

ILMANLAADUN ALUSTAVA ARVIOINTI SUOMESSA
OTSONI

THE PRELIMINARY ASSESSMENT UNDER
THE EC AIR QUALITY DIRECTIVES IN FINLAND
OZONE

Harri Pietarila
Birgitta Alaviippola
Timo Salmi
Tuomas Laurila
Juha-Pekka Tuovinen



ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

**ILMANLAADUN ALUSTAVA ARVIOINTI SUOMESSA
OTSONI**

**THE PRELIMINARY ASSESSMENT UNDER THE EC AIR QUALITY
DIRECTIVES IN FINLAND
OZONE**

**Harri Pietarila
Birgitta Alaviippola
Timo Salmi
Tuomas Laurila
Juha-Pekka Tuovinen**

**ILMATIETEEN LAITOS – ILMANLAADUN TUTKIMUS
Helsinki 9.9.2003**

SUMMARY

In this report, the methods and the data used for the Preliminary Assessment in Finland for ozone under the EC Air Quality Directives are presented. An overview of the results of the Preliminary Assessment is also presented. The results of air quality measurements in Finland are presented for the years 1987–2002. The results of dispersion calculations are presented as maps for Helsinki Metropolitan Area for the year 2000. Also the results of the regional-scale Lagrangian photochemical model of European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) are presented. The spatial distribution of the concentration with respect to the exceedance of the target values and long-term objectives is presented based on the observation data and the model calculations with the help of interpolation methods.

The assessment is based on the air quality measurements and dispersion modelling data with the aid of interpolation methods. Also the emissions of the most important ozone precursors, Volatile Organic Compounds (VOCs) and nitrogen oxides (NO_x) were used in the assessment. The assessment is based on five years of air quality measurement data covering the years 1998–2002.

The VOC and NO_x emission data from the Finnish national emission database of the Finnish Environmental Institute (SYKE) and the traffic emission calculation system of the Technical Research Centre of Finland (VTT) were used in the assessment. SYKE is responsible in Finland for reporting the emissions to international bodies and programmes like EMEP and CORINAIR. VTT is responsible for calculating the emissions of all traffic modes in Finland. Also the more detailed data from individual emission inventories prepared by the Finnish Meteorological Institute (FMI) and the Helsinki Metropolitan Area Council (YTV) were used in the assessment.

The Air Quality measurement data from the local air quality networks and the rural background stations of the FMI were used in the Preliminary Assessment. The measurement data covering the years 1987–2002 were analysed, and the statistical values corresponding to the target values and long-term objectives were calculated. The data is annually collected into the Air Quality Database of the FMI (ILSE) including also additional information, e.g. network information, location of the stations and the measurement techniques. In 2002 there were 13 air quality measurement networks maintained by local authorities, industry or FMI, with 27 different ozone monitoring stations. FMI is responsible for the background air quality measurements in Finland.

The concentration distribution was evaluated with the help of dispersion modelling and interpolation methods. The FMI has carried out dispersion study for the O₃ in the Helsinki Metropolitan area. The emissions from the traffic as well as the background concentrations were taken into account in the calculations. Local scale model for line sources was used in these calculations. Also the results from EMEP regional-scale model simulations were used in the assessment.

Road traffic contributes about 30 % of the VOC emissions in Finland. About 20 % of the VOC emissions are caused by the use of solvents and about 15 % by other mobile sources and machinery. Road traffic contributes about 34 % and other mobile sources

and machinery about 22 % of the NO_x emissions in Finland. The VOC emissions have been decreased about 30 % and NO_x emissions about 20 % in the 90's.

According to the measured and modelled data, the maximum daily 8 hour mean ozone concentrations exceed the Long-term objective for the protection of human health everywhere in Finland. The Long-term objective for the protection of vegetation is also exceeded all over Finland with the exception of the north-eastern part of Lapland and the city centres of the biggest cities. The ozone concentrations are well below the Target value for the protection of human health in Finland. The ozone concentrations are also under the Target value for the protection of vegetation everywhere in Finland. There is a clear trend between ozone concentrations in the southern and northern part of Finland. The biggest ozone concentrations occur in South Finland and the concentrations are decreased towards Northern Finland.

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	5
2	ALUSTAVA ARVIOINTI.....	6
2.1	Otsonin pitkän ajan tavoitteet ja tavoitearvot	7
3	ALUSTAVASSA ARVIOINNISSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT JA AINEISTOT	9
3.1	Otsonia muodostavien yhdisteiden päästötiedot.....	9
3.2	Leviämismallit	10
3.2.1	Liikenteen viivalähdemalli (CAR-FMI)	10
3.2.2	Leviämlaskelmat pääkaupunkiseudulla.....	13
3.2.3	EMEP:in kaukokulkeutumismalli.....	18
3.2.4	Pitoisuustulosten esittämisessä ja analysoinnissa käytetyt interpolointimenetelmät	18
3.3	Ilmanlaadun mittaukset.....	19
3.3.1	Otsonipitoisuudet	19
3.3.2	Otsonia muodostavien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja typen oksidien pitoisuudet	22
4	TULOKSET	23
4.1	Yleistä Suomen otsonipitoisuuksista	23
4.2	Otsonia muodostavien yhdisteiden päästöt.....	24
4.2.1	Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt.....	24
4.2.2	Typen oksidien päästöt	25
4.3	Mitatut otsonipitoisuudet	26
4.3.1	Ilmatieteen laitoksen mittausasemat	26
4.3.2	Kuntien ja teollisuuslaitosten mittausasemat	30
4.4	Mallinnetut otsonipitoisuudet	34
4.4.1	EMEP-mallin tulokset.....	34
4.4.2	Mittaustuloksista interpoloidut otsonin alueelliset taustapitoisuudet	34
4.4.3	Pääkaupunkiseudulle tehtyjen leviämlaskelmien tulokset	38
4.5	Pitoisuudet suhteessa pitkän ajan tavoitteisiin ja tavoitearvoihin.....	39
5	JOHTOPÄÄTÖKSET, TUTKIMUSTARPEET JA SUOSITUKSET.....	40
	VIITELUETTELO	45
	LIITTEET	
	LIITEKUVAT	

1 JOHDANTO

Euroopan unionin neuvoston puitedirektiivin 96/62/EY ilmanlaadun arvioinnista ja hallinnasta mukaan ilmanlaatua tulisi seurata ja tarkkailla jäsenvaltioiden alueella yhteisin menetelmin ja arviointiperustein. Ilmanlaadun seurannan menetelmät ja tarkkuus riippuvat tarkastelualueesta ja pitoisuuksien tasosta verrattuna ilmanlaadun tytärdirektiiveissä määriteltyihin raja-arvoihin ja arviointikynnyksiin. Ilmanlaadun ensimmäisessä tytärdirektiivissä (1999/30/EY) annettiin raja-arvot ja arviointikynnykset ulkoilman rikkidioksidin, typen oksidien (NO₂ ja NO_x), hengitettävien hiukkasien (PM₁₀) ja lyijyn pitoisuuksille. Ilmanlaadun toisessa tytärdirektiivissä (2000/69/EY) annettiin raja-arvot ja arviointikynnykset bentseenin ja hiilimonoksidin pitoisuuksille. Valtioneuvosto antoi 9.8.2001 asetuksen ilmanlaadusta (Vna 711/2001), jolla pantiin täytäntöön ensimmäisen ja toisen tytärdirektiivin säännökset, mm. raja-arvot ja ilmanlaadun seurannan aluejako Suomessa.

Alailmakehän otsonia koskeva ilmanlaadun kolmas tytärdirektiivi 2002/3/EY annettiin 12.2.2002. Raja-arvojen sijasta otsonille on määritetty direktiivissä tavoitearvot ja pitkän ajan tavoitteet. Arviointikynnyksenä käytetään pitkän ajan tavoitteita. Jäsenvaltioiden on tehtävä alustava arviointi otsonille ja ilmoitettava komissiolle ilmanlaadun puitedirektiivin 96/62/EY 11 artiklan 1 kohdan mukaisista ilmanlaadun alustavassa arvioinnissa käytettävistä menetelmistä viimeistään 9.9.2003.

Puitedirektiivin 5 artiklan mukaan jäsenvaltioiden, joilla ei ole kaikilta seuranta-alueilta¹ (engl. zone) ja kaikista väestökeskittymissä² (engl. agglomeration) edustavia mittaustuloksia ilman epäpuhtauksien tasoista, on toteutettava joukko edustavia mittauksia, tutkimuksia tai arviointeja, jotta niillä olisi käytettävissään nämä tiedot riittävän ajoissa ilmanlaadun tytärdirektiivien täytäntöön panemiseksi. Ilmanlaadun ensimmäistä ja toista tytärdirektiiviä koskevat alustavat arvioinnit on tehty Ilmatieteen laitoksella (PIETARILA ym., 2001a, b ja 2002) ja toimitettu ympäristöministeriön toimesta komissiolle. Ensimmäisen ja toisen tytärdirektiivin mukaisissa alustavissa arvioinneissa kehitettiin menetelmiä alustavan arvioinnin tekemiselle Suomessa, joita on myös hyödynnetty tässä raportissa esiteltävässä kolmatta tytärdirektiiviä koskevassa alailmakehän otsonipitoisuuksia koskevassa alustavassa arvioinnissa.

Tässä tutkimuksessa on kerätty ja analysoitu otsonin osalta alustavassa arvioinnissa tarvittava saatavissa oleva aineisto. Yhdistämällä käytettävissä olevat otsonin mittaustiedot ja leviämismallien tulokset sekä käyttämällä interpolointimenetelmiä tulosten alueellisessa esittämisessä on tehty ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa eli ensimmäinen arvio eri alueiden pitoisuuksista suhteessa otsonin tavoitearvoihin ja pitkän ajan tavoitteisiin.

Otsonia ei vapaudu ulkoilmaan suoraan päästönä, vaan sitä muodostuu ilmakehässä valokemiallisissa reaktioissa otsonia muodostavista yhdisteistä, joista tärkeimpiä ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet (Volatile Organic Compound, VOC) ja typen oksidit

¹ seuranta-alue = jäsenvaltioiden rajaama osa niiden alueesta

² väestökeittymä = yhden tai useamman kunnan muodostama tai muuten taajaan rakennettu alue, jonka asukasluku on vähintään 250 000

(NO_x). Tässä raportissa esitetään alustavan arvioinnin taustaksi myös tietoja Suomen VOC- ja NO_x-päästöistä.

Raportissa esitetään otsonin alustavassa arvioinnissa käytetyt menetelmät ja aineistot sekä yhteenveto arvioinnin tuloksista. Tutkimuksessa on lisäksi arvioitu mahdollisten täydentävien selvitysten tarvetta, jotta tehdyn alustavan arvioinnin luotettavuutta voidaan parantaa. Raportissa esitetään myös suosituksia Suomessa tarvittavista ilmanlaadun seurannan menetelmistä.

2 ALUSTAVA ARVIOINTI

Alustavassa arvioinnissa tehdään ensimmäinen epäpuhtaustasojen määrittäminen, jotta voidaan esittää ilmanlaadun seurannalle ja tarkkailulle asetettavat vaatimukset eri alueilla. Ilmanlaadun alustavalle arvioinnille on valmisteltu arviointiohje (*VAN AALST et al., 1998*), jota on hyödynnetty myös tässä otsonin alustavassa arvioinnissa. Alustavassa arvioinnissa tarkastellaan, ovatko käytettävissä olevat tiedot ilmanlaadusta riittäviä direktiivissä tarkoitettujen väestökeskittymien² ja muiden seuranta-alueiden¹ määrittämiseksi. Alustavassa arvioinnissa saatujen tietojen perusteella voidaan määrittää, millä tavalla ilmanlaadun seuranta näillä alueilla vähintään tulee tehdä. Mikäli olemassa olevat tiedot eivät ole riittäviä, alustavassa arvioinnissa hankitaan tarvittavat lisätiedot.

Jäsenvaltiot jaetaan seuranta-alueisiin, joiden pitoisuustaso suhteessa raja-arvoihin määrittää vaatimustason ilmanlaadun seurannalle. Puitedirektiivin 6 artiklan mukainen säännöllinen ilmanlaadun seuranta toteutetaan eri alueilla seuraavasti:

- Ilmanlaadun seuranta tulee tehdä mittaamalla seuraavilla alueilla:
 - väestökeskittymissä²
 - seuranta-alueilla, joilla pitoisuudet ylittävät ylemmän arviointikynnyksen
 - mittauksia voidaan lisäksi täydentää mallintamisella riittävän tiedon saamiseksi ilmanlaadusta.
- Ilmanlaadun seurantaan voidaan käyttää mittausten ja mallintamisen yhdistelmää seuranta-alueilla, joilla pitoisuudet ovat pienempiä kuin ylempi arviointikynnys
- Ilmanlaadua voidaan seurata pelkästään mallintamalla tai objektiivisella arvioinnilla seuranta-alueilla, joilla pitoisuudet ovat alle alemman arviointikynnyksen

Ilmanlaatuasetuksessa (*Vna 711/2001*) annettiin ilmanlaadun seurannan aluejako Suomessa ensimmäisessä ja toisessa tytärdirektiivissä säädellyille ilman epäpuhtauksille: rikkidioksidi, typpidioksidi, typen oksidit, hengitettävät hiukkaset (PM₁₀) ja lyijy sekä bentseeni ja hiilimonoksidi. Otsonille käytettävä aluejako tullaan antamaan erillisessä valtioneuvoston asetuksessa alailmakehän otsonista.

Ilmanlaadun direktiivien mukaisella seurannalla tarkoitetaan menetelmää, jolla mitataan, lasketaan, ennustetaan tai arvioidaan epäpuhtauden taso ilmassa. Tämän mukaan ilmanlaadun seurantaan voidaan mittausten lisäksi käyttää myös muita arviointimenetelmiä. Ilmanlaadun alustavassa arvioinnissa tulevat kyseeseen lähinnä seuraavat kolme menetelmää:

- mittaukset
- päästökartoitukset
- mallintaminen

Menetelmiin sisältyvät epävarmuudet tulisi arvioida ja arvioinnin lopullisille tuloksille tulisi tehdä kokonaisepävarmuuden arviointi. Arvioinnin luotettavuutta voidaan parantaa käyttämällä hyväksi kaikkia em. kolmea arviointimenetelmää yhdessä.

Ilmanlaadun alustavan arvioinnin tulokset tulisi esittää karttoina, joista ilmenevät raja-arvojen ja arviointikynnysten tai otsonin osalta tavoitearvojen ja pitkän ajan tavoitteiden todennäköiset ylittymisalueet tai alueet, joilla tulee käyttää tiettyä menetelmää ilmanlaadun seurantaan.

Koska ilmanlaatu muuttuu ajan kuluessa mm. aktiviteettien (liikenne, teollisuus, väkiluku) muuttumisen, tekniikan kehittymisen ja ilmanlaadun hallinnassa tehtävien muutosten myötä, täytyy myös ilmanlaadun arviointi uusia säännöllisesti. Ilmanlaadun arviointi ilmanlaadun seurannassa käytettävien alueiden luokittelun tarkistamiseksi tulee uusia vähintään viiden vuoden välein tai aikaisemmin, jos on oletettavissa että pitoisuudet ovat muuttuneet olennaisesti.

Ilmanlaadun kolmannessa tytärdirektiivissä on annettu tavoitearvot ja pitkän ajan tavoitteet alailmakehän otsonille terveyshaittojen estämiseksi ja kasvillisuuden suojelemiseksi. Alustavan arvioinnin alueellisen tarkkuuden määrittämisessä voidaan hyödyntää esim. direktiivissä annettuja suosituksia erityyppisten mittausasemien sijainnin edustavuudelle. Direktiivin suositusten mukaan ihmisten terveyden suojelemiseksi annettujen raja-arvojen valvomiseen käytettävien kaupunkiasemien on sijoitettava sellaisilla alueilla, joissa asukastiheys ja otsonipitoisuus ovat suhteellisen korkeita ja jotka edustavat kaupunkiväestön yleistä altistumista. Kaupunkiaseman edustavuuden tulisi olla muutamia neliökilometrejä. Ihmisten terveyden ja kasvillisuuden suojelemiseksi annettujen raja-arvojen valvomiseen käytettävien esikaupunkiasemien on sijoitettava sellaisilla taajamien reunoilla sijaitsevilla alueilla, joissa esiintyvät korkeimmat otsonitasot, joille väestö ja kasvillisuus todennäköisesti altistuvat välittömästi tai välillisesti. Esikaupunkiaseman edustavuuden tulisi olla muutamia kymmeniä neliökilometrejä. Ihmisten terveyden ja kasvillisuuden suojelemiseksi annettujen raja-arvojen valvomiseen käytettävien maaseutuasemien edustavuuden tulisi olla muutamia satoja neliökilometrejä sekä kasvillisuuden ja ihmisten terveyden suojelemiseksi annettujen raja-arvojen valvomiseen käytettävien maaseututausta-asemien edustavuuden tulisi olla 1 000–10 000 neliökilometriä.

2.1 Otsonin pitkän ajan tavoitteet ja tavoitearvot

Otsonin *pitkän ajan tavoitteella* (taulukko 1) tarkoitetaan pitoisuutta (tai kuormitusta), jolla ei nykyisen tieteellisen tietämyksen mukaan todennäköisesti ole välittömiä haitallisia vaikutuksia ihmisten terveyteen tai ympäristöön. Tavoite on alitettava pitkällä aikavälillä, paitsi jos alittaminen ei ole mahdollista oikeasuhteisilla toimilla. Otsonipitoisuuksien seurantavelvoite arvioidaan pitkän ajan tavoitteen perusteella. Kiinteät ja jatkuvat mittaukset otsonipitoisuuksien seuraamiseksi ovat pakollisia

seuranta-alueilla ja väestökeskittymissä, joissa otsonipitoisuus on ylittänyt pitkän ajan tavoitteen jonkin viimeksi kuluneen viiden vuoden aikana. Tässä alustavassa arvioinnissa käytetään arviointiajanjaksona vuosia 1998–2002.

Otsonin *tavoitearvolla* (taulukko 2) tarkoitetaan pitoisuutta (tai kuormitusta), joka on mahdollisuuksien mukaan alitettava määräajassa ja jolla pyritään välttämään ihmisten terveyteen ja ympäristöön kohdistuvia haitallisia vaikutuksia. Otsonipitoisuudelle on lisäksi annettu tiedotuskynnys, joka on $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tuntikeskiarvona ja varoituskynnys, joka on $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tuntikeskiarvona.

Taulukko 1. Otsonin pitkän ajan tavoitteet (2002/3/EY).

	Tunnusluku	Pitkän ajan tavoite
Ihmisten terveyden suojelu	Korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo kalenterivuoden aikana	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$
Kasvillisuuden suojelu	AOT40, joka lasketaan touko-heinäkuun tuntiarvoista	$6\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$

AOT40 (=accumulated exposure over threshold) ilmaisee $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (=40 ppb) ylittävien otsonin tuntipitoisuuksien ja $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden erotuksen summaa laskettuna 1.5.-31.7 jaksolta päivittäisistä tuntipitoisuuksista ajalta 9.00-21.00 Suomen normaaliaikaa.

Taulukko 2. Otsonin tavoitearvot (2002/3/EY).

	Tunnusluku	Tavoitearvo vuodeksi 2010
Ihmisten terveyden suojelu	Korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo kalenterivuoden aikana	$120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka saa ylittyä enintään 25 päivänä vuodessa 3 v keskiarvona
Kasvillisuuden suojelu	AOT40, joka lasketaan touko-heinäkuun tuntiarvoista	$18\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ 5 v keskiarvona

AOT40 (=accumulated exposure over threshold) ilmaisee $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (=40 ppb) ylittävien otsonin tuntipitoisuuksien ja $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pitoisuuden erotuksen summaa laskettuna 1.5.-31.7 jaksolta päivittäisistä tuntipitoisuuksista ajalta 9.00-21.00 Suomen normaaliaikaa.

3 ALUSTAVASSA ARVIOINNISSA KÄYTETTÄVÄT MENETELMÄT JA AINEISTOT

3.1 Otsonia muodostavien yhdisteiden päästötiedot

Otsonia ei vapaudu suoraan päästönä ulkoilmaan, vaan sitä muodostuu ilmakehässä valon vaikutuksesta muista yhdisteistä. Tärkeimpiä otsonin muodostumiseen vaikuttavia yhdisteitä ovat haihtuvat orgaaniset yhdisteet ja typen oksidit. Alustavassa arvioinnissa kerättiin tietoja myös Suomen VOC- ja NO_x-päästöistä ja niiden alueellisesta jakautumisesta. Lisäksi pääkaupunkiseudun liikenteen typenoksidipäästöt kartoitettiin tarkemmin pääkaupunkiseudulle tehtyjen leviämismallilaskelmien lähtötiedoiksi.

Suomen ympäristökeskus (SYKE) vastaa Suomessa valtakunnan tasolla päästötietojen keräämisestä, arvioimisesta ja useista kansainvälisistä raportoinneista. SYKEssä tuotetaan energia- ja teollisuussektoreiden, liuottimien ja tuotteiden käytön sekä maatalouden ja jätteiden käsittelyn päästötietoja. Tilastokeskus arvioi lisäksi polttoaineperäisiä energia- ja teollisuussektoreiden päästöjä, Maa- ja elintarviketalouden tutkimuskeskus maatalouden päästöjä sekä Metsäntutkimuslaitos metsien ja maankäytön sektorin päästötietoja. Valtion teknillinen tutkimuskeskus (VTT) arvioi vuosittain Suomen liikenteen päästöt. (SAARINEN, 2002) Tämän lisäksi tehdään suppeampia esim. kuntakohtaisia päästökartoituksia erilaisten tutkimusprojektien yhteydessä mm. Ilmatieteen laitoksella.

SYKE arvioi Suomen ilman epäpuhtauksien päästötiedot liikennettä lukuun ottamatta kaikilta päästölähdesektoreilta. Energia- ja teollisuussektorin osalta päästötiedot perustuvat alueellisten ympäristökeskusten VAHTI-tietojärjestelmään tallettamiin tarkkailuvelvoitteisten laitosten ilmoittamiin tietoihin. Suomen kokonaispäästöarvioissa hyödynnetään lisäksi mm. energiankulutuksen osalta Tilastokeskuksen energiatilaston tietoja ja liikenteen osalta VTT:n LIPASTO-järjestelmän (MÄKELÄ *ym.*, 2002a) tuloksia ja energiatilastoa.

Autoliikenteen päästöt on Suomessa laskettu jo useiden vuosien ajan VTT:n kehittämällä LIISA-laskentajärjestelmällä (MÄKELÄ *ym.*, 1999). LIISA-malli on uudistettu vuoden 2002 aikana mm. päästökertoimien ja eri ajoneuvotyyppien suoriteosuuksien osalta (MÄKELÄ, 2002). Uuden LIISA 2001.1 -järjestelmän typenoksidipäästöt ovat nykytilanteessa (vuosi 2001) noin 25 % pienempiä kuin vanhassa LIISAssa. Hiilivetyjen päästöt ovat sen sijaan molemmissa järjestelmissä nykytilanteessa suurin piirtein samat. Sekä typenoksidi- että hiilivetypäästöjen väheneminen on tulevaisuudessa kuitenkin suurempaa kuin vanhassa LIISAssa, koska uudessa LIISAssa on huomioitu paremmin mm. katalysaattoritekniikan kehittymisen vaikutus päästöihin. Esimerkiksi uuden LIISAn mukainen ennuste vuoden 2020 typenoksidi- ja hiilivetypäästöiksi on huomattavasti pienempi kuin vanhan LIISAn.

LIISA kuuluu yhtenä osana LIPASTO-järjestelmään (MÄKELÄ *ym.*, 2002a), joka sisältää myös muun liikenteen päästöjen laskentajärjestelmät. LIPASTOon kuuluvat osana jo mainittu autoliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä LIISA, rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä RAILI (MÄKELÄ *ym.*, 2002b), vesiliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä MEERI (MÄKELÄ *ym.*, 2002c) ja ilmaliikenteen päästöjen

laskentajärjestelmä ILMI (*SAVOLA ym., 1995*). Liikenteen päästölaskelmat päivitetään vuosittain.

Alustavassa arvioinnissa hyödynnettiin SYKEN Suomen kokonaispäästöarvioita ja VAHTI-järjestelmän ilmoitusvelvollisten laitosten tietoja sekä VTT:n LIISA-järjestelmän kuntakohtaisia tieliikenteen päästötietoja. Kyseiset yleiset päästötietojärjestelmät sisältävät päästöt vuositasolla ja tarkimmillaan kunnittaisina tietoina. SYKE on arvioinut ja raportoinut Suomen kokonaispäästöt typenoksideille ja haihtuville orgaanisille yhdisteille poislukien metaani (NMVOC). LIPASTON päästöarviot on tehty typenoksideille ja hiilivedyille (HC).

Ilmatieteen laitos ylläpitää lähinnä leviämislaskelmien lähtötietotarpeita varten lisäksi omaa päästörekisteriä, joka sisältää em. päästöjärjestelmien tietojen lisäksi ajallisesti ja alueellisesti tarkempia tietoja päästöistä ja muita päästöjen ilmanlaatuvaikutusten arvioinnissa tarpeellisia tietoja (kuten sijaintitiedot, päästöjen vapautumiskorkeus, savukaasutiedot, tiedot leviämisympäristöstä).

Alustavan arvioinnin yhteydessä tehtiin Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunnan (YTV) liikenneosastolla tarkempi liikenteen päästökartoitus typenoksideille. Päästöt arvioitiin YTV:llä tieosakohtaisesti EMME-liikennesuunnitteluohjelmistoon liitettyllä päästöjenlaskentajärjestelmällä, jonka päästökertoimet on arvioitu VTT:llä.

3.2 Leviäismallit

Alustavassa arvioinnissa hyödynnetyt pääkaupunkiseudun leviämislaskelmat on tehty Ilmatieteen laitoksessa kehitetyllä liikenteen päästöjen leviämistä kuvaavalla viivalähdemallilla (CAR-FMI), jossa otetaan huomioon typen oksidien ja otsonin valokemialliset reaktiot kulkeutumisen aikana. Pääkaupunkiseudun leviämislaskelmissa käytettyjä menetelmiä ja leviämislaskelmiin liittyviä epävarmuuksia on esitelty myös ensimmäiseen ilmanlaadun tytärdirektiiviin liittyvässä alustavassa arvioinnissa (*PIETARILA ym., 2001a*). CAR-FMI-mallia on esitelty myös COST-projektin [www-sivuilla](http://www.mi.uni-hamburg.de/technische_meteorologie/cost/index.html): (http://www.mi.uni-hamburg.de/technische_meteorologie/cost/index.html).

Otsonin taustapitoisuuksien alueellista vaihtelua on arvioitu hyödyntämällä Euroopan talouskomission alaisen kaukokulkeutuvien ilmansaasteiden arviointiohjelman (EMEP) kaukokulkeutumismallin tuloksia ja käyttämällä interpolointimenetelmiä mittaustulosten analysoinnissa.

3.2.1 Liikenteen viivalähdemalli (CAR-FMI)

Autoliikenteen päästöjen aiheuttamien ulkoilman otsonipitoisuuksien arviointiin käytettiin Ilmatieteen laitoksella kehitettyä viivalähdemallia, jota on kuvattu tarkemmin julkaisuissa *KARPPINEN, ym. 2000 a ja 2000 b*. Viivalähdemallilla lasketaan epäpuhtauspitoisuudet haluttuihin pisteisiin eri etäisyyksille liikenneväylästä. Viivalähdemalli perustuu leviämisen osalta analyttiseen ratkaisuun (*LUHAR & PATIL, 1989*) ja päästöjen kemiallisen muutunnan osalta ns. 'discrete parcel' -menetelmään (*BENSON, 1984*), joka on samanlainen kuin amerikkalaisessa CALINE-

mallissa. Viivalähdemallilla ei voida kuvata katukuiluolosuhteista aiheutuvia päästöjen leviämiseen ja pitoisuuksien muodostumiseen vaikuttavia erityispiirteitä. Katukuilujen otsonipitoisuuksia ei alustavassa arvioinnissa erikseen mallinnettu, koska Suomessa katukuiluissa otsonipitoisuudet ovat typenoksidipäästöjen otsonia kuluttavan vaikutuksen vuoksi pienempiä kuin ympäröivällä kaupunkialueella.

Viivalähdemallissa käytetään meteorologisena perusaineistona yleensä 1–3 vuoden pituista parametrien tunneittaisten arvojen aikasarjaa. Päästötietojen aikasarjassa huomioidaan mm. tarkasteltavien viivalähteiden sijainti, liikennemäärä ja liikennevirran nopeus, päästökorkeus sekä päästömäärät ja niiden ajallinen vaihtelu. Laskenta etenee tunnin aika-askeleella kunnes koko meteorologisten tietojen aikasarja ja päästötietojen aikasarja on käyty läpi. Viivalähdemallin laskentatuloksina saatavia pitoisuuden tuntikeskiarvoja analysoidaan tilastollisesti niin, että laskentapisteesiin voidaan tuottaa mm. kotimaisten ilmanlaadun ohjearvojen ja raja-arvojen sekä otsonin tavoitearvojen ja pitkän ajan tavoitteiden määrittelyjen mukaiset tilastoarvot pitoisuuksille. Laskennallisista tunnusluvuista voidaan arvioida yksittäisen viivalähteen vaikutus lähialueen pitoisuuksiin tai kaikkien tutkimusalueen viivalähteiden päästöjen kokonaisvaikutus komponenteittain. Viivalähdemallilla tehtävät sovellutukset voidaan yhdistää Ilmatieteen laitoksen kaupunkimalliin.

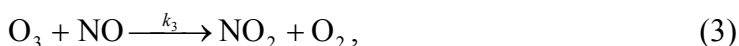
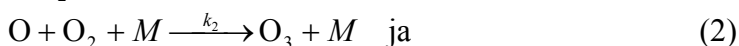
Meteorologiset tiedot

Ilman epäpuhtauksien leviäminen tapahtuu pääosin ilmakehän alimmassa osassa, jota kutsutaan rajakerrokseksi. Rajakerroksen korkeus on Suomessa tyypillisesti alle kilometri, mutta varsinkin kesällä rajakerros voi ulottua yli kahteen kilometriin. Rajakerroksen tuuliolosuhteet määräävät karkeasti ilman epäpuhtauksien kulkeutumissuunnan, mutta rajakerroksen ilmavirtausten pyörteisyys ja kerroksen korkeus vaikuttavat merkittävästi epäpuhtauksien sekoittumiseen ja pitoisuuksien laimenemiseen kulkeutumisen aikana. Leviämisen kannalta keskeisiä meteorologisia muuttujia ovat siis tuulen suunta ja nopeus, ilmakehän stabiilisuus ja sekoituskorkeus.

Alustavassa arvioinnissa pääkaupunkiseudulle tehdyissä leviämislaskelmissa on käytetty Ilmatieteen laitoksen ilmanlaatuosastolla kehitettyä meteorologisten tietojen käsittelymallia eli ilmakehän rajakerroksen parametrisointimenetelmää (*RANTAKRANS, 1990, KARPPINEN, 2001*). Mallin avulla voidaan normaalien meteorologisten rutiinihavaintojen ja fysiikan perusyhtälöiden avulla arvioida ne rajakerroksen tilaan vaikuttavat muuttujat, joita tarvitaan epäpuhtauksien leviämismallilaskelmissa. Menetelmässä huomioidaan tutkimusalueen paikalliset tekijät, kuten leviämisalustan rosoisuus ja vuodenaikaiset albedoarvot (maanpinnan kyky heijastaa auringon säteilyä) eri maanpinnan laaduilla. Meteorologiset tiedot saadaan yleensä Ilmatieteen laitoksen havaintotietokantaan talletetuista sää-, auringonpaiste- ja radioluotaushavainnoista. Sääasemilta saatavat perushavainnot valitaan tutkimusaluetta lähimpänä olevalta asemalta. Tämän lisäksi tuulen suunta- ja nopeustiedot muodostetaan kahden tai useamman aseman havaintojen etäisyyspainotettuna tilastollisena yhdistelmänä. Luotaushavainnot valitaan lähimmältä luotausasemalta. Rajakerroksen parametrisointimenetelmän lopputuloksena saadaan leviämismalleissa tarvittavien meteorologisten tietojen tunneittaiset aikasarjat.

Kemiallinen muutunta

Viivalähdemalliin kehitetyllä typen oksidien muutuntaa arvioivalla mallilla (HÄRKÖNEN *ym.*, 1996; KARPPINEN, *ym.*, 2000 a) voidaan arvioida myös otsonipitoisuuksia päästöjen lähileviämisen alueella (noin 0–30 km:n etäisyydellä päästölähteistä). Viivalähdemalli ottaa huomioon typenoksidien kuluttavan vaikutuksen otsonipitoisuuksiin. Mallissa otetaan huomioon seuraavat typen oksidien ($\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$), hapen (O ja O_2) ja otsonin (O_3) kemialliset perusreaktiot :



missä $h\nu$ tarkoittaa valokvanttia, k_1 on typpidioksidin valokemiallinen reaktiokerroin sekä k_2 ja k_3 reaktiokertoimia. Reaktiokerroin k_1 riippuu säteilymäärästä ja reaktiokerroin k_3 on lämpötilasta riippuva. Reaktio (2) on käytännössä erittäin nopea.

Viivalähdemallissa reaktiovakio k_1 ja k_3 on määritelty seuraavasti (SEINFELD, 1986; HERTEL and BERKOWICH, 1989) :

$$k_1 = 0.8 \cdot 10^{-3} \exp\left(-\frac{10}{Q_R}\right) + 7.4 \cdot 10^{-6} Q_R, \quad (4)$$

$$k_3 = 2.2 \cdot 10^{-12} \exp\left(-\frac{1430}{T}\right), \quad (5)$$

, missä Q_R säteilyn intensiteetti ja T on lämpötila.

Muutuntamallissa tarvittava otsonin ja typen oksidien alueellinen taustapitoisuus arvioidaan Ilmatieteen laitoksen perustason seuranta-asemien tai vastaavien tausta-asemien mittaustuloksista, joista määritetään kullekin kuukaudelle vuorokauden sisäistä vaihtelua kuvaavat typpidioksidi- ja otsonipitoisuuksien keskimääräiset tuntikeskiarvojen jakaumat. Taustapitoisuudet on mahdollista huomioida myös suoraan tuntiaikasarjana vastaavalle meteorologista aikasarjaa vastaavalle ajanjaksolle.

Viivalähdemallissa voidaan tarvittaessa ottaa huomioon myös lähialueen kiinteiden lähteiden päästöjen vaikutus typen oksidien ja otsonin muutuntaan. Tällöin kaupunkimallilla määritetään laskennassa tarkasteltavalle yksittäiselle viivalähteelle piste- ja pintalähteiden aiheuttama typen oksidien taustapitoisuus. Alustavaa arviointia varten tehdyissä mallilaskelmissa ei kuitenkaan otettu huomioon kiinteiden lähteiden päästöjä, koska niillä on todettu olevan päästöjen lähileviämisen alueella varsin pieni vaikutus pitoisuuksiin (mm. PESONEN *ym.*, 1996). Viivalähdemallissa muiden viivalähteiden aiheuttamat typpidioksidi- ja typpimonoksidipitoisuudet sekä otsonin kuluminen otetaan huomioon järjestämällä viivalähteet pitoisuuksia laskettaessa tuulen suunnan mukaan. Näin jokaisen viivalähteen kemiallista muutuntaa arvioitaessa on typpidioksidi-, typpimonoksidi- ja otsonipitoisuuksissa huomioitu kaikkien tuulen

yläpuolella olevien, aiemmin laskennassa mukana olleiden viivalähteiden vaikutus tarkasteltavaan viivalähteeseen.

Viivalähdemallia on testattu vertaamalla mallin tuloksia kokeellisiin aineistoihin (mm. *KUKKONEN et al., 2001 ja 2002*). Mallinnettujen ja mitattujen tulosten yhteensopivuus on ollut hyvä. Tosin mallinnettujen typpidioksidipitoisuuksien yhteensopivuus mitattujen pitoisuuksien kanssa on todettu hieman paremmaksi kuin otsonipitoisuuksien.

3.2.2 Leviämislaskelmat pääkaupunkiseudulla

Alustavassa arvioinnissa tehtiin pääkaupunkiseudun otsonipitoisuuden arvioimiseksi leviämismallilaskelmat autoliikenteen typenoksidipäästöille. Leviämislaskelmat tehtiin vuodelle 2000 arvioiduilla päästötiedoilla ja vuoden 2000 meteorologisilla ja taustapitoisuuden tiedoilla. Leviämismallilla laskettiin otsonipitoisuuden tuntikeskiarvojen aikasarjat vuodelle 2000 noin 35 km × 50 km alueelle yhteensä noin 4 000 laskentapisteeseen. Laskentapisteeset olivat tiheimmillään 500 metrin ja harvimmillaan 2 000 metrin etäisyydellä toisistaan. Mallinnuksessa käytetty laskentapisteköns tiheys on valittu niin, että se vastaisi hyvin direktiivin suositusta ihmisten terveyden suojelemiseksi annettujen pitkän ajan tavoitteiden ja tavoitearvojen valvomiseen käytettävien kaupunkiasemien edustavuudesta. Kaupunkiaseman edustavuuden tulisi direktiivin mukaan olla muutamia neliökilometrejä. Tuloksina esitetään tuntikeskiarvoista laskettujen otsonipitoisuuden korkeimpien 8 tunnin keskiarvojen ja touko-heinäkuun AOT40-pitoisuuden aluejakaumat.

Viivalähdemallin sovellutuksiin valmisteltiin päästötiedostot, joissa on huomioitu mm. tarkasteltavien viivalähteiden sijainti, päästömäärät, päästöjen keskimääräinen vapautumiskorkeus ja päästöjen ajallinen vaihtelu. YTV toimitti liikenteen päästöjen lähtötiedot, jotka muokattiin Ilmatieteen laitoksella leviämismallin tarvitsemaan muotoon. Leviämislaskelmissa käytetyt typen oksidien ja otsonin taustapitoisuudet arvioitiin YTV:n Luukin vuoden 2000 mittaustuloksista tuntikeskiarvoina.

Päästötiedot

Pääkaupunkiseudun tieliikennepäästöille tehtyjen leviämismallilaskelmien lähtötietoina käytetyt, vuodelle 2000 arvioidut liikenteen typen oksidien päästötiedot on laskettu YTV:n liikenneosastolla EMME/2-liikennesuunnitteluohjelmistolla ja siihen liitettyllä päästöjen laskentaohjelmistolla. Liikenteen päästöarvioissa käytettyjä menetelmiä on kuvattu mm. julkaisuissa *PIETARILA, ym., 2000* ja *KARPPINEN, ym. 2000a*. Tässä tutkimuksessa käytetyt päästöt on laskettu VTT:n vuonna 2002 arvioimilla uusituilla päästökertoimilla (vrt. kpl 3.1).

YTV:n päästömallilla lasketaan liikenteen aiheuttamat rikkidioksidi-, hiilidioksidi-, hiilimonoksidi-, typenoksidi-, hiilivety- ja hiukkaspäästöt. Rikkidioksidin päästökertoimet ovat vakioita ja muiden epäpuhtauksien kertoimet ovat keskinopeudesta riippuvia. Kiihdytyksiä tai jarrutuksia ei oteta erikseen huomioon. Päästökertoimet on määritetty 13 eri ajoneuvotyypille (mm. henkilöautossa

katalysaattori/ei katalysaattoria, kuorma-autossa perävaunu/ei perävaunua, diesel-, henkilö- ja pakettiautoille omat kertoimensa).

Kylmäkäynnistysten päästöt on laskettu alueilta lähtevien matkojen määrien perusteella, samoin alemman katuverkon linkkien päästöt. Pitoisuuslaskelmissa kylmäkäynnistysten ja kylmänä ajon päästöt otettiin huomioon linkkien päästöissä, koska niiden erilaisesta alueellisesta ja ajallisesta vaihtelusta ei ollut riittäviä tietoja saatavilla leviämismallin lähtötiedoiksi.

Leviämislaskelmien lähtötietoina käytettiin pääkaupunkiseudun autoliikenteen viivalähteittäisiä typenoksidipäästöjä, joissa otettiin huomioon päästöjen aikavaihtelu. Taulukossa 3 esitetään vuonna 2002 uusituilla päästökertoimilla lasketut pääkaupunkiseudun liikenteen typen oksidien vuosipäästöt päästölähderyhmittäin (kadut ja tiet, linja-autot sekä kylmänä ajo ja kylmäkäynnistykset) vuodelle 2000. Taulukossa 3 on esitetty myös pääkaupunkiseudun muiden lähderyhmien typenoksidipäästöt vuonna 2000 (*AARNIO ym., 2001*).

Taulukko 3. Pääkaupunkiseudun liikenteen ja muiden päästölähderyhmien typenoksidipäästöt (t/a) vuonna 2000.

Päästölähde	Typen oksidit (t/a)	Osuus (%)
Liikenne		
Kadut ja tiet	5 415	78
Kylmänä ajo ja kylmäkäynnistykset	268	4
Linja-autot	1 246	18
Liikenne yhteensä	6 929	46
Energialaitokset	6 134	40
Muut pistelähteet (1999)	174	1
Pintalähteet	442	3
Laivaliikenne	1 480	10
Pääkaupunkiseutu yhteensä	15 159	100

Pääkaupunkiseudun liikenteen typenoksidipäästöt olivat käytettyjen lähtötietojen mukaan vuonna 2000 hieman alle 7 000 tonnia, josta kylmänä ajon ja kylmäkäynnistysten osuus oli alle 5 % ja linja-autoliikenteen osuus hieman alle 20 %.

Pääkaupunkiseudun kaikkien päästölähteiden aiheuttamat vuoden 2000 typenoksidipäästöt olivat hieman yli 15 000 tonnia, josta miltei puolet aiheutui autoliikenteestä ja noin 40 % energiantuotannosta.

Meteorologiset tiedot ja taustapitoisuudet

Ilman epäpuhtauksien leviämisen kannalta keskeisiä meteorologisia muuttujia ovat tuulen suunta ja nopeus, ilmakehän stabiiliutta kuvaava suure ja sekoituskorkeus. Tuulen suunta ja nopeus määräävät epäpuhtauden keskimääräisen kulkeutumisen. Ilmakehän stabiiliutta kuvaavalla suurella arvioidaan ilmavirtauksen pyörteisyyttä, joka tuulen nopeuden ohella vaikuttaa merkittävästi epäpuhtauksien sekoittumiseen ja pitoisuuksien laimenemiseen kulkeutumisen aikana. Sekoituskorkeus ilmaisee sen alimman ilmakerroksen paksuuden, jossa sekoittuminen tapahtuu.

Leviämlaskelmia varten on määritettävä mallin koko sovellutusaluetta mahdollisimman hyvin edustavat ilmakehän rajakerrosta kuvaavat parametrit. Pääkaupunkiseudun autoliikenteen päästöjen leviämismallissa meteorologisten parametrien muodostamiseen käytetty lähtöaineisto käsittää Helsinki-Vantaan lentosääaseman ja Isosaaren sääaseman säähavainnot sekä Jokioisten observatorion radioluotaushavainnot vuodelta 2000. Leviämismalliin tarvittavat ilmakehän rajakerroksen tilaa kuvaavat muuttujat on muodostettu vuoden 2000 tunneittaiseksi aikasarjaksi.

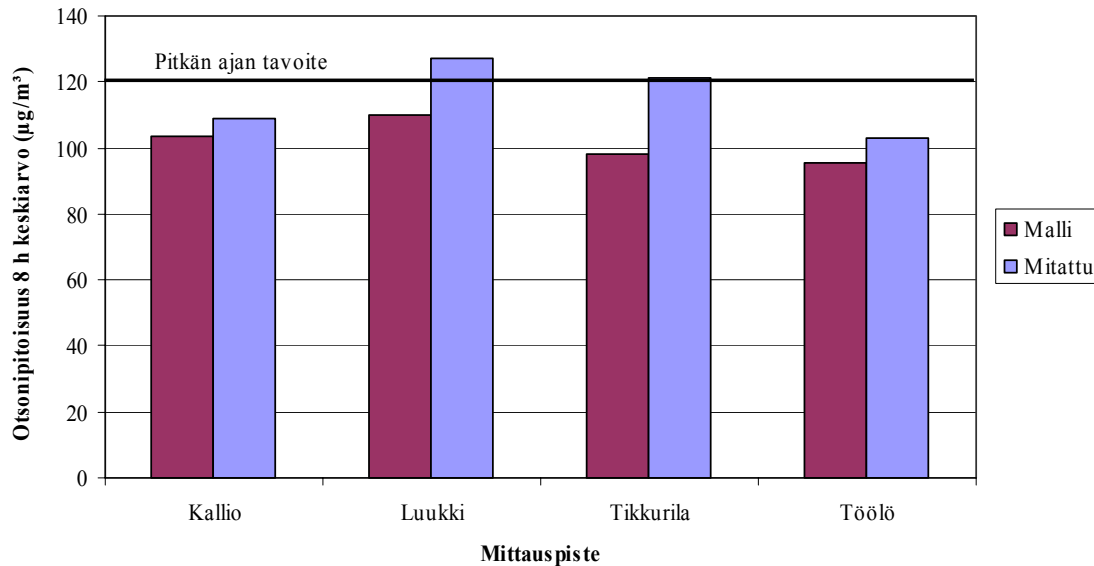
Leviämlaskelmissa käytetyt typen oksidien ja otsonin taustapitoisuudet arvioitiin YTV:n Luukin vuoden 2000 mittaustuloksista. Taustapitoisuudet otettiin huomioon tuntikeskiarvoina.

Mitattujen ja leviämlaskelmilla saatujen pitoisuuksien vertailua

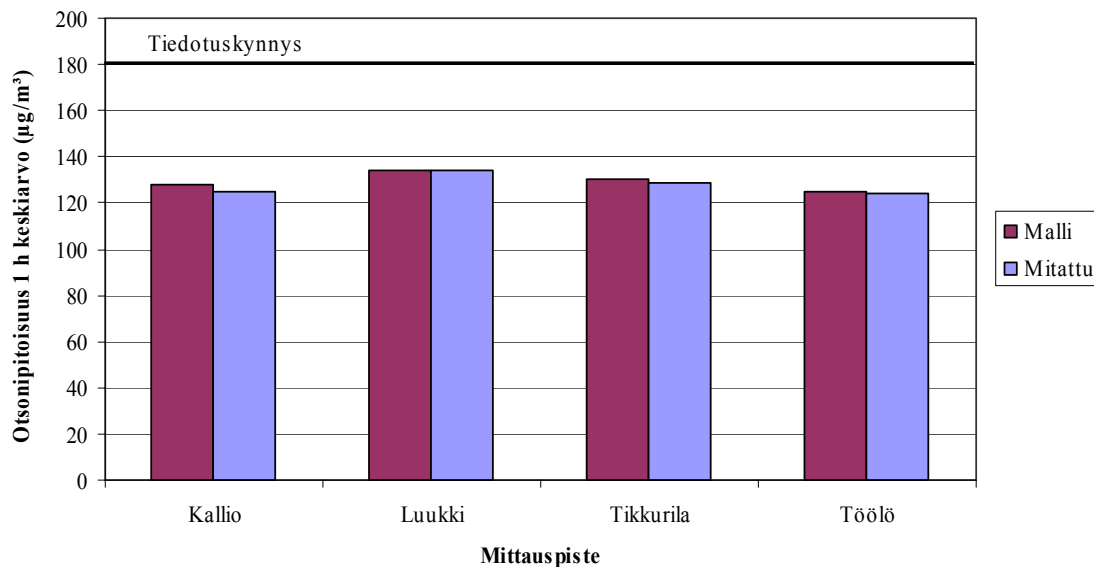
Ilmatieteen laitoksen leviämismallilaskelmien tuloksia on verrattu useilla paikkakunnilla paikallisiin ilmanlaadun mittaustuloksiin. Tarkasteluja on tehty lähinnä rikkidioksidipitoisuuksille, typpidioksidi- ja typenoksidipitoisuuksille sekä hiilimonoksidi- ja hiukkaspitoisuuksille (mm. PIETARILA ym., 1997; VARJORANTA ym. 1999; PIETARILA ym., 2000; RASILA ym., 2000; PIETARILA & VARJORANTA 2001, SALMI ym., 2002). CAR-FMI-mallilla mallinnettujen ja mitattujen otsonipitoisuuksien välisiä vertailuja on tehty vain muutamia. Mallinnettujen otsonipitoisuuksia on verrattu aiemmin muutamien liikenneympäristöissä tehtyjen kampanjamittausten tuloksiin (mm. KUKKONEN et al., 2001 ja 2002). Em. vertailuissa on mallilaskelmilla saatu mittaustulosten kanssa kohtuullisen hyvin yhteensopivia tuloksia.

Leviämisselvitysten tulosten tarkkuus riippuu mm. päästötietojen oikeellisuudesta, päästöjen ja niiden vaihtelujen kuvaamisen tasosta mallilaskelmissa sekä meteorologisen ja taustapitoisuusaineiston alueellisesta ja ilmastollisesta edustavuudesta. Mittauksin saatuihin pitoisuusarvoihin aiheuttavat virhettä esim. mittalaitteesta, kalibroinnista, näytteenotosta ja mittauspaikan edustavuudesta riippuvat tekijät. Vertailtavien pitoisuustietojen tulisi lisäksi olla samalta tarkastelujaksolta. On todettava, että mallilaskelmilla saadaan tilastollisia pitoisuusarvoja, joiden muodostumiseen vaikuttaa voimakkaasti mm. se, kuinka päästöjen ja taustapitoisuuden lyhytaikaisvaihtelu on kuvattu mallissa. Lisäksi leviämismallilaskelmien tuloksiin liittyy epävarmuutta yleensä sitä enemmän mitä lyhyemmän jakson pitoisuusarvoista on kyse.

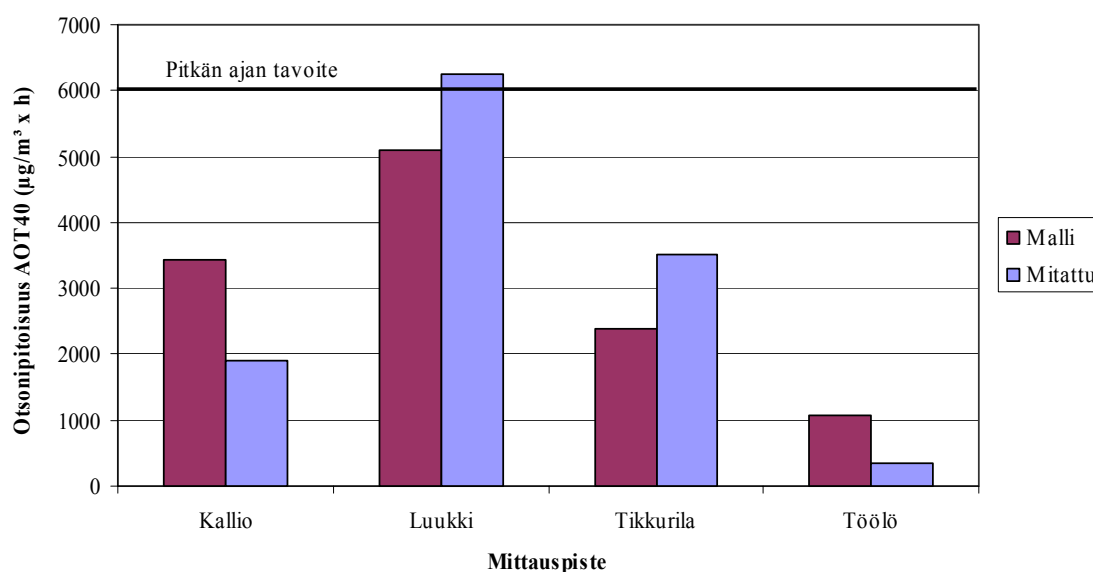
Otsonipitoisuuksia mitattiin pääkaupunkiseudulla vuonna 2000 neljässä YTV:n ylläpitämässä mittauspisteessä: Kalliossa, Luukissa, Tikkurilassa ja Töölössä. Kuvissa 1–3 on esitetty leviämismallilla laskettujen otsonipitoisuuden korkeimpien 8 tunnin ja 1 tunnin keskiarvojen sekä touko-heinäkuun AOT40-arvojen vertailu YTV:n ilmanlaadun mittauspisteissä vuonna 2000 havaittuihin vastaaviin pitoisuuksiin.



Kuva 1. Leviämislaskelmien tuloksina saatujen otsonipitoisuuden korkeimpien 8 tunnin keskiarvojen vertailu vastaaviin vuonna 2000 mitattuihin pitoisuuksiin YTV:n mittauspisteissä.



Kuva 2. Leviämislaskelmien tuloksina saatujen otsonipitoisuuden korkeimpien 1 tunnin keskiarvojen vertailu vastaaviin vuonna 2000 mitattuihin pitoisuuksiin YTV:n mittauspisteissä.



Kuva 3. Leviämislaskelmien tuloksina saatujen otsonipitoisuuden touko-heinäkuun AOT40-arvojen vertailu vastaaviin vuonna 2000 mitattuihin pitoisuuksiin YTV:n mittauspisteissä.

Mallilaskelmissa saatujen otsonipitoisuuden korkeimpien 8 tunnin keskiarvojen yhteensopivuus kaikilla neljällä YTV:n mittausasemalla on mitattujen pitoisuuksien kanssa hyvä (kuva 1). Suurimmat erot ovat Luukissa ja Tikkurilassa, joissa mitattujen ja mallinnettujen pitoisuuksien ero on noin 20 %. Kalliossa ja Töölössä mitattujen ja mallinnettujen korkeimpien 8 tunnin keskiarvojen ero on alle 10 %. Myös mallilaskelmissa saatujen otsonipitoisuuden korkeimpien 1 tunnin keskiarvojen yhteensopivuus kaikilla neljällä YTV:n mittausasemalla on mitattujen pitoisuuksien kanssa hyvä (kuva 2). Korkeimmillaankin ero mitattujen ja mallinnettujen pitoisuuksien välillä alle 5 %.

Leviämismallilla arvioitujen otsonipitoisuuksien AOT40-arvojen yhteensopivuus mitaustulosten kanssa ei ole niin hyvä kuin korkeimmilla 8 tunnin ja 1 tunnin keskiarvoilla (kuva 3). Suurimmillaan ero mitatun ja mallinnetun tuloksen välillä on Töölön mittausasemalla miltei 70 %. Muilla asemilla ero on alle 50 %.

Ilmanlaadun 3. tytärdirektiivissä (2002/3/EY) on annettu mallintamisen laatutavoite otsonipitoisuuden 8 tunnin ja 1 tunnin keskiarvolle. AOT40-arvolle ei ole annettu laatutavoitetta. Sekä 8 tunnin että 1 tunnin keskiarvolle annettu laatutavoite mallintamisen epävarmuudelle on 50 %. Epävarmuus määritetään enimmäispoikkeamana mitatuista ja lasketuista pitoisuustasoista raja-arvon kannalta arvioituna jaksona ottamatta huomioon tapahtumien ajoitusta. Edellä esitetyn vertailun mukaan tässä tutkimuksessa tehty pääkaupunkiseudun otsonipitoisuuden leviämislaskelmat täyttäisivät erittäin hyvin direktiivin mukaiset laatutavoitteet.

3.2.3 EMEP:in kaukokulkeutumismalli

Euroopassa valokemiallisten ilmansaasteiden muodostumisen ja kaukokulkeutumisen arviointi on perustunut mittaustulosten lisäksi mallisimulaatioihin. Erityisesti Euroopan talouskomission alaisen kaukokulkeutuvien ilmansaasteiden arviointiohjelman (EMEP) Oslissa sijaitsevan meteorologisen keskuksen (MSC-W) valokemiallisten kulkeutumismallien tuloksia on käytetty laajasti. (*SIMPSON et al., 1997*). EMEP:in ns. trajektorimallia hyödynnettiin mm. Göteborgin päästövähennyssopimuksen (*UN-ECE, 1999*) ja EU:n päästökattodirektiivin (*EU, 2002*) valmistelussa optimoitaessa päästövähennyksiä suhteessa terveys- ja kasvillisuushaittoihin (*AMANN & LUTZ, 2000*).

EMEP:in trajektorimallissa valtioiden raportoimat otsonia muodostavien yhdisteiden päästöt esitetään 150 km:n hilassa. Päästöt, kuten typenoksidit, hiilimonoksidi ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet, kulkeutuvat ilmakehän alimmassa osassa, rajakerroksessa, meteorologisten olosuhteiden mukaisesti ja muuntuvat ilmakemiallisesti muodostaen muun muassa otsonia. Simuloidut otsonipitoisuudet talletetaan kuuden tunnin välein huhtikuun alusta syyskuun loppuun, minä aikana otsonin nettomuodostus pääasiallisesti tapahtuu ja kynnysarvojen ylitykset havaitaan. Altistusta kuvaavat tunnusluvut halutulle jaksolle lasketaan näistä pitoisuuksista.

EMEP:in trajektorimallin on todettu aliarvioivan otsonipitoisuuksia Suomessa (*JOHANSSON et al., 2001*). Pääsyyinä tähän on mallissa käytetty liian alhainen troposfäärin taustapitoisuus. Erityisen suuri vaikutus mallin aliarvioimilla pitoisuuksilla on kynnysarvotyyppeihin tunnuslukuihin, kuten AOT40, joka varsinkin Pohjois-Euroopan otsonitasoissa on hyvin herkkä pitoisuusmuutoksille (*LAURILA et al., 2001; TUOVINEN, 2000*). Tässä alustavassa arvioinnissa EMEP-mallin tuloksia käytetään lähinnä havainnollistamaan pitoisuuksien alueellisia eroja.

MSC-W:ssä on vastikään kehitetty uusi hila-malli (*SIMPSON et al., 2003*), jonka alueellinen erottelukyky on selvästi parempi ja jonka tulokset sopivat Pohjois-Euroopassa trajektorimallia paremmin yhteen havaintojen kanssa (*FAGERLI et al., 2003*). Tämä malli mahdollistaa myös kasvillisuuden todellisen ilmarakojen kautta kulkeutuvan otsoniannoksen arvioimisen, mikä korostaa kasvillisuusvaurioriskejä Pohjois-Euroopassa (*EMBERSON et al., 2000*). Uuden mallin tulokset eivät vielä olleet käytettävissä tätä arviointia laadittaessa.

3.2.4 Pitoisuustulosten esittämisessä ja analysoinnissa käytetyt interpolointimenetelmät

Mallilaskelmien tulosten ja mitattujen tausta-alueiden otsonipitoisuuksien alueellisessa esittämisessä hyödynnettiin interpolointimenetelmiä. Esittämisen ja interpolointityökaluna käytettiin kaupallista paikkatieto-ohjelmistoa (MapInfo) ja siihen liitettyä interpolointiohjelmaa (VerticalMapper). Käytetyt interpolointimenetelmät valittiin alkuperäisen datan tyyppin mukaan.

Pääkaupunkiseudulle tehdyissä leviämislaskelmissa interpolointi suoritettiin pyöristetty kolmiointimenetelmällä (Triangulation with smoothing), joka perustuu siihen, että

alkuperäisen pistetietokannan pisteet liitetään toisiinsa viivaverkostolla, joka muodostaa ns. kolmioverkon (TIN-verkko) kuvaamaan alkuperäistä tietopintaa. Tämä menetelmä korostaa jokaisen pisteen arvoa ja näin ollen solujen arvot ovat aina yli- tai aliarvioita pisteiden välissä.

Mitattujen otsonipitoisuuksien alueellisessa esittämisessä käytettiin liukuvan keskiarvon tekniikkaa (Inverse Distance Weighting), jossa pisteen arvo lasketaan tietyn säteen sisään jäävien pisteiden etäisyydellä painotettuna keskiarvona. IDW tuottaa hyvin ”pehmeitä” pintoja, joissa alkuperäisten pisteiden arvoja ei korosteta, joten soluille lasketut arvot eivät voi koskaan saada korkeampaa arvoa kuin paikallinen minimi tai maksimi-arvo. Menetelmä soveltuu hyvin aineistoille, jossa vierekkäisten datapisteiden arvojen keskinäinen ero voi olla suurikin.

EMEP-mallin tulosten esittämisessä käytettiin Kriging-interpolointimenetelmää, joka ottaa huomioon sekä tunnettujen pisteiden etäisyyden että niiden välisen variaation arvioitaessa tuntemattomien alueiden solujen arvoja. Menetelmän avulla on mahdollista havaita myös datan maantieteelliseen suuntautumiseen liittyviä trendejä (esim. pohjoinen-etelä, itä-länsi).

3.3 Ilmanlaadun mittaukset

3.3.1 Otsonipitoisuudet

Ilmanlaadun seuranta on järjestetty Suomessa hajautetusti. Suomessa on kuntien, kunnallisten yhteistyöelimien ja teollisuuden ylläpitämänä varsin kattava asemaverkosto ilman epäpuhtauksien mittaamiseen kaupunki- ja teollisuusalueilla. Ympäristönsuojelulain mukaan kunnat ovat velvollisia järjestämään alueellaan tarpeellisen ilmanlaadun seurannan ja toiminnanharjoittajan on oltava selvillä toiminnastaan aiheutuvien päästöjen vaikutuksista ilmanlaatuun. Maaseudun tausta-alueilla ilmanlaadun seurannasta vastaa Ilmatieteen laitos.

Vuosina 1998–2002 oli Suomessa vuosittain toiminnassa 22–28 otsonimittausasemaa, joista Ilmatieteen laitoksen tausta-asemia oli 9–10 ja loput olivat paikallisten mittaaajien asemia. Vuonna 2002 otsonipitoisuuksien seuranta suoritettiin 13 eri mittajaorganisaatiota yhteensä 27 mittausasemalla. Liitteessä 1 on luettelo vuosina 1998–2002 toiminnassa olleista mittausasemista.

Alustava arvioinnin johtopäätökset perustuvat pääasiassa viiden edeltävän vuoden 1998–2002 mittausaineistoon. Tässä tutkimuksessa on kuitenkin esitetty myös tätä aikaisempia mittaustuloksia vuodesta 1987 alkaen. Viittä vuotta pidemmän ajan tarkastelu antaa lisätietoa tarkasteltavien suureiden vuosittaisesta vaihtelusta ja mahdollisesta trendistä. Vuosina 1987–2002 otsonia on mitattu 25 kunnan alueella yhteensä 37 mittausasemalla (liitekuva 1). Liitekuvasssa 2 esitetään nykyiset (vuosi 2002) otsonipitoisuuden mittausasemat.

Paikalliset mittausverkot vastaavat mittauksiensa laadunvarmistuksesta. Dokumentoidut ilmanlaatumittausten laatujärjestelmät ovat yleistyneet viime vuosina. Soveltuvien osien on käytetty YM:n julkaisemaa ohjetta ilmanlaadun mittaamisesta ja mittaustulosten

vertaamisesta ohjearvoihin (YM Sarja B 7/1986). Ympäristöministeriö nimitti Ilmatieteen laitoksen kansalliseksi ilmanlaadun vertailulaboratorioksi vuonna 2001. Vertailulaboratorion tehtävänä on mm. vertailumittausten järjestäminen mittausverkoille, joten tulevaisuudessa verkkojen laadunvarmennusjärjestelmien riittävyys sekä tulosten epävarmuudet ja vertailtavuus voidaan paremmin arvioida ja varmentaa. Otsoni ei kuitenkaan vielä ole ollut mukana vertailumittauksissa.

Lähes kaikissa otsonimittauksissa on käytetty mittausmenetelmänä UV-fotometriaan perustuvaa jatkuvatoimista analysaattoria. Menetelmä vastaa direktiivin vertailumenetelmää ISO FDIS 13964. Valmisteilla oleva CEN:n standardiluonnos otsonimittausten referenssimenetelmäksi pohjautuu ISO FDIS 13964 -standardiin, mutta CEN-standardissa mm. mittausominaisuudet ja laadunvarmistusvaatimukset tulevat muuttumaan.

Ilmatieteen laitoksen otsonimonitorit on kalibroitu kenttäkalibraattorilla neljä kertaa vuodessa. Kenttäkalibraattori tarkistetaan vuosittain Ilmatieteen laitoksen akkreditoidussa referenssilaboratoriossa, josta otsonipitoisuuden jälki johtaa EMPAn (Swiss Federal Laboratories for Materials Testing Research) primäärikalibraattoriin. Aiemmin kenttäkalibraattori tarkistettiin vuosittain Tukholman yliopiston (Tropospheric Ozone Research Network at the Institute for Applied Environmental Research at the University of Stockholm) standardi-instrumentilla. Suurimmalle osalle mittausverkoista laitteiden kalibrointi- ja huoltopalvelut toimittaa sama yksityinen yritys, mikä periaatteessa edesauttaa näiden mittausverkkojen tulosten keskinäistä vertailtavuutta.

Kolmella mittausasemalla (Valkeakosken terveyskeskuksen kaksi eri mittauslinjaa ja Haminan satama) otsonia mitattiin DOAS-menetelmällä. DOAS-mittausten ajallinen tuntiarvojen kattavuus oli vuosittain alle 75 % vuoden tuntiarvoista ja nämä tulokset karsiutuvat jo sen perusteella pois alustavassa arvioinnissa käytetystä pitoisuustulosaineistoista. Nämä asemat ovat kuitenkin mukana seuranta-asemien lukumääriä esittävissä taulukoissa (liite 1, taulukko 5).

Tiedot ilmanlaatumittauksista on kerätty Ilmatieteen laitoksen ylläpitämään ilmanlaadun seurannan tietojärjestelmään (ILSE), johon kerätään vuosittain Suomen ilmanlaadun seurannan mittaustulokset sekä niihin liittyviä tietoja. Myös tässä yhteydessä suoritetaan mittaustuloksille yhdenmukaisia tarkistuksia ja varmistuksia yhdessä mittajaan kanssa.

Alustavassa arvoinnissa esitetyt mittauksiin perustuvat pitoisuustulokset on laskettu ILSE-tietokantaan talletetuista otsonin tuntikeskiarvoista. Laskennassa on käytetty otsonidirektiivin liitteen I sekä liitteen III kohdan II määritelmiä ja perusteita mittaustulosten yhdistämiseksi, tilastollisten tunnuslukujen laskemiseksi ja tavoitearvoihin vertaamiseksi. Kahdeksan tunnin keskiarvo on hyväksytty, jos vähintään 6 tuntiarvoa kahdeksasta on ollut hyväksyttäviä. Tuntiarvojen ja 8 tunnin keskiarvojen tilastoarvot on hyväksytty mukaan arviointiin, jos tuntiarvojen kattavuus on ollut vähintään 75 %. Vuoden korkeimpien 8 tunnin keskiarvojen kolmen vuoden keskiarvot on hyväksytty, jos vähintään kahdelle vuodelle kolmesta on hyväksytty vuoden korkein 8 tunnin keskiarvo. AOT40-arvot on laskettu käyttäen aikavälillä 9.00–21.00 Suomen normaaliaikaa mitattuja tuntiarvoja, mikä vastaa direktiivissä annettua aikaväliä 8.00–20.00 CET. AOT40-arvot on hyväksytty mukaan arviointiin, jos tuntiarvojen kattavuus laskentajaksolla on ollut vähintään 90 %. AOT40-summat on korjattu

puuttuvien osuudella direktiivin liitteessä III esitetyllä kaavalla. AOT40-summien 5-vuoden keskiarvo on hyväksytty, jos hyväksytty keskiarvo on olemassa vähintään kolmelle vuodelle viidestä.

Otsonidirektiivin liitteessä IV mittausasemat on luokiteltu edustavuuden mukaan neljään eri luokkaan: kaupunki, esikaupunki, maaseutu ja maaseututausta. Tässä tutkimuksessa tämä asemaluokittelu on johdettu EU:n komission keskinäistä tietojenvaihtoa koskevan päätöksen (ns. EoI-päätös; 1997/101/EY muutettuna päätöksellä 2001/752/EY) mukaista kaksitasoisesta luokittelusta, jossa asemat luokitellaan erikseen alueen tyypin (kaupunki/esikaupunki/maaseutu) ja päästötyypin (liikenne/teollisuus/tausta) suhteen (taulukko 4).

Taulukko 4. Tietojenvaihtopäätöksen (EoI-päätös) asemaluokituksen ja alustavassa arvioinnissa käytetyn otsonin mittausasemien luokituksen vastaavuus.

EoI-alueityyppi	EoI-päästötyyppi	Otsoniseurannan asematyyppi
Kaupunki	Liikenne	Liikenne
Kaupunki	Teollisuus	Kaupunki
Kaupunki	Tausta	Kaupunki
Esikaupunki	Liikenne	Liikenne
Esikaupunki	Teollisuus	Esikaupunki
Esikaupunki	Tausta	Esikaupunki
Maaseutu	Teollisuus	Maaseutu
Maaseutu	Tausta	Maaseutu tai Maaseututausta

Liikenne-tyypin asemat eivät sovellu direktiivin mukaiseen otsonipitoisuuksien arviointiin, mutta näiden asemien pitoisuustuloksia on esitetty tässä tutkimuksessa. Maaseutu/tausta-asemien jako maaseutu- ja maaseututausta-asemiin on tehty Ilmatieteen laitoksessa tätä tutkimusta varten. Kaikki maaseututausta-asemiksi soveltuvat asemat ovat Ilmatieteen laitoksen omia mittausasemia. Taulukossa 5 on esitetty erityyppisten otsoniseuranta-asemien lukumäärä vuosina 1998–2002.

Taulukko 5. Edustavuudeltaan eri tyyppisten otsonin mittausasemien lukumäärät vuosina 1998-2002.

Asematyyppi	1998	1999	2000	2001	2002
Liikenne	5	5	2	4	3
Esikaupunki	3	3	3	4	5
Kaupunki	4	5	4	5	5
Maaseutu	3	8	9	6	7
Maaseututausta	7	7	7	7	7
Yhteensä	22	28	25	26	27

3.3.2 Otsonia muodostavien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja typen oksidien pitoisuudet

Otsonidirektiivissä todetaan, että kunkin jäsenvaltion on varmistettava, että niiden alueella toimii vähintään yksi asema, jossa mitataan direktiivin liitteen VI luettelon mukaan otsonia muodostavien yhdisteiden pitoisuuksia.

Mittausten tärkeimmät tavoitteet ovat otsonia muodostavien yhdisteiden kehityssuunnan analysointi, päästöjen vähentämisstrategioiden tehokkuuden tarkistaminen, päästökartoitusten yhtenäisyyden tarkistaminen ja epäpuhtauspäästöjen paikantaminen niiden lähteisiin. Lisätavoitteena on tukea otsonin muodostumisen ja otsonia muodostavien yhdisteiden leviämisprosessien ymmärtämistä ja valokemiallisten mallien soveltamista.

Nykyisin Suomessa seurataan haihtuvien hiilivetyjen pitoisuuksia Korppoon Utön EMEP-asemalla sekä Kittilän Sammaltunturin GAW-asemalla (liitekuva 3). Näillä asemilla otetaan kahdesti viikossa kanisterinäytteet, joista analysoidaan seuraavat kevyet haihtuvat hiilivedyt: etaani, etyleeni, asetyleeni, propaani, propeeni, n-butaani, i-butaani, 1-buteeni, trans-2-buteeni, cis-2-buteeni, 1,3-butadieeni, n-pentaani, i-pentaani, 1-penteeni, 2-penteeni, isopreeni, n-heksaani, i-heksaani, n-heptaani, bentseeni ja tolueeni. EMEP-ohjelman tavoitteet ovat samantyyppisiä kuin otsonidirektiivin hiilivetyseurannassa. Kuitenkin näytteiden heikon ajallisen edustavuuden (kaksi lyhytkestoista näytettä viikossa) ja ilmamassojen laaja-alaisen sekoittumisen sekä hiilivetyjen osin pitkien osin lyhyiden elinikien vuoksi ne eivät korvaa otsonidirektiivin hiilivetyseurantaa.

Esimerkiksi bentseenin alustavassa arvioinnissa (*PIETARILA ym., 2002*) esitettiin vuosikeskiarvot sekä Sammaltunturilla että Utössä vuodesta 1995 lähtien. Tulosten mukaan Utössä ei havaita trendiä ja Sammaltunturilla pitoisuudet näyttäisivät olevan paremminkin kasvussa kuin vähenemässä. Mitä ilmeisimmin Suomen taajamissa kehitys on ollut toisenlainen, eivätkä nämä mittaukset edusta taajamiemme ilmankosteumusta. Koska bentseeni on pitkäikäinen, molempien asemien havaintoihin vaikuttaa hyvin paljon taustapitoisuus eli lähteet kaikkialla pohjoisella pallonpuoliskolla. Yleensäkin lähdealueet pitoisuuksille näillä asemilla sijaitsevat pääosin maamme rajojen ulkopuolella. Asemathan on perustettu ilmansaasteiden kaukokulkeuman tutkimista varten. Toisaalta monien yhdisteiden elinikä on lyhyt ja ne ovat muuntuneet ennen tausta-asemalle saapumista. Esimerkiksi pakokaasuissa yleisten buteenien pitoisuudet ovat erittäin alhaisia, kesäaikana yleensä niitä ei havaita lainkaan.

Helsingin seudulla on neljällä YTV:n asemalla viime vuosina mitattu bentseenin, tolueenin ja ksyleenien pitoisuuksia passiivikeräimillä kahden viikon keskiarvoina bentseenipitoisuuksien selvittämiseksi. Nämä mittaukset ovat kuitenkin yhdisteiden määrän osalta liian suppeita otsonidirektiivissä esitettyyn mitattavien yhdisteiden lukumäärän ja tavoitteisiin nähden. Tietääksemme muualta Suomesta ei ole kvantitatiivisia useamman yhdisteen hiilivetymittauksia taajamasta. Kilpilahdessa Fortumin jalostamoalueella on useamman vuoden ajan mitattu hyvällä laitteistolla laajaa hiilivety-spektriä, mikä olisi hyvä aineisto tämän erään Suomen suurimman hiilivetylähteen ja sen otsoninmuodostuspotentiaalin arviointiin. YTV:n mittausasemilla

mitattuja bentseenipitoisuuksia on esitetty hiilimonoksidin ja bentseenin alustavassa arvioinnissa (*PIETARILA ym., 2002*).

Otsonidirektiivissä todetaan, että typpidioksidia on mitattava vähintään puolessa direktiivissä edellytettävissä otsonin näytteenottopaikoissa. Mittausten on oltava jatkuvia lukuun ottamatta maaseututausta-asemia, joissa voidaan käyttää muita menetelmiä. Liitteeseen 1 on merkitty ne otsonimittausasemat, joilla nykyisin mitataan myös typen oksidien pitoisuuksia. Typen oksideja mitataan nykyisin yli puolessa (15 asemalla 27:stä) otsonin mittausasemista. Puolessa (viidellä asemalla kymmenestä) Ilmatieteen laitoksen otsoniasemista mitataan myös typenoksidipitoisuuksia. Typenoksidipitoisuuksia mitataan jatkuvatoimisilla monitoreilla. Typen oksidien mittausten menetelmiä, mittausten verkostoa ja pitoisuustuloksia on esitetty mm. ilmanlaadun ensimmäistä tytärdirektiiviä koskevassa alustavassa arvioinnissa (*PIETARILA ym., 2001a*).

4 TULOKSET

4.1 Yleistä Suomen otsonipitoisuuksista

Euroopan ilmansaastepäästöjen vaikutus Suomessa esiintyviin otsonipitoisuuksiin vaihtelee suuresti eri vuodenaikoina. Talvella auringon valoenergian ollessa vähäistä typpimonoksidi ja muut ilmansaasteet kuluttavat otsonia. Euroopan tiheimmin asutuilla alueilla otsonipitoisuudet ovat tällöin pienempiä kuin alueen pohjoisella reunalla (*SCHEEL et al., 1997*) ja otsonia kulkeutuu Keski-Eurooppaa kohti (*LAURILA, 1999; RINNE et al., 2003*). Maalis-huhtikuussa alkaa ilmansaasteotsonin valokemiallinen muodostuminen, minkä myötä erityisesti Euroopan teollistuneilla alueilla havaitaan korkeita otsonipitoisuuksia, ja otsonia alkaa kulkeutua pohjoista kohti. Etelä-Suomen yllä kulkeutuminen on suurimmillaan kesä-heinäkuussa (*LAURILA, 1999*) ja Pohjois-Suomessa keväällä ja loppukesästä (*RINNE et al., 2003*), mikä kuvastaa otsonin laajamittaista pitoisuusjakaumaa Euroopassa (*RUMMUKAINEN et al., 1996*).

Otsonin terveys- ja kasvillisuushaitat liittyvät korkeisiin kriittisen tason ylittäviin pitoisuuksiin, joita havaitaan lähinnä keväällä ja kesällä. Suomessa keskimääräiset pitoisuudet ja altistumista kuvaavat tunnusluvut pienenevät pohjoista kohden, koska otsonia kaukokulkeutuu yleensä etelästä, ja myös kotimaiset päästöjen vaikutus otsonin muodostumiseen on merkittävä eteläisimmässä Suomessa.

Ilmatieteen laitoksen tausta-asemilla ja YTV:n Luukin maaseutuasemalla vuosikeskiarvot ovat vuosien 1990 ja 2000 välisenä aikana kasvaneet keskimäärin 2 % vuodessa (*ANTTILA et al., 2003*). Helsingin sydämessä, Töölön liikenneasemalla kasvu on ollut 6 % vuodessa. Ainakin kaupungeissa otsonipitoisuuden kasvu liittyy typpimonoksidin päästöjen vähentymiseen (*AARNIO et al., 2002*), minkä vuoksi päästön läheisyydessä tapahtuva otsonin titraationielu on heikentynyt.

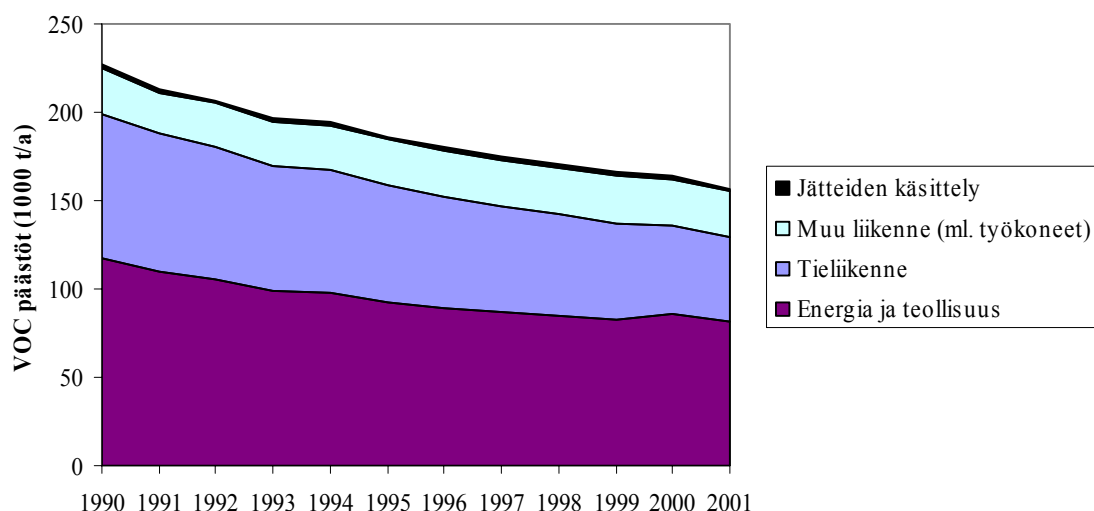
Valokemiallisesti aktiivisina jaksojen (huhti-syyskuu tai touko-heinäkuu) keskimääräisissä otsonipitoisuuksissa ei juurikaan ole ollut tilastollisesti merkittäviä muutoksia. Pitoisuudet ovat kuitenkin pikemminkin kasvaneet kuin laskeneet (*LAURILA et al., 2003*). Kesäaikana puhtaiden ilmamassojen otsonipitoisuus on

kasvanut Etelä- ja Keski-Suomessa. Saastuneimpien ilmassaotsonin korkeimmat pitoisuudet ovat laskeneet lievästi vuosina 1989–2002, tosin muutokset eivät ole tilastollisesti merkittäviä. Touko-kesäkuun ja huhti-syyskuun jaksoille lasketut AOT40-altistusindeksit eivät ole muuttuneet merkittävästi 1990-luvulla. Ilmakemiallisten mallisimulointien mukaan Pohjoismaissa esiintyvien korkeimpien otsonipitoisuuksien (99. persentiili) olisi pitänyt laskea selvästi enemmän kuin on havaittu (*SOLBERG et al., 2002*). Syynä tähän voi olla joko otsonin taustapitoisuuden kasvu pohjoisella pallonpuoliskolla (*JONSON et al., 2001; DERWENT et al., 2002*), liian suuriksi ilmoitetut päästövähennykset Pohjois-Euroopassa tai tarkastelujakson lyhyydestä johtuva tilastollinen epävarmuus. Esimerkiksi Itämeren laivaliikenteen päästöt ovat jatkuvasti kasvaneet (*ENTECH, 2002*), mutta tätä kehitystä on huonosti pystytty ottamaan huomioon päästötiedoissa.

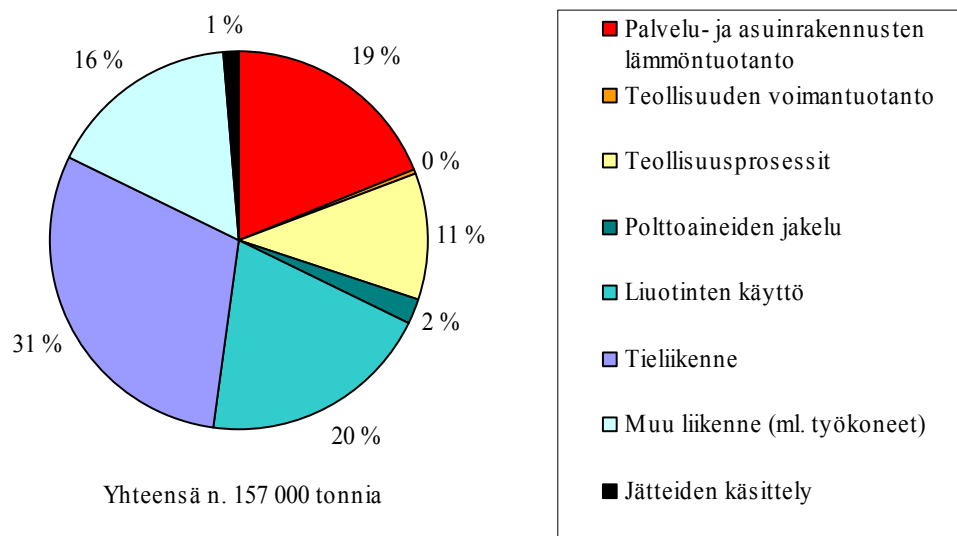
4.2 Otsonia muodostavien yhdisteiden päästöt

4.2.1 Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden päästöt

Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (NMVOC) päästöt, joihin kuuluvat liikenteen hiilivetypäästöt, ovat Suomessa vähentyneet koko 1990-luvun ajan (kuva 4). Vuoteen 2001 mennessä päästöt ovat vähentyneet lähes kolmanneksen vuoden 1990 tasosta. Vuonna 2001 Suomen NMVOC-päästöt olivat yhteensä noin 157 000 tonnia, josta noin 47 % aiheutti liikenne ja 20 % liuotinten käyttö (kuva 5). Liikenteen hiilivetypäästöt vuonna 2002 ja pistelähteiden NMVOC-päästöt vuonna 2000 kunnittain on esitetty liitekuvassa 4. Liitekuvassa 5 on esitetty Suomen NMVOC-päästöt vuonna 2000 50 km × 50 km ruuduittain (*SYKE, 2002b*). Suurimmat päästölähteet ovat keskittyneet Etelä-Suomen alueelle. Suurimmat kunnittaiset pistelähteiden päästöt muodostuvat Porvoossa ja Naantalissa, joissa NMVOC-päästöt aiheutuvat pääosin öljynjalostuksesta (*SYKE, 2002c*).



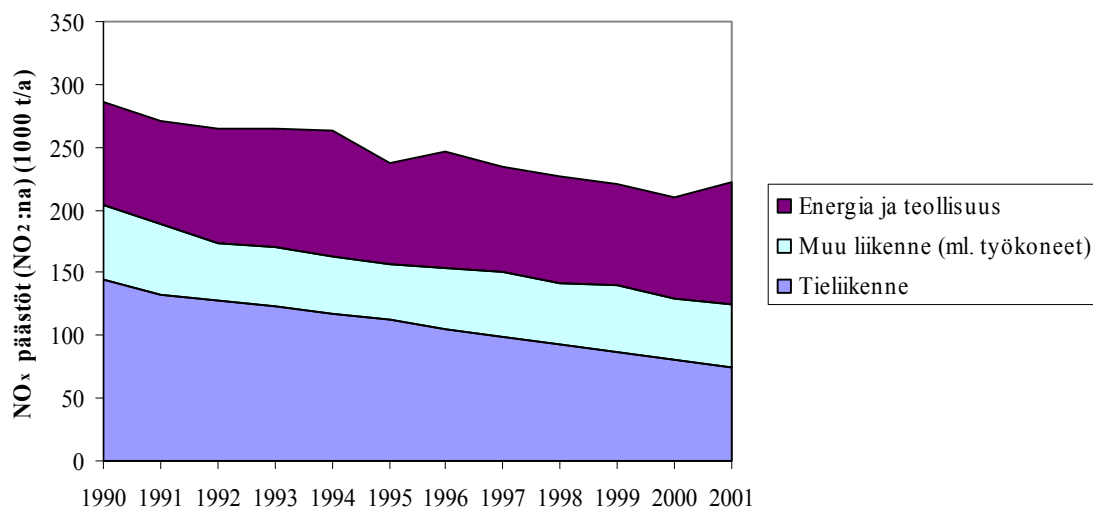
Kuva 4. Suomen NMVOC-päästöjen kehitys vuosina 1990–2001 (*SYKE, 2003; EMEP, 2003*).



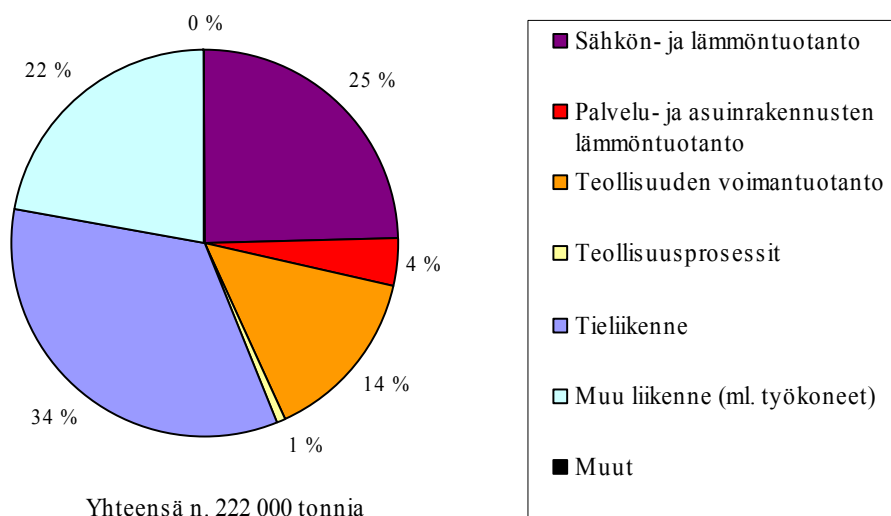
Kuva 5. Suomen NMVOC-päästöjen jakautuminen vuonna 2001 (SYKE, 2003).

4.2.2 Typen oksidien päästöt

Typen oksidien (NO_x) päästöt ovat Suomessa vähentyneet 1990-luvulla lähinnä tieliikenteen päästöjen vähenemisen seurauksena. Vuoteen 2001 mennessä päästöt ovat vähentyneet yli 20 % vuoden 1990 tasosta (kuva 6). Vuonna 2001 Suomen typenoksidipäästöt olivat yhteensä noin 222 000 tonnia, josta 34 % aiheutti tieliikenne ja 22 % muut liikkuvat lähteet (mukana työkoneet) eli yhteensä liikenteen osuus Suomen typenoksidipäästöistä oli 66 % (kuva 7).



Kuva 6. Suomen typenoksidipäästöjen kehitys vuosina 1990–2001 (SYKE, 2003; EMEP, 2003).



Kuva 7. Suomen typenoksidipäästöjen jakautuminen vuonna 2001 (SYKE, 2003).

Liikenteen typenoksidipäästöt vuonna 2002 ja pistelähteiden typenoksidipäästöt vuonna 2000 kunnittain on esitetty liitekuvassa 6. Liitekuvassa 7 on lisäksi esitetty Suomen typenoksidipäästöt vuonna 2000 50 km × 50 km ruuduittain (SYKE, 2002b). Suurimmat kunnittaiset typenoksidipäästöt syntyvät kunnissa, joissa on runsaasti autoliikennettä tai suuria voimalaitoksia. Suurimmat kunnittaiset typenoksidipäästöt syntyvät Etelä-Suomen suurissa kaupungeissa Helsingissä, Espoossa ja Vantaalla, joissa liikenteen lisäksi typenoksidipäästöjä aiheuttaa energiantuotanto. Porissa, Porvoossa, Lappeenrannassa ja Kotkassa suurin osa päästöistä aiheutuu energiantuotannosta tai teollisuudesta (SYKE, 2002c).

4.3 Mitatut otsonipitoisuudet

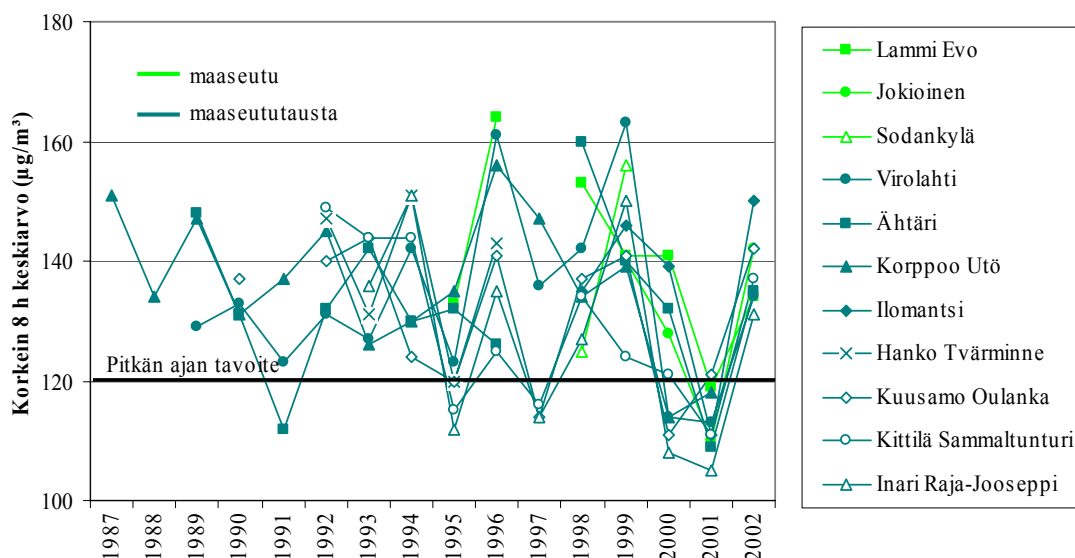
4.3.1 Ilmatieteen laitoksen mittausasemat

Ilmatieteen laitos on seurannut tausta-alueiden ilmanlaatua vuodesta 1987. Mittausverkkoon kuuluu nykyisin 10 mittausasemaa kattavasti ympäri Suomen. Suurin osa Ilmatieteen laitoksen asemista on maaseututausta-asemia, mutta osa asemista sijaitsee lähellä pieniä taajamia ja ne on luokiteltu maaseutuasemiksi otsonidirektiivin liitteen IV luokittelun mukaan (liitekuvat 1 ja 2). Ilmatieteen laitoksen taustamittausverkon havainnot soveltuvat pitkäaikaisten muutosten seurantaan vuodesta 1989 lähtien, koska mittauspaikoissa ja menetelmissä ei ole siitä lähtien tapahtunut suuria muutoksia.

Pitkän ajan tavoitteet

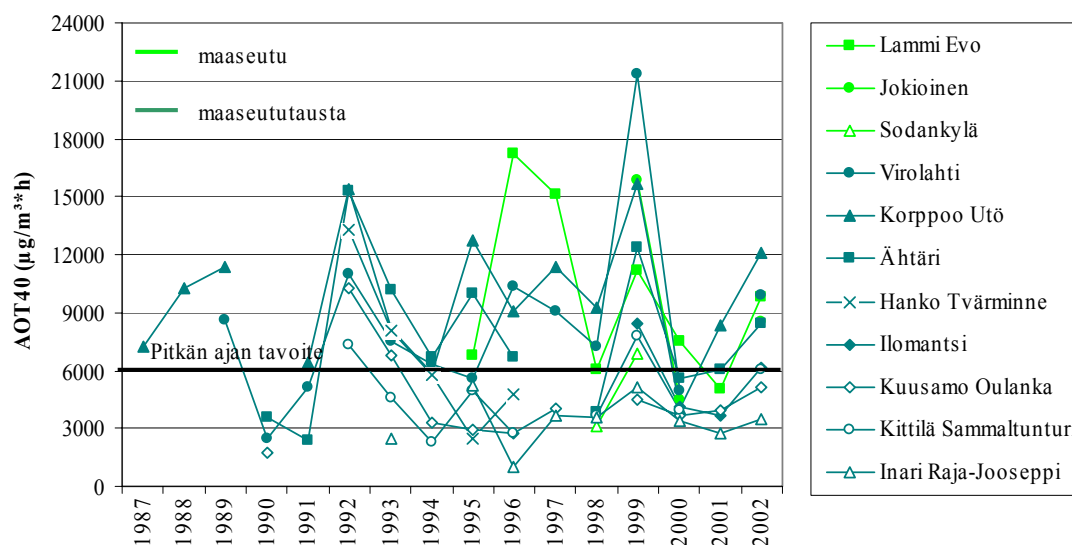
Ihmisten terveyden suojelemiseksi annettu pitkän ajan tavoite $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ on määritelty korkeimpana päivittäisenä 8 tunnin keskiarvona. Vuosina 1998–2002 se on ylittynyt 3–4 vuotena viidestä kaikilla Ilmatieteen laitoksen tausta-asemilla (kuva 8). Korkeimmat vuosittaiset pitoisuudet tausta-asemilla ovat olleet noin $110\text{--}160 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ainoastaan vuonna 2001 otsonipitoisuudet alittivat niukasti pitkän ajan tavoitteen lähes kaikilla asemilla. Vuoden korkein 8 tunnin keskiarvo vaihtelee paljon vuodesta toiseen, eikä selvää nousevaa tai laskevaa trendiä ole havaittavissa pidemmän ajan aikasarjoissa.



Kuva 8. Otsonipitoisuuden suurimmat vuosittaiset 8 tunnin keskiarvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Ilmatieteen laitoksen maaseutu ja maaseututausta-asetilla vuosina 1987–2002.

Kasvillisuuden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite $6\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ on määritelty altistumisajan ja pitoisuustason yhdistävällä käsitteellä AOT40, joka lasketaan vuosittain touko-heinäkuun otsonipitoisuuden tuntiarvoista ajalta 9.00–21.00 Suomen normaaliaikaa. Vuosina 1998–2002 se on ylittynyt varsin selvästi lähes joka vuosi Etelä- ja Keski-Suomessa sijaitsevilla asemilla (kuva 9). Korkeimmillaan touko-heinäkuun AOT40 on ollut Virolahdella yli $21\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuonna 1999. Kuusamon Oulangan, Kittilän Sammaltunturin ja Inarin Raja-Joosepin asemien AOT40 on pääsääntöisesti alittanut pitkän ajan tavoitteen. Myös AOT40-arvot vaihtelevat paljon yhdellä asemalla vuodesta toiseen, eikä selvää laskevaa tai nousevaa trendiä ole havaittavissa pidemmän ajan aikasarjoissa. Vuosina 2000 ja 2001 AOT40-arvot olivat poikkeuksellisen alhaisia ja vuonna 1999 poikkeuksellisen korkeita kaikilla Ilmatieteen laitoksen asemilla.

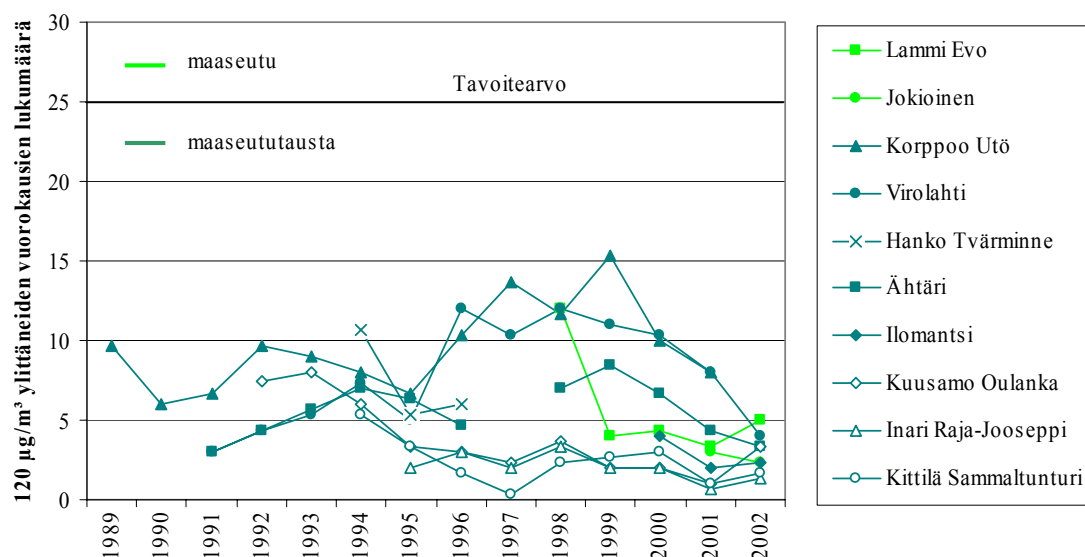


Kuva 9. Otsonipitoisuuden touko-heinäkuun AOT40-arvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) Ilmatieteen laitoksen tausta-
asemilla vuosina 1987–2002.

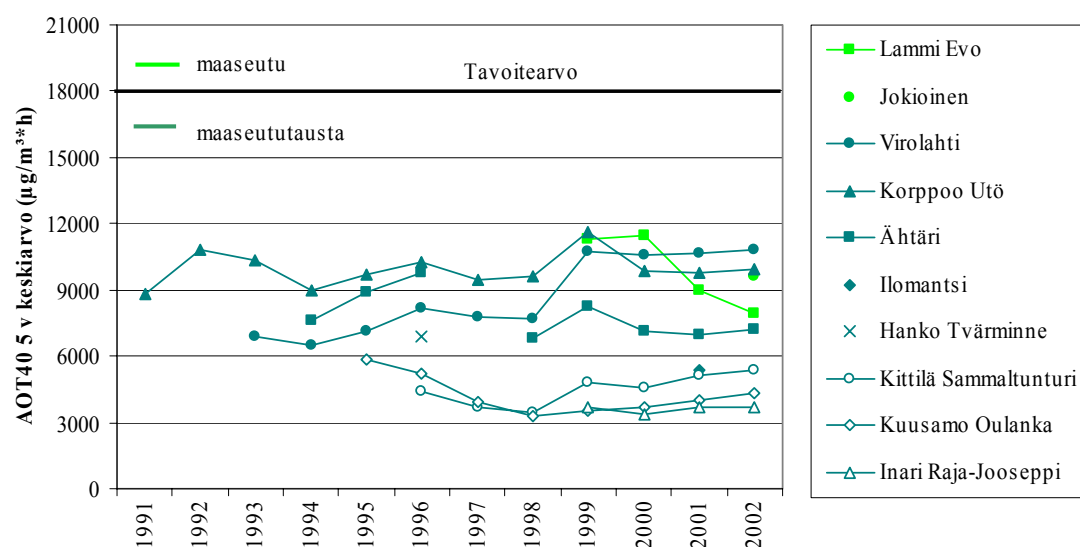
Tavoitearvot

Ihmisten terveyden suojelemiseksi annettu tavoitearvo vuodelle 2010 on $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kahdeksan tunnin keskiarvona. Tavoitearvo saa ylittyä enintään 25 päivänä kalenterivuoden aikana kolmen vuoden keskiarvona. Eniten ylityksiä on mitattu Utön asemalla, jossa otsonipitoisuus $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo) on ylittynyt viimeisen vuosikymmenen aikana korkeimmillaan vuonna 1999 15 päivänä (kuva 10). Pohjois-Suomen asemilla ylityksiä on tapahtunut yleensä selvästi alle 5 päivänä. Vuonna 2002 tavoitearvo ylittyi kaikilla tausta-asetilla enintään 5 päivänä.

Kasvillisuuden suojelua koskeva AOT40-tavoitearvo, joka lasketaan touko-heinäkuun otsonipitoisuuden tuntiarvoista, on $18\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 5 vuoden keskiarvona. Tavoitearvo on alittunut kaikilla tausta-asetilla (kuva 11). Etelä- ja Keski-Suomen asemilla AOT40-arvo oli tarkasteluajanjaksolla noin $6\,000$ – $12\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja Pohjois-Suomessa $3\,000$ – $6\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Korkeimmat AOT40-arvot on mitattu Virolahden, Utön ja Lammin Evon asemilla ja pienimmät Kuusamon Oulangan ja Inarin Raja-Joosepin asemilla.



Kuva 10. Otsonipitoisuuden $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 8 tunnin keskiarvona ylittäneiden vuorokausien lukumäärä kolmen vuoden keskiarvona Ilmatieteen laitoksen tausta-aseilla vuosina 1987–2002. Arvot on merkitty keskiarvon laskentajakson viimeisen vuoden kohdalle.



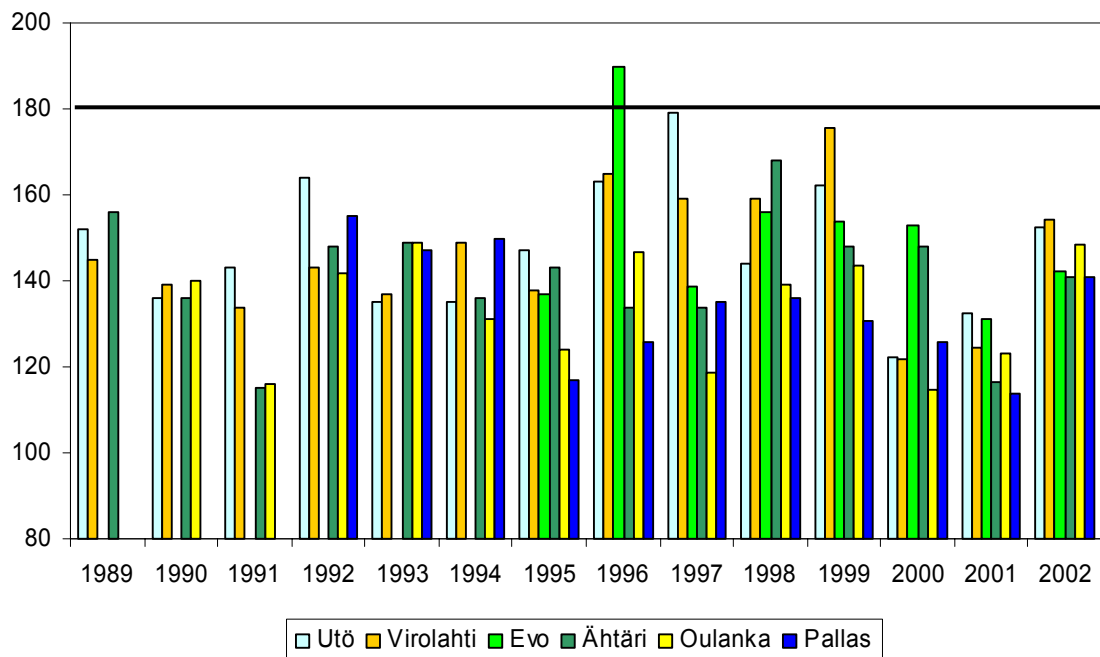
Kuva 11. Otsonipitoisuuden AOT40-arvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) 5 vuoden keskiarvona Ilmatieteen laitoksen tausta-aseilla vuosina 1987–2002. Arvot on merkitty keskiarvon laskentajakson viimeisen vuoden kohdalle.

Tiedotus- ja varoituskynnys

Otsonin *varoituskynnyksellä* tarkoitetaan tasoa, jonka ylittyessä lyhytaikainen altistuminen vaarantaa väestön terveyden, ja *tiedotuskynnyksellä* tasoa jonka ylittyessä lyhytaikainen altistuminen vaarantaa erityisen herkkien väestöryhmien terveyden. Tiedotus- ja varoituskynnyksen ylityksistä on tiedotettava ajantasaisesti yleisölle.

Varoituskynnyksen ylittyessä on lisäksi tehtävä lyhyen aikavälin toimintasuunnitelmia ylitysten estämiseksi, jos tietyt direktiivissä mainitut edellytykset täyttyvät.

Otsonin tiedotuskynnys on $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tuntikeskiarvona ja varoituskynnys $240 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tuntikeskiarvona. Väestölle tiedottamista edellyttävän otsonipitoisuuden kynnysarvon ylityksiä on Suomessa havaittu vain kahdesti. Molemmat ylitykset tapahtuivat vuonna 1996 Ilmatieteen laitoksen Evon mittausasemalla (kuva 12). Varoituskynnyksen ylittäviä pitoisuuksia ei Suomessa ole sen sijaan havaittu lainkaan. Taajamissa ja niiden lähistöllä sijaitsevilla kaupunkien ja kuntien mittausasemilla ei ole havaittu lainkaan tiedotus- tai varoituskynnyksen ylityksiä.



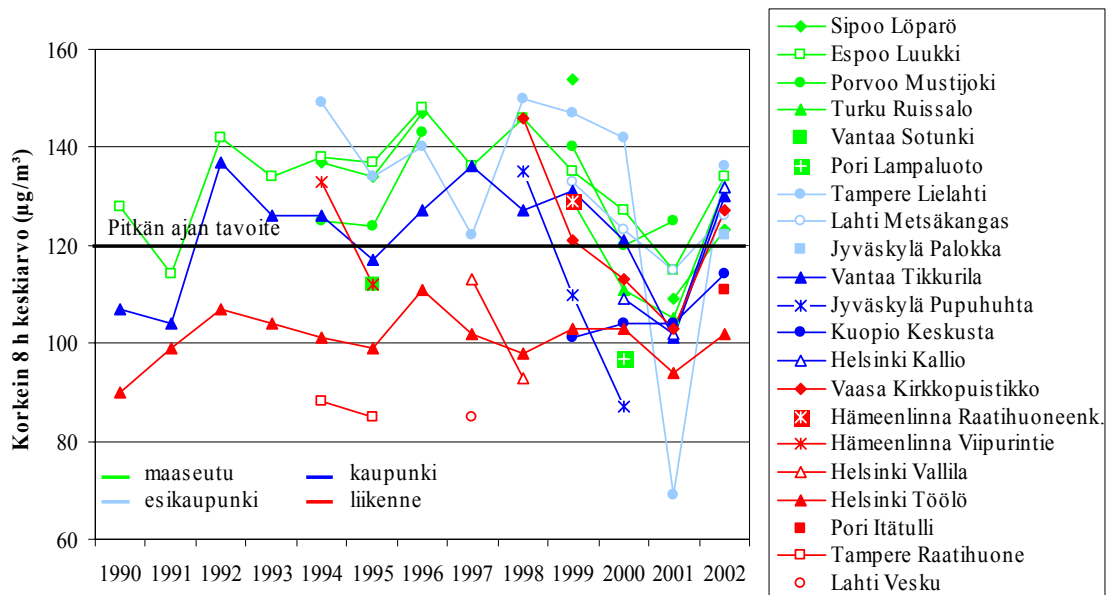
Kuva 12. Otsonipitoisuuden korkein tuntikeskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Ilmatieteen laitoksen mittausasemilla vuosina 1989–2002.

4.3.2 Kuntien ja teollisuuslaitosten mittausasemat

Paikallisen ilmanlaadun otsoniseuranta aloitettiin ensimmäisenä pääkaupunkiseudulla vuonna 1987. Seuraavassa esitetään kuntien ja teollisuuslaitosten ympäristönsuojeluyksikköjen mittaamia otsonipitoisuuksia vuodesta 1990 alkaen. Paikallisen otsoniseurantaan liittyviä mittauksia on viime vuosina ollut vuosittain noin 15 asemalla (liitekuvat 1 ja 2). Näistä kolme on ollut DOAS-mittauksia, joiden tuloksia ei tässä esitetä. DOAS-mittausten vuosittainen kattavuus on ollut alhainen (23-75 %) eikä menetelmän vertailtavuutta UV-fotometrisen menetelmän kanssa ole selvitetty.

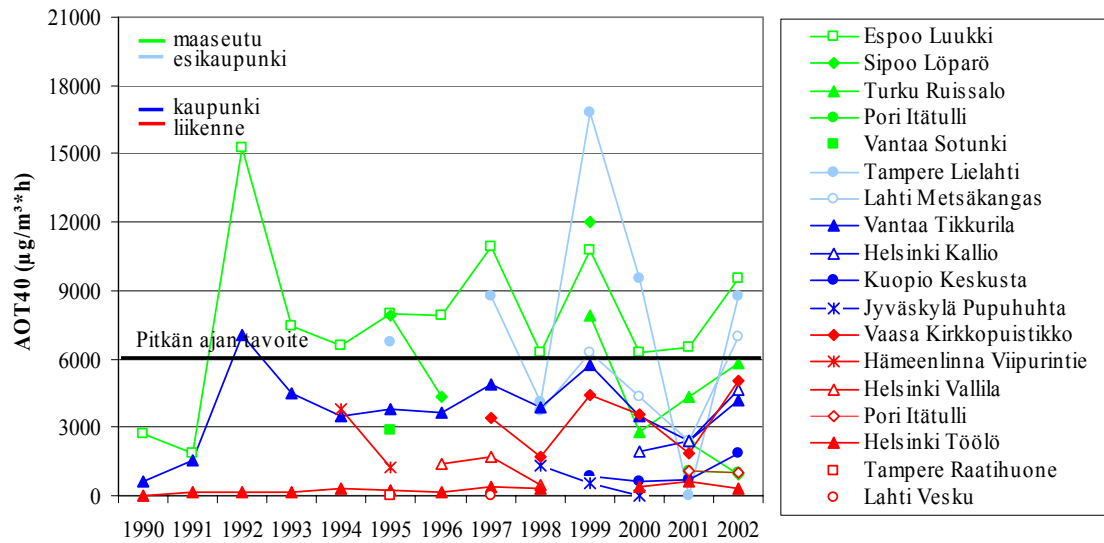
Pitkän ajan tavoitteet

Maaseutu- ja esikaupunkiasemilla mitatut otsonipitoisuudet ovat pääsääntöisesti suurempia kuin kaupunki- ja liikenneasemilla. Korkeimmalle 8 tunnin keskiarvolle määritetty pitkän ajan tavoite $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittyi 1990-luvulla noin 50 % asemista (kuva 13). Ylitykset tapahtuivat yleisemmin maaseutu- ja esikaupunkiasemilla kuin kaupunki- ja liikenneasemilla. Esimerkiksi Espoon Luukissa vuoden korkein 8 tunnin keskiarvo on ollut tarkasteluajanjaksolla $114\text{--}148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja Helsingin Töölössä puolestaan $90\text{--}111 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Mm. Helsingin Töölössä ja Vallilassa sekä Kuopion keskustassa pitoisuudet ovat aina olleet alle pitkän ajan tavoitteen. Sen sijaan esim. Espoon Luukissa, Vantaan Tikkurilassa ja Tampereen Lielahdessa pitoisuudet ovat olleet lähes joka vuosi yli pitkän ajan tavoitteen. Vuonna 2001 suurimmat 8 tunnin pitoisuudet olivat Porvoon Mustijokea lukuun ottamatta kaikilla asemilla alle $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Kuva 13. Otsonipitoisuuden suurimmat vuosittaiset 8 tunnin keskiarvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) kuntien ja teollisuuslaitosten ylläpitämällä asemilla vuosina 1990–2002.

Touko-heinäkuun AOT40-arvolle määritetty pitkän ajan tavoite $6\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ on ylittynyt vuoden 1990 jälkeen yleisesti mm. Espoon Luukin tausta-asemalla ja Tampereen Lielahden esikaupunkiasemalla (kuva 14). Kaikilla liikenne- ja kaupunkiasemilla pitkän ajan tavoite sen sijaan alitettiin selvästi.

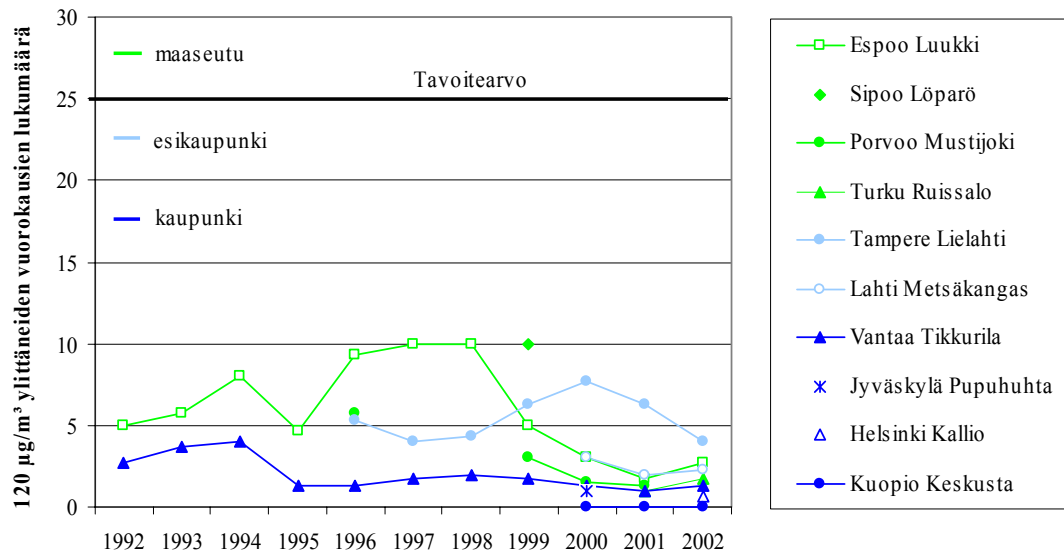


Kuva 14. Otsonipitoisuuden touko-heinäkuun AOT40-arvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) kuntien ja teollisuuslaitosten ylläpitämällä asemilla vuosina 1990–2002.

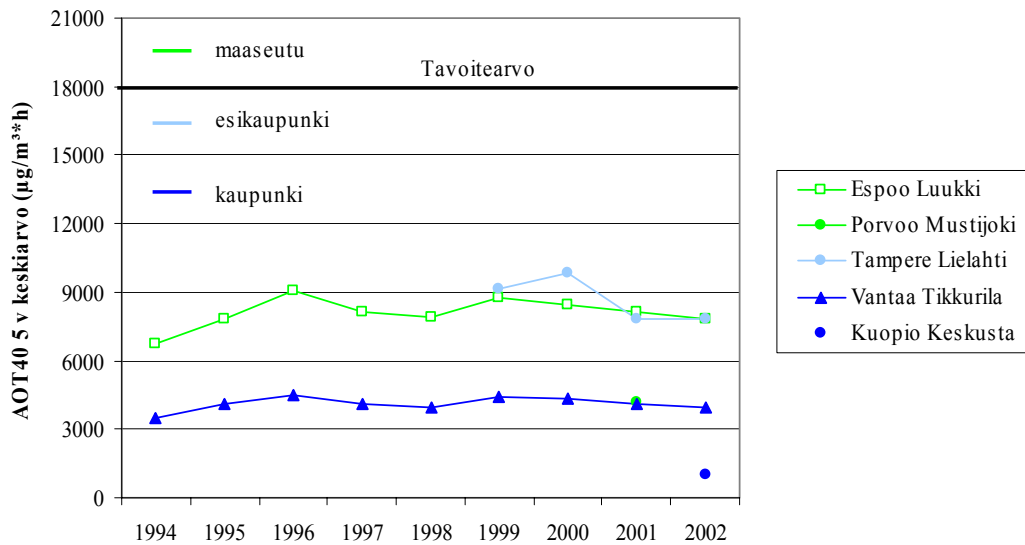
Tavoitearvot

Otsonipitoisuuden $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo) ylittäneiden vuorokausien lukumäärä viimeisten kolmen vuoden keskiarvona on ollut kuntien ja teollisuuden asemilla enimmillään 10 (Espoon Luukki vuosina 1997 ja 1998 sekä Turun Ruissalo vuonna 1999), joten suurin sallittu ylitysten määrä 25 vuorokautta alitettiin reilusti (kuva 15). Esimerkiksi Vantaan Tikkurilassa ylityksiä on ollut korkeimmillaankin alle 5 vuorokautena vuodessa.

Touko-heinäkuun AOT40-arvolle 5 vuoden keskiarvona määritetty tavoitearvo $18\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ alittui myös selvästi kaikilla asemilla (kuva 16). Espoon Luukissa AOT40-arvo on ollut korkeimmillaan $9\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja Vantaan Tikkurilassa korkeimmillaankin alle $5\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Kuvissa 14 ja 15 ei ole mukana liikennetyypin mittausasemia, joilla pitoisuudet ovat vieläkin alhaisempia ja joita ei käytetä otsonidirektiivin mukaisessa seurannassa.



Kuva 15. Otsonipitoisuuden $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittäneiden vuorokausien lukumäärä kolmen vuoden keskiarvona kuntien ja teollisuuslaitosten ylläpitämällä asemilla vuosina 1990–2002. Arvot on merkitty keskiarvon laskentajakson viimeisen vuoden kohdalle.



Kuva 16. Otsonipitoisuuden touko-heinäkuun AOT40-arvot ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) 5 vuoden keskiarvona kuntien ja teollisuuslaitosten ylläpitämällä asemilla vuosina 1990–2002. Arvot on merkitty keskiarvon laskentajakson viimeisen vuoden kohdalle.

4.4 Mallinnetut otsonipitoisuudet

4.4.1 EMEP-mallin tulokset

Liitekuvilla 8 ja 9 esitetään EMEP:in kaukokulkeutumismallilla $150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$:n hilaruutuihin lasketuista tuloksista interpoloidut otsonipitoisuudet Suomessa. Malliajot on tehty käyttäen vuoden 1999 päästötietoja ja vuoden 1994 meteorologista syöttöaineistoa. Tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa tausta-alueiden pitoisuustasoja. Liitekuvassa 8 esitetään otsonipitoisuuden kesäkauden (huhti-syyskuu) päiväajan keskiarvopitoisuus ja liitekuvassa 9 AOT40-arvo touko-heinäkuun jaksolle.

Myös EMEP-mallin tuloksista käy ilmi selvä pitoisuusero Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä. Tulosten mukaan otsonipitoisuuden kesäkauden keskiarvo olisi Suomen etelärannikolla yli $76 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja Pohjois-Suomessa alle $64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (liitekuva 8). Huhti-syyskuussa pitoisuuden kasvu on etelää kohden $1,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ leveyspiiriastetta kohden, mikä on suurempi kuin mittausten osoittama muutos. Suomen tausta-asemien vuosien 1996–2000 havaintojen mukaan huhti-syyskuussa keskimääräinen pitoisuus kasvaa etelää kohden $0,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ leveyspiiriastetta kohden, kun tarkastellaan asemia, jotka edustavat maaseutu- tai metsäympäristöjä. (LAURILA *et al.*, 2003). Vertailu mitattuihin pitoisuuksiin osoittaa myös, että mallitulosten pitoisuustaso on keskimäärin $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ liian alhainen.

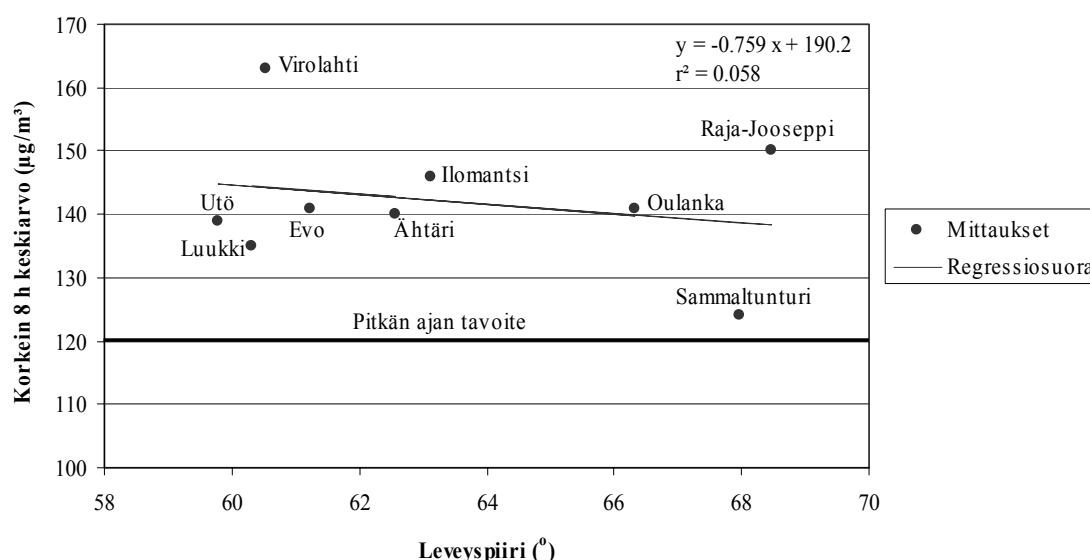
Pitoisuusero Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä näkyy selvästi myös EMEP-mallin tuottamissa AOT40-arvoissa (liitekuva 9), vaikka malli selvästi aliarvioikin Suomen AOT40-arvoja (kts. kpl 3.2.3). Mallin tulosten mukaan Etelä-Suomen AOT40-arvot olisivat noin kymmenkertaisia Pohjois-Suomen arvoihin verrattuna. EMEP-mallilla on vaikeuksia simuloida kynnysarvotyypistä indeksiä oikein, koska keskimääräiset pitoisuudet ovat aliarvioituja ja lähellä kynnysarvoa. Korkeimmillaan mallitettu touko-heinäkuun AOT40 saavuttaa Suomessa arvon $3\,500 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Uudessa EMEP-mallissa ongelma on pitkälti korjaantunut (FAGERLI *et al.*, 2003).

4.4.2 Mittaustuloksista interpoloidut otsonin alueelliset taustapitoisuudet

Ilmatieteen laitoksen tausta-asemien (Raja-Jooseppi, Sammaltunturi, Oulanka, Ähtäri, Ilomantsi, Evo, Utö ja Virolahti) sekä YTV:n Luukin aseman mittaustuloksista mallinnettiin Suomen alueelliset taustapitoisuudet interpoloimalla mittaustulokset kattamaan koko Suomen alueen (kpl 3.2.4). Interpoloinnin tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa Suomen tausta-alueiden pitoisuustasoja. Kaupunkialueilla lähinnä paikalliset typenoksidipäästöt kuluttavat otsonia ja todelliset pitoisuustasot ovat näin ollen jonkin verran pienempiä kuin interpoloinnin tuloksena vastaaville alueille saadut alueelliset pitoisuudet.

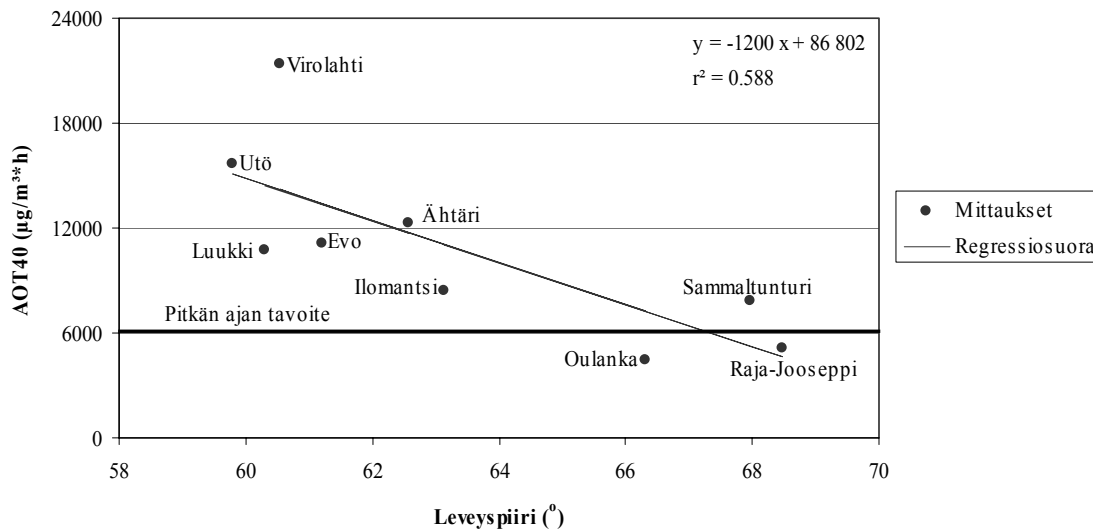
Liitekuvassa 10 esitetään otsonipitoisuuden korkeimman 8 tunnin keskiarvo vuonna 1999. Vuonna 1999 mitattiin arviointiajanjakson 1998–2002 korkeimmat otsonipitoisuudet Suomessa. Mittaustulosten perusteella voidaan arvioida kyseisenä vuotena otsonia kulkeutuneen Suomeen merkittävässä määrin Venäjältä. Tulosten mukaan pitkän ajan tavoite $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittyi kaikkialla Suomen tausta-alueilla. Suurimmat pitoisuudet olivat Koillis-Lapissa ja Kaakkois-Suomessa, jossa korkeimmat

8 tunnin keskiarvot olivat yli $145 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pienimmät pitoisuudet esiintyivät Luoteis-Lapissa, jossa pitoisuudet olivat alle $135 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Suuressa osassa Suomea pitoisuudet olivat $135\text{--}145 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vuoden 1999 korkeimmissa 8 tunnin otsonipitoisuuden keskiarvoissa ei voida kuitenkaan havaita tilastollisesti merkittävää riippuvuutta leveyspiiristä (kuva 17).



Kuva 17. Otsonipitoisuuden korkein 8 tunnin keskiarvo Ilmatieteen laitoksen tausta-aseilla ja YTV:n Luukin asemalla vuonna 1999 ja mittaustuloksista tehty regressiosuora leveyspiirin mukaan.

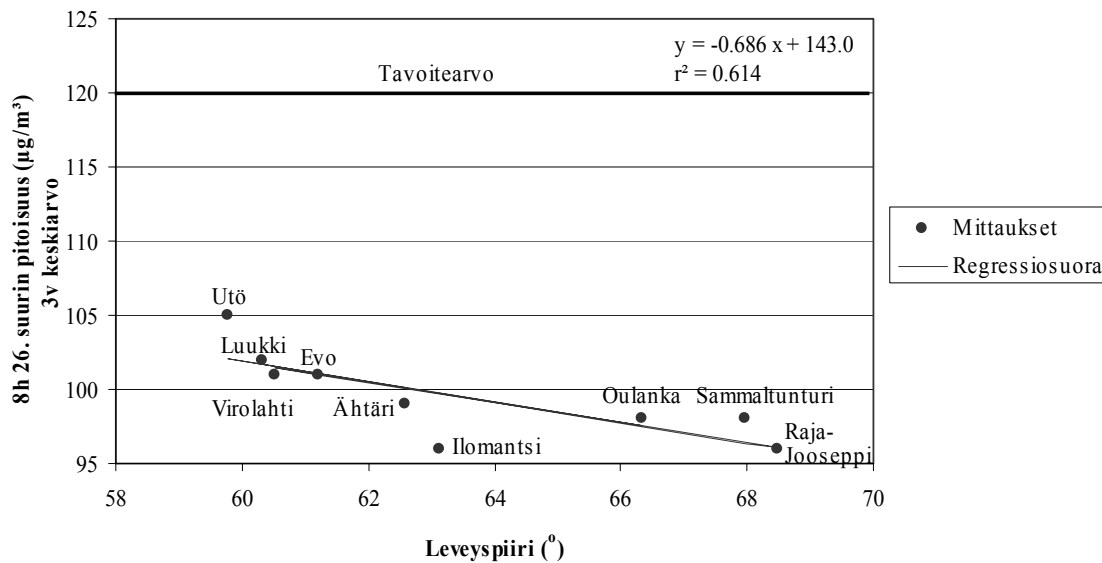
Otsonin pitkän ajan tavoite AOT40-arvolle $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ alittui vuonna 1999 tulosten mukaan ainoastaan Koillis-Lapissa (liitekuva 11). Ylivieska–Joensuu-linjan pohjoispuolella AOT40-arvot olivat alle $10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja Kaakkois- ja Lounais-Suomessa yli $14\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Vuoden 1999 AOT40-arvoissa voidaan havaita riippuvuus pitoisuustason ja leveyspiirin välillä (kuva 18). Pitoisuudet pienenevät selvästi mentäessä etelästä pohjoiseen. Pitkän ajan tavoite alittuisi noin 67. leveyspiirin pohjoispuolella.



Kuva 18. Otsonipitoisuuden AOT40-arvo Ilmatieteen laitoksen tausta-asetilla ja YTV:n Luukin asemalla vuonna 1999 ja mittaustuloksista tehty regressiosuora leveyspiirin mukaan.

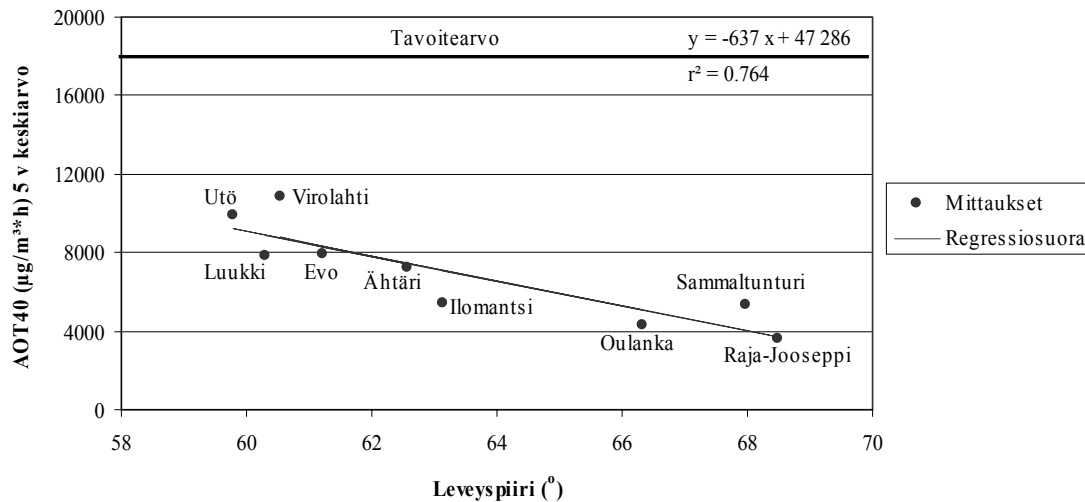
Liitekuvasa 12 esitetään otsonipitoisuuden 8 tunnin keskiarvon tavoitearvoa vastaava pitoisuustaso Suomessa vuosien 2000–2002 keskiarvona. Otsonipitoisuus alitti tavoitearvon ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$, joka saa ylittyä 25 päivänä vuodessa 3 vuoden keskiarvona) varsin selvästi kaikkialla Suomessa. Vaasa–Ähtäri–Savonlinna-linjan eteläpuolella 26. korkein 8 tunnin keskiarvo ylitti kuitenkin $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Tilastollisesti tarkasteltuna suurien pitoisuuksien lukuisuus kasvaa pohjoisesta etelään. Esimerkiksi vuosina 2000–2002 8 tunnin 26. suurin pitoisuus oli Utön asemalla $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$ pienentyen eteläisimmässä Suomessa siten, että 63. leveyspiirin pohjoispuolella se oli $98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ tai alle (kuva 19). Yksittäisenä vuonna tulokset voivat olla vaihtelevampia. Esimerkiksi vuonna 1999, kun koko maassa havaittiin korkeita otsonipitoisuuksia, korkein havaittu 8 tunnin keskiarvo oli Virolahdella $163 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja seuraavaksi korkein oli Raja-Joosepissa $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kuva 17). Lapissa havaitut korkeimmat otsonipitoisuudet ovat kulkeutuneet sinne huhti-kesäkuussa läntisimmästä Euroopasta Norjan meren ylitse ja saapuvat Lappiin lännestä (LAURILA, 1996).



Kuva 19. Otsonipitoisuuden 26. korkein keskiarvo vuosien 2000–2002 keskiarvona Ilmatieteen laitoksen tausta-asetilla ja YTV:n Luukin asemalla ja mittaustuloksista tehty regressiosuora leveyspiirin mukaan.

Otsonipitoisuuden tavoitearvo AOT40:n 5 vuoden keskiarvolle $18\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ alittui myös tulosten mukaan arviointiajanjaksolla 1998–2002 kaikkialla Suomessa (liitekuva 13). Etelärannikolla AOT40-arvot olivat yli $8\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja Ylivieska–Joensuu-linjan pohjoispuolella alle $6\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Koillis-Lapissa AOT40-arvot olivat alle $4\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Viljelykasvien otsonialtistusindeksillä AOT40 (touko-heinäkuu) on hyvin selvä kasvu pohjoisesta etelään. Utön ja Virolahden asemilla indeksin arvo on $10\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ tai ylitse (kuva 20) väheten pohjoista kohden siten että Ilomantsin asema (63°N) ja siitä pohjoisemmat asemat alittavat viiden vuoden keskiarvona $6\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Kuitenkin yksittäisenä vuonna, esimerkiksi 1999, saattaa pitkän ajan tavoitearvo $6\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ylittyä myös Pohjois-Suomessa (kuva 18). Sammaltunturin asema sijaitsee noin 250 m ympäristöään korkeammalla, mikä selittää asemalla havaittuja korkeampia arvoja.



Kuva 20. Otsonipitoisuuden AOT40-arvon vuosien 1998–2002 keskiarvo Ilmatieteen laitoksen taustasemilla ja YTV:n Luukin asemalla ja mittaustuloksista tehty regressiosuora leveyspiiriin mukaan.

4.4.3 Pääkaupunkiseudulle tehtyjen leviämislaskelmien tulokset

Pääkaupunkiseudun tieliikenteen päästöille tehtyjen leviämismallilaskelmien tuloksissa (liitekuvat 14 ja 15) näkyy selvästi paikallisten liikenteen typenoksidipäästöjen otsonia kuluttava vaikutus. Otsonipitoisuudet ovat suurimpia pääkaupunkiseudun laita-alueilla, joissa liikennetiheys ja liikenteen päästöt ovat pieniä. Helsingin kantakaupungin alueella ja vilkkaiden liikenneväylien varsilla otsonipitoisuudet ovat vastaavasti pienimmillään. Vuodelle 2000 tehtyjen mallilaskelmien tulosten mukaan otsonin korkein 8 tunnin keskiarvo olisi tutkimusalueen reunoilla $110\text{--}120\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$, eikä ylittäisi tutkimusalueella pitkän ajan tavoitetta $120\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ (liitekuva 14). Varsin laajalla alueella Helsingin kantakaupungin alueella ja mm. kehä I:n ja kehä III:n sekä vilkkaiden ulosmenoteiden varsilla otsonipitoisuuden korkeimmat 8 tunnin keskiarvot olisivat alle $105\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja vilkkaiden risteyksien ja liikenneväylien lähistöllä alle $100\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$. Verrattaessa mallin tuloksia mitattuihin pitoisuuksiin (kpl 3.2.2, kuva 1) havaittiin, että malli hieman aliarvioi korkeimpia 8 tunnin keskiarvoja. Mittaamalla havaittiinkin sekä Luukissa että Tikkurilassa pitkän ajan tavoitteen $120\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3$ ylittävän hienokseltaan vuonna 2000.

Vuoden 2000 mallilaskelmien tulosten mukaan myös AOT40-arvolle annettu pitkän ajan tavoite $6000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ alittuisi kaikkialla tutkimusaluetta (liitekuva 15). AOT40-arvot olisivat kuitenkin yli $5000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ tutkimusalueen laitamilla mm. Luukissa. Laajalla alueella Helsingin kantakaupunkia ja vilkkaasti liikennöidyillä alueilla AOT40-arvot olisivat alle $4000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja liikenneväylien varsilla alle $3000\text{ }\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$.

Mallilaskelmien tulosten mukaan otsonin tavoitearvot alittuvat siis varsin selvästi kaikkialla pääkaupunkiseudun alueella.

4.5 Pitoisuudet suhteessa pitkän ajan tavoitteisiin ja tavoitearvoihin

Otsonin terveys- ja kasvillisuushaitat liittyvät korkeisiin kriittisen tason ylittäviin pitoisuuksiin, joita havaitaan lähinnä keväällä ja kesällä. Suomessa keskimäärin pitoisuudet ja altistusindeksit pienenevät pohjoista kohden, koska kaukokulkeutumat tulevat yleensä etelästä ja myös kotimaiset päästöt ja siten otsonin muodostuminen niistä on merkittävintä eteläisimmässä Suomessa.

Pitkän ajan tavoitteet

Ilmanlaadun seurannan menetelmät otsonille määräytyvät pitoisuuksien suhteesta pitkän ajan tavoitteisiin. Kiinteässä paikassa tapahtuvat ja jatkuvat mittaukset ovat pakollisia seuranta-alueilla, joissa otsonipitoisuus on jonkin viimeksi kuluneen viiden vuoden aikana ylittänyt pitkän ajan tavoitteen.

Alustavassa arvioinnissa käytettyjen mittaus- ja mallinnustietojen perusteella ihmisten terveyden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo) on ylittynyt arviointijakson 1998–2002 aikana Suomessa kaikkialla tausta-alueilla. Muutamina otsonipitoisuuden kannalta edullisina vuosina pitkän ajan tavoite on alittunut ja tällöin pitoisuudet ovat olleet yleensä alhaisia kaikkialla Suomessa (esim. vuosi 2001). Pääkaupunkiseudulle tehtyjen mallilaskelmien sekä kaupunki-, esikaupunki ja liikenneasemien mittaustulosten mukaan paikalliset päästölähteet toimivat Suomessa taajamissa otsoninieluinä pienentäen pitoisuuksia lähellä päästölähteitä. Keskikokoisissa ja pienissä kaupungeissa ja kuntakeskuksissa terveyden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite kuitenkin ylittyy. Myös suuremmissa kaupungeissa pitkän ajan tavoite ylittyy lukuun ottamatta vilkkaiden liikennealueiden lähialueita. Kaukokulkeutuvan otsonipitoisuuden kannalta edullisina vuosina pitkän ajan tavoite kuitenkin alittuu varsin laajoilla alueilla suurten kaupunkien keskusta-alueiden ulkopuolellakin.

Kasvillisuuden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite touko-heinäkuun AOT40-arvolle $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ on ylittynyt arviointijakson 1998–2002 aikana Koillis-Lappia lukuun ottamatta kaikkialla Suomessa. AOT40-arvot kasvavat selvästi pohjoisesta etelään. Esimerkiksi vuonna 1999, jolloin otsonipitoisuudet olivat korkeimmillaan, AOT40-arvot olivat Ylivieska–Joensuu-linjan eteläpuolella yli $10\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja Kaakkois- ja Lounais-Suomessa yli $14\,000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ eli Etelä-Suomessa pitkän ajan tavoite ylitettiin varsin selvästi. Suurten ja keskikokoisten kaupunkien taajama-alueilla kasvillisuuden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite sen sijaan alittuu mittausten ja mallilaskelmien tulosten mukaan. Kaupunkien tausta-alueilla kauempana päästölähteistä pitkän ajan tavoite sen sijaan ylittyy.

Tavoitearvot

Alustavan arvioinnin tulosten mukaan ihmisten terveyden suojelua koskeva tavoitearvo $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo, saa ylittyä enintään 25 päivänä kalenterivuodessa 3 vuoden keskiarvona) alittuu Suomessa varsin selvästi kaikkialla. Tavoitearvoa vastaavat pitoisuudet ovat korkeimmillaan lounaisrannikolla ja pienenevät pohjoiseen mentäessä. Kaupunkialueilla otsonipitoisuudet alittavat tavoitearvon erittäin selvästi. Tavoitearvon ylityksiä on mitattu kaupunkien tausta-alueiden (maaseutu- ja

esikaupunkiasemat) mittausasemilla korkeimmillaankin 10 päivänä vuodessa sekä kaupunki- ja liikenneasemilla korkeimmillaan vain muutamana päivänä vuodessa.

Myös kasvillisuuden suojelua koskeva tavoitearvo touko-heinäkuun AOT40-arvolle $18\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ viiden vuoden keskiarvona alittuu Suomessa kaikkialla. Etelärannikolla AOT40-arvot olivat 1998–2002 korkeimmillaan $11\,000\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ja Ylivieska–Joensuu-linjan pohjoispuolella alle $6\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Koillis-Lapissa AOT40-arvot olivat alle $4\,500\ \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$. Kaupunkialueilla AOT40-arvot ovat vielä tätäkin alhaisempia.

Tiedotus- ja varoituskynnykset

Varoituskynnyksen ei ole Suomessa havaittu ylittyvän koskaan. Myös tiedotuskynnyksen ylittyminen on erittäin harvinaista. Väestölle tiedottamista edellyttävän otsonipitoisuuden kynnsarvon ylityksiä on Suomessa havaittu vain kahdesti. Molemmat ylitykset tapahtuivat vuonna 1996 Ilmatieteen laitoksen Etelä-Suomessa sijaitsevalla Evon tausta-asemalla. Kaupunkialueilla havaitut pitoisuudet ovat olleet aina selvästi alle tiedotus- ja varoituskynnyksen.

5 JOHTOPÄÄTÖKSET, TUTKIMUSTARPEET JA SUOSITUKSET

Tässä tutkimuksessa on kerätty ja analysoitu otsonin alustavan arvioinnin tekemiseksi suurin osa Suomessa käytettävissä olevasta mittaus- ja mallinnusaineistosta. Lisäksi tutkimusraportissa esitetään arvioinnin taustaksi otsonin muodostukseen osallistuvien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja typenoksidien päästötietoja. Aineiston perusteella on tehty ilmanlaadun 4. tytärdirektiivin vaatima alustava arviointi Suomen otsonipitoisuuksille.

Otsonipitoisuuksien arvioimiseksi on Suomessa käytettävissä varsin hyvä ja alueellisesti kattava ilmanlaadun mittausverkosto. Otsonipitoisuuden mittaustietoja on käytettävissä Ilmatieteen laitoksen tausta-asemilta vuodesta 1987 lähtien sekä kuntien ja kaupunkien mittausasemilta 1990-luvun alkupuolelta lähtien.

Tutkimuksessa hyödynnettiin EMEP:n kaukokulkeutumismallin tuloksia Suomen otsonipitoisuuksista. Käytettävissä olleet EMEP:n trajektorimallin tulokset aliarvioivat otsonipitoisuuksia Suomessa, minkä vuoksi niiden avulla voidaan arvioida lähinnä pitoisuuksien alueellista vaihtelua. Alustavan arvioinnin yhteydessä tehtiin Ilmatieteen laitoksen ja YTV:n tausta-asemien mittaustulosten perusteella mallinnus Suomen otsonipitoisuuksista interpolointimenetelmällä. Tulosten perusteella voidaan arvioida tausta-alueiden pitoisuuksia eri puolilla Suomea. Lisäksi mallinnettiin Ilmatieteen laitoksen paikallisen mittakaavan leviämismalleilla pääkaupunkiseudun otsonipitoisuuksia vuodelle 2000.

Alustavan arvioinnin tulosten perusteella ihmisten terveyden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite $120\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ (vuoden korkein päivittäinen 8 tunnin keskiarvo) ylittyy Suomessa kaikkialla sekä tausta-alueilla että kaupunkialueillakin lukuun ottamatta vilkkaiden liikennealueiden lähistöä. Myös kasvillisuuden suojelua koskeva pitkän ajan

tavoite touko-heinäkuun AOT40-arvolle $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$ ylittyy Suomessa kaikkialla tausta-alueilla Koillis-Lappia lukuun ottamatta. Suurien ja keskikokoisten kaupunkien taajama-alueilla kasvillisuuden suojelua koskeva pitkän ajan tavoite sen sijaan alittuu. Sekä ihmisten terveyden suojelua että kasvillisuuden suojelua koskevat tavoitearvot alittuvat kaikkialla Suomessa.

Otsonipitoisuuksien seuranta

Ilmanlaadun seurannan menetelmät ja taso otsonille määräytyvät pitoisuuksien suhteesta pitkän ajan tavoitteisiin. Kiinteässä paikassa tapahtuvat ja jatkuvat mittaukset ovat pakollisia seuranta-alueilla, joissa otsonipitoisuus on jonkin viimeksi kuluneen viiden vuoden aikana ylittänyt pitkän ajan tavoitteen. Alustavan arvioinnin tulosten perusteella otsonipitoisuuksien mittaaminen jatkuvasti kiinteillä paikoilla on käytännössä pakollista kaikilla seuranta-alueilla riippumatta toteutettavasta seurannan aluejaosta.

Alustavan arvioinnin tulosten perusteella voidaan otsonipitoisuuksien seurannan aluejaon varten otettavina vaihtoehtoina pitää kahta tai kolmea seuranta-aluetta. Kolmella seuranta-alueella tarvittavien kiinteiden mittausasemien lukumäärä olisi koko Suomessa yhteensä 17–18 ja kahdella seuranta-alueella yhteensä 15–16. Maaseututausta-asemia pitää direktiivin mukaan olla 1 asema/50 000 km² kaikkien seuranta-alueiden keskimääräisenä asematiheytenä eli molemmissa vaihtoehdoissa 6–7. Vähintään yhden aseman tulisi kullakin seuranta-alueella sijaita esikaupunkialueella. Typpidioksidia olisi mitattava lisäksi vähintään puolessa mittausasemia.

Ilmatieteen laitoksen suositus otsoniseurannan aluejaoksi on kolme seuranta-aluetta, koska Pohjois- ja Etelä-Suomen otsonipitoisuudet eroavat varsin selvästi toisistaan: Pohjois-Suomen tausta-alueilla otsonipitoisuudet ovat pääsääntöisesti pienempiä kuin Etelä-Suomessa. Esim. AOT40-arvot ovat Pohjois-Suomessa varsin lähellä pitkän ajan tavoitetta, mutta Etelä-Suomessa pitoisuudet ylittävät tavoitteen hyvin selvästi. Pohjois-Suomessa ei otsonipitoisuuksissa yleensä voida havaita Suomen omien päästöjen vaikutusta vaan otsonipitoisuudet ovat taustapitoisuuksien taseisia ja kohonneet otsonipitoisuudet ovat pääsääntöisesti kaukokulkeuman aiheuttamia. Etelä-Suomessa sen sijaan myös Suomen omat päästöt vaikuttavat otsonipitoisuuksiin. Lisäksi pääkaupunkiseutu muodostaa mm. suurien typenoksidipäästöjensä vuoksi selvästi otsonipitoisuuden seurannan kannaltakin oman alueensa ja pääkaupunkiseutu on myös direktiivin mukainen väestökeskittymä.

Nykyisessä asemaverkossa on tällä hetkellä riittävä määrä mittausasemia (liitekuva 2), mutta Ilmatieteen laitos suosittelee Pohjois-Suomeen perustettavaksi yhtä uutta mittausasemaa esikaupunkialueelle. Pohjois-Suomen alueella ei tällä hetkellä ole yhtään esikaupunkialueella sijaitsevaa mittausasemaa. Suositeltava sijoituspaikka olisi Oulu, koska Oulu on asukasluvultaan ja typenoksidipäästöiltään Pohjois-Suomen suurin kaupunki. Lisäksi varsin laajalla alueella Oulun leveyspiirin molemmiin puolin ei ole otsoniasemia, sillä Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun ympäristökeskusten alueilla ole tällä hetkellä yhtään otsoniasemaa. Ilmatieteen laitos suosittelee myös Kuopiossa sijaitsevan otsonin mittausaseman siirtämistä esikaupunkiin, koska Kuopion mittausasema ei tällä hetkellä ole edustava esikaupunkiasema eikä Itä-Suomessa ole yhtään esikaupunkiasemaa.

Vaihtoehtoja otsonin seuranta-alueiksi:

Seuranta-alue	Pinta-ala (km ²)	Asukasluku vuonna 2001	Asemien lukumäärä
Kolme seuranta-alueetta			
1. Pääkaupunkiseutu (YTV-alue)	743	965 000	2
2. Etelä-Suomi	118 110	3 136 000	6
3. Pohjois-Suomi	184 217	1 068 000	3
Maaseututausta	303 070		6–7
Yhteensä			16–17
Kaksi seuranta-alueetta			
4. Pääkaupunkiseutu (YTV-alue)	743	965 000	2
5. Muu Suomi	302 327	4 194 000	7
Maaseututausta	303 070		6–7
Yhteensä			15–16

Otsonin mittausasemat voisivat olla esim. seuraavat:**YTV**

2 asemaa

Maaseutu- ja esikaupunkiasematEtelä-Suomi

Turku, Ruissalo

Jokioinen (IL)

Lammi, Evo (IL)

Lahti, Metsäkangas

Tampere, Lielähti

Jyväskylä, Pupuhuhta

Pohjois-Suomi

Ouluun suositellaan perustettavaksi uusi asema

Kuopion otsoniasema suositellaan siirrettäväksi esikaupunkiin

Sodankylä (IL)

Maaseututausta asemat:

Korppoo, Utö (IL)

Virolahti (IL)

Ähtäri (IL)

Kuusamo, Oulanka (IL)

Ilomantsi (IL)

Kittilä, Sammaltunturi (IL)

Inari, Raja-Jooseppi (IL)

Otsonia muodostavien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden ja typen oksidien mittaukset

Otsonidirektiivissä todetaan, että kunkin jäsenvaltion on varmistettava, että niiden alueella toimii vähintään yksi asema, jossa mitataan otsonia muodostavien yhdisteiden pitoisuuksia. Mittausten tärkeimmät tavoitteet ovat otsonia muodostavien yhdisteiden kehityssuunnan analysointi, päästöjen vähentämisstrategioiden tehokkuuden tarkistaminen, päästökartoitusten yhtenäisyyden tarkistaminen ja epäpuhtauspäästöjen paikantaminen niiden lähteisiin. Lisätavoitteena on tukea otsonin muodostumisen ja otsonia muodostavien yhdisteiden leviämisprosessien ymmärtämistä ja valokemiallisten mallien soveltamista. Mittausaseman tulee olla tyypiltään kaupunkitausta-asema, joka suhteellisen edustavasti kattaa liikennepäästöt ja integroisi myös muita haihtuvien hiilivetyjen päästöjä, joista yleensä suurin osa on hajapäästöjä. Mitattujen pitoisuuksien tulee edustaa tyypillistä kaupungista kulkeutuvaa päästökoostumusta, jossa otsoninmuodostus aurinkoisella ilmalla käynnistyy.

Suomessa luonnollinen paikka otsonia muodostavien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden mittaamiselle on pääkaupunkiseutu, joka on Suomen suurin otsonia muodostavien yhdisteiden päästökeskittymä. Jatkuvatoiminen automatisoitu kaasukromatografi on ainoa mittausten menetelmä, jolla direktiivissä mainitut tavoitteet voidaan täysin saavuttaa. Nykyisin Suomessa toteutettava haihtuvien hiilivetyjen pitoisuusseuranta ei täytä otsonidirektiivissä esitettyjä tavoitteita, joten Ilmatieteen laitos suosittelee jatkuvatoimisten mittausten aloittamista yhdellä mittausta paikalla pääkaupunkiseudulla. Ilmatieteen laitos on yhdessä Helsingin yliopiston fysikaalisten tieteiden laitoksen kanssa perustamassa kaupunkiasemaa yliopiston kasvitieteellisen puutarhan yhteyteen lähelle tulevia toimitilojaan Kumpulaan. Sijainniltaan se on edustava kaupunkitausta ja tarjoaa yhden vaihtoehdon otsonia muodostavien haihtuvien orgaanisten yhdisteiden mittaamiselle Suomessa.

Otsonidirektiivissä todetaan, että typpidioksidia on mitattava vähintään puolessa direktiivissä edellytettävissä otsonin näytteenottopaikoissa. Mittausten on oltava jatkuvia lukuun ottamatta maaseututausta-asemia, joissa voidaan käyttää muita menetelmiä. Typen oksideja mitataan nykyisin jatkuvilla menetelmillä Suomessa yli puolessa otsonin mittausta asemista (liite 1). Ilmatieteen laitoksen otsoniasemista puolessa mitataan myös typenoksidipitoisuuksia.

Lisätutkimustarpeet

Suomessa on tällä hetkellä kohtuullisen hyvä otsonin mittausta verkko, mutta mallien käyttöä otsonipitoisuuksien arvioinnissa ja ennustamisessa tulisi edelleen kehittää. Suomessa ei tällä hetkellä ole rutiinikäytössä kaukokulkeutumismalleja otsonipitoisuuksien arviointiin tai ennustamiseen. Norjalaisten EMEP-mallien tuloksia on laajasti saatavissa, mutta niitä hyödynnettäessä on otettava huomioon, että tähän saakka käytetyn valokemiallisen mallin tulokset aliarvioivat otsonin pitoisuustasoja Suomessa. Tulevaisuudessa kannattaa hyödyntää vastikään valmistuneen, tarkemman hila-mallin tuloksia. Paikallisessa mittakaavassa käytössä olevat mallit ovat riittävän luotettavia kaupunkialueiden pitoisuustasojen alueelliseen arviointiin. Koska otsonipitoisuudet ovat kuitenkin Suomessa enemmän tausta-alueiden ongelma, olisi Suomessakin suositeltavaa ottaa rutiinikäyttöön ja kehittää myös laajemman

mittakaavan malleja otsonipitoisuuksien alueellisessa arvioinnissa. Otsonin kasvillisuudelle aiheuttamia riskejä tulisi kartoittaa AOT40-pitoisuusindeksien sijasta kasvien todelliseen otsoniannokseen perustuen.

VIITELUETTELO

AARNIO, P., MYLLYNEN, M. & KOSKENTALO, T., 2001. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2000. *Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C* 2001:8. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV), Helsinki.

AARNIO, P., HAAPARANTA, S. & KOSKENTALO, T., 2002. Air quality in Helsinki Metropolitan area year 2001. *Pääkaupunkiseudun julkaisusarja PJS C* 2002:17. Helsinki Metropolitan Area Council, Helsinki.

AMANN, M. & LUTZ, M., 2000. The revision of the air quality legislation in the European Union related to ground-level ozone. *J. Hazard. Mater.* 78: 41–62.

ANTTILA, P., ALAVIIPPOLA, B. & SALMI, T., 2003. Ilmanlaatu Suomessa – mitatut pitoisuudet suhteessa ohje- ja raja-arvoihin sekä vertailuja eurooppalaiseen pitoisuustasoihin. Ilmanlaadun julkaisuja, 33, Ilmatieteen laitos, Helsinki.

BENSON, P., 1984. CALINE 4 – a dispersion model for predicting air pollutant concentrations near roadways. FHWA/CA/TL-84/15, California Department of Transportation, Sacramento.

DERWENT, R., COLLINS, W., JOHNSON, C. & STEVENSON, D., 2002. Global ozone concentrations and regional air quality. *Environ. Sci. Technol.* 36: 379A–382A.

EMBERSON, L.D., ASHMORE, M.R., CAMBRIDGE, H.M., SIMPSON, D. & TUOVINEN, J.-P., 2000. Modelling stomatal ozone flux across Europe. *Environ. Pollut.* 109: 403–413.

EMEP 2002. <http://webdab.emep.int>

ENTEC, 2002. *Quantification of emissions from ships associated with ship movements between ports in the European Community*. Final Report for European Commission, Entec UK Limited, Northwich, UK.

EU, 2002. Directive of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants. *Official Journal of European Communities* 44, L 309: 22.

FAGERLI, H., SIMPSON, D., TSYRO, S., SOLBERG, S. & AAS, W., 2003. Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe, Part II. Unified EMEP model performance. *EMEP Status Report 1/2003*. Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

HERTEL, O. AND BERKOWICZ, R., 1989. Modelling NO₂ concentrations in a street canyon. DMU Luft-A131. National Environmental research Institute, Roskilde, 31 p.

HÄRKÖNEN, J., VALKONEN, E., KUKKONEN, J., RANTAKRANS, E., LAHTINEN, K., KARPPINEN, A. AND JALKANEN, L., 1996. A model for the

dispersion of pollution from a road network. Finnish Meteorological Institute, Publications on Air Quality 23. Helsinki, 34 p.

JOHANSSON, M., SUUTARI, R., BAK, J., LÖVBLAD, G., POSCH, M., SIMPSON, D., TUOVINEN, J.-P. & TØRSETH K. 2001. The importance of nitrogen oxides for the exceedance of critical thresholds in the Nordic countries. *Water, Air Soil Pollut.* 130, 1739-1744.

JONSON, J.E., SUNDET, J.K. & TARRASÓN, L. 2001. Model calculations of present and future levels of ozone and ozone precursors with a global and a regional model. *Atmos. Environ.* 35: 525–537.

KARPPINEN, A., KUKKONEN, J., ELOLÄHDE, T., KONTTINEN, M., KOSKENTALO, T. & RANTAKRANS, E., 2000 a. A modelling system for prediction urban air pollution. Model description and applications in the Helsinki metropolitan area. *Atmos. Environ.* 34:22, s. 3723–3733.

KARPPINEN, A., KUKKONEN, J., ELOLÄHDE, T., KONTTINEN, M. & KOSKENTALO, T., 2000 b. A modelling system for predicting urban air pollution. Comparison of model predictions with the data of an urban measurement network. *Atmos. Environ.* 34:22, s. 3735–3743.

KARPPINEN, A., 2001. Meteorological pre-processing and atmospheric dispersion modelling of urban air quality and applications in the Helsinki metropolitan area. Contributions 33, Finnish Meteorological Institute, Helsinki.

KUKKONEN, J., HÄRKÖNEN, J., WALDEN, J., KARPPINEN, A. AND LUSA, K., 2001. Evaluation of the dispersion model CAR-FMI against data from a measurement campaign near a major road. *Atmos. Environ.* 35, pp. 949-960.

KUKKONEN, J., PARTANEN, L., KARPPINEN, A., WALDEN, J., KARTASTENPÄÄ, R., AARNIO, P., KOSKENTALO, T. AND BERKOWICH, R., 2002. Evaluation of the OSPM model combined with urban background model against the data measured in 1997 in Runeberg Street, Helsinki. *Atmos. Environ.* 37, pp. 1101-1112.

LAURILA, T., 1996: Effects of environmental conditions and transport on surface ozone concentrations in Finland. *Geophysica*, **32**, 1-2, 167-194.

LAURILA, T., 1999. Observational study of transport and photochemical formation of ozone over northern Europe. *J. Geophys. Res.* 104: 26235–26243.

LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P. & LINDFORS, V., 2001. Frequency distributions of ozone concentration and the uncertainty in the AOT40 index. In: Midgley P.M., Reuther M. & Williams M. (eds.), *Transport and Chemical Transformation in the Troposphere: Proceedings of the EUROTRAC-2 Symposium 2000*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, CD-ROM, pp. 1300–1304.

LAURILA, T., TUOVINEN, J.-P., TARVAINEN, V. & SIMPSON, D., 2003. Trends and scenarios of ground-level ozone concentrations in Finland, submitted to *Boreal Env. Res.*

LIISA 2001.1. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöjen laskentajärjestelmä. LIISA 2001.1 tulokset. Kari Mäkelä, VTT Rakennus ja yhdyskuntatekniikka, Espoo. <http://lipasto.vtt.fi/lipasto/liisa/>.

LUHAR, K. L. & PATIL, R. S., 1989. A general finite line source model for vehicular pollution prediction. *Atmos. Environ.* 23, 555–562.

MÄKELÄ, K., KANNER, H., & LAURIKKO, J., 1999. Suomen tieliikenteen pakokaasupäästöt LIISA 1998 – laskentajärjestelmä. VTT Yhdyskuntatekniikka, tutkimusraportti 504. Espoo.

MÄKELÄ, K. 2002. Tieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmän uudistus. Esitelmä, 27. Ilmansuojelupäivät, 20.–21.8.2002, Lappeenranta.

MÄKELÄ, K., TUOMINEN, A., PÄÄKKÖNEN, E., 2002a. Suomen liikenteen päästöjen laskentajärjestelmä LIPASTO 2001. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti RTE 3164/02. Espoo.

MÄKELÄ, K., TUOMINEN, A., PÄÄKKÖNEN, E., 2002b. Suomen rautatieliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä RAILI 2001. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti RTE 3165/02. Espoo.

MÄKELÄ, K., TUOMINEN, A., PÄÄKKÖNEN, E., 2002c. Suomen vesiliikenteen päästöjen laskentajärjestelmä MEERI 2001. VTT Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka. Tutkimusraportti RTE 3166/02. Espoo.

PESONEN, R., RANTAKRANS, E., PIETARILA, H., KARPPINEN, A., KOSKENTALO, T. & ELOLÄHDE, T., 1996. Typen oksidien leviämislaskelmat pääkaupunkiseudulla. *SIHTI 2. Energia- ja ympäristötekniikan tutkimusohjelma. Projekti 124 Y.* Ilmatieteen laitos, Ilmanlaatu, Helsinki.

PIETARILA, H., PESONEN, R., RASILA, T. & RANTAKRANS, E., 1997. Turun seudun ilmanlaatatutkimus. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu, Helsinki.

PIETARILA, H., RASILA, T., RANTAKRANS, E. & PESONEN, R., 2000. Keskustatunnelin ilmanlaatuvaikutukset. Hiilimonoksidi- ja typenoksidipäästöjen leviämiselvitys. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu, Helsinki.

PIETARILA, H. & VARJORANTA, R. 2001. Kuopion typenoksidipäästöjen leviämislaskelmat. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.

PIETARILA, H., SALMI, T., SAARI, H. & PESONEN, R., 2001a. Ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa – Rikkidioksidi, typen oksidit, PM₁₀ ja lyijy. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.

- PIETARILA, H., SALMI, T., SAARI, H. & PESONEN, R., 2001b. Ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa – Aluejako. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.
- PIETARILA, H., ALAVIIPPOLA, B., HELLÉN, H., SALMI, T., LAURILA, T. & HAKOLA, H., 2002. Ilmanlaadun alustava arviointi Suomessa – Hiilimonoksidi ja bentseeni. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.
- RANTAKRANS, E., 1990. Uusi menetelmä meteorologisten tietojen soveltamiseksi ilman epäpuhtauksien leviämismalleissa. *Ilmansuojelu-uutiset* 1/90, s. 18–20.
- RASILA, T., PIETARILA, H., VARJORANTA, R. & SAVUNEN, T., 2000. Typenoksidipäästöjen leviämislaskelmat Oulussa. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.
- RINNE, J., LAURILA, T. & KIVI, R., 2003. Horizontal transport of ozone in the troposphere over the northern Scandinavia as derived from ozone sounding data. Submitted to *Geophys. Res. Lett.*
- RUMMUKAINEN, M., LAURILA, T., & KIVI, R., 1996: Yearly cycle of lower tropospheric ozone at the Arctic Circle. *Atmospheric Environment*, 30, 1875-1885.
- SAARINEN, 2002. Päästötietojen tuottamisesta ja raportoinnista. Esitelmä Lappeenrannan ilmansuojelupäivillä 21.8.2002. Kristiina Saarinen, Suomen ympäristökeskus.
- SEINFELD, J.H., 1986. Atmospheric chemistry and physics of air pollution. A Wiley Interscience Publication, New York, 738 p.
- SALMI, J., PIETARILA, H., RASILA, T., 2002. Tampereen seudun typenoksidipäästöjen leviämislaskelmat vuosille 2000 ja 2002. Ilmatieteen laitos, ilmanlaadun tutkimus, Helsinki.
- SAVOLA, M. & VIINIKAINEN, M., 1995. Lentoliikenteen päästöt Suomessa. MOBILE Liikenteen ja energiankäytön ja ympäristövaikutusten tutkimusohjelma, raportti MOBILE 212Y-1. Ilmailulaitos, lennonvarmistusosasto, järjestelmätoimisto, raportti A21/95. Vantaa.
- SCHEEL, H. E., ARESKOU, H., GEISS, H., GOMISCEK, B., GRANBY, K., HASZPRA, L., KLASINC, L., KLEY, D., LAURILA, T., LINDSKOG, A., ROEMER, M., SCHMITT, R., SIMMONDS, P., SOLBERG, S., TOUPANCE, G., 1997: On the spatial distribution and seasonal variation of lower-troposphere ozone over Europe. *J. Atmos. Chem.*, 28, 11-28.
- SIMPSON, D., OLENDZYŃSKI, K., SEMB, A., STØREN, E. & UNGER, S., 1997. Photochemical oxidant modelling in Europe: multi-annual modelling and source-receptor relationships. *EMEP/MSC-W Report* 3/97, Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

SIMPSON, D., FAGERLI, H., JONSON, J. E., TSYRO, S., WIND, P. & TUOVINEN, J.-P., 2003. Transboundary acidification, eutrophication and ground level ozone in Europe, Part I. Unified EMEP model description. *EMEP Status Report 1/2003*. Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

SOLBERG, S., BERGSTRÖM, R., LANGNER, J., LAURILA, T., SJÖBERG, K. & LINDSKOG, A., 2002. Changes in ozone episodes due to emission reductions. A Nordic study. *EMEP/CCC-Report 10/2002*, Norwegian Institute for Air Research, Kjeller.

SYKE, 2001. UNECE convention on long range transboundary air pollution. Revised Finnish Non Methane Volatile Organic Compound Emissions Time Series for the Years 1988 – 1999 with Information on the Emission Sources and Calculation Methods. Documentation of the calculation. Helsinki 15th August 2001.

SYKE, 2002a. National emissions: Main Pollutants, Particulate Matter and Heavy Metals. Reporting of year 2000 emissions. 21 February 2002.

SYKE, 2002b. Hiilimonoksidi- ja NMVOC-päästöjen alueellinen jakautuminen UNECE:n kaukokulkeutumisopimuksen EMEP-ohjelman karttamallin mukaisella alueella Suomessa vuonna 2000. SYKE/IPTJ.

SYKE, 2002c. VAHTI-järjestelmän tiedot vuodelta 2000. 13.5.2002.

SYKE, 2003. <http://www.ymparisto.fi/ympsuo/ilma/laatu/sektpaas.htm>

TUOVINEN, J.-P., 2000. Assessing vegetation exposure to ozone: properties of the AOT40 index and modifications by deposition modelling. *Environ. Pollut.* 109: 361–372.

UN/ECE, 1999. Protocol to the 1979 Convention on Long-range Transboundary Air Pollution to Abate Acidification, Eutrophication and Ground-level Ozone. UN/ECE Document EB/AIR/1999/1, United Nations, New York, Geneva.

VAN AALST, R., EDWARDS, L., PULLES, T., DE SAEGER, E., TOMBROU, M., TØNNESSEN, D., 1998. Guidance report on preliminary assessment under EC air quality directives. Technical report No 11, European Environmental Agency, Copenhagen.

VARJORANTA, R., PIETARILA, H. & HAARALA, S., 1999. Energiantuotannon, teollisuuden ja autoliikenteen rikkidioksidi- ja typenoksidipäästöjen vaikutukset Porin ilmanlaatuun. Ilmatieteen laitos, ilmanlaatu. Helsinki.

Vna 711/2001. Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta. Annettu Helsingissä 9.8.2001.

96/62/EY. Neuvoston direktiivi ilmanlaadun arvioinnista ja hallinnasta. Annettu 27.9.1996.

1997/101/EY. Neuvoston päätös ilman epäpuhtauksia mittaavien jäsenvaltioiden mittausasemaverkostojen ja yksittäisten mittausasemien tietojenvaihtojärjestelmän käyttöönottamisesta. Tehty 27.1.1997.

1999/30/EY. Neuvoston direktiivi ilmassa olevien rikkidioksidin, typpidioksidin ja typen oksidien, hiukkasten ja lyijyn pitoisuuksien raja-arvoista. Annettu 22.4.1999.

2000/69/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ilmassa olevan bentseenin ja hiilimonoksidin pitoisuuksien raja-arvoista. Annettu 16.11.2000.

2001/752/EY. Komission päätös ilman epäpuhtauksia mittaavien jäsenvaltioiden mittausasemaverkostojen ja yksittäisten mittausasemien tietojenvaihtojärjestelmän käyttöönottamisesta tehdyn neuvoston päätöksen 97/101/EY liitteiden muuttamisesta. Tehty 17.10.2001.

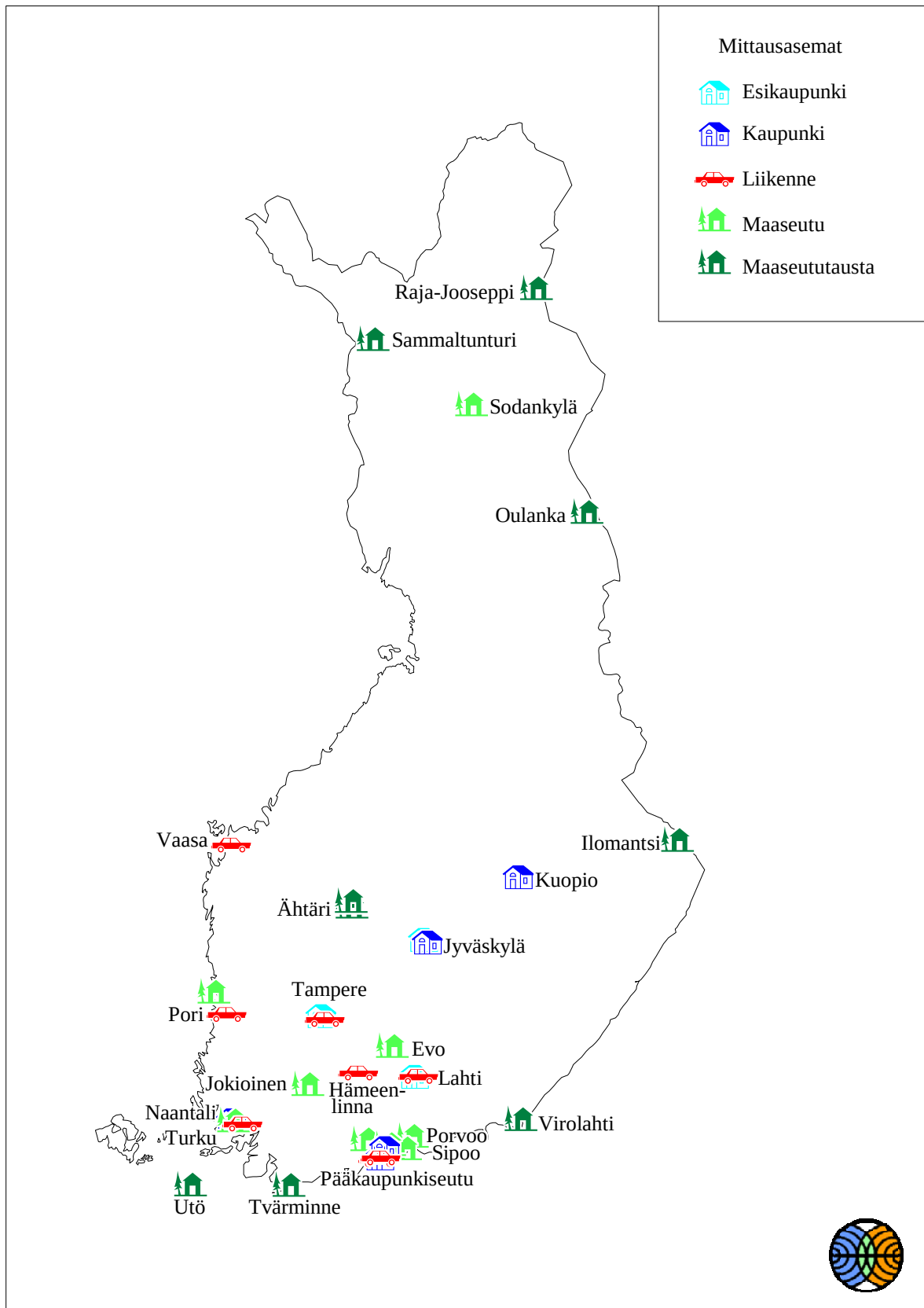
2002/3/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ilman otsonista. Annettu 12.2.2002.

LIIETTEET

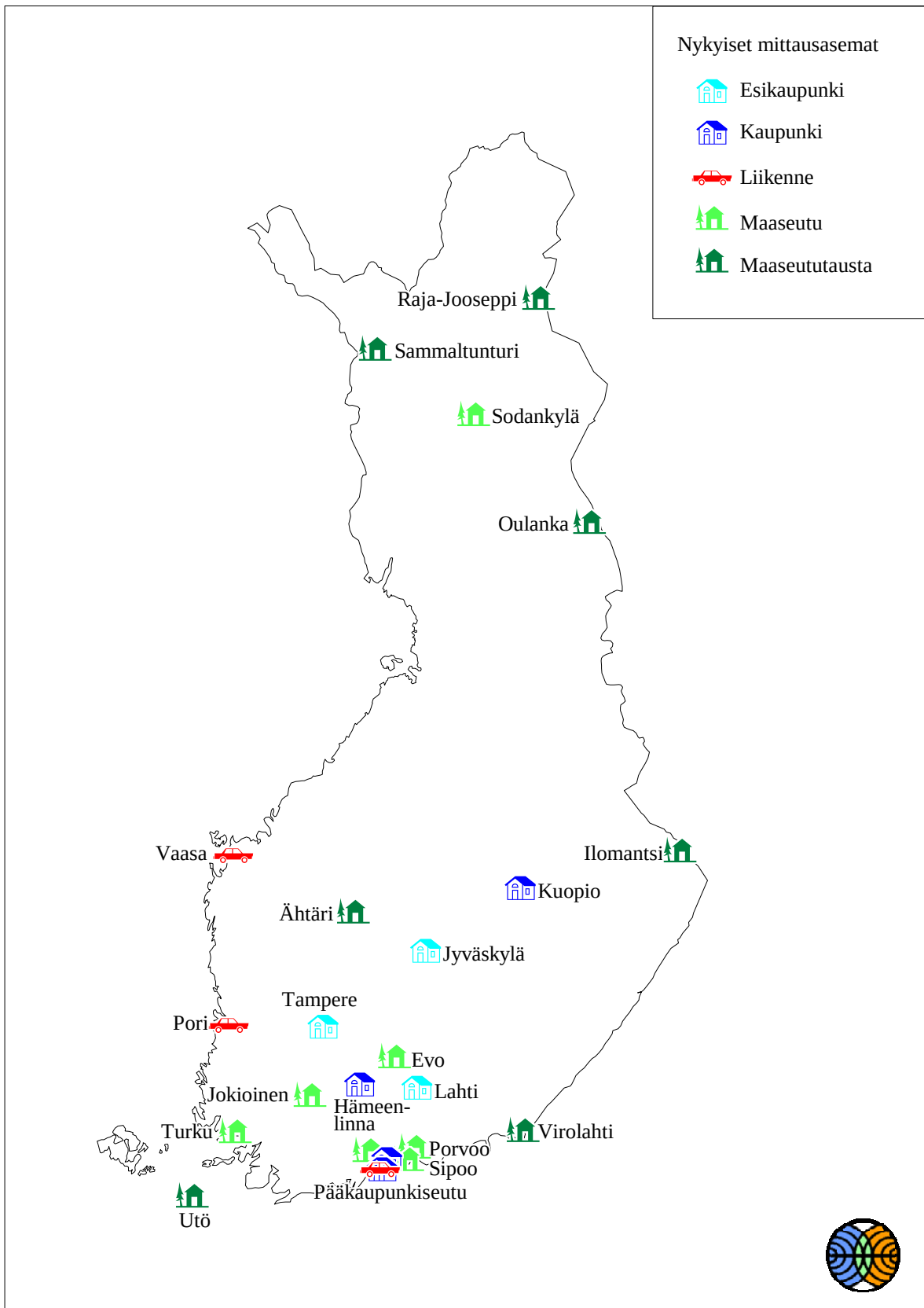
Liite 1. Otsonipitoisuuksia mittaavat ilmanlaadun seuranta-asemat vuosina 1998–2002 ryhmiteltynä asematyypin mukaan. Viimeisessä sarakkeessa on merkintä ”NO_x”, jos asemalla mitattiin typen oksideja vuoden 2002 päättyessä.

Mittausverkon Lyhenne	Sijaintikunta	Mittausaseman nimi	Mittausmenetelmä	Mittaus alkanut	Mittaus päättynyt	NO _x 2002
Asematyyppi = LIIKENNE (eivät sovellu direktiivin mukaiseen otsonipitoisuuksien arviointiin)						
HÄMEENLINNA	HÄMEENLINNA	Raatihuoneenkatu	UV-fotometria	10.1.1997	14.2.2002	
PORI	PORI	Itätulli	UV-fotometria	6.4.2001	8.1.2003	
TAMPERE	TAMPERE	Raatihuone	UV-fotometria	1.4.1992	31.12.2000	
TURKU	TURKU	Turun kauppatori	UV-fotometria	1.1.1998	31.12.1998	
VAASA	VAASA	Kirkkopuistikko	UV-fotometria	22.4.1997		
VALKEAKOSKI	VALKEAKOSKI	Terveyskeskus, linja 2	DOAS	1.1.1990		NO _x
YTV	HELSINKI	Töölö	UV-fotometria	1.7.1986		NO _x
YTV	HELSINKI	Vallila 1	UV-fotometria	18.4.1996	13.7.1999	
Asematyyppi = KAUPUNKI (edustavuus muutamia neliökilometrejä)						
HÄMEENLINNA	HÄMEENLINNA	Cygnaeuksenkadun puisto	UV-fotometria	19.3.2002		NO _x
JYVÄSKYLÄ	JYVÄSKYLÄ	Pupuhuhta	UV-fotometria	1.1.1998	15.5.2001	
KUOPIO	KUOPIO	Kuopion keskusta 2	UV-fotometria	1.7.1997		NO _x
VALKEAKOSKI	VALKEAKOSKI	Terveyskeskus, linja 1	DOAS	1.1.1990		NO _x
YTV	HELSINKI	Kallio 2	UV-fotometria	1.1.1999		NO _x
Asematyyppi = ESIKAUKAUPUNKI (edustavuus muutamia kymmeniä neliökilometrejä)						
HAMINA	HAMINA	Haminan satama	DOAS	1.6.1991		
JYVÄSKYLÄ	JYVÄSKYLÄ	Palokka 2	UV-fotometria	16.5.2001		NO _x
LAHTI	LAHTI	Metsäkangas	UV-fotometria	1.4.1998		
TAMPERE	TAMPERE	Lielähti, Isoniemenkatu	UV-fotometria	1.4.1992		
YTV	VANTAA	Tikkurila 2	UV-fotometria	1.1.1990		
Asematyyppi = MAASEUTU (edustavuus muutamia satoja neliökilometrejä)						
FORTUM	PORVOO	Mustijoki	UV-fotometria	21.8.1991		NO _x
FORTUM	SIPOO	Löparö	UV-fotometria	6.2.1987	25.5.2000	
FORTUM	SIPOO	Löparö 2	UV-fotometria	16.6.2000		
PORI	PORI	Lampaluoto	UV-fotometria	1.12.1999	31.12.2000	
TURKU	TURKU	Ruissalo Saaronniemi	UV-fotometria	1.1.1999		NO _x
YTV	ESPOO	Luukki	UV-fotometria	1.7.1987		NO _x
FMI	JOKIOINEN	Jokioinen	UV-fotometria	29.3.1999		
FMI	LAMMI	Evo (Lammi)	UV-fotometria	30.11.1994		
FMI	SODANKYLÄ	Sodankylä	UV-fotometria	3.2.1995		
Asematyyppi=MAASEUTUTAUSTA (edustavuus 1 000 - 10 000 neliökilometriä)						
FMI	KITTILÄ	Sammaltunturi	UV-fotometria	5.9.1991		NO _x
FMI	KORPPOO	Utö	UV-fotometria	2.2.1986		NO _x
FMI	ILOMANTSI	Ilomantsi	UV-fotometria	2.10.1997		
FMI	INARI	Raja-Jooseppi	UV-fotometria	19.8.1992		
FMI	KUUSAMO	Oulanka	UV-fotometria	21.10.1989		NO _x
FMI	VIROLAHTI	Virolahti	UV-fotometria	11.8.1988		NO _x
FMI	ÄHTÄRI	Ähtäri 2	UV-fotometria	30.5.1997		NO _x

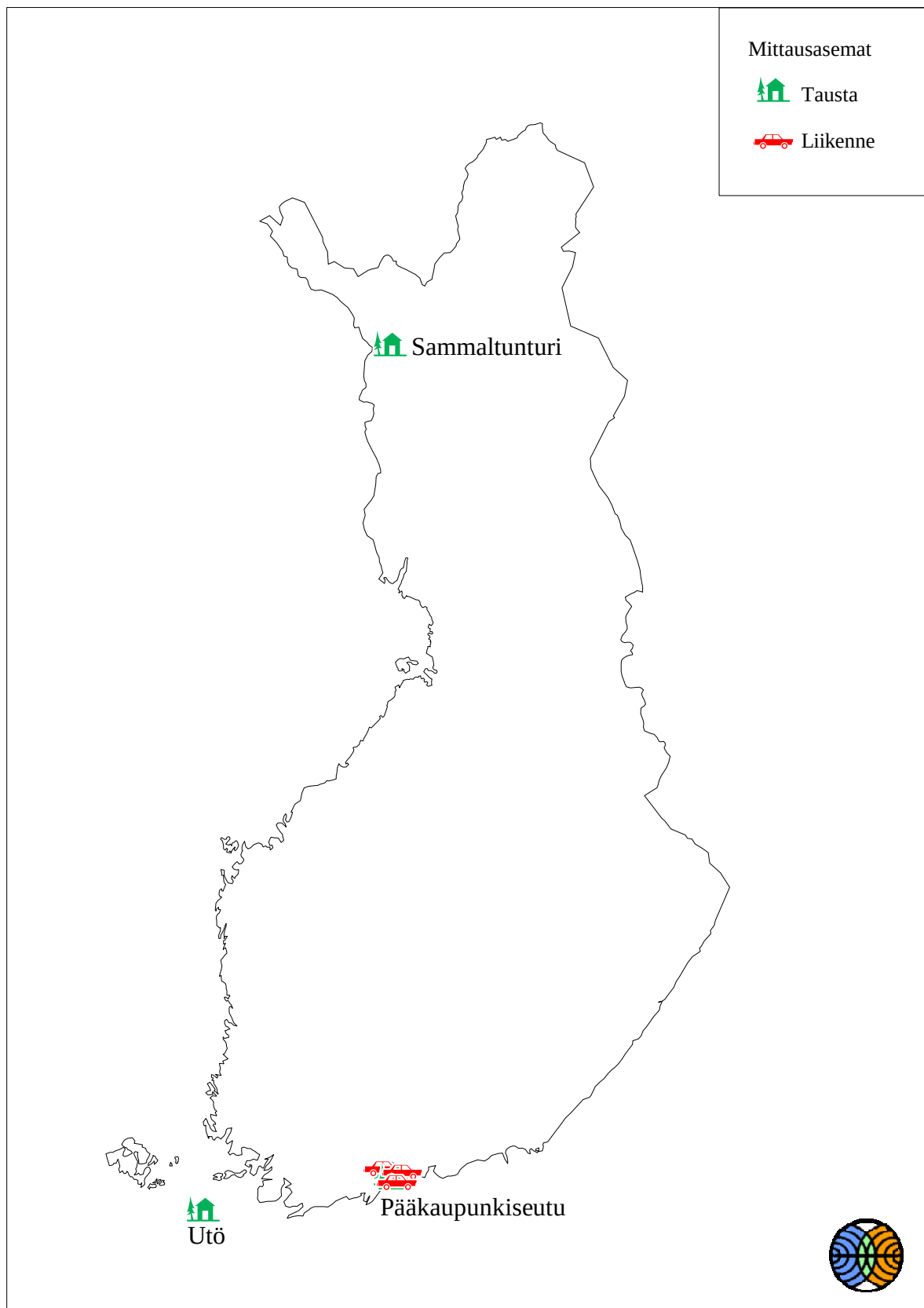
LIITEKUVAT



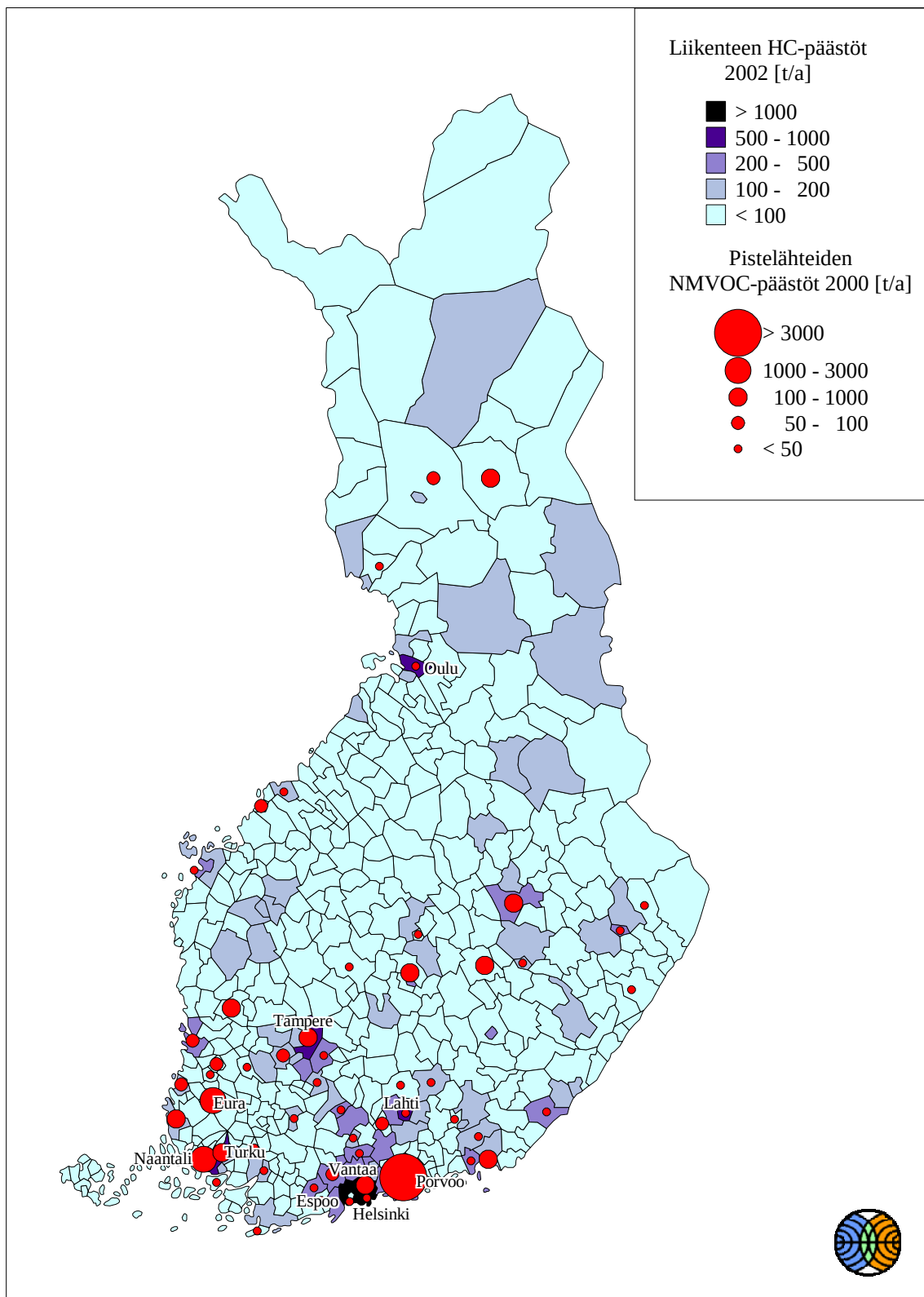
LIITEKUVA 1. Otsonin mittausasemat Suomessa 1987-2001.



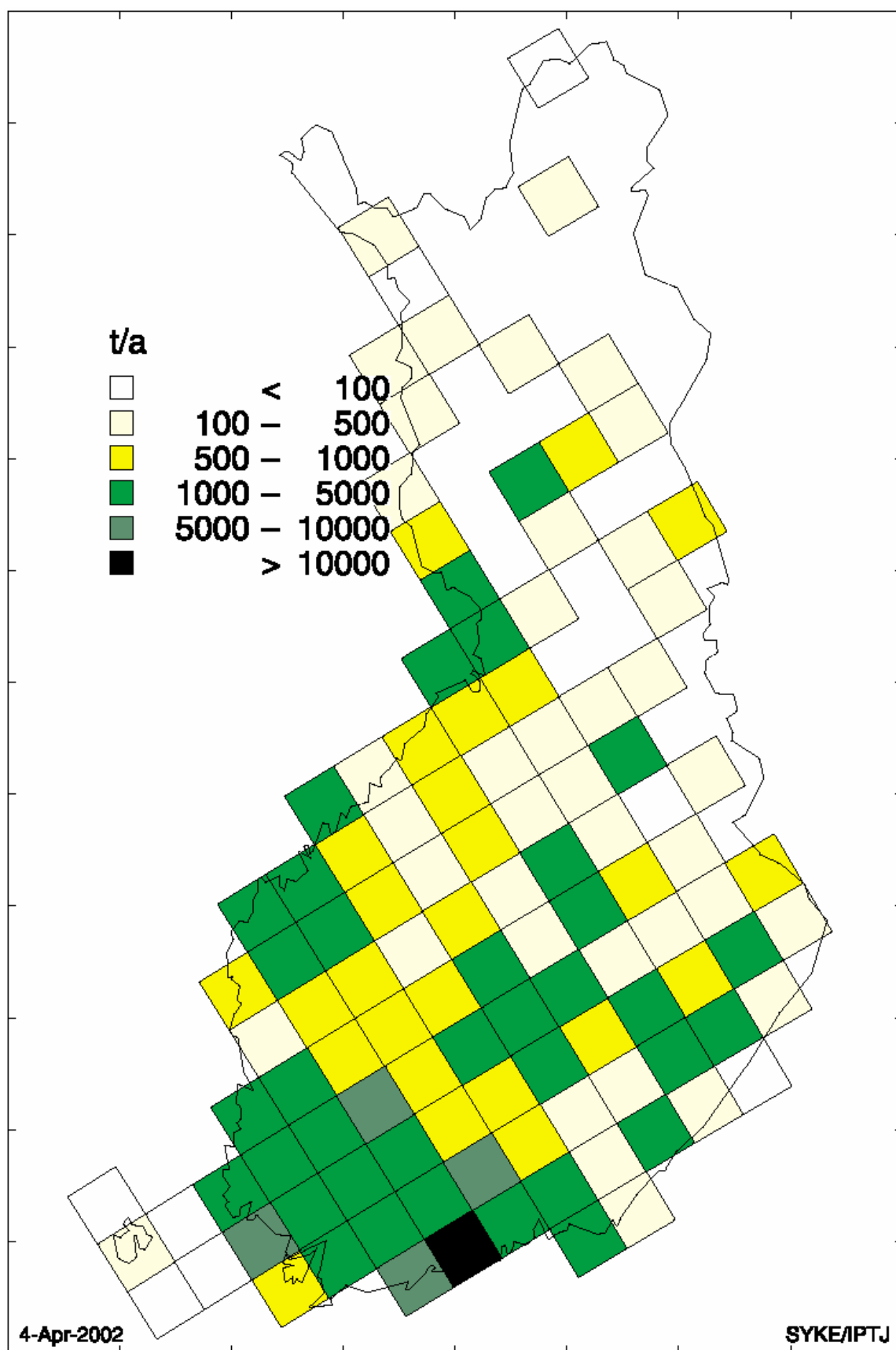
LIITEKUVA 2. Otsonin nykyiset (2002) mittausasemat.



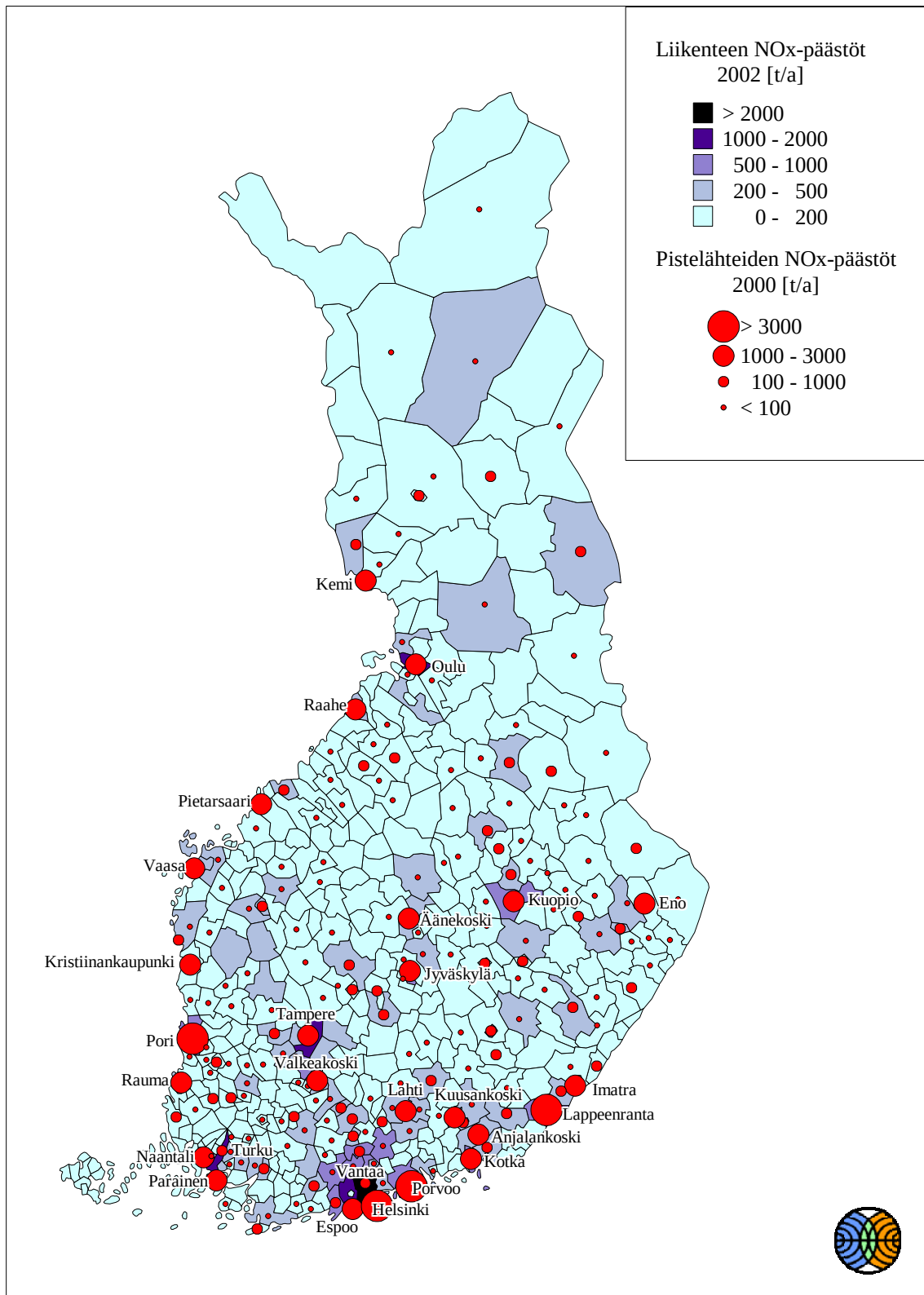
LIITEKUVA 3. Hiilivetyjen mittausasemat Suomessa.



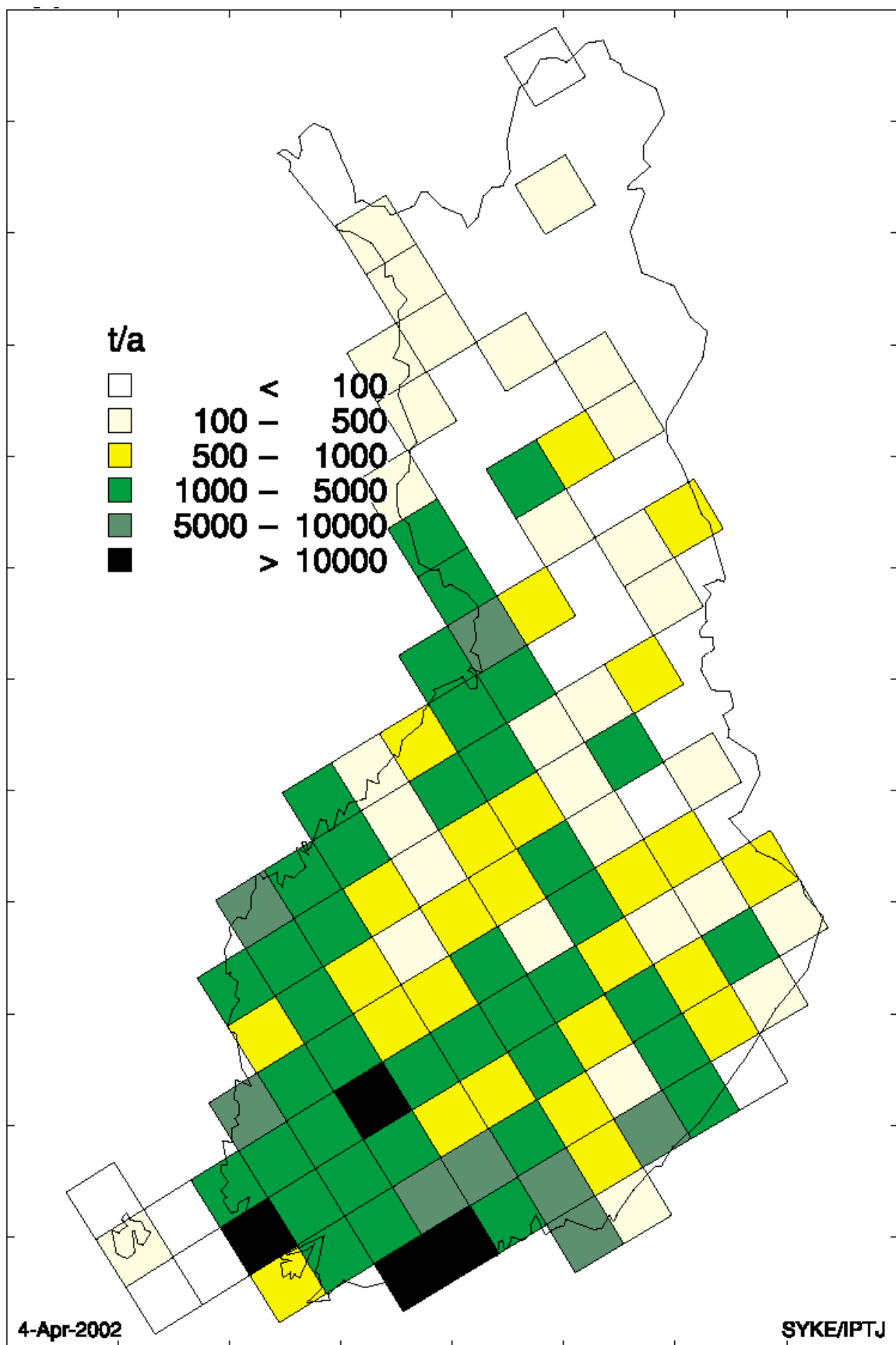
LIITEKUVA 4. Liikenteen hiilivetyypäästöt 2002 ja pistelähteiden NMVOC-päästöt 2000.



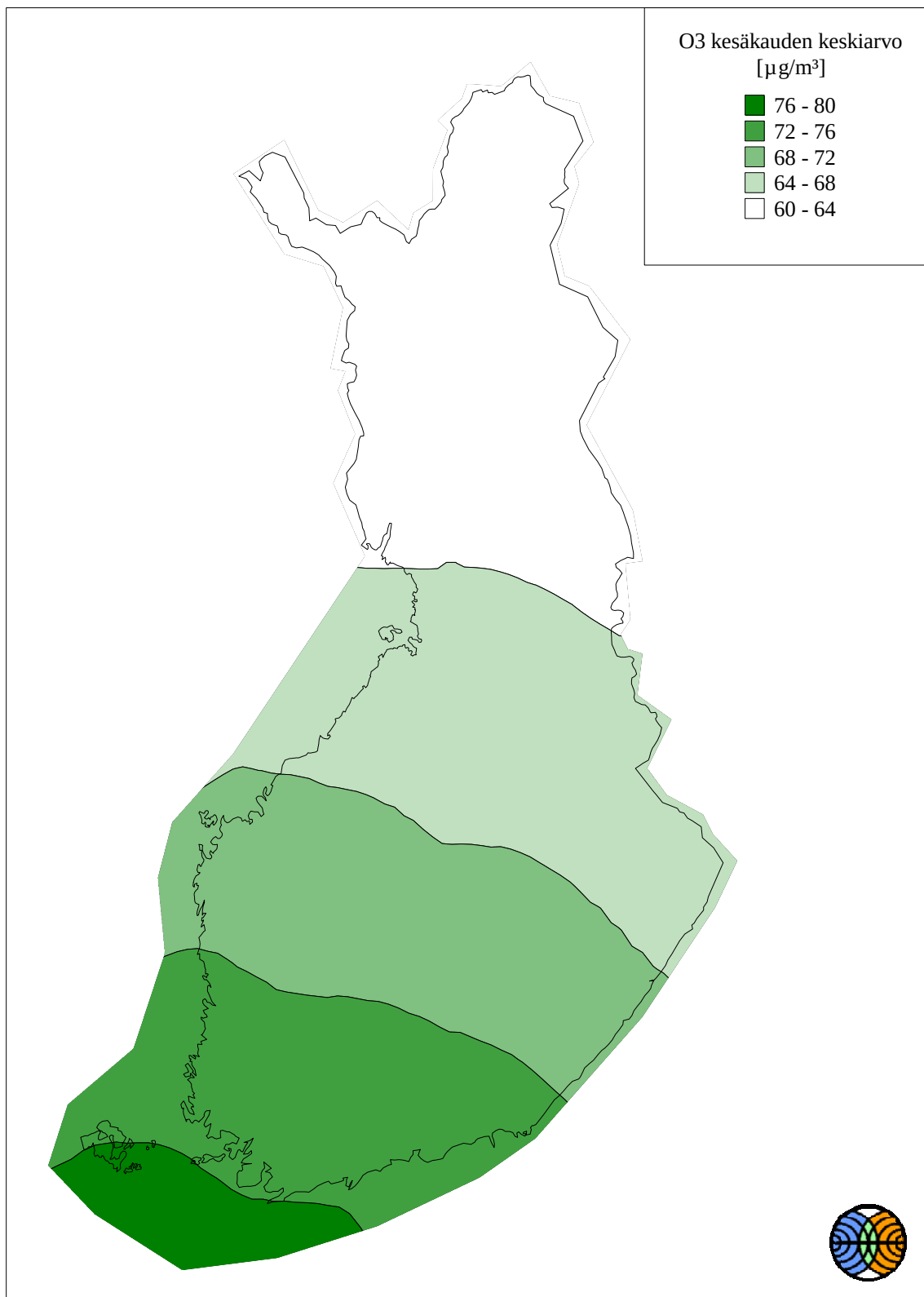
LIITEKUVA 5. Haihtuvien hiilivetyjen (NMVOC) päästöjen alueellinen jakautuminen 2000.



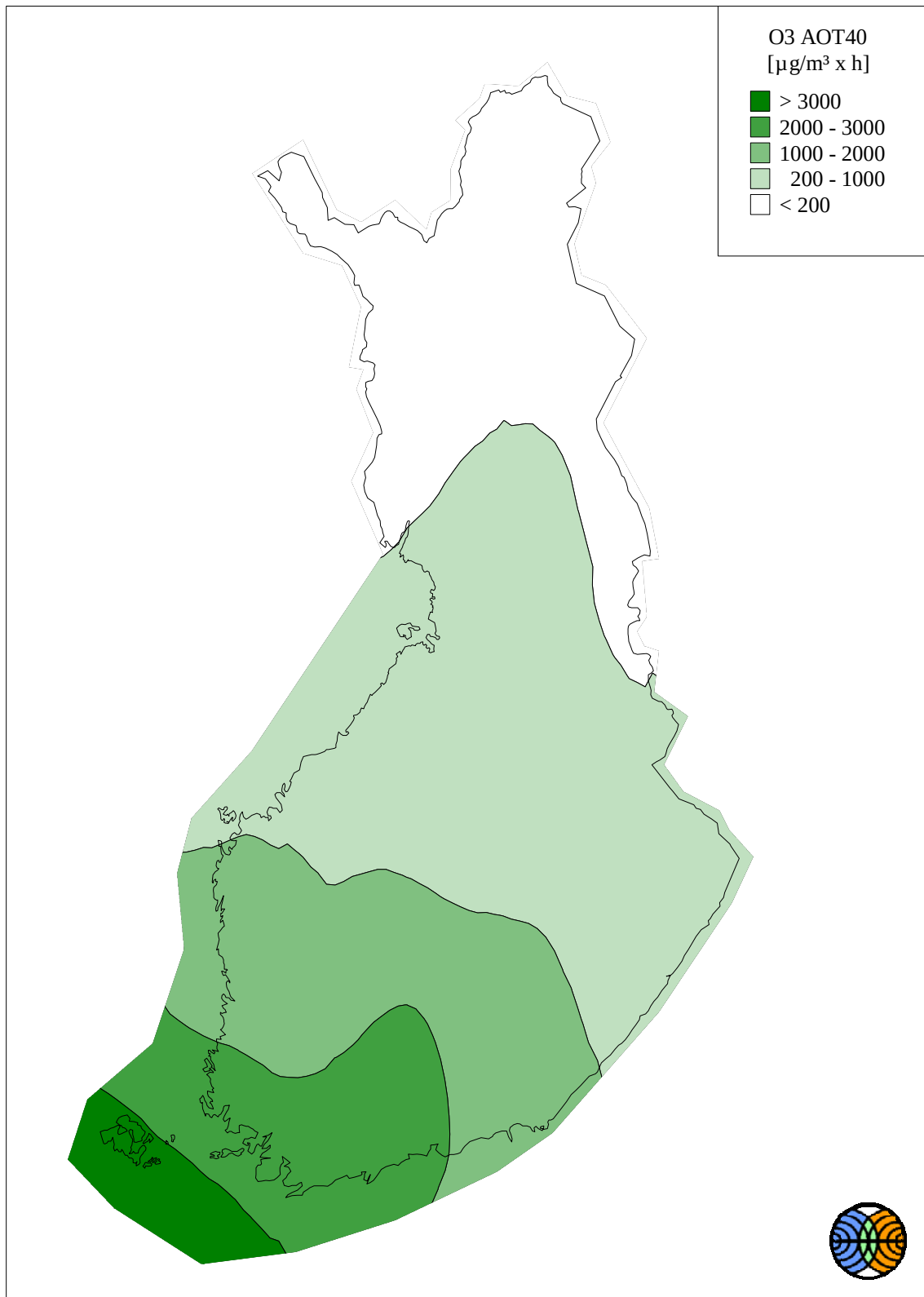
LIITEKUVA 6. Liikenteen NOx-päästöt 2002 ja pistelähteiden NOx-päästöt 2000.



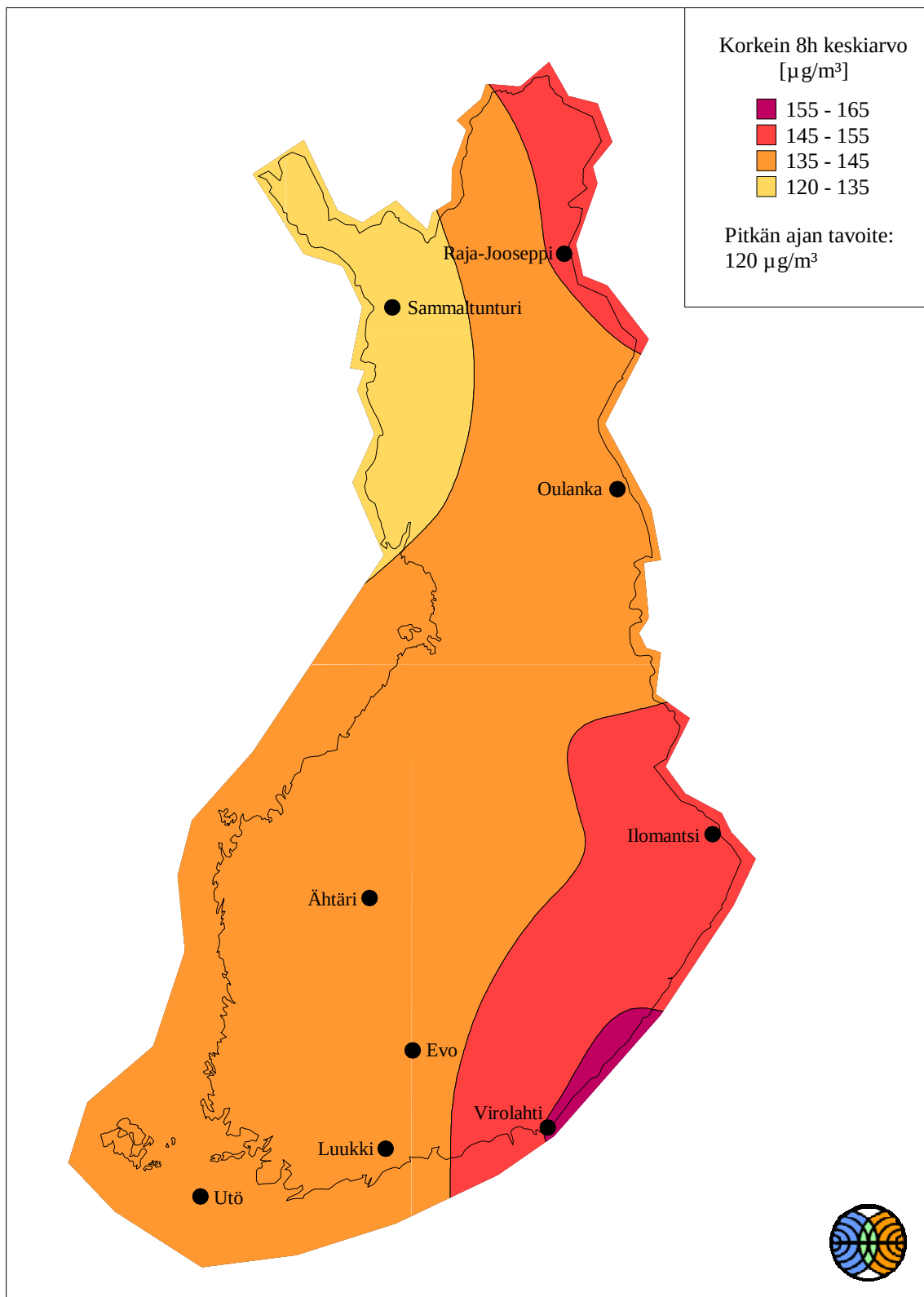
LIITEKUVA 7. Typenoksidipäästöjen alueellinen jakautuminen 2000.



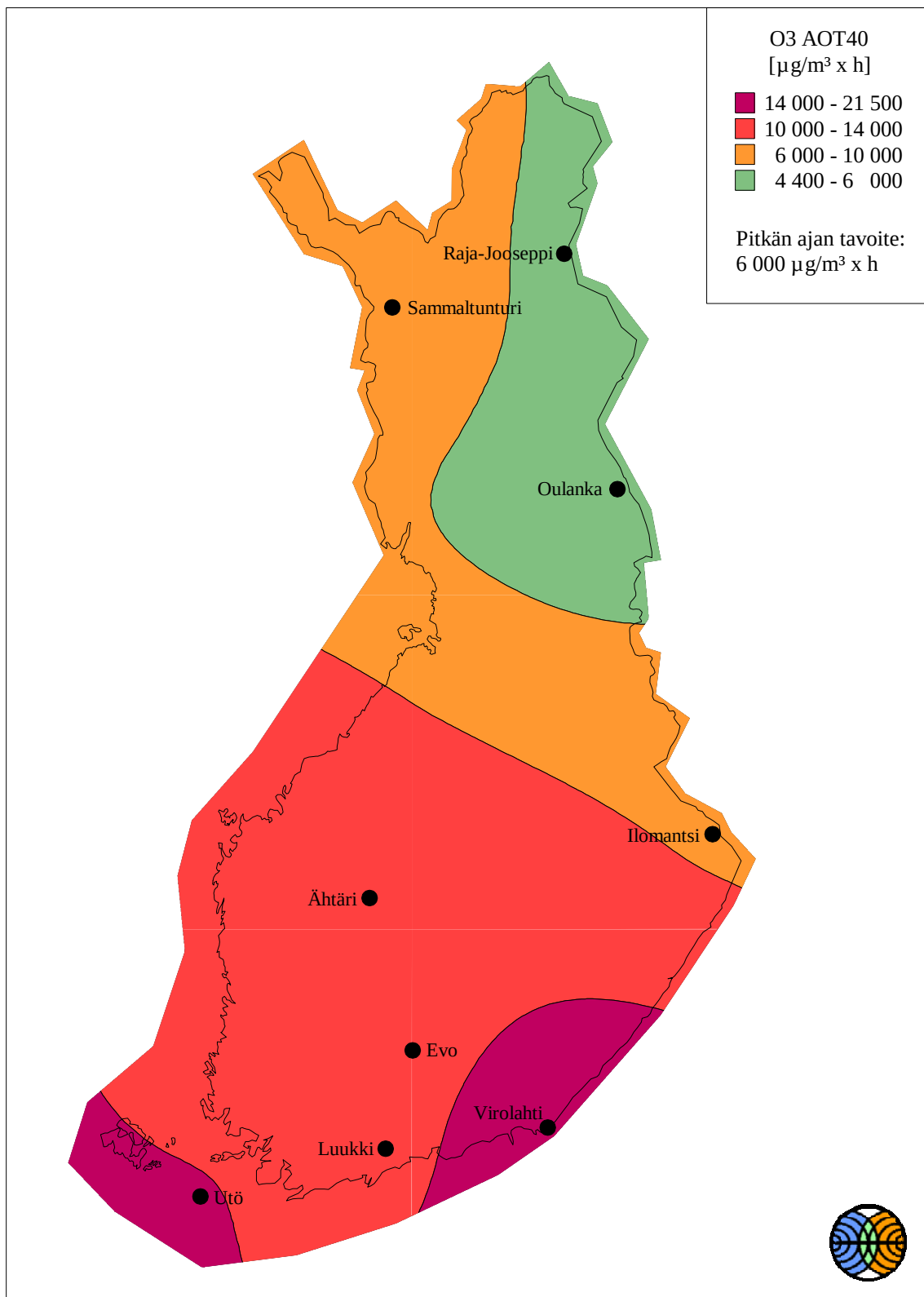
LIITEKUVA 8. Otsonin kesäkauden (huhti-syyskuu) keskiarvopitoisuus (µg/m³)
EMEP-mallin tulosten perusteella.



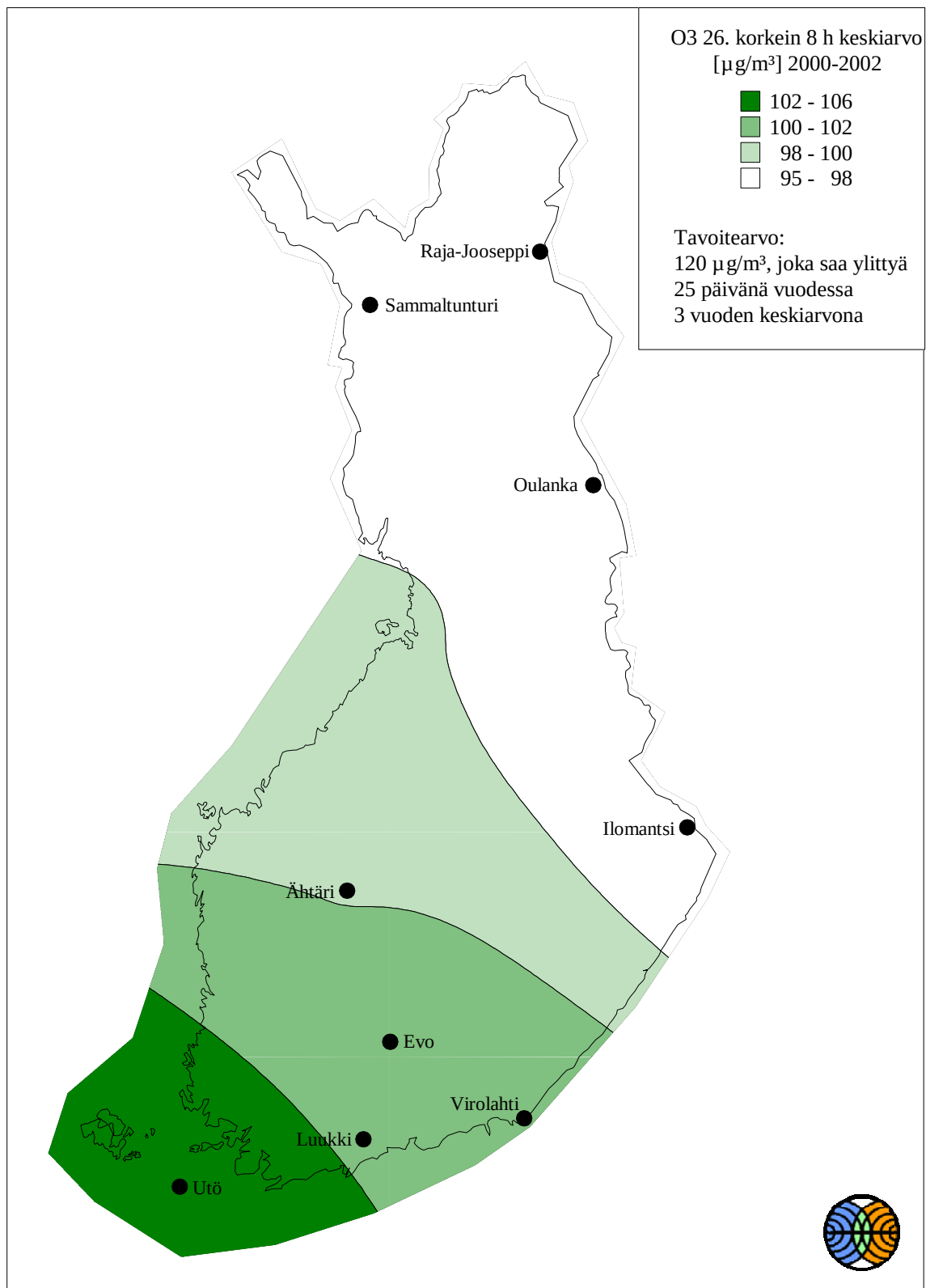
LIITEKUVA 9. Otsonipitoisuuden AOT40-arvo (touko-heinäkuu) ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) EMEP-mallin tulosten perusteella.



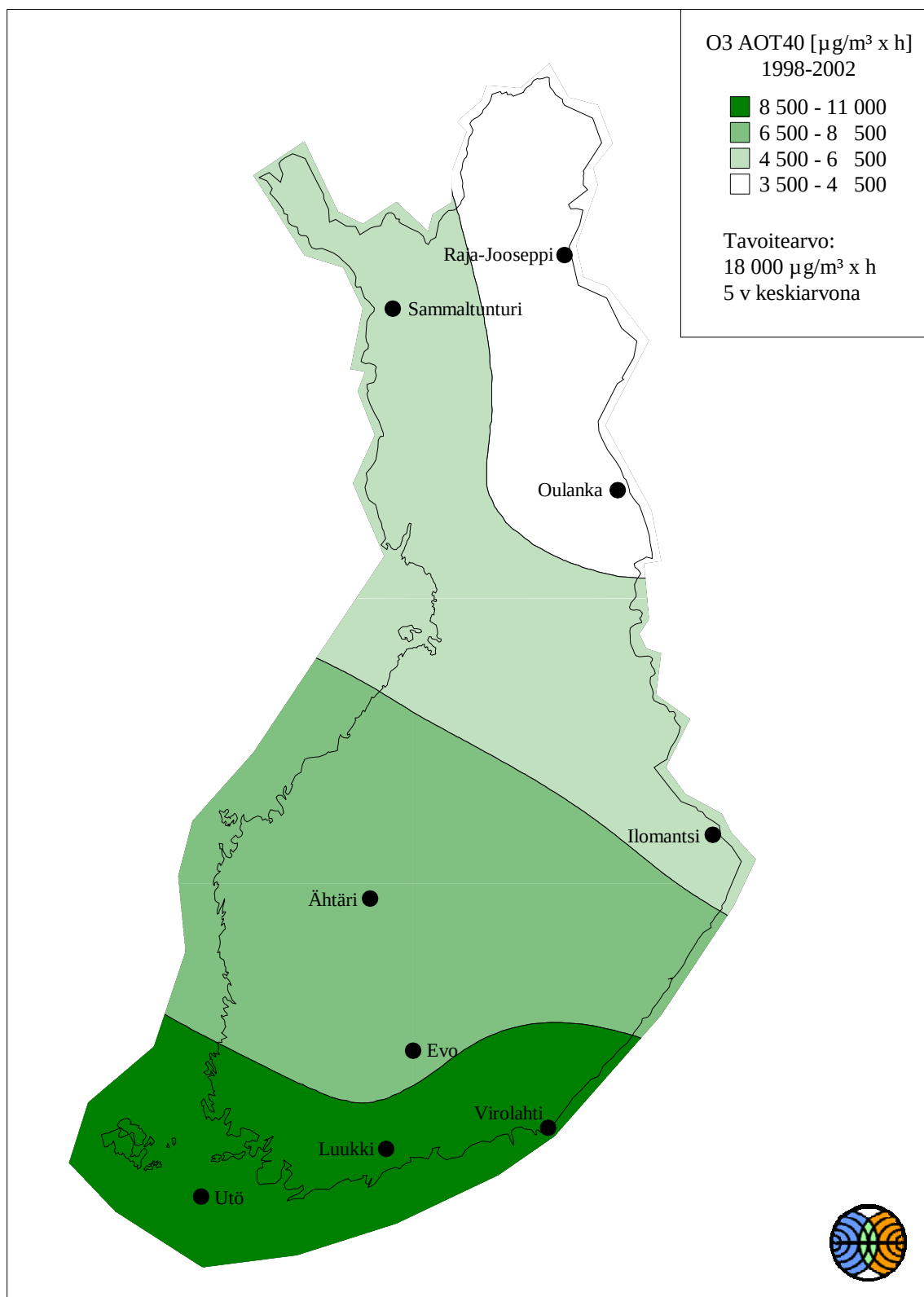
LIITEKUVA 10. Otsonin korkein 8 tunnin keskiarvopitoisuus (µg/m³) vuonna 1999 tausta-asemien mittausten perusteella.



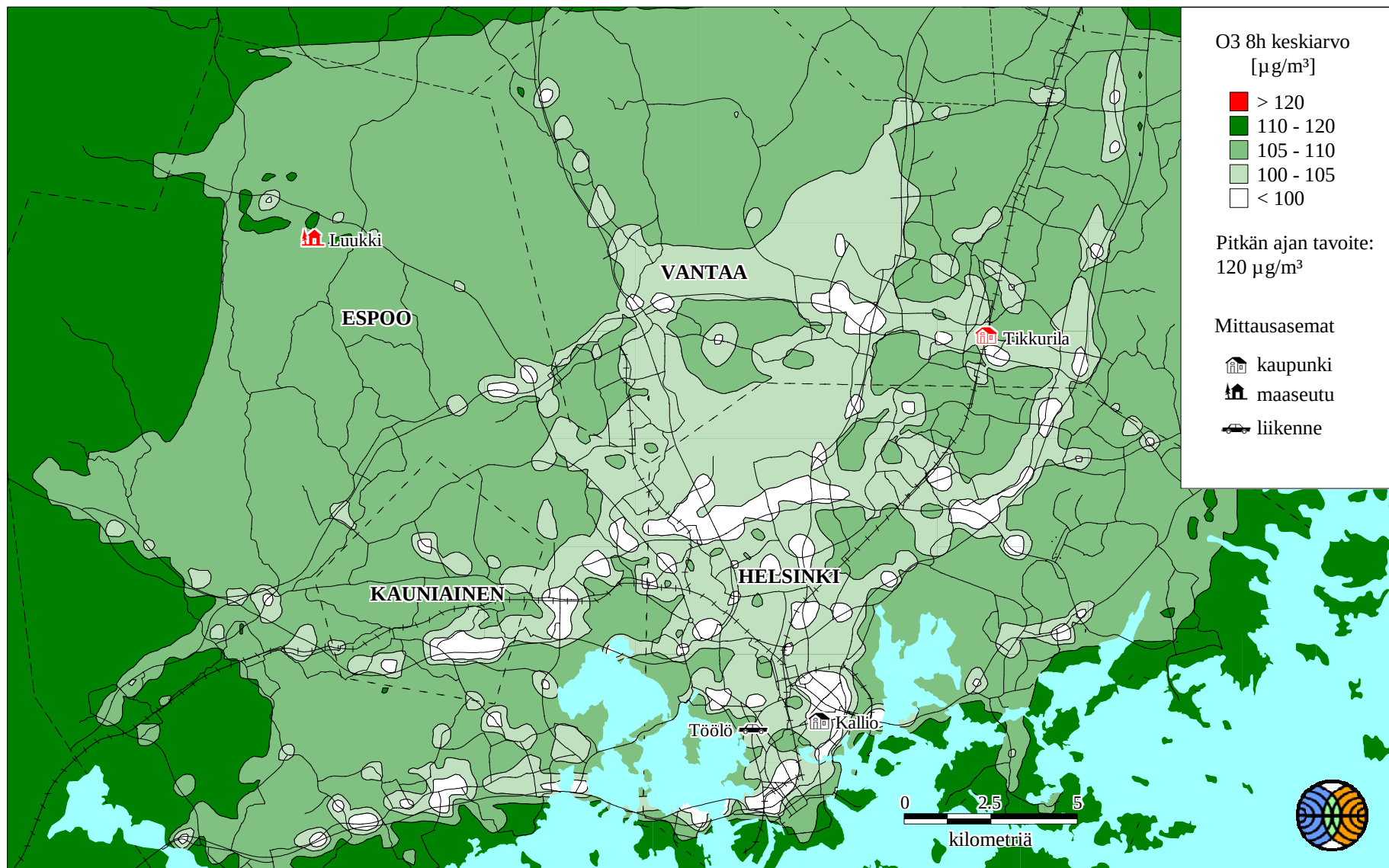
LIITEKUVA 11. Otsonin AOT40-pitoisuudet (touko-heinäkuu) (µg/m³ x h) vuonna 1999 tausta-asemien mittausten perusteella.



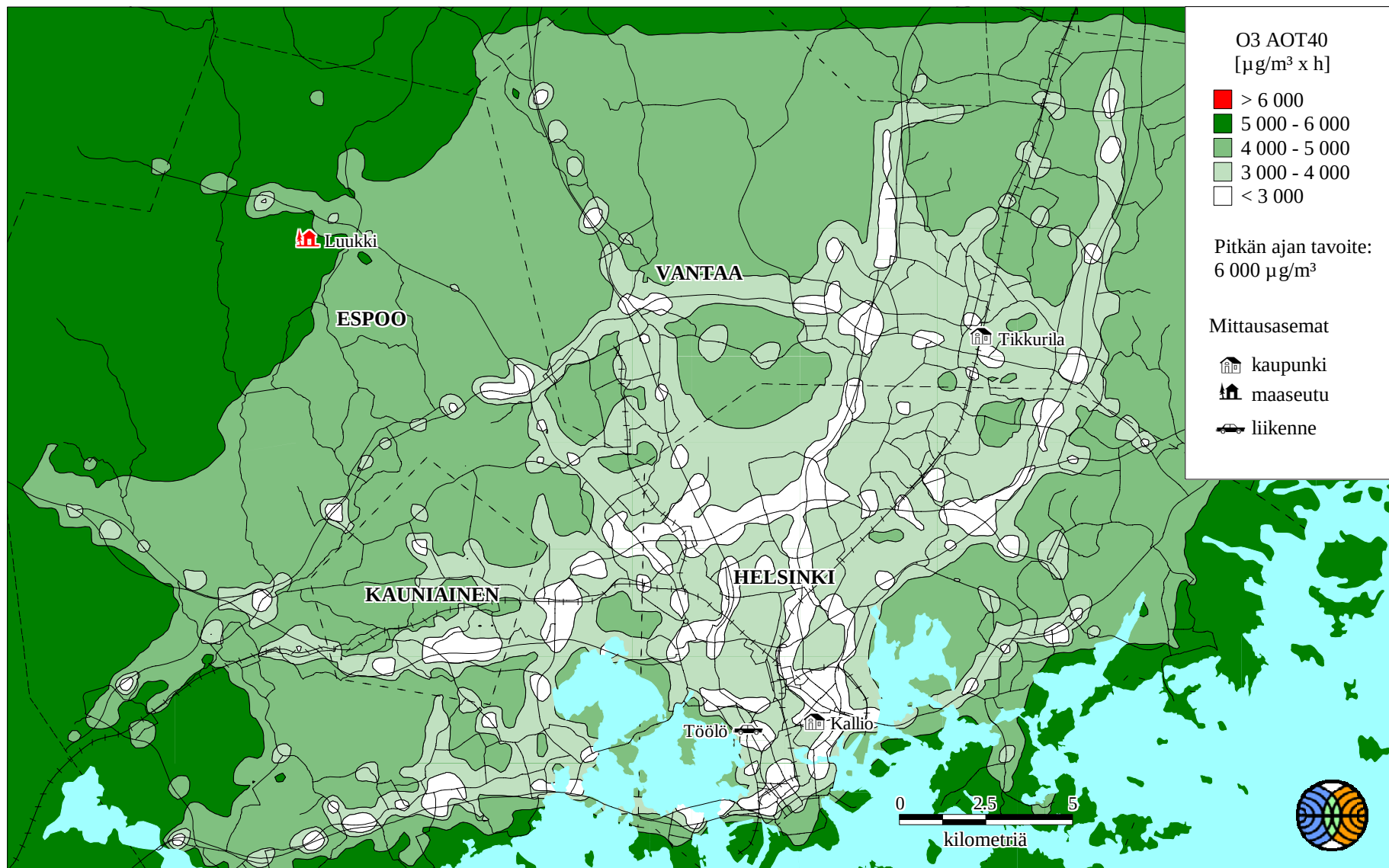
LIITEKUVA 12. Otsonin 26. korkein 8 tunnin keskiarvopitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) vuosina 2000-2002 tausta-asemien mittausten perusteella.



LIITEKUVA 13. Otsonin AOT40-pitoisuudet (touko-heinäkuu) ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) vuosina 1998-2002 tausta-asemien mittausten perusteella.



LIITEKUVA 14. Otsonin korkein 8 tunnin keskiarvopitoisuus ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) pääkaupunkiseudulla vuonna 2000.



LIITEKUVA 15. Otsonipitoisuuden AOT40-arvo (touko-heinäkuu) ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \times \text{h}$) pääkaupunkiseudulla vuonna 2000.

Ilmanlaadun tutkimus
Sahaajankatu 20 E
00810 HELSINKI
puh. (09) 19291
fax (09) 1929 5403

Air quality research
Sahaajankatu 20 E
FIN-00810 HELSINKI
tel. +358 9 19291
fax +358 9 1929 5403

www.fmi.fi



ILMATIETEEN LAITOS
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE