

Arktisen laivaliikenteen päästöt muuttuvassa ilmastossa

Vesa Vihanninjoki
Suomen ympäristökeskus
2.10.2015

Esityksen rakenne

- Työn tarkoitus
- 1. Arktinen ilmastonmuutos
 - Lämpötilakehitys
 - Merijään vetäytyminen
- 2. Merenkulku muuttuvassa Arktikassa
 - Jää- ja sääolojen muutokset
 - Arktisen merenkulun kehittymisen haasteet
- 3. Arktisesta laivaliikenteestä aiheutuvat päästöt
 - Päästölajit ja arktisuuden relevanssi
 - Päästöjen määrä ja merkitys nyt ja tulevaisuudessa
 - Päästövähennykset
- Yhteenveto

Työn tarkoitus

- Lähtökohta: arktisen merenkulun puitteet ovat muuttumassa
 1. Arktinen ilmasto muuttuu ja arktinen merijää sulaa
 2. Arktisen merijään sulaminen avaa uusia liikennöintimahdollisuuksia, mikä voi johtaa arktisen laivaliikenteen lisääntymiseen
 3. Arktisen laivaliikenteen lisääntymisen seurauksena arktisen alueen päästöjen määrä kasvaa
 4. Päästöjen määrän kasvulla voi olla huomattavia ilmastollisia, ympäristöllisiä ja terveydellisiä vaikutuksia
 5. Arktisessa kontekstissa erityisesti musta hiili -päästöillä voi olla ilmastoja lämmittäviä vaikutuksia
- Tarkoituksena on luoda yleiskatsaus arktisen merenkulun olosuhteisiin muuttuvassa arktisessa ilmastossa ja arvioida lisääntyvästä laivaliikenteestä aiheutuvia ilmastovaikutuksia
- Kalvosarja perustuu julkaisuun *Arctic Shipping Emissions in the Changing Climate* (Reports of the Finnish Environment Institute 41/2014)

1. Arktinen ilmastonmuutos

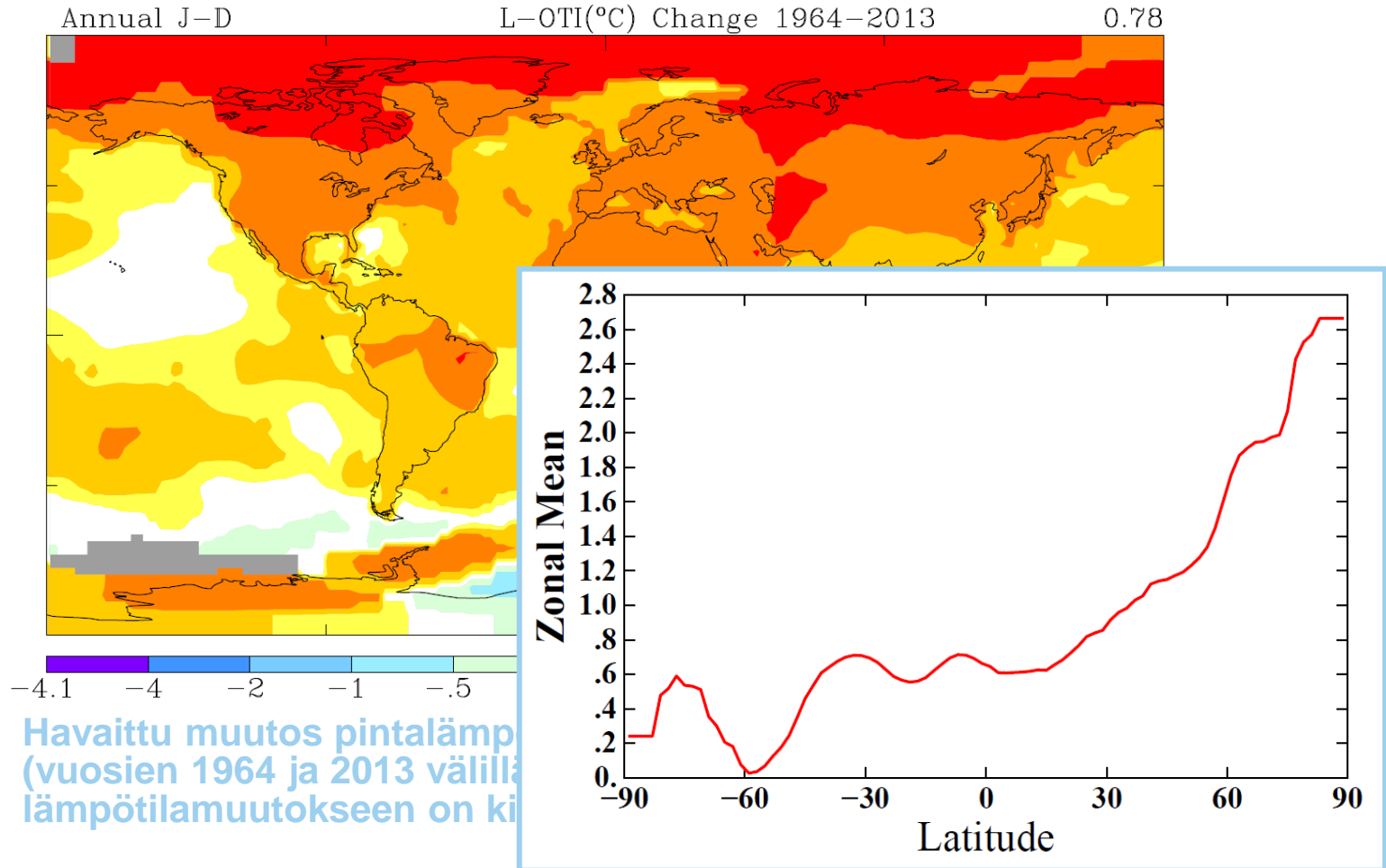
Mikä on keskeisintä arktisen ilmastonmuutoksen ymmärtämisessä ja hillitsemisessä?

Ensimmäisen osion pääasialliset lähteet:

- ACIA 2005
- AMAP 2011b
- IPCC 2013

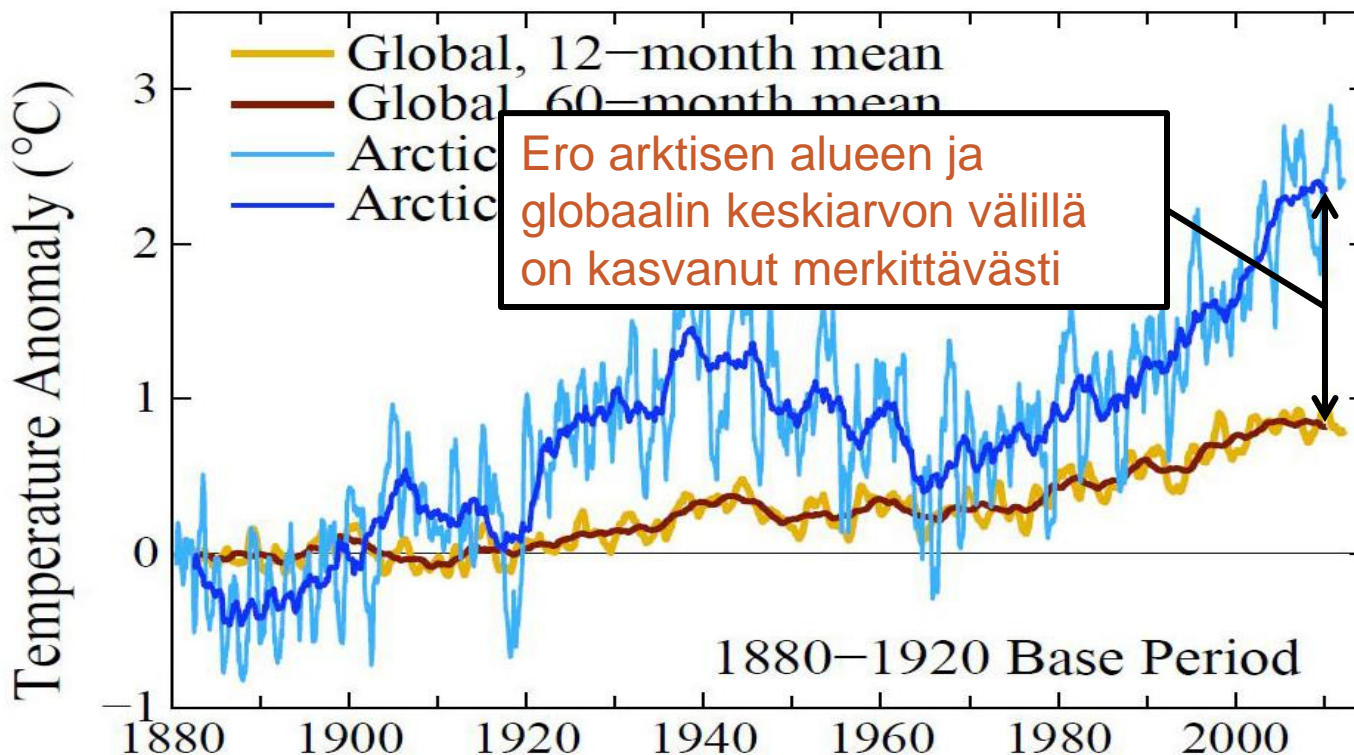
Arktinen ilmasto lämpenee globaalia keskiarvoa huomattavasti nopeammin

Havaittu muutos pintalämpötiloissa viimeisten 50 vuoden aikana



Arktinen ilmasto lämpenee globaalia keskiarvoa huomattavasti nopeammin

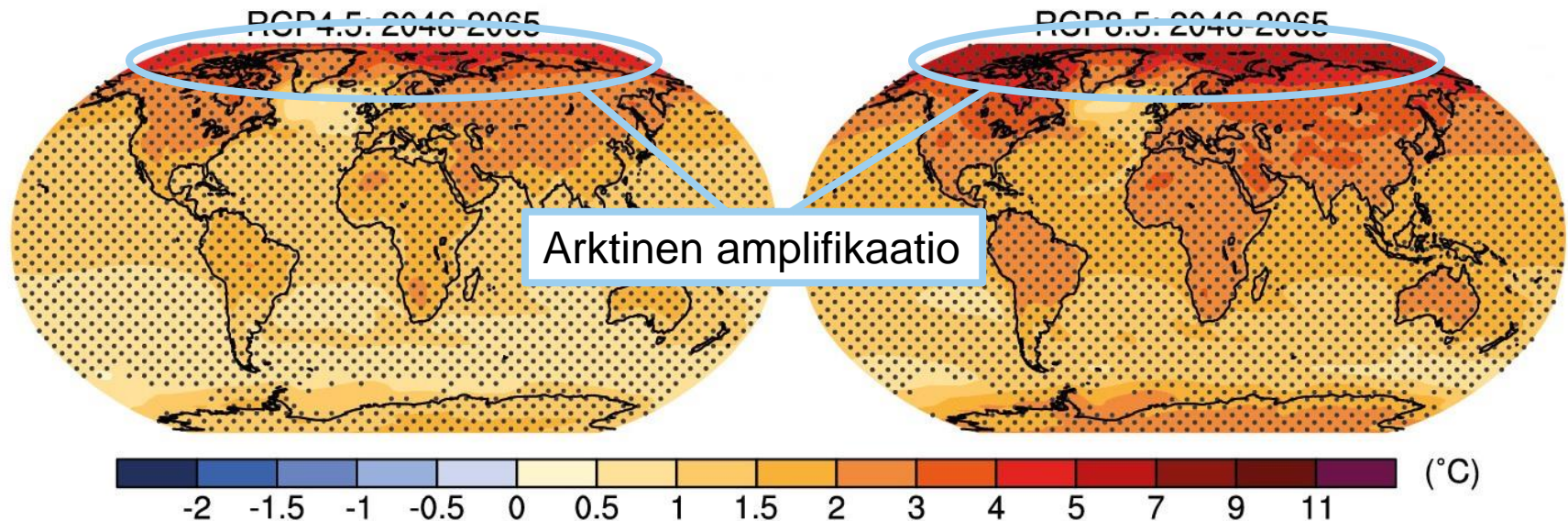
Lämpötilakeskiarvojen poikkeama vuosien 1880-1920 keskiarvosta arktisella alueella ja globaalisti



12 ja 60 kuukauden lämpötilakeskiarvojen poikkeama vuosien 1880-1920 keskiarvosta arktisella alueella (vaalean ja tumman siniset käyrät) ja globaalisti (vaalean ja tumman ruskeat käyrät). Arktisen alueen erityiskehitys (arktinen amplifikaatio) 1900-luvun puolivälistä lähtien näkyy kuvaajasta selvästi. Lähde: Sato 2014.

Arktinen amplifikaatio näkyy selvästi ilmastomallinnuksissa

- Arktisen alueen lämpenemisen nopeus riippuu oleellisesti globaaleista päästötasoista
- Loppusyksyn keskilämpötila tulee nousemaan 7-12 °C vuosisadan loppuun mennessä päästöskenaariosta riippuen (RCP4.5 vs. RCP8.5) (Overland et al. 2013)



Pintalämpötilojen vuosittaisen keskiarvon ennustettu muutos aikavälille 2046-2065 kahdessa eri päästöskenaarioissa (RCP4.5 ja RCP8.5) IPCC:n viidettä arviointiraporttia mukailien. Lähde: IPCC 2013.

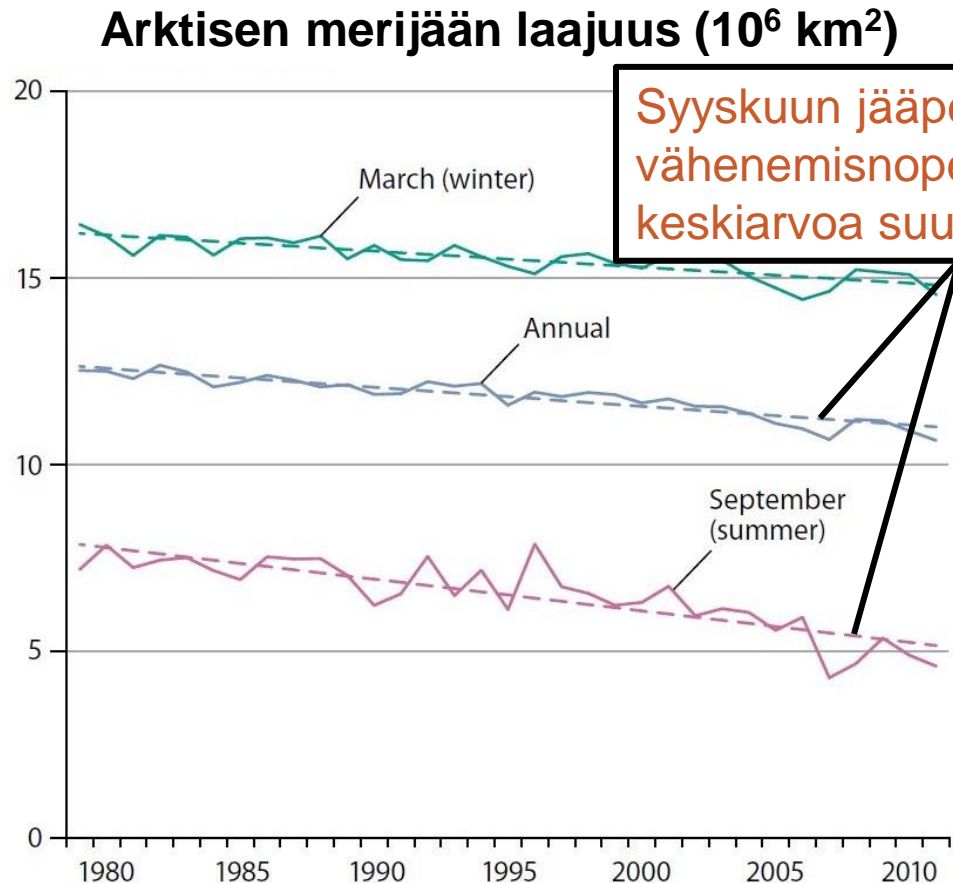
Arktisen alueen jäätiköt sulavat osana ilmastonmuutosta

- Merijään sulaminen ei suoraan nosta merenpinnan korkeutta, mutta ilmiöllä on huomattavia ilmastollisia vaikutuksia
- Lämpötilamuutokset ja muutokset merijäässä ovat vuorovaikutteisessa yhteydessä toisiinsa
 - Arktisen ilmaston ja arktisen alueen jäätiköiden kehitystä ei voi käsitellä toisistaan erillisinä ilmiöinä
 - Lämpötilan kohoaminen johtaa jääpeitteen sulamiseen, mutta myös jääpeitteen sulaminen johtaa lämpötilan kohoamiseen
 - Lisäksi muutokset inhimillisessä toimintaympäristössä ja tämän seurauksena ihmisen toiminnasta aiheutuvat välilliset ilmastovaikutukset

Arktisen merijään vetäytyminen

1. Jääpeitteen kokonaislaajuus ja kokonaispinta-ala vähenevät
2. Jääpeitteestä tulee keskimäärin nuorempaa ja ohuempaa
3. Jääpeitteen vuosittainen kesto lyhenee
4. Merijään vetäytyminen keskittyy erityisesti kesäaikaan ja loppukesään (syyskuulle)

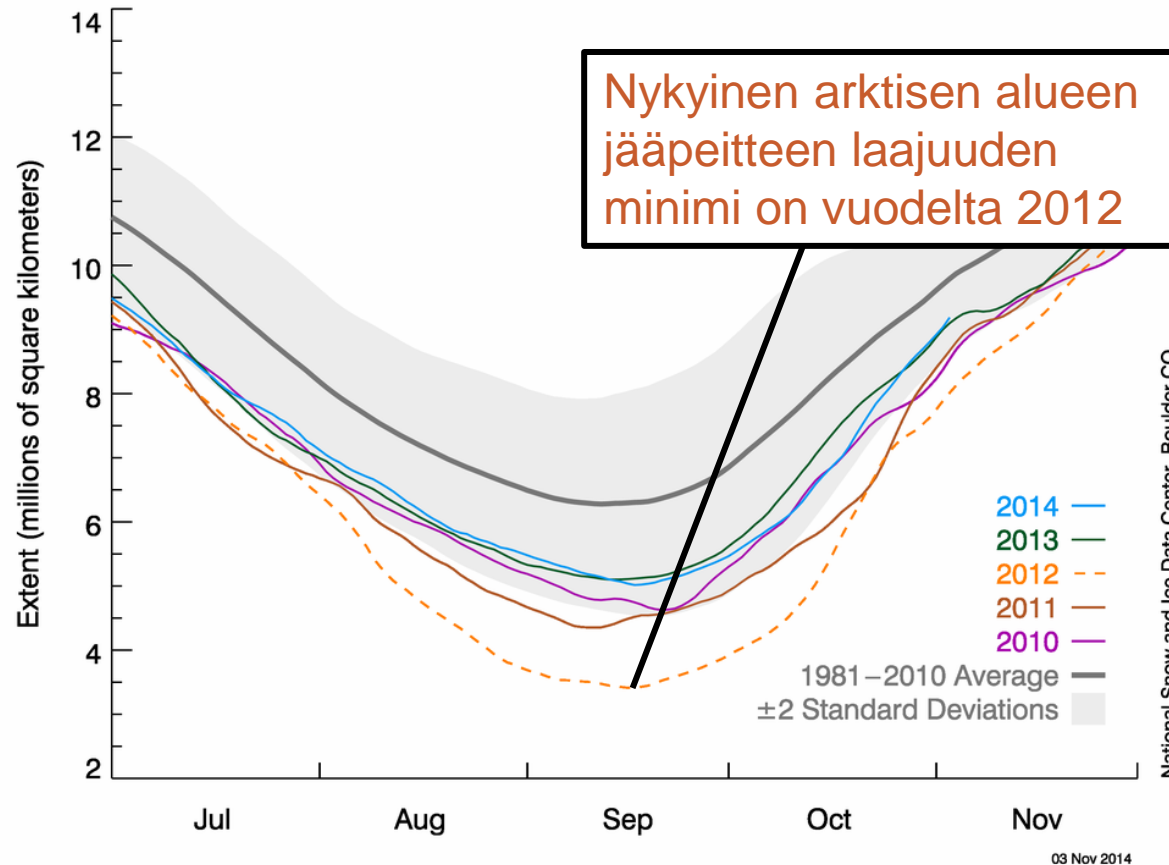
Arktisen merijään kokonaislaajuus pienenee



Keskimääräinen merijään laajuus arktisella alueella loppupalvesta (maaliskuussa), loppukesästä (syyskuussa) ja vuosittain 1979-2010. Arktisen merijääpeitteen vetäytyminen keskittyy kesäaikaan. Lähde: AMAP 2011b.

Viime vuosien loppukesän jääpeitteen laajuus on ollut systemaattisesti kolmenkymmenen vuoden keskiarvoa pienempi

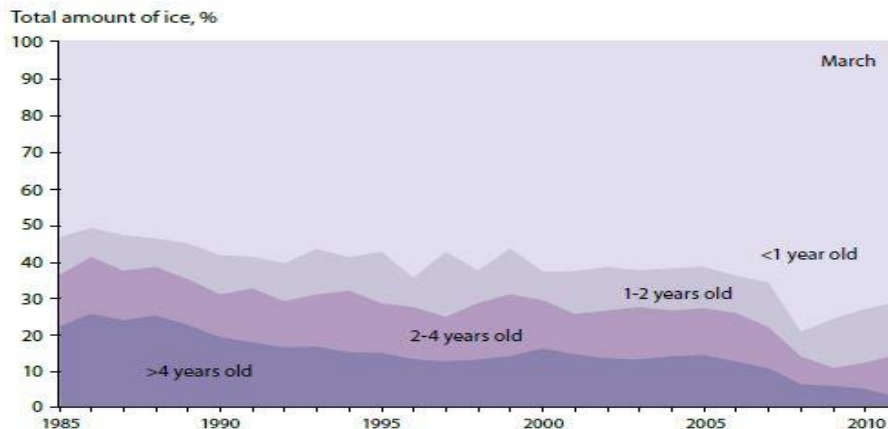
Arktisen jääpeitteen laajuus



Arktisen jääpeitteen laajuus vuosina 2010-2014 (värilliset käyrät) ja vuosien 1981-2010 välisen ajan keskiarvo (harmaa käyrä).
Lähde: NSIDC 2014.

Arktisen alueen merijään koostumus muuttuu

Arktisen merijään ikäjakauma



March 1985



March 2011



Arktisen alueen merijään ikäjakauma ajan funktiona ja eri ikäisen jään maantieteellinen sijoittuminen maaliskuussa vuosina 1985 ja 2011. Lähde: AMAP 2011b.

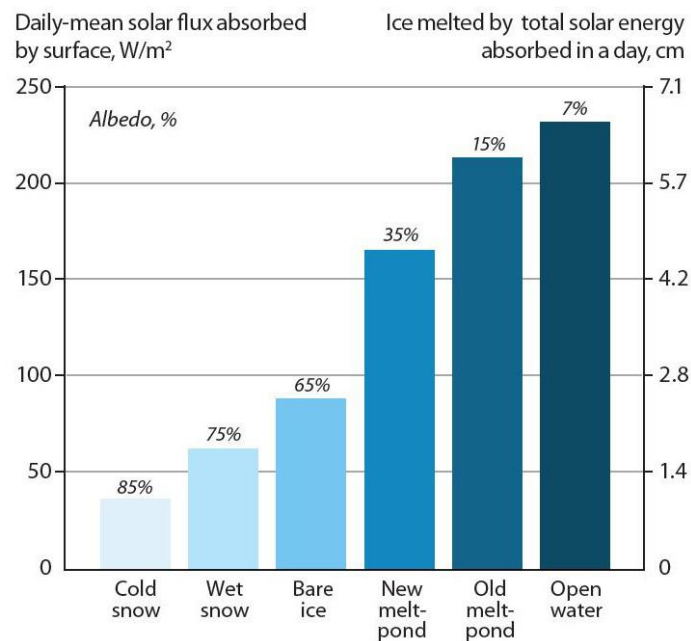
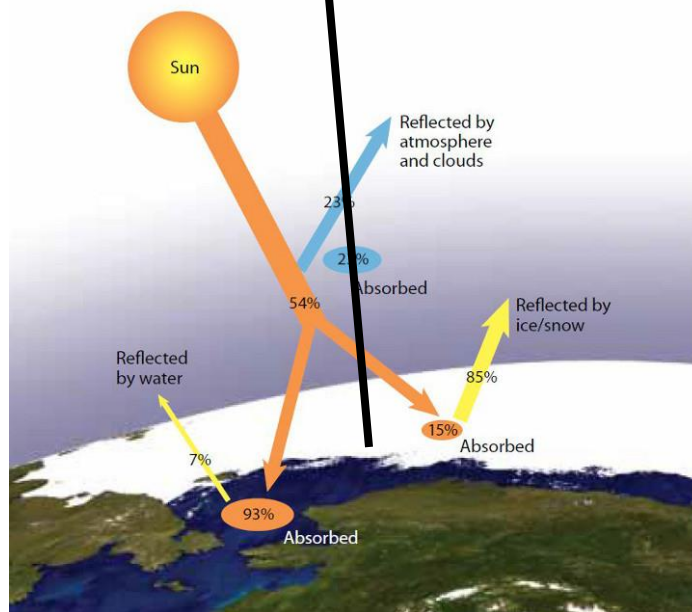
Kesän yli säilyvän monivuotisen jään määrä on vähentynyt kaikista eniten, ja samalla sen suhteellinen osuus on laskenut

Talviajan jääpeitteen laajuus ei ole merkittävästi vähentynyt (vuosien 1985 ja 2011 välillä), mutta sen koostumus on muuttunut

Pinnan laatu vaikuttaa oleellisesti auringon säteilyn heijastumiseen ja absorptioon

Lumi- ja jääpeitteen sulaminen lisää absorboituneen energian määrää ja johtaa lämpötilan kohoamiseen

Lämpötilan nousu ja jääpeitteen sulaminen muodostavat prosessin, joka vahvistaa itse itseään (positiivinen takaisinkytkentä)



Auringon säteilyenergian heijastumiseen ja absorptioon arktisella alueella keskeisesti vaikuttavat tekijät. Lähde: AMAP 2011b.

2. Merenkulku muuttuvassa Arktikassa

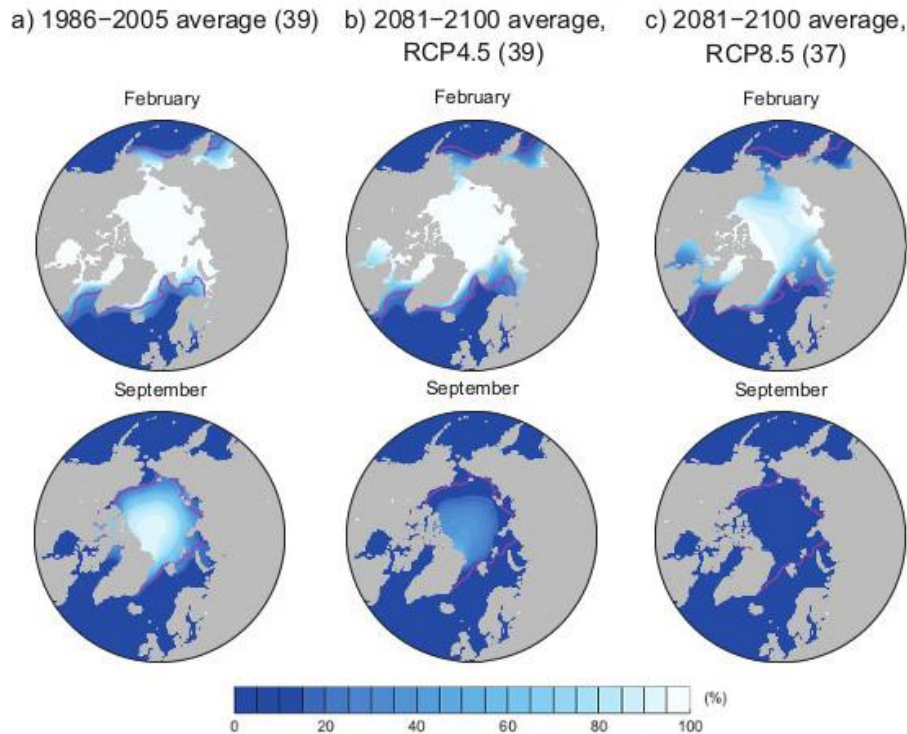
Kuinka arktinen ilmastonmuutos vaikuttaa arktisen merenkulun olosuhteisiin ja mahdollisuuksiin?

Toisen osion pääasialliset lähteet:

- AMSA 2009
- IPCC 2013
- Østreng et al. 2013

Arktinen ilmastonmuutos vaikuttaa arktisen merenkulun mahdollisuuksiin

Arktisen alueen jääpitoisuudet



Arktisen alueen jääpitoisuudet helmi- ja syyskuussa IPCC:n käyttämien CMIP5-mallien keskiarvojen mukaisesti vuosille 1986-2005 (a), sekä vuosille 2081-2100 päästöskenaarioissa RCP4.5 (b) ja RCP8.5 (c). Mukailten lähde: IPCC 2013.

Arktisen merijään vetäytyminen määrittelee arktisen merenkulun yleiset edellytykset 2000-luvulla
→ Uusia liikennöintimahdollisuuksia

Jään määrän väheneminen voi lisätä laivaliikennettä arktisella alueella huomattavasti ja houkuttaa alueelle monia täysin uusia operoijia
→ Ympäristö- ja turvallisuusrisikit

Ilmastonmuutos vaikuttaa merijään lisäksi myös merenkulkuoloihin yleisemmällä tasolla
→ Sää ja merisää muuttuvat

Jääpeitteen oletettavasta vetäytymisestä huolimatta arktinen alue pysyy äärimmäisen haastavana merialueena

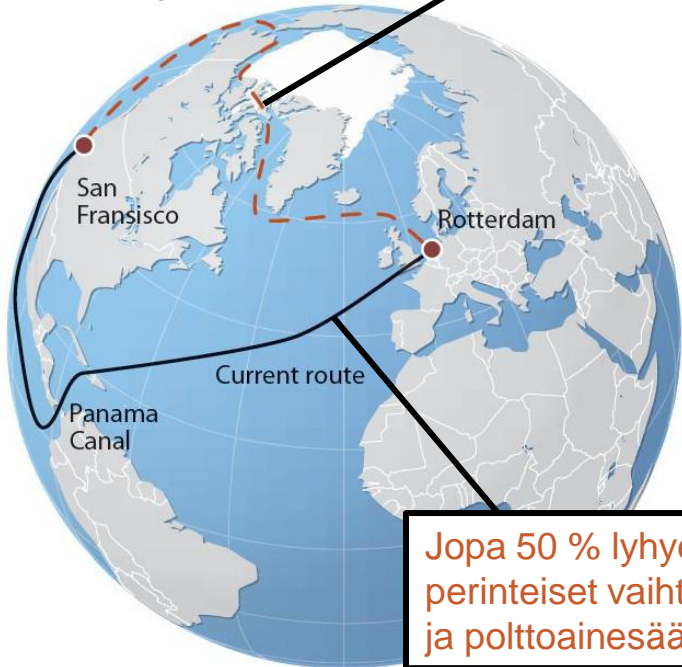
- Jään määrän vähentyminen ei automaattisesti tarkoita suotuisampia olosuhteita merenkululle tai vähentynyttä tarvetta jäänmurtajille
 - Vuotuinen vaihtelu jäätilanteen suhteen on suurta, mikä vähentää reittien luotettavuutta
 - Arktisen ilmaston lämpeneminen johtaa arktisen jään rakenteen murtumiseen, mikä kasvattaa uusien pienten jäävuorten lukumäärää huomattavasti
- Sää- ja merisääolot eivät tule helpottumaan, ja arktisen alueen tietyt ominaispiirteet tulevat pysymään ennallaan
 1. Kylmyys: alusten jäätäminen ja jäätyminen
 2. Huono näkyvyys: kesäsumut ja matalalta paistava aurinko kesällä, pöllyävä lumi ja jatkuva pimeys talvella
 3. Polaarimatalat eli arktiset pyörremyrskyt (nopeasti kehittyvät, vaikeasti ennakoitavat myrskyt)

Transarktiset liikennöintimahdollisuudet tarkoittavat Atlantin valtameren ja Tyynen valtameren välisiä oikoreittejä

Olosuhteet voivat vaihdella huomattavasti ja aiheuttaa merkittäviä hidasteita: säästöt matka-ajassa ja polttoaineen kulutuksessa eivät ole suoraan verrannollisia säästöihin matkan pituudessa

Luoteisväylä

Pohjoinen merentie



Jäänmurtoapu ja mahdolliset läpikulkumaksut lisäävät kustannuksia

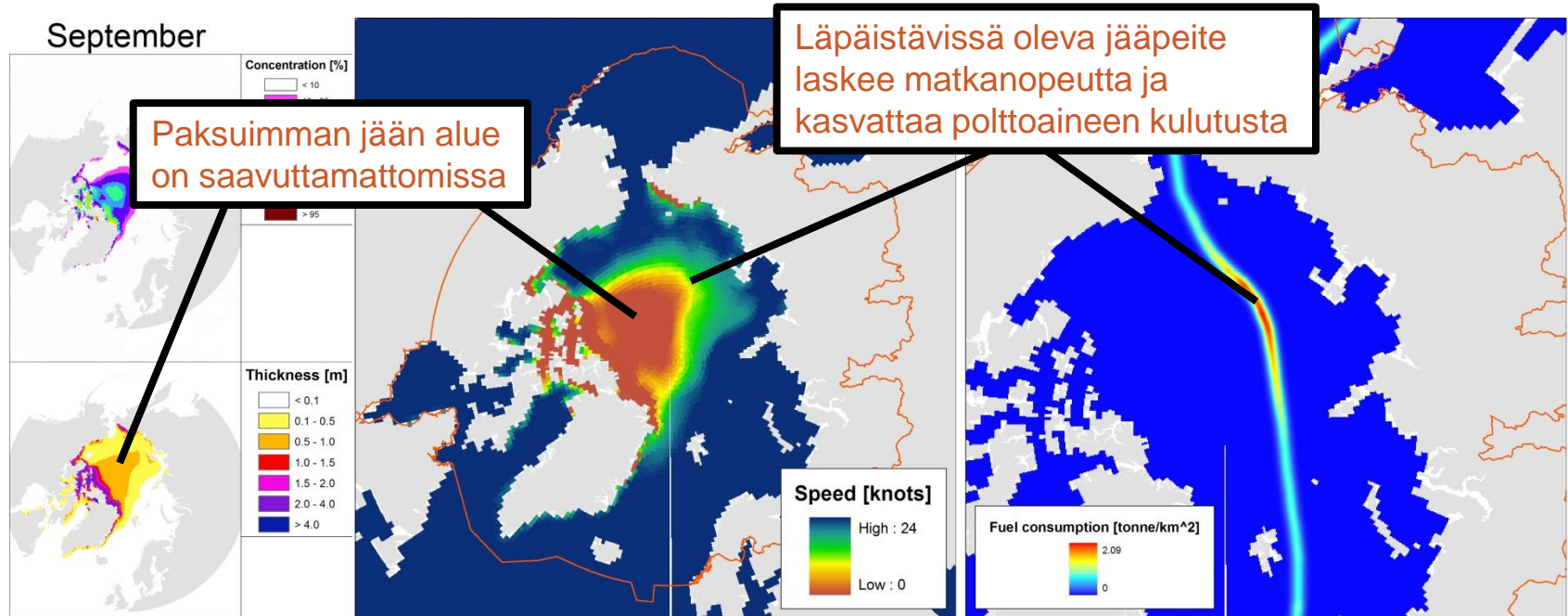
Operoinnin turvallisuuden takaaminen vaatii paljon resursseja

Päästöjä (esim. musta hiili) tulee suoraan arktiselle alueelle

Jopa 50 % lyhyempiä kuin perinteiset vaihtoehdot: aika- ja polttoainesäästöt

Arktisen alueen potentiaaliset oikoreitit: Luoteisväylä (Northwestern Passage) ja Pohjoinen merentie (Northern Sea Route)
Lähde: AMAP 2011b.

Esimerkki toteutettavuusanalyysistä: konttialuksen nopeus ja polttoaineen kulutus jäisissä olosuhteissa



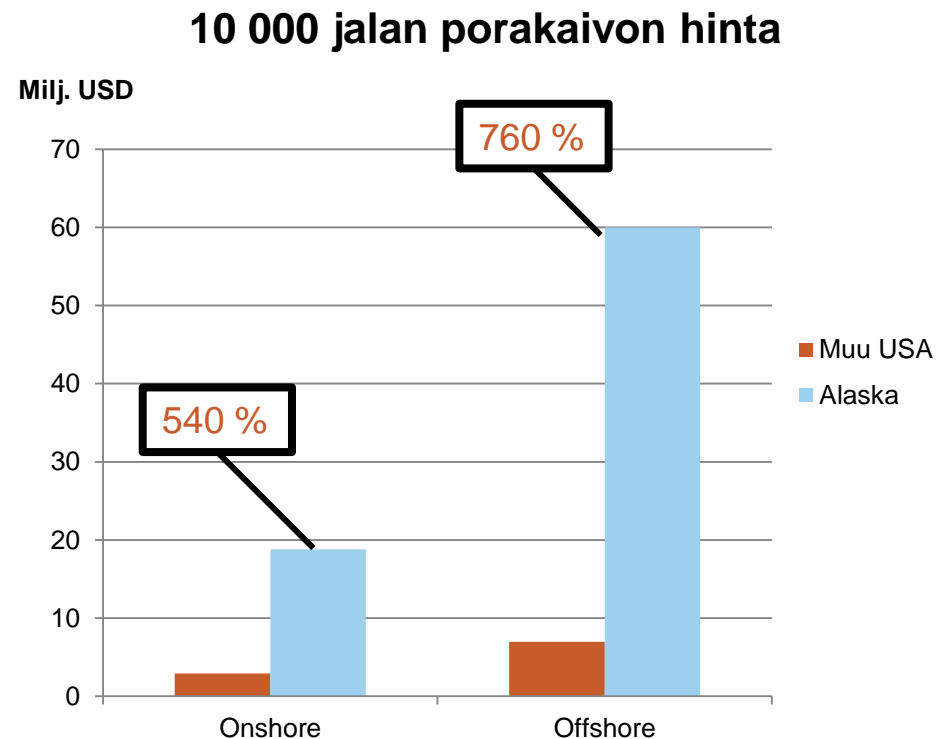
Arvioitu jäätilanne vuoden 2030 syksyllä (SRES A2 BAU-päästöskenaario) ja jäätilanteen perusteella arvioitu matkanopeus sekä polttoaineen kulutus 6500 TEU:n konttialukselle. Lähde: DNV 2010.

Minkälaisissa olosuhteissa transarktisen liikennöinti voisi olla sekä teknisesti että taloudellisesti perusteltua?

- Jääolojen kehitys
- Arktisiin olosuhteisiin soveltuvan kaluston kehittyminen ja saatavuus
- Polttoaineen hinta
- Jäänmurtopalveluiden hinta
- Hallinnollinen status ja turvallisuuskysymykset: rannikkoinfrastruktuuri ja pelastuskalusto
- Kilpailevien reittien kapasiteetti

Jopa viidenneksen maailman kartoittamattomista öljy- ja kaasuvaroista on arvioitu sijaitsevan arktisella alueella

- Arktiset olosuhteet asettavat huomattavia haasteita oletettujen reservien kustannustehokkaalle ja turvalliselle hyödyntämiselle
- Arktisen merijään sulaminen lisää mahdollisuuksia sekä poraukseen merellä että kuljetukseen meriteitse



3. Arktisen laivaliikenteen päästöt

Kuinka paljon ja millaisia päästöjä arktinen laivaliikenne tuottaa nyt ja tulevaisuudessa – ja mikä näiden päästöjen merkitys on ilmastonmuutosta, ympäristön hyvinvointia tai ihmisten terveyttä painottavasta näkökulmasta?

Kolmannen osion pääasialliset lähteet:

- AMSA 2009
- AMAP 2011a
- Buhaug et al. 2009
- Corbett et al. 2010
- Peters et al. 2011
- UNEP 2012
- Winther et al. 2014
- Ødemark et al. 2012

Arktisen laivaliikenteen ja siitä aiheutuvien päästöjen mittaluokka

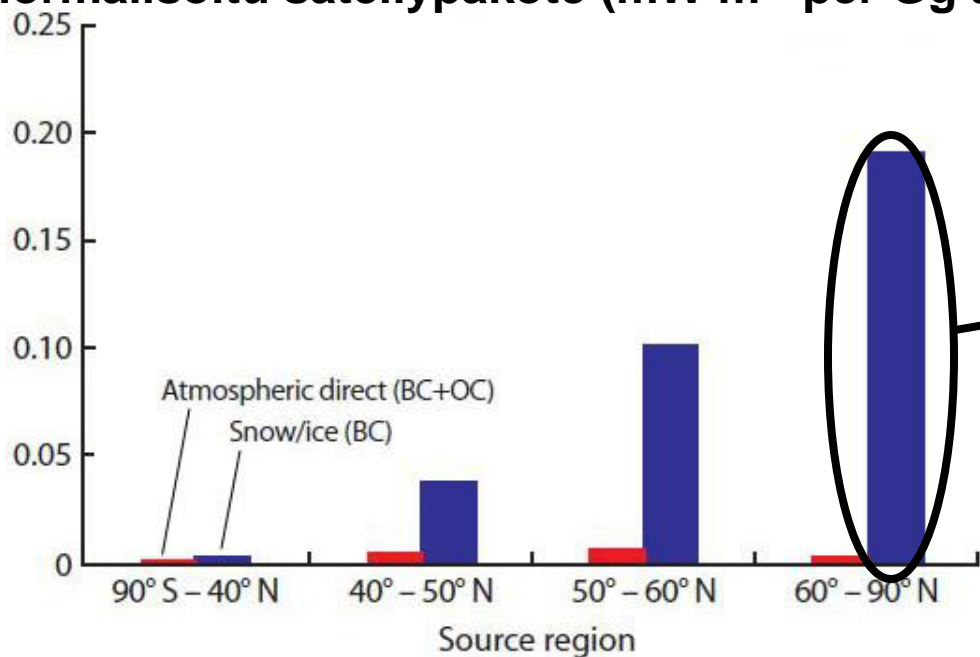
- Globaali laivaliikenne tuotti vuonna 2007 noin 1050 miljoonaa tonnia hiilidioksidipäästöjä (noin 3,3 % kaikista ihmisperäisistä CO₂-päästöistä)
- Arktisen laivaliikenteen osuus tästä on korkeintaan muutaman prosentin luokkaa
 - Arktisen laivaliikenteen CO₂-päästöt ovat ilmastollisesta näkökulmasta lähestulkoon häviävän pieniä (alle promille kaikista ihmisperäisistä päästöistä)
- Myös muiden päästöjen absoluuttinen määrä on verrattain pieni globaalista perspektiivistä arvioituna

Arktisen laivaliikenteen ja siitä aiheutuvien päästöjen määrä voi kasvaa merkittävästi arktisen merijään vetäytymisen myötä

- Arvioiden taustalla huomattava joukko oletuksia arktisen liikennöinnin toteutuskelpoisuudesta
 - Oletukset arktisen merijään ja arktisen alueen merenkulkuolosuhteiden kehityksestä
 - Päästötasojen kohdalla oletukset päästövähennystekniikoiden ja -teknologioiden kehittymisestä ja käyttöönotosta
- Arktisessa ympäristössä absoluuttisesti arvioituna pienet lisäykset päästömäärissä voivat tarkoittaa merkittävää suhteellista lisäystä
- Lyhytikäisten ilmansaastepäästöjen maantieteellisellä sijainnilla on erityisesti merkitystä

Arktisella alueella tapahtuvilla musta hiili -päästöillä voi olla huomattavia ilmastollisia vaikutuksia

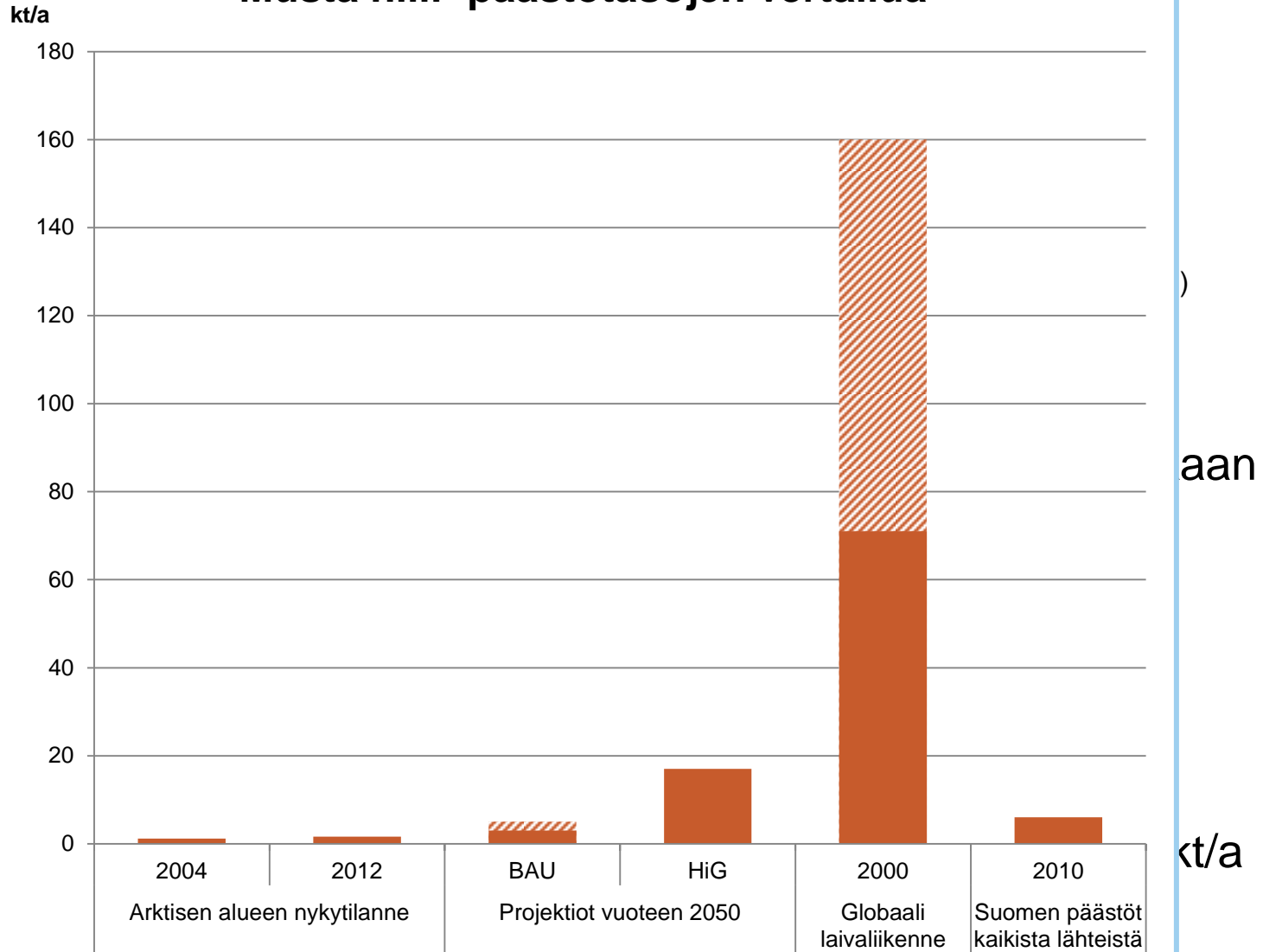
Mustan hiilen päästöyksikköä kohti normalisoitu säteilypakote (mW m^{-2} per Gg a^{-1})



Musta hiili absorboi auringosta säteilevää energiaa hyvin tehokkaasti, jolloin musta hiili -hiukkasten kerrostuminen lumi- ja jääpeitteelle voi oleellisesti muuttaa arktisen alueen säteilytasapainoa

Mustan hiilen aiheuttama päästöyksikköä kohti normalisoitu säteilypakote päästölähteen leveysastevyöhykkeen funktiona. Musta hiili -päästöt vaikuttavat säteilypakotteeseen ja ilmaston lämpenemiseen suhteessa enemmän pohjoisilla leveysasteilla. Lähde: AMAP 2011b.

Musta hiili -päästöjen vertailua

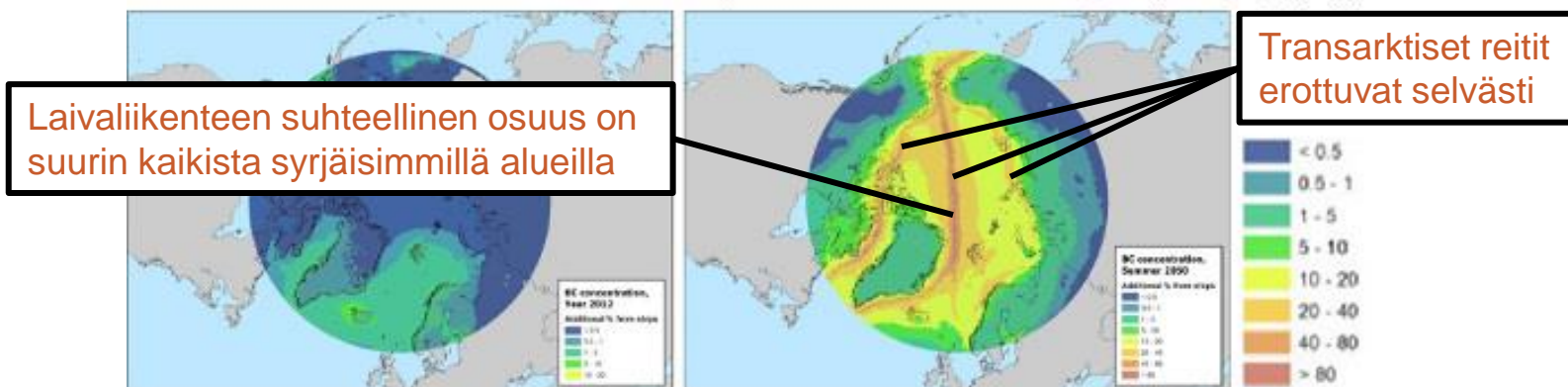


Arktisen laivaliikenteen musta hiili - päästöjen ilmastovaikutukset

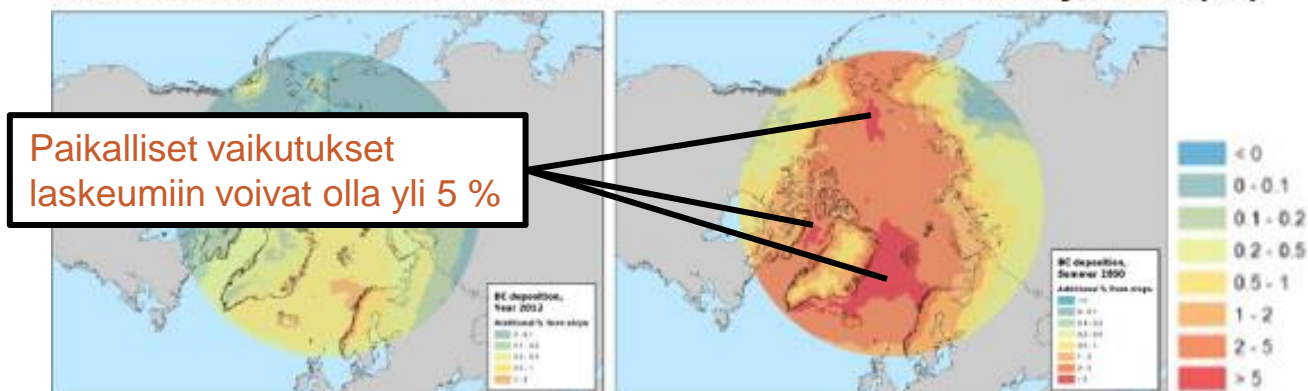
- Nykytasoisista (2004) musta hiili -päästöistä aiheutuu kokonaisuudessaan noin 1 mW m^{-2} suuruinen säteilypakote
 - Globaalin laivaliikenteen hiilidioksidipäästöt 49 mW m^{-2} (vuonna 2007)
 - Arktisella alueella tapahtuvan öljyn ja kaasun tuotannon musta hiili -päästöt 27 mW m^{-2} (vuonna 2004)
- Kuinka liikennöinti- sekä päästömäärien moninkertaistuminen ja täysin uusien reittien avautuminen voi vaikuttaa tilanteeseen?

Arktisen laivaliikenteen musta hiili -päästöjen merkitys vuonna 2012 ja 2050

Laivaliikenteen vaikutus musta hiili -pitoisuuksiin vuonna 2012 ja 2050 (%)



Laivaliikenteen vaikutus musta hiili -laskeumiin vuonna 2012 ja 2050 (%)



Arktisesta laivaliikenteestä aiheutuvien musta hiili -päästöjen vaikutus arktisen alueen musta hiili -pitoisuuksiin (yläkuvat) ja -kerrostumiin (alakovat) vuosina 2012 (vasen sarake) ja 2050 (oikea sarake). Lähde: Winther et al. 2014.

Miten laivaliikenteestä aiheutuvat musta hiili -päästöt syntyvät ja kuinka niitä on mahdollista vähentää?

- Musta hiili on epätäydellisessä palamisessa syntyvä polttoprosessien väistämätön sivutuote
- Palamisolosuhteet, moottorin tyyppi ja rasiustaso sekä mahdollisesti polttoaineen laatu (rikkipitoisuus) vaikuttavat syntyvien musta hiili -päästöjen määrään
 - Matalampien päästötasojen saavuttamisen kannalta keskeiset tekijät
- Musta hiili on määriteltävä **tarpeeksi yksiselitteisesti**, jotta mittaus- ja päästövähennysteknologiaa voitaisiin soveltaa tarkoituksenmukaisesti ja kustannustehokkaasti

Musta hiili ja päästövähennystekniikat

- IMO (Lack et al. 2012) on listannut musta hiili -päästöjen vähentämisen kannalta eniten potentiaalia sisältäviä vaihtoehtoja:
 - EEDI (*Energy Efficiency Design Index*, energiatehokkuuden suunnitteluindeksi)
 - Matkanopeuden alentaminen ja moottorien uudelleensäätö (*Slow steaming*)
 - Vesi—polttoaine-emulsio (*Water in Fuel Emulsion*, WiFE)
 - Raskaan polttoöljyn jatkokäsittely (*Heavy Fuel Oil distillate*)
 - Nesteytetty maakaasu (*Liquefied Natural Gas*, LNG)
 - Hiukkassuodattimet diesel-moottoreihin (*Diesel Particulate Filters*, DPF)
 - Pakokaasupesurit (*Exhaust Gas Scrubbers*, EGS)
- Mahdolliset vaikutukset muihin päästölajeihin ja teknologioiden kaupallinen saatavuus sekä oletettu käyttöönottoaika on otettu listauksessa huomioon
- Tehokkain vaihtoehto voi lopulta koostua monesta yksittäisestä päästöjä vähentävästä osaratkaisusta

Yhteenveto

Miksi arktisesta laivaliikenteestä aiheutuvilla musta hiili -päästöillä ja niiden vähentämisellä on merkitystä?

- Jos arktinen laivaliikenne kasvaa huomattavasti, myös päästövähennyksillä on suurempi vaikutus
 - Arktisen merenkulun päästöt ovat toistaiseksi melko vähäisiä, joten nyt on oikea aika toimia ei-toivottujen vaikutusten minimoimiseksi
- Erityisesti arktisen ilmaston lämpenemisen hillitsemisessä myös lyhyen aikavälin ilmastovaikutuksiin tähtäävät toimet ovat tarpeen
 - Riittääkö arktisen laivaliikenteen päästöjen vähentäminen?
- Arktinen alue ei ole minkään yksittäisen kansallisen sääntelyn piirissä
- Ilmastovaikutusten lisäksi musta hiili -päästöt ovat uhka ihmisten terveydelle ja ympäristön hyvinvoinnille

Lähteet

- ACIA 2005. *Arctic Climate Impact Assessment*. Cambridge University Press, 2005.
- AMAP 2011a. *The Impact of Black Carbon on Arctic Climate* (2011). By: P.K. Quinn, A. Stohl, A. Arneth, T. Berntsen, J. F. Burkhart, J. Christensen, M. Flanner, K. Kupiainen, H. Lihavainen, M. Shepherd, V. Shevchenko, H. Skov, and V. Vestreng. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo.
- AMAP 2011b. *Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA): Climate Change and the Cryosphere*. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP), Oslo, Norway.
- AMSA 2009. *Arctic Marine Shipping Assessment 2009 Report*. Arctic Council, April 2009, second printing.
- Buhaug, Ø., Corbett, J. J., Endresen, Ø., Eyring, V., Faber, J., Hanayama, S., Lee, D. S., Lee, D., Lindstad, H., Mjelde, A., Nelissen, D., Nilsen, J., Pålsson, C., Winebrake, J.J., Wu, W., Yoshida, K. 2009. *Second IMO Greenhouse Gas Study 2009*, International Maritime Organization, London, 2009.
- Corbett, J. J., Lack, D. A., Winebrake, J. J., Harder, S., Silberman, J. A., and Gold, M. 2010. Arctic shipping emissions inventories and future scenarios. *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 9689–9704, 2010, doi:10.5194/acp-10-9689-2010.
- Dalsøren, S. B., B. H. Samset, G. Myhre, J. J. Corbett, R. Minjares, D. Lack, and J. S. Fuglestedt 2013. Environmental impacts of shipping in 2030 with a particular focus on the Arctic region. *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 1941–1955, 2013, doi:10.5194/acp-13-1941-2013.
- DNV 2010. *Shipping across the Arctic Ocean, A feasible option in 2030-2050 as a result of global warming?* DNV Research and Innovation, Position Paper 04 – 2010.
- Flanner, M. G. 2013. Arctic climate sensitivity to local black carbon. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 1840–1851, doi:10.1002/jgrd.50176.
- Fuglestedt, J., Berntsen, T., Eyring, V., Isaksen, I., Lee, D., and Sausen, R. 2009. Shipping Emissions: From Cooling to Warming of Climate—and Reducing Impacts on Health. *Environ. Sci. Technol.*, 43, 9057–9062, doi:10.1021/es901944r.
- IMO 2011. *Definition and measurement of Black Carbon in international shipping*. BLG 16/15/4, 25 November 2011.
- IMO 2014. *Prevention of air pollution from ships (agenda items 8 and 9)*. PPR 1/WP.5, 6 February 2014.
- IPCC 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stockler, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Lack, D.A. & Corbett, J.J. 2012. Black carbon from ships: a review of the effects of ship speed, fuel quality and exhaust gas scrubbing. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 3985–4000, 2012, doi:10.5194/acp-12-3985-2012.
- Lack, D. A., Thuesen, J. & Elliott, R. 2012. *Investigation of appropriate control measures (abatement technologies) to reduce Black Carbon emissions from international shipping*. Litehauz, Denmark, 20 November 2012.
- Lindholt, L. & Glomsrød S. 2011. *The role of the Arctic in future global petroleum supply*. Discussion Papers No. 645, February 2011 Statistics Norway, Research Department.
- Liu, M & Kronbak, J. 2010. The potential economic viability of using the Northern Sea Route (NSR) as an alternative route between Asia and Europe. *Journal of Transport Geography*, 18 (2010), 434–444, doi:10.1016/j.jtrangeo.2009.08.004.
- NASA GISS 2014. GISS Surface Temperature Analysis. Online source: <http://data.giss.nasa.gov/gistemp/maps>, viewed in 1.12.2014.
- NSIDC 2014. Arctic Sea Ice News and Analysis. Online source: <http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/2014/11/Figure21.png>, viewed in 17.11.2014.
- Overland, J. E., M. Wang, J. E. Walsh, and J. C. Stroeve 2013. Future Arctic climate changes: Adaptation and mitigation time scales. *Earth's Future*, 2, 68–74, doi:10.1002/2013EF000162.
- Peters, G. P., T. B. Nilssen, L. Lindholt, M. S. Eide, S. Glomsrød, L. I. Eide, and J. S. Fuglestedt 2011. Future emissions from shipping and petroleum activities in the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 5305–5320, 2011, doi:10.5194/acp-11-5305-2011.
- UNEP 2012. *Fifth Global Environment Outlook / GEO-5*. United Nations Environment Programme.
- UNEP/WMO 2011. *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for Decision Makers*. United Nations Environment Programme / World Meteorological Organization.
- Sato, Makiko 2014. Updating the Climate Science. Online source: http://www.columbia.edu/~mhs119/Temperature/T_moreFigs/global+Arctic.pdf, viewed in 1.12.2014
- Stephenson, S. R., L. C. Smith, L. W. Brigham and J. A. Agnew 2013. Projected 21st-century changes to Arctic marine access. *Climatic Change*, 118:885–899, doi:10.1007/s10584-012-0685-0.
- Wang, M. & Overland, J. E. 2012. A sea ice free summer Arctic within 30 years: An update from CMIP5 models. *Geophysical Research Letters*, vol. 39, L18501, doi:10.1029/2012GL052868, 2012.
- Winther, M., J. H. Christensen, M. S. Plejdrup, E. S. Ravn, Ó. F. Eriksson and H. O. Kristensen 2014. Emission inventories for ships in the arctic based on satellite sampled AIS data. *Atmospheric Environment*, 91 (2014) 1–14, doi:10.1016/j.atmosenv.2014.03.006.
- Ødemark, K., Dalsøren, S. B., Samset, B. H., Berntsen, T. K., Fuglestedt, J. S., and Myhre, G. 2012. Short-lived climate forcers from current shipping and petroleum activities in the Arctic. *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 1979–1993, 2012, doi:10.5194/acp-12-1979-2012.
- Østreng W., K. M., Eger, B. Fløistad, A. Jørgensen-Dahl, L. Lothe, M. Mejlænder-Larsen and T. Wergeland 2013. *Shipping in Arctic Waters: A comparison of the Northeast, Northwest and Trans-Polar Passages*. Springer Praxis Books, doi:10.1007/978-3-642-16790-4_3, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2013.

