

# Ilmastopaneeli

---

MUSTA HIILI ILMASTOPAKOTTEENA:  
PÄÄSTÖJEN JA MAHDOLLISTEN  
PÄÄSTÖVÄHENNYSTEN GLOBAALIT JA  
ALUEELLISET VAIKUTUKSET

A. LAAKSONEN, K. KUPIAINEN, V-M KERMINEN, N. KARVOSENOJA,  
J-P PIETIKÄINEN, M. SAVOLAHTI, V-V PAUNU, I. SAVOLAINEN,  
M. AIRAKSINEN, M. JÄRVELÄ, K. KOKKO, M. KULMALA,  
J. SEPPÄLÄ, P. TAALAS

**Suomen Ilmastopaneeli  
Raportti**

# Musta hiili ilmastopakotteena: Päästöjen ja mahdollisten päästövähennysten globaalit ja alueelliset vaikutukset

A. Laaksonen<sup>1</sup>, K. Kupiainen<sup>2</sup>, V.M. Kerminen<sup>3</sup>, N. Karvosenoja<sup>2</sup>, J.-P. Pietikäinen<sup>1</sup>, M. Savolahti<sup>2</sup>, V.-V. Paunu<sup>2</sup>, I. Savolainen, M. Airaksinen<sup>4</sup>, M. Järvelä<sup>5</sup>, K. Kokko<sup>6</sup>, M. Kulmala<sup>3</sup>, J. Seppälä<sup>2</sup>, P. Taalas<sup>1</sup>

1. Ilmatieteen laitos
2. Suomen ympäristökeskus
3. Helsingin yliopisto
4. VTT
5. Jyväskylän yliopisto
6. Lapin yliopisto

1. Yhteenveto	3
2. Johdanto	4
3. Mustan hiilen ilmastovaikutukset – tieteellinen tausta	4
4. Musta hiili kansainvälisessä ilmasto- ja ilmansaastepolitiikassa	5
5. Suomen mustahiilipäästöt ja kustannustehokkaimmat päästövähennysmahdollisuudet	7
6. Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastovaikutukset	12
7. Pohdintaa	14
8. Kirjallisuusviitteet	16

## Yhteenveto

Musta hiili luetaan otsonin ja metaanin ohella tärkeimpiin lyhytikäisiin ilmastoon vaikuttaviin yhdisteisiin (short-lived climate pollutants, SLCP). Erilaisten ilmastoon vaikuttavien tekijöiden ilmastovaikutuksia tarkastellaan yleensä käyttäen mittatikkuna niin kutsuttua ilmastopakotetta, joka on positiivinen lämmittäville ja negatiivinen viilentäville tekijöille. Paras arvio tämän hetkisellem kokonaisilmastopakotteelle verrattuna esiteolliseen aikaan on noin  $2.3 \text{ W/m}^2$ . Mustan hiilen aiheuttaman säteilypakotteen arvioidaan olevan  $1.1 \text{ W/m}^2$  kun suurin yksittäisen aineen, hiilidioksidin, aiheuttama säteilypakote on tällä hetkellä noin  $1.7 \text{ W/m}^2$ . On kuitenkin otettava huomioon, että monet mustan hiilen lähteet, kuten biomassan poltto, aiheuttavat mustan hiilen lisäksi myös ilmastoa viilentävien hiukkasten päästöjä. Jos viilennysvaikutukset huomioidaan, mustan hiilen lähteiden aiheuttama ilmastopakote on IPCC:n uusimman raportin mukaan n.  $0.4 \text{ W/m}^2$ . Luvussa on kuitenkin vielä huomattava epävarmuus.

Mustan hiilen ilmastovaikutukset voidaan jakaa karkeasti kolmeen kategoriaan: (1) ilmassa leijuva musta hiili imee auringonvaloa ja lämmittää ilmakehää (suora vaikutus); (2) mustahiilihiukkaset vaikuttavat pilvien ominaisuuksiin ja sitä kautta ilmastoon (epäsuora vaikutus) ja (3) lumen ja jään päälle laskeutunut musta hiili aiheuttaa lämmitystä ja aikaistunutta sulantaa (lumivaikutus). Ilmassa leijuvan mustan hiilen suorat ja epäsuorat ilmastovaikutukset ovat suurimmillaan auringonsäteilyn ollessa voimakasta, joten samanlaiset päästöt vaikuttavat enemmän päiväntasaajan lähellä kuin korkeilla leveysasteilla, ja enemmän kesällä kuin talvella. Toisaalta lumen ja jään sulamisen kautta tapahtuva ilmastovaikutus aiheutuu pääasiassa pohjoisten ja vuoristoalueiden talviaikaisista päästöistä.

Ilmastomallisimulaatioiden mukaan Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastovaikutus aiheutuu pääasiallisesti lumen ja jään aikaistuneesta sulannasta. Suomen päästöjen osuus mustan hiilen globaalista lumivaikutuksesta on jopa prosentin luokkaa, kun taas globaaliin suoraan ja epäsuoraan vaikutukseen Suomen päästöt vaikuttavat vain noin promillen verran. Ilmastovaikutusten kannalta Suomen talviaikaiset päästövähennykset ovat siis huomattavasti tehokkaampi hillintäkeino kuin kesäaikaiset päästövähennykset. Vuodenaikaiseroa lisää vielä se seikka, että vähäisen auringonsäteilyn takia mustan hiilen ohella päästöissä syntyvien orgaanisten ja sulfaattihiukkasten viilennysvaikutus on lähes olematon talviaikaan.

Suomen mustan hiilen päästöille puun pienpoltto on suurin lähde. Tällä hetkellä reilut 50 % kokonaispäästöistä syntyy puun pienpoltosta. Toinen merkittävä lähde on liikenne ja työkoneet. Lähivuosikymmeninä liikennepäästöt vähenevät voimakkaasti dieselajoneuvojen tiukkojen päästövaatimusten ansiosta. Sen sijaan pienpoltton päästöille ei ole tällä hetkellä päästölainsäädäntöä ja päästöt eivät vähene ilman suunnattuja toimenpiteitä. Pienpoltton päästöjä olisi mahdollista merkittävästi vähentää olemassa olevilla teknisillä (tehokkaammat uunit ja kattilat) ja ei-teknisillä (käyttöneuvonta) keinoilla. Puunpoltton päästöt ovat terveysriski etenkin tiheään asutuilla pientaloalueilla. Taajama-alueille kohdistetut päästövähennykset olisivat hyödyllisiä sekä ilmaston että terveyden kannalta.

## SUOSITUKSET:

Ilmastopaneeli suosittelee seuraavia toimenpiteitä mustan hiilen päästöjen vähentämiseksi kustannustehokkaasti ja samalla hiukkasten terveysvaikutuksia tehokkaasti rajoittaen:

- 1) Kannustetaan kuntia ja alueellisia viranomaisia järjestämään informaatiokampanjoita puhtaan puunpoltton edistämiseksi ja tuottamaan yleisinformaatiota puunpoltton hiukkaspäästöjen ja mustahiilipäästöjen vaikutuksista.
- 2) Suomi kannattaa EU:n valmisteilla olevan Ecodesign-direktiivin huonelämmittimille ja pienkattiloille voimaantuloa riittävän tiukoilla hiukkasten päästörajoilla.
- 3) Kehitetään kansallinen laitestandardi lainsäädäntöön saunan puukiukaille täydentämään tulisijojen EU-sääntelyä, esimerkiksi suhteuttaen kiuasstandardin sisältö vapaaehtoisen Joutsen-merkin uuden ehdotuksen vaatimuksiin.

## Johdanto

Tässä Ilmastopaneelin selvityksessä tarkastellaan Suomen mustan hiilen päästöjä ja niiden ilmastovaikutuksia. Selvityksen tieteellisestä osiosta ovat vastanneet Helsingin yliopisto (tieteellinen tausta), Suomen ympäristökeskus (Suomen mustan hiilen päästöt ja käynnissä olevat politiikkaprosessit) ja Ilmatieteen laitos (Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastovaikutukset). Projektin puitteissa järjestettiin EU Life+ -projekti MACEBin kanssa yhteinen työpaja Ilmatieteen laitoksella 11.11.2013. Työpajan esitykset ja niiden pohjalta käydyt keskustelut olivat lähtökohtana tämän raportin pohdintaosuudelle, jonka kirjoittamiseen Ilmastopaneelin jäsenet osallistuivat aktiivisesti. Esitykset ovat saatavilla verkossa osoitteessa <http://www.maceb.fi/presentations.html>. Tämän raportin yhteenveto-osassa esitetyt suositukset ovat ilmastopaneelin jäsenten laatimia.

## Mustan hiilen ilmastovaikutukset – tieteellinen tausta

Musta hiili on eräs merkittävimmistä lyhytikäisistä ilmastoon vaikuttavista aineista (short lived climate forcer, SLCF), jolla on sekä ilmakehää lämmittäviä että viilentäviä vaikutuksia, nettovaikutuksen ollessa lämmittävä. Lyhytikäiset päästöt pysyvät ilmassa joitakin päiviä tai korkeintaan viikkoja, kun taas varsinaiset kasvihuonekaasut vaikuttavat ilmassa vuosikymmeniä tai jopa yli vuosisadan. Lyhytikäisten vaikutus kertyy pääosin joidenkin satojen tai tuhannen kilometrin etäisyydellä päästölähteistä, kun taas pitkäikäiset sekoittuvat koko maapallon ilmakehään. Mustan hiilen päästövähennysten ilmastovaikutukset ovat erilaisia riippuen vähennysten alueellisesta ja vuodenaikaisesta kohdentamisesta. Kasvihuonekaasuihin verrattuna mustan hiilen aiheuttama pakote on monimutkainen, koska se jakaantuu useaan eri komponenttiin: n.s. suora pakote aiheutuu auringon valon absorptiosta ilmassa leijuvaan mustaan hiileen, kun taas epäsuora pakote johtuu erilaisista pilviprosesseista. Lisäksi musta hiili sulattaa lunta ja merijäätä. Mustahiilipäästöt lisäävät suoraa ja epäsuoraa pakotetta sitä enemmän mitä lähempänä ekvaattoria päästölähde sijaitsee, mitä lähempänä kesäpäivän seisausta päästö tapahtuu ja mitä suurempi on pinnan albedo päästölähteen ympäristössä. Lumi- ja jääpakote taas on merkittävää lähinnä päästöille, jotka tapahtuvat korkeilla leveysasteilla ja talviaikaan.

Vuoden 2013 aikana ilmestyi kaksi laajaa tieteellistä koostetta mustan hiilen (BC) ilmastovaikutuksista: Bond et al. (2013) sekä kansainvälisen ilmastopaneelin viides arviointiraportti (IPCC, 2013), joista jälkimmäisessä aihetta käsitellään luvuissa 7.5.2.2 ja 7.5.2.3. Bond et al. (2013) antama paras arvio mustan hiilen aiheuttamalle säteilypakotteelle on  $1.1 \text{ W/m}^2$  ja vastaavalle 90 % todennäköisyysväliille  $0.17\text{--}2.1 \text{ W/m}^2$ . IPCC (2013) antama vastaava arvio on  $0.4 \text{ W/m}^2$  ( $0.05\text{--}0.8 \text{ W/m}^2$ ). Näitä lukuja voidaan verrata IPCC (2013) antamaan parhaaseen arvioon aerosolien ja kasvihuonekaasujen aiheuttamasta yhteisestä säteilypakotteesta ( $2.3 \text{ W/m}^2$ ) tai pelkästään aerosolien aiheuttamasta säteilypakotteesta ( $-0.9 \text{ W/m}^2$ ) vuonna 2011. Toinen vertailukohta on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden tämän hetkinen lisääntyminen, josta aiheutuva säteilypakote viimeisten 6 vuoden aikana on noin  $0.2 \text{ W/m}^2$  kasvuvauhdin ollessa siis tällä hetkellä noin  $0.033 \text{ W/m}^2$ . Seuraavassa analysoidaan lyhyesti IPCC:n ja Bond et al.:in tekemien arvioiden välisiä eroja ja aiheeseen liittyviä epävarmuuksia.

IPCC (2013) ja Bond et al. (2013) antamat pakotearviot lähenevät toisiaan huomattavasti, kun otetaan huomioon, etteivät ne ole aivan yhteismitallisia. IPCC:n antama luku  $0.4 \text{ W/m}^2$  sisältää fossiilisten polttoaineiden ja biopolttoaineiden käytöstä syntyvän mustan hiilen suoran säteilypakotteen, muttei esimerkiksi metsäpaloista tai savanninpoltosta syntyvän mustan hiilen suoraa säteilypakotetta, mustan hiilen vaikutusta pilviin, eikä mustan hiilen aiheuttamaa lumen albedon pienenemistä. Bond et al. (2013) antamasta paras arvio fossiilisten polttoaineiden ja biopolttoaineiden käytöstä syntyvän mustan hiilen suoralle säteilypakotteelle on  $0.51 \text{ W/m}^2$  (ei epävarmuusväliä), mikä on noin 25 % IPCC:n nykyistä arviota suurempi ja noin 2.5-kertainen verrattuna IPCC:n vuonna 2007 julkaisemaan edelliseen arvioon ( $0.2\pm 0.15 \text{ W/m}^2$ ) verrattuna.

Uusimmat arviot mustan hiilen suoralle globaalille säteilypakotteelle ovat selkeästi suurempia kuin IPCC:n aiemmin tekemä arvio. Pääsyy tähän on käytetyssä aineistossa ja sen painotuksessa, sillä useimmat globaalit mallit simuloivat huomattavasti pienemmän suoran säteilypakotteen mustalle hiillelle ( $0.06\text{--}0.48 \text{ W/m}^2$ , Myhre et al., 2013), kuin mitä saadaan käyttämällä kaukokartoitushavaintoja ilmakehän aerosolien kokonaisabsorptiosta IPCC:n aiempi arvio perustui yksinomaan globaaleista malleista saatuihin

simulaatiotuloksiin, kun taas uudemmassa arviossa mukaan on otettu myös kaukokartoitushavainnointia. Bond et al. (2013) antaa kaukokartoitushavainnolle hieman suuremman painoarvon kuin IPCC (2013), mikä selittänee erot näiden kahden arvion välillä.

Bond et al. (2013) antama paras arvio avoimesta biomassan poltosta (metsäpalot, savanninpolto ym.) syntyvän mustan hiilen suoralle säteilypakotteelle on  $0.20 \text{ W/m}^2$  (ei raportoitua epävarmuusväliä). IPCC (2013) ei anna ollenkaan arviota kyseiselle pakotteelle, sillä IPCC:n tapana on ollut käsitellä biomassan poltosta syntyviä hiukkasia omana luokkanaan erottelematta kyseisten hiukkasten sisältämiä kemiallisia komponentteja toisistaan. Avoimesta biomassan poltosta syntyvät hiukkaset sisältävät mustan hiilen lisäksi runsaasti orgaanisia hiiliyhdisteitä, joilla on yleensä negatiivinen suora säteilypakote. IPCC (2013) antama paras arvio avoimesta biomassan poltosta syntyvien hiukkasten suoralle säteilypakotteelle on  $0.0 \text{ W/m}^2$  ( $\pm 0.2 \text{ W/m}^2$ ), jonka mukaan kyseisissä hiukkasissa olevien mustan ja orgaanisen hiilen suorat säteilypakotteet kumoavat keskimäärin toisensa.

Mustaa hiiltä sisältävät hiukkaset voivat toimia pilvissä olevien vesipisaroiden ja jääkiteiden tiivistymisytiminä muuttaen siten pilvien mikrofysikaalisia ja optisia ominaisuuksia. Tämän lisäksi musta hiili voi vaikuttaa pilvien syntymiseen ja elinikään lämmittämällä joko pilviä tai niiden ala- tai yläpuolisia ilmakerroksia (Koch and Del Genio, 2010). Bond et al. (2013) antama paras arvio mustan hiilen pilviin liittyvälle säteilypakotteelle on  $0.23 \text{ W/m}^2$ . Vastaava 90 % todennäköisyysväli on  $-0.47 \text{ W/m}^2 - +1.0 \text{ W/m}^2$ , joten kyseinen säteilypakote voi olla myös negatiivinen. IPCC (2013) käsittelee aerosolien ja pilvien välisiin vuorovaikutuksiin liittyviä säteilypakotteita hieman eri tavalla kuin aiemmissa raporteissaan (katso luvut 7.5.3 ja 7.5.4), eivätkä nämä tulokset ole vertailtavissa Bond et al. (2013) raportointiin tuloksiin. IPCC (2013) ei myöskään erittele pilvien vuorovaikutusta eri hiukkastyypin kanssa.

Ilmasta lumi- ja jääpinnoille joutuva musta hiili vähentää näiden pintojen albedoa, mistä aiheutuu positiivien säteilypakote. IPCC (2013) antama arvio tälle säteilypakotteelle on  $0.04 \text{ W/m}^2$  ( $0.02-0.09 \text{ W/m}^2$ ), mikä on selkeästi pienempi kuin IPCC:n edellinen arvio vuonna 2007 ( $0.10 \text{ W/m}^2$ ), mutta sopusoinnussa Bond et al. (2013) antamaan arvioon. Pakotteen uusimpien arvioiden pieneneminen aiempiin arvioihin verrattuna on monen osatekijän summa, joista ehkä tärkein on se, että pinnan albedoon lumessa tai jäässä vaikuttavat mustan hiilen lisäksi useat muutkin tekijät. Näitä ovat esim. hiukkasmaainen mineraalipöly ja tietyt orgaaniset yhdisteet sekä lumen ikä ja rakenne.

Arktisten alueiden ilmastomuutoksen kannalta mustan hiilen vaikutus pinnan albedoon on erityisen mielenkiintoinen, sillä kyseisen säteilypakotteen suuruus saattaa olla useita  $\text{W/m}^2$  keväällä ja alkukesästä Arktisilla alueilla. Säteilypakotteen, joka aiheutuu lumi- tai jääpintojen albedon vähenemisestä, on arvioitu nostavan alailmakehän lämpötilaa 2–4 kertaa tehokkaammin kuin samansuuruinen hiilidioksidin aiheuttama säteilypakote (IPCC 2013). Tästä syystä Bond et al. (2013) antoivat mustan hiilen lumi- ja jäävaikutuksille tavanomaisen ilmastopakotearvon lisäksi n.k. efektiivisen pakotteen suuruudeltaan  $0.13$  ( $0.04-0.33 \text{ W/m}^2$ ). Mustan hiilen eri pakotteiden vertailussa on perusteltua hyödyntää efektiivisen pakotteen käsitettä, ja luvun 4 pakotearvot ovatkin nimenomaan efektiivisiä pakotteita.

Mustan hiilen säteilypakotteille annettujen uusimpien arvioiden epävarmuusvälit ovat varsin suuret. Aihepiiriin liittyvistä epävarmuuksista keskustellaan lyhyesti IPCC (2013) arviointiraportissa ja kattavammin Bond et al. (2013) tekemässä koosteessa. Suomenkielistä lisätietoa aiheesta on koottu EU Life+ ohjelmaan kuuluvan MACEB-projektin puitteissa ([http://www.maceb.fi/uncertainties\\_fi.html](http://www.maceb.fi/uncertainties_fi.html)).

## Musta hiili kansainvälisessä ilmasto- ja ilmansaastepolitiikassa

Mustan hiilen ilmastovaikutukset ovat nousseet viime vuosina puheenaiheeksi mm. Arktisen neuvoston, YK:n alaisen kaukokulkeumasopimuksen sekä kansainvälisten ilmastoneuvottelujen yhteydessä. Lisäksi on perustettu erillinen Ilmasto- ja puhtaan ilman kumppanuus koalitio (Climate and Clean Air Coalition), jonka toiminnan painopisteenä musta hiili osaltaan on. Yleisesti ottaen näyttäisi siltä, että ilmastonäkökulmasta kaikki politiikkaprosessit toteavat mustaa hiiltä ja muita lyhytikäisiä ilmastovaikuttavia aineita koskevien toimien olevan hiilidioksidin päästövähennyksiä täydentäviä toimenpiteitä, päähuomion säilyessä hiilidioksidipäästöjen vähentämisessä.

*Arktinen neuvosto* nosti mustan hiilen omalle työlliställeen ensimmäisen kerran nk. Tromssan ministerikokouksen julistuksessa vuonna 2009, jossa huomioitiin mustan hiilen, metaanin ja torposfäärin otsonin rooli arktisen ilmastoon muutoksessa sekä tunnustettiin päästövähennysten mahdolliset hyödyt arktisen alueen lumen ja jään sulamisen hidastamisessa lyhyellä aikavälillä. Julistuksessa myös rohkaistiin neuvoston jäsenmaita aikaistettuihin toimenpiteisiin päästöjen vähentämiseksi ja perustettiin erillinen selvitysryhmä (Task Force) tunnistamaan olemassa olevia ja uusia päästövähennysmahdollisuuksia sekä suosittelemaan toimenpiteitä. Julistuksen pohjalta arktisen neuvoston AMAP työryhmän alaisuuteen perustettiin asiantuntijaryhmä selvittämään tarkemmin mustan hiilen ja sen päästölähteiden roolia ja vaikutuksia arktiseen ilmastoon. Ryhmät ovat raportoineet työstään Nuukissa 2011 sekä Kiirunassa 2013 pidetyille ministerikokouksille ja jäsenmaita on rohkaistu toimeenpanemaan mahdollisuuksien mukaan esitettyjä suosituksia. Suosituksissa on nostettu esiin mm. liikenteen, pienpolton, avopolton ja laivaliikenteen päästövähennysmahdollisuudet. Vuoden 2013 Kiirunan ministerikokouksen julistuksessa perustettiin uusi selvitysryhmä (Task Force), edeltäjänsä lopettaessa toimintansa. Uuden ryhmän toimeksiantona on selvittää mahdollisuuksia arktisen neuvoston piirissä toteutettavalle sitovammalle järjestelylle mustan hiilen ja metaanin päästövähennyksien edistämiseksi ja raportoida 2015 järjestettävälle ministerikokoukselle.

Helmikuussa 2012 kuusi maata (Bangladesh, Ghana, Kanada, Meksiko, Ruotsi ja Yhdysvallat) perustivat nk. *Ilmasto- ja puhtaan ilman kumppanuus koalition (Climate and Clean Air Coalition)*, johon Suomikin liittyi kesällä 2012. Vapaaehtoisuuteen perustuvan koalition tavoitteena on edistää ja nopeuttaa toimia mustan hiilen ja muiden n.k. lyhytikäisten ilmastoon vaikuttavien aineiden päästöjen ja vaikutusten vähentämiseksi globaalisti. Koalition sihteeristöä ylläpitää UNEP ja sillä on tällä hetkellä noin 70 jäsenmaata tai -organisaatiota.

Ensimmäinen sitova kansainvälinen sopimus, joka käsittelee mustaa hiiltä, on YK:n *Euroopan talouskomission alainen ilmansaasteiden kaukokulkeumasopimus*. Mustaa hiiltä koskevat kohdat lisättiin sopimustekstiin Göteborgin pöytäkirjan tarkistuksen yhteydessä vuonna 2012 osaltaan pohjautuen 2010 toimineen selvitysryhmän suosituksiin. Tarkistettu pöytäkirja käsittelee mustaa hiiltä osana pienhiukkasia ja sopimuksen osapuolia kehoitetaan soveltuvin osin priorisoimaan niitä pienhiukkasiin kohdentuvia päästövähennystoimia, jotka vähentävät merkittävästi myös mustahiilipäästöjä. Osapuolten tulee myös kehittää, ylläpitää ja raportoida mustahiilipäästöjä nyt ja tulevaisuudessa sekä informoida kansalaisia sen vaikutuksista.

YK:n alaisen *kansainvälisen merenkulkujärjestön (IMO)* piirissä selvitetään parhaillaan mahdollisuuksia vähentää laivaliikenteen mustahiilipäästöjä. Työtä valmisteleva komitean raportti valmistunee vuoden 2014 aikana.

*Pohjoismainen ministerineuvosto* on järjestänyt työpajoja koskien mustaa hiiltä ja muita lyhytikäisiä ilmastoon vaikuttavia aineita. Ministerineuvoston työryhmien puitteissa on mahdollista saada hankerahoitusta aihepiiriin liittyen.

*Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (IPCC)* on käsitellyt mustan hiilen ilmastovaikutuksia tieteelliseltä kannalta jo useassa arviointiraportissaan. Aihepiiri on noussut esille myös *YK:n ilmastosopimuksen (UNFCCC)* neuvotteluissa, mutta toistaiseksi ei osana ilmastosopimusta. Tässä yhteydessä on nostettu esille uusien kumppanuuksien, kuten CCAC:n, rooli ilmastosopimuksen rinnalla.

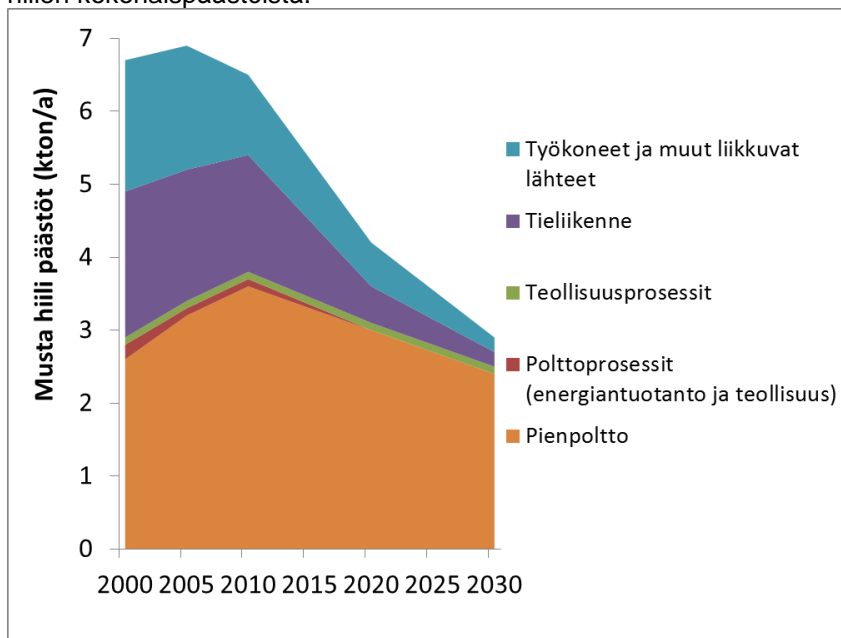
Suomi on jäsen ja toimii aktiivisesti käytännössä kaikissa mustaa hiiltä ja muita lyhytikäisiä ilmastoon vaikuttavia aineita koskevissa prosesseissa. Suomen arktisessa strategiassa (2013) musta hiili on mainittu seuraavasti: "Tuetaan arktisten alueiden lyhytikäisten ilmastomuutosta nopeuttavien ilmansaasteiden, erityisesti mustan hiilen, vähentämiseen tähtääviä kansainvälisiä yhteistyöhankkeita sekä mustan hiilen päästöjen vähentämisen toimintaohjelman laatimista, ja vähennetään Suomen aiheuttamia päästöjä."

## Suomen mustahiilipäästöt ja kustannustehokkaimmat päästövähennysmahdollisuudet

Tässä luvussa esitetään arviot Suomen musta hiilen ja muiden lyhytikäisten ilmastovaikutteisten päästökomponenttien päästöistä päästösektoreittain perustuen SYKE:n Alueelliseen päästöskenaariomalliin (FRES, Karvosenoja 2008). Päästöjä tulee myös mm. jätteenkäsittelystä sekä maataloudesta, mutta niiden osuus on arviolta pieni, alle prosentin luokkaa. Lähivuosikymmenien päästöarvioiden taustalla on käytetty Työ- ja elinkeinoministeriön Energia- ja ilmastostrategian vuoden 2013 päivityksen Tarkennetun perusuran aktiviteettiennusteita. Tulevaisuuden päästövähennyskeinoja ja niiden kustannustehokkuutta on arvioitu puun pienpolttosektorille (yksityiskohtainen dokumentointi: Savolahti ym. 2013). Pienpolton päästövähennystarkastelujen pohjalta on kehitetty kuusi päästöskenaariota, joissa pyritään tarkastelemaan eri päästövähennyskeinojen vaikuttavuutta ilmastovaikutusten näkökulmasta. Myöhemmin Pohdintaa-luvussa käsitellään vähennyksiä myös terveysnäkökulmasta.

### Mustan hiilen päästöt Suomessa

Kuvassa 1 on esitetty Suomen mustahiilipäästöt sektoreittain 2000-2030 ajanjaksolle. Tällä hetkellä suurimpia mustan hiilen päästölähteitä Suomessa ovat tieliikenne, työkoneet ja muut liikkuvat lähteet sekä puun pienpoltto kotitalouksissa (Kuva 1). Pienpolton osuus oli vuonna 2010 noin 55 % Suomen mustan hiilen kokonaispäästöistä.



Kuva 1. Mustan hiilen päästöt Suomessa 2000-2030 nykylainsäädännöllä.

Nykyisin voimassa oleva ilmansaasteita koskeva lainsäädäntö ei käsittele suoraan erityisesti mustan hiilen vähentämistä, mutta koska päästöt tapahtuvat yhdessä muiden nykyisten lakien kattamien aineiden kanssa, on odotettavissa, että päästöt vähenevät erityisesti tieliikenne- ja työkonesektoreilla myös Suomessa (Kuva 1). Liikenteen mustan hiilen päästöt vähenevätkin jatkuvasti kaluston uusiutuessa. Uusi kalusto on varustettu suodattimilla, jotka poistavat mustaa hiiltä pakokaasuista. Vastaavaa kehitystä ei ole odotettavissa pienpoltolle, joten sen suhteellinen merkittävyys nykylainsäädännöllä kasvaa lähivuosikymmeninä ja ilman lisätoimenpiteitä pienpolton osuus vuoden 2030 mustahiilipäästöistä voi olla noin 80 %.

Suomen absoluuttiset mustahiilipäästöt ovat pienet verrattaessa esim. Eurooppaan, Intiaan, Kiinaan, Venäjään ja Yhdysvaltoihin, joten Suomen päästöillä ei näin ollen ole merkittäviä globaaleja ilmastovaikutuksia. Arktisten alueiden välitön läheisyys tekee kuitenkin pienistäkin päästöistämme suhteellisesti merkittävämpiä arktisten alueiden ilmastomuutoksessa kuin etelämpänä sijaitsevien maiden. Mitä lähempänä lähde on arktisia alueita, sen suurempi määrä päästöistä sinne kulkeutuu.

Musta hiili on kuitenkin vain yksi komponentti muiden epätäydellisessä palamisessa syntyvien kaasumaisten ja hiukkasmaisten aineiden ohella. Eri päästökomenttien määrät vaihtelevat voimakkaasti eri lähteiden välillä riippuen polttoaineista ja -teknologioista. Lisäksi päästövähennyskeinot kohdistuvat eri aineisiin eri tavoin, ja koska yksittäisillä päästökomentteilla on joko ilmastoa viilentäviä tai lämmittäviä ominaisuuksia, tulee päästöjä ja päästövähennyskeinoja tarkastella kokonaisuutena huomioiden niiden vaikutukset myös muihin aineisiin kuin mustaan hiileen. Viime kädessä vähennyskeinojen ilmastovaikutus koostuu lämmittävien ja viilentävien epäpuhtauksien nettovaikutuksesta. Taulukoissa 1 ja 2 on esitetty mustan hiilen ja muiden ilmastovaikutteisten ilmansaasteiden päästöt sektoreittain Suomessa vuosina 2010 ja 2030. [t/a]

Taulukko 1. Mustan hiilen ja muiden ilmastovaikutteisten ilmansaasteiden päästöt sektoreittain Suomessa vuonna 2010 [kton/a].

2010	BC	OC	SO <sub>2</sub>	NO <sub>X</sub>	CO	NMVO C	CH <sub>4</sub>
Polttoprosessit (energiantuotanto ja teollisuus)	0.1	0.1	42.9	69.7	66.9	2.2	0
Teollisuusprosessit	0.1	0.2	14.7	7.4	32	8.5	0.4
Tieliikenne	1.6	1.2	1	53.3	134.2	22.1	0
Työkoneet ja muut liikkuvat lähteet	1.1	0.7	1.7	34.5	57.2	14.2	0
Pienpoltto	3.6	3.4	3.4	12.9	151.2	37.5	6.8
Jätteen käsittely	0	0	0	0	4.3	0.5	96.5
Maatalous	0	0	0	0	0.2	0	90.1
Muu	0	0.1	0	0	0	29.6	0

Taulukko 2. Mustan hiilen ja muiden ilmastovaikutteisten ilmansaasteiden päästöt sektoreittain Suomessa vuonna 2030 [kton/a].

2030	BC	OC	SO <sub>2</sub>	NO <sub>X</sub>	CO	NMVO C	CH <sub>4</sub>
Polttoprosessit (energiantuotanto ja teollisuus)	0	0.1	12.9	44.9	76.3	2.21	0
Teollisuusprosessit	0.1	0.2	17	9.2	35.3	11.31	0.4
Tieliikenne	0.2	0.7	0.1	9.6	45.7	21.71	0
Työkoneet ja muut liikkuvat lähteet	0.2	0.2	0.2	18.6	68.3	14.885	0
Pienpoltto	2.4	2	2.3	8.9	122.2	17.16	4.5
Jätteen käsittely	0	0	0	0	4.4	0.26	36.67
Maatalous	0	0	0	0	0.2	0	90.1
Muu	0	0.1	0	0	0	17.81	0

Vuonna 2030 puun pienpoltto on selvästi suurin mustan hiilen päästösektori noin 80 % osuudella kokonaispäästöistä. Liikenteen ja työkoneiden ajoneuvot ovat kannan uusiutumisen myötä lähestulkoon kokonaisuudessaan varustettu tehokkailla hiukkassuodattimilla ja päästöjen lisävähennyspotentiaali on minimaalinen. Tästä syystä seuraavissa luvuissa tarkastellaan yksinomaan puun pienpolton päästöjen vähennysmahdollisuuksia.

#### *Puun pienpolton päästöt Suomessa*

Puun pienpoltto on kansallisesti merkittävä päästölähde pienhiukkasten, mustan hiilen, orgaanisen hiilen, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja hiilimonoksidin kannalta, ja lisäksi se aiheuttaa myös metaanipäästöjä. Pienpolttosektorin ilmastovaikutteisten ilmansaasteiden päästömäärät sekä peruslinjan mukainen kehitysarvio on esitetty Taulukossa 3. Kaikilla päästökomentteilla päästökkehityksessä on selvästi laskeva trendi jo peruslinjassa, johtuen osittain uuden teknologian osuuden kasvusta, mutta merkittävästi myös aktiviteetin oletetusta vähenemisestä vuoden 2010 jälkeen TEM:n Tarkennetussa perusurassa. On hyvä huomata, että todellisuudessa aktiviteetti on kasvanut koko 2000-luvun ajan, joten TEM:n näkemys puun pienkäytön kehityksestä saattaa osoittautua aliarvioksi.



Taulukko 3. Primäärienergian, pienhiukkasten ja pienpolton kannalta tärkeimpien ilmastovaikutteisten ilmansaasteiden päästöt puun pienpoltosta Suomessa [ton/a].

Vuosi	Energia [PJ]	PM2.5	BC	OC	CH4	NM VOC	CO
2010	70	11900	3570	3200	8340	18800	204500
2020	61	9510	2810	2470	6950	15600	168300
2030	51	7150	2160	1750	5600	12500	131400

#### *Puun pienpolton päästöjen vähennyskeinot ja -kustannukset*

Päästövähennyspotentiaalia tarkasteltiin kuudella toimenpiteellä, joissa päästöihin vaikutetaan ottamalla käyttöön kehittyneempiä laitteita, sekä yhdellä teoreettisella toimella, jossa kaikkia nykyisiä tulisijoja käytetään optimaalisella tavalla (Taulukko 4). Vähennyspotentiaalit kullekin toimenpiteelle ja päästökomententille laskettiin vertaamalla niitä vuoden 2030 Peruslinjan mukaisiin päästöihin olettaen kuitenkin Ecodesign-direktiivin voimaantulo vuonna 2016 (Skenaario 2. Peruslinja + Ecodesign, kts. seuraava luku).

Tehokkain yksittäinen vähennyskeino on kaikkien päästöjen osalta saunankiukaiden modernisointi, joka tässä tarkastelussa toteutettaisiin sallimalla vain vähäpäästöisten kiukaiden myynti vuodesta 2016 eteenpäin. Erityisen korkeat päästöt johtuvat siitä, että saunankiukaat ovat rakenteeltaan muita tyypillisiä tulisijoja yksinkertaisempia, jolloin niillä on korkeammat palamatta jääneiden komponenttien päästökertoimet. Lisäksi kiukaita on Suomessa paljon, ja niiden lyhyen käyttöiän vuoksi muutokset markkinoilla myytävissä laitteissa näkyvät nopeammin kiinteistöjen laitekannassa kuin vaikkapa varaavilla takoilla tai lämmityskattiloilla. Saunankiukaiden investointikustannukset ovat myös verrattain edulliset, jonka takia kyseisen toimenpiteen yksikkökustannus mustahiilipäästöjen vähentämiseksi on listan halvimmasta päästä.

Muista keinoista erottuu mustahiilivähennysten suhteen selkeimmin sähkösuodatinten asentaminen tulisijoihin. Sähkösuodattimet pientalokokoluokassa ovat kuitenkin vasta kaupallistamisen alkuvaiheessa ja siten sen toteuttamiseen sisältyy eniten epävarmuuksia käytännön toimivuuden ja taloudellisuuden suhteen, ja se on myös yksikkökustannuksiltaan kallein vaihtoehto.

Kustannustehokkuudeltaan paras vaihtoehto on vesivaraajien asentaminen vanhoihin klapikattiloihin, joka helpottaisi kattiloiden käyttöä niille tarkoitettulla tehoalueella (ei kitupolttoa). Vaikka ilman varaajaa toimivien kattiloiden määrä on oletettu erittäin vähäiseksi vuonna 2030, se olisi silti vähennyspotentiaaliltaan varteenotettava toimenpide. Toimenpiteenä tässä voisi olla klapikattiloiden käytön kieltäminen ilman riittävän kokoista varaajaa. Tämä voisi kuitenkin tuoda käytännön ongelmia. Jos esim. puulämmittäjän pannuhuoneessa ei ole tilaa kunnon varaajalle, kiello tarkoittaisi käytännössä pakottamista lämmitysmuodon vaihtamiseen.

Varaava takka on tyypillisin lisälämmityslaite, ja niiden osalta laitekanta vaihtuu hitaasti takkojen pitkän eliniän vuoksi. Vaihtuvuuden nopeuttaminen on tarkastelluista menetelmistä kallein.

Taulukko 4. Mustan hiilen päästövähennystoimien yksikkökustannukset ja vähennyspotentiaali päästökomententteittäin vuonna 2030.

Vähennyskeino	Yksikkö-kustannus BC [k€/ton]	Vähennyspotentiaali [ton/a]					
		PM2.5	BC	OC	CH4	VOC	CO
Vain moderneja saunankiukaita myynnissä 2016 ->	53	1890	730	550	1740	5080	33800
Vain moderneja lämmityskattiloita myynnissä 2016 ->	110	450	88	56	12	4	9530
Vesivaraajien asennus vanhoihin klapikattiloihin	15	330	100	68	-	190	-
Sähkösuodattimet lämmityskattiloihin*	553	910	138	97	-	-	-
Varaavien takkojen uudistumisvauhdin kaksinkertaistaminen	1310	270	88	93	110	250	4500
Sähkösuodattimet tulisijoihin**	2620	1240	440	340	-	-	-
Optimaalinen poltto kaikissa tulisijoissa	-	1000	150	420	1060	2890	18800

Maksimivähennyspotentiaali	-	5070	1690	1290	2490	7130	47900
----------------------------	---	------	------	------	------	------	-------

\*paitsi ilman vesivaraajaa toimiviin klapiattiloihin

\*\*paitsi avotakkoihin, perinteisiin saunankiukaisiin ja vapaa-ajan rakennusten tulisijoihin

Optimaalisen polton saavuttamiselle kaikissa tulisijoissa ei arvioitu hintaa, sillä 100 % onnistuminen takankäyttäjien polttotapoihin vaikuttamisessa on käytännössä mahdotonta. Vaikutuksia on kuitenkin mahdollista saada esim. erilaisilla informaatiokampanjoilla. Taulukossa 5 on tarkasteltu kahta oletettua vaikutusta kampanjalle, jossa jaetaan jokaiselle Suomen takankäyttäjälle opaslehtinen puhtaaseen puunpolttoon. Kampanjan vaikutus näkyy vähentyneenä huonon polton osuutena, jonka lähtötasoksi on arvioitu 10.5 % kaikissa tulisijoissa perustuen nuohoojahaastatteluihin. Luvut antavat suuntaa sekä päästövähennyspotentiaalille että ennen kaikkea yksikkökustannuksille.

Taulukko 5. Herkkyytarkastelu informaatiokampanjan vaikutuksille ja päästövähennysten yksikkökustannuksille mustahiilen osalta.

Kampanjan vaikutus huonon polton osuuteen	Yksikkökustannus BC [k€/ton]	Päästövähennyspotentiaali [ton/a]				
		BC	OC	CH4	VOC	CO
Huono poltto vähenee 10.5 % -> 10 %	19	7	20	51	140	900
Huono poltto vähenee 10.5 % -> 5 %	1.7	80	220	560	1510	9850

#### *Päästövähennysten terveyshyödyt*

Mustan hiilen terveysvaikutuksia on käsitelty WHO:n piirissä tehdyssä kahdessa katsauksessa (Janssen et al. 2012 sekä REVIHAAP 2013). Mustan hiilen todettiin olevan yhteydessä terveyshaittoihin kuten kuolleisuuteen, sydän- ja verisuonitauteihin sekä lyhyellä (24 tuntia) että pitkällä (vuositaso) aikavälillä. Terveyshaittojen todettiin olevan selvemmin yhteydessä musta hiileen kuin massaperustaisiin hiukkasmääriin. Musta hiili ei välttämättä ole itse syynä terveysvaikutuksiin vaan se voi toimia kantajana ja näin ollen indikaattorina palamisprosesseissa muodostuville muille haitallisemmille aineille.

Väestöaltistuminen mustalle hiilelle sekä pienhiukkasille yleisesti ja siten sen aiheuttamat terveysvaikutukset väestölle on vahvasti riippuvainen päästölähteiden sijainnista. Päästöt jotka tapahtuvat tiheään asutuksen läheisyydessä aiheuttavat suuren väestöaltistuksen. Siksi kaupunkialueiden tai tiheästi asuttujen pientaloalueiden päästöt ovat haitallisempia kuin päästöt maaseudulla tai muilla harvaan asutuilla alueilla.

Pienpolton päästöjen väestöaltistusvaikutuksia Suomen väestölle on tarkasteltu useissa tutkimuksissa (esim. Ahtoniemi ym. 2010, Karvosenoja ym. 2011, Paunu 2012). Selkeä viesti näistä on, että puun pienpolto kaupunkien pientaloalueilla tapahtuu pääosin muuta lämmitystä täydentävänä lämmityksenä varaavissa tulisijoissa talviaikaan. Myös puukiukaiden käyttö on varsin yleistä kaupunkialueilla (Gröndahl ym. 2011).

Edellä arvioitujen päästövähennyspotentiaalien ja aikaisempien tutkimusten perusteella voidaan arvioida, että suurimmat terveyshyödyt vähennettyä päästöyksikköä kohden voitaisiin saavuttaa seuraavien toimenpiteiden kohdalla:

- Informaatiokampanjat tehokkaista puun polton käytännöistä (erittäin kustannustehokas, melko vähäinen potentiaali päästöjen vähentämiseen)
- Saunan kiukaiden modernisointi (melko kustannustehokas, suuri potentiaali päästöjen vähentämiseen)
- Varaavien tulisijojen modernisoinnin vauhdittaminen (ei kustannustehokas, kohtalainen potentiaali päästöjen vähentämiseen)
- Sähkösuodattimet tulisijoihin (ei kustannustehokas, suuri potentiaali päästöjen vähentämiseen)

Päästövähennysten suhteelliset terveyshyödyt ovat merkittävästi suuremmat, jos toimet on mahdollista rajata koskemaan vain tiheästi asuttuja seutuja. Yllä esitetyistä informaatiokampanjat ovat tyypillisesti paikallisesti toteutettuja ja siten mahdollista kohdistaa erityisesti kaupunkien pientaloasukkaille. Puukattiloita käytetään pääasiassa maaseudulla ja harvaan asutuilla alueilla, joten niihin suunnattujen toimenpiteiden päästövähennykset tuovat huomattavasti alempia terveyshyötyjä vähennettyä päästöyksikköä kohden. Myöskään vapaa-ajan rakennuksiin kohdistetut päästövähennykset eivät ole tehokkaita terveysnäkökulmasta. Ilmastovaikutuksen näkökulmasta taas on sama, toteutetaanko päästöjen vähentämisen toimenpiteet tiheästi tai harvaan asutulla seudulla.

## Puun pienpolton päästöskenaariot

Suomen pienpolttosektorin päästövähennyskeinojen vaikutuksia tarkasteltiin kuudessa skenaariossa, joissa taulukon 5 mukaisia toimenpiteitä kohdistettiin tietyn tyyppisiin rakennuksiin ja käyttötapoihin. Käyttötapa- ja otteellut on pyritty luomaan sen mukaan, että, yhtäältä, niiden erilaiset vuodenaikaisvaihtelut toisivat esiin vähennysten erilaisia ilmastovasteita (esim. asuinrakennusten ja vapaa-ajan asuntojen puun käytön erilaiset vuodenaikaispainotukset) ja, toisaalta, jaottelut olisivat kansallisia päätöksentekoprosesseja tukevia (esim. saunankiukaiden päästöjen vähentäminen kansallisella lainsäädännöllä, koska eivät kuulu Ecodesign-direktiivin piiriin). Skenaarioiden päästöt puun pienpoltosta on esitetty Taulukossa 6 ja Kuvassa 2.

Tarkastellut skenaariot:

**1 Peruslinja:** Ei pienpolton kansallisia päästövähennystoimia, mutta oletetaan, että Ecodesign-direktiivi tulee voimaan alkaen vuodesta 2016.

**2 Puulämmitys:** Kaikki tekniset toimenpiteet ja 50 % vähenemä huonon polton osuudessa asuinrakennusten tulisijoille ja kattiloille (ei kiukaille).

**3 Kiukaat:** Vain vähäpäästöisiä kiukaita kaupan ja 50 % vähenemä kiukaiden huonon polton osuudessa

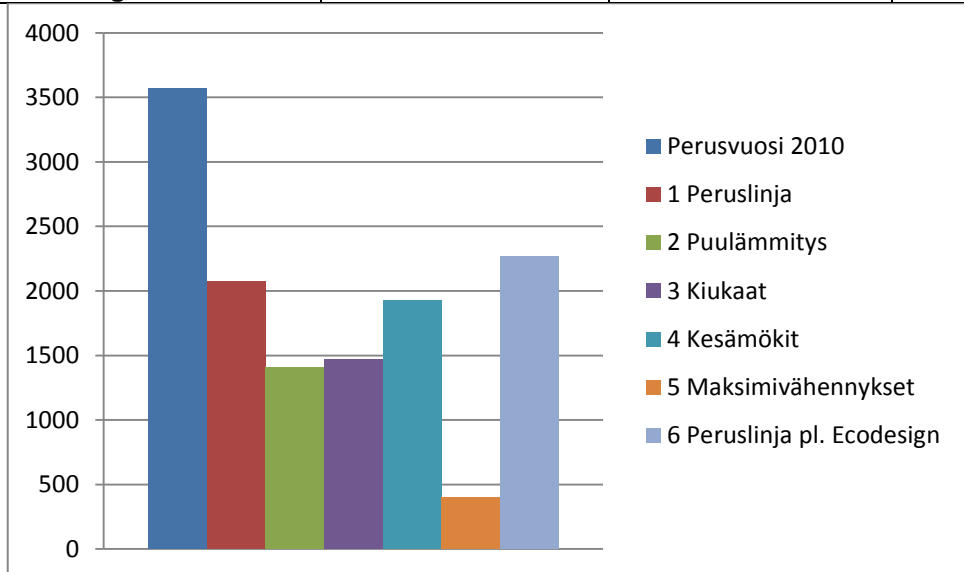
**4 Kesämökkit:** Tekniset toimenpiteet ja 50 % vähenemä huonon polton osuudessa vapaa-ajan rakennusten tulisijoille.

**5 Maksimivähennykset:** Kaikki tekniset toimenpiteet ja 50 % vähenemä huonon polton osuudessa kaikille tulisijoille ja rakennustyypeille.

**6 Peruslinja ilman Ecodesignia:** Kuten 1, mutta oletetaan, että Ecodesign ei toteudu.

Taulukko 6. Vaikutusarvioinnissa käytettyjen skenaarioiden päästöt vuonna 2030 [ton/a].

skenaario	PM2.5	BC	OC
<b>1 Peruslinja</b>	6330	2080	1700
<b>2 Puulämmitys</b>	3800	1410	1090
<b>3 Kiukaat</b>	4730	1470	1210
<b>4 Kesämökkit</b>	5920	1923	1570
<b>5 Maksimivähennykset</b>	1390	400	410
<b>6 Peruslinja pl. Ecodesign</b>	7110	2270	1870



Kuva 2. Vaikutusarvioinnissa käytettyjen skenaarioiden päästöt vuonna 2030 [ton/a].

# Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastovaikutukset

## *Mallit ja menetelmät*

Projektissa on käytetty ilmaston simuloimiseen globaalia ilmastomallia ECHAM-HAM (Stier et. al, 2005; Zhang et. al, 2012). Malli kuvaa ilmastoa laskentahiloissa, joiden sivujen pituus on keskimäärin 200 km maanpinnan suhteen. Pystysuora laskentatarkkuus muodostuu 31 laskentatasosta ulottuen maanpinnasta n. 30 km korkeuteen. Tasot ovat jakautuneet siten, että maanpinnan lähellä niitä on enemmän kuin yläilmakehässä.

Ilmakehän pienhiukkasia ECHAM-HAM-malli kuvaa erillisessä aerosolimoduulissa. Moduuli ottaa huomioon kaikki tärkeimmät aerosoliprosessit fysikaalisesti, dynaamisesti ja kemiallisesti. Se kuvaa myös aerosolihiukkasten tuotto- ja vähenemisprosesseja. Tuottoprosesseista tärkein on eri päästölähteistä tulevat pienhiukkaset. Malli ottaakin huomioon päästöjen erot ainekohtaisesti (esim. musta ja orgaaninen hiili) ja lähdekohtaisesti (esim. liikenne, kotitalouksien pienpoltto, metsäpalot jne.).

Aerosolihiukkaset vaikuttavat ilmastoon suoraan sirottamalla auringon valoa ja absorboimalla lämpösäteilyä sekä toimimalla pilvien tiivistymisytiminä. Nämä kaikki ilmastolle merkittävät prosessit ovat kuvattu ECHAM-HAM-mallissa. Toisaalta mallissa ei ole mukana lumen heijastavuuden muutosta sen liikaantuessa. Lumi liikaantuu usealla eri tapaa, varsinkin kaupunkiolosuhteissa, mutta pääasialliset mekanismit ovat mustan hiilen laskeuma sekä kulkeuma alas sateen mukana (vesi- ja lumisade).

## *Simulaatiot*

Projektissa on tehty useita eri simulaatioita ECHAM-HAM-mallilla. Simulaatioissa on käytetty ns. nudgetus menetelmää. Tämä tarkoittaa sitä, että mallin simuloimaa ilmastoa on ohjattu kohti havaintoja. Simuloitu aikaväli on ollut vuodesta 2003 vuoteen 2007. Yli tämän aikavälin on tehty kuukausikohtainen keskiarvostus yhteen vuoteen. Tällä on pyritty minimoimaan mallin sisäinen vaihtelevuus, eli vähentämään tulosten virhettä.

Globaalina päästölähdekarttana simulaatioissa on käytetty MACEB-projektissa luotuja emissiokarttoja. Ne pääasiallisesti pohjautuva IASA:n (International Institute for Applied Systems Analysis, Itävalta) päästölähdemalli GAINS:in (The Greenhouse Gas and Air Pollution Interactions and Synergies) tuloksiin. Suomen osalta päästöjä on tarkennettu Suomen ympäristökeskuksen päästökartoilla. Lisäksi simulaatioita on tehty emissiokarttoja muuttaen siten, että Suomen mustan hiilen päästöt ovat poistettu. Tällöin on mahdollista arvioida kuinka paljon mustan hiilen päästöt Suomesta vaikuttavat ilmastoon. Analyysi on tehty tarkastelemalla ilmakehän pienhiukkasten aiheuttamaa pakotetta sekä ilmakehän kannalta että lumen heijastavuuden muutoksen kautta. Pakotevertailut on tehty ainoastaan nykyilmastoa kuvaavalle ensimmäiselle skenaariolle.

## *Lumen likaantumisen lisääminen*

Lumen likaantumisen aiheuttama heijastavuuden muutos lisättiin ECHAM-HAM malliin ilmatieteen laitoksen sisäisen yhteistyön perusteella. Aikaisemmin olleessa MACEB musta hiili -projektissa mitattiin lumen heijastavuuden muutosta sen nokeentuessa. Näiden mittausten avulla pystyttiin tekemään kuvaaja, joka kertoo heijastavuuden muutoksen mustan hiilen lumipitoisuuden muuttuessa.

Malliin lisättiin laskentamoduuli, joka ottaa huomioon mustan hiilen laskeuman ja kulkeuman sateen mukana lumeen. Tämä moduuli ottaa huomioon lumen sulamisen, mutta olettaa, että musta hiili on tasaisesti jakautunut lumipakettiin kussakin laskentaruudussa. Tämä aiheuttaa lievää heijastavuuden muutoksen virhettä syksyn ja kevään suhteen. Vuosikohtaisessa tarkastelussa virhe on erittäin pientä. Moduulin antamalla mustan hiilen määrällä lumessa voidaan laskea heijastavuuden muutos mittauksiin perustuvan kaavan avulla. Tämä lumen heijastavuuden muutos otetaan sitten ECHAM-HAM-mallissa huomioon ja näin saadaan lumen likaantuminen mukaan. Koska mallissa oleva säteilymoduuli ottaa pinnan

heijastuvuuden huomioon, myös lumen likaantumisen aiheuttama lämpötilan nousu (ja lumen sulaminen) tulee automaattisesti mukaan.

### Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastopakotteet

#### Suora pakote

Suomen mustan hiilen suora pakote laskettiin kahden eri malliajon erotuksesta: 1) ilman Suomen emissioita ja 2) normaali malliajo. Globaaleja arvoja ei suoraan voi käyttää keskiarvon tekemiseen, koska Suomen emissioiden poiston vaikutus näkyy realistisesti vain lähellä Suomea ja sen jälkeen vaikutus häviää mallin kohinaan. Tämän vuoksi globaalit arvot on skaalattu Suomen läheisen alueen avulla.

Taulukko 7: Suomen mustan hiilen emissioiden poistamisen aiheuttama suoran pakotteen muutos [ $\text{mW/m}^2$ ] eri kuukausina ja keskiarvona sekä globaalisti että Suomen alueelle.

	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä
Maapallo	0.03	0.02	0.04	0.08	0.11	0.05	0.15
Suomi	0.86	2.74	27.5	25.1	2.52	1.06	1.66
	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu		Keskiarvo
Maapallo	0.21	0.02	0.12	-0.02	0.01		0.07
Suomi	6.66	6.21	16.5	0.72	0.10		23.9

#### Epäsuora pakote

Suomen mustan hiilen epäsuora pakote on niin pientä, että se häviää mallin kohinaan. Ylärajana sille voidaan käyttää esimerkiksi samaa arvoa kuin suorassa pakotteessa.

#### Lumipakote

Lumen likaantumisen vaikutuksen tutkiminen tehtiin tekemällä kaksi malliajoa: 1) uusi lumen likaantumisen vaikutuksen huomioon ottava moduuli oli käytössä ja 2) ilman uutta lumen likaantumisen moduulia. Albedopakote (eli heijastavuuspakote) laskettiin kummallekin simulaatiolle erikseen Ghanin (2013) esittämällä tavalla. Siinä ilmakehän yläosan nettosäteilyvuosta vähennetään aerosolien pakote (laskenta tehdään ilman pilvien vaikutusta) ja jäljelle jäävä osuus kuvaa kuinka paljon pinnan heijastavuus vaikuttaa säteilytaseeseen, eli mikä on sen pakote. Kun vähennämme ensimmäisen malliajon albedopakotteesta toisen malliajon pakotteen, jäljelle jäävä osuus kertoo kuinka paljon lumeen likaantuminen vaikuttaa säteilytaseeseen, eli kertoo lumen likaantumisen pakotteen.

Suomen mustan hiilen päästöjen aiheuttama lumipakote arvioitiin tekemällä lisäksi malliajo, jossa Suomen päästöt oli asetettu nolaksi. Tämän tuloksia verrattiin yllämainittuun malliajoon 1).

Taulukko 8: Mustahiilipäästöistä johtuvan lumen likaantumisen aiheuttama pakote [ $\text{W/m}^2$ ] eri kuukausina ja vuosikeskiarvona Globaalisti ja Suomen alueella.

	Tammi	Helmi	Maalis	Huhti	Touko	Kesä	Heinä
Maapallo	0.11	0.26	0.57	0.84	0.90	0.17	0.02
Suomi	0.00	0.12	3.17	1.08	0.02	0.00	0.00
	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu		Keskiarvo
Maapallo	0.01	0.03	0.07	0.06	0.06		0.26
Suomi	0.00	0.01	0.04	0.01	0.00		0.55

Taulukossa 8 on esitetty lumeen likaantumisen aiheuttama pakote globaaleille mustan hiilen päästöille. Pakotearvot on annettu koko maapallon alueelle ja Suomen alueelle. Pakotteessa on mukana sekä lumen likaantuminen että sen aiheuttaman lumen sulamisen komponentit, joten se on verrannollinen Bond et al. (2013) käyttämään efektiiviseen pakotteeseen. Havaitaan, että globaali pakote ( $0.26 \text{ W/m}^2$ ) on selkeästi suurempi kuin Bond et al. (2013) paras arvio ( $0.10 \text{ W/m}^2$ ), mutta kuitenkin heidän antamiensa virherajojen sisällä. Korkea arvo johtunee käyttämämme ilmastomallin suuresta herkkyydestä.

Vertaamalla malliajoja, jossa Suomen mustan hiilen päästöt on asetettu nolaksi, malliajooon 1), saadaan Suomen päästöjen aiheuttamaksi pakotteeksi  $0.39 \text{ mW/m}^2$ . Pakotteiden suuren kohinaisuuden vuoksi tämä arvo on kuitenkin erittäin epävarma, ja luotettavan arvion saaminen vaatisi nykyisiä malliajoja (5 v) huomattavasti pidempiä simulaatioita. Tästä syystä turvaudumme arvioon, jossa käytetään hyväksi taulukon 8 globaalia pakotetta ja Suomen päästöistä peräisin olevaa mustan hiilen lumidepositiota. Globaalista mustan hiilen lumidepositiosta Suomen päästöt aiheuttavat malliajojemme mukaan  $0.4\text{--}0.6 \%$ . Arvioimme siten Suomen mustan hiilen päästöjen lumipakotteeksi  $1.04\text{--}1.56 \text{ mW/m}^2$ . Tämä arvio on hyvin luultavasti luotettavampi kuin simulaatiosta suoraan saatu arvio. Jos lumideposition prosenttiosuudella kerrotaan Bond et al. (2013) antama lumipakote, saadaan Suomen päästöjen aiheuttamaksi pakotteeksi  $0.4\text{--}0.6 \text{ mW/m}^2$ , eli kuudesta yhdeksään kertaa suurempi arvo kuin mallimme antama suora pakote.

Taulukon 6 skenaarioiden mukaisista malliajoista oli vaikeaa saada Suomen mustan hiilen päästövähennysten aiheuttamaa lumideposition pienenemää laskettua luotettavasti. Tähän on syynä mallin karkeasta resoluutiosta johtuva kohinataso. Luotettavaan arvioon tarvittaisiin tarkemman resoluution mallia, kuten alueellista ilmastomallia. Arvio lumelle deponoituvan mustan hiilen vähenemisestä saadaan kuitenkin päästöajankohdan mukaan, esimerkiksi olettamalla, että marras- maaliskuun välisenä aikana päästetty musta hiili deponoituu kokonaisuudessaan lumelle, kun taas muina aikoina päästetty musta hiili ei deponoidu lumelle ollenkaan. Kumpikaan oletus ei todellisuudessa pidä täysin paikkaansa, vaan etenkin Etelä-Suomen talvipäästöistä osa päättyy lumettomille alueilla, kun taas etenkin Pohjois-Suomen huhtilokakuun päästöistä osa päättyy lumisille alueille. Nämä virheet kuitenkin kumonnevat ainakin osittain toisensa. Lumideposition prosentuaalinen vähennys on puolestaan samaa luokkaa kuin lumipakotteen prosentuaalinen vähennys.

Taulukossa 9 on esitetty arvioimme mustan hiilen lumideposition prosentuaalinen vähennys eri skenaarioille. Kohdistamalla päästövähennykset puun lämmityskäyttöön, ts. talviaikaisiin päästöihin, saadaan merkittävä vaikutus lumipakotteeseen ( $19.1 \%$  vähenemä verrattuna Peruslinjaan). Saunan-kiukaita käytetään tasaisesti ympäri vuoden, joten niihin kohdistetut päästövähennykset aiheuttavat kohtuullisen vähenemän lumipakotteessa ( $10.1 \%$ ). Sen sijaan vapaa-ajan asuntojen mustahiilipäästöjen vähentämisellä on vain hyvin pieni vaikutus lumipakotteeseen ( $1.4 \%$ ). Ecodesign-direktiivin vaikutukset ovat Suomessa suhteellisen alhaiset; jos direktiivi ei tulisi voimaan, lumipakotevaikutus lisääntyisi  $5.1 \%$  verrattuna Peruslinjaan (joka siis olettaa Ecodesign-direktiivin voimaantulon).

Taulukko 9. Mustan hiilen lumipakotteen prosentuaalinen vähenemä eri päästöskenaarioissa vuonna 2030.

Skenaario	Pakotteen vähenemä
1 Peruslinja	0 %
2 Puulämmitys	19.1 %
3 Kiukaat	10.4 %
4 Kesämökkit	1.4 %
5 Maksimivähennykset	35.2 %
6 Peruslinja pl. Ecodesign	-5.1 %

## Pohdintaa

Yleisellä tasolla voidaan todeta, että mustan hiilen päästöjen rajoittamisen ilmastoa viilentävä potentiaali on sangen rajallinen. Voitaisiin ajatella, että maksimaalisilla päästövähennyksillä ilmaston lämpenemiskehitystä saataisiin lykättyä muutamilla vuosilla. Hiilidioksidin päästövähennykset ovat tärkein keino torjua ilmastomuutosta. Näin ollen mahdollisia musta hiilen päästöjen rajoittamiseen ilmaston kannalta

kohdistuvia toimia tulee käsitellä hiilidioksidin päästövähennyksiä täydentävinä toimenpiteinä, sillä on vaarana, että hiilidioksidin päästövähennykset hidastuvat, jos liiaksi keskitytään mustaan hiileen.

Ilmastomallitulosten mukaan Suomen mustan hiilen päästöjen ilmastovaikutuksia dominoi lumen ja jään aikaistuva sulanta suoran vaikutuksen ollessa huomattavasti pienempi. Tästä seuraa, että ilmastovaikutusten kannalta talviaikaiset päästövähennykset ovat huomattavasti tehokkaampi hillintäkeino kuin kesäaikaiset päästövähennykset. Vuodenaikaiseroa lisää vielä se seikka, että varsinkin biomassan poltossa syntyy myös ilmastoa viilentäviä orgaanisia hiukkasia, mutta vähäisen auringonsäteilyn takia niiden viilennysvaikutus on lähes olematon talviaikaan. On huomionarvoista, että Suomen mustahiilipäästöjen osuus globaalista lumi- ja jääpakotteesta on jopa prosentin luokkaa, kun taas suoran pakotteen osalta vastaava osuus on vain noin promille.

Mustan hiilen on todettu olevan yhteydessä terveyshaittoihin, kuten kuolleisuuteen, sydän- ja verisuonitauteihin sekä lyhyellä (24 tuntia) että pitkällä (vuositaso) aikavälillä. Terveyshaittojen on todettu olevan selvemmin yhteydessä mustaan hiileen kuin massaperustaisiin hiukkasmääriin. Musta hiili ei välttämättä ole itse syynä terveysvaikutuksille vaan se voi toimia kantajana ja näin indikaattorina palamisprosesseissa muodostuville muille haitallisemmille aineille.

Dieselmootoreiden mustahiilipäästöjen voimakas vähentyminen tulevina vuosina on positiivista sekä terveys- että ilmastonäkökulmasta, koska päästöt tapahtuvat pääosin kaupungeissa, joissa asutus on tiheää ja ilmastoa viilentävä hiukkasten pilvivaikutus ei riipu vahvasti musta hiili -hiukkasista. Puunpolton päästöt ovat nykytilanteessa terveysriski etenkin taajamissa, jossa puuta poltetaan pientalojen lämmitystarkoituksessa. Päästövähennykset olisivat hyödyllisiä sekä ilmaston että terveyden kannalta.

EU:ssa valmisteilla oleva Ecodesign-direktiivi asettaa uusille myytävälle tulisijoille ja pienkattiloille päästövaatimuksia. Vaatimukset koskevat mm. hiukkasia, mitä kautta se vaikuttaa myös mustaan hiileen. Tullessaan voimaan direktiivi vähentää siten puun pienpolton päästöjä tulevaisuudessa. Jotta Ecodesign-direktiivi vähentäisi tehokkaasti mustahiilipäästöjä, vaatimusten hiukkaspäästöille tulisi olla riittävän tiukat. Suomessa päästöt vähenevät Ecodesign-direktiivin seurauksena kuitenkin melko hitaasti, koska (1) Suomessa yleiset varaavat tulisijat ovat varsin pitkäikäisiä ja siten modernit tulisijat yleistyvät suhteellisen hitaasti ja (2) direktiivi ei koske saunan kiukaita, joiden hiukkasten ja mustan hiilien päästöt ovat erityisen korkeita.

Ecodesign-direktiivin lisäksi on olemassa muitakin keinoja vähentää puun pienpolton päästöjä. Arvioitaessa tässä raportissa tarkasteltuja keinoja kustannustehokkuuden, potentiaalisten terveyshyötyjen ja käytännön toteutettavuuden kannalta. Seuraavat kaksi keinoa erottuvat:

- Saunankiukaiden modernisointi esim. Ecodesignin kaltaisella laitestandardilla. Saunankiukailla on korkeat hiukkasten ja mustan hiilen päästöt ja suhteellisen lyhyt käyttöikä verrattuna varaaviin tulisijoihin, joten uusille myytävälle kiukaille asetettava lainsäädäntö vähentäisi päästöjä merkittävästi. Vapaaehtoisen Joutsen-merkin uudessa ehdotuksessa esitetään päästörajoja erikseen myös puukiukaille. Tämä voisi toimia lähtökohtana kansallisen lainsäädännön arvioinnissa.
- Informaatiokampanjat hyvistä puun polttotavoista. Vaikka potentiaali päästöjen vähentämiseen arvioitiin suhteellisen vähäiseksi, informaatiokampanjat ovat hyvin edullinen tapa vaikuttaa pienpolton päästöihin. Informaatiokampanjat toteutetaan tyypillisesti paikallisesti, joten ne on mahdollista kohdentaa kaupunkialueille ja saada siten ilmanlaatu- ja terveyshyötyjä paikallisesti. Paikallisten informaatiokampanjoiden kannustamiseksi MACEB-hankkeessa kehitettiin nettisivut, joilla esitellään kampanjan toteutusohjeita kunnille sekä HSY:n vapaasti käytettävissä oleva kampanjamateriaali (<http://www.kunnat.net/fi/asiantuntijapalvelut/tyy/energia/energiahuolto/pienpoltto/Sivut/default.aspx>).

Kustannustehokkuutta voidaan arvioida myös suhteessa päästöjen vähenemään ilmaistuna hiilidioksidiekvivalentteina. IPCC (2013) raportin luvussa 8 ja liitteen taulukossa 8.A.6 on esitetty GWP-painoja mustalle hiilelle. Sadan vuoden tarkasteluaikalla paino on 100...1700, paras arvio 900. Epävarmuus on siis suurta. Jos laskelman yksinkertaistamiseksi oletetaan painoksi 1000, saadaan saunan kiukaita koskevan toimen kustannustehokkuudeksi 53 €/tCO<sub>2e</sub>, eli siis numeroarvo pysyy samana. Edellä listattujen toimien kustannukset ovat siis samaa luokkaa kuin yleensä ei-päästökaupparektorilla (Lindroos et al. 2011, Hast et al. 2013). Suomen mustan hiilen päästöt vaikuttavat voimakkaimmin muuttamalla lumen albedoa. Tämän mekanismin vaikutus on maailman keskimääräisessä GWP:ssä melko pieni mutta Suomessa tapahtuvissa päästöissä suuri. Jos oletetaan vaikutuksen kymmenkertaistavan GWP:n (eli Suomessa

tapahtuvan mustan hiilen päästön GWP-paino olisi 10000), olisi kiukaita koskevan vaatimuksen kustannustehokkuus varsin hyvä, 5,3 €/tCO<sub>2</sub>e.

## Kirjallisuusviitteet

Ahtoniemi P., Tainio M., Tuomisto J. T., Karvosenoja N., Kupiainen K., Porvari P., Karppinen A., Kangas L., Kukkonen J. 2010. Pienhiukkasten lähipäästöjen terveystriskit: puun pienpoltto ja tieliikenne (PILTTI). National Institute for Health and Welfare REPORT 3/2010. <http://www.thl.fi/thl-client/pdfs/821ba678-1430-4016-bfc8-77a40c49eb1f>

Bond, T. C. et al.: Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment, J. Geophys. Res., doi:10.1002/jgrd.50171, 2013.

Ghan, S. J.: Technical Note: Estimating aerosol effects on cloud radiative forcing, Atmos. Chem. Phys., 13, 9971-9974, doi:10.5194/acp-13-9971-2013, 2013.

Hast, A., Ekholm, T., Savolainen, I. 2013. Meeting emission targets under uncertainty – the case of Finnish non-emission-trading-sector. Mitig Adapt Strateg Glob Change (2013) 18:637–658 DOI 10.1007/s11027-012-9379-1

IPCC. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Stocker T.F., Qin D., Plattner G.-K., Tignor M., Allen S.K., Boschung J., Nauels A., Xia Y., Bex V. & Midgley P.M. (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Janssen N.A.H., Gerlofs-Nijland M.E., Lanki T., Salonen R.O., Cassee F., Hoek G., Fischer P., Brunkereef B., Krzyzanowski M. 2012. Health effects of black carbon. Copenhagen, World Health Organization, Regional Office for Europe. (<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2012/health-effects-of-black-carbon>)

Karvosenoja N., Kangas L., Kupiainen K., Kukkonen J., Karppinen A., Sofiev M., Tainio M., Paunu V.-V., Ahtoniemi P., Tuomisto J. T., Porvari P. 2011. Integrated modeling assessments of the population exposure in Finland to primary PM<sub>2.5</sub> from traffic and domestic wood combustion on the resolutions of 1 and 10 km. Air Qual Atmos Health 4:179-188.

Koch, D. and Del Genio, A. D.: Black carbon semi-direct effects on cloud cover: review and synthesis, Atmos. Chem. Phys., 10, 7685–7696, 2010.

Lindroos, T.J., Hast, A., Ekholm, T., Savolainen, I. 2011. Arvio ei-päästökauppasektorin päästövähennyskeinoista ja kustannuksista Suomessa. VTT Tiedotteita 2605. 65s.+liitt. 9s.

Myhre, G. et al.: Radiative forcing of the direct aerosol effect from AeroCom Phase II simulations, Atmos. Chem. Phys., 13, 1853-1877, 2013.

Paunu V.-V. 2012. Emissions of Residential Wood Combustion in Urban and Rural Areas of Finland. Master of Science Thesis. 62 pp.

REVIHAAP 2013. Review of Evidence on Health Aspects of Air Pollution – REVIHAAP Project. Technical Report. World Health Organization, Regional Office for Europe. (<http://www.euro.who.int/en/health-topics/environment-and-health/air-quality/publications/2013/review-of-evidence-on-health-aspects-of-air-pollution-revihaap-project-final-technical-report>)



Savolahti, M., Karvosenoja, N., Paunu, V.-V., Kupiainen, K., 2013. Reduction measures and mitigation scenarios for particulate emissions in Finnish residential wood combustion (FRES-DOMPM), Draft 28.6.2013. Finnish environment institute.

Stier, P., Feichter, J., Kinne, S., Kloster, S., Vignati, E., Wilson, J., Ganzeveld, L., Tegen, I., Werner, M., Balkanski, Y., Schulz, M., Boucher, O., Minikin, A. ja Petzold, A.: The aerosol-climate model ECHAM5-HAM. *Atmos. Chem. Phys.*, 5, 1125-1156, 2005

Zhang, K., O'Donnell, D., Kazil, J., Stier, P., Kinne, S., Lohmann, U., Ferrachat, S., Croft, B., Quaas, J., Wan, H., Rast, S., and Feichter, J.: The global aerosol-climate model ECHAM-HAM, version 2: sensitivity to improvements in process representations, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 8911-8949, doi:10.5194/acp-12-8911-2012, 2012.