

## TIIVISTELMÄRAPORTTI

### Aerosolimallit ja aerosolisään ennustaminen Suomen olosuhteissa

#### Hankeen johtaja:

Dosentti Heikki Lihavainen, Ilmatieteen laitos, Helsinki, 09 1929 5492, [heikki.lihavainen@fmi.fi](mailto:heikki.lihavainen@fmi.fi)

#### Hankkeen muut tutkijat:

FT Niku Kivekäs, Ilmatieteen laitos, Helsinki, 09 1929 5447, [niku.kivekas@fmi.fi](mailto:niku.kivekas@fmi.fi)

FT Tero Mielonen, Ilmatieteen laitos, Kuopio, 050 525 3028, [tero.mielonen@fmi.fi](mailto:tero.mielonen@fmi.fi)

Prof. Kari Lehtinen, Ilmatieteen laitos, Kuopio, 040 867 7844, [kari.lehtinen@fmi.fi](mailto:kari.lehtinen@fmi.fi)

FT Antti Arola, Ilmatieteen laitos, Kuopio, 050 307 2131, [antti.arola@fmi.fi](mailto:antti.arola@fmi.fi)

FT Timo Kaurila, , PVTT, Lakiala, 02 99 550 539, [timo.kaurila@mil.fi](mailto:timo.kaurila@mil.fi)

Ilkka Rajakallio, PVTT, Lakiala, 02 99 550 539, [ilkka.rajakallio@mil.fi](mailto:ilkka.rajakallio@mil.fi)

#### Tiivistelmä

Maailmalla käytössä olevien aerosolimallien on todettu soveltuvan vain osittain Suomen olosuhteisiin. Tutkimushankeen tarkoituksena on kehittää Suomen olosuhteisiin sopivat aerosolimallit. Yhdistämällä aerosolimallit sääennusteeseen voidaan antaa todennäköisyysennuste säteilynvaimenemiselle tietyllä aallonpituudella halutulle paikalle ja ajan- kohdalle. Hankeen ensimmäisenä vuotena on selvitetty mahdollisuutta luoda aerosolimallit pohjatuen pitkiin mittausaikasarjoihin ja ilmassojen kulkeutumisreitteihin. Tämän perusteella on löydetty kaksi selkeästi toisistaan eroavaa aerosolikokojakauman muotoa; mantee- reellinen ja merellinen. Nämä eroavat merkittävästi aiemmin käytetyistä standardi aerosolimalleista. Hankeen tulevina vuosina määriteltäviä aerosolimalleja jatkjalostetaan ja kytketään osittain sääennustemalliin.

#### 1. Johdanto

Säteilynkulun mallittaminen ilmakehässä on monimutkainen ongelma. Yksi suurimmista epävarmuustekijöistä on ilmakehän aerosolien vaikutus. Aerosolien vaikutusta säteilyn eteen- nemiin mallinnetaan yleisesti amerikkalaisen MODTRAN-ohjelmiston avulla [viite 1]. Puolustusvoimien Teknillisen Tutkimuslaitoksen (PVTT) ja Ruotsin puolustuslaitoksen (FOI) tekemän yhteistutkimuksen perusteella, joka perustui Ruotsissa tehtyihin mittauksiin, MODTRAN-ohjelmiston aerosolimallit eivät vastaa Ruotsissa vallitsevia aerosoliolo- suhteita [viite 2,4]. PVTT teki FOI:n mittauksia vastaavan tutkimuksen Lakialassa vuosina 2004-2006 [viite 3]. Lopputulos oli hyvin samanlainen kuin FOI:n mittausaineistoon perus- tuvassa tutkimuksessa. Noin 25 % tapauksista MODTRAN:in Rural-aerosolimalli aliarvio voimakkaasti aerosolien aiheuttaman vaimennuksen infrapuna-alueella ts. infrapunakame- roiden ja laseretäisyysmittareiden suorituskyky näissä olosuhteissa on huomattavasti huon- ompi kuin kuvitellaan.

Postiosoite	MATINE Puolustusministeriö PL 31 00131 HELSINKI	Sähköposti	matine@defmin.fi
Käyntiosoite	Eteläinen Makasiinikatu 8 00130 HELSINKI	WWW-sivut	www.defmin.fi/matine
Puhelinvaihe	(09) 16001	Y-tunnus	FI01460105
Pääsihteeri	(09) 160 88310	OVT-tunnus/verkkolaskuosoite	003701460105
		Itellan operaattorivälittäjä-tunnus	003710948874
Suunnittelusihteeri	(09) 160 88314	Verkkolaskuoperaattori	Itella Information Oy
Toimistos sihteeri	050 5555 837	Yhteyshenkilö/Itella	helpdesk@itella.net
Faksi kirjaamo	(09) 160 88244		

MATINE-rahoitteisessa tutkimusprojektissa "Aerosolien optisten ominaisuuksien vaikutus säteilynkulkuun ilmakehässä" vuosina 2005–2007, tavoitteena oli selvittää tarkemmin syitä tähän mallien ja mittausten ristiriitaan. Kolmen vuoden aikana järjestettiin useita mittauskampanjoita, joissa aerosolien hiukkaskokojakaumia ja niiden aiheuttamaa vaimennusta mitattiin usealla eri menetelmällä. Lisäksi tehtyjen säteilynkulun mallinnusten perusteella selvisi, että myös tietoa hiukkasten kemiallisista ominaisuuksista tarvitaan muodostettaessa parempia aerosolimalleja Suomen olosuhteisiin. Viimeisimmässä mittauskampanjassa kemiallisen koostumuksen määrittäminen otettiin mukaan. "Aerosolien optisten ominaisuuksien vaikutus säteilynkulkuun ilmakehässä" – projektissa tehty tutkimustyö toi runsaasti uutta tietoa aerosolien vaikutuksesta säteilyn etenemiseen Suomen olosuhteissa. Tehdyt mittaukset ja tutkimus toimivat välttämättömänä esitutkimuksena kehitettäessä työkaluja, joilla voidaan ennustaa aerosolisäätä Suomen olosuhteissa.

Nyt käynnissä oleva hanke "Aerosolimallit ja aerosolisään ennustaminen Suomen olosuhteissa" pohjautuu yllä esiteltyyn "Aerosolien optisten ominaisuuksien vaikutus säteilynkulkuun ilmakehässä" – projektin tuloksiin, ja jatkaa niiden kehittämistä käyttökelpoiseksi kokonaisuudeksi ja edelleen hyödyllisiksi sovelluksiksi. Tavoitteena on, että tämän nykyisen hankkeen tuloksia voidaan käyttää esimerkiksi seuraavissa sovelluksissa:

1. Arvioitaessa optronisten sensorijärjestelmien suorituskykyä operatiivisissa tehtävissä eli miten etäältä vihollinen voidaan havaita sääolosuhteet huomioiden.
2. Arvioitaessa voidaanko laseretäisyysmittaus suorittaa halutulle etäisyydelle kyseisissä sääolosuhteissa ja miten voimakkaasti aerosolit sirottavat (leventävät) lasersäteen keilaa. Keilan hajoaminen helpottaa mm. vihollisen tuottaman laseruhan ilmaisua.
3. Aerosolisääennustetta voidaan hyödyntää kenttätestien suunnittelussa ja toteutuksessa.
4. Paremmin Suomen olosuhteisiin soveltuvia aerosolimalleja voidaan käyttää ilma- ja satelliittikuvien ilmakehäkorjausten tekemiseen.

## 2. Tutkimuksen tavoite ja suunnitelma

Tällä hankkeella on kaksi hyvin konkreettista päätavoitetta:

- 1) määrittellä Suomen alueella tyypillisimmät infrapuna-aallonpituudella vaikuttavat aerosolimallit
- 2) tehdä ohjelmistoprototyyppi, joka määrittää ennusteen aerosolien aiheuttamaan säteilynvaimennuksen ilmakehässä infrapuna-aallonpituuksilla

Tutkimuksen tavoitteet saavutetaan kahden työpaketin avulla.

### Työpaketti 1: Ilmakehän aerosolien vaikutus säteilyyn infrapuna-aallonpituuksilla

Säteilyn vaimennukseen infrapuna-aallonpituuksilla vaikuttavat pääasiassa isot, yli 0.5  $\mu\text{m}$ :n, hiukkaset. Näiden lähteet ovat pääsääntöisesti primäärisiä, esim pöly, merisuola. Näiden hiukkasten elinikä ilmakehässä on muutamasta päivästä viikkoon. Sekä lähteistä että eliniästä johtuen niiden pitoisuuksien arvioiminen on Suomen oloissa huomattavasti hel-

pompaa kuin ns. ultrapienien hiukkasten pitoisuudet. Isojen hiukkasten pitoisuudet ovat suhteellisen pieniä Suomessa. Erikoistapauksina, joka vaikeuttavat arvioimista, mainittakoon esim. tulivuoren purkaukset ja metsäpalot. Lisäksi ultrapienet hiukkaset vaikuttavat pilvien ja sumun muodostumiseen jolloin jo 100 nm hiukkaset saattavat vaikuttaa niiden ominaisuuksiin. Tässä työpaketissa määritellään, perustuen kirjallisuuteen, olemassa oleviin mittaustietoihin sekä lisämittauksiin, lähteet eri vuodenaikoina, pitoisuudet, kasvukertoimet sekä taitekertoimet ja tiheydet aerosoleille. Näitä parametrejä tarvitaan säteilyn vaimenemisen määrittämiseen. Lähdealueet, joille määrätynlaiset aerosolien ominaisuudet ovat tyypillisiä, määritellään ilmamassojen kulkeutumisreittien avulla. Aerosolien aiheuttama vaimennus parametrisoidaan vallitsevan sään ja ilmamassan kulkeutumisreittien perusteella.

Lisäksi tutkitaan mitä ja miten operatiivisessa toiminnassa olevia mittalaitteita voidaan käyttää maanlaajuisen tilannekuvan saamiseksi säteilyn vaimenemisesta infrapuna-aallonpituuksilla. Näitä voivat olla esim. näkyvyysanturit, ceilometrit (pilvenkorkeus) ja ilmanlaatumittauksissa käytettävät laitteet kuten PM10 mittarit (PM10 = halkaisijaltaan alle 10 µm hiukkasten massa).

### Työpaketti 2 : Aerosolien infrapunavaimennus- parametrisaatioiden integroiminen sääennustemallien kanssa

Pitkän tähtäimen tavoitteeksi olisi houkuttelevaa asettaa täysin kytketty sään ennustusmalli joka sisältäisi aerosolien pitoisuuden sekä koko- ja koostumusjakaumat ennustettavina parametreina tavanomaisten sääparametrien (lämpötila, kosteus, pilvisuus, tuuli, sade) lisäksi. Tämä ei ole kuitenkaan vielä realismia ongelman laskentaintensiivisyyden vuoksi. Siksi tavoittelemme tässä hankkeessa 'osittain kytkettyä', tilastolliseen analyysiin ja mittauksiin perustuvaa mallia.

Mallin lähtökohtana on aerosolien mittaukset eri olosuhteissa. Edellisessä hankkeessa käynnistetyn klusterianalyysin perusteella ilmamassojen kulkeutumisreitit jaetaan klustereihin, joita jokaista kuvaa mittauksiin perustuva tieto aerosolien pitoisuudesta, kokojakaumasta ja kemiallisesta koostumuksesta, siis 'aerosolisäästä'. Sään ennustusmallilla (HIRLAM) voidaan ennustaa ko. kulkeutumisreitit (siis haluttuun paikkaan tulevan ilmamassan lähdealue(et)) sekä olosuhteet (joista tärkeimpinä lämpötila ja suhteellinen kosteus), jolloin klusterianalyysin tulosten perusteella saadaan ennuste vallitsevalle aerosolisäälle. Saadun aerosolisääennusteen, lämpötilan ja suhteellisen kosteuden avulla voidaan ennustaa säteilyn vaimeneminen.

Työpaketti 1 on tarkoitus saada päätöksen mahdollisen toisen vuoden aikana. Toisen vuoden aikana käynnistyy myös työpaketti 2:ssa tehtävä työ.

### 3. Aineisto ja menetelmät

Ensimmäisen vuoden aikana tutkimuksessa on kerätty mittausdataa aerosolihiuksien koko- ja lukumääräjakaumasta kokoalueella 0,1 – 15 µm (hiukkasten halkaisija kuivissa olosuhteissa). Käytökelpoista dataa on saatu runsaasti Hyytiälän (61° 51' P, 24° 17' I), Puijon (62° 54' P, 27° 31' I) ja Pallaksen (67° 58' P, 24° 07' I) mittausasemilta vuosilta 2007-2010. Lisäksi ilmamassojen kulkeutumisreitit on laskettu FLEXTRA-trajektorimallilla. Malli käyttää hyväkseen ECMWC:n (European Centre of Medium-Range Weather Forecasts) mallilaskuja ilmakehän tilasta. Hiukkasten kemiallista koostumusta kuvaavaa dataa on saata-

villa huomattavasti huonommin, ja sitä ei tutkimuksen ensimmäisen vuoden aikana ole vielä käytetty.

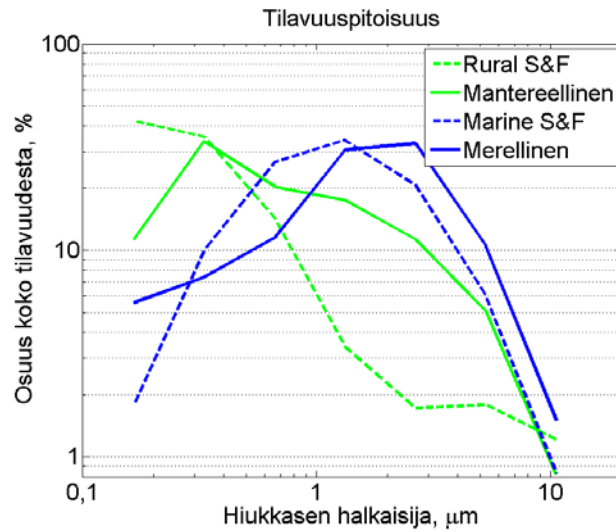
#### 4. Tulokset ja pohdinta

Tulokset mittausaikasarjoista on saatettu yhtenäiseen käyttökelpoiseen muotoon ja yhdistetty ilmassojen kulkeutumisreitteihin. Tulosten pohjalta on laskettu hiukkasten kokonaistilavuudella normitettu hiukkasten tilavuus-kokojakauma kullekin lähdealueelle eri vuodenaikoina. Hiukkasten tilavuuspitoisuuden on havaittu korreloivan hyvin hiukkasten absorption ja sironnan, ja sitä kautta säteilynvaimenemisen kanssa [viite 5]. Hiukkasten tilavuuspitoisuus voidaan määrittää joko suoraan lukumääräkokojakaumasta tai likimääräisesti eri puolilla Suomea mitattavaa ilmanlaatu parametria, PM10:ntä, käyttäen. PM10 on halkaisijaltaan alle 10 µm hiukkasten yhteenlaskettu massa ilman tilavuusyksikköä kohden. Koska tutkittavan kokoluokan hiukkasten viipymäaika ilmakehässä on tyypillisesti korkeintaan muutamia vuorokausia, painotettiin lähdealue-analyyseissä lähempänä mittauspistettä olevia alueita suuremmalla painoarvolla.

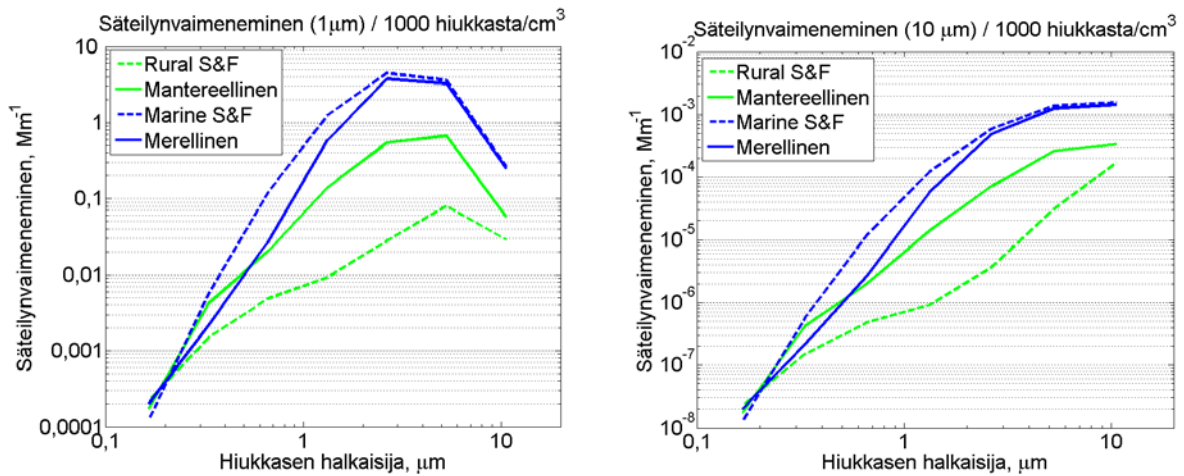
Tutkittavia lähdealueita oli alun perin useampia, mutta erot eri mantereellisten lähdealueiden välillä, samoin kuin eri merellisten lähdealueiden välillä, jäivät niin pieniksi, että lopulta lähdealueiksi otettiin vain mantereellinen ja merellinen alue kokonaisuuksina. Mantereelliselta ja merelliseltä alueelta saapuvien ilmassojen tilavuus-kokojakaumat olivat varsin erilaisia. Mantereellisessä ilmassa talvella suurin osa hiukastilavuudesta muodostui alle 1 µm hiukkasista. Kesälläkin alle 1µm hiukkaset muodostivat suurimman osan hiukastilavuudesta, mutta keskimääräinen jakauma oli kaksihuippuinen siten, että halkaisijaltaan useiden mikrometrien kokoisten hiukkasten osuus oli myös merkittävä. Merellisessä ilmassa yli 1 µm hiukkaset muodostivat suurimman osan hiukkasten tilavuudesta ympäri vuoden.

Hyytiälän ja Puijon mittausasemilla mitatut tilavuuskokojakaumat olivat keskenään varsin samankaltaisia, mutta Pallaksella mitatut jakaumat poikkesivat kesällä mantereellisessä ilmassa edellisistä siten, että yli 1µm hiukkasten suhteellinen osuus oli huomattavasti pienempi.

Jakaumien muodoilla on sekä yhtäläisyyksiä että eroja MODTRAN-mallissa käytettyjä jakaumien kanssa. Tässä työssä määritellyt mantereellinen että merellinen hiukkasten kokojakauma sijoittuvat MODTRANin rural ja marine jakaumien välille (Kuva 1). Merellisen ilman osalta tämä on ymmärrettävää, sillä sisämaassa tai Itämerellä olevilla mittausasemilla ei käytännössä voida mitata puhtaan merellistä ilmaa ilman mantereellista vaikutusta. Mantereellisen ilman kohdalla ero ei ole selitettävissä yksinkertaisesti. Myös lähdealueiden hiukkasten kokojakaumasta laskettu säteilynvaimeneminen jäi MODTRANin rural ja marine jakaumista lasketun vaimenemisen välille (Kuva 2). Eryteisesti mantereellisen ilman kohdalla ero säteilynvaimenemisessä on huomattava.

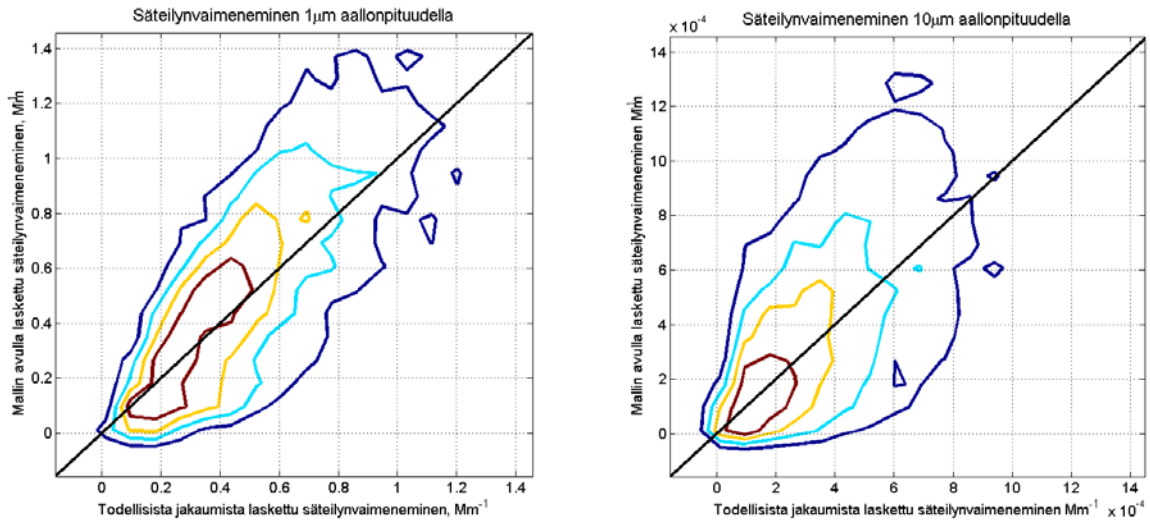


Kuva 1: Mitattu hiukkasten tilavuuspitoisuusjakauma mantereelliselle ja merelliselle ilmalle, sekä vastaavat MODTRAN-mallissa (S&F) käytetyt jakaumat Rural ja Marine.



Kuva 2: Mitattujen hiukkasjakaumien (mantereellinen, merellinen) ja MODTRAN-mallissa käytettyjen vastaavien hiukkasjakaumien (Rural S&F, Marine S&F) aiheuttama säteilyvaimeneminen 1 μm ja 10 μm allonpituudella 1000/cm<sup>3</sup> hiukkasta kohden.

Aerosolisään ennustamista testattiin olemassa olevaa mittaustiedon avulla. Kullekin mitaushetkelle laskettiin tutkimuksen tavoitteiden mukaisesti hiukkasten kokojakauma ilmassojen ja kokonaistilavuuspitoisuuden perusteella, ja tästä edelleen säteilyvaimeneminen. Saatuja arvoja verrattiin kunkin mitaushetken todellisella hiukkasten kokojakaumalla laskettuihin säteilyvaimenemisen arvoihin (Kuva 3). Arvot vastasivat toisiaan keskimäärin hyvin, ja korrelaatiokertoimeksi ( $R^2$ ) saatiin 0.45. Tämän perusteella voidaan todeta, että menetelmä on käyttökelpoinen, mutta tällaisenaan (ilman tarkempaa tietoa hiukkasten lähteistä, hiukkasten koostumuksesta tai sääolosuhteista) ei vielä riittävän tarkka.



Kuva 3: Tässä työssä kehitetyn säteilyvaimennusmallin avulla laskettu vs todellisista hiukkaskokojakaumista laskettu säteilyvaimeneminen koko mittausajalta 1 ja 10  $\mu$ m aallonpituuksilla. Käyrät kuvaavat vertailupisteiden esiintymistiheyttä kuvan eri osissa (punaisen sisällä suurin, tummansinisen ulkopuolella pienin).

## 5. Loppupäätelmät

Tutkimushanke on hyvin aikataulussaan. Kun perusta uusille Suomeen soveltuville aerosolimalleille on luotu, on niiden jatkojalostaminen helpompaa. Alustavat testit ennustemenetelmän toimivuudesta ovat olleet erittäin rohkaisevia.

Haasteena tulee olemaan tarkan aerosolien kemiallisen tiedon vähäinen saatavuus Suomessa. Tässä joudutaan interpoloimaan ja yleistämään olemassa olevia mittaustuloksia. Myös tieto isojen hiukkasten kasvukerrointen ja hiukkasten kasvukertoimista suurissa ilman suhteellisissa kosteuksissa on maailmanlaajuisestikin hyvin vähäistä.

6. Tutkimuksen tuottamat tieteelliset julkaisut ja muut mahdolliset raportit (Lyhyt kuvaus julkaisun keskeisestä sisällöstä sekä täydelliset bibliografiset tunnistetiedot (kirjoittajat; julkaisun nimi; sarjan, julkaisun tai journalin nimi ja numero; julkaisija; paikka; vuosi))

Tähän mennessä tämän projektin puitteissa ei ole vielä julkaistu yhtäkään tieteellistä julkaisua. Niitä on kuitenkin valmisteilla, ja tullaan julkaisemaan vuosina 2012-2013.



---

## Viitteet:

1. E. Shettle and R. Fenn, Models for the Aerosols of the Lower Atmosphere and the Effects of Humidity Variations on Their Optical Properties, AFGL-TR-79-0214 Environmental Research Papers, No. 676, Air Force Geophysics Laboratory, Hanscom AFB, Massachusetts, USA, 1979
2. T. Kaurila, A. Hågård, and R. Persson, Aerosol extinction models based on measurements at two sites in Sweden, *Appl. Opt.* 45, 6750-6761, 2006.
3. T. Kaurila, ATRAIN-projektin loppuraportti: Aerosolien aiheuttama säteilyn etenemisvaimennus Suomen olosuhteissa, PVTT:n sisäinen raportti 07/34/D/I, 2007.
4. R. Persson and T. Kaurila, Aerosol attenuation model for Scandinavian environment, FOI-R--0689--SE, ISSN 1650-1942, FOI Linköping Sweden, 2002
5. A. Virkkula, J. Backman, P.P. Aalto, M. Hulkkonen, L. Riuttanen, T. Nieminen, M. dal Maso, L. Sogacheva, G. de Leeuw, and M. Kulmala, Seasonal cycle, size dependencies, and source analysis of aerosol optical properties at the SMEAR II measurement station in Hyytiälä, Finland. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 10, 29997-30053, 2010