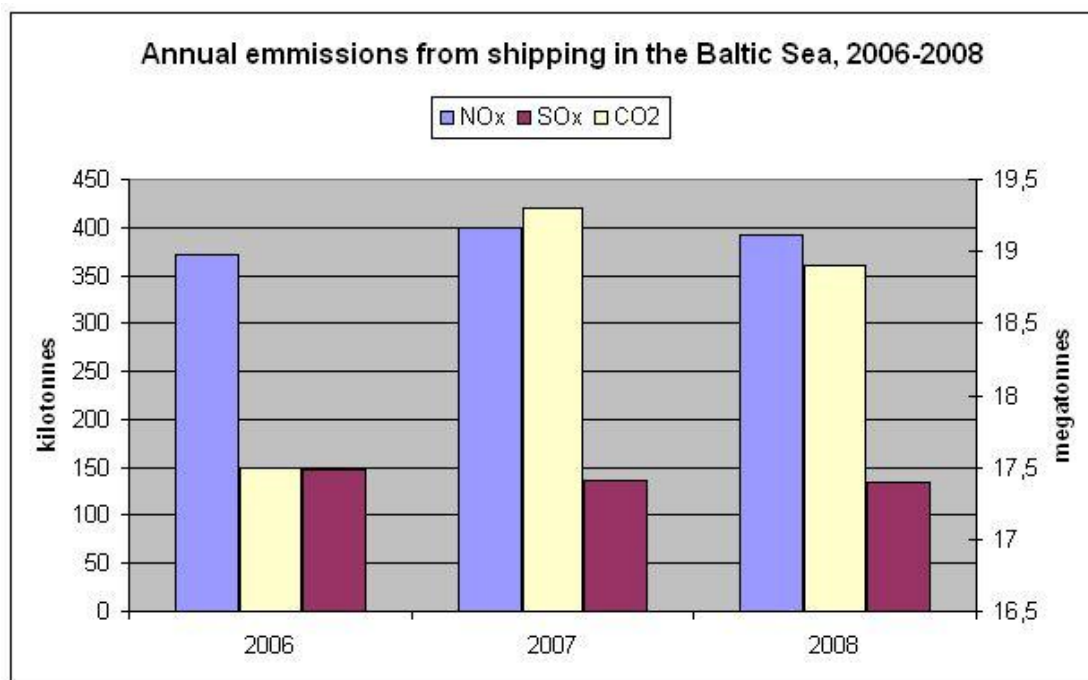
Helcomin vuonna 2008 suoritetussa tutkimuksessa huomattiin, että aluksien määrä Itämeren alueella oli noussut 4400–5900 alukseen, kuukaudesta riippuen (kuva 7). Nämäkin tiedot saatiin käyttämällä AIS tietoja Helcom:n tietokannasta. Typen ja rikin oksidi päästöissä ei sen sijaan huomattu vastaavanlaista nousua kuin alusten kasvussa. NO<sub>x</sub> päästöjen huomattiin yllättäen pienenevän verrattuna vuodelta 2006 ja 2007 saatuihin tietoihin. Tämän arvellaan johtuneen finanssikriisistä, joka johti pienempiin kuljetuksiin erityisesti kesällä. Raaka-öljytankkereiden, bulkkereiden ja muiden rahtilaivojen määrä väheni tänä aikana merkittävästi verrattuna vuoden 2007 lukuarvoihin. Vastaavasti pienempien alusten lukumäärä kasvoi, erityisesti kesä kuukausina. Kuvasta 9 voidaan nähdä alusmäärän nousu vuoden 2008 kesäkuukausina. Kuvasta näkyy hyvin, miten typen ja rikin oksidipäästöt ovat olleet laskussa edellisen vuoden kesä-

kuukausista, mutta lähtevät nousuun huhtikuusta, kuten myös laivojen määrä. Tämän nousun huomaa paremmin kylläkin typen oksidipäästöjen osalta. (56.)



Kuva 7 Alustiheys, typen ja rikin oksidipäästöt kuukausitasolla(56)

Kun vertaillaan vuosien 2007 ja 2008 typen ja rikin oksidipäästöjä keskenään (kuva 8) nähdään, että päästöt ovat vähentyneet edellisvuoteen verrattuna. NO<sub>x</sub> –päästöjen keskiarvo on laskenut 400 000 tonnista 393 000 tonniin vuodessa ja SO<sub>x</sub> –päästöjen keskiarvo on tippunut 137 000 tonnista 135 000 tonniin vuodessa. Suurin osa päästöjen aiheuttajista tuli Euroopan Unionin alueelta. Tutkimuksen mukaan n. 30 % aluksista oli rekisteröity EU:n ulkopuolelle. (56)



Kuva 8 Typhen ja rikin oksidien sekä hiilidioksidipäästöjen jakautuminen 2006–2008 (56)

Laivaliikenne aiheuttaa satama-alueilla manoveeraustilanteissa suhteessa enemmän päästöjä kuin avomerinavigoinnissa. Sen takia laivaliikenteen aiheuttamaan rikin oksidipäästöjä satama-alueella on rajoitettu 1.1.2010 alkaen EU direktiivissä 2005/33/EC. Direktiivissä määritellään, että Euroopan unioniin kuuluvan sataman laiturissa olevan aluksen tulee käyttää dieselpolttoainetta jonka rikkipitoisuus ei ylitä 0,1 %:ia (61). Rajoituksen tarkoituksena on parantaa ilmanlaatua satamien alueella sekä niiden läheisyydessä sijaitsevilla kaupungeilla. Kun otetaan huomioon, että SECA-alueilla rikin pitoisuudet laskivat myös 1.7.2010 1,0 %:iin (3), huomataan Itämeren olevan matkalla kohti rikkipäästötöntä aluetta. Tavoitteena on rikkittömän polttoaineen käyttö, kuten maantieliikenteessä on ollut jo vuosia. Nopeita muutoksia ei ole luvassa, eikä se olisi taloudellisesti mahdollistakaan, mutta ympäristöystävällisempiä ratkaisuja kohti ollaan tässä asiassa matkalla. Itämeren suojelemiseksi EU:lla on vesipuitedirektiivi, joka edellyttää suojoittoa ja kuormituksen vähentämistä valuma-alueilla. Merensuojelustrategiassa taas pyritään saavuttamaan koko Itämeren alueen hyvä tila vuoteen 2020 mennessä. (62)

## 5 LIIKENNEMUOTOJEN VERTAILU

Vesiliikenteen on perinteisesti katsottu olevan ympäristöä kuormittava liikennemuoto. Mutta tietääkö tavallinen ihminen, joka esim. käy Ruotsin risteilyllä, miten paljon ympäristöä saastuttava liikenneväline laiva on? Esimerkiksi m/s Silja Serenade vie raskasta polttoainetta, jonka rikki-pitoisuus on 0,5 %, 160 kg/nm (merimaili = 1852 m). (63) Edestakainen matka Helsingistä Maarianhaminan kautta Tukholmaan on 545 merimailia. Jo merimatalla kuluvaan raskaan polttoaineen määrä on pelkästään n. 87 tonnia. Polttoaineen kulutus on todellisuudessa suurempi, koska satama-alueella polttoainetta kuluu enemmän ja laiturissa ollessaan alus käyttää myös sähköntuotantoon polttoainetta.

Jotta saataisiin realistinen kuva alusliikenteen aiheuttamista rikin ja typen oksidipäästöistä, on havainnollisinta verrata päästöjä jonkun toisen liikennemuodon kanssa. Tässä työssä vertailuvastakohdaksi vesiliikenteelle on otettu maantieliikenne. Maantieliikenteen tuottamat päästöt yksikkötasolla ovat luonnollisesti huomattavasti laivaliikennettä pienemmät typen ja rikin oksidipäästöjen osalta. Tarkoitus on laskea lasti-yksikköä kohti jakautuvat päästöt ja selvittää siitä liikennemuotojen erot.

Vertailtaessa liikennemuotoja keskenään on tehtävä oletuksia potentiaalisista olosuhteista, jotka vallitsevat matkan aikana. Vertailen kahdessa esimerkissä aluksen ja puoliperävaunuyhdistelmän (rekan) päästöjä keskenään, josta olen laatinut taulukon päästöjen jakautumisesta kuljetusmuotojen kesken. Kahden esimerkin perusteella tehty vertailu antaa kuvan siitä, minkälainen on Itämerellä liikennöivän yksittäisen aluksen päästötilanne verrattuna maantieliikenteeseen, kun verrataan rikin ja typen oksidipäästöjä. Vertailuissa tulee selkeästi esille, minkälainen ero liikennemuotojen välillä on tällä hetkellä.

Vertaillessani päästöjä keskenään olen käyttänyt VTT:n LIPASTO-tietokantaa siltä osin mikä koskee yksikköpäästöjä tavaraliikenteessä. Vertailussa aluksen kuljettama yksi traileri vastaa maantieliikenteessä yhtä puoliperävaunuyhdistelmää. Puoliperävaunuyhdistelmän massana olen käyttänyt 17,5 tonnia. LIPASTO ilmoittaa Suomen laivaliikenteen trailerin nettolastiksi keskimäärin 14 tonnia, ja kun siihen lisätään tyhjän trailerin massa, ovat lukuarvot lähes samat (59).

## 5.1 Esimerkki 1

Ensimmäiseen tarkasteluun olen ottanut ropax-alustyypin ja puoliperävaunuyhdistelmän. Matka on Helsingistä Travemüнден, Saksaan. Aluksen reitti kulkee Itämeren poikki mahdollisimman lyhyttä reittiä. Reikka ajaa Ruotsin kautta Tanskaan ja sieltä Saksaan, Travemüнден. Reikan reittiä laskettaessa on käytetty hyväksi Googlen karttaohjelmaa määriteltäessä lyhintä reittiä Helsingistä Travemüнден. Aluksen reittiä laskettaessa on käytetty portworld distance calculator -ohjelmaa.

Laiva on oletuslaskussa lastattu täyteen trailereita, joita mahtuu esimerkin 1 tapauksessa 300 (Liite 1). Laskettaessa päästöjen jakautumista laskuissa ei ole otettu huomioon mahdollisia matkustajia ja heille suuntautuvaa päästömäärää. Kaikki päästöt on jaettu 300 trailerin kesken. Laskuissa on käytetty puoliperävaunuyhdistelmää, joka kuuluu EURO 3-luokkaa (Liite 2), joka tarkoittaa, että kategoriaan kuuluvat ajoneuvot on rakennettu 2001–2006. On myös oletettu, että reikka ajaa matkan noudattaen lain vaatimia lepoaikoja. Yhden trailerin massaksi aluksella on laskuissa käytetty 14 tonnin nettopainoa ja 17,5 tonnin bruttopainoa puoliperävaunuyhdistelmässä. Lastintyyppi on määrittelemätön.

*Taulukko 6 Typen ja rikin oksidipäästöjen jakautuminen ropax-aluksen ja puoliperävaunuyhdistelmän kesken*

Esimerkki 1	Ropax	Puoliperävaunuyhdistelmä
Matka	Helsinki - Travemünde	Helsinki - Travemünde
Matka km	1268	2682
Keskinopeus	18 kn - 33,4 km/h	49 kn - 90 km/h
Traileri kapasiteetti	300	1
Matka-aika	n. 38h	n. 48 h
NOx(g/km)	5164	7,1
SOx(g/km)	2137	0,0065
NOx yht. (kg)	6547,95	19,04
SOx yht. (kg)	2709,72	0,0174
NOx/traileri(kg)	22	19,04
SOx/traileri(kg)	9,03	0,02
Polttoaineen kulutus(g/km)	79024	355
Polttoaineen kulutus yht.(t)	100,20	0,95
Polttoaineen kulutus traileria kohti(kg)	334,01	952,11

Vertailun tuloksista nähdään (taulukosta 6), että laivalla kuljettu matka on jo pituudeltaan kaksi kertaa lyhyempi kuin rekalla kuljettaessa. Tämä vaikuttaa huomattavasti polttoaineen kulutukseen ja päästömääriin. Päästöjä tarkasteltaessa selviää, että aluksen päästöt ovat moninkertaisia puoliperävaunuyhdistelmään verrattuna. Rekalla on suhteellisen isot  $\text{NO}_x$ -päästöt kilometriä kohti, mutta olemattomat rikinoksidipäästöt. Tämä johtuu niin sanotusta rikittömästä polttoaineesta. Maantieliikenteessä käytettävässä polttoaineessa rikkipitoisuus saa nykyisin olla korkeintaan 10 mg/kg, joka on 0,001 massa (m)-%, vastaavasti aluksen rikin pitoisuus polttoaineessa on 1,45 m-% (Liite 1/1). Taulukosta käy ilmi, että rikin päästöissä on isoja eroja näiden kuljetusmuotojen kesken. Laivan päästöt ovat kyseisellä matkalla yhteensä n. 2,7 tonnia ja rekan päästöt ovat kaksi kertaa pidemmällä matkalla vain 17 grammaa. Kun lasketaan päästöt traileria kohti, tulokseksi saadaan 9 kg. Ero on silti valtava, melkein viisisata-kertainen.

Vertailtaessa aluksen typen kokonaisoksidipäästöjä puoliperävaunuyhdistelmään on selvä, että nämä ovat huomattavasti isommat. Kun katsotaan päästöjen jakautumista yhtä traileria kohti nähdään, että ero ei ole kuin muutaman kilon rekan eduksi. Tulos johtuu siitä, että typen oksidipäästöjä ei ole niin yksinkertaista vähentää kuin rikin. Pelkästään polttoaineen koostumusta muuttamalla typen päästöjä ei voida vähentää, vaan pienempiin arvoihin voidaan päästä vain moottoriteknisin keinoin.

Ainoa etu aluksen käytössä näyttäisi saavutettavan polttoaineen kulutuksen osalta. Aluksen polttoaineen kulutus on kokonaisuudessaan valtava, peräti 100 tonnia yhdellä matkalla, kun taas rekka pärjää yhdellä tonnilla kaksi kertaa pidemmällä matkalla. Kun tarkastellaan polttoaineen kulutusta traileria kohti, huomataan laivan olevan kuitenkin edullisempi vaihtoehto. Esimerkki 1:n laivan ja rekan matkan kohdalla ero näyttäisi olevan melkein kolminkertainen.

Aluksen raskaan polttoaineen koostumusta tarkasteltaessa, huomataan rikin pitoisuuden polttoaineessa olevan 1,45 massaprosenttia (Liite 1). Tämä tarkoittaa sitä, että matkalla kuluva polttoaineessa, jota kului 100,2 tonnia, on pelkästään rikkiä n. 1,45 tonnia.  $\text{SO}_x$  kaasujen määräksi matkan aikana ilmoitetaan n. 2,7 tonnia (Taulukko 6). Tämä on melkein kaksinkertainen lukuarvo polttoaineessa olevalle rikille. Rikki käykin palamisprosessissa läpi kemiallisia reaktioita, jotka muodostavat oksideja enem-

män kuin polttoaineessa itsessään on. Rikin oksideja muodostuu polttoaineen rikin hapettumisesta. (64: 10)

## 5.2 Esimerkki 2

Tarkasteluun nro. 2 on otettu ro-ro-tyyppinen alus (Liite 3), joka kuljettaa samalla tavalla kuin esimerkissä 1 trailereita Helsingistä Travemündeeseen. Alus on kooltaan pienempi ja sen rahtikapasiteetti on 150 traileria. Päästöt on jaettu esimerkki 1:n mukaan trailereiden kesken, eli mahdollisia matkustajia ei ole otettu huomioon. Rekan tiedot (Liite 2) ovat samat kuin esimerkissä 1.

Tarkoituksena esimerkissä 2 on selvittää, onko aluksen koolla merkitystä päästöjen jakautumisessa. Kahden aluksen päästöjen välillä pitäisi olla selkeä ero (vrt. luku 4.1 Laivaliikenne Itämerellä). Kyseisen luvun taulukoista NO<sub>x</sub> päästöjen osalta tuli ilmi, että bruttovetoisuudeltaan pienten alusten päästöt olivat huomattavasti suurikokoisia alhaisemmat. Isommissa aluksissa päästöt olivat korkeat niillä aluksilla joiden GRT on 21000 – 50000 tonnia. Esimerkin 2 aluksen bruttovetoisuus on 18000 tonnia ja esimerkin 1 aluksen GRT on 40000 tonnia. Ero on siis noin kaksinkertainen. Saatuja tietoja verrataan edelleen puoliperävaunuyhdistelmän lukuarvoihin ja lasketaan siitä aluksen yhdelle trailerille allokoitujen päästöt aluksen ollessaan lastattu maksimiin. Esimerkistä 2 käy siten myös ilmi, onko luontoystävällisempää kuljettaa trailereita isoissa vai pienissä aluksissa. Esimerkin 1 perusteella voidaan rekan ja aluksen vertailussa odottaa muutosta, joko positiivista tai negatiivista, mutta isoja eroja ei ole aluksen ja puoliperävaunuyhdistelmän välillä todennäköisesti tiedossa perustuen esimerkissä 1 saatujen tietojen perusteella.



Taulukko 7 Päästöjen jakautuminen Ro-ro-aluksen ja rekan välillä

Esimerkki 2	Ro-ro-alus	Puoliperävaunuyhdistelmä
Matka	Helsinki - Travemünde	Helsinki - Travemünde
Matka km	1268	2682
Keskinopeus	18 kn - 33,4 km/h	49 kn - 90 km/h
Traileri kapasiteetti	150	1
Matka-aika	n. 38h	n. 48 h
NO <sub>x</sub> (g/km)	3957	7,1
SO <sub>x</sub> (g/km)	1713	0,0065
NO <sub>x</sub> yht. (kg)	5017,48	19,04
SO <sub>x</sub> yht. (kg)	2172,08	0,0174
NO <sub>x</sub> /traileri(kg)	33,45	19,04
SO <sub>x</sub> /traileri(kg)	14,48	0,02
Polttoaineen kulutus(g/km)	59844	355
Polttoaineen kulutus yht.(tonnia)	75,88	0,95
Polttoaineen kulutus traileria kohti(kg)	505,88	952,11

Taulukkoja 6 ja 7 vertailtaessa selviää, että ro-ro-aluksen oksidipäästöt ovat pienemmät kuin ropax-aluksen. Huomattava muutos on kuitenkin vain typen oksidien osalta. Esimerkkiin 1 verrattuna typen oksidipäästöt ovat vähentyneet n. 1,5 tonnia. Rikin oksidipäästöt ovat vähentyneet n. 0,6 tonnia. Kun otetaan huomioon alusten välinen kookoero huomataan, että vähennykset eivät ole toivotunlaisia. Kun tarkastellaan näiden oksidipäästöjen jakautumista traileria kohti, huomataan arvojen nousseen suhteellisen paljon. Esimerkkiin 1 verrattuna NO<sub>x</sub>-päästöt traileria kohti ovat nousseet n. 11,5 kg ja SO<sub>x</sub> päästöjen nousu on n. 5,5 kg.

Ro-ro-aluksen polttoainekulutus on 25 tonnia pienempi kuin ropaxin. Kun kyseessä on kooltaan noin puolet pienempi alus, tämä vähennys ei ole riittävä jotta saavutettaisiin etua esimerkki 1 alukseen verrattuna. Tarkasteltaessa polttoaineen jakautumista traileria kohti havaitaan polttoaineen kulutuksen selvä nousu, joka on n. 170 kg.

Vertailussa puoliperävaunuyhdistelmän ja ro-ro-aluksen välillä on nyt selkeä ero myös typen oksidipäästöissä. Kuljetusmuotojen typen oksidipäästöjen ero on melkein 15 kg traileria kohti edellisen esimerkin 3 kilogramman sijaan. Ainoa etu näytettäisiin saavutettavan edelleen polttoaineen kulutuksen osalta. Esimerkkiin 2 verrattuna kulutuksessa on noin 450 kg:n ero, joka vastaa melkein puolta rekan polttoainekulutuksesta.

Voidaan edelleen todeta, että alus on vertailussa edullisempi kuljetusvaihtoehto, mutta ei niin ympäristöystävällinen kuin puoliperävaunun yhdistelmä.

Esimerkkien pohjalta voidaan todeta, että on ympäristöystävällisempää ja kustannustehokkaampaa kuljettaa rahtia aluksissa, joissa on iso lastikapasiteetti. Tällöin vältetään isoilta kustannuksilta ja samalla säästetään ympäristöä, kun lasketaan lastiyksikköä kohti. Nämä teoreettiset laskelmat todistavat vain täydessä lastissa olevien alusten käyttökelpoisuuden. On taas ihan eri asia kun alus kulkee vajassa lastissa. Sekin on aika yleistä. Harvemmin Saksan väliä ajavat ro-ro- tai ropax alukset ovat täydessä lastissa. Ennemmin ajetaan toiseen suuntaan suhteellisen vajalla lastilla. Tällöin rahdille jakautuvat typen ja rikin oksidipäästöt nousevat todennäköisesti eksponentiaalisesti. Aluksilla kuljetetaan Saksaan rahtia suhteellisen paljon, joten voidaan päätellä aluskuljetuksen olevan kuitenkin kustannustehokkaampi vaihtoehto.

## 6 YHTEENVETO JA JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän tutkimuksen tarkoitus oli selvittää Itämerellä liikennöivien laivojen rikin ja typen oksidipäästöjä sekä niiden vaikutuksia ympäristölle ja ihmisen terveydelle. Tutkimuksessa esiteltiin rikin ja typen oksidit ja kerrottiin niiden haitallisista vaikutuksista. Työssä käsiteltiin myös Itämeren laivaliikenteen suuruutta, laivaliikenteestä koituvaa ympäristörasitetta ja alueella voimassa olevia päästörajoituksia. Lopuksi esiteltiin vertailu kahden kuljetusmuodon välillä ja käsiteltiin niistä saatu informaatio.

Työssä tuli esille, että laivaliikenne on kasvanut Itämerellä jatkuvasti. Määrän arvioitiin olevan n. 5 %:n vuosiluokkaa. Liikennetiheyden kasvaessa myös alusten päästömäärät kasvavat. Tämä tarkoittaa kasvavaa ympäristörasitetta ja viihtyvyysoongelmia ihmisille tietyillä alueilla. Itämeren suojelusta onkin tulossa poliittisesti tärkeämpi kysymys.

Itämeren suojeleminen on rantavaltioiden ympäristöpolitiikassa tärkeässä roolissa. Kansainvälisen merisuojausjärjestö IMO on julistanut Itämeren alueen rikin oksidien kontrollialueeksi, jossa ovat voimassa tiukemmat päästörajoitukset. Rikkipitoisuus laivaliikenteen polttoaineissa saa olla nykyisin 1 % tai vastaavasti samaan lukuarvoon on päästävä käyttämällä rikkipesuria. Euroopan unionin asettamat rajoitukset koskevat satama-alueella tapahtuvia päästöjä, ja siellä rajoitukset ovat vielä tiukemmat. Aluksen, joka käyttää satama-alueella tai laiturissa ollessaan dieselmootoria, on käytettävä polttoainetta, jonka rikkipitoisuus saa olla korkeintaan 0,1 %. Laiturissa ollessaan alus voidaan kytkeä maasähköverkkoon, jos käytössä ei ole vähärikkipitoista polttoainetta. Itämeren alueella myös Itämeren suojelukomissio Helcom asettaa rantavaltioille suosituksia merellisen ympäristön suojelemiseksi. Helcomin heikkous on siinä, että sen suositukset eivät ole lainvoimaisia, ellei valtio, jonka lipun alla alus liikennöi, ole säistänyt suosituksia omaan lainsäädäntönsä. Itämeren suojelussa on asetettu tavoitteeksi parantaa merellisen alueen hyvinvointia vuoteen 2020 mennessä. Greenpeace kertoo kotisivuillaan EU:n päästövähennystavoitteiden olevan 30 % vuoteen 2020 mennessä

Itämerellä rikin ja typen oksidipäästöjen näkyvimpiä ja puhutuimpia haittoja ovat alailmakehän otsonin muodostuminen, happamoituminen ja rehevöityminen. Alailmakehän otsonin pahimpien alueiden todettiin olevan rantakaupunkien ongelma eikä se

johdu yksinomaan laivaliikenteestä. Satama-alueiden keskittyessä metropolialueiden läheisyyteen ongelmaan ei ole tulossa nopeaa ratkaisua. Vesistöjen ja maaperän happamoituminen johtuu lähinnä rikin oksidipäästöistä, mutta myös typen oksidipäästöillä on oma osansa. Laivaliikenteen edelleen käyttäessä raskaita polttoaineita on siitä tulossa happamoittavien yhdisteiden suurimpia lähteitä. Happamoitumisesta koituu ongelmia Itämeressä eläville eliöille, kun myrkyllisiä yhdisteitä liukenee veteen ja samalla tärkeitä ravinteita huuhtoutuu pois sekä kalakannat vähenevät. Rehevöityminen johtuu mm. typpilaskeuman mukana tulevasta liiallisesta ravinteesta. Vesistössä tämä näkyy veden samenumina ja runsaina sinileväkukintoina. Liiallinen ravinto johtaa lopulta vesistöjen happikatoon ja muutoksiin ekosysteemeissä.

Laiva on edullinen rahdinkuljetusmuoto, kun kuljetetaan iso määrä lastia kerrallaan. Koska alukset käyttävät raskasta polttoainetta, joka on raakaöljyteollisuuden ns. sivutuote, kuljetuskustannukset ovat pienemmät kuin käytettäisiin maantieliikennettä. Ei ole järkevää kuljettaa kolmeasataa traileria tavaraa puoliperävaunuyhdistelmässä, jolloin jouduttaisiin käyttämään 300:aa työntekijää, kun laivaa käyttäessä riittää aluksen minimimiehitys ja satamissa lasti saadaan kyytiin/pois satamatyöntekijöiden avulla jotka, operoivat mm. vetomestareita.

Vaikka alusliikenteen rikin ja typen oksidipäästöt ovat huimat, kuten tutkimuksesta kävi ilmi, pysyy tämä kuljetusmuoto silti hyvässä kilpailevassa asemassa. Niin kauan kun laki ei velvoita tekemään radikaaleja muutoksia päästöjen vähentämiseksi, niitä ei ole tiedossa, koska jokainen rahtiajasta tavarantoimittajaan haluaa rahdin kustannustehokkaammin perille määränpäähensä. Laivaliikenteen kilpailuasema on hyvässä asemassa rahdin kuljetuksissa.

Koska laivaliikenteen polttoaineenkulutus on kokonaisuudessaan korkea, rikittömiin polttoaineisiin siirtyminen ei ole edullisin tapa laskea päästörajoja. Kun halutaan vähentää alusliikenteen päästömääriä, on vaikutuksia mietittävä pidemmällä tähtäimellä. Tämän vuoksi muutoksia ei voida saada aikaiseksi lyhyellä aikavälillä. Liian nopea lasku voi ajaa alusliikenteen jonkinasteiseen kriisiin, mikä sitten taas lisää muiden kuljetusmuotojen käyttöä. Siitä seuraa päästöjen kokonaiskasvu, kuljetuskustannusten nousu ja lopulta kulutustuotteiden hintojen nousu.

## LÄHTEET

1. Cofala, J., Amann, M., Heyes, C., Wagner, F., Klimont, Z., Posch, M., Wolfgang, S., Leonor, T., Jonson, J. E., Whall, C., Stavrakaki, A., 2007. Analysis of Policy Measures to Reduce Ship Emissions in the Context of the Revision of the National Emissions Ceilings Directive. European Commission, DG Environment, Unit ENV/C1 Contract No 070501/2005/419589/MAR/C1
2. Hanhijärvi, M., 2009. Background paper for a project initiative on ship emissions in the BSR. The Baltic Institute of Finland. 20.10.2009
3. Prevention of Air Pollution from Ships. IMO, 2010. Saatavissa: [http://www.imo.org/environment/mainframe.asp?topic\\_id=233#annexvi](http://www.imo.org/environment/mainframe.asp?topic_id=233#annexvi). (viitattu 23.11.2010)
4. Pedersen, M. F., 2008. International: IMO Marine Engine Regulations. Saatavissa: <http://www.dieselnets.com/standards/inter/imo.php>. (viitattu 23.11.2010)
5. Parviala, A., YLE Uutiset, 2010. Suomi jarruttaa laivojen päästöleikkauksia. Saatavissa: [http://yle.fi/uutiset/talous\\_ja\\_politiikka/2010/09/suomi\\_jarruttaa\\_laivojen\\_paastoleikkauksia\\_1983235.html](http://yle.fi/uutiset/talous_ja_politiikka/2010/09/suomi_jarruttaa_laivojen_paastoleikkauksia_1983235.html) (viitattu 23.11.2010)
6. Karttunen, H., Koistinen, J., Saltikoff, E., Manner, O., 2008. Ilmakehä, sää ja ilmasto. Helsinki: Urso.
7. Nivaldo J. Tro, 2008. Chemistry: A Molecular Approach. U.S: Prentice Hall
8. EPA, 2009. Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides and Particulate Matter, Chapter 3 Impacts of Shipping Emissions on Air Quality, Health and the Environment. USA: EPA.
9. Wikipedia: Alailmakehän otsoni, 2010. Saatavissa: [http://fi.wikipedia.org/wiki/Alailmakeh%C3%A4n\\_otsoni](http://fi.wikipedia.org/wiki/Alailmakeh%C3%A4n_otsoni). (viitattu 23.11.2010)
10. Ilmatieteenlaitos: Itämerta saastuttaa myös ilman kautta tuleva kuormitus, 2001. Saatavissa: <http://ilmatieteenlaitos.fi/uutiset/index.html?A=1&Id=990606621.html>. (viitattu 23.11.2010)
11. Happamoituminen. Saatavissa: <http://www.edu.helsinki.fi/malu/kirjasto/mbl/kemia/happamoituminen.htm>. (viitattu 23.11.2010)
12. Moilanen, E., 1998. Lääketieteen Nobelin palkinto typpioksidin tutkijoille. Saatavissa:

[http://www.duodecimlehti.fi/web/guest/arkisto?p\\_p\\_id=dlehtihaku\\_view\\_article\\_WAR\\_dlehtihaku&p\\_p\\_action=1&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_mode=view&doAsUse-  
rId=hydyejqasavj&\\_dlehtihaku\\_view\\_article\\_WAR\\_dlehtihaku\\_\\_spage=/portlet\\_a  
ction/dlehtihakuartikkeli/viewarticle/action&\\_dlehtihaku\\_view\\_article\\_WAR\\_dleh  
tiha-  
ku\\_tunnus=duo80518&\\_dlehtihaku\\_view\\_article\\_WAR\\_dlehtihaku\\_p\\_frompage=  
uusinnumero.](http://www.duodecimlehti.fi/web/guest/arkisto?p_p_id=dlehtihaku_view_article_WAR_dlehtihaku&p_p_action=1&p_p_state=maximized&p_p_mode=view&doAsUse-<br/>rId=hydyejqasavj&_dlehtihaku_view_article_WAR_dlehtihaku__spage=/portlet_a<br/>ction/dlehtihakuartikkeli/viewarticle/action&_dlehtihaku_view_article_WAR_dleh<br/>tiha-<br/>ku_tunnus=duo80518&_dlehtihaku_view_article_WAR_dlehtihaku_p_frompage=<br/>uusinnumero.) (viitattu 23.11.2010)

13. Vainio, H., Liesivuori, J., Lehtola, M., Louekari, K., Engström, K., Kauppinen, T., Kurppa, K., Riipinen, H., Savolainen, K., Tossavainen, A., 2006. Kemikaalit ja työ. Selvitys työympäristön kemikaaliriskeistä. Helsinki: Työterveyslaitos
14. Ilmanlaatuportaali: Typpidioksidi. Saatavissa:  
<http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/komponentit/no2.html>. (viitattu 23.11.2010)
15. Liikenneministeriö, Liisa, 2008. Rikkidioksidi SO<sub>2</sub>. Saatavissa:  
<http://lipasto.vtt.fi/liisa/so2s.htm>. (viitattu 23.11.2010)
16. Neste tuotteet. Saatavissa:  
<http://www.neste.fi/artikkeli.aspx?path=2589,2655,2710,2821,2944>. (viitattu 23.11.2010)
17. Wikipedia: Rikkidioksidi, 2010. Saatavissa:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Rikkidioksidi>. (viitattu 23.11.2010)
18. Rikkidioksidi, 2008. Saatavissa: <http://overload.ath.cx/overload/Rikkidioksidi>
19. Åkerfelt, T., 2010. Päästöjen hallinta ja säädöt Neste Oilin energialaitoksessa. Opinnäytetyö. Metropolia
20. Wikidipedia: Rikkitrioksidi, 2008. Saatavissa:  
<http://fi.wikipedia.org/wiki/Rikkitrioksidi>. (viitattu 23.11.2010)
21. U.S. Environmental Protection Agency, 2010. Proposal to Designate an Emission Control Area for Nitrogen Oxides, Sulfur Oxides and Particulate Matter.
22. Saatavissa: <http://www.vastavalo.fi/pakokaasu-savu-saaste-dieselin-yskaisy-117742.html>. (viitattu 23.11.2010)
23. Ympäristöministeriö, 2010. Ilma. Saatavissa:  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=105&lan=fi>. (viitattu 23.11.2010)
24. Ympäristöministeriö: Happamoituminen, 2010. Saatavissa:  
<http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=101&lan=fi>. (viitattu 23.11.2010)

25. The World Bank Group, 1998. Pollution Prevention and Abatement Handbook.
26. Luukko, K., 2009. Havaintoja meriveden happamoitumisesta. Saatavissa: <http://planeetta.wordpress.com/2009/01/04/havaintoja-meriveden-happamoitumisesta/>. (viitattu 23.11.2010)
27. Kågeson, P., 2009. Market-based Instruments for NOx abatement in the Baltic Sea.
28. WWF: Rehevöityminen, 2009. WWF. Saatavissa: [http://www.wwf.fi/ymparisto/meret\\_sisavedet/rehevoityminen/](http://www.wwf.fi/ymparisto/meret_sisavedet/rehevoityminen/). (viitattu 23.11.2010)
29. Itämeren rehevöityminen. Saatavissa: <http://matwww.ee.tut.fi/ymparistoverkko/galleria/pyynikki-97/itameri.html>. (viitattu 23.11.2010)
30. Breathing Earth: Simpukoista apu Itämeren puhdistukseen, 2009. Saatavissa: <http://breathingearth.wordpress.com/2009/07/25/simpukoista-apu-itameren-puhdistukseen/>. (viitattu 23.11.2010)
31. WWF: Itämeren suojeleohjelman toimet jäljessä aikataulusta, 2010. Saatavissa: [http://www.wwf.fi/tiedotus/tiedotteet/tiedotteet\\_2010/itameren\\_suojeleohjelman\\_toimet.html](http://www.wwf.fi/tiedotus/tiedotteet/tiedotteet_2010/itameren_suojeleohjelman_toimet.html). (viitattu 23.11.2010)
32. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=15125&lan=fi>. (viitattu 23.11.2010)
33. Ympäristöministeriö: Happamoittavat päästöt ilmaan, 2010. Saatavissa: <http://www.ymparisto.fi/default.asp?node=667&lan=fi>. (viitattu 23.11.2010)
34. Saatavissa: <http://www.elkcountyfreshwater.org/watershed/education.php?mo=7&yr=2010>. (viitattu 23.11.2010)
35. Pykäläinen, M., 1999. Happamoituminen. Saatavissa: <http://www.sbk-ceb.net/mapy/era/Misc/happamoituminen.html>. (viitattu 23.11.2010)
36. Myrberg Kai & Raateoja Mika. Itämeren peruskuvaukset. Saatavissa: [http://www.itameriportaali.fi/fi/tietoa/yleiskuvaukset/peruskuvaukset/fi\\_FI/peruskuvaukset/](http://www.itameriportaali.fi/fi/tietoa/yleiskuvaukset/peruskuvaukset/fi_FI/peruskuvaukset/). (viitattu 23.11.2010)
37. Saatavissa: [http://maps.grida.no/go/graphic/acid\\_rain\\_in\\_europe](http://maps.grida.no/go/graphic/acid_rain_in_europe). (viitattu 23.11.2010)
38. Ophardt Charles E., 2003. Acid rain effects. Saatavissa: <http://www.elmhurst.edu/~chm/vchembook/196buildings.html>. (viitattu 23.11.2010)

39. U.S. Environmental Protection Agency, 2008. Integrated Science Assessment for Sulfur Oxides – Health Criteria. U.S: EPA
40. Kansainväliset kemikaalikortit, 2008, Typpioksidi ICSC: 1311. Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin1311.htm>. (viitattu 23.11.2010)
41. Kansainväliset kemikaalikortit, 2003, Typpidioksidi ICSC: 0930. Saatavissa: <http://kappa.ttl.fi/kemikaalikortit/khtml/nfin0930.htm>. (viitattu 23.11.2010)
42. Commission proposes clean air strategy to protect human health and the environment, 2005. Saatavissa: <http://europa.eu/rapid/pressReleasesAction.do?reference=IP/05/1170>. (viitattu 23.11.2010)
43. Chapter 5 Environmental and Health Impacts. Moniste
44. EU directive 2008/50/EC, 2008. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:32008L0050:en:NOT>. (viitattu 23.11.2010)
45. Ilmatieteen laitos: Otsonia syntyy troposfäärin valokemiallisissa reaktioissa. Saatavissa: [http://ilmatieteenlaitos.fi/tutkimus\\_otsoni/otsoni\\_32.html](http://ilmatieteenlaitos.fi/tutkimus_otsoni/otsoni_32.html). (viitattu 23.11.2010)
46. Tarvainen V., 2008. Otsoni ilmansaasteena. Saatavissa: [http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/tietosivut/otsoni\\_ilmansaasteena.php](http://www.ilmanlaatu.fi/ilmansaasteet/tietosivut/otsoni_ilmansaasteena.php). (viitattu 23.11.2010)
47. Wikipedia: Savusumu, 2010. Saatavissa: <http://fi.wikipedia.org/wiki/Savusumu>. (viitattu 23.11.2010)
48. U.S. Environmental Protection Agency, 2007. Effects of Acid Rain – Human Health. Saatavissa: <http://www.epa.gov/acidrain/effects/health.html>. (viitattu 23.11.2010)
49. IMO. About Imo. Saatavissa <http://www.imo.org>. (viitattu 23.11.2010)
50. Trafi: MARPOL 73/78 – yleissopimus. Saatavissa: [http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston\\_suojelu/marpol\\_73\\_78\\_-\\_yleissopimus](http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston_suojelu/marpol_73_78_-_yleissopimus). (viitattu 23.11.2010)
51. Trafi: Liite VI ilmansuojelu. Saatavissa: [http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston\\_suojelu/marpol\\_73\\_78\\_-\\_yleissopimus/liite\\_vi\\_ilmansuojelu](http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston_suojelu/marpol_73_78_-_yleissopimus/liite_vi_ilmansuojelu). (viitattu 23.11.2010)
52. Kämäräinen, J., 2008. Ajankohtainen kansainvälinen säädöstilanne. Pdf esitelmä. (Viitattu 23.11.10)



53. Syri S., Lehtilä, A., 2003. Kasvihuonekaasujen päästöjen vähentämisen vaikutus muihin ilmansaasteisiin. Espoo: VTT
54. Trafi: Aluksia koskevia EU:n ympäristönsuojelumääräyksiä. Saatavissa:  
[http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston\\_suojelu/eu\\_n\\_ymparistonsuojelumaara\\_yksia](http://www.trafi.fi/merenkulku/ympariston_suojelu/eu_n_ymparistonsuojelumaara_yksia). (viitattu 23.11.2010)
55. WWF: Itämeren suojelusopimus, 2009. Saatavissa:  
[http://www.wwf.fi/ymparisto/meret\\_sisavedet/merten\\_suojelupolitiikka/itameren\\_suojelusopimus.html](http://www.wwf.fi/ymparisto/meret_sisavedet/merten_suojelupolitiikka/itameren_suojelusopimus.html). (viitattu 23.11.2010)
56. Jalkanen, J-P., Stipa, T., Helsinki commission, Maritime Group, Eighth Meeting, Lübeck, Germany 24-26.11.2009. Emissions from Baltic Sea Shipping in 2008. Yhteenveto saatavissa:  
[http://www.helcom.fi/BSAP\\_assessment/ifs/ifs2009/en\\_GB/Ship\\_emissions\\_in\\_Baltic\\_Sea\\_Area\\_in\\_2008/](http://www.helcom.fi/BSAP_assessment/ifs/ifs2009/en_GB/Ship_emissions_in_Baltic_Sea_Area_in_2008/). (viitattu 23.11.2010)
57. Stipa, T., Jalkanen, J-P., Hongisto, M., Kalli, J., Brink A., 2007. Emissions of NOx from Baltic Sea Shipping and First Estimates of Their Effects on Air Quality and Eutrophication of the Baltic Sea
58. Kuljetusopas: Vesiliikenteen kalusto. Saatavissa:  
<http://www.kuljetusopas.com/kalusto/vesiliikennekalusto/>. (viitattu 23.11.2010)
59. Laivaliikenteen yksikköpäästöjen määrittäminen, 2009. Saatavissa:  
[http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/vesiliikenne/maaritysperusteet\\_tavara\\_vesi.htm](http://lipasto.vtt.fi/yksikkopaastot/tavaraliikenne/vesiliikenne/maaritysperusteet_tavara_vesi.htm). (viitattu 23.11.2010)
60. Kuisma, J., Tervonen, J., Happonen, K., Kovasin, M., Pokela, J., 2009. Laivaliikenne ja sen vaikutukset Itämerellä. Moniste
61. EU Sulphur Directive 2005/33/EC. Saatavissa:  
[https://www.bimco.org/en/Members/News/2009/2009/12/23\\_EU\\_Sulphur\\_Directive.aspx](https://www.bimco.org/en/Members/News/2009/2009/12/23_EU_Sulphur_Directive.aspx). (viitattu 23.11.2010)
62. Itämeriportaali: Itämeren suojelu on yhteistyötä. Saatavissa:  
[http://www.itameriportaali.fi/fi/suojelu/fi\\_FI/suojelu/](http://www.itameriportaali.fi/fi/suojelu/fi_FI/suojelu/). (viitattu 23.11.2010)
63. Silja Serenade, Tietosivut, Tekniset Tiedot. Saatavissa:  
[http://sere.toppeli.com/tekniset\\_tiedot](http://sere.toppeli.com/tekniset_tiedot). (viitattu 23.11.2010)
64. Ympäristöministeriö: Tiivistelmä. Saatavissa:  
<http://www.ymparisto.fi/download.asp?contentid=11525&lan=FI> pdf. (viitattu 23.11.2010)

## LIITTEET

## LIITE 1

## Laiva 1

<b>Ropax, 18 solmua, trailerikapasiteetti 300</b>		CO	HC	NO <sub>x</sub>	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> ekv.	Polttonesteen kulutus	Energian kulutus [MJ]
[g/laiva km]		209	44	5 164	118	95	21	7	2 137	251 791	254 401	79 024	3 240
[g/trailerikm]		0.73	0.15	18	0.41	0.33	0.072	0.025	7,50	881	890	277	11
[g/tkm]		0.06	0.013	1.50	0.035	0.028	0.0061	0.0021	0.63	74	75	23	1.0

Traileri-			Teho				Ominaiskulutus		Rikkipitoisuus	
kapasiteetti	GT	DWT	Pää-koneet	Nopeus	Matka		Pääko- neet	Apuko- neet	HFO	MGO
[kpl]	[t]	[t]	[kW]	[solmua]	[km]		[g/kWh]	[g/kWh]	[m-%]	[m-%]
300	40 000	8 000	44 000	18	1 300		190	210	1,45	0.10

## Puoliperävaunun yhdistelmän NOx ja SOx päästöt

**SOx [g/km]**

	Tyhjä rekka	17.5 tonnin kuorma	25 tonnin kuorma
--> 1993	0.0049	0.0062	0.0067
EURO 1 (1994 - 1996)	0.0050	0.0063	0.0068
EURO 2 (1997 - 2000)	0.0051	0.0064	0.0069
<b>EURO 3 (2001 - 2006)</b>	<b>0.0052</b>	<b>0.0065</b>	<b>0.0071</b>
EURO 4 (2007 - 2008)	0.0051	0.0064	0.0069
EURO 5 (2009 --> )	0.0051	0.0064	0.0069
EURO 6			
keskimäärin v. 2008	0.0051	0.0064	0.0070

**NOx [g/km]**

	Tyhjä rekka	17,5 tonnin kuorma	25 tonnin kuorma
--> 1993	15	18	19
EURO 1 (1994 - 1996)	10	12	13
EURO 2 (1997 - 2000)	8,7	11	12
<b>EURO 3 (2001 - 2006)</b>	<b>5,8</b>	<b>7,1</b>	<b>7,7</b>
EURO 4 (2007 - 2008)	3,6	3,9	4,0
EURO 5 (2009 --> )	2,3	2,6	2,7
EURO 6			
keskimäärin v. 2008	6,8	8,3	8,9

--> 1993 = vuosimalli 1993 ja vanhemmat
EURO 1 = vuosimallit 1994 - 1996
EURO 2 = vuosimallit 1997 - 2000
EURO 3 = vuosimallit 2001 - 2006
EURO 4 = vuosimallit 2007 - 2008
EURO 5 = vuosimalli 2009 ja uudemmat
EURO 6

Laiva 2

Roro, 18 solmua, trailerikapasiteetti 150		CO	HC	NOx	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2,5</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub> O	SO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub>	CO <sub>2</sub> ekv	Polttonesteen kulutus	Energi- an kulu- tus [MJ]
[g/laiva km]		158	32	3 957	94	75	16	5,30	1 713	190 762	192 750	59 844	2 454
[g/trailerikm]		1,30	0,27	33	0,78	0,62	0,13	0,045	14	1 590	1 606	499	20
[g/tkm]		0,11	0,022	2,80	0,066	0,052	0,011	0,0037	1,20	134	135	42	1,70

Traileri- kapasiteetti	GT	DWT	Teho Pääko- neet	Nopeus [sol- mua]	Matka [km]	Ominaiskulutus		Rikkipitoisuus	
[kpl]	[t]	[t]	[kW]			Pääko- neet [g/kWh]	Apuko- neet [g/kWh]	HFO [m-%]	MGO [m-%]
150	18 000	10 000	15 000	18	1 300	190	210	1,45	0,10