

TUTKIMUKSIA
UNDERSÖKNINGAR
STUDIES

No. 1

504.064
504.064.2
504.064.3

**KOKONAISMALLI PIENHIUKKASTEN PÄÄSTÖJEN,
LEVIÄMISEN JA RISKIN ARVIOINTIIN – KOPRA**

Jaakko Kukkonen, Ari Karppinen, Mikhail Sofiev, Leena Kangas
Ilmatieteen laitos

Niko Karvosenoja, Matti Johansson, Petri Porvari
Suomen ympäristökeskus

Jouni Tuomisto, Marko Tainio
Kansanterveyslaitos

Tarja Koskentalo, Päivi Aarnio, Anu Kousa
Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta

Liisa Pirjola
Helsingin ammattikorkeakoulu

Kaarle Kupiainen
Nordic Envicon Oy

Ilmatieteen laitos
Meteorologiska institutet
Finnish Meteorological Institute
Helsinki 2007

ISBN 978-951-697-635-1
ISSN 1796-1203
Yliopistopaino
Helsinki 2007



ILMATIETEEN LAITOS

Julkaisija	Ilmatieteen laitos, Erik Palménin aukio 1, PL 503, 00101 Helsinki	Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi Tutkimuksia – Undersökningar – Studies No. 1 STU-1	Julkaisuaika Lokakuu 2007
Tekijä(t)	Jaakko Kukkonen, Ari Karppinen, Mikhail Sofiev, Leena Kangas, Niko Karvosenoja, Matti Johansson, Petri Porvari, Jouni Tuomisto, Marko Tainio, Tarja Koskentalo, Päivi Aarnio, Anu Kousa, Liisa Pirjola, Kaarle Kupiainen	Projektin nimi Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin – KOPRA	Toimeksiantaja TEKES
Nimeke	Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin – KOPRA		
Tiivistelmä	<p>FINE-tutkimusohjelmaan kuuluneessa KOPRA-projektissa on kehitetty yhdenmoinen malli, jolla voidaan arvioida koko Euroopan ja Suomen pienhiukkaspäästöjä, niiden leviämistä ilmassa, väestön altistumista sekä terveysriskejä. Hanke oli jaettu kolmeen työpakettiin: (1) pienhiukkasten päästöjen arviointi nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä päästöjen vähentäminen (vastuullinen laitos Suomen ympäristökeskus), (2) pienhiukkasten kulkeutuminen ja muutonta ilmakehässä (Ilmatieteen laitos) ja (3) pienhiukkasten riskinarviointi ja päätösanalyysi (Kansanterveyslaitos).</p> <p>Päästöarvioinnin tuloksena on saatu arviot Suomen vuotuisista alueellisista hiukkaspäästöistä sekä sekundäärisiä hiukkasia muodostavien kaasujen päästöistä vuosille 1990, 2000, 2001, 2002, 2010 ja 2020, sekä arviot päästöjen vähennyspotentiaaleista ja -kustannuksista. Primäärihiukkasten, sulfaatin ja merisuolan leviäminen Suomen ja Euroopan alueelle sekä kulkeutumismatriisit on arvioitu SILAM-leviämismallilla. Hankkeessa on myös kehitetty malli metsäpalojen pienhiukkaspäästöjen ja niiden leviämisen arvioimiseksi. Mallitettuja Euroopan laajuisia pitoisuusarvioita on myös verrattu saatavilla oleviin mittauksiin (kuten EMEP).</p> <p>Paikallisen mittakaavan mallilla on tehty pääkaupunkiseudun kattavat leviämislaskelmat pienhiukkasille vuodelle 2002, ja tuloksia on verrattu YTV:n mittauksiin. Pienhiukkasten terveysvaikutuksia on arvioitu kirjallisuuskatsauksella ja kansainvälisen asiantuntijajaneelin haastatteluilla, ja riskien arvioimiseksi on kehitetty päästö-altistus-vaikutus -ketjuja kuvaava malli. Ns. saantiosuudet (intake fraction) on arvioitu käyttämällä riskinarviointimallia, jossa on hyödynnetty hankkeen tuottamia päästötietoja ja leviämismallien tuloksia. Päästövähennysten nettohyötyjä ja kustannuksia on verrattu päätösanalyysillä.</p>		
Julkaisijajaksikko Ilmanlaatu	Luokitus (UDK) 504.064 504.064.2 504.064.3	Asiasanat hiukkaset, päästöt, leviämismalli, aerosolimalli, altistus, terveysriskit, kokonaismallitus	
ISSN ja avainnimeke ISSN 1796-1203	Tutkimuksia – Undersökningar - Studies		
ISBN ISBN 978-951-697-635-1	Suomi	Kieli	
Myynti Ilmatieteen laitos / Kirjasto PL 503, 00101 Helsinki	41 Lisätietoja	Sivumäärä	Hinta



FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Published by

Finnish Meteorological Institute
Erik Palménin aukio 1, P.O. Box 503
FIN-00101 Helsinki, Finland

Series title, number and report code of publication
Studies No. 1 STU-1

Date
October 2007

Authors

Jaakko Kukkonen, Ari Karppinen, Mikhail Sofiev, Leena Kangas,
Niko Karvosenoja, Matti Johansson, Petri Porvari, Jouni Tuomisto,
Marko Tainio, Tarja Koskentalo, Päivi Aarnio, Anu Kousa,
Liisa Pirjola, Kaarle Kupiainen

Name of project

An integrated model for evaluating the emissions,
atmospheric dispersion and risks caused by ambient air
fine particulate matter

Commissioned by TEKES

Title

An integrated model for evaluating the emissions, atmospheric dispersion and risks caused by ambient air fine particulate matter

Abstract

The KOPRA project has been part of the Finnish research programme on fine particles, "FINE". We have developed an integrated and evaluated modelling system for assessing the emissions, atmospheric dispersion, population exposure and health risks of fine particulate matter. The project contained: (1) evaluation of emissions at present and in the future, and evaluation of various emission abatement scenarios (main responsibility of Finnish Environment Institute), (2) atmospheric dispersion and transformation (Finnish Meteorological Institute), and (3) health risk assessment and decision analysis (National Public Health Institute).

The annual emissions of primary particulate matter and precursor gases that can form secondary particles have been evaluated for the years 1990, 2000, 2001, 2002, 2010 and 2020 on a regional scale in Finland, and technical potentials and costs for emission abatement have been evaluated. The regional scale atmospheric transport of primary particulate matter (PM), sulphates and sea salt has been computed with the regional and continental scale dispersion model SILAM for Finland and the whole of Europe. The corresponding source-receptor matrices were also determined. We have also developed a model for evaluating the emissions and atmospheric dispersion of fine particulate matter originated from wild-land fires. The model predictions have been evaluated by comparing these with available measured concentration data (including EMEP).

On the urban scale, atmospheric dispersion computations for PM_{2.5} have been performed for the Helsinki metropolitan area for 2002, and the results have been compared against measurement data. The potential health effects of particulate matter have been reviewed and evaluated by an expert panel, and a risk assessment model representing emission-exposure-effect chains has been developed. Intake fractions have been evaluated with a risk assessment model, using the emission inventories and the results of regional scale dispersion modelling. Costs and effects of different emission abatement strategies can be compared in a decision analysis.

Publishing unit

Air Quality Research

Classification (UDK)

504.064

504.064.2

504.064.3

Keywords

particulate matter, emissions, dispersion model,
aerosol model, population exposure,
health risks, integrated assessment modelling

ISSN and series title

ISSN 1796-1203 Studies

ISBN

ISBN 978-951-697-635-1

Language

Finnish

Sold by

Finnish Meteorological Institute / Library
P.O.Box 503, FIN-00101 Helsinki
Finland

Pages

41

Price

Note

SISÄLTÖ

1	Johdanto	7
	1.1 Projektin tausta	7
	1.2 Projektin tavoitteet	8
2	Projektin toteutus	9
3	Projektin tulokset	11
	3.1 Pienhiukkasten päästöjen arviointi nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä päästöjen vähentäminen	11
	3.2 Pienhiukkasten kulkeutuminen ja muuntuma ilmakehässä	20
	3.3 Pienhiukkasten riskinarviointi ja päätösanalyysi	27
4	Tulosten hyödyntäminen ja johtopäätökset	30
5	Tutkimuksen jatkaminen	32
	Viitteet	33

1 Johdanto

1.1 Projektin tausta

Ulkoilman pienhiukkasten kokonaismallintaminen on parhaillaan tutkimuksen erityiskohteena kansainvälisesti, sekä alueellisessa että paikallisessa mittakaavassa. Tällaista työtä tarvitaan mm. ilmansaasteiden päästöjen rajoitussopimuksien ja kaukokulkeumasopimuksen suunnittelussa sekä rajoitusten vaikutusten arvioinnissa. Euroopanlaajuisessa EMEP-ohjelmassa (Co-operative programme for monitoring and evaluating of the long-range transmission of air pollutants in Europe) on käynnissä tällaista tutkimusta, johon myös suomalaiset tutkijat ovat osallistuneet, erityisesti Suomen ympäristökeskus (SYKE), Helsingin yliopisto ja Ilmatieteen laitos (IL).

Kokonaismallien kehittämiseen vaikuttavat suuresti eri maiden tuottamien kansallisten tietojen tarkkuus ja kattavuus, kuten erityisesti pienhiukkasten ja niitä muodostavien yhdisteiden päästötiedot. Tällaisten tietojen koostaminen ja arviointi ovat kansainvälisestäkin vasta alussa, erityisesti hiukkasten kokojakaumien ja kemiallisen koostumuksen osalta.

Suomen Akatemian rahoittamissa SYTTY ja TERVE –tutkimusohjelmissa (1998–2001 ja 2002–2004) sekä MOBILE² –tutkimusohjelmassa (1999–2001) on kehitetty IL:n, Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnan (YTV), Kansanterveyslaitoksen (KTL) ja Valtion teknillisen tutkimuskeskuksen (VTT) yhteistyönä mallijärjestelmä, jolla voidaan arvioida liikennemääriä, päästöjä, pitoisuuksia ja väestön altistumista ilman epäpuhtauksille kaupunkien mittakaavassa. SYTTY-ohjelman puitteissa on myös tutkittu IL:n leviämismallien sekä Helsingin yliopiston (HY) ja Helsingin Ammattikorkeakoulun (Stadia) kehittämien aerosoliprosessimallien yhteiskäyttöä ja yhdistämistä paikallisessa mittakaavassa.

On tärkeää pystyä kytkemään toisiinsa eri mittakaavoissa tehdyt arviot. Tämän perusteella voidaan arvioida mm. kaukokulkeuman ja kansainvälisten päästövähennysten osuus paikallisen tason ilmanlaadussa. Tämän hankkeen eräänä

keskeisenä osana on ollut juuri paikallisen, alueellisen ja Euroopan laajuisen mittakaavan mallituksen yhdistäminen.

Tämän raportin tarkoituksena on esittää katsaus TEKES:in pienhiukkasten tutkimusohjelmaan ”FINE” kuuluneen projektin ”Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin – KOPRA” päätuloksista. Tässä laajassa yhteisprojektissa pienhiukkasten päästöjen mallinnuksesta on vastannut Suomen ympäristökeskus, epäpuhtauksien leviämisen ja muuntuman mallinnuksesta Ilmatieteen laitos, ja Kansanterveyslaitoksella on arvioitu väestön altistumista ja hiukkasten aiheuttamia terveysriskejä. Hankkeeseen ovat lisäksi osallistuneet Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta, Helsingin ammattikorkeakoulu, Nordic Envicon Oy ja Teknillinen korkeakoulu (Espoo).

1.2 Projektin tavoitteet

Hankkeen tavoitteena on ollut kehittää laaja-alainen, yhdennetty ja todennettu matemaattis-fysikaalinen malli. Mallin perusteella voidaan arvioida pienhiukkasten päästöjä, kemiallista ja fysikaalista muuntumaa, pitoisuuksia ilmassa, väestön altistumista pienhiukkasille sekä pienhiukkasten aiheuttamaa terveysriskiä. Mallin suorituskyky, tarkkuus ja sovellusalue arvioidaan vertaamalla laskettuja arvoja päästömittauksiin, mitattuihin pienhiukkasten pitoisuuksiin ja mitattuihin altistuksiin. Tällaista yhdennettyä mallijärjestelmää ei aiemmin ole ollut käytettävissä maassamme; kansainvälisesti lähinnä vastaava malliyhdistelmä on EMEP + RAINS. RAINS-malli (Regional Acidification Information and Simulation model) on IIASA-tutkimuslaitoksen (International Institute of Applied Systems Analysis) kehittämä.

Projektissa on arvioitu pitoisuuksia mantereellisessa (Euroopan), alueellisessa (Suomen) ja paikallisessa (pääkaupunkiseutu) mittakaavassa. Kaukokulkeutuvien hiukkasten osuudet on arvioitu Euroopan kattavien mallilaskelmien tulosten sekä tähän soveltuvien pitoisuuksien alueellisten taustamittausten perusteella. Mallijärjestelmän perusteella voidaan arvioida kvantitatiivisesti erilaisten päästöskenaarioiden ja päästöjä vähentävien tekniikoiden vaikutus päästöihin, ilmanlaatuun sekä väestön altistumiseen ja terveyteen.

Hankkeessa on pyritty kehittämään tehokas mallinnustyökalu, jota voidaan jatkossa hyödyntää esimerkiksi arvioimaan, kuinka hiukkasten päästöjä ja pitoisuuksia voidaan vähentää kustannustehokkaimmalla tavalla. Sekä tutkimuksessa kehitettäviä menetelmiä että laskentatuloksia tarjotaan hyödynnettäväksi kansainvälisessä ilmansaasteiden rajoitusneuvotteluihin liittyvässä päätöksenteossa. Hankkeessa on toimittu yhteistyössä kansainvälisen EMEP-keskuksen kanssa.

Hankkeeseen on kuulunut yhteistyö Nordic Envicon -yrityksen kanssa; tämän yrityksen yksi tärkeä liiketoiminnan alue on ilmanlaadun tutkimus- ja konsultointipalvelut. Hiukkasten kokonaismallinnustyö tarjoaa mahdollisuuden sen liiketoiminnan laajentamiseen.

2 Projektin toteutus

Hanke oli jaettu kolmeen työpakettiin, jotka olivat (1) pienhiukkasten päästöjen arviointi nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä päästöjen vähentäminen, (2) pienhiukkasten kulkeutuminen ja muuntuma ilmakehässä ja (3) pienhiukkasten riskinarviointi ja päätösanalyysi. Seuraavassa kuvataan lyhyesti työn sisältö, ja saatuja tuloksia tarkastellaan yksityiskohtaisemmin seuraavassa luvussa.

Työpaketti 1. Pienhiukkasten päästöjen arviointi nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä päästöjen vähentäminen (vastuullinen laitos Suomen ympäristökeskus)

Hiukkasten päästöjen arvioinnissa on sovellettu parhaita saatavilla olevia eurooppalaisia ja suomalaisia lähdeaineistoja ja menetelmiä. Euroopan hiukkaspäästöt on arvioitu pääasiassa EMEP ja RAINS -mallien tiedoista. Suomen kattavien alueellisten hiukkaspäästöjen arvioimiseksi on kehitetty SYKE:n päästöskenaariomallia (FRES) siten, että sillä voidaan laskea kaikki ihmisperäiset primäärihiukkaspäästöt vuosittain suurille pistelähteille ja aluelähteille $1 \times 1 \text{ km}^2$ resoluutiolla (*Karvosenoja & Johansson, 2003a; Karvosenoja et al., 2005a*). Lisäksi päästöskenaariomalliin on liitetty tärkeimpien sekundäärisiä hiukkasia muodostavien kaasujen päästöt. Päästölähteet on

luokiteltu polttoaineittain ja toimintasektoreittain. Metsäpalojen päästöt on arvioitu satelliittitietojen (MODIS) perusteella (*Saarikoski et al., 2007*).

Paikallisen mittakaavan laskelmia varten on arvioitu pienhiukkasten päästöjä pääkaupunkiseudulla. Tähän arviointiin on käytetty SYKEN päästömallin lisäksi IL:n päästörekisteriä. Eri menetelmillä tehtyjä päästöarvioita on vertailtu. Muiden kuin polttoperäisten liikennepäästöjen arvioimiseen on kehitetty tarkennettu versio. Lisäksi hankkeen yhteydessä on kehitetty ajoneuvokohtaisen liikenteen mallittamiseen soveltuvaa mikrosimulointimallia HUTSIM siten, että se soveltuu liikenteen polttoperäisten pienhiukkaspäästöjen arvioimiseen.

Työpaketti 2. Pienhiukkasten kulkeutuminen ja muuntuma ilmakehässä (vastuullinen laitos Ilmatieteen laitos)

Pienhiukkasten kulkeutumista ja muuntumaa ilmakehässä on arvioitu sekä mantereellisessa, alueellisessa että paikallisessa mittakaavassa.

Alueellisen mittakaavan leviämislaskelmissa on käytetty IL:ssä kehitettyä SILAM-mallia (*Sofiev et al., 2006a*), jolla on laskettu primäärihiukkasten leviäminen Suomen ja koko Euroopan alueelle. Hankkeen yhteydessä on myös saatu käyttöön Ruotsin ilmatieteen laitoksen (SMHI) kehittämä alueellinen MATCH-leviämismalli (Multiscale Atmospheric Transport and Chemistry Model, *Robertson et al., 1999*), jota on testattu IL:ssä. Mallista on erotettu kemiallinen osamalli, joka on yhdistetty aerosolihukkasten syntyä ja kasvuprosesseja kuvaavaan MONO32-malliin (*Pirjola & Kulmala, 2000; Pirjola et al., 2003a*). Tätä mallia on käytetty aerosolidynamiikan merkityksen arvioimiseen. Lisäksi on arvioitu luonnonalueiden paloissa muodostuvien pienhiukkasten leviämistä SILAM-mallilla (*Saarikoski et al., 2007*).

Paikallisen mittakaavan leviämislaskelmiin käytettävää IL:n kaupunkimallijärjestelmää on laajennettu siten, että se soveltuu pienhiukkasten massapitoisuuksien laskentaan. Mallituloksia on verrattu YTV:n pääkaupunkiseudulla tekemiin mittauksiin.

Työpaketti 3. Pienhiukkasten riskinarviointi ja päätösanalyysi (vastuullinen laitos Kansanterveyslaitos)

Pienhiukkasten terveysvaikutuksia on arvioitu perusteellisella kirjallisuuskatsauksella, käyttäen KTL:n sisäistä asiantuntijaryhmää sekä kansainvälisen asiantuntijapaneelin haastatteluilla. Työhön on käytetty erityistä asiantuntija-arvuuttelumenetelmää (*elicitation of expert judgement*), jossa asiantuntijat arvioivat myös nykyisiin vaikutusarvioihin liittyvän epävarmuuden. Menetelmän avulla on saatu myös aiempaa täsmällisempi näkemys erilaisten hiukkasten välisistä myrkyllisyseroista ja mm. altistumisen ja terveyshaittojen ajallisesta yhteydestä.

Pienhiukkasille altistumista on tutkittu käyttämällä hyväksi ns. saantiosuutta (*intake fraction*). Saantiosuudella tarkoitetaan sitä osuutta päästöstä, joka päätyy väestön hengittämäksi. Saantiosuus yhdistää tehokkaasti monimutkaisen ilmakehämallinnuksen lopputulokset käyttökelpoiseen muotoon päätösanalyysijä varten. Saantiosuudet on arvioitu käyttämällä päästö-altistus-vaikutus-ketjuja kuvaavaa mallia, jossa on hyödynnetty KOPRA-hankkeen tuottamia päästötietoja ja leviämismallituloksia.

Mallilla on arvioitu eri päästösektorien vaikutusta terveyteen. Lisäksi on kehitetty malli, jonka avulla voidaan verrata päästövähennysten nettohyötyjä ja kustannuksia sekä jäljelle jäävän tieteellisen epävarmuuden vaikutusta päätöksentekoon.

3 Projektin tulokset

3.1 Pienhiukkasten päästöjen arviointi nykytilanteessa ja tulevaisuudessa sekä päästöjen vähentäminen

Päästöarvioinnin tuloksena on saatu arviot Suomen vuotuisista alueellisista ihmisperäisistä hiukkaspäästöistä vuosille 1990, 2000, 2001 ja 2002 sekä 2010 ja 2020 (Kuva 1, Taulukko 1). Arviot tuleville vuosille on tehty käyttäen kolmea eri kansallisen ilmastostrategian (2001) energia- ja aktiviteettiskenaariota. Arviot sisältävät primäärihiukkaset (TSP, PM₁₀, PM_{2,5} ja PM₁), arviot hiukkasten hiilipitoisuuksista (sekä

musta että orgaaninen hiili) (Taulukko 2) sekä sekundäärisiä hiukkasia muodostavat kaasut (SO₂, NO_x, NH₃ ja NMVOC).

Merkittävimmät primääristen pienhiukkasten päästölähteet maassamme ovat puun pienpoltto ja liikenne. Näiden lähteiden merkitystä terveysvaikutusten kannalta lisää niiden alhainen päästökorkeus. Liikenteessä, maataloudessa sekä erilaisten materiaalien käsittelyprosessien seurauksena mekaanisesti syntynyt pöly on merkittävä päästölähde karkeammissa hiukkaskokoluokissa, mutta vähäisempi pienhiukkasille. Sekundääristen hiukkasten prekursoreista SO₂ syntyy pääasiassa voimalaitos- ja teollisuusprosesseissa, NO_x liikenteessä, NH₃ maataloudessa ja NMVOC liikenteessä ja teollisuudessa.

Tulevaisuuden päästöissä primääristen hiukkasten päästöjen erot eri aktiviteettiskenaarioilla ovat varsin pieniä. Suurten voimalaitosten päästöt ovat suhteellisesti ottaen alhaiset eikä niiden primäärienergian valinnoilla, joita ilmastostrategian tarkastelut lähinnä koskivat, ole suurta vaikutusta primäärihiukkasten päästöihin. Puun pienpolton ja prosessiteollisuuden aktiviteetit olivat suunnilleen nykytasoa vastaavat ja eri skenaarioissa samat, joten nämäkään päästöt eivät poikkea merkittävästi toisistaan eri skenaarioissa. Liikenteen hiukkaspäästöt tulevat laskemaan pakokaasupäästöjen osalta tiukkanevan lainsäädännön myötä, mutta kasvamaan epäsuorien resuspensio- ja muiden pölypäästöjen osalta, lisääntyvien ajokilometrien myötä.

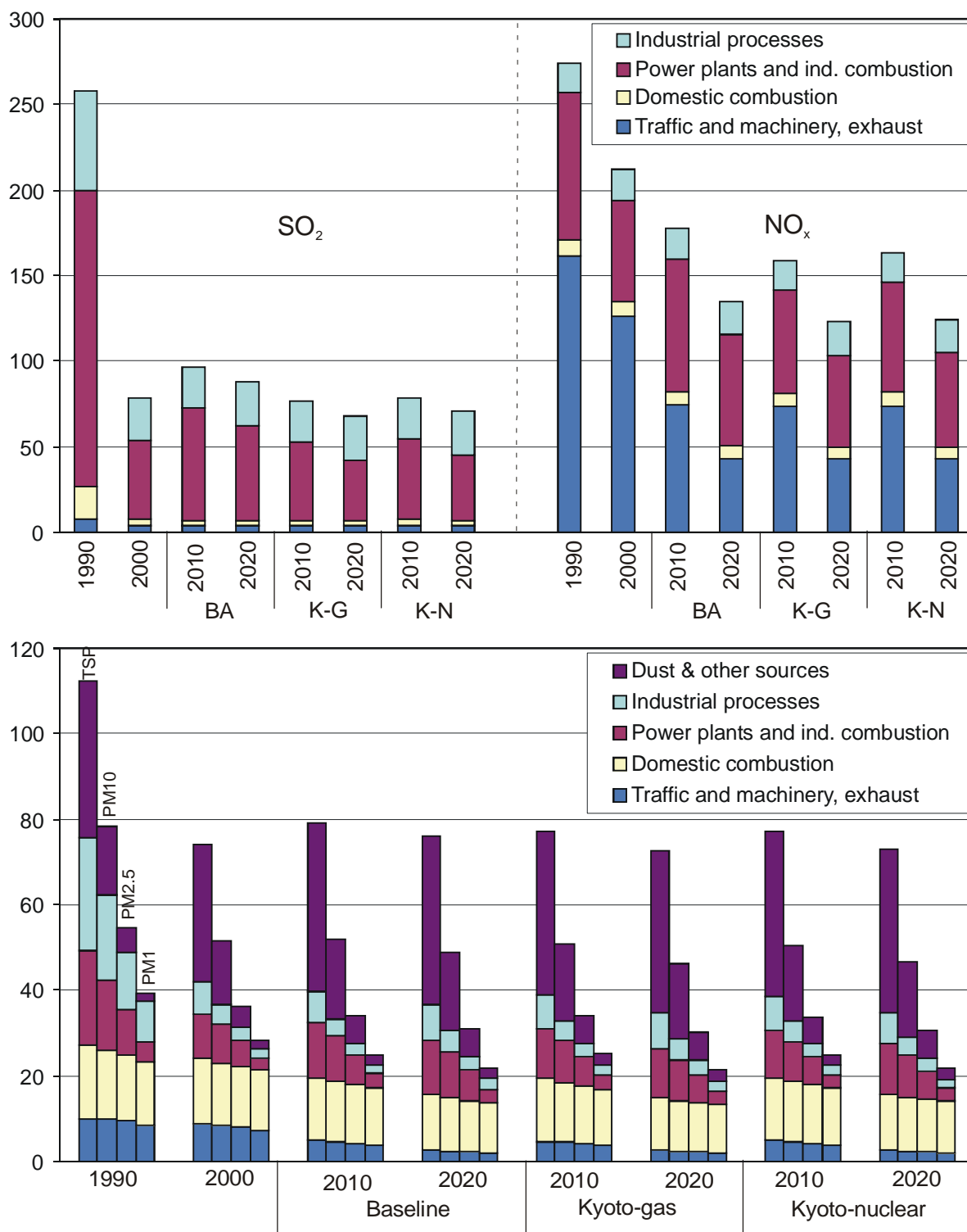
Projektissa käytetyn vanhan ilmastostrategian (2001) skenaariot (Perusura, KIO1 ja KIO2) poikkeavat jossakin määrin uusimman strategian (2005) skenaarioista, jotka on nimetty ”With Measures” (WM) ja ”With Additional Measures (WAM)”. Taulukossa 1 on esitetty myös vertailu näiden skenaarioiden välillä.

FRES-mallin päästöjä on verrattu muihin kansallisiin päästöinventaarioihin vuosille 1990 ja 2000, ja ne on todettu yhteneviksi muiden kuin puun pienpolton päästöarvioiden osalta (*Karvosenoja & Johansson, 2003b*). Osana FINE-tutkimusohjelmaa suoritettujen päästöjen mittaushankkeet ovat auttaneet tarkentamaan tämän hetkisiä päästöarvioita ja siten vähentämään niiden epävarmuutta. Erityisesti puun pienpolton päästöarvioita eri tyyppisistä polttolaitteista on kehitetty SYKE:ssä KOPRA-projektin aikana yhteistyössä mm. Kuopion yliopiston PIPO-projektin kanssa.

KOPRA-projektin pitoisuus- ja terveystulokset perustuvat kuitenkin aikataulullisista syistä päästöarvioihin, joissa näitä viimeisimpiä tuloksia muista FINE-tutkimusohjelman hankkeista ei vielä ole otettu huomioon. Tämän vuoksi uusimpia päästöarvioita ei ole sisällytetty mm. kuviin 1 ja 3 ja taulukoihin 1 ja 2, vaan niissä on esitetty päästöarviot, joihin KOPRAn leviämislaskelmat perustuvat. Sen sijaan päästöjen ja väestön erillistarkastelu (Kuvat 2, 4-6) on tehty käyttäen uusia pienpolton päästöarvioita, jotka ovat noin 50 % vanhoista luvuista (*Karvosenoja et al., käsikirjoitus b*). Uudet päästöarviot tullaan ottamaan käyttöön myös SYKE:n ja Tilastokeskuksen päästöraportoinneissa.

Taulukko 1. Suomen PM_{2.5} primäärihiukkasten, rikkidioksidin (SO₂) ja typenoksidien (NO_x) päästöt 1990 ja 2000, sekä 2010 ja 2020 kolmella kansallisen ilmastostrategian (2001) skenaariolla (BA = Baseline = Perusura, KG = Kyoto-gas = KIO1, KN = Kyoto-Nuclear = KIO2) (Gg a⁻¹) (*Karvosenoja et al., 2003a*).

PM _{2.5}	2000	2010			2020		
		BA	KG	KN	BA	KG	KN
Traffic and machinery, exhaust	7.9	4.4	4.3	4.3	2.3	2.3	2.3
Power plants and ind. combustion	6.1	7.0	7.0	6.5	7.0	6.7	6.7
Domestic combustion	14.1	13.6	13.3	13.5	12.0	11.4	12.2
Industrial processes	3.1	2.5	3.0	3.0	3.3	3.3	2.8
Dust & other sources	5.0	6.5	6.4	6.4	6.5	6.4	6.5
Total	36.3	33.9	34.0	33.7	31.1	30.1	30.4
Total in new Climate Strategy:		2010: WM 33, WAM 32,			2025: WM 28, WAM 27		
SO₂							
Traffic and machinery, exhaust	4.0	4.0	3.9	4.0	4.0	4.0	4.0
Power plants and ind. combustion	45.9	65.8	45.6	47.5	55.3	34.7	38.3
Domestic combustion	3.7	3.2	3.2	3.3	2.9	3.2	2.7
Industrial processes	24.4	23.3	23.3	23.3	26.1	26.1	26.1
Total	78.0	96.2	76.0	78.1	88.3	67.9	71.0
Total in new Climate Strategy:		2010: WM 84, WAM 67,			2025 WM 84, WAM 70		
NO_x							
Traffic and machinery, exhaust	126.5	74.4	73.8	73.9	43.2	43.0	43.0
Power plants and ind. combustion	59.6	77.5	59.7	63.9	65.0	53.4	54.8
Domestic combustion	8.0	7.9	7.8	8.0	7.1	6.9	6.8
Industrial processes	18.3	17.7	17.7	17.7	19.7	19.7	19.7
Total	212.4	177.6	159.1	163.5	134.9	123.0	124.3
Total in new Climate Strategy:		2010 WM 173, WAM 160			2025 WM 130, WAM 129		



Kuva 1. Rikkidioksidin (SO_2), typenoksidien (NO_x) ja eri kokoisten primäärihiukkasten (TSP, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, PM_1) päästöt 1990 ja 2000, sekä 2010 ja 2020 kolmella kansallisen ilmastostrategian (2001) skenaariolla (BA = Baseline = Perusura, K-G = Kyoto-gas = KIO1, K-N = Kyoto-Nuclear = KIO2) (Gg a^{-1}) (Karvosenoja *et al.*, 2003a).

Päästövertailuja on tehty myös IIASA:n RAINS-mallin päästöihin PM₁- ja hiilihiukkasten osalta (Taulukko 2) sekä tarkemmin prosessiteollisuudelle (*Tohka & Karvosenoja, 2006a*). Myös RAINS:in päästöjen vähennyskustannustietoja on arvioitu yhteistyössä IIASA:n tutkijoiden kanssa suomalaisten tietojen valossa (*Karvosenoja et al., käsikirjoitus a*). Sektorikohtaisia eroja kansallisten tietojen ja RAINS-mallin välillä löydettiin merkittävästi. Päästöerot selittyvät RAINS-mallin epätarkoilla aktiviteetti- ja laskentaparametreilla. Nämä parametrit ovat pääosin kansallisesti määriteltäviä, joten erot ovat korjattavissa IIASA:n kanssa käytävissä kahdenvälisissä RAINS-tietojen tarkistusneuvotteluissa. Näitä tietojen tarkistuksia tehdään tulevaisuudessa.

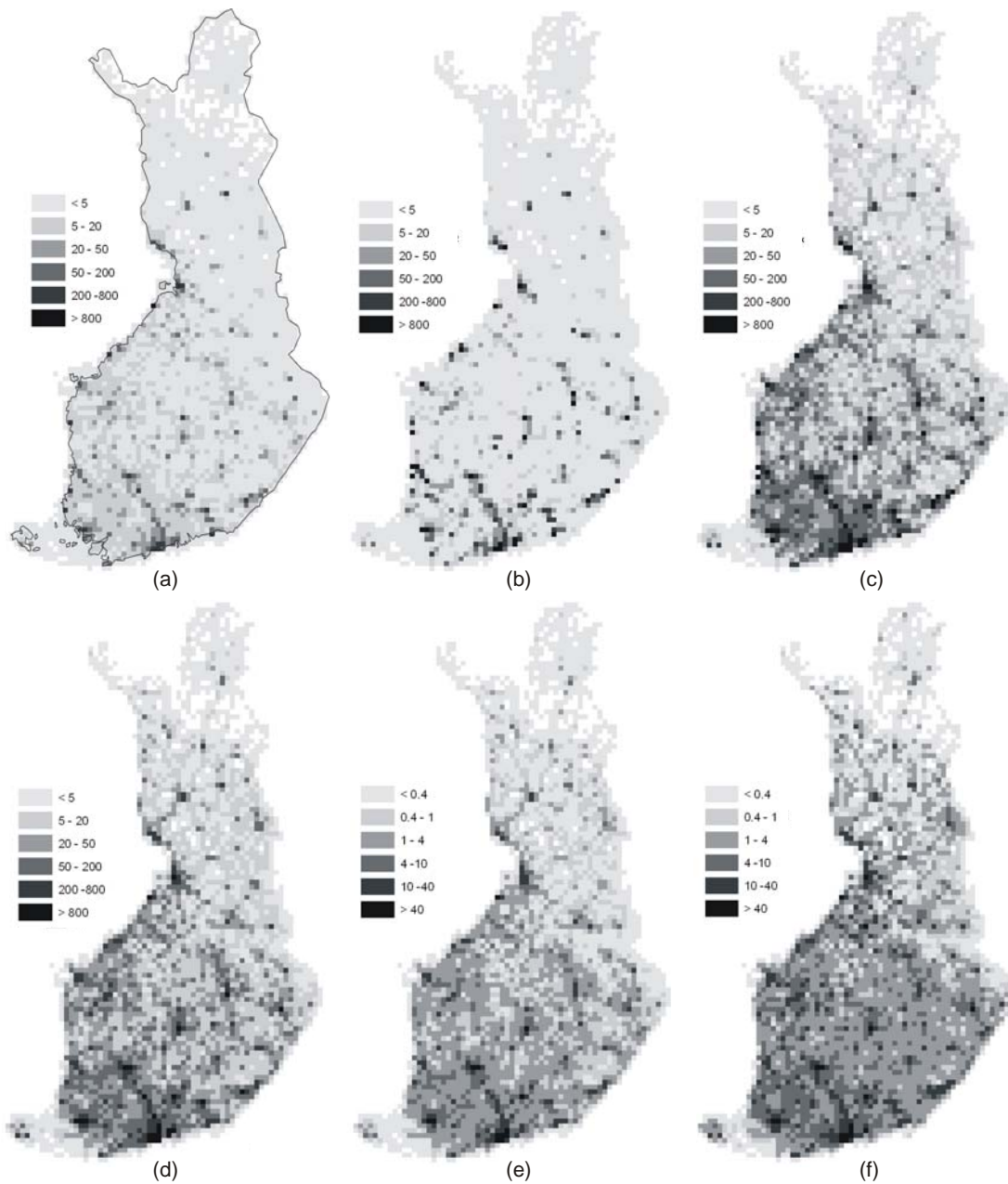
Taulukko 2. Suomen PM₁, BC ja OC päästöt vuonna 2000 ja vertailu RAINS-mallin lukuihin (Gg a⁻¹) (*Kupiainen, 2005*).

Main area sources at country level	PM₁	BC in PM_{2.5}	OC in PM_{2.5}
Power plants and industrial combustion	2.9	0.64	0.30
Domestic combustion	14	2.5	7.1
Industrial processes	2.3	0.11	0.17
Road traffic	3.9	2.0	1.0
Machinery, off-road	3.4	1.3	1.1
Others	2.1	0.07	2.0
SUM all	29	6.6	12
RAINS (<i>Kupiainen & Klimont 2004</i>)	31*	9*	14*

* PM₁, BC and OC from domestic combustion 19 Gg a⁻¹, 3.8 Gg a⁻¹ and 9.5 Gg a⁻¹, respectively

Myös päästöjen epävarmuuksia on arvioitu kvantitatiivisesti (*Kupiainen et al., 2006; Karvosenoja et al., käsikirjoitus b*). Primääristen PM₁-päästöjen epävarmuudeksi saatiin noin ± 20 % (95 % luottamusväli). Suurimmat epävarmuudet arvioitiin puun pienpoltolle.

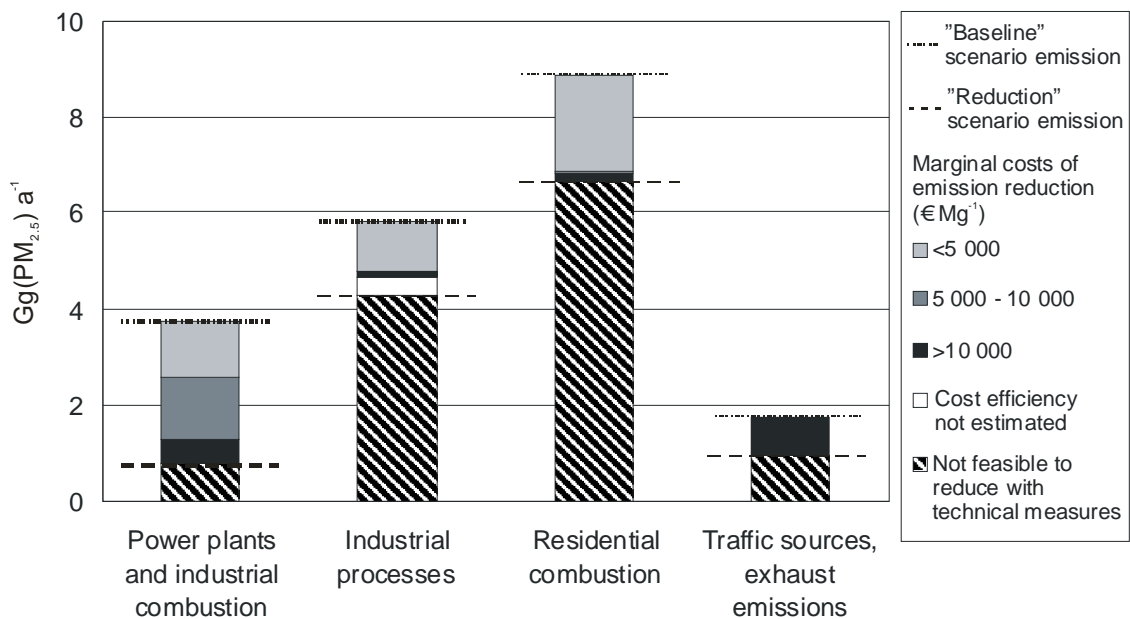
FRES-mallin päästöt on alueellisesti mallitettu 1 x 1 km² ruudukossa (Kuva 2). Primäärihiukkaspäästöt ovat melko tasaisesti jakaantuneet koko Etelä- ja Keski-Suomeen johtuen puun pienpoltton merkittävästä osuudesta maaseudulla ja haja-asutusalueilla. Rikkidioksidipäästöt syntyvät pääosin suurissa pistelähteissä, kun taas typenoksidipäästöt hajalähteissä, pääosin liikenteessä Etelä- ja Lounais-Suomen alueella.



Kuva 2. (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) SO_2 , (c) NO_x , (d) NMVOC, (e) BC ja (f) OC päästöjen alueellinen jakauma vuonna 2000 esitettynä $10 \times 10 \text{ km}^2$ ruudukossa (Mg a^{-1}) (Karvosenoja *et al.*, 2005a).

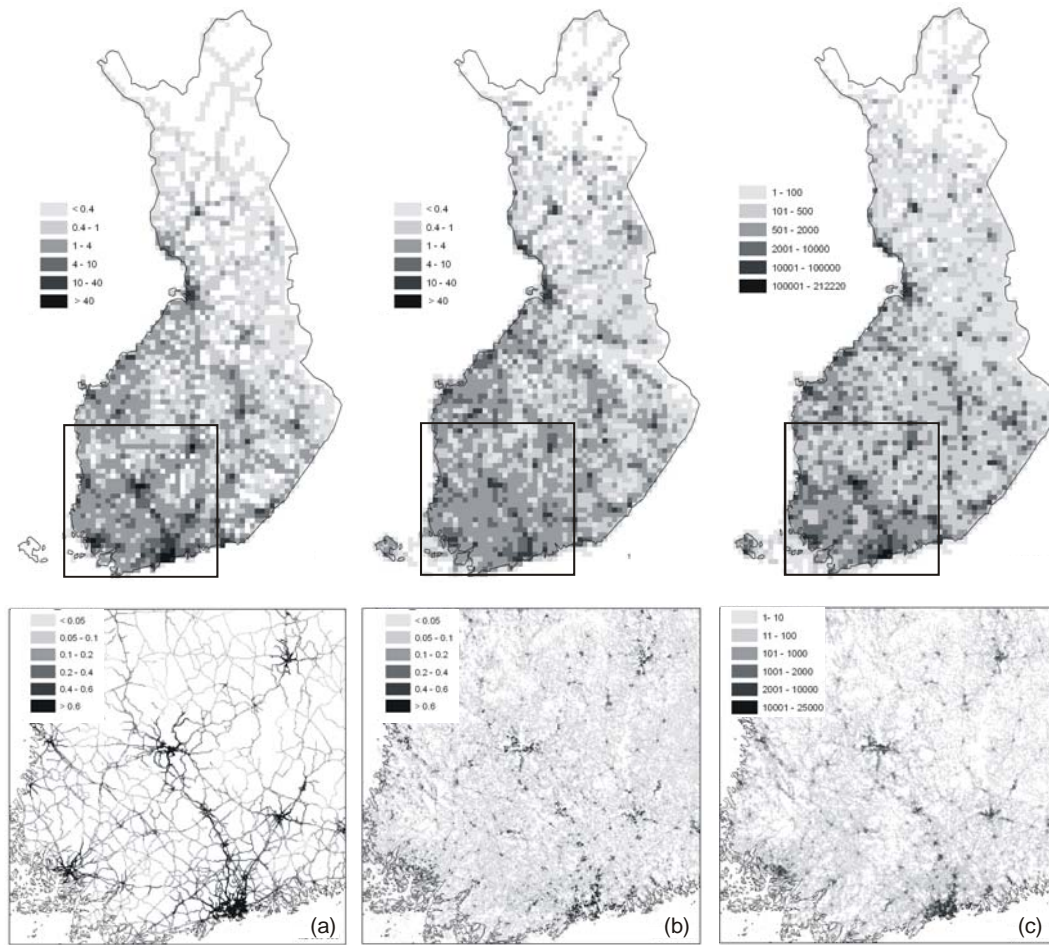
Primäärihiukkasten tulevaisuuden päästöjen vähennyspotentiaaleja ja –kustannuksia on arvioitu sektorikohtaisesti (Kuva 3). Suurimmat kustannustehokkaat $\text{PM}_{2.5}$ -päästövähennyspotentiaalit vuonna 2020 arvioitiin puun pienpoltoon pienillä sähkösuodattimilla, sekä energiantuotantoon kuitusuodattimilla. Teollisuusprosesseilla vähennyspotentiaalia löytyy muutamista yksittäisistä laitoksista.

Tosin teollisuusprosesseilla sekä vähennyspotentiaalien että erityisesti kustannusten arviot ovat varsin epävarmoja. Liikenteen päästöjen vähentämisessä tarkasteltiin ainoastaan pakokaasupäästöjä, joiden potentiaali arvioitiin suhteellisen vähäiseksi ja kalliiksi. Henkilöautojen EURO V ja raskaan liikenteen EURO VI mukaisia valmisteilla olevia päästötasoja ei käsitelty.

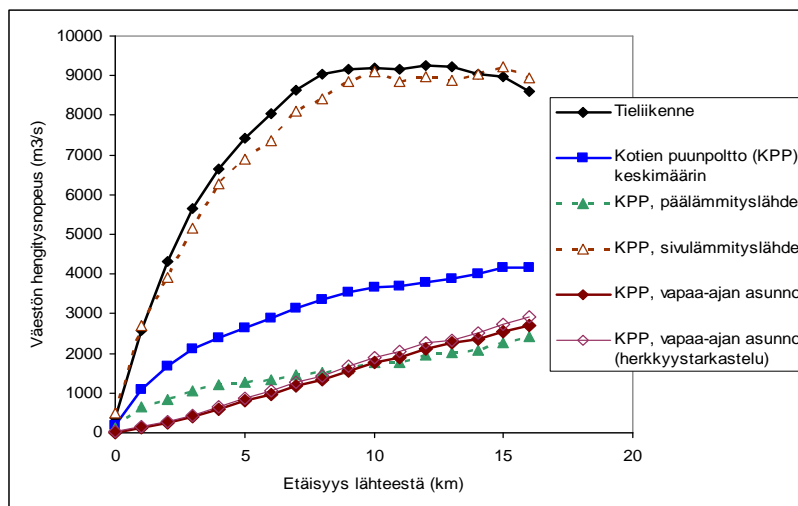


Kuva 3. Primääriset PM_{2.5}-päästöt vuonna 2020 neljältä pääsektorilta KIO₂-aktiiviteettiskenaariossa (Gg a⁻¹). 'Baseline' tarkoittaa päästötasoa joka saavutetaan olemassaolevan lainsäädännön täyttävällä hiukkasten vähennysteknologialla. 'Reduction'-päästötaso saavutetaan parhaalla teknisesti ja taloudellisesti käyttökelpoisella teknologialla. Päästövähennysten kustannustehokkuus (marginaalikustannukset) on esitetty eri harmaan sävyillä ja mustalla (Karvosenoja et al., 2006a, käsikirjoitus a).

Kahden tärkeimmän matalan lähipäästölähteen, tieliikenteen ja puun pienpolton primääripäästöjen potentiaalisia väestöaltistusten vaikutuksia on myös tarkasteltu 1 x 1 km² resoluutiolla tilastollisesti ilman leviämismallinnusta (Kuvat 4 ja 5, Karvosenoja et al., 2005b; Karvosenoja et al., käsikirjoitus b, Tuomisto et al., käsikirjoitus b). Tässä erillistarkastelussa molemmille sektoreille laskettiin kuinka paljon väestöä asuu keskimäärin eri etäisyyksillä päästölähteestä. Tulosten mukaan liikenteen päästöille altistuu keskimäärin kaksinkertainen määrä ihmisiä verrattuna puun pienpolton päästöihin, kun tarkastellaan päästöjen vaikutuksia alle 20 km etäisyydellä päästöpisteestä.

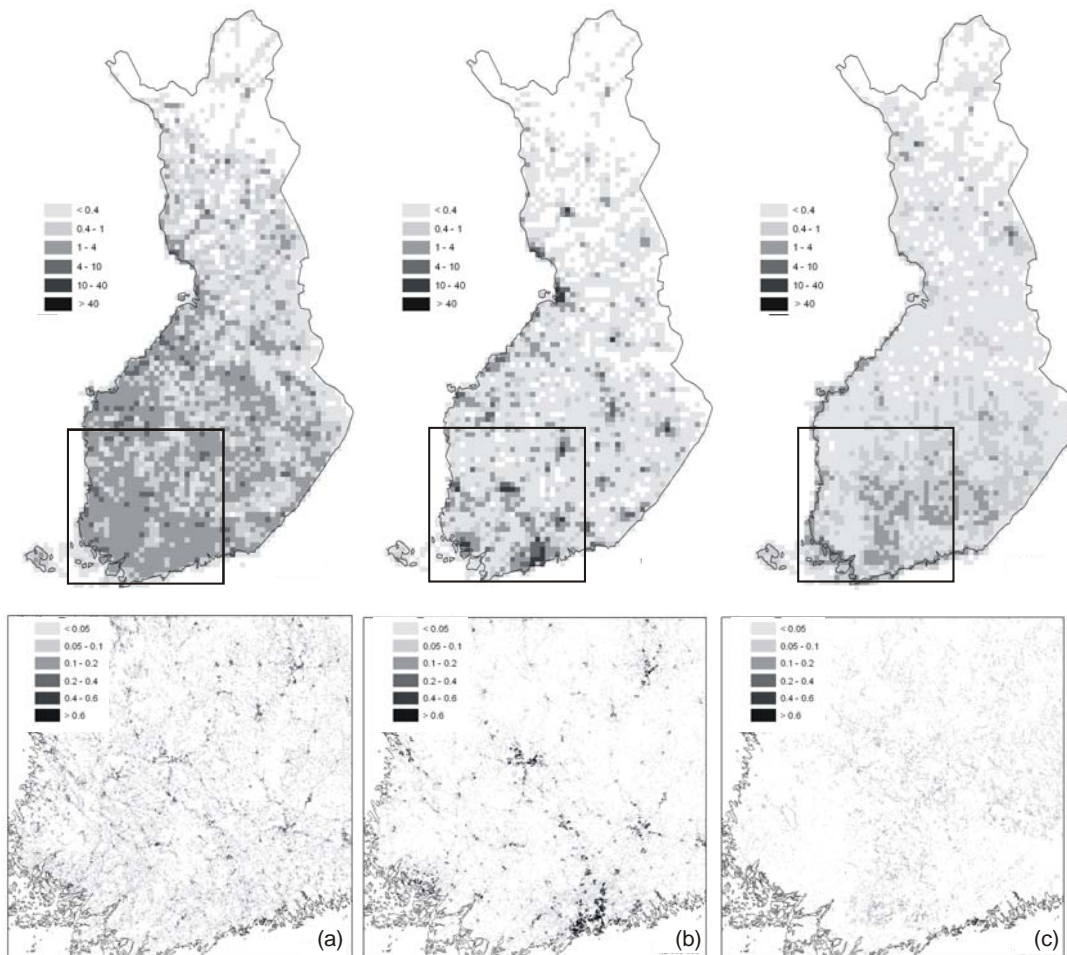


Kuva 4. Primääriset PM_{2.5}-päästöt (Mg a⁻¹) vuonna 2000 (a) tieliikenteestä ja (b) puun pienpoltosta, esitettynä 10 × 10 km² (ylempi) ja 1 × 1 km² (alempi) erotuskyvyllä. Väestön jakautuminen on esitetty kuvassa (c) (Karvosenoja et al., 2005b, Karvosenoja et al., käsikirjoitus b).



Kuva 5. Ns. väestöhengitysnopeus etäisyyden funktiona. Tuloksissa on eroteltu (i) kaksi päästöluokkaa, tieliikenne ja puun pienpoltto, (ii) kolme puun pienpoltton aliluokkaa ja (iii) vapaa-ajan asuntojen puunpoltton herkkyystarkastelu (Tuomisto et al., käsikirjoitus b).

Lisäksi tutkittiin puun pienpolttoa pääasiallisena ja täydentävänä lämmityslähteenä sekä vapaa-ajan asunnoissa (Kuva 6, *Karvosenoja et al., käsikirjoitus b*). Pienpoltton päästöistä noin puolet syntyy puun käytöstä pääasiallisena lämmityslähteenä, neljännes täydentävästä lämmityskäytöstä ja neljännes vapaa-ajan asunnoista. Potentiaalisesti altistuvien ihmisten määrät päästöjen lähialueilla pääasiallisesta lämmityskäytöstä ovat vielä huomattavasti alhaisemmat kuin pienpoltolle keskimäärin. Täydentävälle lämmitykselle asukastiheydet ovat suunnilleen vastaavat kuin liikenteelle. Vapaa-ajan asuntojen kohdalla altistus arvioitiin hyvin alhaiseksi.



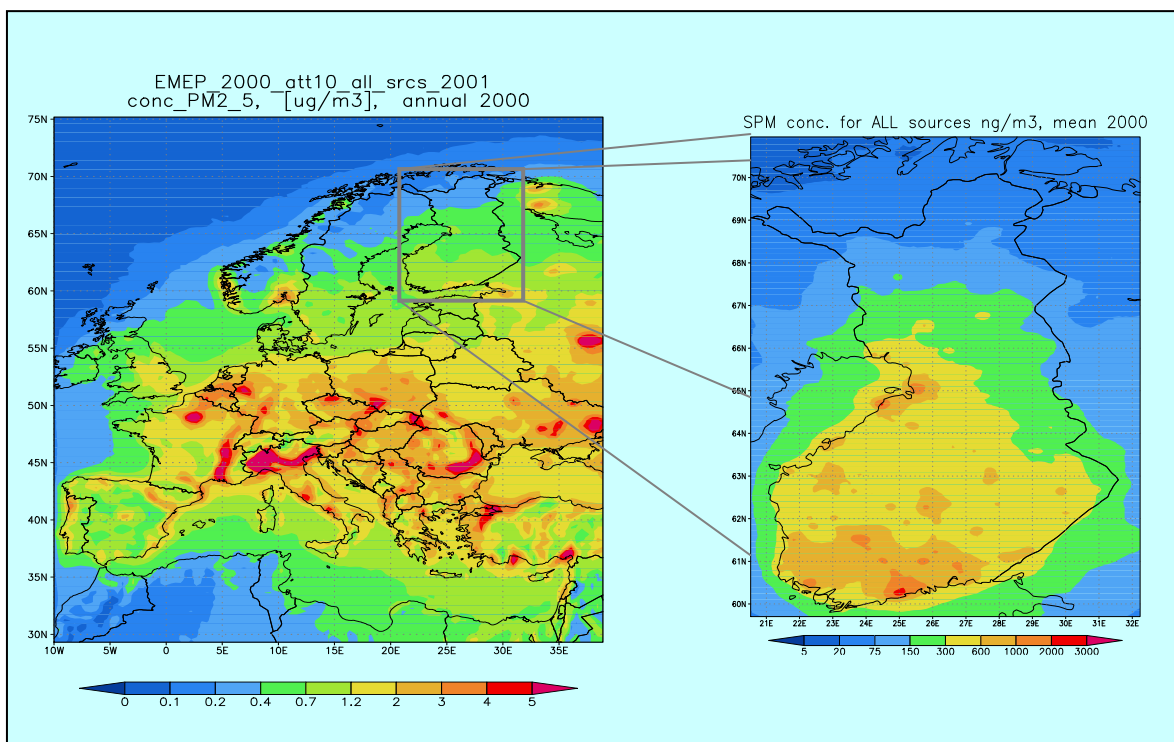
Kuva 6. Primääriset $\text{PM}_{2.5}$ -päästöt (Mg a^{-1}) vuonna 2000 puun pienpoltosta (a) pääasiallisena lämmityslähteenä, (b) toissijaisena lämmityslähteenä ja (c) vapaa-ajan asunnoista esitettynä $10 \times 10 \text{ km}^2$ (ylempi) ja $1 \times 1 \text{ km}^2$ (alempi) erotuskyvyllä (*Karvosenoja et al., käsikirjoitus b*).

3.2 Pienhiukkasten kulkeutuminen ja muuntuma ilmakehässä

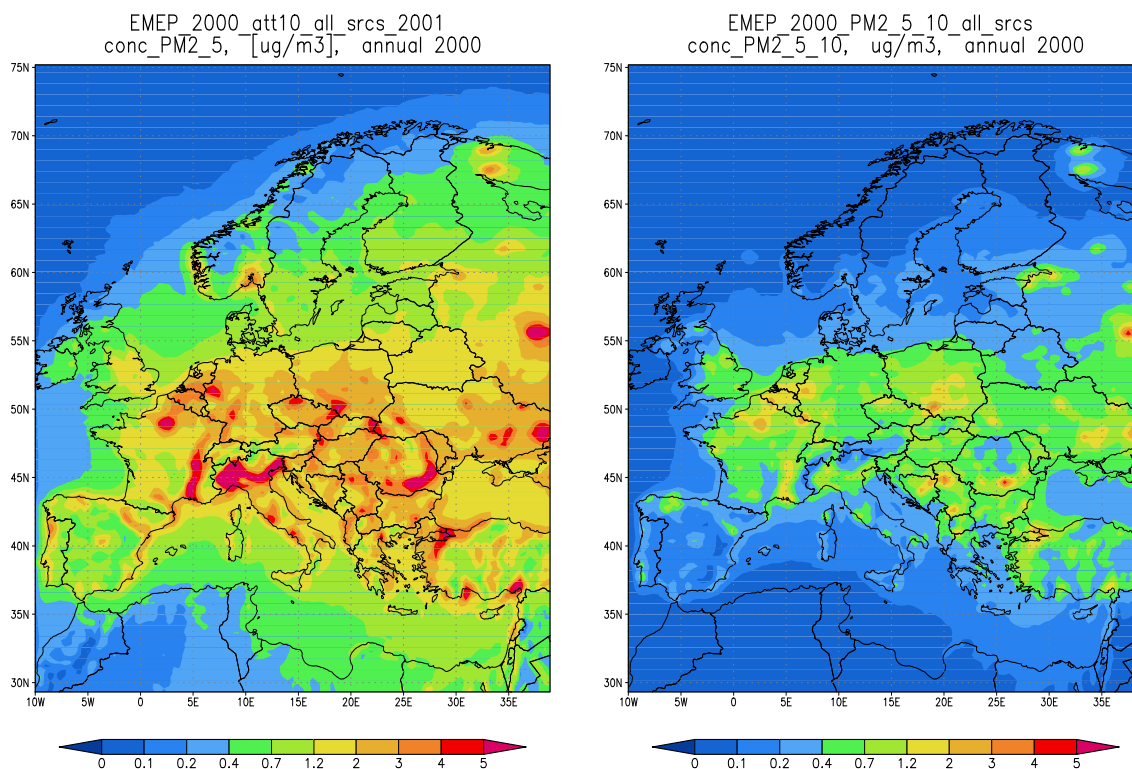
Alueellisen mittakaavan mallituksen tuloksena on saatu arviot tärkeimpien hiukkaskomponenttien pitoisuuksista Suomen ja koko Euroopan alueella (Sofiev et al., 2006b, 2006c). Euroopan alueen tulokset käsittävät primäärihiukkaspitoisuudet kokoluokille $PM_{2.5}$ ja $PM_{2.5-10}$ sekä sulfaatti- ja merisuolapitoisuudet. Tulosten resoluutio on $30 \times 30 \text{ km}^2$. Suomen alueelle oli käytettävissä tarkempi primäärihiukkaspäästöjen kokoluokittelu, ja laskentatuloksena saatiin pitoisuudet kokoluokille $PM_{0.1}$, $PM_{0.1-1}$, $PM_{1-2.5}$, $PM_{2.5-10}$ ja yli PM_{10} , sekä sulfaatille.

Lisäksi Suomen alueelle laskettiin terveysvaikutusten arvioimiseen tarvittavat kulkeutumismatriisit kuvitteelliselle päästölähteelle yhdeksälle eri sijaintipaikalle käyttäen kahta eri päästökorkeutta. Suomen alueen laskelmien resoluutio oli $5 \times 5 \text{ km}^2$. Laskelmat on tehty vuosille 2000 – 2002. Mallitulosten ja mittausten vertailua varten on lisäksi laskettu joitakin lyhyempiä ajanjaksoja vuosilta 1999 ja 2003. Merkittävin aerosolien massasulkeumasta puuttuva komponentti on pöly. DMAT-mallilla on arvioitu aavikkopölyn aiheuttama pitoisuus 20 vuoden keskiarvona pohjoiselle pallonpuoliskolle (Hongisto & Sofiev, 2004). Pölypitoisuudet vaihtelevat kuitenkin huomattavasti vuosittain ja episodien mukaan, ja korkeita pitoisuuksia voi esiintyä etenkin lähdealueilla vallitsevina kuivina kausina.

Esimerkkejä primäärihiukkaspitoisuuksista on esitetty kuvissa 7 ja 8. Vastaavia pitoisuustasoja primäärihiukkasille Euroopassa on arvioitu myös LOTOS-mallilla (Schaap et al., 2004b) ja EMEP/MSC-W:n mallilla (Kahnert & Tarrason, 2003). Tässä esitettyjen laskelmien etuna on kuitenkin tarkempi alueellinen resoluutio, joka antaa pitoisuustasoista yksityiskohtaisemman kuvan Suomen alueella, sekä uudempi tarkasteluvuosi. Kuvan 7a tulosten mukaan primäärien pienhiukkasten pitoisuudet olivat Etelä-Suomessa suuruusluokkaa $1-2 \mu\text{g m}^{-3}$ vuonna 2000.

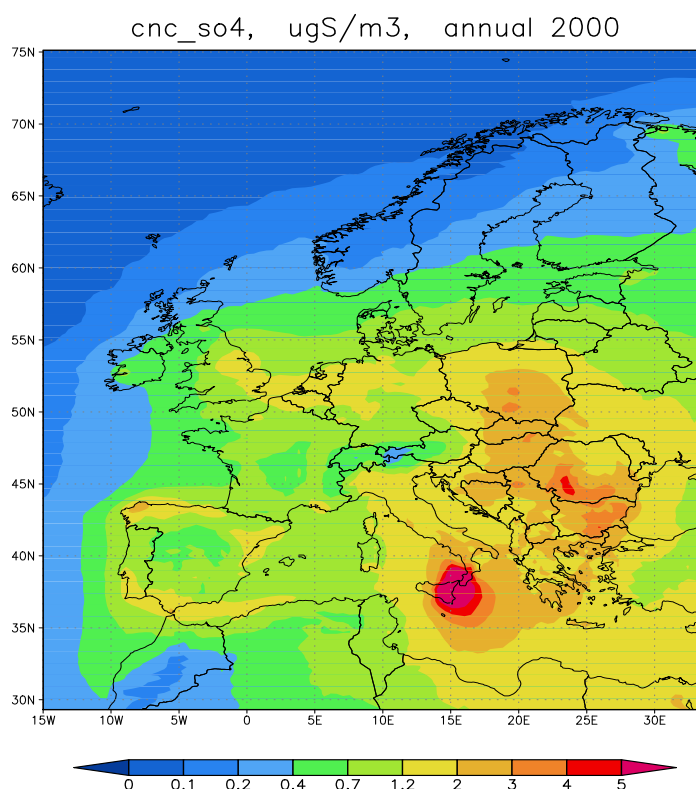


Kuva 7. Laskettu primääristen pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) pitoisuus Euroopassa ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ja Suomessa (ng/m^3) vuonna 2000. Oikeanpuoleisessa kuvassa esitetyissä tuloksissa on laskentaan otettu mukaan vain kotimaiset lähteet.



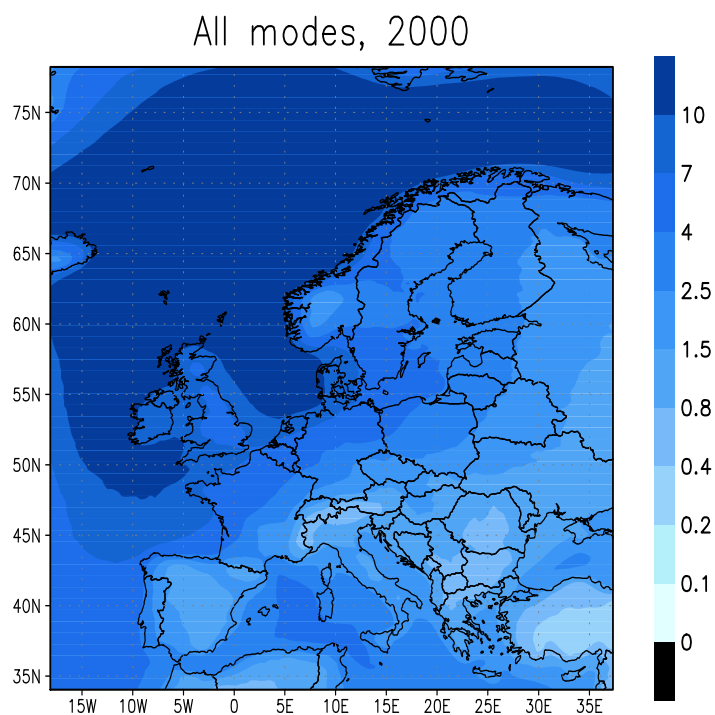
Kuva 8. Laskettu primääristen pienhiukkasten ($PM_{2.5}$) ja karkeiden hiukkasten ($PM_{2.5} - PM_{10}$) pitoisuus Euroopassa vuonna 2000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Laskettuja sulfaatti- ja merisuolapitoisuuksia on esitetty kuvissa 9 ja 10. Merisuolapitoisuus on Suomen eteläosissa suuruusluokkaa 2-5 $\mu\text{g m}^{-3}$ ja sulfaattipitoisuus luokkaa 3 $\mu\text{g m}^{-3}$, mikä vastaa tyypillisiä LOTOS-mallilla laskettuja sulfaattipitoisuustasoja (*Schaap et al., 2000a,b*). Sekundäärihiukkasista nitraattia ja ammoniumia ei arvioitu tässä työssä; aiempien arvioiden mukaan niiden yhteenlaskettu osuus on Suomen eteläosissa noin 1-2 $\mu\text{g m}^{-3}$ (esim. *Schaap et al., 2004a*).



Kuva 9. Laskettu sulfaattipitoisuus Euroopassa ($\mu\text{g(S)}/\text{m}^3$) vuonna 2000.

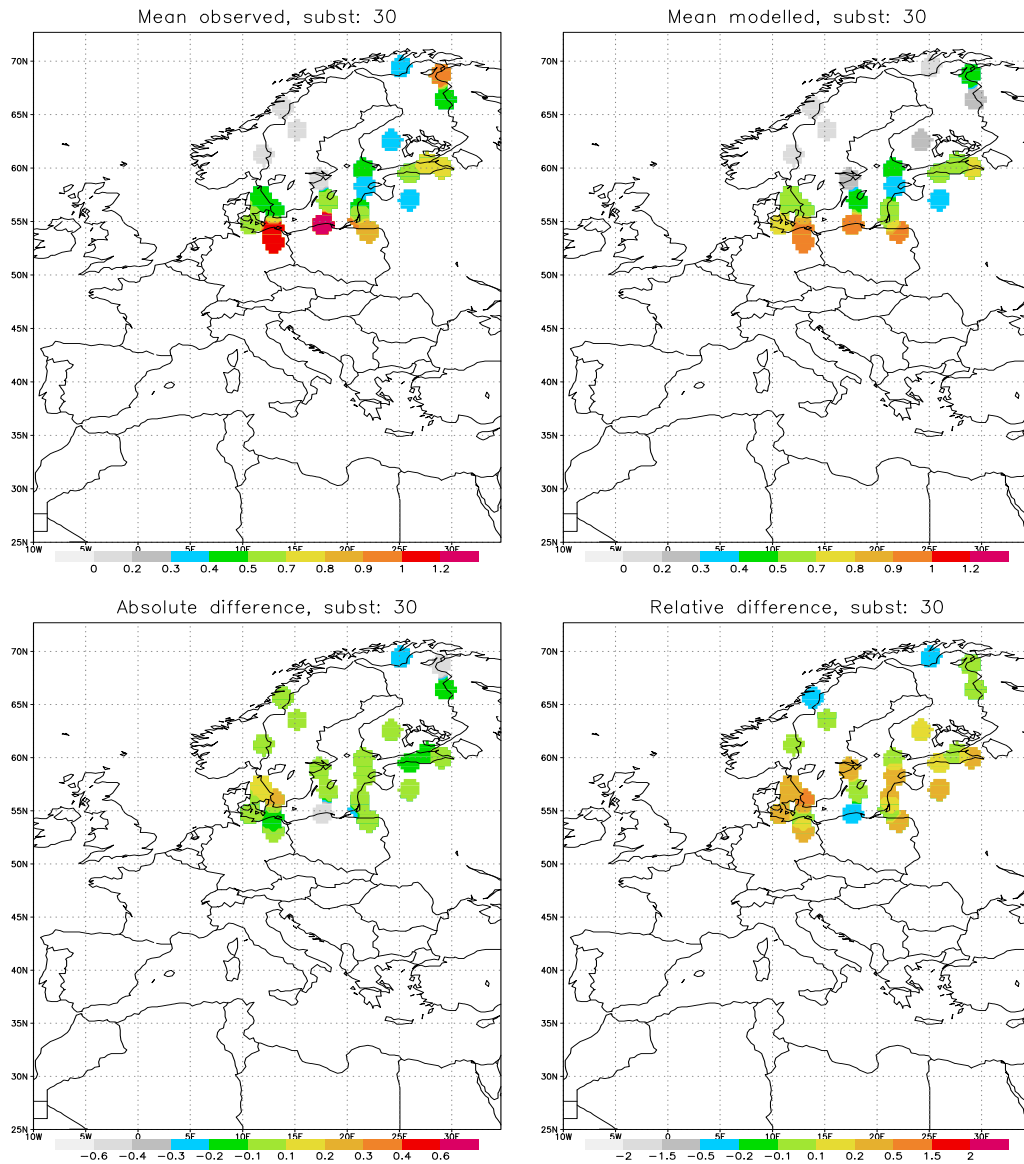
Mallilaskelmista puuttuvan aerosolidynamiikan vaikutusta on arvioitu MONO32-aerosolidynamiikkamallin ja MATCH-mallin kemiallisen osamallin yhdistelmällä tehdyillä laskelmilla. Aerosolidynamiikan vaikutus pienhiukkasten massapitoisuuksiin on verrattain vähäinen, mutta sillä on huomattavampi vaikutus lukumääräpitoisuuksiin ja kokojakaumiin.



Kuva 10. Keskimääräinen merisuolapitoisuus vuonna 2000, sisältää kaikki hiukkaskokoluokat. Yksikkö $\mu\text{g m}^{-3}$ (Sofiev *et al.*, 2006b).

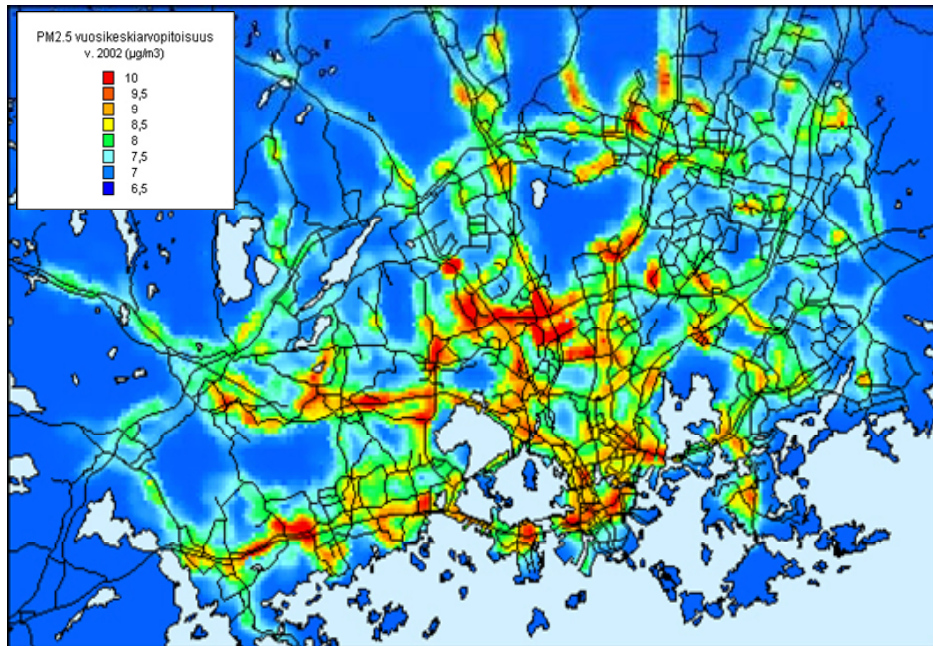
Rikkidioksidin ja sulfaatin osalta mallituloksia verrattiin EMEP-mittauksiin ja yhteensopivuus todettiin hyväksi. Sen sijaan Suomen alueen primäärihiukkaspitoisuuksia ei voitu verrata, koska laskenta-ajanjaksolta ei ollut käytettävissä tähän sopivia havaintoja. Esimerkki malli- ja mittaustulosten yhteensopivuudesta on esitetty kuvassa 11.

Paikallisen mittakaavan mallitustyössä (Kukkonen *et al.*, 2002; Karppinen *et al.*, 2002, 2003, 2004a, 2005ab) on tehty pääkaupunkiseudun kattavat leviämislaskelmat vuodelle 2002 (kuva 12). Laskelmat sisältävät liikenteen polttoperäiset ja ei-polttoperäiset päästöt, kylmäkäynnistyksen ja kylmänä ajon päästöt sekä alueellisen ja kaukokulkeutuneen taustan (Karppinen *et al.*, 2004b).



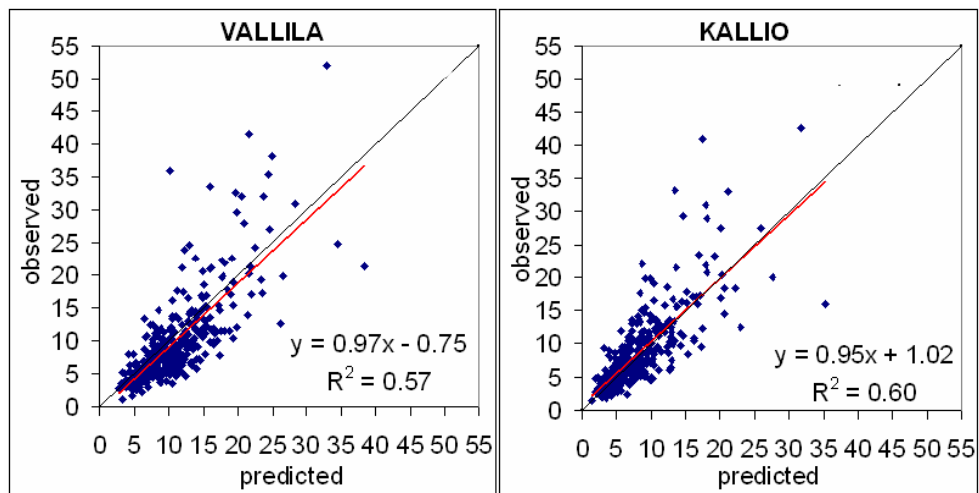
Kuva 11. Malli- ja mittaustulosten yhteensopivuus. Havaittu (ylhäällä vasemmalla) ja laskettu (ylhäällä oikealla) SO₂-pitoisuus (μg/m³), sekä niiden absoluuttinen (alhaalla vasemmalla) ja suhteellinen (alhaalla oikealla) ero.

Tuloksista nähdään että alueellisen ja kaukokulkeuman osuus pienhiukkaspitoisuuksiin on merkittävä. Vuositasolla pääkaupunkiseudulla kaukokulkeuman osuus vaihtelee noin puolesta vilkkaissa liikenneympäristöissä lähes sataan prosenttiin laskenta-alueen reunoilla (Karppinen et al., 2004b, Kukkonen et al., 2007). Pitoisuuksien alueellisessa jakaumassa voidaan selkeästi erottaa paikallisten liikenneväylien vaikutus. Paikallisen liikenteen aiheuttamien ei-polttoeräisten hiukkaspäästöjen osuus on merkittävä polttoeräisiin verrattuna.



Kuva 12. Mallinnettu PM_{2.5}-vuosikeskiarvo (µg/m³) pääkaupunkiseudulla vuonna 2002 (Karppinen et al., 2005ab).

Mallinnetut vuorokausikeskiarvot ovat keskimääräisesti hyvin yhteensopivat Vallilassa ja Kalliossa havaittujen (YTV) pitoisuusarvojen kanssa (Kuva 13).



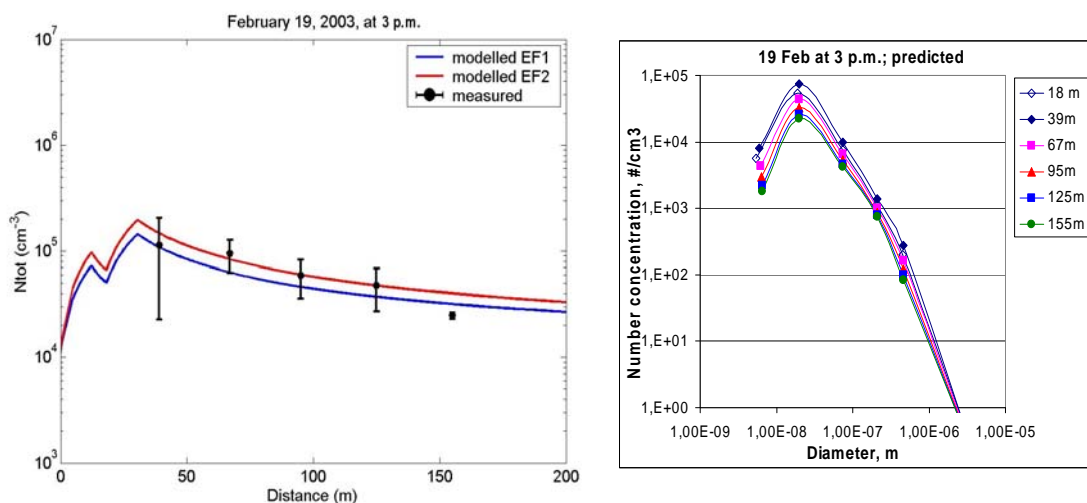
VALLILA: $R^2 = 0.57$, IA = 0.84

KALLIO: $R^2 = 0.60$, IA = 0.86

Kuva 13. Mitattujen ja mallinnettujen PM_{2.5} vuorokausikeskiarvojen (µg/m³) vertailu Helsingissä Vallilan ja Kallion mittausasemilla (Karppinen et al., 2005b). R = korrelaatiokerroin ja IA = yhteensopivuuskerroin (index of agreement).

Aerosoliprosessimallia (MONO32) ja leviämismallia (CAR-FMI) käytettiin yhtenä kokonaisuutena, ja yhdistetyn mallin suorituskykyä testattiin hyödyntäen LIPIKA-projektin mittauskampanjaa Itäväylän varrella. Tuloksia verrattiin myös malliyhdistelmällä UHMA ja CAR-FMI saatuihin tuloksiin (*Pohjola et al., 2004, 2005, 2007*). Mallitulosten todettiin vastaavan hyvin mitattuja hiukkasten kokojakaumia ja etäisyysriippuvuutta.

Tulokset (kuva 14) osoittivat, että laimeneminen on tärkein pitoisuuksia määräävä prosessi väylän lähiympäristössä. Sen lisäksi aerosolimallin kytkeminen leviämismallisysteemiin antaa sellaista lisätietoa hiukkasten kokojakaumasta ja lukumääräpitoisuuksista eri etäisyyksillä väylästä, jota ei muilla menetelmillä voitaisi saada selville. Erityisesti, jos terveysriskien voidaan tulevaisuudessa osoittaa olevan vahvasti riippuvaisia hiukkasten koosta tai lukumääristä pelkän kokonaismassan sijaan, näillä tuloksilla ja kehitetyllä mallisysteemillä tulee olemaan tärkeä rooli arvioitaessa liikenteen päästöjen vaikutuksia liikenneväylien lähistöllä.



Kuva 14. Vasen kuva: mitattu ja mallinnettu aerosolien lukumääräpitoisuus (cm^{-3}) etäisyyden funktiona eräälle esimerkitapaukselle. Oikea kuva: mallinnetut (MONO32+ CAR-FMI) hiukkasten lukumäärien kokojakaumat eri etäisyyksillä liikenneväylästä (*Pohjola et al., 2004, 2005, 2007*).

Yhdistettyjä hiukkasten prosessimalleja ja leviämismalleja arvioitiin myös SAPPHIRE-projektissa tuotetun aineiston perusteella (*Hussein et al., 2007*).

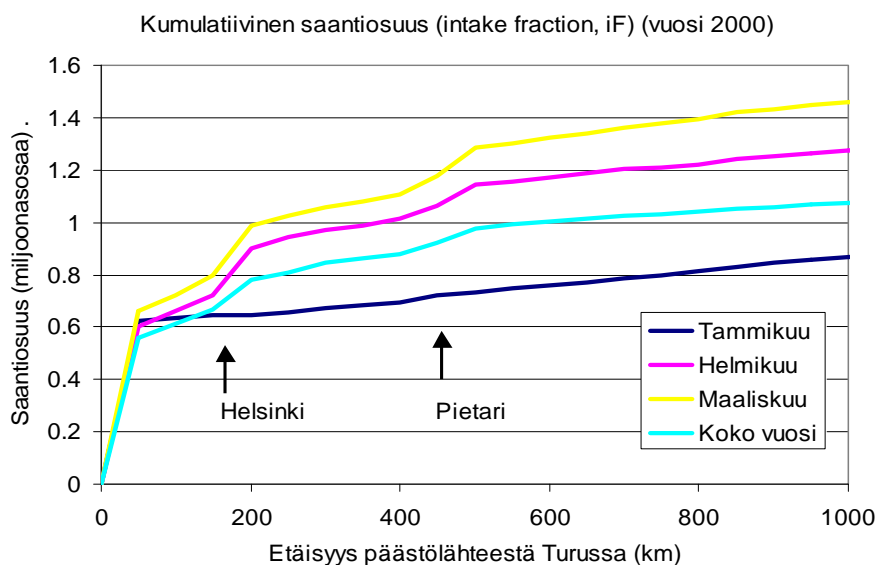
3.3 Pienhiukkasten riskinarviointi ja päätösanalyysi

Terveysvaikutusten arvioinnin tuloksena on saatu kvantitatiiviset arviot eri päästölähteistä peräisin olevien pienhiukkasten altistus-vaikutusfunktioille ja näihin liittyville epävarmuuksille, sekä arviot eri hiukkasten erilaisista toksisuuksista (*Tainio et al., käsikirjoitus a,b,c; Wilson et al., käsikirjoitus a,b; Tuomisto et al., käsikirjoitus a,b*). Riskinarviointimallilla on laskettu saantiosuudet (intake fraction) primäärihiukkasille eri päästösektoreille, pistelähteille ja Euroopan maille.

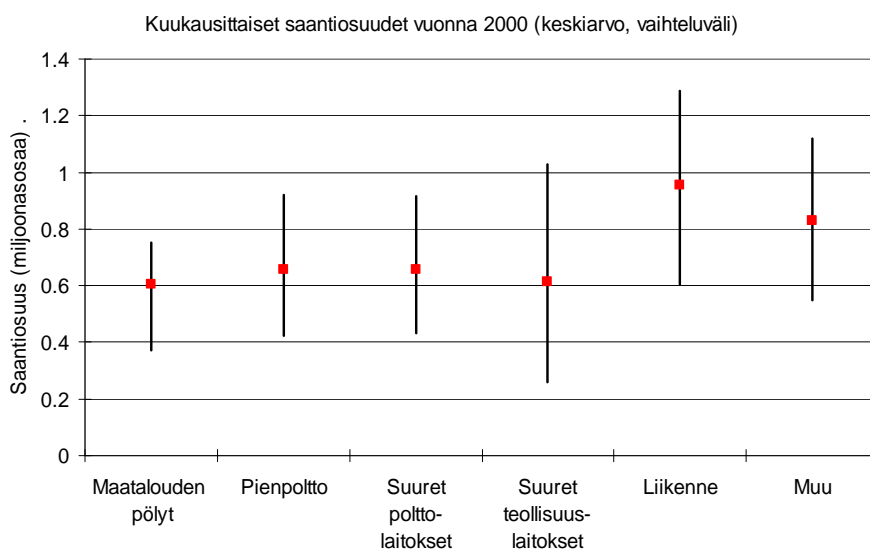
Saantiosuus on se osa päästöstä, joka lopulta päätyy jonkun ihmisen hengittämäksi (*Bennett et al., 2002*). Tyypilliset saantiosuudet suomalaisille primäärihiukkasten päästöille olivat suuruusluokkaa yksi miljoonasosa (kuvat 15 ja 16), mutta arvot vaihtelivat sektoreittain ollen liikenteelle suurempia kuin muille. Saantiosuus osoittautui tutkimuksessa erittäin hyödylliseksi tavaksi arvioida väestön kokonaisaltistusta.

KOPRA-projektin osana toteutettiin kansainvälisten pienhiukkasasiantuntijoiden haastattelu yhteistyössä Harvardin yliopiston ja Delftin teknillisen yliopiston kanssa. Kuusi eurooppalaista pienhiukkastutkimuksen johtavaa epidemiologia ja toksikologia haastateltiin käyttämällä ns. expert elicitation -menetelmää eli asiantuntija-arvuuttelua. Siinä asiantuntijat antoivat määrällisiä arvioita pienhiukkasten terveysvasteista, vaikutusten ilmaantumisesta ja eri hiukkastyypin erilaisesta myrkyllisyydestä. Asiantuntijoiden suoriutumista ja kykyä arvioida todennäköisyyksiä testattiin käyttämällä saman aihepiirin kysymyksiä, joihin oikeat vastaukset saatiin haastattelujen jälkeen.

Keskeisenä löydöksenä oli, että asiantuntijoiden näkemyksen mukaan yhdysvaltalaiset kohorttitutkimukset antavat hyvän kuvan pienhiukkasvaikutusten suuruudesta, vaikka he pitivätkin todellista epävarmuutta suurempana kuin tutkimusten tilastolliset luottamusvälit olivat (*Wilson et al. käsikirjoitus a,b, Tuomisto et al. käsikirjoitus a,b*). Toinen keskeinen tulos oli, että polttoperäiset primäärihiukkaset näyttivät myrkyllisemmiltä kuin pienhiukkaset keskimäärin, kun taas sekundäärihiukkasia pidettiin vähemmän haitallisina.



Kuva 15. Saantiosuus etäisyyden kasvaessa primäärisille pienhiukkasille. Päästölähde on oletettu Turkuun. Kuvassa näkyvät kuukausittaiset vaihtelut sekä suurten asutuskeskittymien vaikutus altistukseen (*Tainio et al., käsikirjoitus b*).



Kuva 16. Saantiosuudet sektoreittain primäärisille pienhiukkasille koko Suomessa (*Tainio et al., käsikirjoitus b*).

Päästötiedot, saantiosuudet ja altistus-vastefunktiot yhdistämällä on saatu kokonaisnäkemys Suomen pienhiukkaspäästöjen terveysvaikutuksista (Kuva 16 ja taulukko 3). Liikenteen saantiosuus on suurin kuvassa 16, koska päästön lähellä, missä pitoisuudet eivät vielä ole laimentuneet, on paljon ihmisiä. Pienemmän mittakaavan

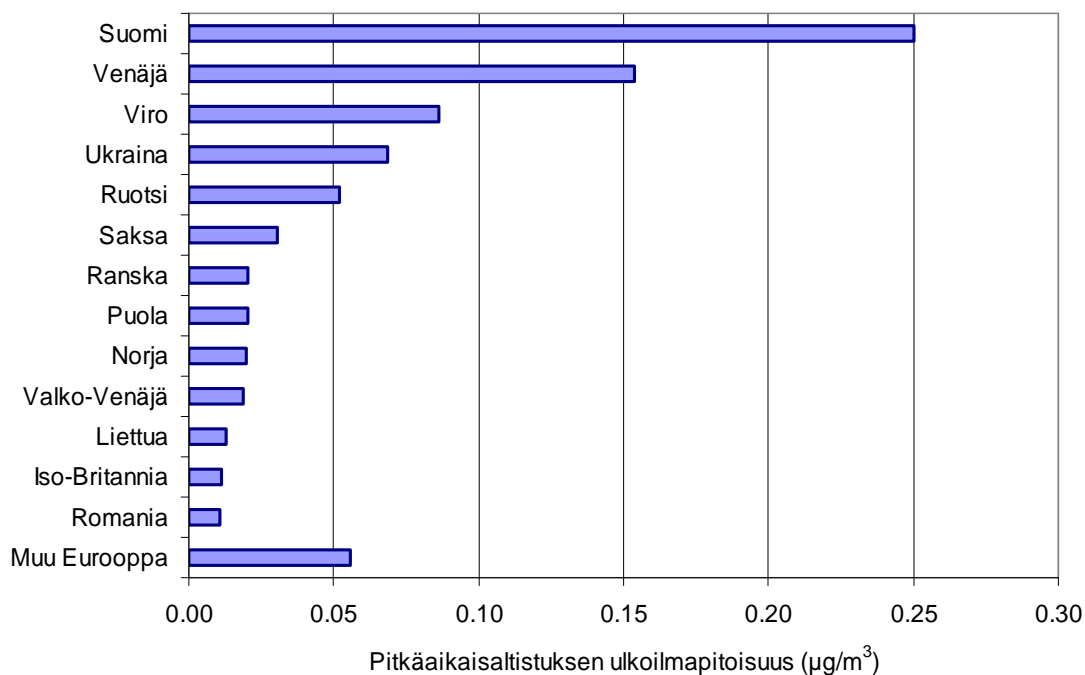
mallittamisella liikenteen saantiosuus olisi luultavasti vieläkin suurempi. Näissä laskelmissa väestön sijaintitietona on käytetty kotipaikkaa; erityisesti liikenteen saantiosuudet kasvaisivat, jos ihmisten liikenteessä vietetty aika voitaisiin huomioida laskennassa.

Taulukko 3. Alustava arvio primääristen ilman pienhiukkasten aiheuttamista ennen aikaisten kuolemantapausten määristä Suomessa päästölähde-sektoreittain vuonna 2000 (*Tainio et al., käsikirjoitus c*). Laskennassa on mukana myös muun Euroopan päästöt. Lisäksi on arvioitu suomalaisten päästöjen vaikutuksia muualla Euroopassa altistuvilla ihmisillä. Eri lähteistä peräisin olevien hiukkaspäästöjen myrkyllisyys on laskelmissa oletettu samanlaiseksi.

Päästö	Altistuva väestö		
	Suomen väestö	Muu Eurooppa	Yhteensä
Päästölähde Suomessa			
Kiinteät hajalähteet	12	7	19
Pienpoltto	52	39	91
Liikenne	49	27	76
Maatalous + turvetuotanto	14	9	23
Suuret polttolaitokset	13	11	24
Suuret teollisuuslaitokset	10	8	18
Yhteensä	150	102	252
Päästölähde Euroopassa, yht.	195	..	
Kaikki päästöt	345	..	

Tulosten mukaan primäärisille pienhiukkasille altistuminen aiheuttaa maassamme muutaman sata ennen aikaista kuolemantapausta (*Tainio et al., käsikirjoitus c*). Näistä huomattava osa johtuu lähellä ihmisiä olevista päästöistä, kuten kotitalouksien pienpoltosta sekä liikenteestä. Arvio suomalaisten pitkäaikaisaltistuksen jakautumisesta päästölähteiden mukaan eri maihin on esitetty kuvassa 17.

Pienhiukkaspäästön suuruus ei suoraan kerro päästösektorin terveysvaikutuksista, koska hiukkasten myrkyllisyys ja niille altistuvien ihmisten määrä vaihtelee huomattavan paljon päästölähteestä ja sen sijainnista riippuen. Niinpä onkin olennaisen tärkeää pystyä arvioimaan myös eri päästölähteiden saantiosuuksia ja hiukkasten erilaisia terveyshaittoja, jotta saadaan parempi kuva tietyn päästön vaikutuksista ja päästövähennystoimien kustannustehokkuudesta.



Kuva 17. Alustava arvio suomalaisten pitkäaikaisaltistuksesta primäärisille pienhiukkasille jaoteltuna päästömaan mukaan (Tainio et al., käsikirjoitus b). Suomen omien päästöjen aiheuttama altistus Suomessa on todennäköisesti aliarvio, koska malli ei ota huomioon alle kymmenen kilometrin päässä olevien päästöjen vaikutusta riittävän tarkasti.

4 Tulosten hyödyntäminen ja johtopäätökset

Pienhiukkaset tiedetään yhdeksi suurimmista ympäristöterveysongelmista tällä hetkellä. Päätöksentekoa varten tarvitaan lisätietoa ja ymmärrystä siitä, mitkä päästölähteet aiheuttavat eniten terveyshaittaa, ja millaisilla keinoilla haitallisimpia päästöjä voidaan parhaiten vähentää. Tätä tietoa on FINE -tutkimusohjelman KOPRA -projektissa tuotettu pyrkimällä kattamaan tärkeimpiä tietoaikkoja; näitä ovat erityisesti päästöjen kattava arviointi, pienhiukkasten leviäminen, muuntuma ja altistus, sekä terveysvaikutusten todellisen suuruuden arviointi, ottaen huomioon myös erityyppisten hiukkasten myrkyllisyserot.

Hankkeen lopullisena tavoitteena oli parantaa merkittävästi kokonaisvaltaista riskienhallintaa. Hankkeessa on saatu integroiduksi kolmen tutkimuslaitoksen (SYKE, IL ja KTL) ja muiden osallistuvien laitosten osaaminen ja mallit huomattavasti aiempaa paremmin yhteen. Aiemmin käytettävissä ollut paikallisen ja osittain alueellisen mittakaavan mallijärjestelmä myös yleistettiin FINE-ohjelmassa koko Euroopan

kattavaksi. Hanke on tuottanut tehokkaan mallinnustyökalun, jota voidaan käyttää arvioimaan, kuinka hiukkaspäästöjä ja -pitoisuuksia voidaan tulevaisuudessa vähentää kustannustehokkaimmalla tavalla. Kokonaismallin avulla voidaan myös arvioida, miten erilaiset toimenpiteet tulevaisuudessa vaikuttavat päästöjen vähenemiseen ja miten päästörajojen muuttuminen vaikuttaa ihmisten terveyteen. Malleilla saadaan myös selville, mistä eri päästölähteistä ilman epäpuhtaudet ovat peräisin.

Hankkeen yhtenä tuloksena saatuja sektorikohtaisia ja alueellisesti esitettyjä päästötietoja voidaan hyödyntää kansallisen poliittisen päätöksenteon tukena arvioitaessa päästöjen rajoitustoimia. Niitä on voitu käyttää myös Euroopan uuden ilmansaasteiden kaukokulkeutumissopimuksen (UNECE/CLRTAP) valmistelussa sekä EUn ilmansuojeluohjelmaan (CAFÉ) liittyvässä päätöksenteossa ja tutkimuksessa. Projektista saatuja mallinnustuloksia eri alueellisilla resoluutioilla (5 x 5 km² ja 1 x 1 km²) on voitu verrata CAFÉ-työssä käytettyihin mallinnustuloksiin Suomelle (50 x 50 km²).

Projektissa on pystytty tarkentamaan pienhiukkasten päästöt ja päästöjen lähteet koko Suomen alueella. Yhdistämällä päästömallit sää- ja leviämismalleihin on arvioitu pienhiukkaspitoisuuksia Euroopassa ja Suomessa. Pitoisuus- ja väestötietojen perusteella on edelleen arvioitu terveysvaikutuksia. Mallien käyttö on tarpeen erilaisten tietojen yhdistämiseksi ja kokonaiskuvan saamiseksi; mallien käytöllä on siksi myös tutkimusta integroiva vaikutus. Kehitetyllä mallijärjestelmällä on arvioitu esimerkiksi altistumisen ajallista ja paikallista vaihtelua pääkaupunkiseudulla (*Kousa et al., 2007*).

Mallien avulla voidaan arvioida myös sitä, miten erilaiset päästöjen vähennykset, sekä liikenne- ja kaupunkisuunnittelun vaihtoehdot todennäköisesti vaikuttavat väestön altistumiseen ja terveyteen. Hankkeessa kehitettyä altistumisen arvioinnin tieto-taitoa ja mallinnusta on sovellettu euroopanlaajuisesti ns. FUMAPEX-hankkeessa (*Baklanov et al., 2007*). Leviämismalli CAR-FMI on viety kansainvälisesti käytettävään ns. OSCAR-mallinnusjärjestelmään (*Sokhi et al., 2007*). Leviämismalli SILAM on avoimesti saatavilla Internetin kautta (<http://silam.fmi.fi/>).

Hankkeessa arvioitiin ensimmäistä kertaa Suomessa primäärisistä pienhiukkasista aiheutuvien ennenaikaisten kuolemantapausten määrä. Sekä ulkomaisista että

kotimaisista päästölähteistä peräisin olevat primääriset pienhiukkaset aiheuttavat maassamme noin muutaman sadan (tämän työn laskelmien mukaan noin 350) ihmisen ennenaikaisen kuoleman. Primääriset pienhiukkaset, jotka suomalaiset päästölähteet synnyttävät, aiheuttavat vuosittain muutaman sadan (noin 250) ihmisen ennenaikaisen kuoleman Suomessa ja ulkomailla. Jos laskelmiin otettaisiin mukaan kaasuista ilmakehässä syntyneet sekundääriset hiukkaset, nämä lukumäärät kasvaisivat huomattavasti. Saadut arviot ovat yhteensopivia CAFÉ-tutkimuksessa saatujen arvioiden kanssa Suomen osalta.

Pahimmiksi kotimaisiksi pienhiukkasten päästölähteiksi terveysvaikutusten kannalta osoittautuivat puiden pienpoltto ja liikenne. Luonnollisesti myös alueellisella ja kaukokulkeumalla on pienhiukkasten pitoisuuksille maassamme huomattava vaikutus. Suurimmat hiukkaspäästöt syntyvät maassamme Etelä-Suomen suurissa kaupungeissa, erityisesti Helsingin seudulla. Myös kaukokulkeuman merkitys on suurin eteläisessä Suomessa.

5 Tutkimuksen jatkaminen

Vuonna 2006 aloitettiin projekti ”Pienhiukkasten lähipäästöjen terveysriskit: puun pienpoltto ja tieliikenne – PILTTI” ympäristöministeriön rahoittamana. Hankkeessa tutkitaan mainittujen päästölähteiden pienhiukkasille altistumista ja terveysvaikutuksia 1-20 km etäisyydellä päästölähteestä, koko Suomen mittakaavassa. Projekti on suoraan jatkoa KOPRA-projektille ja keskittyy aiemmin havaittuihin tärkeimpiin kotimaisiin päästölähteisiin, eli liikenteeseen ja pienpoltoon.

Projektissa kehitetään edelleen Suomen ympäristökeskuksen (SYKE) päästömallin (FRES) 1x1 km² resoluution päästö- ja väestötietoja, Ilmatieteen laitoksen (IL) päästöjen leviämismallitusta ja Kansanterveyslaitoksen (KTL) terveysriskien arviointimalleja, sekä sovelletaan näiden muodostamaa kokonaismallia. Projektissa tarkastellaan erityisesti nykytilannetta ja tulevaisuutta sekä päästöjen rajoitusmahdollisuuksia ja -kustannuksia, käyttäen Ilmastostrategian uusimpia aktiviteettiskenaarioita vuosille 2010 ja 2025.

PILTTI-projektin tuloksena saadaan arviot tieliikenteen ja puun pienpolton pienhiukkaspäästöjen terveysvaikutuksista sekä vaikutusten rajoitusmahdollisuuksista ja rahallisista kustannuksista. Projektin tuloksena kehitettävällä riskimallilla voidaan verrata kustannuksia saavutettaviin terveyshyötyihin. Tulosten perusteella annetaan suosituksia päästöjen rajoitustoimista. Projektin kotisivut ovat osoitteessa <http://www.ymparisto.fi/default.asp?contentid=202624&lan=fi>.

KOPRA ja PILTTI -projekteissa kehitettyjen menetelmien avulla voidaan jatkossa tehokkaasti arvioida pitoisuusarvoja ja altistumista epidemiologisten terveysvaikutustutkimusten tarpeisiin. Menetelmiä voidaan hyödyntää myös ilmanlaadun ennusteiden laadinnassa. Operatiivisia ilmanlaadun ennusteita tutkimuskäyttöön Euroopan mittakaavassa on esitetty Internetissä (<http://silam.fmi.fi/>).

Viitteet

- Baklanov, A., Hänninen, O., Slørdal, L.H., Kukkonen, J., Bjergene, N., Fay, B., Finardi, S., Hoe, S.C., Jantunen, M., Karppinen, A., Rasmussen, A., Skouloudis, A., Sokhi, R.S., Sørensen, J.H. & Ødegaard, V., 2007. Integrated systems for forecasting urban meteorology, air pollution and population exposure. *Atmos. Chem. Phys.* 7, 855–874, 2007, www.atmos-chem-phys.net/7/855/2007/.
- Bennett, Deborah H., McKone, Thomas E., Evans, John S., Nazaroff, William W., Margni, Manuele D., Jolliet, Olivier & Smith, Kirk R., 2002. Defining Intake Fraction. *Environ. Sci. Technol.* 36 (9): 206A-211A.
- Evans, J.S., Wilson, A., Tuomisto, J.T., Tainio, M. & Cooke R.M., 2005 What risk assessment can tell us about the mortality impacts of the Kuwaiti oil fires. *Epidemiology* 16 (5): S137-S138 SEP 2005. Meeting Abstract. Seventieth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology.
- Gidhagen, L., Johansson, C., Ström, J., Kristensson, A., Swietlicki, E., Pirjola, L. & Hansson, H.-C., 2003. Model simulation of ultrafine particles inside a road tunnel. *Atmos. Environ.* 37 (15), pp. 2023-2036.
- Hussein, Tareq, Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko, Härkönen, Jari, Aalto, Pasi P., & Kulmala, Markku, 2005. The dependence of urban particle number size distributions on meteorological parameters in Helsinki. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, 29-31 March 2005*.
- Hussein, Tareq, Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko, Härkönen, Jari, Aalto, Pasi P., Hämeri, Kaarle, Kerminen, Veli-Matti & Kulmala, Markku, 2006. Meteorological dependence of size-fractionated number concentrations of urban aerosol particles. *Atmos. Environ.* 40:8, pp.1427-1440.
- Hussein, T., Kukkonen, J., Korhonen, H., Pohjola, M., Pirjola, L., Wraith, D., Härkönen, J., Teinilä, K., Koponen, I.K., Karppinen, A., Hillamo, R. & Kulmala, M., 2007. Evaluation and modeling of the size fractionated aerosol particle number concentration measurements nearby a major road in Helsinki – Part II: Aerosol measurements within the SAPPHERE project. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4081-4094, 2007.

- Hänninen O.O., Palonen J., Tuomisto J.T., Yli-Tuomi T., Seppänen O. & Jantunen M.J., 2005. Reduction potential of urban PM_{2.5} mortality risk using modern ventilation systems in buildings. *Indoor Air* 2005 Aug;15(4):246-56.
- Härkönen, Jari, Karppinen, Ari & Hussein, Tareq, 2005. Development of a hybrid model for predicting particle number concentrations. Abstract book of the conference: 2005 AAAR Particulate Matter Supersites Program and Related Studies. Abstract 20B-1, p.164. (<http://www.aaar.org/PMAbstractBookDec29fnl.pdf>)
- Johansson, Matti, Karvosenoja, Niko, Porvari, Petri & Kupiainen, Kaarle, 2003. Emission Scenarios for Particulate Matter Research and Policy Assessment in Finland. *Proceedings of the 12th International USEPA Emission Inventory Conference "Emission Inventories – Applying New Technologies", San Diego, USA 29.4.-1.5.2003*, 14 pp.
- Kahnert, Michael & Tarrasón, Leonor (eds.), 2003. Transboundary particulate matter in Europe. *EMEP Status report 4/2003*, Oslo, O-98134, 87pp.
- Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko, Pohjola, Mia & Härkönen, Jari, 2002. Modelling of the atmospheric dispersion of PM_{2.5} and PM₁₀. Workshop on Particles in the size of 2.5 to 10 microns in urban areas, Berlin, Germany, November 4-6, 2002.
- Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko, Härkönen, Jari, Aarnio, Päivi & Koskentalo, Tarja, 2003. Modelling fine particle concentrations (PM_{2.5}) in Helsinki Metropolitan Area. In: Sokhi, R.S. and Brechler, J. (eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Urban Air Quality - Measurement, Modelling and Management, Charles University, Prague, Czech Republic, 25-27 March 2003*. University of Hertfordshire, Hatfield, United Kingdom, pp. 290-293.
- Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko, Härkönen, Jari, Kauhaniemi, Mari, Kousa, Anu & Koskentalo, Tarja, 2004a. A modelling system for predicting urban PM_{2.5} concentrations: numerical results and model evaluation against the data in Helsinki. In: *Proceeding of the 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, 1-4 June 2004, Garmisch-Partenkirchen, Germany. Vol. 2*, pp. 65-69.
- Karppinen, Ari, Härkönen, Jari, Kukkonen, Jaakko, Aarnio, Päivi & Koskentalo, Tarja, 2004b. Statistical model for assessing the portion of fine particulate matter transported regionally and long range to urban air. *Scand. J. Work Environ. Health*, 30 (suppl. 2), pp. 47-53.
- Karppinen, Ari, Kauhaniemi, Mari, Härkönen, Jari, Kukkonen, Jaakko, Kousa, Anu & Koskentalo, Tarja, 2005a. Evaluation of a model for predicting fine particle concentrations. Abstract book of the conference: 2005 AAAR Particulate Matter Supersites Program and Related Studies. Abstract 10C-3, p.84. (<http://www.aaar.org/PMAbstractBookDec29fnl.pdf>)
- Karppinen, A., Kukkonen, J., Kauhaniemi, M., Härkönen, J., Nikmo, J., Sokhi, R.S., Luhana, L., Kousa, A., Alaviippola, B., Koskentalo, T. & Aarnio, P., 2005b. Evaluation and application of a model for the urban and regional scale concentrations of PM_{2.5}. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, 29-31 March 2005*.
- Karvosenoja, Niko, 2004. Puun pienpoltto päästöinventaaressa. *Ympäristö ja Terveys* 4/2004.
- Karvosenoja N., 2005. Reduction potential for PM_{2.5} emissions from wood combustion in the Nordic countries and population exposure in Finland, *Proceedings of Abatement strategies for air pollution and health effects from locally emitted and transnationally transported biomass combustion aerosols, 27-28 Oct 2005, Helsinki*, pp 12-13.

- Karvosenoja, Niko & Johansson, Matti, 2003a. The Finnish Regional Emission Scenario model – a base year calculation. *Proceedings of Air Pollution XI Conference, Catania, Italy*, pp. 315-324.
- Karvosenoja, Niko & Johansson, Matti, 2003b. Primary particulate matter emissions and the Finnish climate strategy. *Boreal Environ. Res.* 8:125-133.
- Karvosenoja, Niko, Johansson, Matti & Kupiainen, Kaarle, 2003a. Size-fractionated particulate matter emissions in Finland in 1990-2020. *Proceedings of the 14th International IUAPPA Conference "Air Quality – Assessment and Policy at Local, Regional and Global Scales" 6.-10.10.2003, Dubrovnik, Croatia*, pp. 97-104.
- Karvosenoja, Niko, Johansson, Matti & Porvari Petri, 2003b. Emissions of fine particles, sulphur dioxide and nitrogen oxides from biomass combustion in Finland. *Proceedings of International Nordic Bioenergy Congress and Exhibition 2.-5.9.2003, Jyväskylä, Finland*, pp. 310-312.
- Karvosenoja, Niko, Johansson, Matti, Kindbom, Karin, Lükewille, Anke, Jensen, Dorthe, Sternhufvud, Catarina & Illerup, Jytte B., 2004. Fine particulate matter emissions from residential wood combustion and reduction potential in the Nordic countries. *Proceedings of the 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition, London 22-27 August 2004*. 6 pp.
- Karvosenoja, Niko, Porvari, Petri, Raateland, Arjen, Kupiainen, Kaarle & Johansson, Matti, 2005a. The spatial allocation of air pollutants in Finnish regional emission model. *Proceedings of the 3rd Air Quality Management Conference, Istanbul 26-30 September*. pp. 571-580.
- Karvosenoja, Niko, Porvari, Petri, Raateland, Arjen, Tuomisto, Jouni T., Tainio, Marko, Johansson, Matti & Kousa, Anu, 2005b. Emission modeling in the assessment of PM_{2.5} from traffic and residential wood combustion. *Proceedings of the 3rd Air Quality Management Conference, Istanbul 26-30 September*. pp. 581-590.
- Karvosenoja, Niko, Klimont, Zbigniew, Tohka, Antti & Johansson, Matti, 2006a. Fine particle emissions, emission reduction potential and reduction costs in Finland in 2020. *The Finnish Environment* 46. 33pp. www.environment.fi/publications
- Karvosenoja, Niko, Kupiainen, Kaarle, Tohka, Antti, Porvari, Petri, Tuomisto, Jouni & Kukkonen, Jaakko, 2006b. Emission reduction potential and costs for primary and secondary PM_{2.5} in Finland. *Proceedings of IUAPPA regional conference/ 17th EFCA speciality conference, Lille, FRANCE, September 6 - 8, 2006*. CD-ROM, 8pp.
- Karvosenoja, N., Klimont, Z., Tohka, A., & Johansson, M., käsikirjoitus a. Cost-effective reduction of fine primary particulate matter emissions in Finland. Manuscript.
- Karvosenoja, N., Tainio, M., Kupiainen, K., Tuomisto, J.T., Kukkonen, J. & Johansson, M., käsikirjoitus b. Emission uncertainties of PM_{2.5} from vehicular traffic and residential wood combustion in Finland. Submitted.
- Korhonen, H., Lehtinen, K.E.J., Pirjola, L., Napari, I., Vehkamäki, H., Noppel, M. & Kulmala, M., 2003. Simulation of atmospheric nucleation mode: A comparison of nucleation models and size distribution representations. *J. Geophys. Res.* 108 (D15), 4471, 10.1029/2002JD003305.
- Kousa, A., Aarnio, P., Kukkonen, J., Riikonen, K., Alaviippola, B., Kauhaniemi, M., Karppinen, A., Elolähde, T. & Koskentalo, T., 2005. Refinement of a deterministic population exposure model, and its application for predicting the exposures of PM_{2.5} in Helsinki in 2002, *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, 29-31 March 2005*.
- Kousa, A., Aarnio, P., Koskentalo, T., Elolähde, T., Alaviippola, B., Kukkonen, J., Karppinen, A., Kauhaniemi, M., Riikonen, K. & Härkönen, J., 2007. Väestön

- altistuminen ilmansaasteille pääkaupunkiseudulla. *Pääkaupunkiseudun julkaisusarja 4/2007*, Helsinki.
- Kukkonen, Jaakko, Karppinen, Ari, Härkönen, Jari, Aarnio, Päivi, Koskentalo, Tarja, Tiitta, Petri & Raunemaa, Taisto, 2002. A model for evaluating the concentrations of PM_{2.5} in urban areas, 2002. In: *Batchvarova, E. and Syrakov, D. (eds.), Proceedings of the 8th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Sofia, October 14-17, 2002*, pp. 287-291.
- Kukkonen, Jaakko, Partanen, Leena, Karppinen, Ari, Walden, Jari, Kartastenpää, Raimo, Aarnio, Päivi, Koskentalo, Tarja & Berkowicz, Ruwim, 2003a. Evaluation of the OSPM model combined with an urban background model against the data measured in 1997 in Runeberg Street, Helsinki. *Atmos. Environ.* 37 (8), pp. 1101-1112.
- Kukkonen, Jaakko, Partanen, Leena, Karppinen, Ari, Ruuskanen, Juhani, Junninen, Heikki, Kolehmainen, Mikko, Niska, Harri, Dorling, Stephen, Chatterton, Tim, Foxall, Rob & Cawley, Gavin, 2003b. Extensive evaluation of neural network models for the prediction of NO₂ and PM₁₀ concentrations, compared with a deterministic modelling system and measurements in central Helsinki. *Atmos. Environ.* 37(32), pp. 4539-4550.
- Kukkonen, J., Karppinen, A., Kauhaniemi, M., Härkönen, J., Nikmo, J., Kousa, A., Alaviippola, B., Koskentalo, T. & Aarnio, P., 2006a. A model for evaluating the urban and regional scale concentrations of PM_{2.5}, and its application in Helsinki, In: *Vehkamäki, H. et al. (eds.): Report Series in Aerosol Science, No 83, NOSA 2006 Aerosol Symposium, combined with the X Finnish National Aerosol Symposium, Finnish-Czech Aerosol Symposium and BACCI workshop, Helsinki 8.-10.11.2006*, pp. 167-170, Yliopistopaino, Helsinki.
- Kukkonen, Jaakko, Karvosenoja, Niko, Tuomisto, Jouni, Koskentalo, Tarja, Pirjola, Liisa, Kupiainen, Kaarle & Niittymäki, Jarkko, 2006b. Kokonaismalli pienhiukkasten päästöjen, leviämisen ja riskin arviointiin – KOPRA. An integrated model for evaluating the emissions, atmospheric dispersion and risks caused by ambient air fine particulate matter. In: *FINE – Pienhiukkaset – Teknologia, ympäristö ja terveys 2002 – 2005, Loppuraportti. Teknologiaohjelmaraportti 9/2006*, Tekes, Helsinki, ISBN 952-457-231-1, pp. 197 – 205.
- Kukkonen, Jaakko, Sokhi, Ranjeet, Luhana, Lakhu, Härkönen, Jari, Salmi, Timo, Sofiev, Mikhail & Karppinen, Ari, 2007. Evaluation and application of a statistical model for assessment of long-range transported proportion of PM_{2.5} in the United Kingdom and in Finland. *Atmos. Environ.* (in print).
- Kupiainen, Kaarle, 2005. Emissions of Submicron and Carbonaceous Particles in Finland – Data Sources and Methodology in the Finnish Regional Emission Scenario Model (FRES). Final Report for the KOPRA-project, 29.8.2005.
- Kupiainen, K. & Klimont, Z., 2004. Primary Emissions of Submicron and Carbonaceous Particles in Europe and the Potential for their Control. Interim Report IR-04-079. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA), Laxenburg, Austria. 115 p.
- Kupiainen, K., Karvosenoja, N., Porvari, P., Johansson, M., Tainio, M. & Tuomisto, J., 2006. Emissions of primary carbonaceous particles, their uncertainties and spatial allocation in Finland. *Proceedings of IUAPPA regional conference / 17th EFCA speciality conference, Lille, FRANCE, September 6 - 8, 2006*. CD-ROM, 8pp.

- Levitin, Joseph, Härkönen, Jari, Kukkonen, Jaakko & Nikmo, Juha, 2005. Evaluation of the CALINE4 and CAR-FMI models against measurements near a major road. *Atmos. Environ.* 39, pp. 4439–4452.
- Pekkanen, Juha, 2004. Kaupunki-ilman pienhiukkasten terveystvaikutukset. *Duodecim* 2004;120:1645–52.
- Pirjola, Liisa & Kulmala, Markku, 2000. Aerosol dynamical model MULTIMONO. *Boreal Environ. Res.*, 5:361-374.
- Pirjola, L., Tsyro, S., Tarrason, L. & Kulmala, M., 2002. A monodisperse aerosol dynamics module – a promising candidate for use in long-range transport models: box-model tests. *Program conference proceedings, NOSA Aerosol Symposium 7-8 November, 2002*, 52-53.
- Pirjola, L., Tsyro, S., Tarrason, L. & Kulmala, M., 2003a. A monodisperse aerosol dynamics module, a promising candidate for use in long-range transport models: Box model tests. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 108, No. D9, 4258, doi:10.1029/2002JD002867.
- Pirjola, L., Tsyro, S., Tarrason, L., & Kulmala, M., 2003b. A monodisperse aerosol dynamics module for use in three-dimensional meteorological models. In: *Proceedings of the 4th International Conference of Urban Air Quality - measurement, modelling and management*, Eds. Sokhi, R.S. and Brechler, J., Charles University, Prague, Czech republic, 25-27 March 2003, pp. 294-297.
- Pirjola, L., Lehtinen, K.E.J., Hansson, H.-C & Kulmala M., 2004. How important is nucleation in regional/global modelling? *Geophysical Research Letters*, Vol. 31, L12109, doi:10.1029/2004GL019525.
- Pirjola, L., Paasonen, P., Pohjola, M., Hussein. T., Hämeri, K., Karppinen, A., Härkönen, J., Kukkonen, J. & Ketzel, M., 2005a. Dispersion of traffic emissions in a roadside environment: mobile laboratory measurements and modelling. *Abstracts of the European Aerosol Conference 2005, Ghent, Belgium, 28 August – 2 September 2005*, 75.
- Pirjola, Liisa, Paasonen, Pauli, Hämeri, Kaarle, Hussein, Tareq, Pohjola, Mia, Karppinen, Ari, Härkönen, Jari, Kukkonen, Jaakko & Virtanen, Annele, 2005b. Dispersion of traffic emissions in a roadside environment: mobile laboratory measurements and modelling. *Abstracts of 24th Annual AAAR Conference, October 17-21, 2005, Hilton Austin, Austin, Texas*.
- Pohjola, Mia, Pirjola, Liisa, Kukkonen, Jaakko & Kulmala, Markku, 2003a. Modelling of the influence of aerosol processes for the dispersion of vehicular exhaust plumes in street environment. *Atmos. Environ.* 37 (3), pp. 339-351.
- Pohjola, Mia, Pirjola, Liisa, Kukkonen, Jaakko & Kulmala, Markku, 2003b. Modelling aerosol processes in a street environment. In: Sokhi, R.S. and Brechler, J. (eds.), *Proceedings of the Fourth International Conference on Urban Air Quality - Measurement, Modelling and Management, Charles University, Prague, Czech Republic, 25-27 March 2003*. University of Hertfordshire, Hatfield, United Kingdom, pp. 298-301.
- Pohjola, Mia, Pirjola, Liisa, Kukkonen, Jaakko, Karppinen, Ari & Härkönen, Jari, 2004. The influence of aerosol processes in vehicular exhaust plumes: Model evaluation against the data from a roadside measurement campaign. *Proceedings of the 9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes, Garmisch-Partenkirchen, Germany, June 1-4, 2004*.
- Pohjola, M.A., Pirjola, L., Kukkonen, J., Karppinen, A., Härkönen, J. & Ketzel, M., 2005. Modelling of dispersion and aerosol processes in a roadside environment, and

- evaluation with measured data. *Proceedings of the 5th International Conference on Urban Air Quality, Valencia, 29-31 March 2005*.
- Pohjola, M.A., Pirjola, L., Kukkonen, J. & Kulmala, M., 2006a. Correction to modelling of the influence of aerosol processes for the dispersion of vehicular exhaust plumes in street environment. *Atmos. Environ.* 40:2, pp.311-314.
- Pohjola, M.A., Pirjola, L., Kukkonen, J., Karppinen, A., Härkönen, J. & Ketzel, M., 2006b. Roadside Environment Particle Modelling and Evaluation with Measured Data – Coupling a Dispersion Model and an Aerosol Process Model. In: *Vehkamäki, H. et al. (eds.): Report Series in Aerosol Science, No 83, NOSA 2006 Aerosol Symposium, combined with the X Finnish National Aerosol Symposium, Finnish-Czech Aerosol Symposium and BACCI workshop, Helsinki 8.-10.11.2006*, pp. 292-296, University press, Helsinki.
- Pohjola, M.A., Pirjola, L., Karppinen, A., Härkönen, J., Korhonen, H., Hussein, T., Ketzel, M. & Kukkonen, J., 2007. Evaluation and modelling of the size fractionated aerosol particle number concentration measurements nearby a major road in Helsinki – Part I: Modelling results within the LIPIKA project. *Atmos. Chem. Phys.*, 7, 4065-4080, 2007.
- Porvari, P., Karvosenoja, N., Kupiainen, K. & Johansson, M., 2006. Spatial allocation of PM_{2.5} emissions from road traffic in Finnish regional emission model. *Proceedings of IUAPPA regional conference / 17th EFCA speciality conference, Lille, FRANCE, September 6 - 8, 2006*. CD-ROM, 8pp.
- Rantamäki, Minna, Kauhaniemi, Mari, Kukkonen, Jaakko, Karppinen, Ari, Niska, Harri & Kolehmainen, Mikko, 2005. An evaluation of a deterministic modelling system and a neural network model for forecasting the concentrations of PM_{2.5} in an urban area. Abstract book of the conference: *2005 AAAR Particulate Matter Supersites Program and Related Studies*. Abstract 13C-4, p. 113. (<http://www.aaar.org/PMAbstractBookDec29fnl.pdf>)
- Robertson, Lennart, Langner, Joakim & Engardt, Magnuz, 1999. An Eulerian limited-area atmospheric transport model. *Journal of Applied Meteorology* 38, 190-210.
- Saarikoski, Sanna, Sillanpää, Markus, Sofiev, Mikhail, Timonen, Hilikka, Saarnio, Karri, Teinilä, Kimmo, Karppinen, Ari, Kukkonen, Jaakko & Hillamo, Risto, 2007. Chemical composition of aerosols during a major biomass burning episode over northern Europe in spring 2006: Experimental and modelling assessments. *Atmos. Environ.* 41 pp. 3577–3589.
- Sanderson, E & Hurley, F (eds.), 2004. Air Pollution and the Risks to Human Health - Health Impact Assessment. AIRNET Work Group - Risk and Health Impact Assessment. Utrecht University, Utrecht, 2004.
- Schaap, M., van Loon, M., ten Brink, H.M., Dentener, F.J. & Builtjes, P.J.H., 2004a. Secondary inorganic aerosol simulations for Europe with special attention to nitrate. *Atmos. Chem. Phys.*, 4, 857-874.
- Schaap, M., Denier Van Der Gon, H.A.C., Dentener, F.J., Visschedijk, A.J.H., Van Loon, M., ten Brink, H.M., Putaud, J.-P., Guillaume, B., Liousse, C. & Builtjes, P.J.H., 2004b. Anthropogenic black carbon and fine aerosol distribution over Europe. *J. Geophys. Res.*, Vol. 109, D18207, doi:10.1029/2003JD004330, 2004.
- Sofiev, M., Kaasik, M. & Hongisto, M., 2003. Model simulations of the alkaline dust distribution from Estonian sources over the Baltic Sea Basin. *Water Air Soil Pollut.*, 146, 211-223.
- Sofiev, M., Siljamo, P., Valkama, I., Ilvonen, M. & Kukkonen, J., 2006a. A dispersion modelling system SILAM and its evaluation against ETEX data. *Atmos. Environ.*, 40, 674-685.

- Sofiev, M., Jourden, E., Pirjola, L., Kangas, L., Karvosenoja, N., Karppinen, A. & Kukkonen, J.*, 2006b. Dispersion modelling of the concentrations of fine particulate matter in Europe. Presented at 28th NATO/CCMS International Technical Meeting on Air Pollution Modelling and its Application. May 15-19, 2006, Leipzig, Germany.
- Sofiev, Mikhail, Jourden, Erwan, Kangas, Leena, Karvosenoja, Niko, Karppinen, Ari & Kukkonen, Jaakko*, 2006c. Numerical modelling of the spatial distribution of fine particulate matter in Europe and Finland. In: *NOSA 2006 Aerosol symposium, combined with the X Finnish National Aerosol Symposium, Finnish-Czech Aerosol Symposium, and BACCI workshop, Helsinki 8-10.11.2006, Report Series in Aerosol Science N:o 83*, Finnish Association for Aerosol Research, Helsinki., pp. 348-352.
- Sokhi, Ranjeet S., Mao, Hongjun, Srimath, Srinivas T.G., Fan, Shiyuan, Kitwiroon, Nutthida, Luhana, Lakhumal, Kukkonen, Jaakko, Haakana, Mervi, van den Hout, K. Dick, Boulter, Paul, McCrae, Ian S., Larssen, Steinar, Gjerstad, Karl I., San Jose, Roberto, Bartzis, John, Neofytou, Panos, van den Breemer, Peter, Neville, Steve, Kousa, Anu, Cortes, Blanca M., Karppinen, Ari & Myrtveit, Ingrid*, 2007. An integrated multi-model approach for air quality assessment: development and evaluation of the OSCAR air quality Assessment system. Environmental Modelling and Software (in print).
- Tainio, M.* Incorporating local emission information to a regional dispersion model: a case study in Helsinki, Finland. Manuscript.
- Tainio, M. & Tuomisto, J.T.*, 2003. Comparing methodologies of six fine particle risk assessments. Sixth Finnish conference of environmental sciences, 8.-9.5.2003, Joensuu, Finland.
- Tainio, M. & Tuomisto, J.T.*, 2004. Importance analysis and value of information analysis in air pollution risk modeling. Society for Risk Analysis Annual Meeting, 2004, Palm Spring, CA, USA.
- Tainio, M, Tuomisto, J.T., Aarnio, P., Jantunen, M. & Pekkanen, J.*, 2003a. Comparison of different bus types and mortality due to fine particulate matter in Helsinki, Finland. World congress on risk, 22.-25.6.2003, Brussels, Belgium.
- Tainio, M., Tuomisto, J.T., Aarnio, P., Jantunen, M., Koistinen, K., Hänninen, O. & Pekkanen, J.*, 2003b. Estimation of the contributions of different sources to average PM_{2.5} exposure of the adult population of Helsinki. Abstract in 13th annual conference of International Society of Exposure Analysis, 21.-25.9.2003.
- Tainio, Marko, Tuomisto, Jouni T., Aarnio, Päivi, Jantunen, Matti, Koistinen, Kimmo, Hänninen, Otto & Pekkanen, Juha*, 2004. Eri bussitekniikoiden vaikutus pienhiukkasten aiheuttamaan kuolleisuuteen pääkaupunkiseudulla vuonna 2020. *Sosiaali- ja terveystieteiden tutkimuskeskuksen monistuksia 2004:1*.
<http://stm.fi/Resource.phx/publishing/store/2004/01/pr1075360882181/passthru.pdf>
- Tainio, Marko, Tuomisto, Jouni T., Hänninen, Otto, Aarnio, Päivi, Koistinen, Kimmo J., Jantunen Matti J. & Pekkanen, Juha*, 2005a. Health effects caused by primary fine particulate matter (PM_{2.5}) emitted from busses in Helsinki Metropolitan Area, Finland. *Risk Analysis* 2005; 25(1):151-160.
- Tainio, M., Tuomisto, J.T., Ruuskanen, J. & Pekkanen J.*, 2005b. Air pollution, local traffic, and life expectancy. Seventh Finnish Conference of Environmental Sciences, Jyväskylä, 12-13.5.2005.
- Tainio M., Tuomisto J.T., Ruuskanen J. & Pekkanen J.*, 2005c. Air pollution effects in life table model – an importance analysis. Society for Risk Analysis Annual Meeting, 2005, Orlando, Florida, USA.
- Tainio, M., Hujo, M., Sofiev, M., Kukkonen, J., Karppinen, A., Karvosenoja, N. & Tuomisto, J.T.*, 2006. Evaluation of the seasonal variation of Intake Fractions (iF) for

- the Primary Fine Particle (PM_{2.5}) Emissions in Finland for Various Source Sectors. In: *Proceedings of the International Conference on Environmental Epidemiology & Exposure, Paris. 2-6 September.* pp. 17.
- Tainio, M., Tuomisto, J.T., Hänninen, O., Ruuskanen, J. & Pekkanen, J., käsikirjoitus a. Fine particles (PM_{2.5}) life-table model: an importance analysis of variables. Submitted.
- Tainio, M., Hujo, M., Tuomisto, J.T., Karppinen, A., Karvosenoja, N., Sofiev, M., Kangas, L. & Kukkonen, J., käsikirjoitus b. Defining intake fraction for Finnish primary and secondary fine particles. Manuscript.
- Tainio, M., Tuomisto, J.T., Sofiev, M., Karppinen, A., Karvosenoja, N., Kangas, L. & Kukkonen, J., käsikirjoitus c. The sources, dispersion and health effects of Finnish fine particles. Manuscript.
- Tohka, Antti & Karvosenoja, Niko, 2004. Estimating VOC emissions from residential biomass combustion in Finland. *Proceedings of the 13th World Clean Air and Environmental Protection Congress and Exhibition, London 22-27 August 2004.* 6 pp.
- Tohka, Antti & Karvosenoja, Niko, 2005. The Importance of Fine Particle and Trace Element Emissions from Non-Fuel Process Industry Sources in Finland. In: *Pierucci, Sauro (ed.). Chemical engineering transactions, Volume 6.* Milano, AIDIC Servizi S.r.l. P. 635-640. ISBN 88-900775-7-3.
- Tohka, Antti & Karvosenoja, Niko, 2006a. Fine particle emissions and emission reduction potential in Finnish industrial processes. *Reports of Finnish Environment Institute 21.*
- Tohka, A. & Karvosenoja, N., 2006b. Particle emissions and control potential from non-fuel process industry sources in Finland. *Proceedings of IUAPPA regional conference / 17th EFCA speciality conference, Lille, FRANCE, September 6 - 8, 2006.* CD-ROM, 8pp.
- Tuomisto, Jouni T. & Tainio, Marko, 2005. An economic way of reducing health, environmental, and other pressures of urban traffic: a decision analysis on trip aggregation. *BMC Public Health* ;5:123.
- Tuomisto, J.T. & Tainio, M., 2006. Extended causal diagrams in describing environmental health risks. International Conference on Environmental Epidemiology & Exposure, Paris. 2-6 September.
- Tuomisto, Jouni T., Tuomisto, Jouko, Tainio, Marko, Niittynen, Marjo, Verkasalo, Pia, Vartiainen, Terttu, Kiviranta, Hannu & Pekkanen, Juha, 2004a. Risk-Benefit Analysis of Eating Farmed Salmon. *Science.* 2004 Jul 23;305(5683):476-7.
- Tuomisto J.T., Tainio M., Pekkanen J. & Tuomisto J., 2004b. Comparative risk analysis of dioxins and fine particulate matter. *Toxicology and Applied Pharmacology* 197 (3): 169-169 127 JUN 2004. Meeting Abstract.
- Tuomisto J.T., Wilson, A., Cooke R.M., Tainio M. & Evans J.S., 2005. Mortality in Kuwait Due to PM from Oil Fires after the Gulf War: Combining Expert Elicitation Assessments. *Epidemiology* 16 (5): S74-S75 SEP 2005. Meeting Abstract. Seventieth Conference of the International Society for Environmental Epidemiology.
- Tuomisto, J.T., Wilson, A., Cooke, R.M., Tainio, M. & Evans J.S., käsikirjoitus a. Quantifying Uncertainty in the Relationship between Population Mortality and Airborne Particulate Matter. Manuscript.
- Tuomisto, J.T., Wilson, A., Evans, J.S., Tainio, M., Cooke, R.M., käsikirjoitus b. Uncertainty in Mortality Response to Airborne Fine Particulate Matter: Combining European Air Pollution Experts. In press.

Tuomisto, J.T., Karvosenoja, N., Porvari, P., Raateland, A., Tainio, M., Johansson, M., Kukkonen, J. & Kupiainen, K., käsikirjoitus c. Population breathing rate as a relative exposure measure: PM2.5 from vehicular traffic and domestic wood combustion in Finland. Submitted.

Wilson, A.M., Tuomisto, J.T., Morales, O., Tainio, M., Cooke, R.M. & Evans, J.S., käsikirjoitus a. A Probabilistic Characterization of the Relationship Between Fine Particulate Matter and Mortality: Elicitation of European Experts. Submitted.

Wilson, A.M., Tuomisto, J.T., Morales, O., Tainio, M., Evans, J.S. & Cooke, R.M., käsikirjoitus b. Mortality Impact of the 1991 Kuwait Oil Fires: Quantitative Estimates of Uncertainty via Expert Judgment. Submitted.