



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2021:6

ILMANLAATU SUOMESSA ILMANLAATUMITTAUSTEN JA SATELLIITTIHAVAINTOJEN PERUSTEELLA

BIRGITTA KOMPPULA
TOMI KARPPINEN
HENRIK VIRT
ANU-MAIJA SUNDSTRÖM
IOLANDA IALONGO
KAISA KORPI
PIA ANTILA
JATTA SALMI
JOHANNA TAMMINEN
KATJA LOVÉN

Raportteja 2021:6

**ILMANLAATU SUOMESSA ILMANLAATUMITTAUSTEN
JA SATELLIITTIHAVAINTOJEN PERUSTEELLA**

**Birgitta Komppula
Tomi Karppinen
Henrik Virta
Anu-Maija Sundström
Iolanda Ialongo
Kaisa Korpi
Pia Anttila
Jatta Salmi
Johanna Tamminen
Katja Lovén**

ILMATIETEEN LAITOS

Helsinki 6.9.2021

Julkaisija	Ilmatieteen laitos (Erik Palménin aukio 1) PL 503, 00101 Helsinki		Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi Raportteja 2021:6 Päiväys 6.9.2021
Tekijä(t)	Toimeksiantaja Ympäristöministeriö Birgitta Komppula, Tomi Karppinen, Henrik Virta Anu-Maija Sundström, Iolanda Ialongo, Kaisa Korpi Pia Anttila, Jatta Salmi, Johanna Tamminen, Katja Lovén		
Nimeke	Ilmanlaatu Suomessa ilmanlaatumittausten ja satelliittihavaintojen perusteella		
Tiivistelmä	Ilmanlaatuselvityksessä on arvioitu Suomen ilmanlaadun nykytilaa ilmanlaadun mittausten sekä satelliittihavaintojen avulla. Pitoisuuksien arvioinnissa olivat mukana seuraavat ilman epäpuhtaudet: typpidioksidi, typen oksidit, hengitettävät hiukkaset, pienhiukkaset, rikkidioksidi, hiilimonoksidi, otsoni, bentso(a)pyreeni, bentseeni, lyijy, arseeni, kadmium ja nikkeli. Näille ilman epäpuhtauksille on annettu ilmanlaadun arviointikynnykset ilmanlaatulainsäädännössä (79/2017, 113/2017). Ilmanlaadun arvioitu ilmanlaadun seuranta-alueittain. Arvioinnissa käytettiin aineistona Suomen ilmanlaatumittausten pitoisuustuloksia vuosilta 2015–2019. Satelliittihavaintoja hyödynnettiin objektiivisen arvioinnin työkaluna typpidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuuksien alueellista vaihtelun arvioinnissa. Ilmanlaadun mittausten mukaan ilmanlaatu on monin osin parantanut Suomessa. Ilmanlaadun seurantarave jatkuvin ilmanlaadun mittauksin on vähentynyt erityisesti NO₂ ja PM₁₀ osalta. Bentso(a)pyreenin mittausta tulisi lisätä kaupunkialueilla seurantatarpeen tarkennuttua. Otsonipitoisuuksien alentamispäyrymyksissä tarvitaan kansainvälisen yhteisön toimia. Rikkidioksidin, hiilimonoksidin, bentseenin ja raskasmetallien matalia pitoisuustasoja voidaan monin paikoin teollisuusalueiden ulkopuolella arvioida muilla menetelmillä kuin jatkuvin mittauksin ja jatkuvatoimisia mittausta onkin jo vähennetty. Satelliittihavaintojen avulla typpidioksidin (NO₂) ja hiilimonoksidin (CO) pitoisuuksia ja alueellista jakaumaa on Suomessa analysoitu käyttäen pääasiassa TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) satelliittinstrumentin havaintoja. Hiilimonoksidin osalta satelliittihavaintoihin pohjautuva analyysi tehtiin ensimmäistä kertaa Suomeen. Tuloksista nähdään, että CO:n pitoisuus on Suomessa vuositasona yleisesti matala ja alueelliset erot ovat pieniä. Myös typpidioksidipitoisuus on Suomessa yleisesti verrattain matala, mutta alueelliset erot ovat hieman selvemmin nähtävissä. Korkeimmat NO₂-arvot havaitaan suurimmissa kaupungeissa. Käyttäen maanpintamittausten ja satelliittihavaintojen välistä riippuvuutta, satelliittihavaintojen koko ilmapälarin pitoisuuksista arvioitiin NO₂:n ja CO:n maanpintapitoisuudet seuranta-alueille. Satelliittimittauksista arvioitu NO₂:n vuosikeskiarvo pääkaupunkiseudulle on 28 µg/m³ ja muualla pääasiassa 10–15 µg/m³. Vastaavasti, CO:n vuosikeskiarvot Suomessa vaihtelevat pääasiassa välillä 160–164 µg/m³ eli olivat noin 0,16 mg/m³.		
Julkaisijayksiköt	Asiantuntijapalvelut ja Kaukokartoitustutkimus		
Luokitus (UDK)	Asiasanat ilmanlaatu, seuranta-alue, ilmanlaadun arviointi, ilmanlaatumittaus, satelliittihavainnot		
502.3, 551.510.42, 551.501.8			
ISSN ja avainnimeke	ISBN		
0782–6079 Raportteja - Rapporten - Reports	978–952–336–140–9 (pdf)		
DOI	Kieli	Sivumäärä	
10.35614/isbn.9789523361409	suomi	75 + 49 liitesivua	

Published by **Finnish Meteorological Institute**
(Erik Palménin aukio 1), P.O. Box 503
FIN-00101 Helsinki, Finland

Series title, number and report code

Reports 2021:6

Date 6.9.2021

Author(s)

Birgitta Komppula, Tomi Karppinen, Henrik Virta
Anu-Maija Sundström, Iolanda Ialongo, Kaisa Korpi
Pia Anttila, Jatta Salmi, Johanna Tamminen, Katja Lovén

Commissioned by

Ministry of the Environment

Title

Air quality in Finland according to air quality measurements and satellite observations

Abstract

In this report the current air quality in Finland has been assessed with air quality measurement data and satellite observations. The assessment of ambient air concentrations included following air impurities: NO₂, NO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, SO₂, CO, O₃, benzo(a)pyrene, benzene, Pb, As, Cd ja Ni. For these pollutants air quality assessment thresholds are given in air quality legislation (2008/50/EY, 2004/107/EY). Assessment has been performed for air quality zones. The main data set included air quality measurements performed in Finland during 2015–2019. Satellite observations were used as an objective assessment tool in analysis of the spatial variation of NO₂ and CO concentrations.

Air quality measurements show that air quality has improved in Finland in many respects. Especially the need to monitor NO₂ and PM₁₀ with continuous measurements has decreased. Growing understanding of national benzo(a)pyrene concentrations has increased the monitoring needs. Efforts to decrease ozone levels still requires international actions. SO₂, CO, benzene and heavy metal concentrations are on a low level in Finland outside industrial areas and other assessment methods than continuous monitoring can be used, and the number of continuous monitoring sites has already decreased.

Satellite-based concentrations of nitrogen dioxide and carbon monoxide as well as their spatial variation in Finland were analyzed using observations from the Tropospheric Monitoring Instrument (TROPOMI). The analysis of CO over Finland was carried out for the first time in this project. Results show that overall annual CO concentrations over Finland are low and spatial variability is small. Also, NO₂ concentrations over Finland are rather low, but spatial patterns are more clearly visible. The highest NO₂ concentrations are observed over the largest cities. By establishing a relationship between ground-based and satellite total column concentrations, surface concentrations of NO₂ and CO were estimated from the satellite data for the zones. The satellite-based estimate for annual NO₂ surface concentration over Helsinki metropolitan area is 28 µg/m³, and for the rest of Finland mostly between 10–15 µg/m³. For CO the differences between monitoring areas are small, with estimates varying between 160–164 µg/m³ or in other words about 0,16 mg/m³.

Publishing units

Expert Services and Earth Observation Research

Classification (UDC)

502.3, 551.510.42, 551.501.8

Keywords

air quality, zone, AQ assessment

AQ measurement, satellite observations

ISSN and series title

0782–6079 Raportteja - Rapportier - Reports

ISBN

978–952–336–140–9 (pdf)

DOI

10.35614/isbn.9789523361409

Language

Finnish

Pages

75 + 49 appendix pages

SISÄLLYSLUETTELO

JOHDANTO.....	5
1 ILMANLAATUMITTAUKSET ILMANLAADUN SEURANTAMENETELMÄNÄ.....	6
1.1 Ilmanlaadun seuranta-alueet	6
1.2 Ilmanlaadun arviointikynnykset	8
1.3 Mittausasemien vähimmäismäärän määrittäminen	10
2 SATELLIITTIHAVAINNOT ILMANLAADUN ARVIOINTIMENETELMÄNÄ.....	12
2.1 Satelliittimittausten yleinen periaate.....	12
2.2 Satelliittihavaintojen käsittely	16
2.3 Typpidioksidin satelliittimittaukset	18
2.3.1 Aiemmat tulokset	18
2.4 Hiilimonoksidin satelliittimittaukset	21
2.4.1 Hiilimonoksidin satelliittimittausten yksiköistä	24
3 ILMANLAADUN ARVIOINNIN TULOKSET	27
3.1 Typpidioksidi- ja typenoksidipitoisuudet	27
3.1.1 Ilmanlaatumittaukset	28
3.1.2 Satelliittihavainnot	31
3.2 Hengitettävien hiukkasten pitoisuudet.....	39
3.3 Pienhiukkaspitoisuudet	42
3.4 Rikkidioksidipitoisuudet.....	44
3.5 Hiilimonoksidipitoisuudet	47
3.5.1 Ilmanlaatumittaukset	47
3.5.2 Satelliittihavainnot	49
3.6 Otsonipitoisuudet.....	53
3.7 Bentso(a)pyreenipitoisuudet	56
3.8 Bentseenipitoisuudet	59
3.9 Lyijypitoisuudet.....	61
3.10 Arseenipitoisuudet	62
3.11 Kadmiumpitoisuudet	64
3.12 Nikkelipitoisuudet.....	65
4 YHTEENVETO SUOMEN NYKYISESTÄ ILMANLAADUSTA JA SEURANTATARPEEN ARVIOINTI.....	67
4.1 Seurantatarve kaupunkialueilla	67
4.2 Seurantatarve maaseututausta-alueilla.....	71

5 JOHTOPÄÄTÖKSET	72
VIITELUETTELO	74
LIITE 1: ILMANLAATUMITTAUSTEN TULOKSET SEURANTA-ALUEILLA	76
NO ₂ vuosipitoisuudet.....	76
NO ₂ tuntipitoisuudet	81
NO _x vuosipitoisuudet.....	86
PM ₁₀ vuosipitoisuudet	87
PM ₁₀ vuorokausipitoisuudet.....	92
PM _{2,5} vuosipitoisuudet.....	97
SO ₂ talvikausipitoisuudet.....	101
SO ₂ vuorokausipitoisuudet	105
CO 8 tunnin pitoisuudet.....	109
Otsonin 8 tunnin pitoisuudet.....	110
Otsonin AOT40-pitoisuudet.....	111
Bentso(a)pyreenin vuosipitoisuudet	113
Bentseenin vuosipitoisuudet.....	114
Lyijyn vuosipitoisuudet	116
Arseenin vuosipitoisuudet	117
Kadmiumin vuosipitoisuudet.....	118
Nikkelin vuosipitoisuudet.....	119
LIITE 2: SATELLIITTIMITTAUSTEN TULOKSET SEURANTA-ALUEILLA.....	120
NO ₂ satelliittimittaukset	120

JOHDANTO

Ilmanlaadun seurannan riittävyys tulee arvioida vähintään viiden vuoden välein. Tässä ilmanlaatuselvityksessä on päivitetty Ilmatieteen laitoksen aikaisemmin tekemä kansallinen arvio Suomen ilmanlaadusta ([Komppula, ym., 2014](#)). Työssä on arvioitu Suomen ilmanlaadun nykytilaa ilmanlaadun mittausverkkojen vuosina 2015–2019 suorittamien ilmanlaadun mittaustulosten perusteella. Raportissa on tarkasteltu seuraavia ilman epäpuhtauksia: rikkidioksidi, typen oksidit, typpidioksidi, hengitettävät hiukkaset, pienhiukkaset, bentso(a)pyreeni, otsoni, hiilimonoksidi, bentseeni, lyijy, arseeni, kadmium ja nikkeli. Typpidioksidi- ja hiilimonoksidipitoisuuksien arvioinnin tukena on käytetty satelliittihavaintoja alueilla, joilta ei ole saatavilla mittaussaineistoa.

Ilmanlaatuarviot on tehty ilmanlaatuasetuksessa ([79/2017](#)) ja metalliasetuksessa ([113/2017](#)) määritetyille ilmanlaadun seuranta-alueille. Ilmanlaatuarvio on tehty vertailemalla pitoisuuksia ilmanlaatulainsäädännössä annettuihin ylempiin ja alempiin arviointikynnyksiin. Ilmanlaatu- ja metalliasetuksessa annetut arviointikynnykset perustuvat CAFE-direktiiviin ([2008/50/EY](#)) ja ns. neljänteen tytärdirektiiviin ([2004/107/EY](#)).

Oleellinen osa selvitystä oli arvioida satelliittihavaintojen hyödyntämismahdollisuuksia objektiivisen ilmanlaatuarvioinnin tukena. Ilmatieteen laitos toteutti vuonna 2019 esiselvityksen satelliittihavaintojen hyödyntämisestä ilmanlaadun seurannassa ([Sundström, ym., 2020](#)). Esiselvityksen tulokset osoittivat, että satelliittien avulla voidaan tarkastella typpidioksidin alueellista jakaumaa Suomessa aina kaupunkitasolle asti. Tässä työssä hyödynnetään ensimmäistä kertaa vastaavaa menetelmää hiilimonoksidin pitoisuustasojen kartoituksessa, sillä mittaustietoja on enää vähän saatavilla. Hiilimonoksidin pitoisuusmittaukset kaupungeissa ovat loppuneet viimeistään vuonna 2015, mutta ilmastonmuutoksen seurantaan keskittyvillä tutkimusasemilla hiilimonoksidipitoisuuksia yhä seurataan.

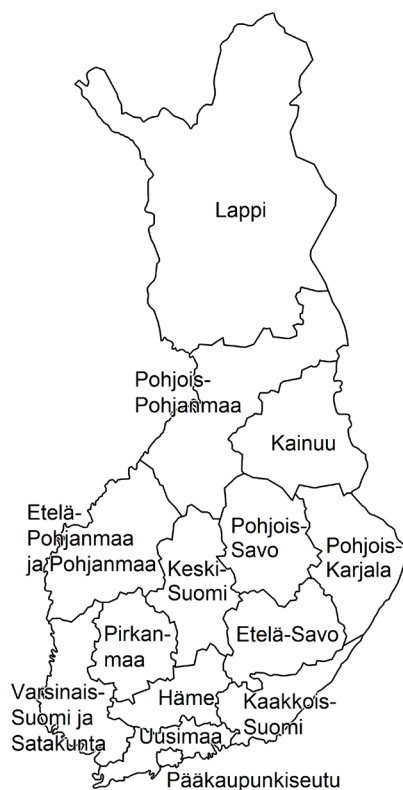
IPR-päätös (Implementing Provisions on Reporting, [2011/850/EU](#)) ja sen tulkintaohje ([European Commission, 2018](#)) edellyttävät, että arviointikynnysten ylittymiset on dokumentoitava ja verkkolinkit näihin asiakirjoihin on liitettävä vuosittaisiin ilmanlaadun EU-raportointeihin. Ilmatieteen laitos hyödyntää tämän raportin tuloksia EU-raportoinnissa ilmanlaadun arviointina sekä objektiivisen arvioinnin menetelmäviitteenä. Lisäksi raportti on kokoava katsaus Suomen nykyisestä ilmanlaadusta ja sitä voidaan käyttää seuranta-alueiden ja kuntien ilmanlaatusuunnitelmien pohjana. Tuloksia voidaan hyödyntää myös mahdollisten uusien seuranta-alueiden suunnittelutyössä.

1 ILMANLAATUMITTAUKSET ILMANLAADUN SEURANTA-MENETELMÄNÄ

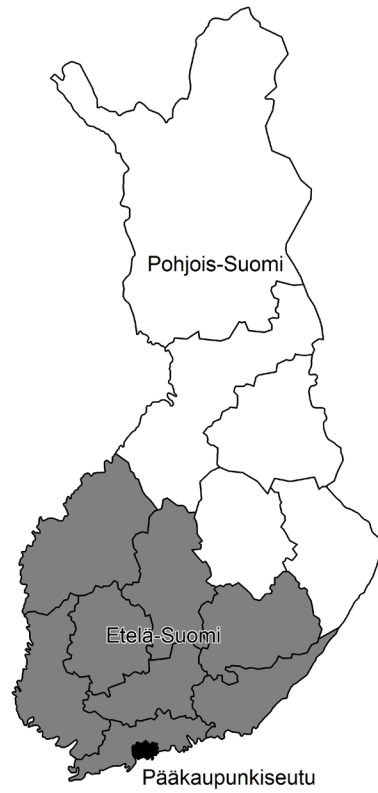
1.1 Ilmanlaadun seuranta-alueet

Ilmanlaadusta annettu valtioneuvoston asetus 79/2017 (ilmanlaatuasetus) ja ilmassa olevasta arseenista, kadmiumista, elohopeasta, nikkelistä ja polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä (PAH-yhdisteistä) annettu valtioneuvoston asetus 113/2017 (metalliasetus) määrittelevät Suomen seuranta-alueet eri ilman epäpuhtauksille. Seuranta-alueet on rajattu ilmanlaadun arviointia ja hallintoa varten.

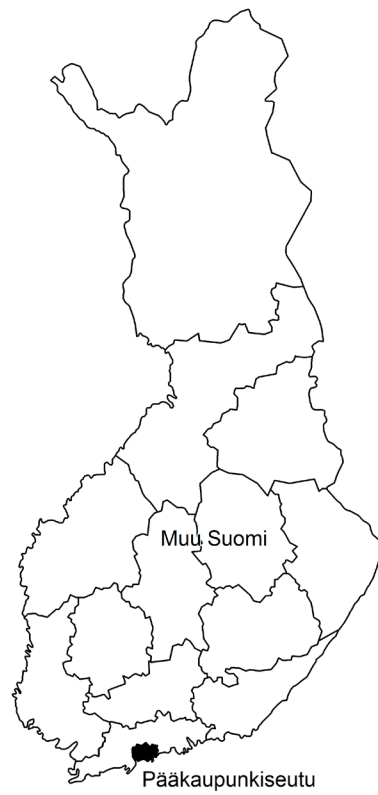
Seuranta-alueilla tarkoitetaan yhden tai useamman elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskuksen (ELY-keskuksen) toimialuetta tai väestökeskittymää, johon voi kuulua yksi tai useampi kunta ja jonka asukasluku on vähintään 250 000 asukasta. Suomessa väestökeskittymällä tarkoitetaan pääkaupunkiseutua (HSY-alue). Eri ilman epäpuhtauksien nykyiset seuranta-alueet Suomessa on esitetty kuvissa 1, 2 ja 3.



Kuva 1. Ilmanlaadun seuranta-alueet rikkidioksidille, typen oksideille, typpidioksidille, hengitettäville hiukkasille, pienhiukkasille, lyijylle ja hiilimonoksidille.



Kuva 2. Ilmanlaadun seuranta-alueet bentseenille.



Kuva 3. Ilmanlaadun seuranta-alueet otsonille, arseenille, kadmiumille, nikkelille ja bentso(a)pyreenille.

1.2 Ilmanlaadun arviointikynnykset

Ilmanlaatuasetuksen 11 § ja metalliasetuksen 7 ja 8 § määrittelevät, milloin ilmanlaadun mittaukset ovat tarpeen seuranta-alueella. Pääsääntöisesti mittaustarvetta arvioidaan vertaamalla seuranta-alueen pitoisuuksia ilmanlaatu- ja metalliasetuksessa määriteltyihin ylempiin ja alempiin arviointikynnyksiin, mutta mm. maaseututausta-alueilla pitoisuuksia on seurattava asetuksen määrittelemässä laajuudessa pitoisuustasosta riippumatta. Ilmanlaatu- ja metalliasetuksissa määritellyt ylemmät ja alemmat arviointikynnykset eri ilman epäpuhtauksille on esitetty taulukossa 1.

Jos seuranta-alueen pitoisuudet ylittävät ilmanlaatuasetuksissa määritellyn ylemmän arviointikynnyksen pitoisuustason, ovat jatkuvat mittaukset ensisijainen ilmanlaadun seurantamenetelmä. Seuranta-alueen pitoisuuksien alittaessa ylemmän arviointikynnyksen pitoisuustason, on jatkuvien mittausten tarve vähäisempi ja arvioinnissa voidaan käyttää jatkuvien mittausten ja mallintamistekniikoiden tai suuntaa-antavien mittausten yhdistelmää, jotta saadaan riittävästi tietoa ilmanlaadun alueellisesta jakautumisesta. Pitoisuuksien alittaessa alemman arviointikynnyksen ovat suuntaa-antavat mittaukset, pitoisuuksien mallintaminen, päästökartoitukset tai muut vastaavat menetelmät kuten esimerkiksi satelliittihavainnot riittävä menetelmä ilmanlaadun arvioimiseksi (kuva 4).



Kuva 4. Ilmanlaadun seurantatarve seuranta-alueella määräytyy mitattujen pitoisuuksien suhteesta ylempään ja alempaan arviointikynnykseen. Seurantatarve kasvaa pitoisuuksien kasvaessa.

Taulukko 1. Ilman epäpuhtauksien ylemmät ja alemmat arviointikynnykset ja niiden osuus vastaavasta raja-arvosta, tavoitearvosta tai kriittisestä tasosta. Otsonipitoisuuksia arvioidaan suhteessa pitkän ajan tavoitteeseen (Vna 79/2017 ja Vna 113/2017).

Rikkidioksidi (SO₂) (µg/m³)	Raja-arvo tai kriittinen taso	Ylempi arviointikynnys		Alempi arviointikynnys	
24 tuntia (saa ylittyä 3 krt/vuosi)	125	75	(60 %)	50	(40 %)
talvikausi (1.10.–31.3.) ¹⁾	20	12	(60 %)	8	(40 %)
Typidioksidi (NO₂) (µg/m³)	Raja-arvo				
1 tunti (saa ylittyä 18 krt/vuosi)	200	140	(70 %)	100	(50 %)
kalenterivuosi	40	32	(80 %)	26	(65 %)
Typen oksidit (NO_x) (µg/m³)¹⁾	Kriittinen taso				
kalenterivuosi	30	24	(80 %)	19,5	(65 %)
Hengitettävät hiukkaset (PM₁₀) (µg/m³)	Raja-arvo				
24 tuntia (saa ylittyä 35 krt/vuosi)	50	35	(70 %)	25	(50 %)
vuosi	40	28	(70 %)	20	(50 %)
Pienhiukkaset (PM_{2,5}) (µg/m³)	Raja-arvo				
kalenterivuosi	25	17	(70 %)	12	(50 %)
Lyijy (Pb) (µg/m³)	Raja-arvo				
kalenterivuosi	0,5	0,35	(70 %)	0,25	(50 %)
Hiilimonoksidi (CO) (mg/m³)	Raja-arvo				
8 tuntia ²⁾	10	7	(70 %)	5	(50 %)
Bentseeni (C₆H₆) (µg/m³)	Raja-arvo				
kalenterivuosi	5	3,5	(70 %)	2	(40 %)
Otsoni (O₃)	Pitkän ajan tavoite				
8 tuntia ²⁾	120 µg/m ³				
AOT40 ³⁾	6 000 µg/m ³ h				
Arseeni (As) (ng/m³)	Tavoitearvo				
kalenterivuosi	6	3,6	(60 %)	2,4	(40 %)
Kadmium (Cd) (ng/m³)	Tavoitearvo				
kalenterivuosi	5	3	(60 %)	2	(40 %)
Nikkeli (Ni) (ng/m³)	Tavoitearvo				
kalenterivuosi	20	14	(70 %)	10	(50 %)
Bentso(a)pyreeni (BaP) (ng/m³)	Tavoitearvo				
kalenterivuosi	1	0,6	(60 %)	0,4	(40 %)

¹⁾ Kriittinen taso kasvillisuuden ja ekosysteemien suojelemiseksi

²⁾ Vuorokauden korkein 8 tunnin keskiarvo valitaan tarkastelemalla 8 tunnin liukuvia keskiarvoja. Kukin 8 tunnin jakso osoitetaan sille päivälle, jona jakso päättyy.

³⁾ AOT40 (accumulated exposure over threshold) on otsonin kuormitus, joka ilmaistaan 80 µg/m³ (=40 ppb) ylittävien otsonin tuntipitoisuuksien ja 80 µg/m³ erotuksen kumulatiivisena summana. AOT40 lasketaan 1.5.–31.7. välisen ajan tuntiarvoista, jotka mitataan klo 9.00–21.00 välisenä aikana Suomen normaaliaikaa, joka on klo 10.00–22.00 Suomen kesäaikaa.

Ilmanlaadun mittaustarve ja seurannan riittävyys ilmanlaadun seuranta-alueilla tulee arvioida vähintään viiden vuoden välein. Tarkistus on tehtävä useammin, jos ilman epäpuhtauksien pitoisuuksissa tai niihin vaikuttavissa toiminnoissa tapahtuu merkittäviä muutoksia. Ylemmän ja alemman arviointikynnyksen ylittyminen määritellään viiden edellisen vuoden pitoisuuksien perusteella. Arviointikynnyksen katsotaan ylittyneen, kun se on ylittynyt vähintään kolmena vuotena viidestä. Jos pitoisuustietoja ei ole saatavilla viiden vuoden jaksolta, voidaan käyttää lyhyemmiltä mittausjaksoilta saatuja tietoja yhdistettynä päästökartoituksista ja mallilaskelmista saatuihin tietoihin. Mittaustietojen on edustettava alueita ja vuodenaikoja, jolloin pitoisuudet ovat tyypillisesti korkeimmillaan. Ilmanlaadun mittauksista tai mallilaskelmista saatuja tuloksia voidaan käyttää arvioitaessa muiden olosuhteiltaan vastaavanlaisten alueiden ilmanlaatua.

1.3 Mittausasemien vähimmäismäärän määrittäminen

Ilmanlaadun jatkuvia mittauksia hajapäästölähteiden (esim. liikenne, kotitalouksien pienpoltto) aiheuttaman kuormituksen seurantaan on tehtävä taulukoiden 2 ja 3 mukaisessa laajuudessa seuranta-alueilla, joilla ylempi arviointikynnys ylittyy sekä seuranta-alueilla, joilla ilman epäpuhtauksien pitoisuudet ovat ylemmän ja alemman arviointikynnyksen välissä. Mittausasemien vähimmäismäärää arvioidaan epäpuhtauskohtaisesti ja se riippuu seuranta-alueen väestömäärästä sekä korkeimmista pitoisuuksista. Mikäli ylempi arviointikynnys ylittyy, on typpidioksidin, hiukkasten, hiilimonoksidin, bentseenin ja bentso(a)pyreenin näytteenottopaikkoihin seuranta-alueilla kuuluttava vähintään yksi kaupunkien tausta-alueita edustava mittausasema ja yksi liikenneympäristöä edustava asema edellyttäen, että näytteenottopaikkojen lukumäärää ei tarvitse nostaa. Vastavassa tapauksessa metallipitoisuuksien seurantaan tulee olla vähintään yksi kaupunkitausta-asema.

Otsonipitoisuuksien kiinteissä mittauksissa käytettävien näytteenottopaikkojen vähimmäislukumäärä on määritetty direktiivien 2004/107/EY ja 2008/50/EY liitteiden muuttamisesta annetussa komission direktiivissä [2015/1480/EU](#) ja se on esitetty taulukossa 4. Otsonin jatkuvia mittauksia on tehtävä taulukon mukaisessa laajuudessa kaikilla seuranta-alueilla pitoisuuksista riippumatta. Seuranta-alueilla vähintään yksi otsoniasema on sijaittava esikaupunkialueilla, joilla pitoisuudet ovat yleensä korkeampia kuin kaupunkikeskustoissa ja väestön altistuminen on todennäköisesti suurinta. Väestökeskittymissä vähintään 50 % mittausasemista on sijoitettava esikaupunkialueille. Otsonia muodostavia yhdisteitä on mitattava seuranta-alueella ainakin yhdellä otsonin mittausasemalla. Otsonia muodostavia yhdisteitä ovat typen oksidit (NO ja NO₂) ja tietyt haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC), joista 31 yhdisteen mittaamista suositellaan. Typpidioksidin jatkuvia mittauksia on tehtävä vähintään joka toisella otsonin mittausasemalla, lukuun ottamatta maaseututausta-asemia, joilla voidaan käyttää suuntaa antavia mittauksia.

Maaseututausta-alueilla koko Suomen alueella tulee seurata rikkidioksidin ja typen oksidien pitoisuuksia vähintään yhdellä asemalla 20 000 neliökilometriä kohden, jos pitoisuudet ylittävät ylemmän arviointikynnyksen. Jos pitoisuudet ovat ylemmän ja alemman arviointikynnyksen välissä, tulee mittausasemia olla vähintään yksi asema 40 000 neliökilometriä kohti. Pienhiukkaspitoisuuksia tulee maaseututausta-alueilla seurata vähintään yhdellä asemalla 100 000 neliökilometriä kohti pitoisuuksista riippumatta. Pienhiukkasten massapitoisuutta seuraavilla asemilla tulee mitata myös pienhiukkasten kemiallista koostumusta (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, EC, OC). Otsonipitoisuuksia tulee maaseututausta-alueilla seurata vähintään yhdellä asemalla 50 000 neliökilometriä kohti pitoisuuksista riippumatta. Otsonia muodostavia

yhdisteitä tulee mitata vähintään yhdellä otsonin mittausasemalla. Arseenin, kadmiumin, nikkelin, elohopean, bentso(a)pyreenin ja muiden PAH-yhdisteiden pitoisuuksia sekä kokonaislaskeumia on seurattava suuntaa antavin mittauksin vähintään kolmella mittausasemalla.

Pistemäisten päästölähteiden aiheuttaman kuormituksen jatkuvaan seurantaan tarvittavien mittausasemien lukumäärä määritetään tapauskohtaisesti ottaen huomioon päästöjen määrä, epäpuhtauksien leviäminen päästölähteen lähialueella sekä väestön mahdollinen altistuminen.

Taulukko 2. Hajapäästölähteiden seurantaan tarvittavien rikkidioksidin, typpidioksidin, hiukkasten, lyijyn, hiilimonoksidin ja bentseenin mittausasemien vähimmäismäärät (Vna 79/2017).

Seuranta-alueen väestö (× 1 000)	Korkeimmat pitoisuudet ylittävät ylemmän arviointikynnyksen		Korkeimmat pitoisuudet ovat ylemmän ja alemman arviointikynnyksen välissä	
	Muut epäpuhtaudet	Hiukkaset (PM ₁₀ ja PM _{2,5})	Muut epäpuhtaudet	Hiukkaset (PM ₁₀ ja PM _{2,5})
0–249	1	2	1	1
250–499	2	3	1	2
500–749	2	3	1	2
750–999	3	4	1	2
1 000–1 499	4	6	2	3
1 500–1 999	5	7	2	3
2 000–2 749	6	8	3	4
2 750–3 749	7	10	3	4
3 750–4 749	8	11	3	6
4 750–5 999	9	13	4	6
≥ 6 000	10	15	4	7

Taulukko 3. Hajapäästölähteiden seurantaan tarvittavien arseenin, kadmiumin, nikkelin ja bentso(a)pyreenin mittausasemien vähimmäismäärät (Vna 113/2017).

Seuranta-alue	Korkeimmat pitoisuudet ylittävät ylemmän arviointikynnyksen		Korkeimmat pitoisuudet ovat ylemmän ja alemman arviointikynnyksen välissä	
	Arseeni, kadmium, nikkeli	Bentso(a)pyreeni	Arseeni, kadmium, nikkeli	Bentso(a)pyreeni
Pääkaupunkiseutu	2	2	1	1
Muu Suomi	3	4	2	2

Taulukko 4. Otsonipitoisuuksien seurantaan tarvittavien mittausasemien vähimmäismäärät (215/1480/EU).

Seuranta-alueen väestö (× 1000)	Väestökeskittymät	Muut seuranta-alueet
< 250		1
< 500	1	2
< 1 000	2	2
< 1 500	3	3
< 2 000	3	4
< 2 750	4	5
< 3 750	5	6
> 3 750	yksi lisäasema kahta miljoonaa asukasta kohden	yksi lisäasema kahta miljoonaa asukasta kohden

2 SATELLIITTIHAVAINNOT MENETELMÄNÄ

ILMANLAADUN

ARVIOINTI-

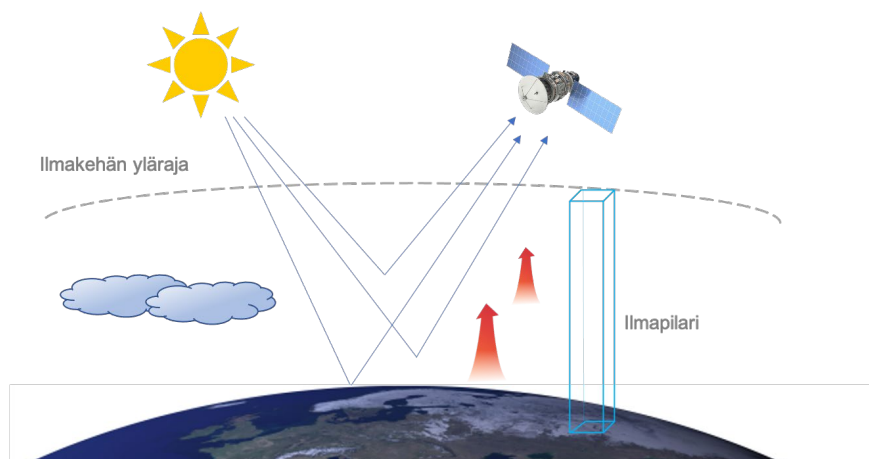
Maapalloa avaruudessa kiertävät satelliitit ovat tuottaneet maailmanlaajuisia havaintoja ilmakehän koostumuksesta jo usean kymmenen vuoden ajan. Viime vuosina kehitys satelliittikaukokartoituksessa on ollut nopeaa ja havaintojen tarkkuus sekä paikallinen erotuskyky on parantunut merkittävästi, mikä on avannut uusia mahdollisuuksia satelliittimittausten monipuoliseen hyödyntämiseen myös erilaisissa ilmanlaatuun liittyvissä sovelluksissa.

Satelliiteilla voidaan havainnoida monia ilmanlaadun kannalta oleellisia parametreja, kuten kaasujen pitoisuuksia tai pienhiukkasia. Vaikka satelliittimittaukset eroavat maanpinnalla tehtävistä mittauksista monin tavoin, voivat ne tukea pintamittauksiin perustuvaa ilmanlaadun arviointia. Satelliittimittausten ehdottomana etuna on niiden maailmanlaajuinen kattavuus, joka mahdollistaa ilmakehän koostumuksen havainnoinnin myös maanpinta-asemaverkoston ulkopuolella.

Tässä raportissa esitetyt satelliittihavainnot typpidioksidin (NO_2) ja hiilimonoksidin (CO) pitoisuuksista ja niiden alueellisista jakaumista perustuvat TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) ja Ozone Monitoring Instrument (OMI) mittauksiin. TROPOMI laukaistiin EU:n Copernicus-ohjelman rahoittamassa Sentinel-5P-satelliitissa vuonna 2017 ja se on tällä hetkellä paikalliselta erotuskyvyltään tarkin ilmanlaadun kannalta oleellisia kaasuja havainnoiva satelliittimittalaite. Suomalais-hollantilainen OMI-instrumentti NASA:n Aura-satelliitissa on puolestaan tuottanut maailmanlaajuisia havaintoja jo yli 15 vuoden ajan. TROPOMI-instrumentti on kehitetty pitkälti OMI-instrumentin ominaisuuksien pohjalta. Moninkertaisesti parantuneen paikallisen erotuskyvyn lisäksi TROPOMI:ssa on säteilyn lähi-infrapuna-aallonpituusalueella uudet mittauskanavat, jotka mahdollistavat CO :n ja metaanin havainnoinnin.

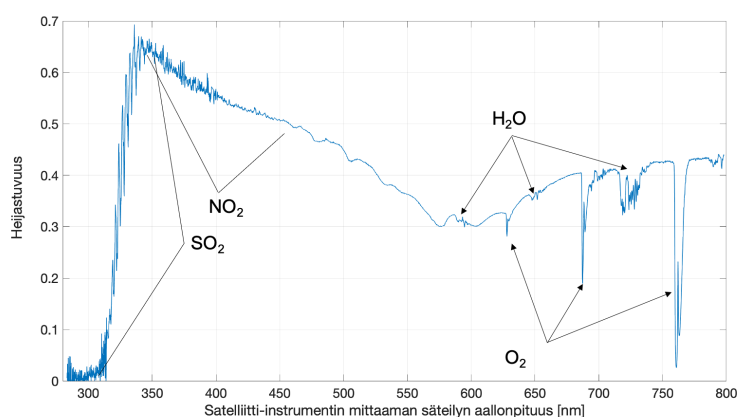
2.1 Satelliittimittausten yleinen periaate

Kaukokartoituksella tarkoitetaan yleisesti sellaista epäsuoraa mittausmenetelmää, jossa laite ei fyysisesti mittaa suoraan havainnoitavan kohteen ominaisuutta, esim. kaasun pitoisuutta, vaan määrittää sitä välimatkan päästä säteilymittauksen kautta. Kaikki satelliiteista tehtävät havainnot ovat kaukokartoitusmittauksia. Satelliitti-instrumentit mittaavat joko maanpinnalta ja ilmakehästä takaisin avaruuteen heijastunutta säteilyä (tyypillisesti auringon valoa) tai maanpinnan ja ilmakehän lähettämää lämpösäteilyä (kuva 5). Käytännössä satelliitit mittaavat siis instrumenttiin tulevan säteilyn intensiteettiä ja sen muutoksia ennalta määritellyillä aallonpituusalueilla. Kaukokartoitusmittauksia voidaan tehdä myös maanpinnalta erilaisin laittein, jolloin havainnoidaan suoraan auringosta ilmakehän läpi tulevaa säteilyä.



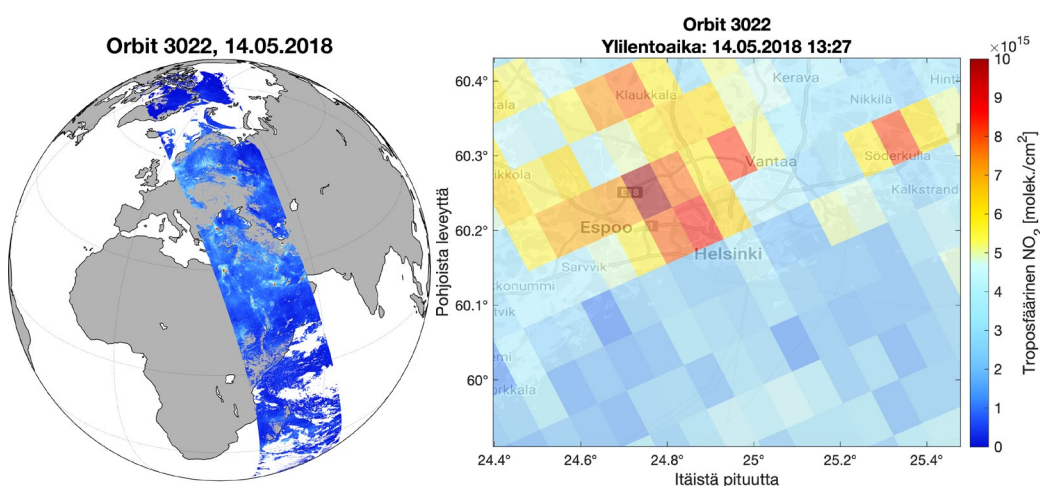
Kuva 5. Yksinkertaistettu kaaviokuva satelliitti-instrumentin säteilymittauksesta. Ilmakehää havainnoivat satelliitti-instrumentit mittaavat usein joko maasta ja ilmakehästä takaisin heijastunutta auringon valoa (siniset nuolet) tai maan ja ilmakehän lähettämää lämpösäteilyä (punaiset nuolet). Säteilymittaus muunnetaan ilmapilarin kaasupitoisuuksiksi laskenta-algoritmein.

Säteilyn käyttäminen ilmakehän kaukokartoitusmittauksissa perustuu siihen, että kaasumolekyylit ja pienhiukkaset vaikuttavat tietyllä tavalla ilmakehän läpi kulkevaan säteilyyn. Ne siis jättävät säteilyyn ns. oman tunnusomaisen "sormenjälkensä" (kuva 6). Kaasuille on ominaista se, että ne vaimentavat säteilyä kukin vain tietyillä säteilyn aallonpituuksilla. Mittaamalla säteilyn intensiteettiä ja sen muutoksia juuri näillä aallonpituuksilla, voidaan kyseisen kaasun pitoisuus ilmakehässä arvioida satelliitin mittausten perusteella. Säteilyn muuntaminen ilmakehää kuvaaviksi parametreiksi, esim. kaasupitoisuuksiksi, vaatii räätälöityjen laskenta-algoritmien käyttöä. Tuloksena saadaan kaasun pitoisuus satelliitin ja maanpinnan välisessä ilmakehän pylväässä, ns. ilmapilarissa. Satelliiteista saatava tulos ei siis sisällä tietoa kaasun pystysuuntaisesta jakaumasta ilmakehässä. Nämä oleelliset erot on hyvä muistaa maanpintamittauksia ja satelliittimittauksia vertailtaessa. Tästä huolimatta satelliittimittauksista saatava maantieteellinen jakauma etenkin lyhytikäisten kaasujen kohdalla (esim. typpidioksidi) kuvaa usein hyvin maanpintamittauksissa havaittua jakaumaa, sillä voimakkaimmat kaasujen lähteet ovat useimmin lähellä maanpintaa (eivätkä ylhäällä ilmakehässä) ja kaukokulkeutumisen osuus on hyvin pientä. Näissä tapauksissa satelliitin mittaaman ilmapilarin pitoisuuksien alueelliset vaihtelut ovat siis hyvin suurelta osin peräisin juuri maanpinnan lähellä tapahtuvista kaasupitoisuuksien muutoksista. Pitkäikäisempien kaasujen (esim. hiilimonoksidi) sekä aerosolien havainnoinnissa kaukokulkeutumisen osuus tietyissä tilanteissa kasvaa, mikä on otettava huomioon satelliittihavaintoja analysoitaessa.



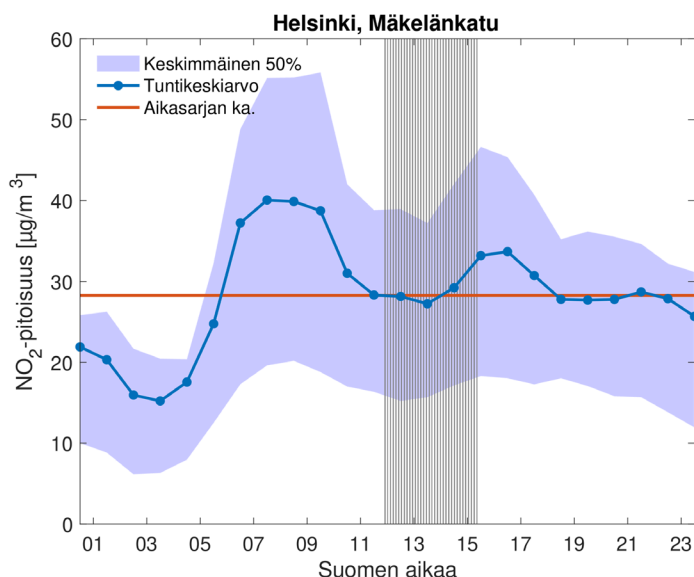
Kuva 6. Esimerkki satelliitti-instrumentin mittaamasta säteilystä. Säteilyn intensiteetti on tässä kuvassa muunnettu säteilyn heijastuvuudeksi, jotta kaasujen aiheuttamia ominaisuuksia saadaan paremmin esille. Kuvaan on merkitty tiettyjä aallonpituuksia (nuolet) tai aallonpituusalueita (viivat), joita käyttämällä kyseisistä kaasujen pitoisuuksista voidaan saada tietoa.

Satelliitti-instrumentin alueellinen erotuskyky eli resoluutio määräytyy käytännössä sen mittaaman kuvausalueen leveyden ja instrumentin vastaanottimen pikselien lukumäärän perusteella, vastaavalla tavalla kuin tavallisessa digitaalisessa kamerassa. Instrumentin mittaukset koostuvat siis yksittäisistä pikseleistä, joista jokainen edustaa alueensa keskimääräistä ilmapilarin pitoisuutta. Tällä hetkellä tarkin ilmakehän kaasuja kartoittava satelliitti-instrumentti on TROPOMI, jonka yksittäisen pikselin koko on noin $7 \times 3,5$ km (tai 7×7 km, riippuen mittauskanavasta) (kuva 7). Satelliitti-instrumenttien erotuskyky on siis parhaimmillaan noin kaupunginosan luokkaa. Lisäksi alhaisten pitoisuuksien alueella, kuten Suomessa, yksittäisiä mittauksia saattavat häiritä taustakohina ja sään vaihtelut.



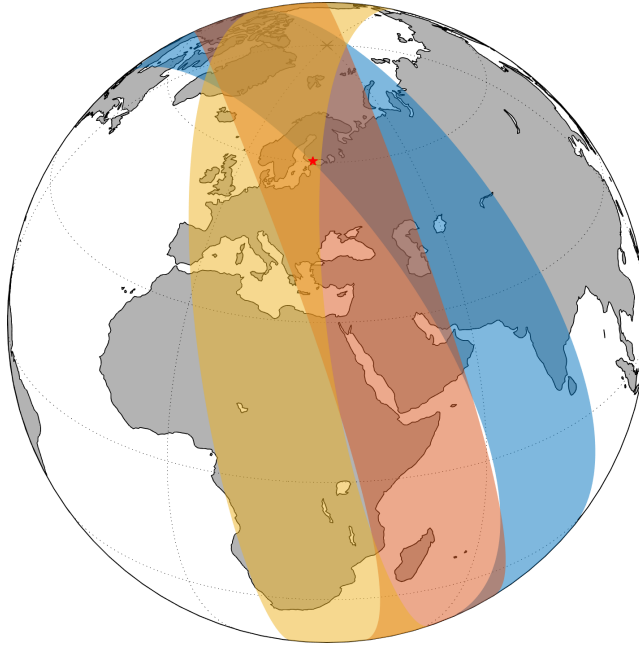
Kuva 7. Esimerkki TROPOMI-instrumentin tekemistä mittauksista 14.5.2018. Vasemmalla on esitetty yhden maapallon ympäri menevän kierroksen eli orbitin NO_2 -mittaukset. Yksi orbit kattaa noin 2600 km leveän kaistaleen maapallon pinnalla. Satelliitin lentosuunta on etelästä kohti pohjoista. Aukot orbitin havainnoissa johtuvat pilvistä. Oikealla on esitetty samat NO_2 -havainnot tarkennettuna Helsingin ylle. Oikeanpuoleisesta kuvasta nähdään hyvin, kuinka instrumentin mittaus koostuu yksittäisistä pikseleistä, joiden koko on noin $7 \times 3,5$ km.

Tässä raportissa keskitytään analysoimaan satelliittihavaintoja, jotka perustuvat maanpinnalta ja ilmakehästä takaisin heijastuneen auringon valon mittaamiseen. Nämä satelliitti-instrumentit kiertävät maapalloa niin sanotuilla aurinkosynkronisilla radoilla, minkä seurauksena ne ylittävät jonkin maanpinnan pisteen aina samaan paikalliseen aurinkoaikaan. Tässä työssä käytettävät instrumentit (TROPOMI, OMI) tekevät mittauksensa keskimäärin noin kello 13:30 paikallista aurinkoaikaa. Mittausten tarkka ajankohta riippuu lisäksi myös instrumentin mittaaman kuvausalueen leveydestä (kuva 7), sillä paikallinen aika on instrumentin näkemän alueen itälaidalla pidemmällä kuin sen länsilaidalla. Tässä työssä käytettyjen satelliitti-instrumenttien kuvausalueen leveys on noin 2 600 kilometriä, mikä johtaa Helsingin leveysasteella noin kolmen tunnin eroon radan itä- ja länsilaidan välillä. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, etteivät satelliitti-instrumenttien tekemät mittaukset kata kuin suhteellisen lyhyen osan päivästä, etenkin verrattuna maanpintamittauksiin (kuva 8).



Kuva 8. Esimerkki NO₂-vuorokausivaihtelusta ja TROPOMI-instrumentin tekemistä havaintojen ajankohdista Helsingissä. Sininen kuvaaja esittää NO₂-pitoisuuden (µg/m³) keskimääräistä vuorokausivaihtelua Helsingin Mäkelänkadun maanpintamittausasemalla aikavälillä 1.4.–30.9.2019, varjostettu alue kuvaa 50 % vaihteluväliä. Punaisella on esitetty kyseisen maanpinta-aseman koko mittauskauden keskiarvo. Harmaat pystyviivat esittävät aikaväliä, jolloin TROPOMI-instrumentti teki aseman yläpuolelta NO₂-mittauksen kyseisenä ajanjaksona. TROPOMI:n havaintoajat vaihtelivat pääasiassa klo 12 ja 15 välillä.

Auringonvalon käyttö mittausten perustana hankaloittaa ympärivuotisten mittausten tekemistä korkeilla leveysasteilla, kuten Suomessa. Talvella valon vähäinen määrä käytännössä estää mittausten tekemisen, minkä vuoksi talvikuukaudet (marras-, jouluku- ja tammikuu, osittain myös loka- ja helmikuu) jäävät ilman käyttökelpoisia mittauksia. Talviaikaan maanpinnalla havaitaan useimpien kaasumaisten ilman epäpuhtauksien suurimmat pitoisuudet. Tämä johtaa siihen, että korkeilla leveysasteilla satelliittimittaukset aliarvioivat keskimääräisiä vuosipitoisuuksia. Toisaalta Suomen pohjoinen sijainti on myös etu aurinkosynkronisilla radoilla kiertävien satelliittien kannalta. Tällaiset satelliitit käyvät lähellä maapallon napoja jokaisella kierroksellaan, minkä seurauksena niiden tekemien mittausten päällekkäisyys kasvaa napoja kohti (kuva 9). Käytännössä tämä tarkoittaa, että esimerkiksi Helsingin seudulta voidaan saada jopa kolme päivittäistä satelliittimittausta.



Kuva 9. Esimerkki TROPOMIn peräkkäisistä, maapallon ympäri etelästä pohjoiseen kulkevista n. 2 600 km levyisistä kuvausalueista (orbiteista), jotka kulkevat Suomen päältä. Ensimmäisenä mittaukset on tehty sinisellä merkityllä alueella. Helsinki on merkitty kuvaan punaisella tähdellä. Kuvasta huomataan, kuinka peräkkäiset alueet menevät lähellä napoja päällekkäin. Tämän ansiosta Helsingin alueelta saatiin kyseisenä päivänä kolme satelliittihavaintoa.

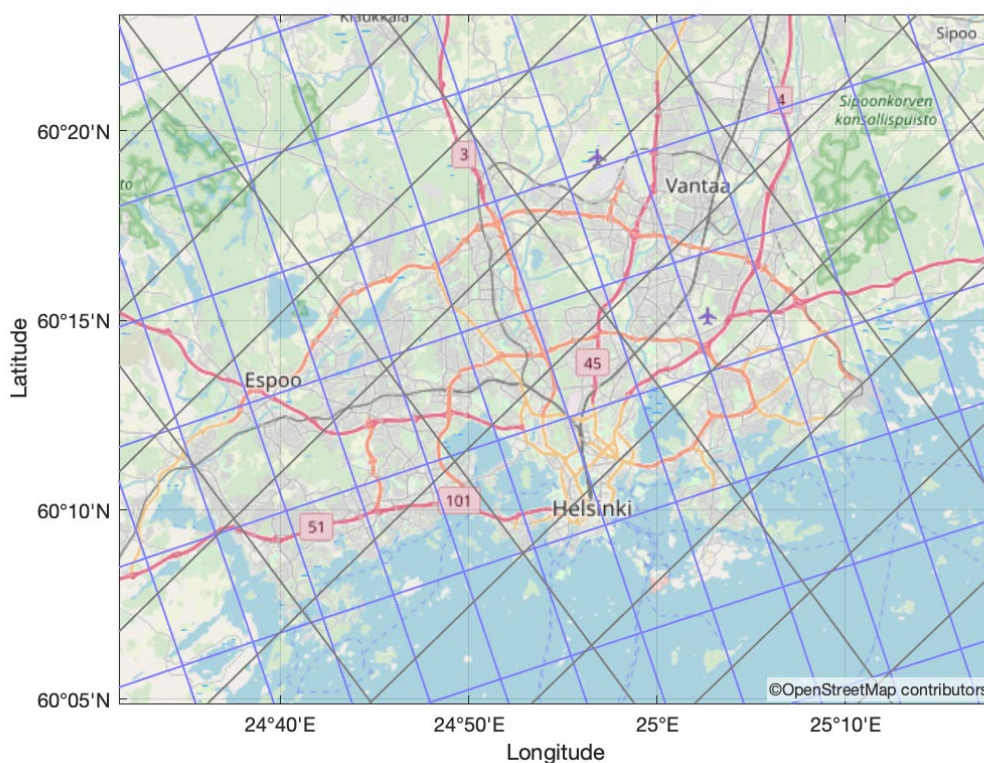
Auringonvalon määrän lisäksi satelliiteilla tehtävää ilmakehän koostumuksen havainnointia rajoittavat pilvet. Käytännössä pilvet haittaavat havaintoja siksi, että ne estävät avaruudesta maata kohti katsovaa satelliittia näkemästä pilven alapuolelle jäävää ilmakehän osaa. Kaasujen havainnoinnissa yleensä vähäinen pilvisuus voidaan vielä sallia, mutta kun pilvet kattavat suurimman osan yksittäisen pikselin pinta-alasta, ei voida enää tehdä luotettavaa havaintoa, joka edustaisi kaasun pitoisuutta koko ilmapilarissa sisältäen myös alimmissa ilmakehän kerroksissa tapahtuvat muutokset.

2.2 Satelliittihavaintojen käsittely

Suomessa ja yleensä korkeilla leveysasteilla tehtävien ilmakehän satelliittihavaintojen haasteena on yleisesti kohtuullisen runsas pilvisuus, talvikuukaudet sekä tiettyjen kaasujen tapauksissa hyvin alhaiset pitoisuudet. Kun pitoisuudet ovat hyvin alhaisia ja mittauksia tehdään lähellä instrumentin havaintokyvyn alarajaa, mittauksissa on yleensä kohinaa. Näistä syistä satelliittimittaukset eivät sovellu korkeilla leveysasteilla päivittäisten pitoisuuksien seurantaan, vaan niiden avulla voidaan tarkastella laajoilta alueilta pidemmän aikavälin keskiarvoja. Kokemus on osoittanut, että Suomen alueella keskiarvoistus on tehtävä vähintään noin kuukauden pituiselle ajanjaksolle, jotta kohinan vaikutus minimoituu riittävästi. Tavallisesti satelliittimittauksista saadut kaasujen pitoisuudet ilmoitetaan yksiköissä $\text{molekyyli}/\text{cm}^2$, joka on siis kaasumolekyylien lukumäärä pohjapinta-alaltaan yhden neliösenttimetrin suuruudessa, maanpinnalta joko troposfäärin tai koko ilmakehän ulkorajalle ulottuvassa ilmapilarissa ("pylväspitoisuus"). Joillekin kaasuille, kuten CO:lle yksiköt muunnetaan usein ilmapilarin sekoitussuhteeksi.

Maapallon napojen kautta polaariradoilla kulkevat satelliitit havainnoivat ilmakehän koostumusta päivittäin lähes samaan paikalliseen aikaan, mutta korkeilla leveysasteilla mittauksia tiettyyn paikkaan voidaan saada jopa kolme kertaa päivässä peräkkäisten ratojen "päällekkäisyydestä" johtuen. Kaikissa tapauksissa satelliittien rata ja pikseleiden täsmällinen paikka maanpinnalla vaihtelee (kuva 10) näin ollen satelliiteista saaduista päivittäisistä havainnoista ei voida sellaisenaan laskea suoraan esimerkiksi keskiarvoa pidemmän ajanjakson yli tietylle alueelle. Yleisimpiä menetelmiä esim. vuosi- ja kuukausikeskiarvokarttojen laskemiseksi on satelliittihavaintojen kerääminen tasaväliseen hilaruudukkoon. Hilan paikallinen tarkkuus tyypillisesti vaihtelee sovelluksen mukaan.

Kun tarkastellaan pienempää maantieteellistä aluetta, satelliittihavaintojen keskiarvoistamisessa voidaan käyttää ns. "oversampling"-menetelmää. Tässä menetelmässä etukäteen määritetyn tasavälisen hilan yksittäisten ruutujen koko on alkupe-
räistä satelliittipikseliä pienempi, jonka johdosta lopullisesta keskiarvokartasta saadaan alueelliselta erotuskyvyltään "tarkempi" kuin mitä alkuperäiset satelliittihavainnot ovat. Oversampling-menetelmä mahdollistaa pienen mittakaavan alueellisen vaihtelun tarkastelun, kunhan keskiarvoistusaika on riittävän pitkä. Tässä raportissa ajankohtana käytetään vuotta 2019 ja NO₂- sekä CO-kartoissa keskiarvoistus on tehty resoluutioltaan 2 × 2 km suuruisen hilaruudukkoon



Kuva 10. Esimerkki TROPOMI-instrumentin yksittäisten pikseleiden sijainnista peräkkäisinä päivinä. Pikseleiden ääriviivat ensimmäisen päivän yllennosta on piirretty sinisellä, ja toisen päivän yllennosta harmaalla. Kuvasta nähdään myös pikselien eri koko, riippuen siitä, mikä osa satelliitin radasta (itä- tai länsilaita vs. radan keskikohta) on kulkenut Helsingin yltä. Pikselien koko on pienimmillään radan keskikohdalla. Kuvan lähde: Sundström ym., 2020.

- Satelliitti-instrumentit mittaavat säteilyn intensiteettiä, joka muutetaan kaasupitoisuuksiksi laskenta-algoritmeilla.
- Satelliittimittaus kuvaa kaasun pitoisuutta maanpinnalta ilmakehän ylärajalle ulottuvassa ilmapilarissa.
- Polaariradalla olevista satelliiteista saadaan havaintoja noin kerran päivässä. Havaintoja haittaavat pilvisuus ja auringon valon puute.

2.3 Typpidioksidin satelliittimittaukset

Typpidioksidia (NO_2) mitataan tällä hetkellä usealla eri satelliitti-instrumentilla, joista uusin ja tarkin on TROPOMI. Korkean tarkkuutensa vuoksi tämän raportin NO_2 -tarkasteluissa käytetään yksinomaan TROPOMI-instrumentin mittauksia.

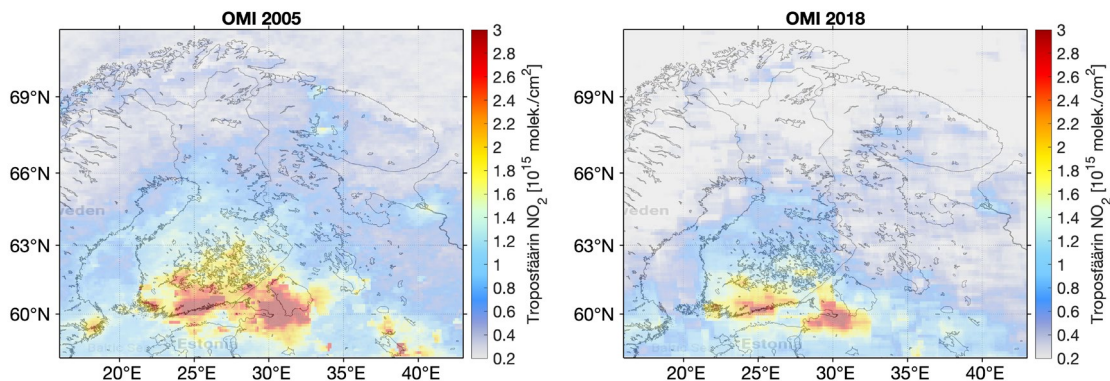
TROPOMI:n NO_2 -mittaukset perustuvat noin 400–450 nm aallonpituusvälillä olevan säteilyn tarkasteluun, sillä NO_2 -molekyyleillä on tällä välillä erityisen tunnistettava, säteilyä vaimentava "sormenjälki". Tämä väli sisältyy näkyvän valon aallonpituuksiin (violetti väri), minkä vuoksi mittauksia haittaavat esimerkiksi pilvet: ne käytännössä estävät satelliittia "näkemästä" niiden alapuolella olevaa ilmakehää. Tämä on erityisen merkittävää lyhytikäisten kaasujen kuten NO_2 :n kannalta, sillä lyhyen elinikensä vuoksi ne eivät yleensä kulkeudu pystysuunnassa paljon rajakerrosta korkeammalle (ilmakehän alin ~ 1 km). NO_2 :n pitoisuudet ovat lisäksi rajakerroksen sisälläkin keskittyneet varsin lähelle maanpintaa, erityisesti suurten lähteiden kuten kaupunkien alueella. Tämän vuoksi pilvien peittämiltä alueilta tehty NO_2 -satelliittimittaukset jätetään yleensä huomiotta mittauksia käsiteltäessä (vrt. kuva 7). Koska pilvien ja lumen peittämän maanpinnan erottaminen toisistaan on satelliitin näkökulmasta monesti vaikeaa, jätetään pilvien lisäksi samalla huomiotta myös lumisia alueita. Tämä yhdessä valon vähäisen määrän kanssa haittaa NO_2 :n satelliittimittausten tekemistä talvella, minkä vuoksi tässä raportissa tarkastellaan yksinomaan talvikuukausien ulkopuolista aikaa vuodesta. Koko maata ajatellen täksi aikaväliksi on valittu 1.4.–30.9.2019.

Satelliitti-instrumentin mittaamasta koko ilmakehän pylväspitoisuudesta voidaan laskennallisesti erottaa sen ala- ja yläilmakehän komponentit. Alailmakehän (troposfäärin) komponentti on näistä kahdesta NO_2 :n kannalta olennaisin sekä NO_2 :n lyhyen eliniän että sen terveysvaikutusten vuoksi. Tämän takia kaikissa tämän raportin analyyseissä NO_2 :n satelliittimittauksina käytetään troposfäärin pylväspitoisuutta.

2.3.1 Aiemmat tulokset

Suomen alueella tehtyjä satelliittien ilmanlaatumittauksia on käsitelty jo aiemmin julkaistussa raportissa (*Sundström ym., 2020*), jossa niitä vertailtiin myös erilaisiin maanpintamittauksiin. Raportissa havaittiin, että erilaisista mittausmenetelmistä huolimatta NO_2 :n maanpinta- ja satelliittimittaukset korreloivat hyvin toistensa kanssa. Erityisen hyvä korrelaatio saavutettiin, kun vertailu rajattiin koskemaan pelkästään heikkojen tuulien aikaisia mittauksia ja useamman aseman muodostamia alueellisia

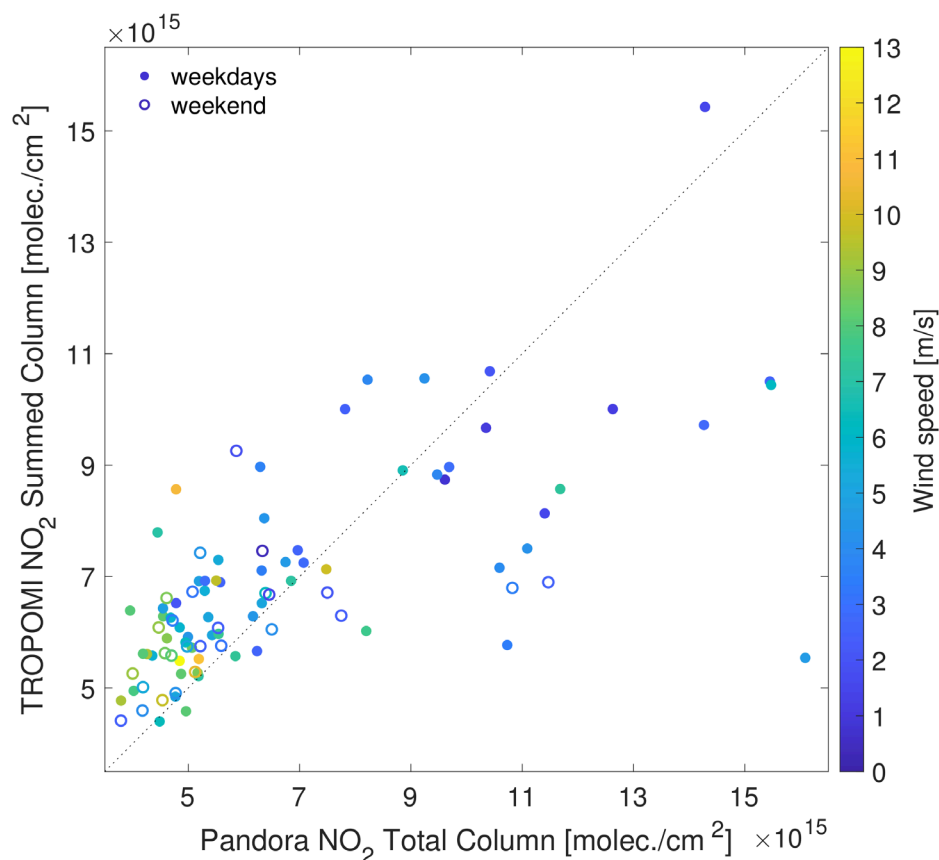
kokonaisuuksia. Satelliittihavaintojen todettiin lisäksi olevan hyödynnettävissä ilmanlaadun maantieteelliseen seurantaan, pitoisuuksien kulkeutumisen tarkasteluun sekä ajallisten vaihteluiden tunnistamiseen (kuva 11).



Kuva 11. OMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO₂-mittausten keskiarvo Suomessa ja lähialueilla vuosina 2005 ja 2018. Mittaukset on keskiarvoistettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on 0,125° × 0,125°. Pitoisuudet on esitetty yksikössä 10¹⁵ molekyyliä/cm². Pitoisuudet ovat laskeneet näiden vuosien välillä selvästi.

Sundström ym. (2020) raportin lopussa kerrattiin myös *Ialongo ym. (2020)* tekemän tutkimuksen tulokset, jossa TROPOMIn NO₂-mittauksia verrattiin Helsingin Kumpulassa sijaitsevan Pandora-instrumentin mittauksiin. Pandora-instrumentit ovat maanpinnalta käsin toimivia kaukokartoitusinstrumentteja, joita käytetään satelliittimittausten vertailuinstrumentteina. Pandora tekee mittauksensa auringon valon avulla, vastaavalla periaatteella kuin satelliitit. Sen ei kuitenkaan tarvitse käyttää ilmakehästä siroavaa ja maanpinnalta heijastuvaa valoa, vaan se voi maanpintainstrumenttina mitata suoraan auringosta ilmakehän läpi tulevaa valoa. Tämä parantaa selvästi Pandoran signaali-kohinasuhdetta suhteessa satelliitteihin, mikä tekee siitä erityisen hyvän vertailuinstrumentin. TROPOMIn ja Pandoran mittaukset edustavat lisäksi myös samaa koko ilmapilarin NO₂-pitoisuutta (yksiköissä mole./cm²), mikä tekee niiden vertailusta yksinkertaista.

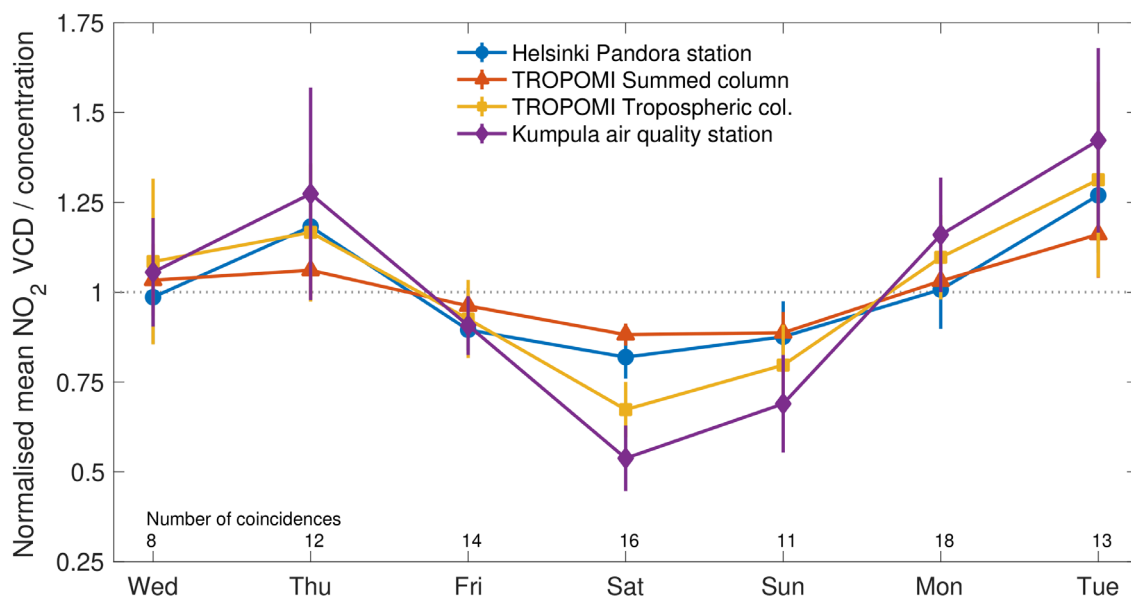
Ialongo ym. (2020) tekemän vertailun tulokset on esitetty kuvassa 12. Nähdään, että TROPOMIn ja Pandoran mittaukset korreloivat hyvin pitoisuuksien ollessa alhaisia, mutta huonommin kun pitoisuudet ovat korkeita. Lisäksi havaitaan, että TROPOMI yliarvioi alhaisia pitoisuuksia ja aliarvioi suhteellisen korkeita pitoisuuksia. Molemmat seikat liittyvät todennäköisesti instrumenttien mittausten erilaiseen alueelliseen edustavuuteen. TROPOMIn mittaukset edustavat suhteellisen suuren, noin 7 × 3,5 km kokoisen alueen keskimääräistä pylväspitoisuutta, kun taas Pandoran mittaukset edustavat sen kapean, aurinkoa kohti osoittavan näkökentän sisäistä pitoisuutta. Pandora on siis paljon herkempi paikallisille pitoisuuksien vaihteluille kuin TROPOMI, mikä on tyypillinen tulos satelliitti- ja maanpintahavaintoja vertailtaessa. Kokonaisuutena TROPOMIn todettiin vertailussa kuitenkin toimivan sille asetettujen teknisten vaatimusten mukaisesti.



Kuva 12. Samaan aikaan ja samassa paikassa (Kumpula, Helsinki) tehtyjen Pandora- ja TROPOMI-instrumenttien NO₂-mittausten vertailu aikavälillä 15.4.–30.9.2018. Pitoisuudet on esitetty yksikössä 10¹⁵ molekyylä/cm². Mittausten täydellinen 1:1-vastaavuus on esitetty pisteiviivalla, jonka alapuolelle jäävät pisteet merkitsevät TROPOMI:n tekemää pitoisuuksien aliarviointia suhteessa Pandoraan ja yläpuolelle jäävät yliarviointia. Pisteiden värillä on merkitty tuulen nopeutta mittaushetkellä, minkä lisäksi täysinäiset pisteet merkitsevät arkipäivinä tehtyjä mittauksia ja ontot pisteet viikonloppuina tehtyjä mittauksia.

TROPOMI:n ja maanpintainstrumenttien erilainen herkkyys paikallisille pitoisuuksille käy ilmi myös kuvasta 13, jossa on esitetty NO₂:n pitoisuuksien suhteellinen vaihtelu eri viikonpäivien välillä. Vaihtelu on suurinta Kumpulan ilmanlaatuaseman mittauksissa, sillä se on maanpinnan tason pitoisuuksia mittaavana instrumenttina herkin paikallisille pitoisuusvaihteluille. Pandoran mittaama koko ilmakehän pylväspitoisuus on TROPOMI:n vastaavaa (kuvassa "Summed Column") herkempi, kuten jo kuvan 12 yhteydessä todettiin. Näitä molempia herkempi on TROPOMI:n mittaama alailmakehän pylväspitoisuus (kuvassa "Tropospheric col."), sillä NO₂:n vaihtelut ovat suurimpia lähellä maanpintaa. Kaikki instrumentit kykenevät havaitsemaan NO₂:n tyypillisen työmatkaliikenteestä johtuvan viikonaikaisen vaihtelun, jossa pitoisuudet ovat alhaisimmillaan viikonloppuna.

Ialongo ym. (2020) tekemä tutkimus on osa laajempaa ESan ylläpitämää kansainvälistä validointikampanjaa (S5P Mission Performance Centre (MPC)), joka valvoo säännöllisesti TROPOMI:n mittausten luotettavuutta. S5P MPC julkaisee joka kolmas kuukausi validointiaktiviteeteistaan kootun raportin Internet-sivuillaan (S5P MPC, 2020).



Kuva 13. NO₂-pitoisuuksien viikonaikainen vaihtelu Helsingissä Kumpulan ilmanlaatuasemalla aikavälillä 15.4.–30.9.2018 eri instrumenttien mittausten perusteella. Kuvaajassa on esitetty kunkin instrumentin eri viikontähtien mittausten keskiarvo jaettuna kyseisen instrumentin koko viikon mittausten keskiarvolla (yksikötön). Pystyakselilla mainittu VCD on lyhenne sanoista "Vertical Column Density" eli pylväspitoisuus. "Summed column" tarkoittaa koko ilmakehän pylvään pitoisuutta, "Tropospheric col." alailmakehän pylvään pitoisuutta.

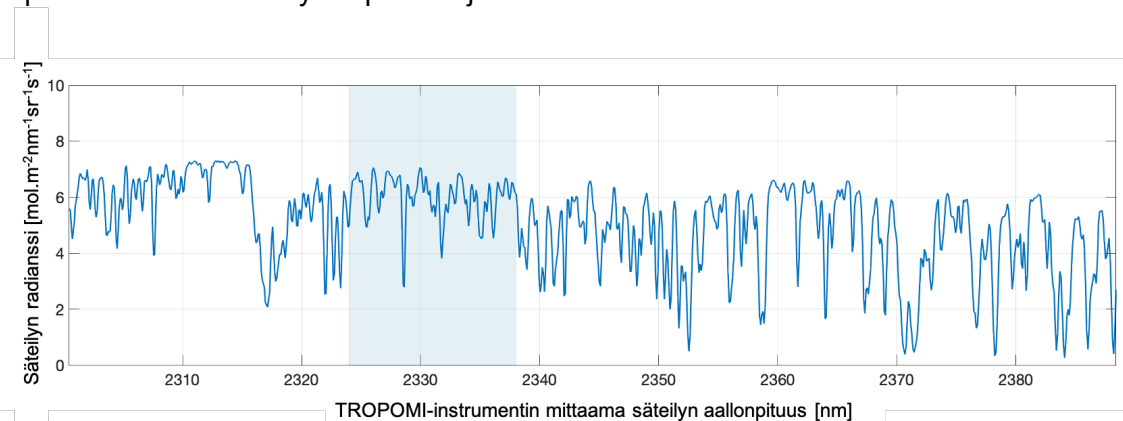
- Tämän raportin satelliittimittausten avulla tehdyt NO₂-pitoisuustarkastelut perustuvat TROPOMI-instrumentin mittauksiin.
- TROPOMI:n troposfäärinen NO₂-mittaus edustaa pitoisuutta maanpinnalta katsottuna noin 10 km korkeudessa ilmapilarissa.
- NO₂-havaintoja häiritsee syys- ja talviaikana valon vähyys sekä joissain tapauksissa lumi. Tästä syystä tarkastelut tehdään 1.4.–30.9.2019 aikavälillä.
- TROPOMI:n NO₂-mittausten luotettavuus on todettu vertaamalla niitä vastaavalla menetelmällä toimivien maanpintainstrumenttien mittauksiin.

2.4 Hiilimonoksidin satelliittimittaukset

Hiilimonoksidin satelliittimittaukset perustuvat joko lämpösäteilyn tai lähi-infrapuna-alueen mittauksiin. CO-molekyylit vaimentavat säteilyä lähellä 2,3 mikrometrin aallonpituusalueella, joka kuuluu ns. lähi-infrapuna-alueeseen. Lämpösäteilyalueen CO-mittaukset tehdään tyypillisesti noin 4,5–4,7 mikrometrin aallonpituuksilla. Näiden kahden eri aallonpituusalueen havainnot eroavat toisistaan siten, että lähi-infrapunamittaukset riippuvat auringon valon määrästä ja näin ollen havaintoja ei saada talvi- tai yöaikaan. Lämpösäteilyyn perustuvia mittauksia puolestaan voidaan tehdä myös yöllä ja talvella. Toisaalta lähi-infrapunamittaukset ovat herkempiä pinnan lähellä

tapahtuville CO-pitoisuuksien muutoksille, kun taas lämpösäteilyyn perustuvat havainnot kuvaavat erityisesti ylempänä ilmakehässä tapahtuvia muutoksia kuten kaukokulkeutumista.

Tässä raportissa analysoidaan ensimmäistä kertaa satelliitista saatavia hiilimonoksidi-havaintoja Suomessa. Työssä käytetään TROPOMI-instrumentin CO-havaintoja, jotka perustuvat lähi-infrapunamittauksiin aallonpituusvälillä 2 324–2 338 nm (kuva 14). TROPOMI on tällä hetkellä paikalliselta erotuskyvyltään tarkin CO-havaintoja tuottava satelliitti-instrumentti (mittauspikselin koko 7×7 km, 2019/08 alkaen 7×5,5 km). TROPOMIsta saatava mittaustulos kertoo hiilimonoksidin kokonaismäärän kyseisen alueen yläpuolella maanpinnan ja satelliitin välisessä ilmapilarissa. Tämä tarkoittaa sitä, että pienelle alueelle maanpinnalla (= pikselin pinta-alan kokoluokka) keskittyvät lähteet eivät yleensä erotu yksittäisistä satelliittimittauksista. Ne voidaan kuitenkin joissain tapauksissa saada näkyviin pitkän ajan keskiarvossa.



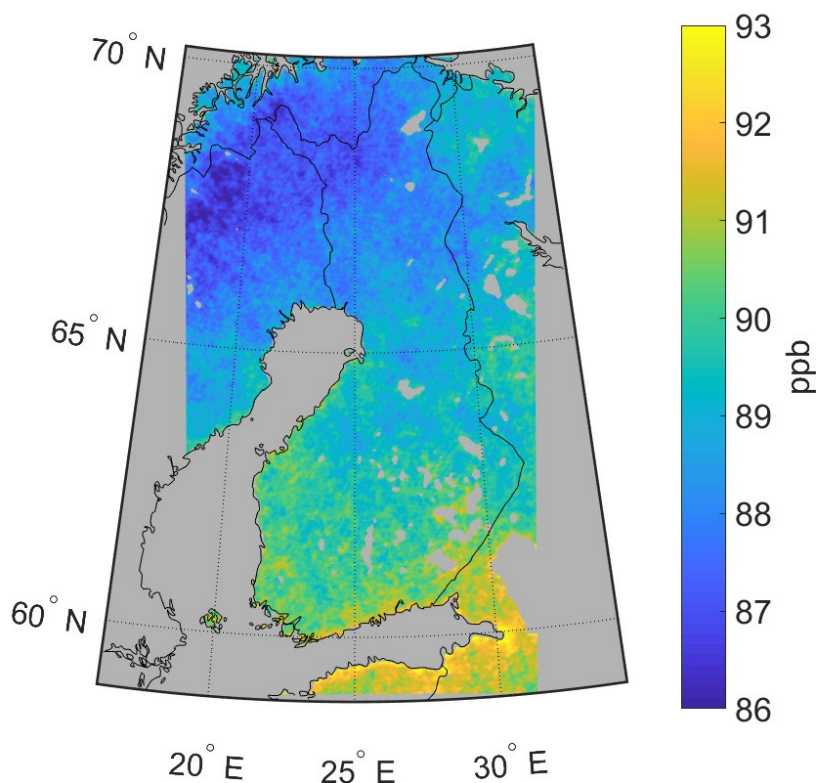
Kuva 14. Esimerkki TROPOMI-instrumentin tekemästä infrapuna-alueen säteilymittauksesta yhdessä mittauspikselissä. Kuvaan on varjostettu aallonpituusalue, jota käyttämällä säteilymittaus voidaan muuntaa laskenta-algoritmillä ilmapilarin CO-pitoisuudeksi.

TROPOMIsta CO-havaintoja saadaan sekä pilvettömissä että pilvisissä tilanteissa. Paksun pilven päältä mitattaessa TROPOMI:n CO-pitoisuus kuitenkin vastaa vain pilven yläpuolisen ilmapilarin pitoisuutta eikä näin ollen ole herkkä maanpinnalla tapahtuville vaihteluille. Tästä syystä analyysissä on käytetty vain havaintoja, joissa pilvisyys ei kokonaan estä havainnointia maanpinnalle asti. Koska vesi on lähes heijastamaton pinta lähi-infrapuna-aallonpituuksille, järvien ja merien päältä mittauksia saadaan vain pilvisissä tilanteissa. Tästä syystä myös vesistöjen yltä tehdyt CO-mittaukset on suodatettu pois.

Hiilimonoksidin elinaika ilmakehässä on muutamia kuukausia vuodenajasta riippuen. CO:n pääasiallinen poistuminen ilmakehästä tapahtuu valokemiallisten reaktioiden kautta ja näin ollen sen elinaika riippuu voimakkaasti saatavilla olevan auringon UV-säteilyn määrästä. CO-pitoisuuksissa onkin nähtävissä selvä vuodenaikaisvaihtelu: maksimipitoisuudet saavutetaan talvella ja minimi kesällä, jolloin auringonsäteily on voimakkaimmillaan. Hiilimonoksidin suhteellisen pitkän elinajan vuoksi se on melko tasaisesti sekoittunut ilmakehän alimmassa n. 10 km paksuisessa kerroksessa ja kaukokulkeutuminen on huomioitava satelliittihavaintoja analysoitaessa. Nämä kaukokulkeutumiset voivat nostaa hetkellisesti satelliitilla havaittuja alueellisia CO-pitoisuuksia, jos keskiarvoistusaika on lyhyt. Kuvassa 15 on esitetty TROPOMI:n CO-havaintojen pitkäaikainen keskiarvo Suomessa vuosina 2018–2020. Hiilimonoksidin alueellisesta jakaumasta nähdään, että kaiken kaikkiaan pitoisuudet Suomessa ovat

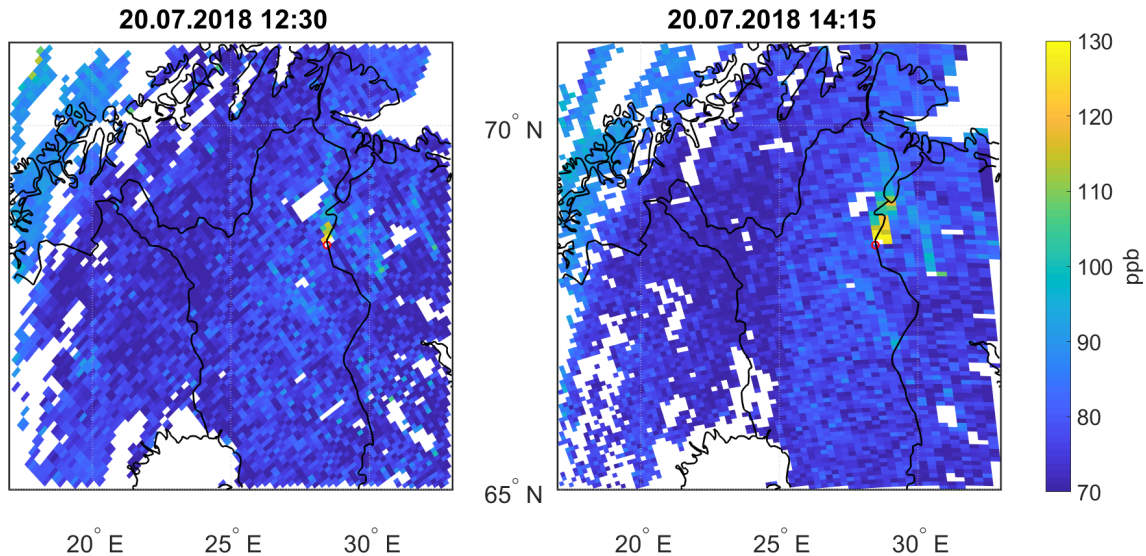
alhaiset ja alueellisia eroja on verrattain vähän. Suurin lähde lähialueilla on Pietari, jossa havaitaan selvästi kohonneita CO-pitoisuuksia.

CO sekoitussuhteen keskiarvo, 2018-2020



Kuva 15. Hiilimonoksidin sekoitussuhteen keskiarvo (yksikössä ppb) 2×2 km hilaan laskettuna vuosina 2018–2020. Vesistöt, joiden kohdalta on todella vähän tai ei ole lainkaan mittauksia, on merkitty harmaalla; samoin laskenta-alueen ulkopuolinen osuus.

Poikkeuksena yksittäisten lähteiden havainnointiin ovat metsäpalot, jotka päästävät ilmakehään nopeasti suuria määriä hiilimonoksidia. Voimakkaiden metsäpalojen yhteydessä CO-signaali voidaan Suomenkin oloissa havaita jo yksittäisestä ylilennosta. Kuvassa 16 on esitetty esimerkki 20.7.2018 Suomen ja Venäjän rajalla Raja-Joosepissa olleesta metsäpalosta, jonka aiheuttama CO-pitoisuuksien nousu voitiin havaita selvästi TROPOMI-mittauksissa peräkkäisissä satelliitin ylilennoissa.



Kuva 16. Raja-Joosepin raja-asema (punainen ympyrä) suljettiin 20.7.2018 lähistöllä olleiden suurten metsäpalojen vuoksi. Palojen aiheuttamat kohonneet CO-pitoisuudet (kirkas keltainen alue) erottuivat selvästi taustapitoisuuksista TROPOMI-satelliittimittauksissa. Iltapäivän yllennosta nähdään myös kuinka syntynyt hiilimonoksidi on kulkeutunut tuulten mukana kohti pohjoista.

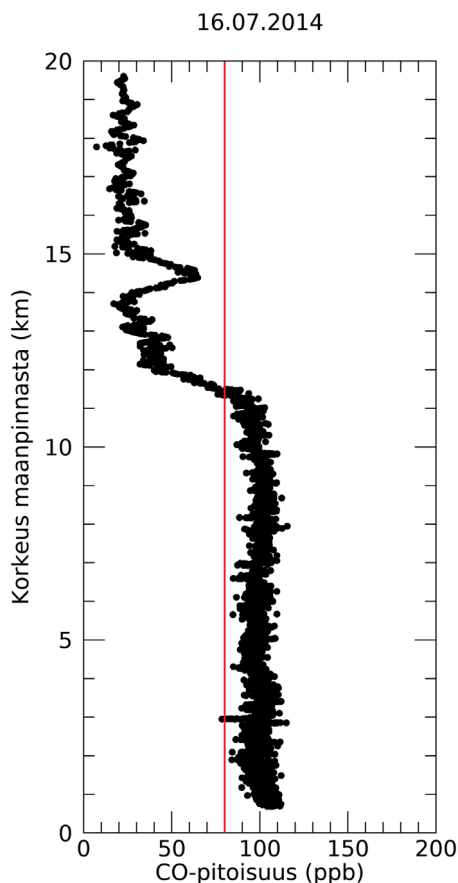
2.4.1 Hiilimonoksidin satelliittimittausten yksiköistä

TROPOMI:n CO-havainnot kuvaavat hiilimonoksidin määrää maanpinnalta ilmakehän ulkorajalle ulottuvassa ilmapilarissa. Yksikkönä voidaan käyttää molekyyliä/cm², samoin kuten esimerkiksi typpidioksidille. Satelliiteista saatu hiilimonoksidin määrä voidaan muuntaa myös CO:n sekoitussuhteeksi ilmapilarissa ja ilmoittaa se yksikössä ppb (parts per billion), jota maanpintahavainnoissa yleensä käytetään. Sekoitussuhde ppb-yksikössä kertoo, montako CO-molekyyliä olisi miljardin satunnaisesti valitun ilmakehän molekyylin joukossa. Tässä on kuitenkin syytä muistaa se oleellinen ero, että maanpintamittauksessa tuo otanta koskisi mittalaitteen välittömässä läheisyydessä olevia molekyyliä, kun taas satelliittimittauksen tapauksessa molekyylit poimittaisiin satunnaisesti eri korkeuksilta mittapisteen yläpuolella olevasta ilmapilarista.

Ilmapilarin ja pintamittauksen välistä sekoitussuhteen tulkintaeroa voidaan havainnollistaa käyttämällä Ilmatieteen laitoksen Sodankylän mittausasemalla tehtyjä CO:n profiilimittauksia. Nämä profiilimittaukset on tehty nk. AirCore-mittauslaitteella (*Karion, 2010*). AirCore koostuu pitkästä ohuesta putkesta, joka nostetaan suuren luotaspallon avulla ilmaan noin 30 kilometrin korkeuteen, missä pallo lopulta puhkeaa. Puhkeamisen jälkeen putki laskeutuu maahan laskuvarjon hidastamana. Laskeutumisen aikana putkeen kertyy ilmanäytteitä eri korkeuksilta. Putken laskeuduttua maahan se noudataan mahdollisimman pian ja putkessa oleva ilma analysoidaan ja tuloksena saadaan määritettyä esimerkiksi hiilimonoksidin sekoitussuhteen pystyjakauma (Kuva 17).

Jos samassa paikassa kyseisenä päivänä olisi tehty CO:n maanpintamittaus, tulos olisi noin 110 ppb. Samassa tilanteessa satelliittimittaus antaisi puolestaan sekoitussuhteen, joka olisi samaa suuruusluokkaa kuin painotettu keskiarvo kaikista profiilimittauksessa näkyvistä mittauspisteistä (kuva 17, punainen viiva). Näin ollen satelliittihavainnon ilmapilarin sekoitussuhde olisi noin 80 ppb. On siis muistettava, että satelliitin ja maanpintamittauksen välillä on oleellinen ero vaikka molemmat havainnot

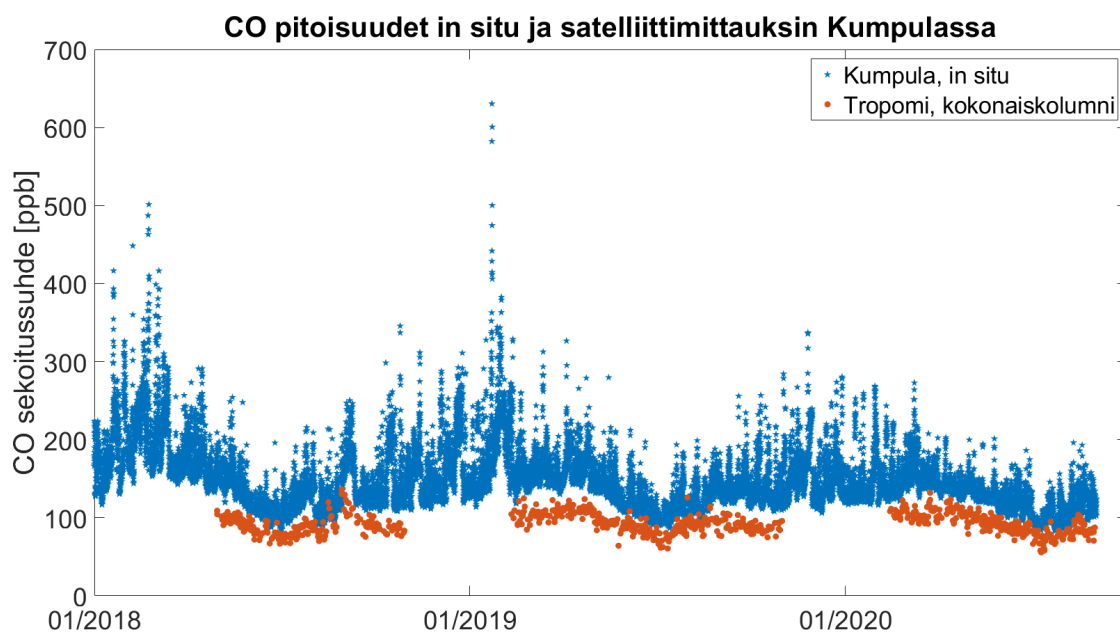
on annettu samoissa yksiköissä ja että satelliittihavainto antaa yleensä matalamman arvion sekoitussuhteesta kuin mitä pintamittauksista nähdään. Tästä erosta huolimatta pinnan lähellä tapahtuvat pitoisuuksien muutokset näkyvät satelliittimittauksissa, vaikkakin usein vaimeampina.



Kuva 17. Esimerkki Sodankylässä tehdystä AirCore CO-profiilimittauksesta. Profiilimittauksesta nähdään CO:n sekoitussuhteen pystyjakauma maanpinnalta noin 20 km korkeuteen. Punainen pystyviiva osoittaa kaikista profiilin mittapisteistä määritettyä painotettua keskiarvoa, joka on myös satelliiteista saatava havainnon arvo kyseisessä tilanteessa.

Kuvassa 18 on esitetty maanpinnalla tehdyt mittaukset Helsingin Kumpulassa ja TROPOMI-satelliitin ilmapilarin mittaukset Kumpulan yltä. Tästäkin kuvasta nähdään, että maanpinnalta mitatut sekoitussuhteet ovat yleensä korkeampia kuin koko ilmapilarin sekoitussuhteet. Molemmissa mittaustavoissa havaitaan samanlainen vuodenaikaisvaihtelu, joka johtuu siitä, että CO poistuu ilmakehästä nopeammin auringonvalon lisääntyessä.

Maanpintamittauksissa havaitaan enemmän lyhytaikaista vaihtelua. Tähän on syynä satelliittimittauksen keskiarvoistus: satelliittimittaus havainnoi suurempaa aluetta (minimissään $7 \times 5,5$ km) maan pinnalta ilmakehän ylimpiin kerroksiin asti. Vaihtelut, jotka näkyvät maanpintamittalaitteessa voivat olla paikallisia eivätkä merkittävästi muuta ympärillä olevan $7 \times 5,5$ km:n alueen keskimääräistä pitoisuutta, jolloin satelliittimittauksin tätä muutosta ei havaita.



Kuva 18. CO:n sekoitussuhteen (yksikössä ppb) maanpintamittaukset Helsingin Kumpulassa (sininen tähti) ja ilmapilarin satelliittimittaukset Kumpulan päältä (oranssi ympyrä) 2018–2020.

- Tässä raportissa tarkastellaan ensimmäistä kertaa hiilimonoksidin satelliittihavaintoja Suomessa.
- Instrumenttina käytetään TROPOMIa, joka on tällä hetkellä paikalliselta erotuskyvyltään tarkin CO-havaintoja tuottava satelliitti-instrumentti.
- Satelliittihavainnoista saatu CO-pitoisuus voidaan ilmoittaa sekoitussuhteena (ppb), joka kuvaa koko ilmapilarin keskimääräistä CO:n sekoitussuhdetta.
- Pitkän ajan keskiarvo vuosilta 2018–2020 osoittaa, että CO-pitoisuudet Suomessa ovat matalat ja alueelliset erot hyvin pieniä.

3 ILMANLAADUN ARVIOINNIN TULOKSET

Seuraavissa kappaleissa 3.1–3.12 on arvioitu ilmanlaadun seuranta-alueiden ilmanlaatua komponenteittain vuosien 2015–2019 ilmanlaadun mittausten perusteella sekä typpidioksidin ja hiilimonoksidin osalta hyödyntämällä satelliittihavaintoja. Kappaleiden lopussa on esitetty yhteenveto seuranta-alueiden ilmanlaadusta suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin. Tekstissä on esitetty pääkaupunkiseudun pitoisuuksien kuvaajat. Muiden seuranta-alueiden kuvaajat löytyvät ilmanlaatumittausten osalta liitteestä 1 ja satelliittimittausten osalta liitteestä 2.

Tuloskuviissa on havainnollistettu mittausaseman ympäristön alue- ja päästötyyppiä seuraavin värikoodein:

lila = liikenneasema kaupunkialueella

turkoosi = liikenneasema esikaupunkialueella

punainen = teollisuusasema

vaalean vihreä = tausta-asema esikaupunki- tai maaseutualueella

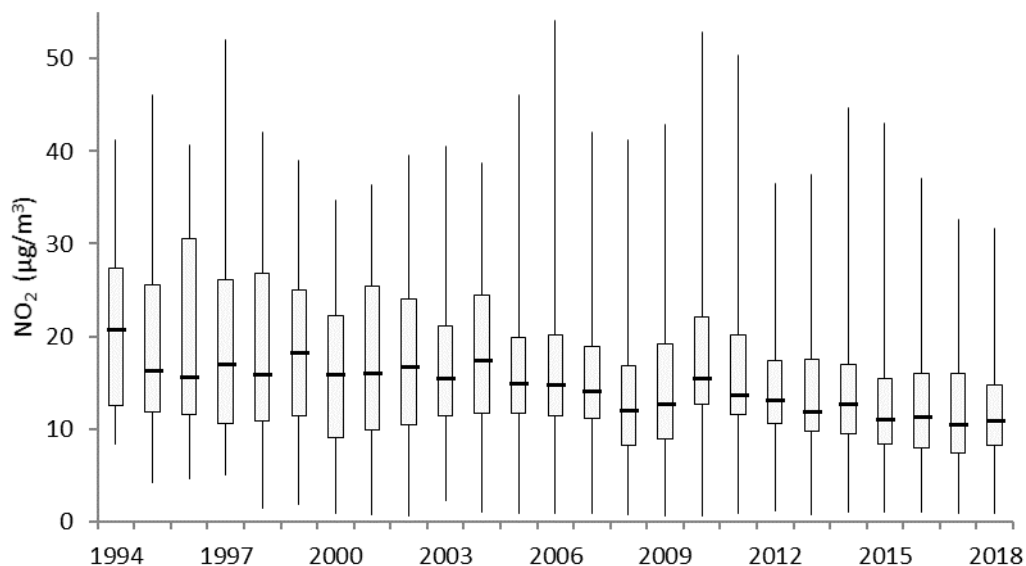
tumman vihreä = kaupunkitausta-asema

vihreä = Ilmatieteen laitoksen maaseututausta-asema

oranssi = tuntematon (esim. päästölähteenä satama, pienpoltto)

3.1 Typpidioksidi- ja typenoksidipitoisuudet

Typenoksidipitoisuudet ovat alentuneet selvästi pitkäjänteisen typenoksidipäästöjen vähennystyön ansiosta, mutta typpidioksidipitoisuudet eivät kaupungeissa pitkään alentuneet odotetusti. Selvää myönteistä kehitystä on saavutettu vasta vuoden 2015 jälkeen, kun suurimmat typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudet ovat pienentyneet eikä vuosiraja-arvo $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ enää ylity Suomessa missään (kuva 19).

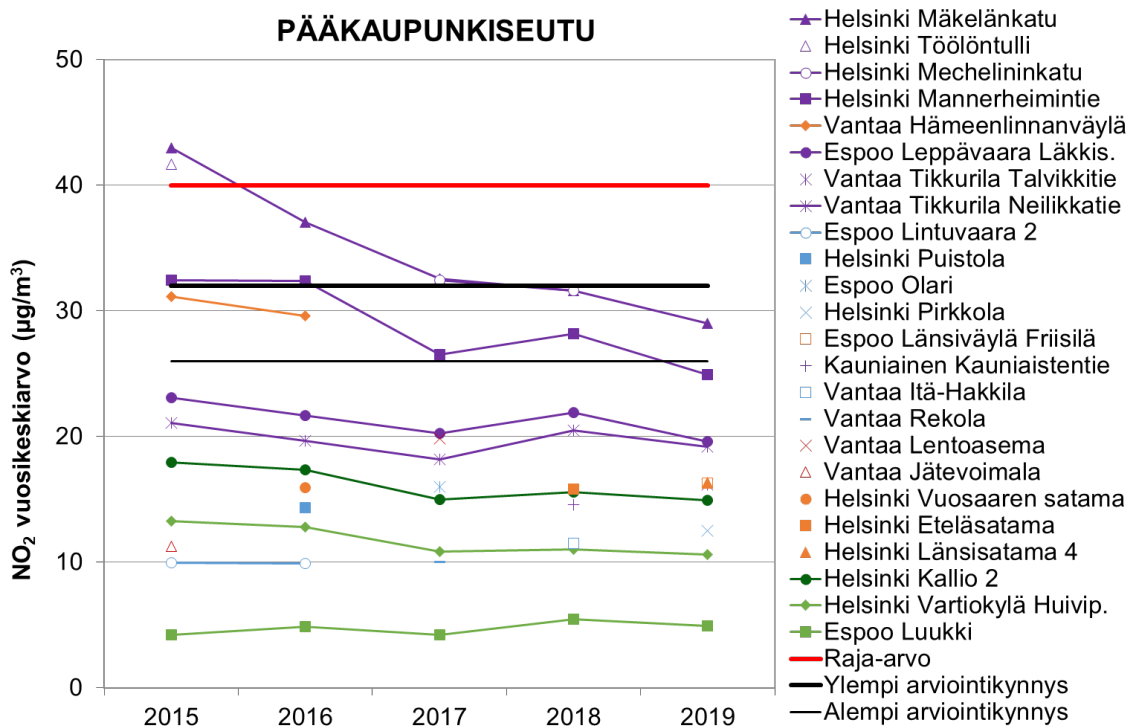


Kuva 19. Typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1994–2018 (Anttila, 2020). Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 26–59 mittausaseman tulokset. Vuonna 2018 typpidioksidipitoisuuden mittausasemia oli 59 kpl.

3.1.1 Ilmanlaatumittaukset

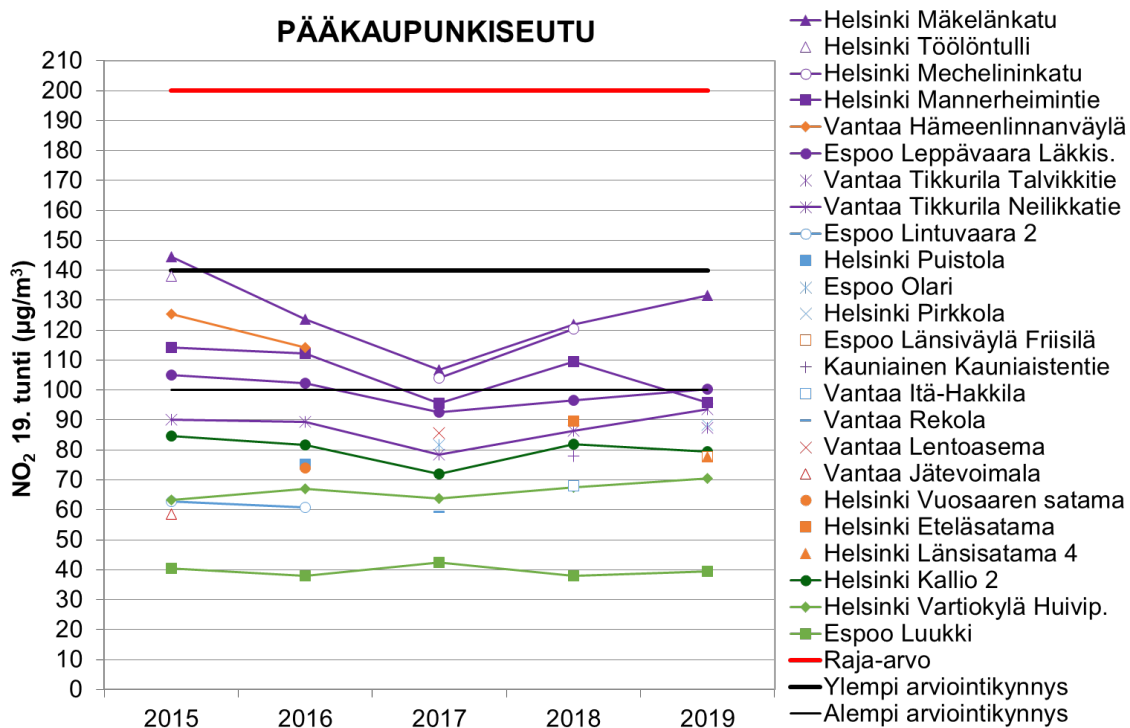
Typpidioksidin pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja typpidioksidipitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle sekä 19. korkeimmalle tuntipitoisuudelle (tuntiraja-arvo) annettuihin arviointikynnyksiin. Alla on esitetty typpidioksidin mittaustulokset pääkaupunkiseudulta, jossa mitataan Suomen korkeimmat typpidioksidin pitoisuustasot. Muilla seuranta-alueilla mitatut typpidioksidipitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

Korkeimmat typpidioksidipitoisuudet ovat selvästi pienentyneet viime vuosina. Typpidioksidin vuosiraja-arvo on ylittynyt Helsingissä viimeksi vuonna 2015 (kuva 20). Typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudelle annettu ylempi arviointikynnys ylittyy Suomessa ainoastaan pääkaupunkiseudulla. Arviointikynnykset ylittäviä typpidioksidin vuosipitoisuuksia on tarkasteluajanjaksolla mitattu pääkaupunkiseudun vilkasliikenteisten väylien läheisyydessä (Mäkelänkatu, Mechelininkatu, Mannerheimintie, Töölöntulli, Hämeenlinnanväylä). Kaikilla muilla ilmanlaadun seuranta-alueilla typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen.



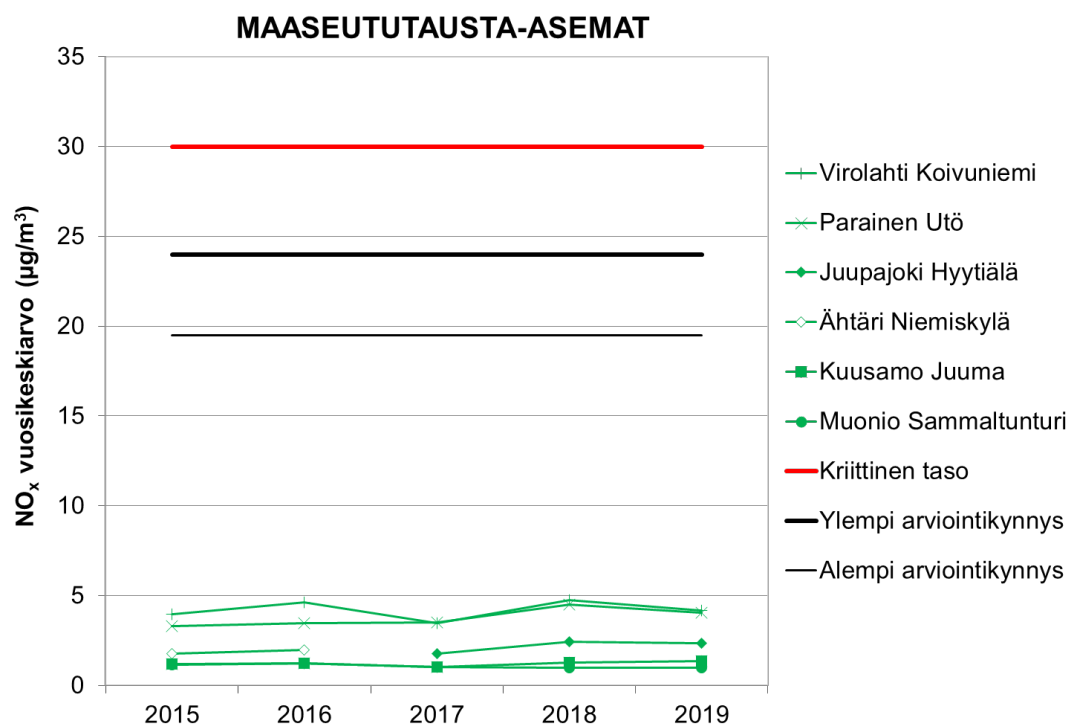
Kuva 20. Mitatut typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Typpidioksidin tuntiraja-arvoon verrannolliset pitoisuudet ylittävät alemman arviointikynnyksen pääkaupunkiseudulla (kuva 21) ja Pohjois-Pohjanmaalla. Alempi arviointikynnys on ajanjaksolla ylittynyt pääkaupunkiseudun vilkasliikenteisten väylien varsilla sekä Oulun keskustassa. Muilla ilmanlaadun seuranta-alueilla alempi arviointikynnys alittuu. Kuitenkin varsin lähellä alemmaa arviointikynnystä typpidioksidipitoisuudet ovat Varsinais-Suomessa ja Satakunnassa, Hämeessä, Pirkanmaalla sekä Etelä-Pohjanmaalla ja Pohjanmaalla.



Kuva 21. Mitatut typpidioksidin 19. korkeimmat tuntipitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Typen oksidien (NO_x) kriittinen taso on annettu kasvillisuuden ja ekosysteemien suojelemiseksi ja sitä sovelletaan vain tausta-alueilla. Typen oksidien vuosikeskiarvopitoisuudet alittavat selvästi alemman arviointikynnyksen kaikilla maaseututausta-alueilla eri puolilla Suomea (kuva 22).



Kuva 22. Mitatut typen oksidien vuosikeskiarvopitoisuudet Ilmatieteen laitoksen maaseututausta-asemilla vuosina 2015–2019.

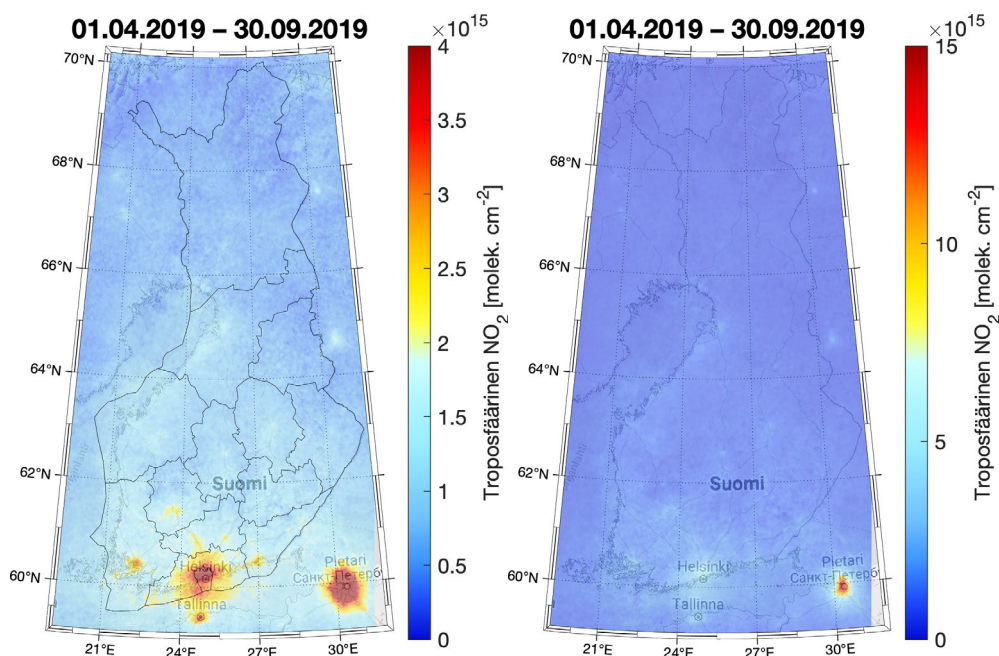
Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista typpidioksidin ja typen oksidien pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5. Typpidioksidin ja typen oksidien pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys, YAK=ylempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	NO ₂		NO _x
	1 h	1 v	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	> AAK	> YAK	> AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	< AAK	< AAK	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK	< AAK	< AAK
Häme	< AAK	< AAK	< AAK
Kaakkois-Suomi	< AAK	< AAK	< AAK
Pirkanmaa	< AAK	< AAK	< AAK
Keski-Suomi	< AAK	< AAK	< AAK
Etelä-Savo	< AAK	< AAK	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	< AAK	< AAK	< AAK
Pohjois-Savo	< AAK	< AAK	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK	< AAK	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	> AAK	< AAK	< AAK
Kainuu	< AAK	< AAK	< AAK
Lappi	< AAK	< AAK	< AAK

3.1.2 Satelliittihavainnot

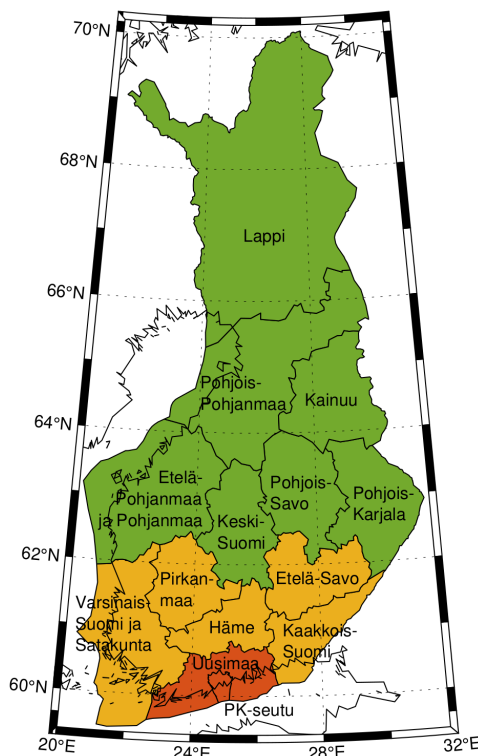
Kuvassa 23 on esitetty typpidioksidin keskimääräinen pitoisuus Suomen alueella 1.4.–30.9.2019 välisenä aikana TROPOMI-instrumentin mittausten perusteella. Korkeimmat pitoisuudet keskittyvät lähelle liikenteellisesti vilkkaita asutuskeskuksia sekä voimakkaita pistelähteitä kuten voimalaitoksia ja tehtaita. Lisäksi esimerkiksi pääkaupunkiseudulta Tampereelle johtava moottoritie erottuu kuvassa. Energiantuotannon sekä liikenne- ja teollisuuspäästöjen vaikutusta on kuitenkin vaikeaa erottaa täydellisesti toisistaan NO₂:n pitoisuuksien jakaumassa. Lähialueisiin verrattuna Suomen keskimääräiset typpidioksidipitoisuudet ovat verrattain alhaisia: Helsingin seudun korkeimmat pitoisuudet ovat noin 40 prosenttia Pietarin korkeimmista pitoisuuksista. Euroopan ympäristökeskuksen EEA:n ylläpitämän Euroopan päästörekisterin E-PRTR (European Pollutant Release and Transfer Register) mukaisia NO₂:n pistelähteitä ja TROPOMI:n mittaamia NO₂-pitoisuuksia on mahdollista tarkastella tarkemmin kaupungeittain Ilmatieteen laitoksen julkaisemassa Internet-palvelussa (<https://sampon.fmi.fi/airpollution/no2/fi/>).



Kuva 23. Suomen alueen keskimääräinen NO₂-pitoisuus 1.4.–30.9.2019 välisenä aikana TROPOMI-instrumentin mittausten perusteella. Pitoisuudet on esitetty yksikössä 10¹⁵ molekyyliä/cm². Mittaukset on keskiarvoistettu tasaväliseen hilaan, jonka resoluutio on 2×2 km. Kuvat eroavat toisistaan pelkästään väriskaalalle valittujen rajojen mukaan: vasemmanpuoleisessa kartassa on pyritty korostamaan Suomen alueen pitoisuuksia, kun taas oikeanpuoleisessa kartassa pitoisuudet on suhteutettu Pietarin pitoisuuksiin. Vasemmanpuoleiseen karttaan on lisäksi merkitty NO₂:n ilmanlaadun seuranta-alueiden rajat.

Koska typpidioksidin pitoisuuserot eri puolilla Suomea ovat suuria, tarkastellaan jokainen ilmanlaadun seuranta-alue seuraavaksi erikseen. Tarkasteluissa väriskaalan rajoina käytetään kolmea eri vaihtoehtoa helpottamaan eri puolilla Suomea olevien lähteiden korostamista ja samaan aikaan mahdollistamaan samoja rajoja käyttävien alueiden keskinäinen vertailu. Kuvaan 24 on merkitty värien avulla alueet, joiden

satelliittihavaintojen tarkasteluissa käytetään keskenään samoja väriskaalan rajoja: pääkaupunkiseutu, Etelä-Suomen alue sekä Keski- ja Pohjois-Suomen alue.



Kuva 24. Ilmanlaadun seuranta-alueet ja niiden rajat vuoden 2021 tilanteen mukaan. Alueet, joiden liitteessä olevien satelliittihavaintojen tarkasteluissa on käytetty keskenään samoja väriskaalan rajoja, on merkitty tähän kartalle samalla värillä.

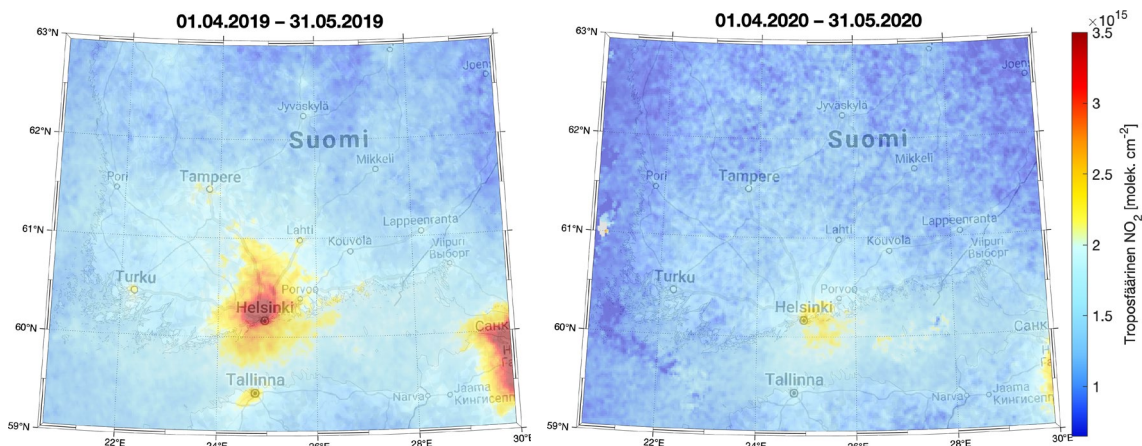
Seuranta-alueittaiset tulokset on esitetty liitteessä 2. Typpidioksidin keskimääräinen pitoisuus pääkaupunkiseudun ja Uudenmaan alueella on esitetty vastaavalla aikavälillä kuin kuvassa 23, minkä lisäksi kuvaan on lisätty pääkaupunkiseudun rajat. Uudenmaan mittakaavassa korkeimmat pitoisuudet rajautuvat varsin tarkasti pääkaupunkiseudulle, eli ne ovat yhtenevät väestön alueellisen jakauman kanssa.

Muilla seuranta-alueilla erottuvat suurimmat kaupungit kuten Turku, Tampere, Oulu, Kuopio ja Jyväskylä sekä merkittävimmät teollisuuskaupungit. Varsinais-Suomen ja Satakunnan sekä Pirkanmaan vertailujen perusteella kaupunkien pitoisuudet eivät vaikuta olevan suoraan verrannollisia asukaslukuun: esimerkiksi Turun pitoisuudet ovat Tamperetta korkeampia ja Rauman pitoisuudet Poriä korkeampia. Kaakkois-Suomessa puolestaan Kotkan pitoisuudet ovat poikkeuksellisen korkeita asukaslukuun nähden. Kaupunkien pitoisuudet riippuvat kuitenkin liikenteen lisäksi myös alueella olevista pistelähteistä, joiden suuruutta ja sijaintia suhteessa keskimääräisiin pitoisuuksiin on mahdollista tarkastella aiemmin mainitun Internet-palvelun avulla (<https://sampo.fmi.fi/airpollution/no2/fi/>). Monet mainituista kaupungeista ovat lisäksi satamakaupunkeja, minkä vuoksi laivaliikenteen vaikutusta eri satamien pitoisuuksiin tutkitaan tarkemmin tämän kappaleen lopussa.

NO₂:n pitoisuudet laskevat Suomessa pohjoista kohti eikä Pohjois-Karjalan, Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan ja Lapin kuvissa erotu enää merkittävästi taustapitoisuuksia suurempia lähteitä Oulun seudun lisäksi. Kuvia tulkittaessa on huomioitava, että yksittäisen TROPOMin mittauksen virhe tai "taustakohina" (enimmillään noin $0,7 \times 10^{15}$ molek./cm²) edustaa suuruusluokaltaan tyypillisiä Suomen alueen taustapitoisuuksia.

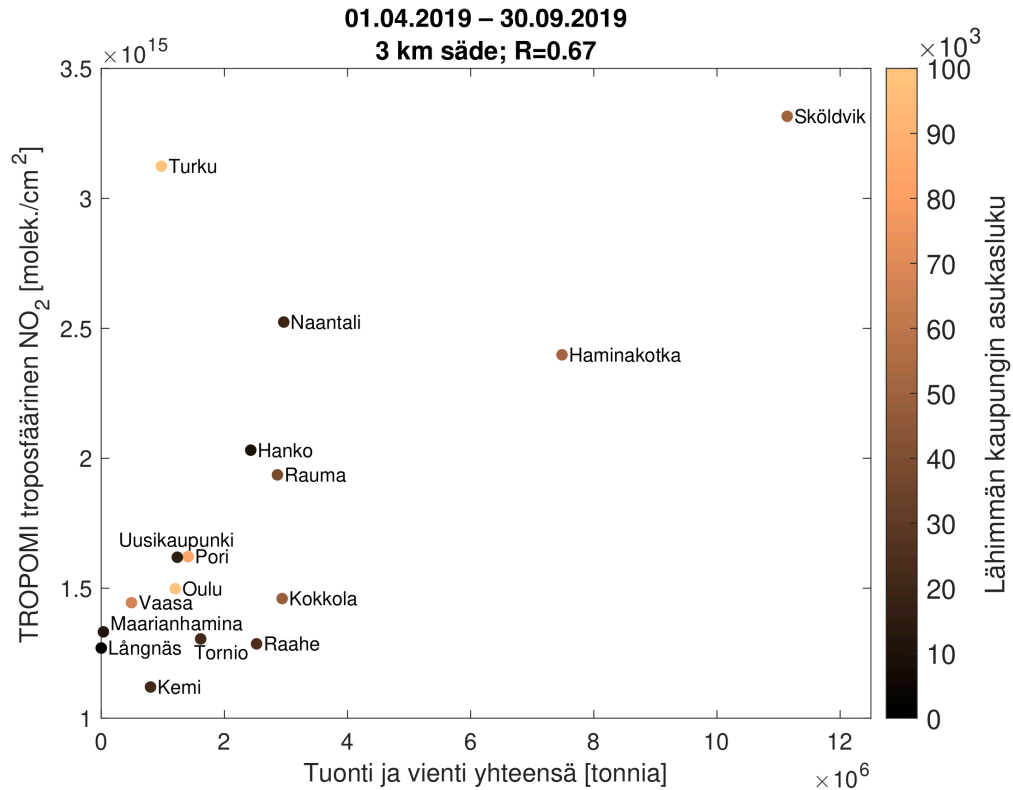
Vaikka taustakohinan vaikutus pienentyikin keskiarvoistamisen tuloksena, ei tässä raportissa esitettyjen karttojen pohjalta ole suositeltavaa tehdä yksityiskohtaisia päätelmiä pitoisuuksien jakautumisesta suurimpien lähteiden kuten kaupunkien ulkopuolella. Karttojen perusteella kannattaakin sen sijaan tarkastella esimerkiksi pitoisuuseroja eri seuranta-alueiden välillä tai pitoisuuksien alueellista jakautumista seuranta-alueiden sisällä.

Satelliitti-instrumenttien suuri alueellinen kattavuus mahdollistaa laajamittaisen ilmiöiden, kuten koronapandemian liikkumisrajoitusten, alueellisten vaikutusten tarkastelun. Kuva 25 esittää koronapandemian vaikutusta Etelä-Suomen alueen keskimääräisiin NO_2 -pitoisuuksiin huhti-toukokuussa vuonna 2020 verrattuna vuoteen 2019. Pääkaupunkiseudun pitoisuudet alenivat tarkastelujaksolla noin 45 prosenttia, mikä ei kuitenkaan ota huomioon eri vuosina vallitsevia erilaisia sääolosuhteita. Ero pienenee 34 prosenttiin, kun tarkastelu rajataan pelkästään heikkojen tuulien aikaisiin mittauksiin. Nämä ovat yhteneviä tuloksia Keski-Euroopan kaupunkien pitoisuusmuutoksia tarkastelleen tutkimuksen kanssa (ESA, 2020), jonka teki Alankomaiden ilmatieteen laitos KNMI.



Kuva 25. Keskimääräiset alailmakehän NO_2 -pitoisuudet (yksikössä 10^{15} molekyyliä/ cm^2) Etelä-Suomen alueella huhti-toukokuussa vuosina 2019 ja 2020 TROPOMI-instrumentin mittausten perusteella.

TROPOMI-instrumentin korkea resoluutio mahdollistaa uudentyyppisiä sovelluksia satelliittimittauksille. Tästä esimerkkinä on kuvassa 26 esitetty Suomen satamien lähialueiden (kolmen kilometrin säde) NO_2 -pitoisuus vuonna 2019 verrattuna sataman läpi kulkeneeseen rahtiliikenteeseen. Rahtiliikenteen voidaan olettaa olevan hyvä ennuste satamassa käyvien alusten yhteispäästöistä, sillä painavamman rahdin kuljettaminen vaatii enemmän energiaa ja siten polttoainetta. Kuvassa on lisäksi merkitty väreillä satamaa lähinnä olevan kaupungin asukasluku. Kuvasta nähdään, että Turku ja Naantalia lukuun ottamatta satamien rahtiliikenteen ja niiden lähialueen pitoisuuksien välinen suhde on varsin lineaarinen. Turun sataman osalta sen korkeat pitoisuudet suhteessa rahtiliikenteeseen voivat selittyä sataman läheisyydellä itse kaupunkiin, jonka keskustasta suurin osa on kolmen kilometrin säteellä satamasta. Lisäksi havaitaan, että Kotkan jo aiemmin korkeiksi havaitut pitoisuudet ovat sen sataman (HaminaKotka) osalta samassa suhteessa rahtiliikenteen kanssa. Lopuksi voidaan todeta, ettei satamaa lähinnä olevan kaupungin koko vaikuta olevan selvässä suhteessa sataman alueen pitoisuuksiin.



Kuva 26. Suomen suurimpien satamien keskimääräinen NO_2 -pitoisuus (yksikössä 10^{15} molekyyliä/ cm^2) ja sataman läpi kulkeneen rahdin kokonaistonnimäärä aikavälillä 1.4.–30.9.2019. Rahtiliikenteen tiedot ovat peräisin Tilastokeskuksen StatFin-tietokannasta (Tilastokeskus, 2019). Pitoisuus on laskettu keskiarvona 3 km säteellä satamasta. Kuvaan on lisäksi merkitty väreillä kutakin satamaa lähinnä olevan kaupungin asukasluku. Kuvan otsikossa mainittu R on pitoisuuksien ja rahtiliikenteen välinen korrelaatiokerroin.

Satelliittimittauksiin perustuva objektiivinen arvio maanpintapitoisuuksista

Yhtenä satelliittimittausten suurimpana etuna suhteessa maanpintamittauksiin on niiden suuri maantieteellinen kattavuus: esimerkiksi tässä raportissa tarkasteltu TROPOMI-instrumentti kykenee kartoittamaan koko maapallon yhden päivän aikana. Tämän edun selkein sovelluskohde on käyttää sitä arvioimaan NO_2 -pitoisuuksia sellaisilla ilmanlaadun seuranta-alueilla Suomessa, missä ei tehdä perinteisiä maanpintamittauksia. Tällä hetkellä näitä ovat Etelä-Savon, Kainuun ja Lapin seuranta-alueet. Arviointi tehdään siten, että tuloksia voidaan verrata NO_2 :lle lainsäädännössä määriteltiin ilmanlaadun raja-arvoihin.

Satelliittimittauksen tulos ei itsessään sisällä tietoa NO_2 :n pystysuuntaisesta jakaumasta ilmakehässä. Tämä on ongelmallista ilmanlaadun seurannan kannalta, sillä lainsäädännössä asetetut raja-arvot koskevat NO_2 :n pitoisuuksia lähellä maanpintaa. Kuitenkin erityisesti korkeiden pitoisuuksien alueilla kuten kaupungeissa suurin osa NO_2 :sta on tyypillisesti keskittynyt lähelle maanpintaa, jolloin satelliiteista saadun alailmakehän pylväspitoisuuden voidaan olettaa muodostuvan suurelta osin tästä maanpinnan tason NO_2 :sta. Tässä raportissa tätä oletusta sovelletaan koko Suomen alueelle, jolloin NO_2 :n maanpintapitoisuudet voidaan arvioida käyttäen perinteisten ilmanlaatuasemien ja TROPOMI:n mittausten välistä lineaarista riippuvuutta. Riippuvuus arvioidaan käyttä-

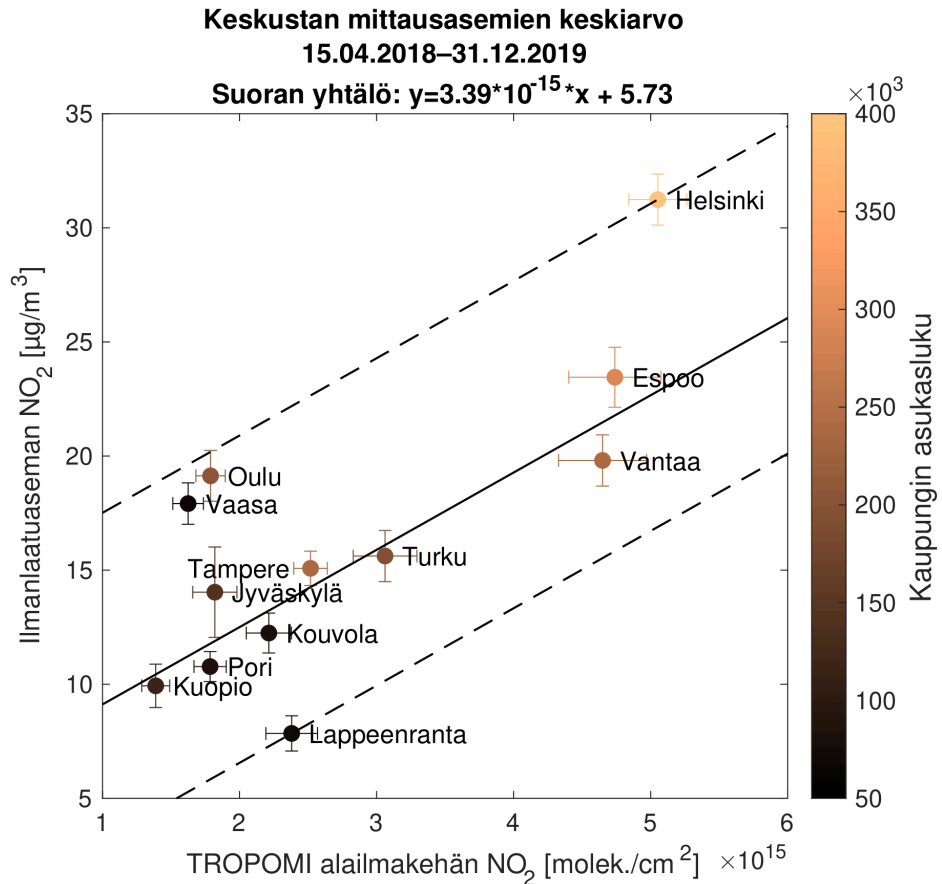
en samaan aikaan ja paikkaan kohdistettuja NO₂:n ilmanlaatuasema- ja satelliittimittauksia.

Riippuvuuden luotettavaksi arvioimiseksi on asemia valittaessa otettava huomioon monta eri tekijää. Koska yksittäinen satelliittimittaus edustaa aina suhteellisen suuren alueen keskimääräistä pitoisuutta, on sen kanssa vertailussa käytettävän ilmanlaatuaseman sijaittava ympäristönsä kannalta edustavalla paikalla. Asemien on lisäksi sijaittava suhteellisen korkeiden pitoisuuksien alueella, jotta satelliittimittauksiin liittyvän taustakohinan vaikutus voidaan minimoida. Nämä vaatimukset huomioiden vertailuun valittiin Suomen suurimpien kaupunkien keskustassa sijaitsevat asemat. Jos saman kaupungin alueelta valikoitui useampi asema, tutkittiin niiden mittauksia kokonaisuutena (keskiarvona) alueellisen edustavuuden parantamiseksi.

Typpidioksidille on määritelty lainsäädännössä kaksi eri raja-arvoa, joiden keskiarvon laskenta-aika on 1 tunti tai kalenterivuosi. Koska tässä raportissa käytetyillä satelliittinstrumenteilla ei ole mahdollista tutkia vuorokausivaihtelua tai määrittää tuntikeskiarvoja, tehdään maanpintapitoisuuksien objektiivinen arviointi vuosikeskiarvojen perusteella. Arvio tehdään vuodelle 2019, sillä vuosi 2020 on koronaviruspandemian vuoksi pitoisuuksiltaan poikkeuksellinen (vrt. kuva 25). Vaihtelevien sääolosuhteiden vaikutus minimoidaan tarkastelemalla pelkästään heikkojen tuulien aikaisia mittauksia (alle 3 m/s), kuten tässä raportissa esitetyissä NO₂-kartoissa.

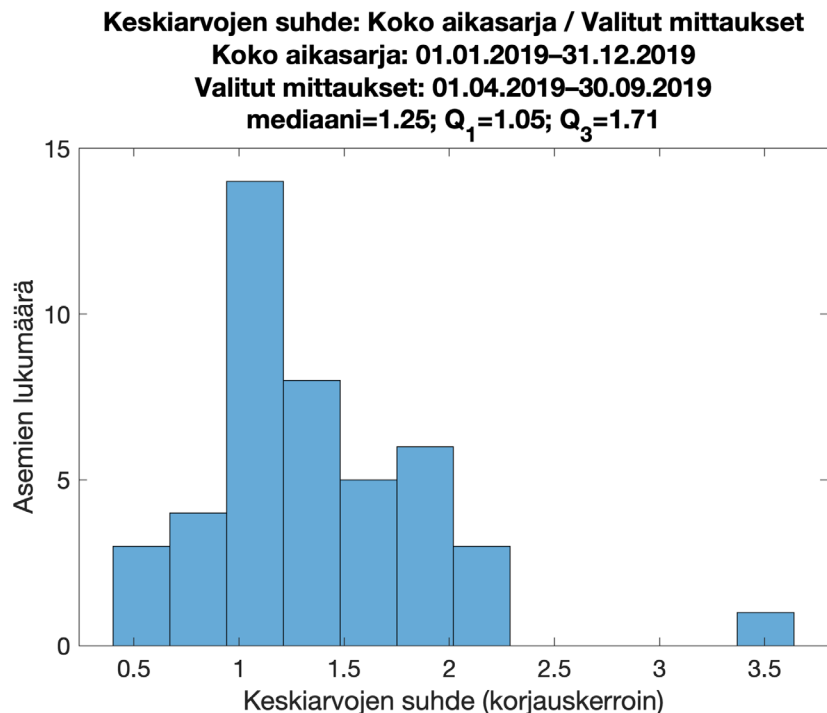
Kuvassa 27 on esitetty ilmanlaatuasemilla tehtyjen mittausten ja satelliittimittausten vertailun tulokset. Kaupunkien pitoisuuskeskiarvot on laskettu koko käytettävissä olevalle aikavälille (pois lukien vuosi 2020), jotta niihin liittyvä virhe olisi mahdollisimman pieni. TROPOMIn ja ilmanlaatuasemien mittausten välinen suhde on varsin lineaarinen (kuvaan merkittyä suoraa seuraava), lukuun ottamatta Oulua, Vaasaa, Lappeenrantaa ja Helsinkiä. TROPOMIn tiedetään aliarvioivan pitoisuuksia suhteessa maanpintamittauksiin erityisen korkeiden pitoisuuksien alueilla (vrt. kuva 12), minkä vuoksi Helsingin tulos ei ole yllättävä. Oulun, Vaasan ja Lappeenrannan tulokset ovat kyseenalaisia, sillä niiden ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo poikkeaa merkittävästi muista samansuuruisista kaupungeista (myös virherajat huomioiden). Nämä neljä kaupunkia on tämän vuoksi jätetty huomiotta arvioitaessa TROPOMIn ja ilmanlaatuasemien mittausten välistä suhdetta. Suhde on arvioitu sovittamalla kaupunkien pisteisiin suora pienimmän neliösumman menetelmällä (Kuva 27, keskimäinen suora). Saadun suoran yhtälö mahdollistaa maanpintapitoisuuksien arvioimisen ($x = \text{TROPOMIn mittaama alailmakehän NO}_2\text{-pitoisuus yksiköissä molek./cm}^2$). Arvioinnin lähtökohtana käytetään seuranta-alueittain laskettuja alueellisia pitoisuuskeskiarvoja aikaväliltä 1.4.–30.9.2019 talvikuukausien vaikutuksen minimoimiseksi. Tästä aiheutuva systemaattinen virhe (verrattuna koko vuoden keskiarvoon) korjataan myöhemmin erillisen korjauskertoimen avulla. Alueellisia keskiarvoja laskettaessa ei oteta huomioon merialueita.

Kuvassa 27 on varsinaisen suorasovituksen lisäksi merkitty näkyviin kaksi muuta suoraa sovituksen virherajojen arvioimiseksi (katkoviivat). Niillä on molemmilla sama kulmakerroin kuin keskimmaisella suoralla, ja ne rajaavat väliinsä kaikki kuvaan merkityt kaupungit. Virherajojen arviointi tehdään niiden avulla vastaavalla tavalla kuin keskimmäistä suoraa käyttäen.



Kuva 27. TROPOMIn alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo (10^{15} molekyylä/ cm^2) ja samaan aikaan tehtyjen ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) Suomen suurimmissa kaupungeissa aikavälillä 15.4.2018–31.12.2019. Pisteiden viikset merkitsevät keskiarvojen arvioitua virhettä (keskiarvon keskivirhe), väri puolestaan merkitsee kaupunkien asukaslukua (Tilastokeskus, 2020). Pisteisiin (lukuun ottamatta Helsinkiä, Oulua, Vaasaa ja Lappeenrantaa) on sovitettu suora pienimmän neliösumman menetelmällä. Sovituksen ylä- ja alapuolella olevat katkoviivat toimivat varsinaisen sovituksen virherajoina. Ne ovat kulmakertoimeltaan vastaavia kuin itse sovitus ja rajaavat välilleen kaikki kuvan pisteet.

Koko vuoden keskimääräisten pitoisuuksien arvioimiseksi on lopuksi otettava huomioon satelliittimittausten erilainen ajallinen edustavuus verrattuna ilmanlaatuasemien mittauksiin. TROPOMIn mittaukset edustavat iltapäivän aikaisia pitoisuuksia (vrt. kuva 8), minkä lisäksi niitä ei ole saatavilla talvikuukausilta. Tästä aiheutuvaa virhettä ja sen korjaamiseksi tarvittavaa korjauskerrointa voidaan arvioida valitsemalla satelliittimittausten kanssa samaan aikaan tehdyt ilmanlaatuasemien mittaukset ja vertaamalla niistä laskettua keskiarvoa koko vuoden 2019 keskiarvoon. Tulos on esitetty kuvassa 28, jossa vaadittava korjauskerroin on laskettu asemakohtaisesti ja tulokset esitetty histogrammin avulla. Koko maan olosuhteita edustamaan on valittu korjauskertoimen mediaani (1,25), sillä se on keskiarvoon verrattuna vähemmän herkkä äärimmäisille arvoille. Kyseistä arvoa sovelletaan maanpintapitoisuuksien arvioimiseksi kaikilla seuranta-alueilla. Korjauskertoimen virherajat arvioidaan niin kutsuttujen ala- ja yläkvartiilien avulla (Q_1 ja Q_3). Ne jakavat lasketut kertoimet siten, että 25 % kaikista kertoimen arvoista on alakvartiilia pienempiä ja 25 % yläkvartiilia suurempia.



Kuva 28. Satelliittimittausten erilaisesta ajallisesta otannasta johtuvan systemaattisen virheen korjaamiseksi tarvittavan kertoimen arvo eri ilmanlaatuasemilla Suomessa histogrammina esitettynä. Q_1 on kertoimien alakvartiili, jota pienempiä kertoimen arvoja edustaa 25 % kaikista asemista. Q_3 on vastaavasti yläkvartiili, jota suurempia arvoja edustaa 25 % kaikista asemista.

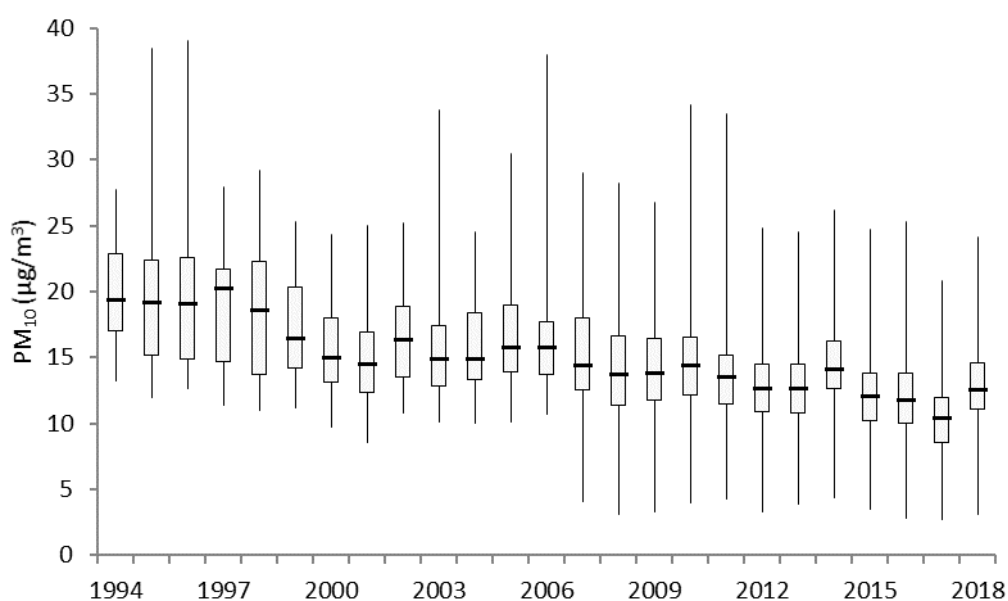
Lopulliset satelliittimittauksista arvioidut keskimääräiset NO_2 :n maanpintapitoisuudet ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on esitetty taulukossa 6. Satelliittimittauksista lasketun typpidioksidin vuosikeskiarvopitoisuus vaihtelee välillä 10–28 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ eri seuranta-alueilla. Etelä-Savon, Kainuun ja Lapin seuranta-alueilla, joilla ei tällä hetkellä enää tehdä NO_2 -mittauksia, voidaan ilmanlaatatietojen raportoinnissa käyttää taulukon arvoja.

Taulukko 6. NO₂:n satelliittimittauksista arvioidut keskimääräiset maanpintapitoisuudet (µg/m³) vuonna 2019 eri seuranta-alueilla. Taulukossa on myös esitetty pitoisuuksien arvioidut virherajat (ala- ja yläraja). Alaraja on laskettu käyttäen kuvan 27 alemmaa suoraa ja kertomalla tulos kuvan 28 alakvartiililla, yläraja puolestaan käyttäen kuvan 27 ylemmää suoraa ja kertomalla tulos kuvan 28 yläkvartiililla.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Arvioitu maanpinnan tason NO ₂ -pitoisuus, vuosikeskiarvo (µg/m ³)
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	28,4 (17,6–53,2)
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	17,4 (8,3–38,2)
Varsinais-Suomi ja Satakunta	13,9 (5,4–33,4)
Häme	14,1 (5,5–33,6)
Kaakkois-Suomi	13,5 (5,1–32,8)
Pirkanmaa	12,9 (4,5–31,9)
Keski-Suomi	11,6 (3,5–30,2)
Etelä-Savo	12,3 (4,0–31,1)
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	11,9 (3,7–30,6)
Pohjois-Savo	11,5 (3,4–30,1)
Pohjois-Karjala	11,0 (3,0–29,4)
Pohjois-Pohjanmaa	10,7 (2,8–29,0)
Kainuu	10,0 (2,2–28,1)
Lappi	9,6 (1,8–27,5)

- NO₂-pitoisuudet seuraavat Suomessa pitkälti väestöjakaumaa: pitoisuudet ovat korkeimmillaan pääkaupunkiseudulla ja Uudellamaalla sekä muissa suurissa Etelä-Suomen kaupungeissa.
- Pääkaupunkiseutu on Suomen selkeästi suurin yksittäinen päästöalue. Pitoisuudet ovat silti alhaisia lähialueisiin (Pietari) verrattuna.
- Pääkaupunkiseudun NO₂-pitoisuudet olivat vuoden 2020 huhti-toukokuussa koronapandemiasta johtuneen poikkeustilan aikaan noin 34 % alhaisempia edeltävään vuoteen verrattuna.
- Satelliittimittauksien avulla arvioidut maanpinnan tason vuosittaiset NO₂-pitoisuudet ovat ilmanlaadun seuranta-alueilla keskimäärin noin 10–28 µg/m³.

Vuoteen 2006 asti hengitettäviä hiukkasia mitattiin ainoastaan kaupunkien vilkasliikenteisissä ympäristöissä. Vuonna 2007 hengitettävien hiukkasten mittaukset aloitettiin myös Pallaksen ja Raja-Joosepin tausta-asemilla, mikä näkyy kuvassa minimipitoisuuksien alenemisena (Anttila, 2020).

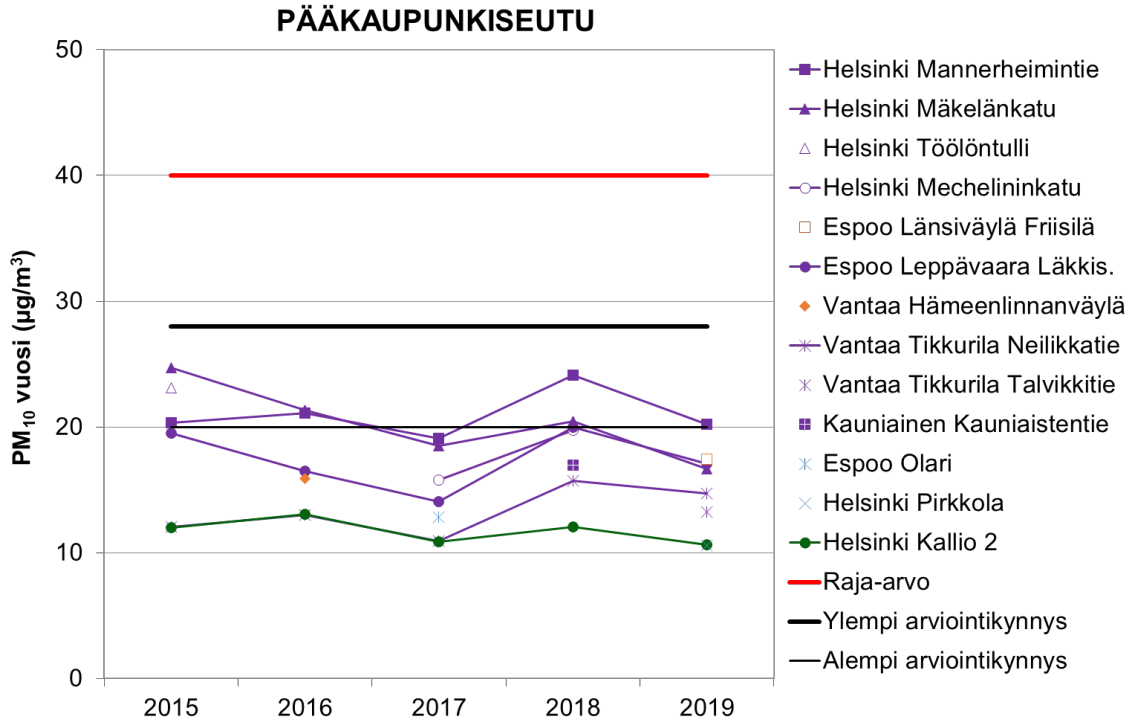


Kuva 29. Hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1994–2018 (*Anttila, 2020*). Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 9–60 mittausaseman tulokset. Vuonna 2018 hengitettävien hiukkasten pitoisuuden mittausasemia oli 60 kpl.

Hengitettävien hiukkasten pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle sekä 36. korkeimmalle vuorokausipitoisuudelle (vuorokausiraja-arvo) annettuihin arviointikynnyksiin. Alla on esitetty mitatut hengitettävien hiukkasten pitoisuudet pääkaupunkiseudulla, jossa mitataan Suomen korkeimmat hengitettävien hiukkasten pitoisuustasot. Muilla seuranta-alueilla mitatut hengitettävien hiukkasten pitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

Kaupungeissa on onnistuttu alentamaan korkeimpia hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia tehostettujen katupölyntorjuntatoimien ansiosta. Vuosikeskiarvopitoisuudelle annettu alempi arviointikynnys ylittyy Suomessa ainoastaan pääkaupunkiseudulla. Alemman arviointikynnyksen ylittäviä hengitettävien hiukkasten vuosipitoisuuksia on tarkasteluajanjaksolla mitattu Helsingissä Mannerheimintien ja Mäkelänkadulla sekä

yhtenä vuotena Töölöntullin mittausasemalla (kuva 30). Kaikilla muilla ilmanlaadun seuranta-alueilla hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen.



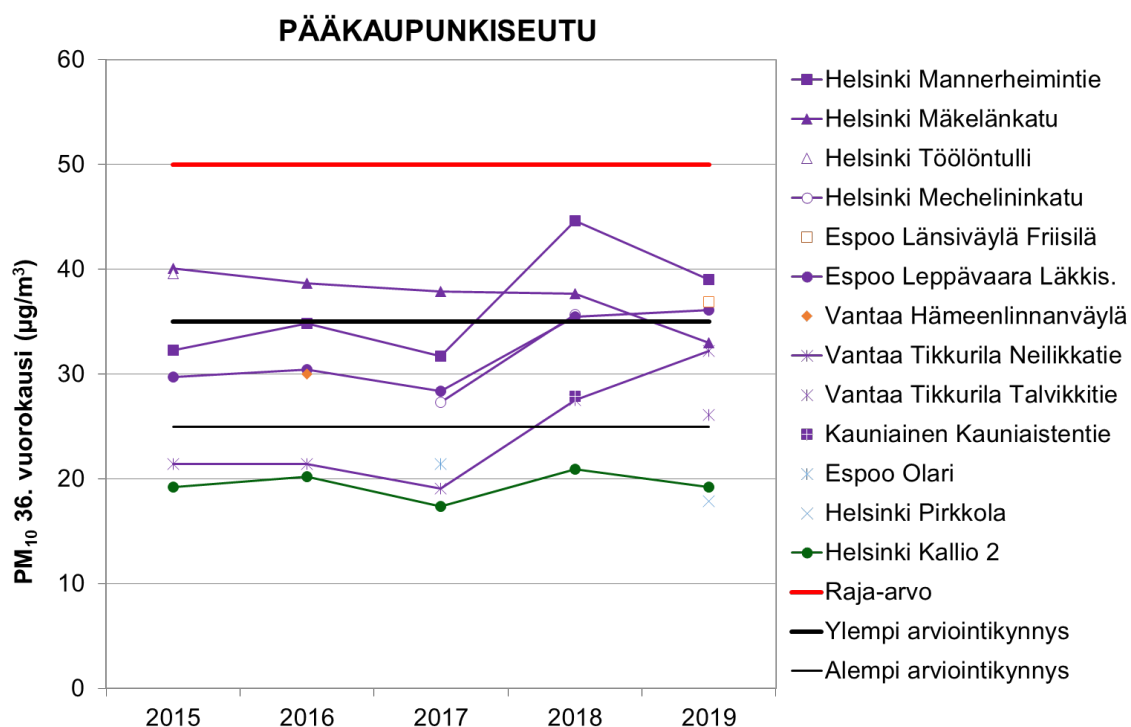
Kuva 30. Mitatut hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Hengitettävien hiukkasten vuorokausiraja-arvoon verrannolliset pitoisuudet ylittävät ylempään arviointikynnyksen pääkaupunkiseudun vilkasliikenteisillä alueilla (kuva 31). Alempi arviointikynnys ylittyy Uudellamaalla, Hämeessä, Kaakkois-Suomessa, Etelä-Pohjanmaalla ja Pohjanmaalla sekä Pohjois-Savossa. Muilla ilmanlaadun seuranta-alueilla alempi arviointikynnys alittuu. Kuitenkin lähellä alempaa arviointikynnystä ollaan myös Lounais-Suomessa ja Pirkanmaalla.

Pohjois-Savossa sijaitsevan Kuopion Sorsasalons mittausasemalla ylempi arviointikynnys ylittyy vuosina 2015–2017, mutta väliaikaisesti kohonneita pölypitoisuuksia aiheutti valtatie 5:n laaja siltatyömaa, joten mittaustuloksia ei ole huomioitu Pohjois-Savon seuranta-alueen yleisen ilmanlaadun arvioinnissa. Samoin Pirkanmaan seuranta-alueella Tampereen Rantatunnelin työmaan pölyämistä seuranneiden Naistenlahden ja Santalahden mittausasemien tuloksia ei ole huomioitu Pirkanmaan ilmanlaadun arvioinnissa. Edellä mainitut tulokset ovat kuitenkin nähtävissä liitteen 1 kuvaajissa.

On huomioitava, että vuonna 2017 otettiin käyttöön päivitetty korjauskertoimet jatkuva-toimisille hiukkasmittalaitteille (Walden ym., 2017), minkä vuoksi mittaustulokset voivat olla mittalaitteesta riippuen vuodesta 2017 eteenpäin tasoltaan joko pienempiä tai suurempia kuin vuosina 2015–2016.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista hengitettävien hiukkasten pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 7.



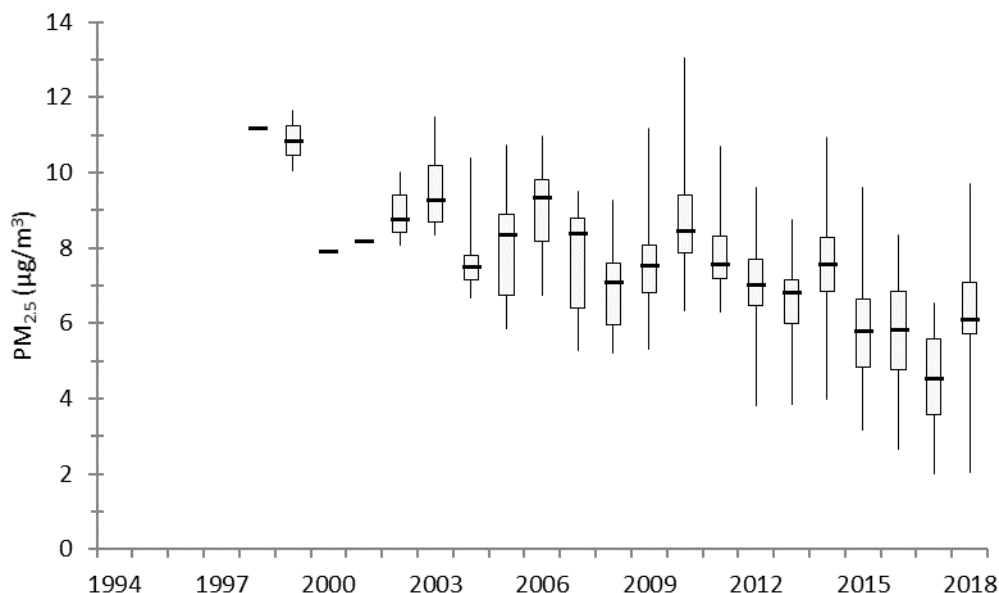
Kuva 31. Mitatut hengitettävien hiukkasten 36. korkeimmat vuorokausipitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Taulukko 7. Hengitettävien hiukkasten pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys, YAK=ylempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	PM ₁₀	
	24 h	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	> YAK	> AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	> AAK	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK	< AAK
Häme	> AAK	< AAK
Kaakkois-Suomi	> AAK	< AAK
Pirkanmaa	< AAK	< AAK
Keski-Suomi	< AAK	< AAK
Etelä-Savo	< AAK	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	> AAK	< AAK
Pohjois-Savo	> AAK	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	< AAK	< AAK
Kainuu	< AAK	< AAK
Lappi	< AAK	< AAK

3.3 Pienhiukkaspitoisuudet

Pienhiukkaspitoisuuksien mittaukset alkoivat Suomessa 2000-luvun alkupuolella. Pitoisuudet ovat kääntyneet laskuun 2010-luvulla, mutta pienhiukkaspitoisuuksien vuosittaiseen vaihteluun vaikuttavat merkittävästi esiintyvien kaukokulkeumaepisodien määrät (kuva 32).



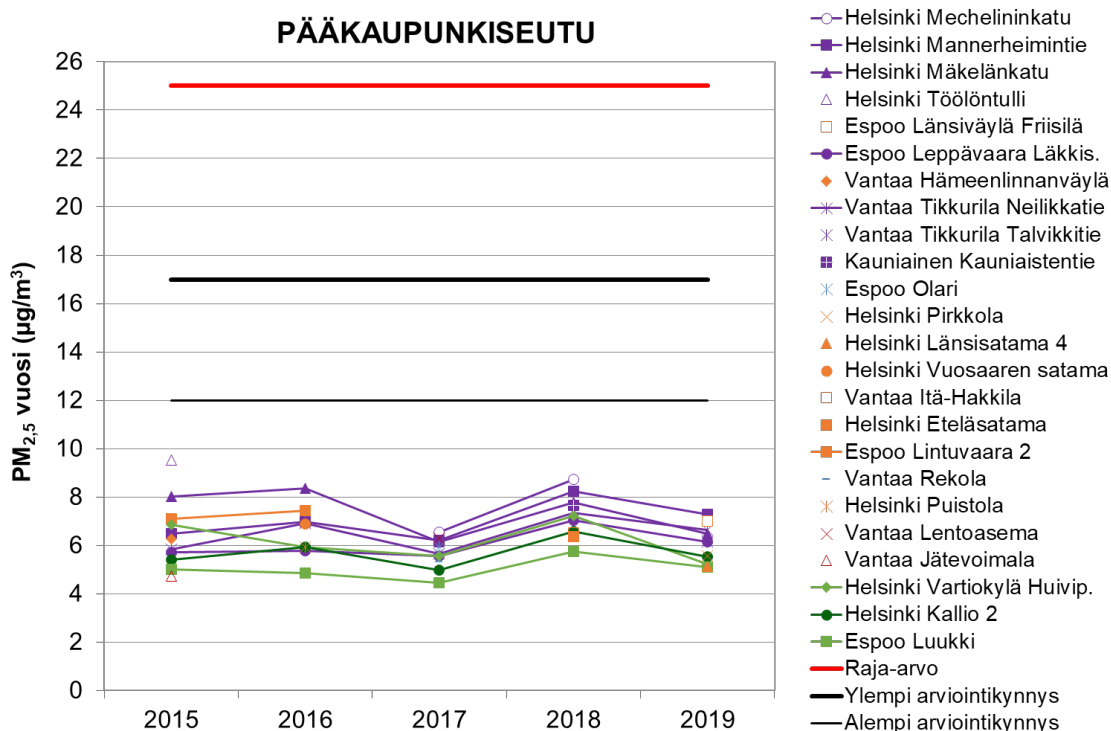
Kuva 32. Pienhiukkasten vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1994–2018. Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 1–32 mittausaseman tulokset. Vuonna 2018 pienhiukkasten pitoisuuden mittausasemia oli 32 kpl.

Pienhiukkasten pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja pienhiukkaspitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Alla on esitetty pääkaupunkiseudulla mitatut pienhiukkaspitoisuudet. Muilla seuranta-alueilla mitatut pienhiukkaspitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

Pienhiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudet alittavat selvästi alemman arviointikynnyksen $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ kaikkialla Suomessa. Pitoisuudet ovat korkeimmillaan pääkaupunkiseudulla, jossa pienhiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudet ovat tarkasteluajanjaksolla vaihdelleet erilaisissa päästöympäristöissä välillä $4,5\text{--}9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kuva 33).

On huomioitava, että vuonna 2017 otettiin käyttöön päivitetyt korjauskertoimet jatkuva-toimisille hiukkasmittalaitteille (Walden ym., 2017), minkä vuoksi mittaustulokset voivat olla mittalaitteesta riippuen vuodesta 2017 eteenpäin tasoltaan joko pienempiä tai suurempia kuin vuosina 2015–2016.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista pienhiukkasten pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 8. Kolmella ilmanlaadun seuranta-alueella (Etelä-Savo, Pohjois-Karjala ja Kainuu) ei ole mitattu pienhiukkaspitoisuutta tarkasteluajanjaksolla, mutta pitoisuustasot on arvioitu samantasoisiksi kuin muillakin seuranta-alueilla eli alempi arviointikynnys alittuu.



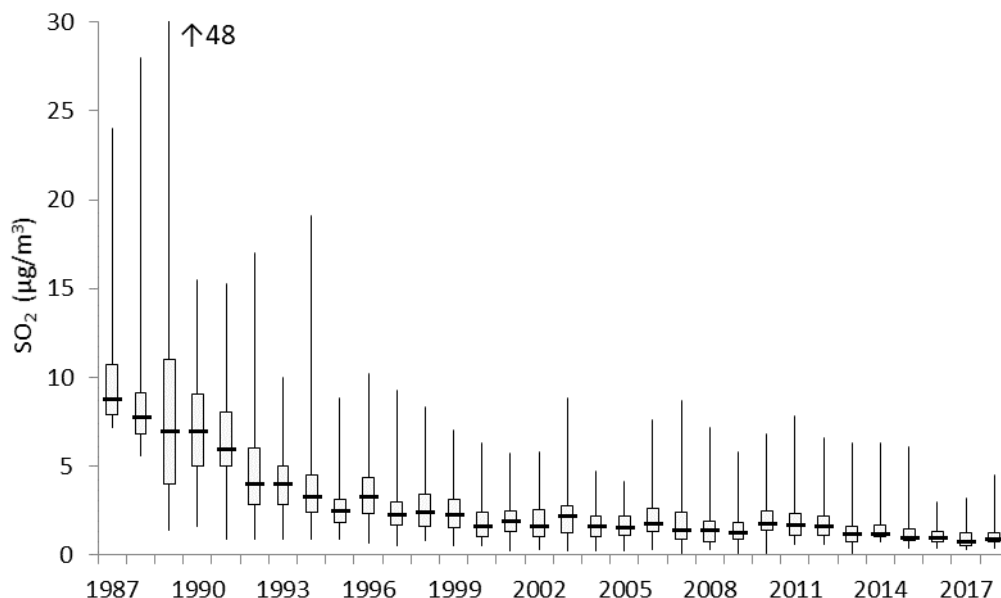
Kuva 33. Mitatut pienhiukkasten vuosikeskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Taulukko 8. Pienhiukkasten pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	PM _{2,5}
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK
Häme	< AAK
Kaakkois-Suomi	< AAK
Pirkanmaa	< AAK
Keski-Suomi	< AAK
Etelä-Savo	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	< AAK
Pohjois-Savo	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	< AAK
Kainuu	< AAK
Lappi	< AAK

3.4 Rikkidioksidipitoisuudet

Rikkidioksidipitoisuudet ovat vähentyneet merkittävästi 1990-luvun pitoisuustasoista rikkidioksidipäästöjen pienentyttyä monilla päästösektoreilla (kuva 34). Rikkidioksidin vuosikeskiarvopitoisuudet ovat nykyisin pieniä, mutta kohonneita lyhytaikaispitoisuuksia voi ajoittain esiintyä teollisuusalueiden sekä satamien läheisyydessä.

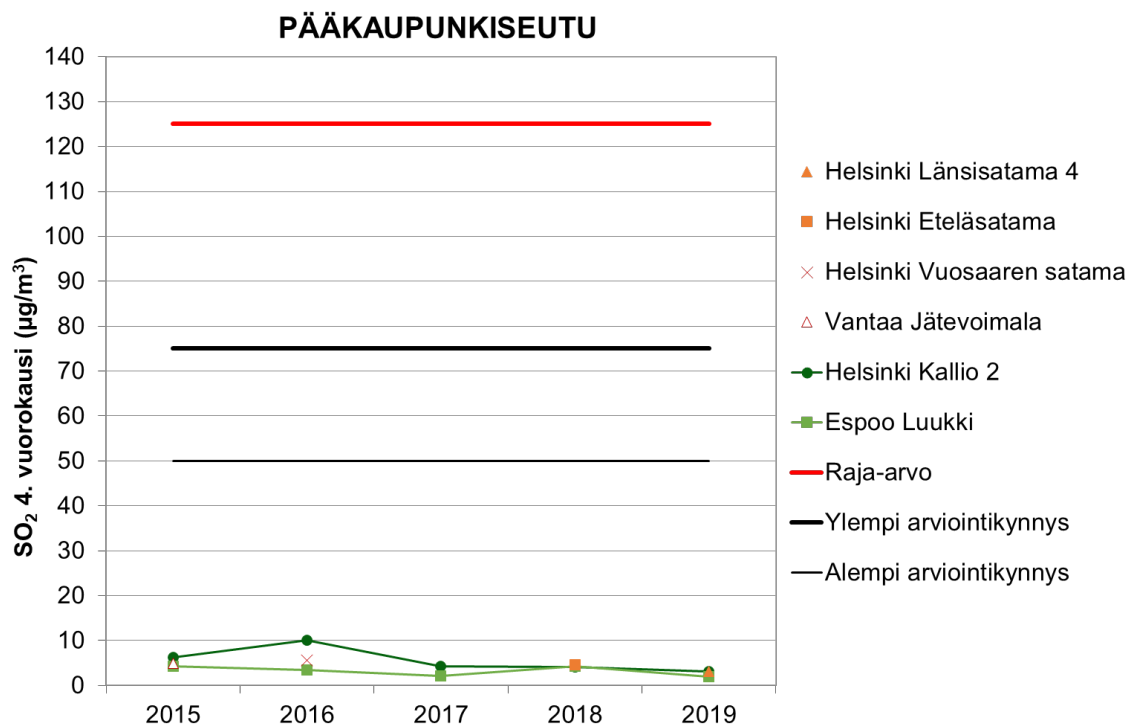


Kuva 34. Rikkidioksidin vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1987–2018 (Anttila, 2020). Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 6–76 mittausaseman tulokset. Vuonna 2018 rikkidioksidipitoisuuden mittausasemia oli 36 kpl.

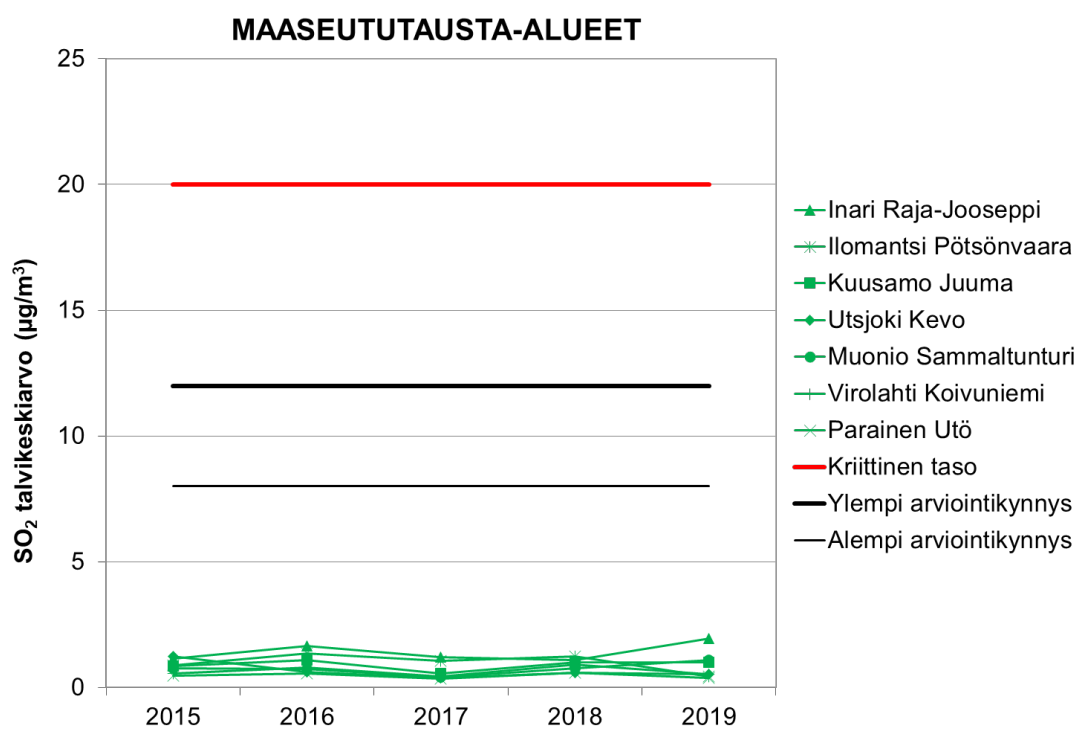
Rikkidioksidin pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja rikkidioksidipitoisuuksia 4. korkeimmalle vuorokausiarvolle (vuorokausiraja-arvo) annettuihin arviointikynnyksiin. Alla on esitetty pääkaupunkiseudulla mitatut rikkidioksidipitoisuudet. Muilla seuranta-alueilla mitatut rikkidioksidipitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

Rikkidioksidin vuorokausiraja-arvoon verrannolliset pitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen selvästi pääkaupunkiseudulla ja kaikkialla muuallakin Suomessa (kuva 35).

Rikkidioksidin kriittinen taso on annettu kasvillisuuden ja ekosysteemien suojelemiseksi ja sitä sovelletaan vain tausta-alueilla. Rikkidioksidin talvikauden (1.10–31.3.) keskiarvopitoisuudet alittavat selvästi alemman arviointikynnyksen maaseututausta-alueilla (kuva 36).



Kuva 35. Mitatut rikkidioksidin 4. korkeimmat vuorokausipitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.



Kuva 36. Mitatut rikkidioksidin talvikeskiarvopitoisuudet maaseututausta-alueilla vuosina 2015–2019.

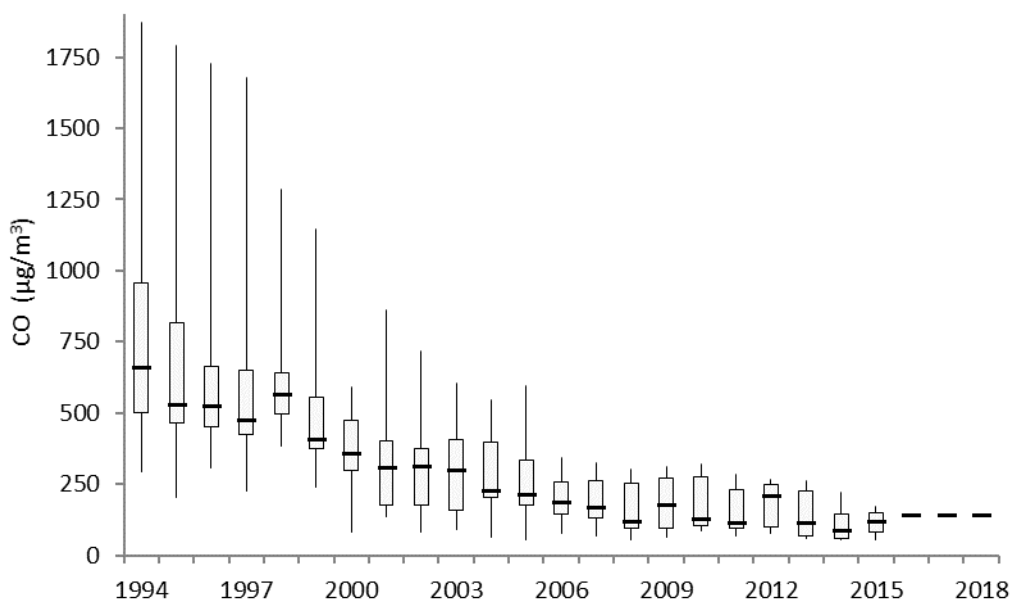
Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista rikkidioksidin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 9. Neljällä ilmanlaadun seuranta-alueella (Häme, Pirkanmaa, Etelä-Savo ja Kainuu) ei ole mitattu rikkidioksidipitoisuutta tarkasteluajanjaksolla, mutta pitoisuustasot on arvioitu samantasoisiksi kuin muillakin seuranta-alueilla eli alempi arviointikynnys alittuu.

Taulukko 9. Rikkidioksidin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	SO ₂	
	24 h	talvi
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK	< AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	< AAK	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK	< AAK
Häme	< AAK	< AAK
Kaakkois-Suomi	< AAK	< AAK
Pirkanmaa	< AAK	< AAK
Keski-Suomi	< AAK	< AAK
Etelä-Savo	< AAK	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	< AAK	< AAK
Pohjois-Savo	< AAK	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	< AAK	< AAK
Kainuu	< AAK	< AAK
Lappi	< AAK	< AAK

3.5 Hiilimonoksidipitoisuudet

Hiilimonoksidipitoisuudet ovat vähentyneet merkittävästi 1990-luvun pitoisuustasoista liikenteen häkypäästöjen pienennyttyä (kuva 37). Hiilimonoksidipitoisuudet ovat nykyisin niin alhaisia, että pitoisuuksien seuranta on lopetettu kaupunkialueilla vuoden 2015 jälkeen. Sen jälkeen hiilimonoksidipitoisuuksia on seurattu ainoastaan Ilmatieteen laitoksen Muonion Sammaltunturin ilmanlaadun tausta-aseamalla sekä muutamilla ilmastomuutostutkimukseen keskittyvillä taustamittausasemilla: Helsinki Kumpula, Juupajoki Hyytiälä, Kuopio Puijo, Parainen Utö ja Salla Värriö. Tutkimusasemien mittaustuloksia ei ole tallennettu ilmanlaatatietokantaan.

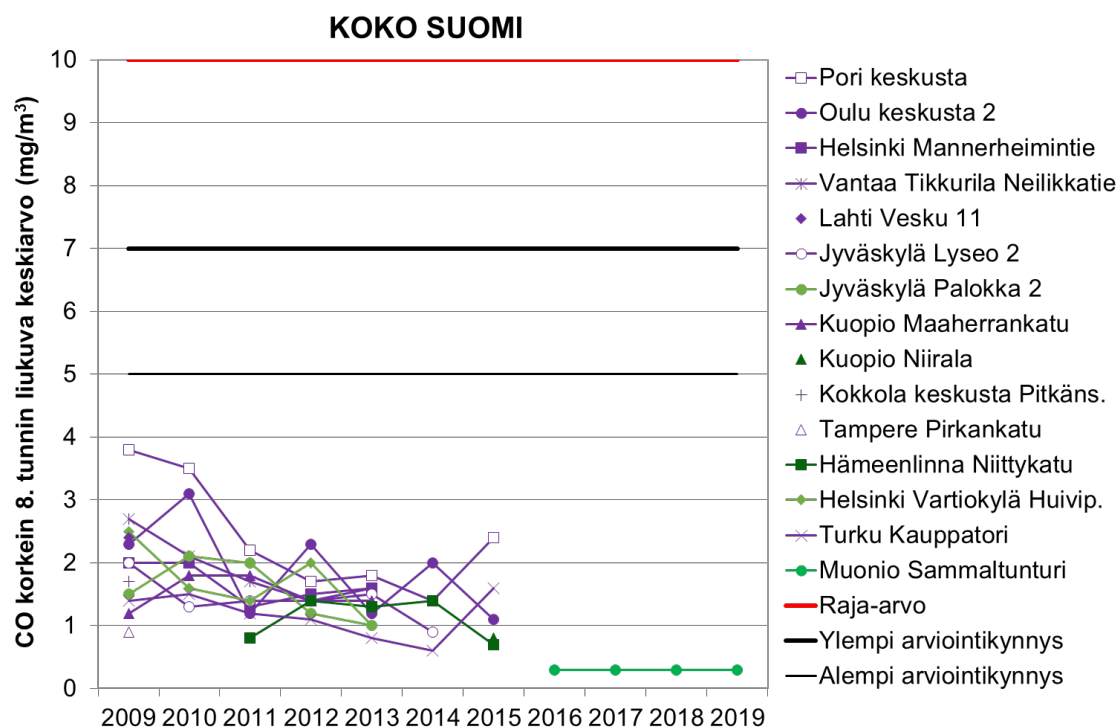


Kuva 37. Hiilimonoksidin vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1994–2015 (Anttila, 2020). Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 4–17 mittausaseman tulokset. Vuonna 2015 oli jäljellä enää 4 mittausasemaa kaupungeissa ja sen jälkeen CO-mittaukset ovat loppuneet kaupunkialueilla.

3.5.1 Ilmanlaatumittaukset

Hiilimonoksidin pitoisuustasoja on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja hiilimonoksidipitoisuuksia vuorokauden korkeimmalle 8 tunnin liukuvalla keskiarvolle (tunti-raja-arvo) annettuihin arviointikynnyksiin. Hiilimonoksidimittaukset ovat vähentyneet niin paljon, että tulokset esitetään yhdessä koko Suomen kattavassa kuvassa, vaikka hiilimonoksidipitoisuuksille on annettu 14 ilmanlaadun seuranta-aluetta. Sama kuva on esitetty myös liitteessä 1.

Hiilimonoksidin 8 tunnin liukuvat keskiarvopitoisuudet on esitetty pidemmältä ajanjaksolta vuosien 2009–2019 ajalta (kuva 38). Hiilimonoksidin 8 tunnin pitoisuudet alittavat erittäin selvästi alemman arviointikynnyksen 5 mg/m^3 kaikkialla Suomessa. Vuonna 2015 kaupunkialueilla pitoisuustaso oli noin $0,7\text{--}2,5 \text{ mg/m}^3$. Muonion Sammaltunturin taustamittausasemalla hiilimonoksidin pitoisuustaso on $0,3 \text{ mg/m}^3$.



Kuva 38. Mitatut hiilimonoksidin vuorokauden korkeimmat 8 tunnin liukuvat keskiarvopitoisuudet Suomessa vuosina 2009–2019.

Yhteenveto Suomen arvioituista hiilimonoksidin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 10. Hiilimonoksidipitoisuuksia on mitattu vuodesta 2016 lähtien vain tausta-alueilla, mutta hiilimonoksidipitoisuuden on arvioitu alittavan arviointikynnykset kaikilla ilmanlaadun seuranta-alueilla.

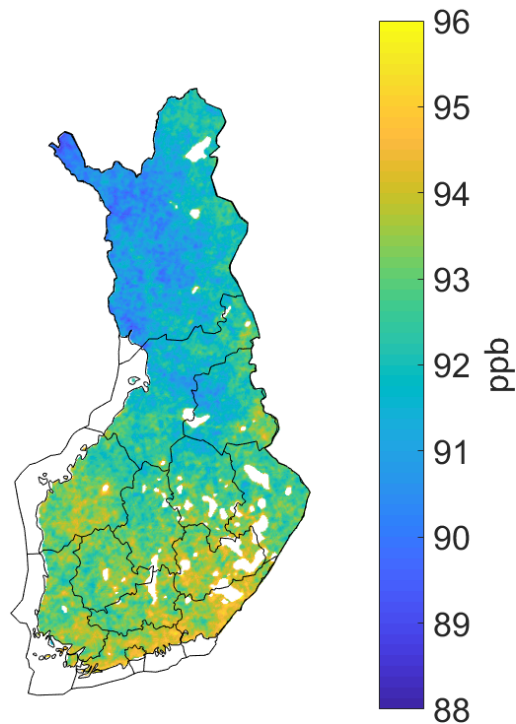
Taulukko 10. Hiilimonoksidin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	CO
	8 h
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK
Häme	< AAK
Kaakkois-Suomi	< AAK
Pirkanmaa	< AAK
Keski-Suomi	< AAK
Etelä-Savo	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	< AAK
Pohjois-Savo	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	< AAK
Kainuu	< AAK
Lappi	< AAK

3.5.2 Satelliittihavainnot

Tässä raportissa tarkastellut hiilimonoksidin pitoisuusjakaumat perustuvat TROPOMI-satelliitti-instrumentin mittauksiin. Kuvassa 39 on esitetty vuoden 2019 satelliittimittausten keskiarvo laskettuna 2×2 km hilaan. Suomessa CO-pitoisuuden keskiarvo vaihtelee välillä 88–97 ppb eli alueellinen vaihtelu on pientä. Kartasta on kuitenkin havaittavissa vähäinen CO:n määrän lisääntyminen siirryttäessä pohjoisesta kohti etelää. Tämä johtunee Etelä-Suomen korkeammasta väestötiheydestä, teollisuudesta sekä liikennemääristä. TROPOMI-havainnoista saatu CO:n alueellinen jakauma noudattelee pitkälti myös päästötietokannoista, esimerkiksi Euroopan ympäristökeskuksen Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR), saatua arviota Suomen alueellisesta CO-jakaumasta.

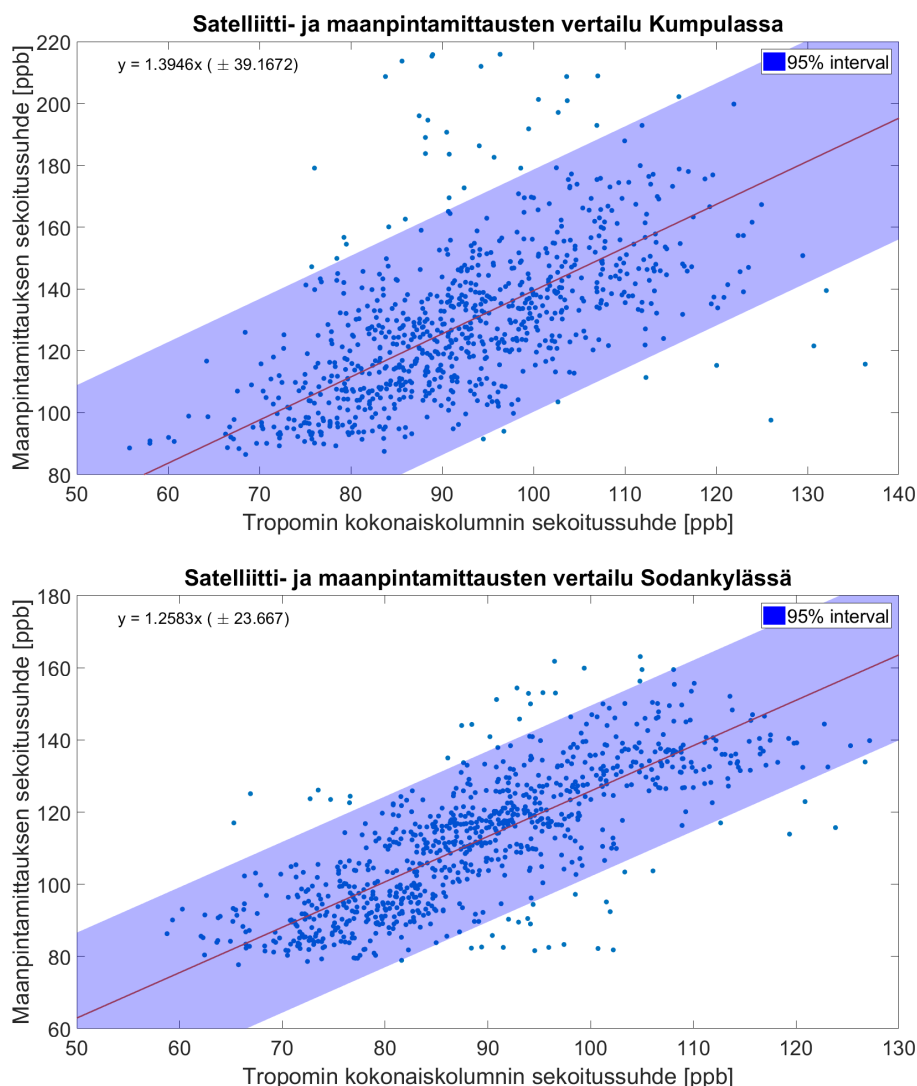
CO sekoitussuhteen keskiarvo, 2019



Kuva 39. Hiilimonoksidin ilmapilarin sekoitussuhteen keskiarvo (ppb) vuonna 2019 laskettuna TROPOMI-satelliitin mittauksista. Karttaan on piirretty myös ilmanlaadun seuranta-alueiden rajat hiilimonoksidille.

Ilmanlaadulle asetettu hiilimonoksidin raja-arvo koskee maanpinta-arvoja. Jotta satelliittimittaukset voitaisiin täydellisesti muuntaa maanpintahavainnoiksi, tulisi tietää hiilimonoksidin korkeusjakauma ilmakehässä. Hiilimonoksidin pystyjakaumaa ei kuitenkaan mitata säännöllisesti ja kuvassa 17 esimerkkinä annetut mittaukset on suoritettu vain valikoituina ajankohtina Ilmatieteen laitoksen Arktisessa Avaruuskeskuksessa AirCore-menetelmällä (Karion, 2010). Näitä mittauksia suoritetaan noin kuukauden välein, mutta kuitenkin epäsäännöllisesti ja Suomessa tällä hetkellä ainoastaan Sodankylässä. Niiden tarkoituksena on parantaa satelliittihavaintojen tarkkuutta antamalla parempaa tietoa hiilimonoksidin ja muiden kaasujen pystyjakaumasta, mutta niitä ei käytetä jatkuvaan ilmakehän tilan seuraamiseen.

Tässä työssä maanpintapitoisuuksia arvioidaan yksinkertaisella lineaarisella relaatiolla maanpintahavaintojen ja satelliittimittausten välillä (kuva 40). Alemmassa kuvassa on esitetty satelliittihavaintojen ja pintahavaintojen keskinäinen korrelaatio Sodankylässä ja ylemmässä kuvassa sama korrelaatio Helsingin Kumpulassa. Kumpulassa maanpintahavainnot ovat korkeampia pylväspitoisuuteen verrattuna kuin Sodankylässä. Tämä luultavasti johtuu siitä, että Helsingissä paikallisia lähteitä kuten liikennettä on enemmän ja näin ollen lähellä maanpintaa on enemmän hiilimonoksidia suhteessa kokonaismäärään kuin Sodankylässä.



Kuva 40.

Lineaarinen relaatio maanpintahavaintojen ja satelliittimittausten välillä Helsingin Kumpulassa (ylempi kuvaaja) ja Sodankylässä (alempi kuvaaja). Yksittäiset mittaussarjat on esitetty sinisillä pisteillä. Sovitetun suoran (punainen viiva) yhtälö on kuvaajan vasemmassa yläreunassa. Pistejoukolle on laskettu 95 % epävarmuusalue (lilavärinen alue) pisteiden ja sovituksen erotusten neliösumman perusteella.

Taulukossa 11 on listattu ilmanlaadun seuranta-alueiden hiilimonoksidin vuosikeskiarvot ja vuosimaksimit satelliittimittauksista sekä satelliittimittausten perusteella tehty arvio maanpinta-arvoista. Keskiarvot ja maksimit on laskettu ajalle, jolloin satelliittimittauksia on saatavilla. Koska mittauksia puuttuu talvikuukausilta, jolloin CO-pitoisuudet ovat korkealla, satelliittimittausten perustella määritelty keskiarvo jää todellista keskiarvoa matalammaksi. Sodankylän ja Helsingin maanpintamittausten perusteella talvikuu-kausien puuttumisesta aiheutuva ero on noin 6–8 %.

Taulukko 11. Satelliittimittauksista määritetyt ilmapilarin hiilimonoksidin vuosikeskiarvot ja maksimi-arvot (ppb) vuonna 2019 eriteltynä seuranta-alueittain. Taulukkoon on myös laskettu arvio vastaavista lukemista maapinnalla ($\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Ilmanlaadun seuranta-alue	Pylväskeski-arvo (ppb)	Pylväsmaksimi (ppb)	Maanpinta-arvio keskiarvo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Maanpinta-arvio maksimi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Pääkaupunkiseutu	94,15	133,03	164	281
Uusimaa (pois lukien pks-seutu)	93,91	136,08	164	286
Varsinais-Suomi ja Satakunta	93,24	173,63	162	351
Häme	93,28	138,45	163	290
Kaakkois-Suomi	93,91	145,03	164	301
Pirkanmaa	93,11	140,91	162	294
Keski-Suomi	92,89	147,35	162	306
Etelä-Savo	93,64	154,57	163	318
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	93,04	150,18	162	310
Pohjois-Savo	92,71	147,59	162	306
Pohjois-Karjala	92,86	144,00	162	300
Pohjois-Pohjanmaa	92,04	159,47	160	327
Kainuu	92,18	176,01	161	355
Lappi	91,23	168,84	159	343

Koska maanpintahavaintoja tehdään vain muutamassa havaintopisteessä (Helsinki Kumpula, Sodankylä Tähtelä, Juupajoki Hyytiälä, Kuopio Puijo, Parainen Utö, Muonio Sammaltunturi ja Salla Värriö), käytetään tässä arviossa Helsingin mittausten lineaaris- ta sovitusta satelliittimittausten muuntamisessa maanpinta-arvioksi ($1,3946 \times$ pystypyl- väspitoisuus). Näin ollen maanpinta-arviot ovat mahdollisesti hieman liian suuria isoimpien kaupunkien ulkopuolella. Hiilimonoksidipitoisuuksien maksimia arvioidessa keskimääräiseen lineaariseen relaatioon lisättiin 95 % epävarmuusraja (39 ppb), jotta todellinen maanpinta-arvo jäisi suurimman satelliittimittauksista arvioidun arvon alapuo- lelle. Epävarmuusraja on määritetty mittausten ja sovituksen välisen erotuksen ne- liösumman perusteella. Tässä arviointitavassa 95 % epävarmuusraja sisältää epävar- muudet, jotka johtuvat satelliittimittausten satunnaisepävarmuudesta sekä alueellisesta ja korkeussuunnassa tapahtuvasta keskiarvoistuksesta. Käyttämällä tarkempaa tietoa korkeusjakaumasta esimerkiksi ilmakehämallin avulla voitaisiin saada tarkempia arvioita maanpinta-arvoista.

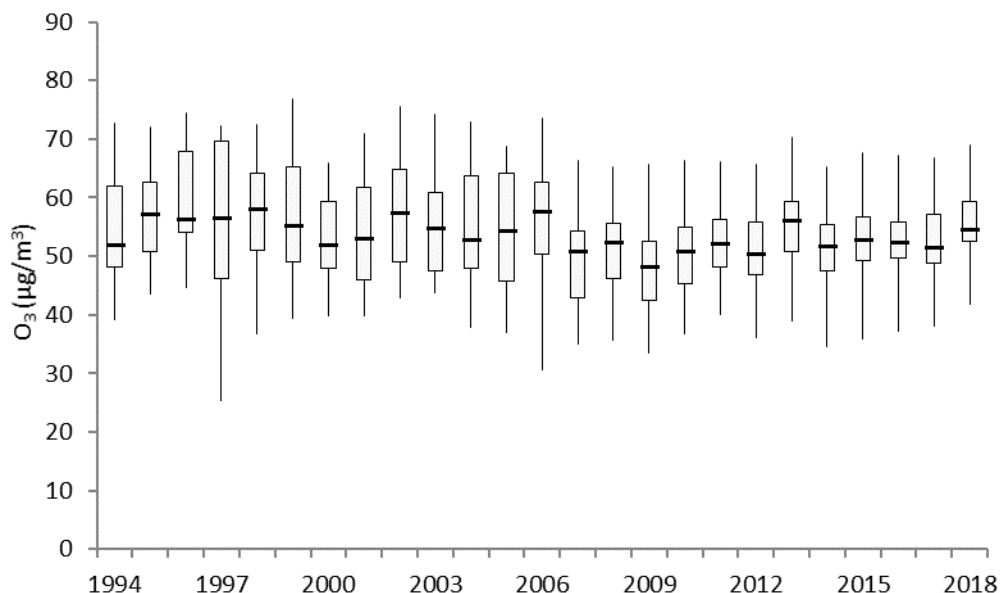
Sekoitus-suhteiden maanpinta-arviot on muutettu pitoisuuksiksi, yksikköön $\mu\text{g}/\text{m}^3$, käyttämällä ideaalikaasun yhtälöä paikallisen ilman molekyylipitoisuuden laskemiseksi.

Muunnos tehtiin standardiolosuhteille (paine = 1013,25 hPa, lämpötila = 0 °C). Tämä aiheuttaa arvioon myös pientä virhettä, koska todellisia paikallisia olosuhteita ei oteta huomioon. Kaiken kaikkiaan voidaan kuitenkin todeta eri virhelähteet huomioiden, että CO-pitoisuudet Suomessa ovat matalalla tasolla ja selvästi raja-arvon alapuolella.

- Satelliittimittauksiin perustuvan maanpintapitoisuuden arvio perustuu satelliittimittausten ja maan pinnalla tehtyjen ilmanlaatumittausten väliseen riippuvuuteen, joka on määritetty Helsingissä tehdyistä mittauksista.
- Määrittävasta johtuen suurten kaupunkien ulkopuolella satelliiteista saatu CO:n maanpintapitoisuuden arvio saattaa olla hieman liian korkea.
- Satelliittimittauksiin perustuvat maanpintapitoisuuksien vuosikeskiarvot vaihtelevat välillä 160–164 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ja seuranta-alueiden väliset erot ovat pieniä.

3.6 Otsonipitoisuudet

Maanpinnan otsonipitoisuudet ovat Suomessa pysyneet vuosikeskiarvotasolla keskimäärin melko vakaana vuosien 1994–2018 välillä eikä ratkaisevaa pitoisuuksien laskua ole näkyvissä (kuva 41). Otsonin tavoitearvo alittuu, mutta pitkän ajan tavoitearvon alle pääsemiseksi tarvitaan kansainvälisen yhteisön toimia.



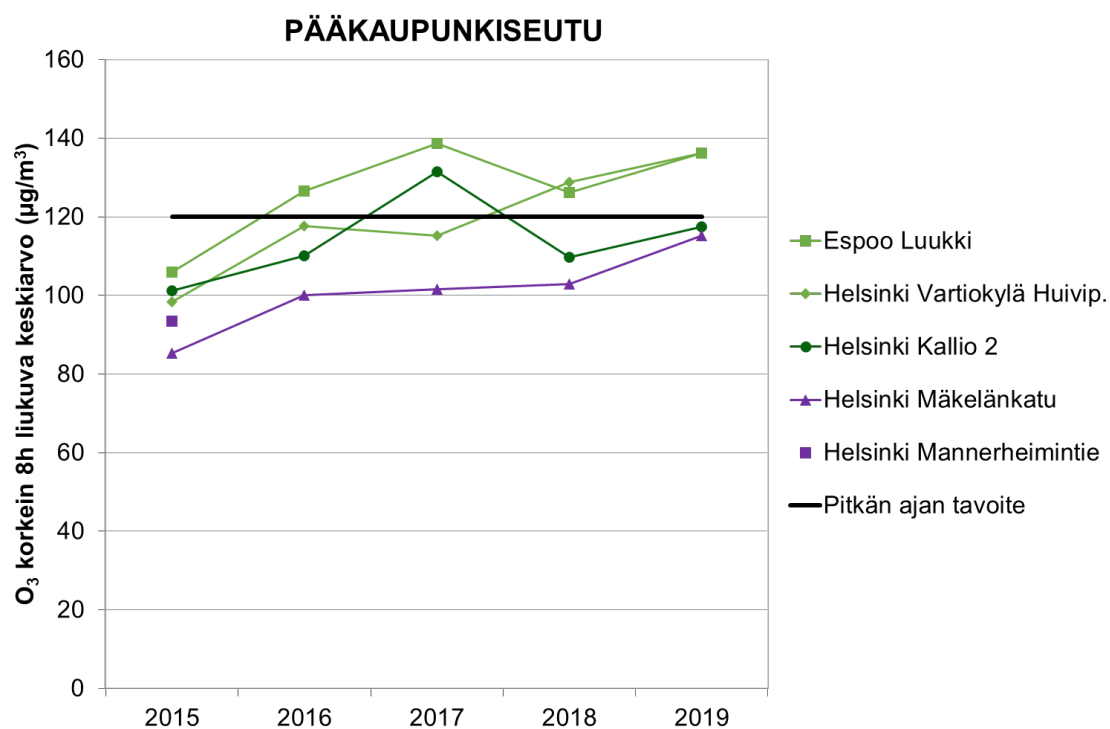
Kuva 41. Otsonin vuosikeskiarvopitoisuuksien kehittyminen suomalaisilla ilmanlaadun mittausasemilla vuosina 1994–2018 (Anttila, 2020). Jokaiselle tarkasteluvuodelle on esitetty aineiston pienin ja suurin arvo, mediaaniarvo sekä 25. ja 75. prosenttiarvot. Aineistossa on tarkasteluvuodesta riippuen mukana 10–20 mittausaseman tulokset. Vuonna 2018 otsonipitoisuuden mittausasemia oli 20 kpl.

Otsonin pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja otsonipitoisuuksia korkeimmalle 8 tunnin liukuvalla keskiarvopitoisuudelle sekä AOT40-pitoisuudelle annettuihin pitkän ajan tavoitteisiin. Ylittymiseen riittää, että pitkän ajan tavoite ylittyy yhden kerran viiden vuoden aikana. Alla on esitetty pelkästään pääkaupunkiseudulla mitatut otsonipitoisuudet. Muun Suomen seuranta-alueella ja tausta-alueilla mitatut otsonipitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

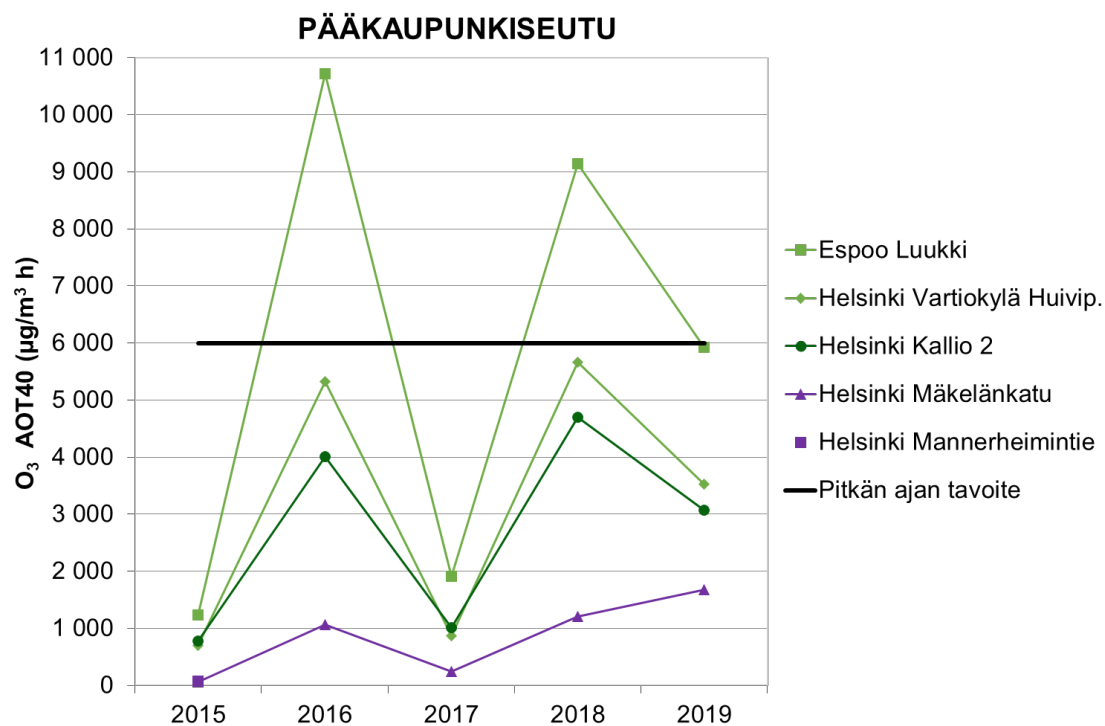
Otsonin korkeimmat 8 tunnin pitoisuudet ovat kohonneet viimeisen 5 vuoden aikana, mikä liittyy laskeviin NO_x-pitoisuuksiin (kuva 42). Otsonin pitkän ajan tavoite korkeimmalle 8 tunnin pitoisuudelle ylittyy molemmilla ilmanlaadun seuranta-alueilla. Pääkaupunkiseudulla pitkän ajan tavoite 120 µg/m³ on ylittynyt kaupunkitausta-, esikaupunkitausta- ja tausta-alueilla. Muun Suomen seuranta-alueella otsonipitoisuus on ylittynyt lähes kaikissa kaupungeissa ja tausta-alueilla erityisesti vuonna 2018 tai 2019.

Kasvillisuuden suojelemiseksi annettu AOT40:n pitkän ajan tavoite 6 000 µg/m³ h ylittyy molemmilla ilmanlaadun seuranta-alueilla. Pääkaupunkiseudulla AOT40 on ylittynyt Espoon Luukissa vuosina 2016 ja 2018 (kuva 43). Muualla Suomessa AOT40 on ylittynyt Porvoon Mustijoella ja Turun Ruissalossa vuosina 2016 ja 2018 sekä Utön ja Virolahden tausta-asemilla vuonna 2016. AOT40 (=Accumulated Ozone exposure over a Threshold of 40 ppb (=80 µg/m³)) lasketaan 1.5.–31.7. välisen ajan tuntiarvoista,

jotka mitataan klo 9.00–21.00 välisenä aikana Suomen normaaliaikaa, joka on klo 10.00–22.00 Suomen kesäaikaa.



Kuva 42. Mitatut otsonin vuorokauden korkeimmat 8 tunnin liukuvat keskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.



Kuva 43. Mitatut otsonin AOT40-pitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista otsonin pitoisuustasoista suhteessa pitkän ajan tavoitteisiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 12. Molemmat pitkän ajan tavoitteet ylittyvät sekä pääkaupunkiseudulla että muualla Suomessa.

Taulukko 12. Otsonin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. PAT=pitkän ajan tavoite.

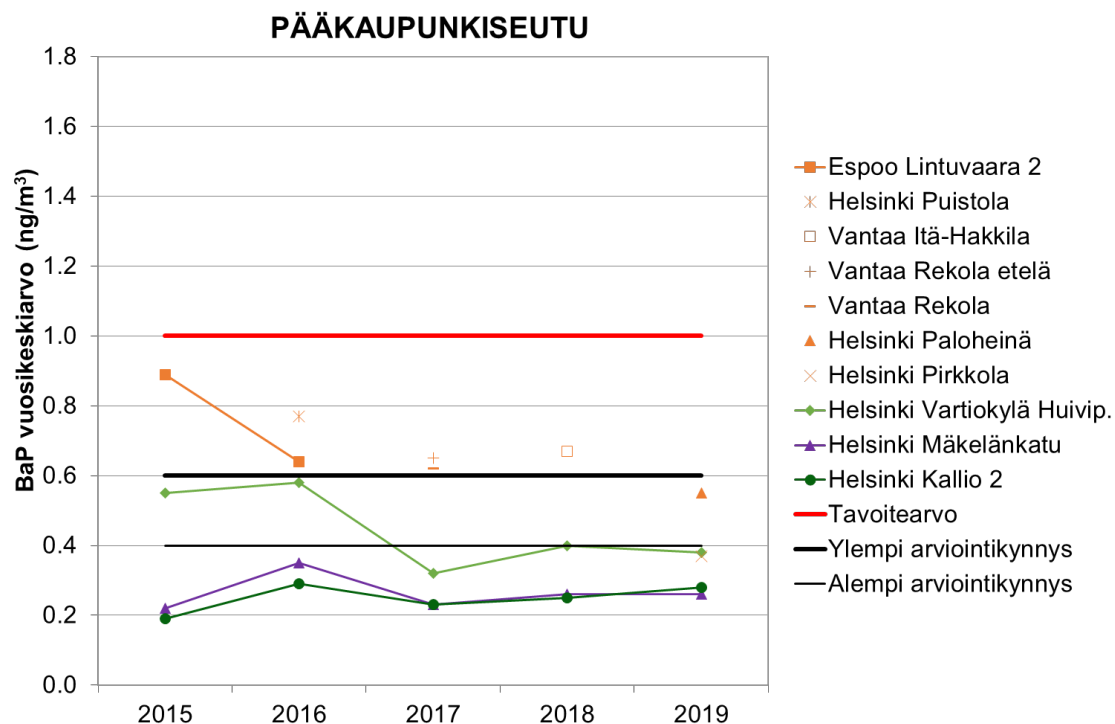
Ilmanlaadun seuranta-alueet	O ₃	
	8 h	AOT40
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	> PAT	> PAT
Muu Suomi	> PAT	> PAT

3.7 Bentso(a)pyreenipitoisuudet

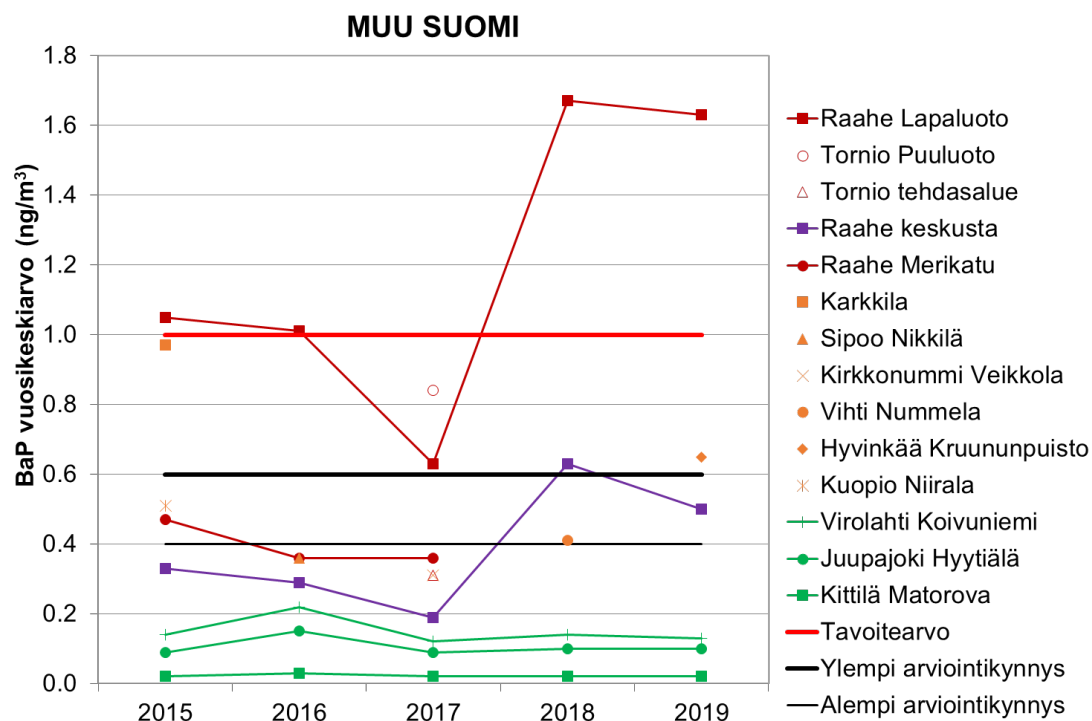
Bentso(a)pyreeni on polysyklisiin aromaattisiin hiilivetyihin (PAH) kuuluva yhdiste, jonka merkittävin päästölähde Suomessa on kotitalouksien puunpoltto. Liikenteen päästöjen vaikutus PAH-pitoisuuksiin on melko vähäinen. PAH-päästöt vapautuvat suhteellisen matalalta ja pitoisuuksille altistutaan kotona, jossa vietetään suurin osa vuorokaudesta. Bentso(a)pyreenin (BaP) pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja bentso(a)pyreenipitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Alla esitetyt kuvat löytyvät myös liitteestä 1.

Pääkaupunkiseudun seuranta-alueella bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvopitoisuudet ylittävät ylempään arviointikynnyksen $0,6 \text{ ng/m}^3$ (kuva 44). Pitoisuudet ovat korkeimmillaan tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla. Helsingin Seudun ympäristöpalveluiden (HSY) mukaan bentso(a)pyreenin tavoitearvo 1 ng/m^3 voi ylittyä paikoin pientaloalueilla puunpolton päästöjen vuoksi. Pitoisuudet vaihtelevat pientaloalueiden sisällä ja niiden välillä. Mittausaseman sijainnilla on myös suuri vaikutus pitoisuustasoihin, sillä lähitaloista peräisin olevat päästöt korostuvat mittaustuloksissa (*Korhonen, ym., 2021*). BaP-pitoisuustaso on pääkaupunkiseudun pientaloympäristöissä vaihdellut tarkasteluajan jaksolla välillä $0,3\text{--}0,9 \text{ ng/m}^3$. Liikenne- ja kaupunkitaustaympäristöissä BaP-pitoisuustaso on ollut noin $0,2\text{--}0,3 \text{ ng/m}^3$.

Muun Suomen seuranta-alueella ylittyy myös bentso(a)pyreenin ylempi arviointikynnys (kuva 45). Ylempi arviointikynnys on ylittynyt yksittäisinä vuosina Uudenmaan siirrettävillä asemilla Karkkilassa ja Hyvinkäällä, Tornion Puuluodon asuinalueella sekä Raahen keskustassa terästeollisuuden vaikutuspiirissä. Bentso(a)pyreenipitoisuuksia on seurattu Uudenmaan kuntien pientaloalueilla vuodesta 2014 lähtien (*Väkevä ja Loukko-la, 2021*) ja Raahessa PAH-pitoisuuksien seuranta on alkanut jo 1980-luvulla. Korkeimmat bentso(a)pyreenipitoisuudet Suomessa mitataan Raahen Lapaluodossa, jossa myös tavoitearvo 1 ng/m^3 on ylittynyt useana vuotena. Raahen mittausasemilla seurataan SSAB:n terästehtaan PAH-päästöjen vaikutuksia ja Lapaluodossa pitoisuuksia voi kohottaa myös paikallinen puun pienpoltto. Vuonna 2017 bentso(a)pyreenipitoisuuksia mitattiin kahdella asemalla Torniossa Outokummun terästehtaan läheisyydessä (*Saari ym., 2018*). Pientaloalueilla kampanjaluonteisia mittauksia on tehty ainakin Kuopion Niiralassa vuonna 2015 sekä Lahden Launeella vuosina 2018 ja 2020. Lahdessa vuoden 2018 keväällä puolivuotisen talvikaudelle painottuvan mittauskampanjan keskiarvo oli peräti $2,08 \text{ ng/m}^3$ (*Auronen ja Kähäri, 2019*). Vuonna 2020 koko vuoden pituisessa mittauksessa bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvo oli $0,93 \text{ ng/m}^3$ eli hieman alle tavoitearvon (*Korhonen, ym., 2021; Kähäri, 2021*). Etelä-Suomen tausta-alueilla bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvopitoisuus on pääosin alle $0,2 \text{ ng/m}^3$ ja Pohjois-Suomessa alle $0,03 \text{ ng/m}^3$.



Kuva 44. Mitatut bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.



Kuva 45. Mitatut bentso(a)pyreenin vuosikeskiarvopitoisuudet muun Suomen seuranta-alueella vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista bentso(a)pyreenin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 13.

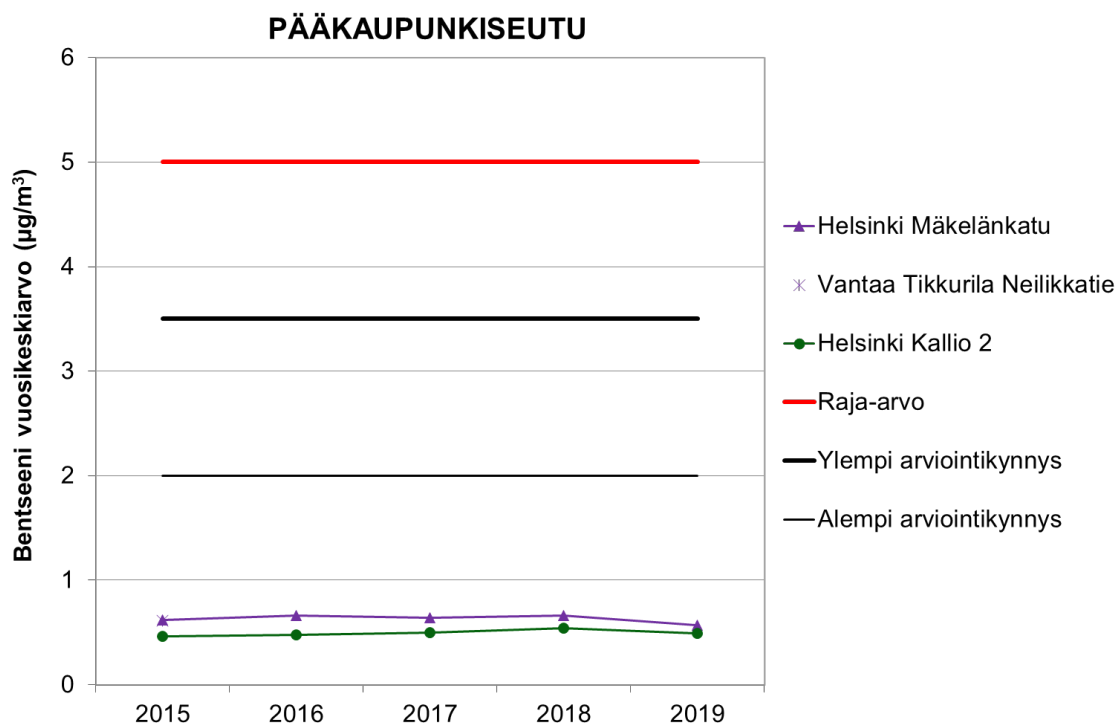
Taulukko 13. Bentso(a)pyreenin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. YAK=ylempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	BaP
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	> YAK
Muu Suomi	> YAK

3.8 Bentseenipitoisuudet

VOC-yhdisteisiin kuuluvan bentseenin pitoisuustasoja eri ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja bentseenipitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Alla on esitetty pelkästään pääkaupunkiseudulla mitatut bentseenipitoisuudet. Etelä- ja Pohjois-Suomen seuranta-alueilla mitatut bentseenipitoisuudet on esitetty liitteessä 1.

Bentseenipitoisuudet ovat Suomessa alhaisia ja alempi arviointikynnys $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ alittuu selvästi kaikilla seuranta-alueilla. Pääkaupunkiseudun seuranta-alueella bentseenin vuosikeskiarvo on liikenneympäristössä noin $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja kaupunkitaustaympäristössä noin $0,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (kuva 46). Etelä-Suomen seuranta-alueella bentseenipitoisuuksia seurataan Lahden seudulla, jossa pitoisuustaso on ollut noin $0,3\text{--}0,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Myös Kuopion Niiralassa on kampanjaluonteisesti mitattu bentseeniä vuonna 2015, jolloin vuosikeskiarvopitoisuus oli noin $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Pohjois-Suomen seuranta-alueella bentseenipitoisuuksia seurataan Muonion Sammaltunturin tausta-asemalla, jossa pitoisuustaso on noin $0,2\text{--}0,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Kuva 46. Mitatut bentseenin vuosikeskiarvopitoisuudet pääkaupunkiseudulla vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista bentseenin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 14.

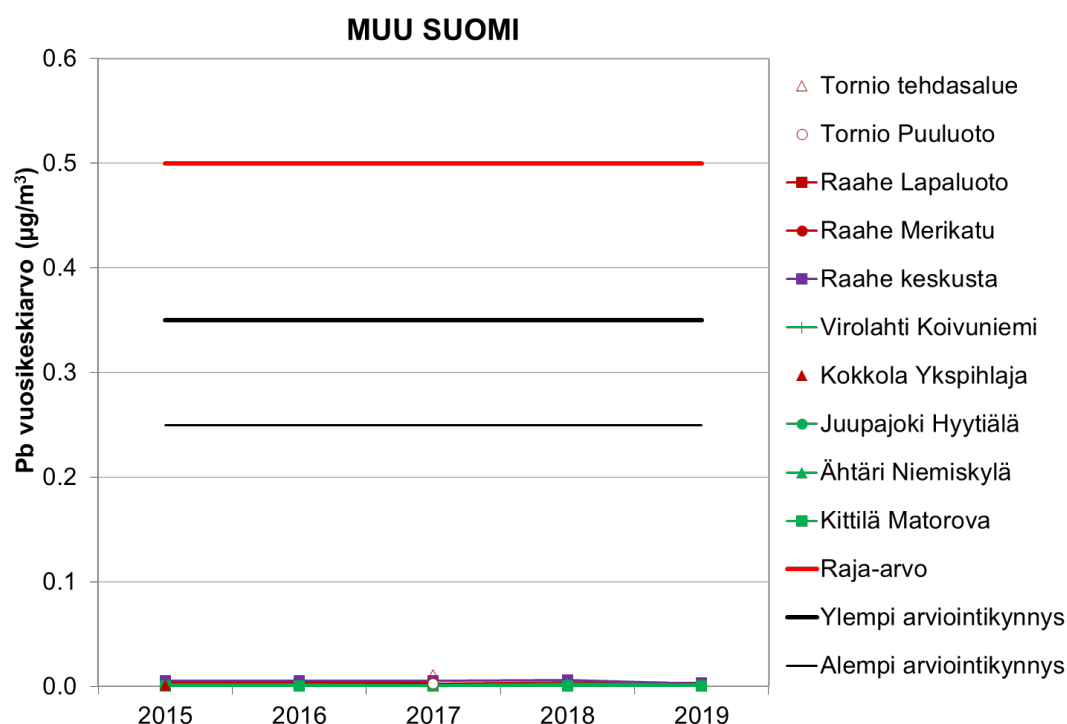
Taulukko 14. Bentseenin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Bentseeni
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Etelä-Suomi	< AAK
Pohjois-Suomi	< AAK

3.9 Lyijypitoisuudet

Lyijyn pitoisuustasoja ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja lyijypitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Pääkaupunkiseudun ja muun Suomen seuranta-alueiden tulokset löytyvät liitteestä 1.

Lyijypitoisuudet ovat Suomessa erittäin alhaisella tasolla ja alempi arviointikynnys alittuu selvästi molemmilla seuranta-alueilla. Muualla Suomessa lyijypitoisuuksia seurataan metalliteollisuuspaikkakunnilla ja tausta-alueilla (kuva 47). Pääkaupunkiseudulla on mitattu lyijypitoisuuksia viimeksi vuonna 2015 ja sen jälkeen metalliseuranta on loppunut.



Kuva 47. Mitatut lyijyn vuosikeskiarvopitoisuudet muun Suomen seuranta-alueella vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista lyijyn pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 15.

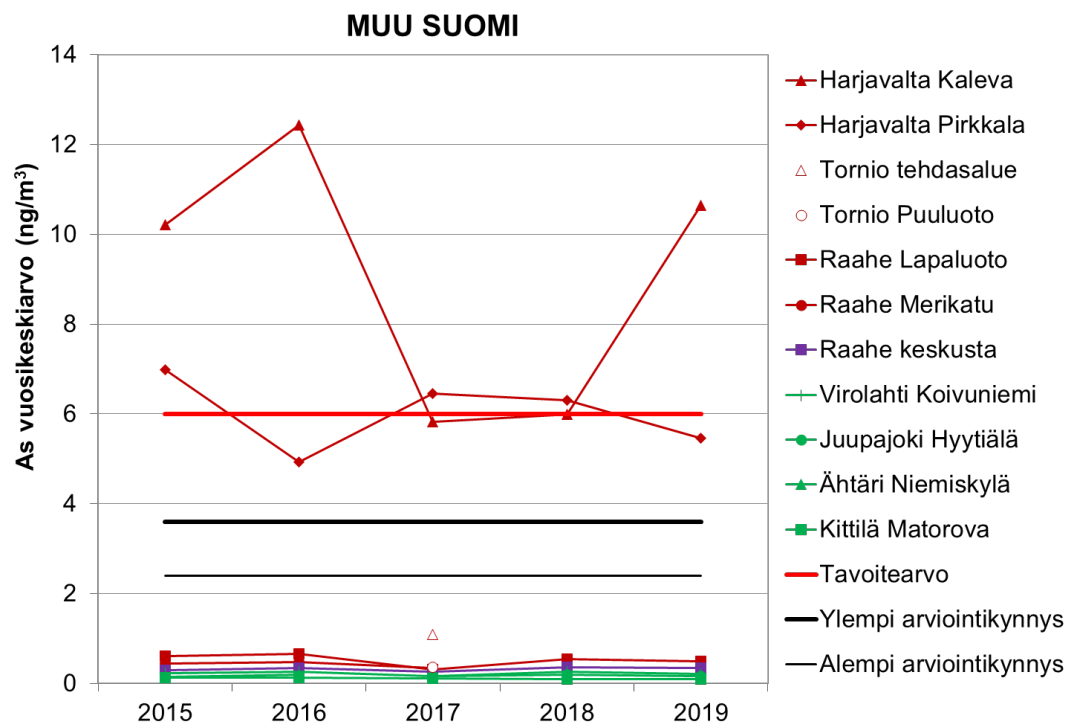
Taulukko 15. Lyijyn pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Pb
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Uusimaa (pois lukien pääkaupunkiseutu)	< AAK
Varsinais-Suomi ja Satakunta	< AAK
Häme	< AAK
Kaakkois-Suomi	< AAK
Pirkanmaa	< AAK
Keski-Suomi	< AAK
Etelä-Savo	< AAK
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	< AAK
Pohjois-Savo	< AAK
Pohjois-Karjala	< AAK
Pohjois-Pohjanmaa	< AAK
Kainuu	< AAK
Lappi	< AAK

3.10 Arseenipitoisuudet

Arseenin pitoisuustasoja ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja arseenipitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Pääkaupunkiseudun ja muun Suomen seuranta-alueiden tulokset löytyvät liitteestä 1.

Arseenipitoisuudet ovat Suomessa pääosin alhaisella tasolla. Ylempi arviointikynnys ylittyy ainoastaan Harjavallassa, jossa myös tavoitearvo on ylittynyt useana vuotena. Muualla Suomessa arseenipitoisuuksia seurataan metalliteollisuuspaikkakunnilla ja tausta-alueilla (kuva 48). Pääkaupunkiseudulla on mitattu arseenipitoisuuksia viimeksi vuonna 2015 ja sen jälkeen metalliseuranta on loppunut. Vuoden 2015 arseenipitoisuudet alittivat pääkaupunkiseudulla erittäin selvästi alemman arviointikynnyksen.



Kuva 48. Mitatut arseenin vuosikeskiarvopitoisuudet muun Suomen seuranta-alueella vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista arseenin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 16.

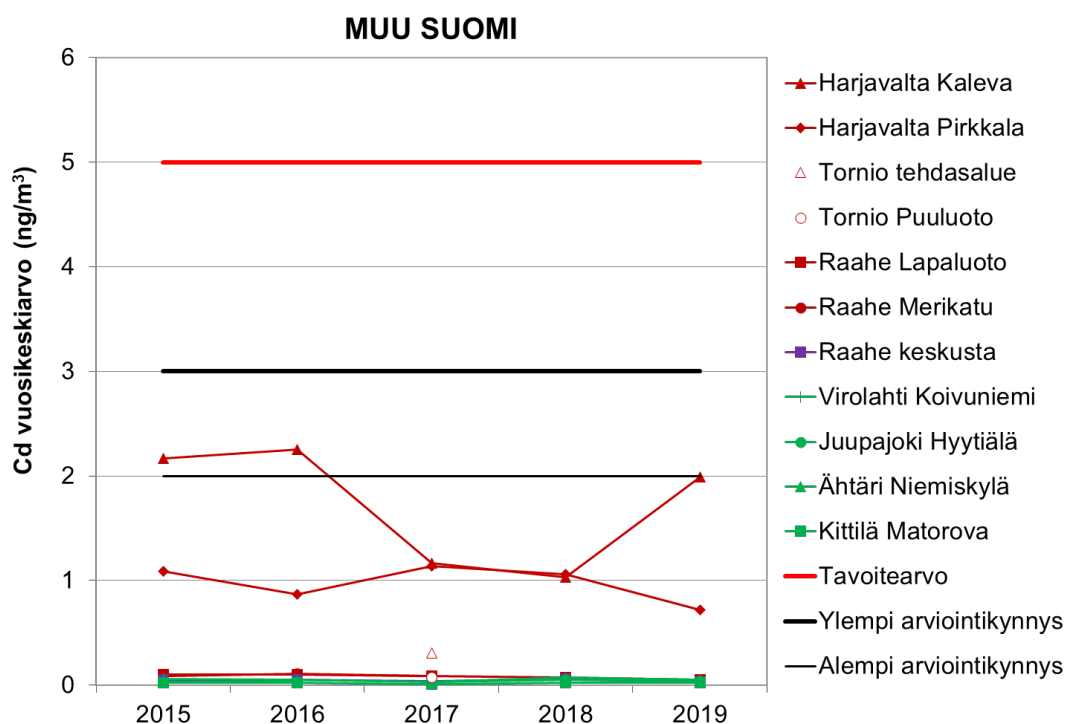
Taulukko 16. Arseenin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla sekä erikseen Harjavallan ja Raahen teollisuuskaupungeissa. AAK=alempi arviointikynnys, YAK=ylempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Arseeni
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Muu Suomi	< AAK
• Harjavalta	> YAK
• Raahe	< AAK

3.11 Kadmiumpitoisuudet

Kadmiumin pitoisuustasoja ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja kadmiumpitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Pääkaupunkiseudun ja muun Suomen seuranta-alueiden tulokset löytyvät liitteestä 1.

Kadmiumpitoisuudet ovat Suomessa pääosin alhaisella tasolla ja alempi arviointikynnys alittuu molemmilla seuranta-alueilla. Muun Suomen seuranta-alueella kadmiumpitoisuudet ovat korkeimmillaan Harjavallassa, jossa alempi arviointikynnys 2 ng/m^3 alittuu vain erittäin niukasti (kuva 49). Muualla Suomessa kadmiumpitoisuuksia seurataan metalliteollisuuspaikkakunnilla ja tausta-alueilla. Pääkaupunkiseudulla on mitattu kadmiumpitoisuuksia viimeksi vuonna 2015 ja sen jälkeen metalliseuranta on loppunut. Vuoden 2015 kadmiumpitoisuudet alittivat pääkaupunkiseudulla erittäin selvästi alemman arviointikynnyksen.



Kuva 49. Mitatut kadmiumin vuosikeskiarvopitoisuudet muun Suomen seuranta-alueella vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista kadmiumin pitoisuustasosta suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 17.

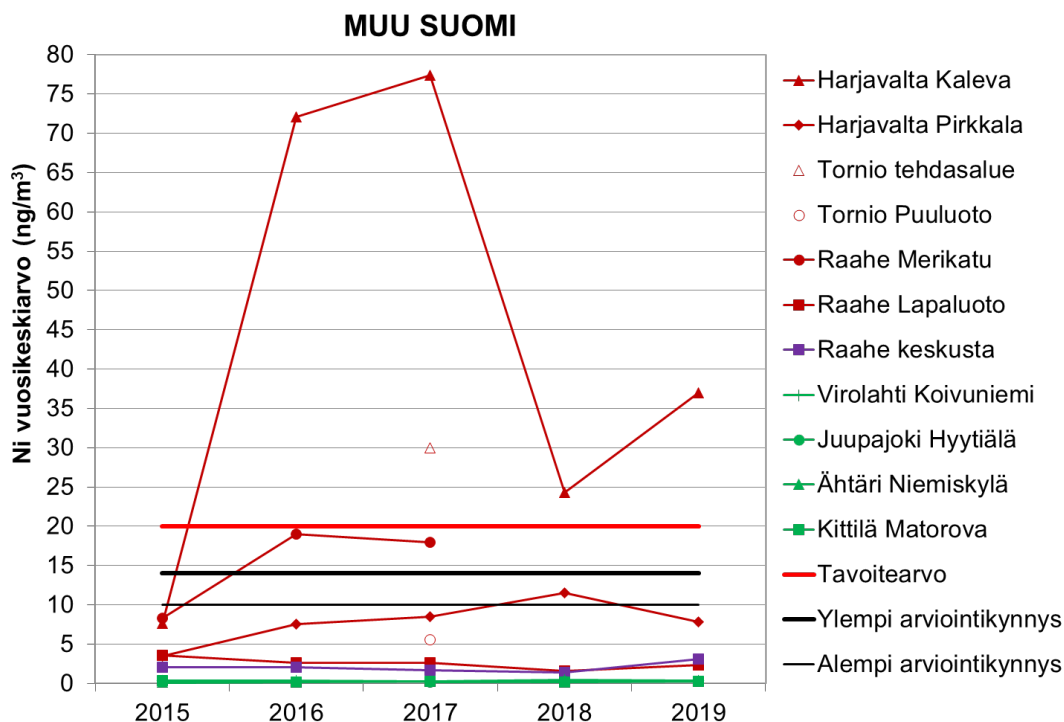
Taulukko 17. Kadmiumin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla sekä erikseen Harjavallan ja Raahen teollisuuskaupungeissa. AAK=alempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Kadmium
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Muu Suomi	< AAK
• Harjavalta	< AAK
• Raahen	< AAK

3.12 Nikkelipitoisuudet

Nikkelin pitoisuustasoja ilmanlaadun seuranta-alueilla on arvioitu vertaamalla vuosina 2015–2019 mitattuja nikkelipitoisuuksia vuosikeskiarvopitoisuudelle annettuihin arviointikynnyksiin. Pääkaupunkiseudun ja muun Suomen seuranta-alueiden tulokset löytyvät liitteestä 1.

Nikkelipitoisuudet ovat Suomessa koholla metalliteollisuuspaikkakunnilla. Muun Suomen seuranta-alueella nikkelipitoisuudet ovat korkeimmillaan Harjavallassa, jossa ylempi arviointikynnys ja tavoitearvokin ylittyy reilusti (kuva 50). Myös Raahen Merikadulla on mitattu ylemmän arviointikynnyksen tason ylittäviä nikkelipitoisuuksia vuosina 2016 ja 2017, mutta sen jälkeen mittaukset on lopetettu. Metalliteollisuuspaikkakuntien lisäksi nikkelipitoisuuksia seurataan myös tausta-alueilla. Pääkaupunkiseudulla on mitattu nikkelipitoisuuksia viimeksi vuonna 2015 ja sen jälkeen metalliseuranta on loppunut. Vuoden 2015 nikkelipitoisuudet alittivat pääkaupunkiseudulla erittäin selvästi alemman arviointikynnyksen.



Kuva 50. Mitatut nikkelin vuosikeskiarvopitoisuudet muun Suomen seuranta-alueella vuosina 2015–2019.

Yhteenveto Suomessa vuosina 2015–2019 mitatuista nikkelin pitoisuustasoista suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin seuranta-alueilla on esitetty taulukossa 18.

Taulukko 18. Nikkelin pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla sekä erikseen Harjavallan ja Raahen teollisuuskaupungeissa. AAK=alempi arviointikynnys, YAK=ylempi arviointikynnys.

Ilmanlaadun seuranta-alueet	Nikkeli
	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	< AAK
Muu Suomi	< AAK
• Harjavalta	> YAK
• Raahen	< AAK

4 YHTEENVETO SUOMEN NYKYISESTÄ ILMANLAADUSTA JA SEURANTATARPEEN ARVIOINTI

Yhteenveto Suomen ilmanlaadusta kaupunki- ja maaseututausta-alueilla sekä ilmanlaadun mittausten tarve ilmanlaadun seuranta-alueilla on esitetty seuraavissa kappaleissa.

4.1 Seurantatarve kaupunkialueilla

Ilman epäpuhtauksien pitoisuustasot ilmanlaadun seuranta-alueilla on esitetty suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin taulukoissa 19–23. Mikäli pitoisuuden alempi tai ylempi arviointikynnys seuranta-alueella ylittyy viiden vuoden tarkastelujaksolla 2015–2019, on esitetty myös seuranta-alueella tarvittavien mittausasemien vähimmäislukumäärä. Taulukoissa on mukana vertailu sekä lyhytaikais- että vuosikeskiarvopitoisuuksia koskeviin arviointikynnyksiin. Ilmanlaatu seurannan lopullinen tarve määräytyy näistä kahdesta pahemman tilanteen perusteella. Asemien vähimmäislukumäärä on määritetty seuranta-alueen pitoisuustason ja asukasmäärän perusteella taulukoiden 2–4 mukaisesti.

Pitoisuuksien tasoja suhteessa ilmanlaadun arviointikynnyksiin on alla olevissa taulukoissa havainnollistettu seuraavin värikoodein:

oranssi	Pitoisuudet ovat yli ylemmän arviointikynnyksen
keltainen	Pitoisuudet ovat alemman ja ylemmän arviointikynnyksen välissä
vihreä	Pitoisuudet ovat alle alemman arviointikynnyksen

Taulukko 19. Typpidioksidin, hengitettävien hiukkasten ja pienhiukkasten pitoisuuksien suhde ilmanlaadun arviointikynnyksiin sekä mittausasemien vähimmäislukumäärä hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan seuranta-alueittain.

Ilmanlaadun seuranta-alue	Asukasluku 2017	NO ₂		PM ₁₀		PM _{2,5}
		1 h	1 v	24 h	1 v	1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	1 138 502	2	4	6	3	1
Uusimaa (pois lukien pks-seutu)	519 142	-	-	2	-	-
Varsinais-Suomi ja Satakunta	724 570	-	-	-	-	-
Häme	374 043	-	-	2	-	-
Kaakkois-Suomi	305 521	-	-	2	-	-
Pirkanmaa	512 230	-	-	-	-	-
Keski-Suomi	276 071	-	-	-	-	-
Etelä-Savo	147 256	-	-	-	-	-
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	440 743	-	-	2	-	-
Pohjois-Savo	246 689	-	-	1	-	-
Pohjois-Karjala	163 060	-	-	-	-	-
Pohjois-Pohjanmaa	411 887	1	-	-	-	-
Kainuu	73 971	-	-	-	-	-
Lappi	179 281	-	-	-	-	-
Yhteensä	5 512 966	5		15		7–8*

* 7–8 kpl mittausasemia PM₁₀- ja PM_{2,5}-mittausasemien lukumääräsuhteen perusteella.

Helsingin Kallion pienhiukkasmittauksilla seurataan väestön pienhiukkassaltistumista. Kallion mittausasema voidaan laskea yhdeksi 7–8 pienhiukkaspitoisuuksien mittausasemasta.

Typpidioksidipitoisuuden ylempi arviointikynnys ylittyy pääkaupunkiseudulla, jossa pitoisuuksia tulee seurata vähintään neljällä mittausasemalla. Näistä asemista vähintään yhden tulee edustaa kaupunkien tausta-alueita ja yhden liikenneympäristöjä. Pääkaupunkiseudulla on kaupunkitausta-asema Helsingin Kalliossa ja useita liikennetyypin mittausasemia. Alempi arviointikynnys ylittyy Pohjois-Pohjanmaalla, jossa tulisi olla vähintään yksi NO₂-mittausasema, mikä toteutuu mm. Oulun keskustassa. Muilla seuranta-alueilla typpidioksidipitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen, eikä mittausvelvoitetta ole.

Hengitettävien hiukkasten pitoisuuden ylempi arviointikynnys ylittyy pääkaupunkiseudulla, jossa hiukkaspitoisuutta tulee seurata kuudella mittausasemalla (taulukko 19). Asemat voivat olla joko PM₁₀ tai PM_{2,5} pitoisuuksien seurantaan tarkoitettuja ja vähintään yhden tulee edustaa kaupunkien tausta-alueita ja yhden liikenneympäristöjä. Kallio edustaa kaupunkitausta-ympäristöä ja liikenneympäristöä edustavia hiukkasmittausasemia on paljon. Hengitettävien hiukkasten pitoisuuden alempi arviointikynnys ylittyy Uudellamaalla, Hämeessä, Kaakkois-Suomessa, Pohjanmaalla ja Pohjois-Savossa. Kullakin seuranta-alueella tulee mitata hiukkaspitoisuuksia 1–2 mittausasemalla. Minimivaatimus täyttyy useimmilla seuranta-alueilla reilusti.

Pienhiukkaspitoisuudet alittavat kaikkialla Suomessa alemman arviointikynnyksen. Pitoisuustasojen perusteella jatkuvia ilmanlaatumittauksia ei tarvittaisi, mutta pienhiukkaspitoisuuksia mittaavien asemien minimimäärä määräytyy PM₁₀- ja PM_{2,5}-mittausasemien lukumäärän suhteesta, jonka mukaan Suomessa tulee olla yksi PM_{2,5}-mittausasema kahta PM₁₀-asemaa kohden. Taulukon 19 mukaan Suomessa tulee olla vähintään 15 PM₁₀-asemaa, minkä seurauksena PM_{2,5}-asemia tulee olla 7–8 kappaletta. Pienhiukkasia seurataan Suomessa noin 30 mittausasemalla. Lisäksi väestön altistumista pienhiukkaspitoisuuksille arvioidaan pääkaupunkiseudulla sijaitsevan kaupunkitausta-aseman eli Helsingin Kallion mittaustulosten perusteella.

Rikkidioksidin, lyijyn, hiilimonoksidin ja bentseenin pitoisuudet alittivat niille määritetyt alemmat arviointikynnykset kaikkialla Suomessa (taulukot 20 ja 21). Pitoisuustasojen perusteella näitä ilman epäpuhtauksia ei tarvitsisi seurata jatkuvien ilmanlaadun mittauksin vaan kevyemmät seurantamenetelmät, kuten suuntaa-antavat mittaukset, päästökartoitukset, leviämismallinnukset tai satelliittihavainnot riittäisivät hajapäästölähteiden aiheuttamien pitoisuustasojen arviointiin.

Otsonipitoisuudet ylittivät molemmilla seuranta-alueilla sekä terveyden että kasvillisuuden suojelemiseksi annetut pitkän ajan tavoitteet (taulukko 22). Otsonipitoisuuden jatkuvia mittauksia tulee suorittaa kaikilla seuranta-alueilla pitoisuuksista riippumatta. Seuranta-alueen väestömäärän perusteella otsonia tulee seurata pääkaupunkiseudulla vähintään kolmella mittausasemalla, ja muun Suomen seuranta-alueella vähintään seitsemällä asemalla. Pääkaupunkiseudulla vähintään puolet mittausasemista tulee sijaita esikaupunkialueella. Otsonia mitataan pääkaupunkiseudulla neljällä mittausasemalla, joista yksi sijaitsee esikaupunkialueella Helsingin Vartiokylässä ja yksi Espoon Luukin tausta-asemalla. Muualla Suomessa otsonia seurataan kuudella asemalla (Porvoo, Turku, Kuopio, Lahti, Oulu ja lisäksi Tampereella mittaus jatkumassa laiterikon jälkeen), joten mittausasemien vähimmäismäärä 7 kpl ei täyty seuranta-alueella. Otsonia muodostavia yhdisteitä on mitattava ainakin yhdellä otsonin mittausasemalla. Pääkaupunkiseudulla VOC-yhdisteitä seurataan Helsingin Kalliossa ja Mäkelänkadulla. Typpidioksidin jatkuvia mittauksia on tehtävä vähintään joka toisella otsonin mittausasemalla. Pääkaupunkiseudulla typpidioksidia seurataan kaikilla otsonin mittausasemilla ja muualla Suomessa viidellä kuudesta kaupunkialueen otsoniasemasta.

Taulukko 20. Rikkidioksidin, lyijyn ja hiilimonoksidin pitoisuuksien suhde ilmanlaadun arviointikynnyksiin sekä mittausasemien vähimmäislukumäärä hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan seuranta-alueittain.

Ilmanlaadun seuranta-alue	Asukasluku 2017	SO ₂	Pb	CO
		24 h	1 v	8 h
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	1 138 502	-	-	-
Uusimaa (pois lukien pks-seutu)	519 142	-	-	-
Varsinais-Suomi ja Satakunta	724 570	-	-	-
Häme	374 043	-	-	-
Kaakkois-Suomi	305 521	-	-	-
Pirkanmaa	512 230	-	-	-
Keski-Suomi	276 071	-	-	-
Etelä-Savo	147 256	-	-	-
Etelä-Pohjanmaa ja Pohjanmaa	440 743	-	-	-
Pohjois-Savo	246 689	-	-	-
Pohjois-Karjala	163 060	-	-	-
Pohjois-Pohjanmaa	411 887	-	-	-
Kainuu	73 971	-	-	-
Lappi	179 281	-	-	-
Yhteensä	5 512 966	0	0	0

Taulukko 21. Bentseenipitoisuuksien suhde ilmanlaadun arviointikynnyksiin sekä mittausasemien vähimmäislukumäärä hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan seuranta-alueittain.

Ilmanlaadun seuranta-alue	Asukasluku 2017	Bentseeni
		1 v
Pääkaupunkiseutu	1 138 502	-
Etelä-Suomi	3 299 576	-
Pohjois-Suomi	1 074 888	-
Yhteensä	5 512 966	0

Taulukko 22. Otsonipitoisuuksien suhde ilmanlaadun arviointikynnyksiin sekä mittausasemien vähimmäislukumäärä hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan seuranta-alueittain.

Ilmanlaadun seuranta-alue	Asukasluku 2017	O ₃	
		8 h	AOT40
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	1 138 502	3	-
Muu Suomi	4 374 464	7	-
Yhteensä	5 512 966	10	

Metallipitoisuudet ovat olleet pääkaupunkiseudulla niin alhaisia, että niiden mittaukset on lopetettu vuoden 2015 jälkeen. Myös muualla Suomessa pitoisuudet alittavat alemman arviointikynnyksen, paitsi teollisuuden vaikutuspiirissä Harjavallassa, jossa ylittyvät arseenin ja nikkelin ylemmät arviointikynnykset ja kadmiumpitoisuudet ovat hyvin lähellä ylittää alemman arviointikynnyksen. Mittausasemien vähimmäislukumäärä määritetään kuitenkin hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan,

minkä vuoksi suuntaa antavasti pitoisuustasojen perusteella määritetyt asemamäärät on merkitty taulukkoon Harjavallan kohdalle harmaalla sulkuihin (taulukko 23). Harjavallan metallipitoisuuksien seurannasta määrätään erikseen näitä päästöjä aiheuttavan teollisuuden ympäristöluvista. Harjavallassa seurataan metallipitoisuuksia kahdella mittausasemalla.

PAH-yhdisteisiin kuuluvan **bentso(a)pyreenin pitoisuudet** ylittävät ylemmän arviointikynnyksen pääkaupunkiseudulla ja muualla Suomessa tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla (taulukko 23). Pääkaupunkiseudulla bentso(a)pyreenipitoisuuksia tulee seurata kahdella mittausasemalla ja muualla Suomessa neljällä mittausasemalla. Pääkaupunkiseudulla bentso(a)pyreeniä mitataan kolmella jatkuvatoimisella mittausasemalla ja lisäksi 1–2 kpl vuosittain siirtyvällä mittausasemalla, joten asemien vähimmäismäärä täyttyy. Muun Suomen seuranta-alueella bentso(a)pyreeniä seurataan pientaloalueilla Uudellamaalla yhdellä vuosittain siirtyvällä mittausasemalla. Kampanjaluonteisesti bentso(a)pyreenipitoisuuksia on kartoitettu Kuopiossa vuonna 2015 ja Lahdessa vuonna 2018. Lahdessa on aloitettu bentso(a)pyreenimittaukset vuonna 2020 ja niitä jatketaan ainakin vuoteen 2026 jatkuvan sopimuskauden ajan. Mittaussuunnitelmaan sisältyy Lahden mittauksen lisäksi mittaukset vähintään kolmena vuotena myös Hollolassa (*Kähäri, 2021*). Tällä hetkellä muun Suomen seuranta-alueella mitataan siis bentso(a)pyreeniä 2–3 pientalo- tai kaupunkiympäristössä sijaitsevalla asemalla. Tarve olisi lisätä seuranta-alueita muualla Suomessa 1–2 mittausasemalla, jotta mittausasemien vähimmäislukumäärä 4 kpl saavutettaisiin. Raahessa terästeollisuuden päästöjen vaikutuspiirissä bentso(a)pyreenipitoisuuksia seurataan Lapaluodossa ja keskustassa. Lapaluodossa ylittyy ylempi arviointikynnys ja useana vuotena pitoisuudet ovat ylittäneet myös tavoitearvon. Lapaluodon bentso(a)pyreenipitoisuuksiin voi vaikuttaa myös Lapaluodon pientaloalueen puunpolto. Raahen PAH-yhdisteiden seurannasta määrätään SSAB:n terästehtaan ympäristöluvista ja siksi alla olevassa taulukossa pitoisuustasojen perusteella annettu mittausasemien lukumäärä on esitetty harmaana suluissa eikä Raahen asemia lasketa mukaan muun Suomen seuranta-alueen vähimmäislukumäärään.

Taulukko 23. Arseeni-, kadmium-, nikkeli- ja bentso(a)pyreenipitoisuuksien (B(a)P) suhde ilmanlaadun arviointikynnyksiin sekä mittausasemien vähimmäislukumäärä hajapäästölähteiden aiheuttaman kuormituksen seurantaan ilmanlaadun seuranta-alueittain. Teollisuuden päästövaikutusten seurantaan tarkoitetut mittausasemat, joista on määrätty laitosten ympäristöluvista, eivät vaikuta ilmanlaadun seuranta-alueen asemien vähimmäislukumäärään. Nämä on taulukossa merkitty sulkeisiin.

Ilmanlaadun seuranta-alue	Asukasluku 2017	Arseeni 1 v	Kadmium 1 v	Nikkeli 1 v	B(a)P 1 v
Pääkaupunkiseutu (=HSY-alue)	1 138 502	–	–	–	2
Muu Suomi	4 374 464	–	–	–	4
• Harjavalta		(3)	–	(3)	–
• Raahen		–	–	–	(4)
Yhteensä	5 512 966	0	0	0	6

4.2 Seurantatarve maaseututausta-alueilla

Maaseututausta-alueilla koko Suomen alueella tulee seurata **rikkidioksidin ja typen oksidien pitoisuuksia** vähintään yhdellä asemalla 20 000 neliökilometriä kohden, jos pitoisuudet ylittävät ylemmän arviointikynnyksen tai yhdellä asemalla 40 000 neliökilometriä kohden, jos pitoisuudet ovat ylemmän ja alemman arviointikynnyksen välissä. Suomessa rikkidioksidin ja typen oksidien pitoisuudet alittavat Ilmatieteen laitoksen maaseututausta-aseilla alemmat arviointikynnykset, joten mittausvelvoitetta ei ole. Osana kansainvälisiä tutkimusohjelmia (mm. GAW, EMEP) rikkidioksidia kuitenkin seurataan seitsemällä ja typen oksideja viidellä tausta-aseamalla.

Pienhiukkaspitoisuuksia tulee maaseututausta-alueilla seurata vähintään yhdellä asemalla 100 000 neliökilometriä kohti pitoisuuksista riippumatta. Suomen pinta-ala on 338 465 km², mikä tarkoittaa Suomessa kolmea mittausasemaa. Näillä pienhiukkasten massapitoisuutta seuraavilla asemilla tulee mitata myös pienhiukkasten kemiallista koostumusta (SO₄²⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Na⁺, K⁺, Cl⁻, Ca²⁺, Mg²⁺, EC, OC). Ilmatieteen laitos seuraa pienhiukkasten pitoisuutta ja kemiallista koostumusta kolmella maaseututausta-aseamalla: Kittilän Matorovalla, Virolahdella ja Paraisilla Utössä.

Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia ei velvoiteta seuraamaan maaseututausta-alueilla, mutta Ilmatieteen laitos seuraa hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia Muonion Sammaltunturilla ja Virolahdella.

Otsonipitoisuuksia tulee maaseututausta-alueilla seurata vähintään yhdellä asemalla 50 000 neliökilometriä kohti pitoisuuksista riippumatta, mikä tarkoittaa Suomessa kuutta mittausasemaa. Ilmatieteen laitos seuraa otsonipitoisuuksia kahdeksalla tausta-aseamalla: Muonion Sammaltunturilla, Inarin Raja-Joosepissa, Sodankylässä, Kuusamon Juumassa, Ilomantsin Pötsönvaarassa, Juupajoen Hyytiälässä, Virolahdella ja Paraisilla Utössä. Otsonia muodostavia yhdisteitä tulee mitata vähintään yhdellä otsonin mittausasemalla. Ilmatieteen laitos seuraa VOC-yhdisteiden pitoisuuksia Muonion Sammaltunturilla suuntaa antavin mittauksin. Typpidioksidipitoisuuden suuntaa antavia mittauksia tulee tehdä joka toisella otsoniasemalla ja typpidioksidia mitataankin viidellä tausta-aseamalla kahdeksasta.

Arseenin, kadmiumin, nikkelin, elohopean, bentso(a)pyreenin ja muiden polysyklisten aromaattisten hiilivetyjen pitoisuuksia sekä kokonaislaskeumia on seurattava suuntaa antavin mittauksin vähintään kolmella taustamittausasemalla. Ilmatieteen laitos mittaa arseenin, kadmiumin, elohopean, nikkelin ja bentso(a)pyreenin ja muiden PAH-yhdisteiden pitoisuuksia sekä laskeumaa kolmella tausta-aseamalla: Kittilän Matorovalla, Juupajoen Hyytiälässä ja Virolahdella. Matorova on elohopean osalta Suomen ja Ruotsin yhteinen ilmanlaadun tausta-asema. Lisäksi arseenin, kadmiumin ja nikkelin kokonaislaskeumaa mitataan osana kansainvälisiä mittausohjelmia (mm. EMEP ja IM) kolmella muulla tausta-aseamalla (Hailuoto, Valkea-Kotinen ja Hietajärvi) ja elohopealaskemaa yhdellä tausta-aseamalla (Valkea-Kotinen). Samoista näytteistä, joista määritetään arseenin, kadmiumin ja nikkelin pitoisuus PM₁₀-hiukkasissa tai laskeumassa, määritetään myös muita raskasmetalleja (lyijy, alumiini, koboltti, kromi, kupari, mangaani, rauta, vanadiini ja sinkki).

5 JOHTOPÄÄTÖKSET

Ilmanlaatuarvioinnissa tarkasteltiin Suomen ilmanlaadun nykytilaa ilmanlaadun mittaustulosten ja satelliittihavaintojen perusteella. Tarkastellut ilman epäpuhtaudet olivat typpidioksidi, typen oksidit, hengitettävät hiukkaset, pienhiukkaset, rikkidioksidi, hiilimonoksidi, otsoni, bentso(a)pyreeni, bentseeni, lyijy, arseeni, kadmium ja nikkeli. Ilmanlaatuarvioinnissa tarkasteltiin Suomessa vuosina 2015–2019 mitattuja pitoisuuksia ja verrattiin niitä ilmanlaadun arviointikynnyksiin. Tarkastelualueina käytettiin ilman epäpuhtauksille määritettyjä ilmanlaadun seuranta-alueita.

Ilmanlaatu on monilta osin parantunut edellisen vastaavan arvioinnin jälkeen (*Komppula ym., 2014*). Erityisesti typpidioksidin pitoisuudet ovat laskeneet ja pääkaupunkiseudulla on pitkäjänteisen työn seurauksena päästy alle typpidioksidin vuosiraja-arvon. Katupölykauden aikaiset korkeimmat hengitettävien hiukkasten pitoisuudet on myös saatu vähenemään tehostetun katupölyn torjunnan ansiosta. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuustasojen perusteella seurantarave jatkuvin mittauksin onkin vähentynyt monilla ilmanlaadun seuranta-alueilla. Pienhiukkaspitoisuudet ovat myös alentuneet, mutta pitoisuudet ovat alittaneet alemman arviointikynnyksen jo aiemminkin, joten seurantavelvoitteeseen ei ole tullut muutoksia.

Ymmärrys PAH-yhdisteisiin kuuluvan bentso(a)pyreenin pitoisuuksista on kasvanut, kun mittaustuloksia on saatavilla aiempaa enemmän. Arvion mukaan bentso(a)pyreenin pitoisuudet ylittävät ylempien arviointikynnyksen tiiviisti rakennetuilla pientaloalueilla sekä pääkaupunkiseudulla että muualla Suomessa. Mittausvelvoite täyttyy pääkaupunkiseudulla, jossa pitoisuuksia seurataan kolmella pysyvällä mittausasemalla ja lisäksi vuosittain siirtyvillä asemilla. Kuitenkin kaupunkialueilla muualla Suomessa tulisi mitata bentso(a)pyreeniä 1–2 uudella mittausasemalla, jotta mittausten vähimmäistavoite 4 mittausasemaa täyttyisi. Tällä hetkellä bentso(a)pyreenipitoisuuksia seurataan Uudellamaalla vuosittain siirtyvällä asemalla, Lahdessa pientaloalueella sekä Hollolassa vähintään kolmena vuotena vuoteen 2026 mennessä. PAH-yhdisteitä seurataan myös Raahessa terästeollisuuden vaikutuspiirissä kahdella mittausasemalla, mutta seurantavelvoite tulee ympäristöluvasta eikä Raahen asemia lasketa mukaan muun Suomen seuranta-alueen mittausasemiin.

Raskasmetallien pitoisuudet ovat Suomessa pääosin alhaisia ja pääkaupunkiseudulla mittaukset on lopetettu vuoden 2015 jälkeen. Raskasmetallien pitoisuudet ovat koholla metalliteollisuuspaikkakunnilla. Erityisesti Harjavallassa mitataan korkeita ylempien arviointikynnysten ylittäviä arseeni- ja nikkelipitoisuuksia ja kadmiumpitoisuudetkin ovat koholla. Torniossa ja Raahessa raskasmetallipitoisuudet alittavat alemmat arviointikynnykset.

Otsonipitoisuuksissa ratkaisevaa pitoisuuksien laskua ei ole näkyvissä. Otsonipitoisuudelle annetut tavoitearvot alittuvat, mutta pitkän ajan tavoitteiden alle pääsemiseksi tarvitaan kansainvälisen yhteisön toimia. Pääkaupunkiseudulla otsonipitoisuuksien seuranta on riittävää, mutta muun Suomen seuranta-alueella otsonin mittausasemien määrä ei täytä vähimmäismäärää. Mittausasemia tulisi olla seitsemän ja tällä hetkellä otsonia mitataan viidellä asemalla ja lisäksi yksi mittaus on alkamassa.

Rikkidioksidin, hiilimonoksidin ja bentseenin pitoisuudet ovat Suomessa alhaisia ja ne alittavat alemmat arviointikynnykset. Hiilimonoksidipitoisuuksien mittaukset onkin

kaupunkialueilla lopetettu vuonna 2015 ja seuranta jatkuu enää tausta-alueilla. Tässä selvityksessä tarkastellaankin mahdollisuutta arvioida jatkossa hiilimonoksidipitoisuuksia satelliittihavaintojen perusteella.

Tässä työssä satelliittihavaintoja käytettiin ensimmäistä kertaa objektiivisen ilmanlaatuarvioinnin tukena. TROPOMI-instrumentin tuottamia typpidioksidi- ja hiilimonoksidihavaintoja käyttäen saatiin laaja-alainen ja ajantasainen arvio kaasupitoisuuksien alueellisesta vaihtelusta Suomessa. Satelliittihavaintoihin liittyvistä rajoitteista (auringon valo, havainnot vain tiettyyn aikaan päivästä, paikallinen erotuskyky) ja havaintomenetelmien eroista huolimatta TROPOMI-instrumentista saadut tulokset typpidioksidille ja hiilimonoksidille ovat yhteneviä maanpintamittausten kanssa. Satelliittimittausten ja maanpintamittausten välistä riippuvuutta hyväksikäyttäen TROPOMI-havainnoista voitiin johtaa arviot NO_2 :n ja CO:n maanpintapitoisuuksille eri seuranta-alueille Suomessa. Tämän työn tulokset osoittavat, että satelliittihavaintoja voidaan hyödyntää ilmanlaadun arvioinnissa alueilla, joissa maanpintamittauksia ei enää tehdä. Satelliittien tuottamien maailmanlaajuisten havaintojen vuoksi tässä työssä käytettyä lähestymistapaa on helppo soveltaa myös muualla. Tämä voi tarjota mm. uuden kustannustehokkaan mahdollisuuden ilmanlaadun seurantaan kehittyvissä maissa.

VIITELUETTELO

Auranen, P. ja Kähäri, K., 2019. Launeen alueen PAH-pitoisuudet alkuvuonna 2018 – ja avaimet parempaan ilmanlaatuun. Lahden kaupunki. Kaupunkiympäristön palvelualue.

<https://www.lahti.fi/tiedostot/launeen-alueen-pah-pitoisuudet/>

Anttila, P., 2020. Air Quality Trends in Finland, 1994–2018. Academic dissertation in physics. Institute of Atmospheric and Earth System Research / Physics, Faculty of Science, University of Helsinki, Helsinki, Finland. *Finnish Meteorological Institute Contributions No. 163*.

<https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/320460/thesis-Pia-Anttila-web.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

ESA, 2020: Air pollution remains low as Europeans stay at home.

https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-5P/Air_pollution_remains_low_as_Europeans_stay_at_home

European Commission, 2018. Member States' and European Commission's Common Understanding of the Commission Implementing Decision laying down rules for Directives 2004/107/EC and 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council as regards the reciprocal exchange of information and reporting on ambient air (Decision 2011/850/EU). Version of 15 March 2018. European Commission, DG ENV.

http://www.eionet.europa.eu/aqportal/doc/IPR%20guidance_2.0.1_final.pdf

Ialongo, I., Virta, H., Eskes, H., Hovila, J., ja Douros, J., 2020: Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki, *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 205–218.

<https://doi.org/10.5194/amt-13-205-2020>

Karion, A., Sweeney, C., Tans, P. ja Newberger, T. AirCore, 2010: An innovative atmospheric sampling system. *J. Atmos. Ocean. Technol.* 27, 1839–1853.

<https://doi.org/10.1175/2010JTECHA1448.1>

Komppula, B., Anttila, P., Vestenius, M., Salmi, T. ja Lovén, K., 2014. Ilmanlaadun seurantatarpeen arviointi. Ilmatieteen laitos, Asiantuntijapalvelut, Ilmanlaatu ja energia. 123 s. + 48 liites.

http://expo.fmi.fi/ages/public/Raportti_Ilmanlaadun_seurantatarpeen_arviointi.pdf

Korhonen, S., Loukkola, K. ja Portin, H., 2021. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2020. HSY:n julkaisuja 1/2021.

<https://julkaisu.hsy.fi/ilmanlaatu-paakaupunkiseudulla-vuonna-2020-1.pdf>

Kähäri, K., 2021. Lahden kaupunki. Kirjallinen tiedonanto sähköpostitse 24.8.2021.

Saari, H., Salmi, J., Vestenius, M., Kyllönen, K., Makkonen, U., Wemberg, A., Laakia, J. ja Latikka, J., 2018. Outokumpu Stainless Oy. Ilmanlaatumittaukset Tornion tehtaan ympäristössä. Rikkidioksidin, elohopean, hengitettävien hiukkasten, arseenin, metallien, PAH-yhdisteiden ja ionien pitoisuudet vuonna 2017. Loppuraportti. Ilmatieteen laitos, Asiantuntijapalvelut, Ilmanlaatu ja energia. 64 s.+ 17 liites.

http://expo.fmi.fi/ages/public/Tornio_Outokumpu_Ilmanlaatumittausten_2017_loppuraportti.pdf

Sundström, A-M., Virta, H., Ialongo, I. ja Tamminen, J., 2020. Satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa. *Raportteja 2020:1*. Ilmatieteen laitos, Kaukokartoitustutkimus. 52 s.

<http://hdl.handle.net/10138/311906>

S5P Mission Performance Centre (MPC) – Validation Data Analysis Facility, 2020.

<http://mpc-vdaf.tropomi.eu>. Viimeksi tarkistettu: 11.1.2020.

Tilastokeskus, 2019: StatFin » Liikenne ja matkailu » Ulkomaan meriliikenne » Kuukausitiedot » 12is -- Ulkomaan merikuljetukset satamittain ja tavaralajeittain, 2016M01-2020M08.

<https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/>

Tilastokeskus, 2020: StatFin » Väestö » Väestön ennakkotilasto » 11lj -- Väestörakenteen ennakkotiedot alueittain, 2020M01*-2020M10*.

<https://pxnet2.stat.fi/PXWeb/pxweb/fi/StatFin/>

Väkevä, Outi ja Loukkola, K., 2021. Ilmanlaatu Uudellamaalla vuonna 2020. Uudenmaan ELY-keskus. Raportteja 19/2021.

<https://www.doria.fi/bitstream/handle/10024/181420/Raportteja%2019%202021.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Waldén, J., Waldén, T., Laurila, S., Hakola, H., 2017. Demonstration of the equivalence of PM2.5 and PM10 measurement methods in Kuopio 2014–2015. Finnish Meteorological Institute, *Reports 2017:1*.

http://expo.fmi.fi/ages/public/PM_Equivalence_report_Kuopio_2017.pdf

79/2017. Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta. Annettu Helsingissä 26.1.2017.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170079>

113/2017. Valtioneuvoston asetus ilmassa olevasta arseenista, kadmiumista, elohopeasta, nikkelistä ja polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä. Annettu Helsingissä 16.2.2017.

<https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2017/20170113>

2004/107/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ilmassa olevasta arseenista, kadmiumista, elohopeasta, nikkelistä ja polysyklisistä aromaattisista hiilivedyistä. Annettu Strasbourgissa 15.12.2004.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32004L0107>

2008/50/EY. Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi ilmanlaadusta ja sen parantamisesta. Annettu Strasbourgissa 21.5.2008.

<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fin/ALL/?uri=CELEX:32008L0050>

2011/850/EU. Komission täytäntöönpanopäätös tietojenvaihtojärjestelmästä ja ilmanlaatua koskevien tietojen raportoinnista annettuja Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivejä 2004/107/EY ja 2008/50/EY koskevien sääntöjen vahvistamisesta. Annettu Brysselissä 12.12.2011.

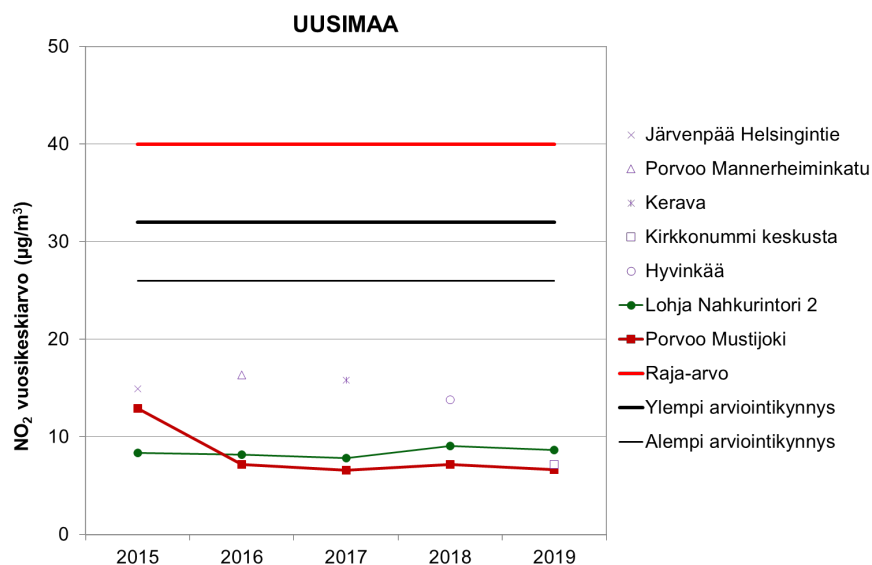
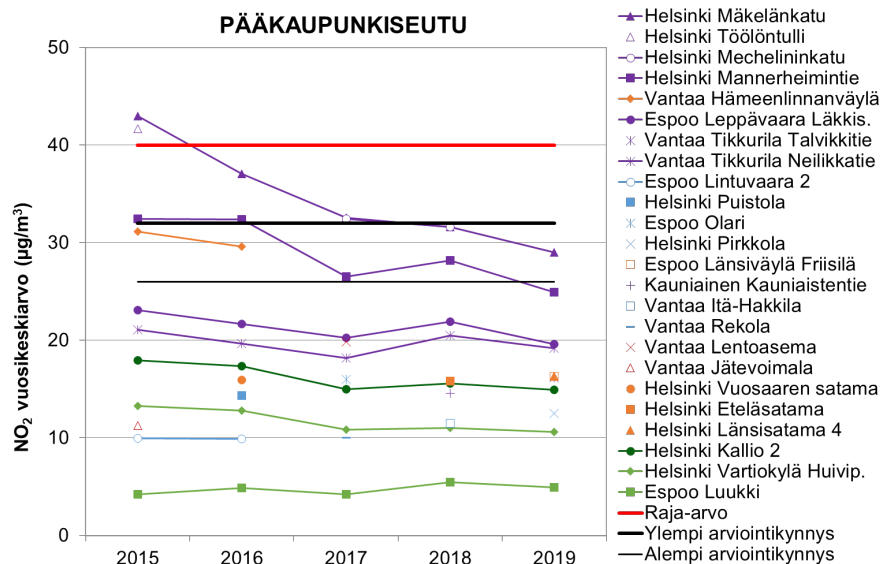
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FI/TXT/?uri=CELEX:32011D0850>

2015/1480/EU. Komission direktiivi ilmanlaadun arvioinnissa käytettäviä vertailumenetelmiä, tietojen validointia ja näytteenottoa paikkojen sijaintia koskevien sääntöjen vahvistamisesta koskevien Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivien 2004/107/EY ja 2008/50/EY useiden liitteiden muuttamisesta. Annettu Brysselissä 28.8.2015.

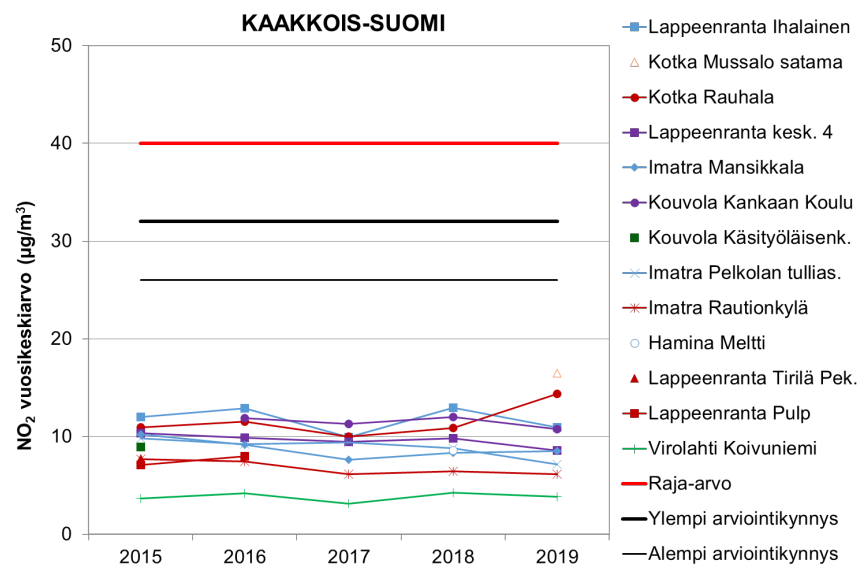
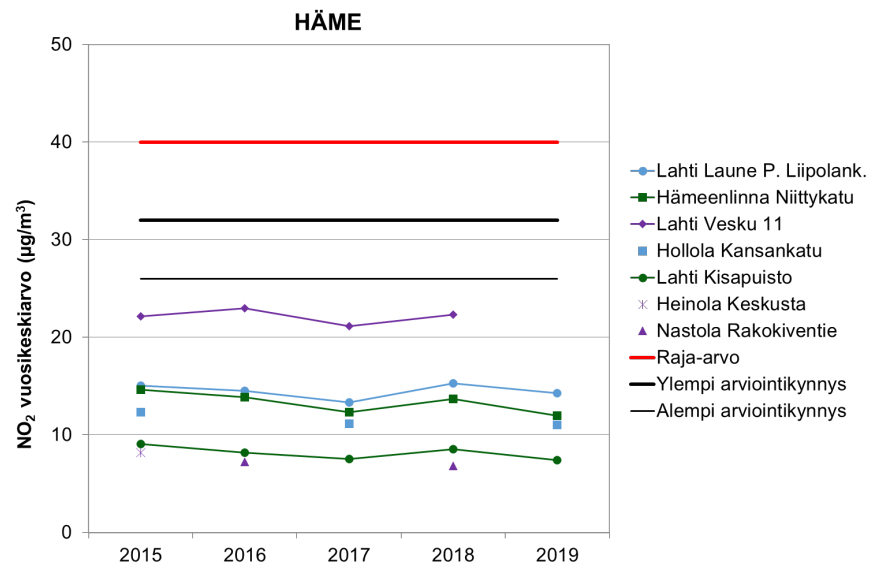
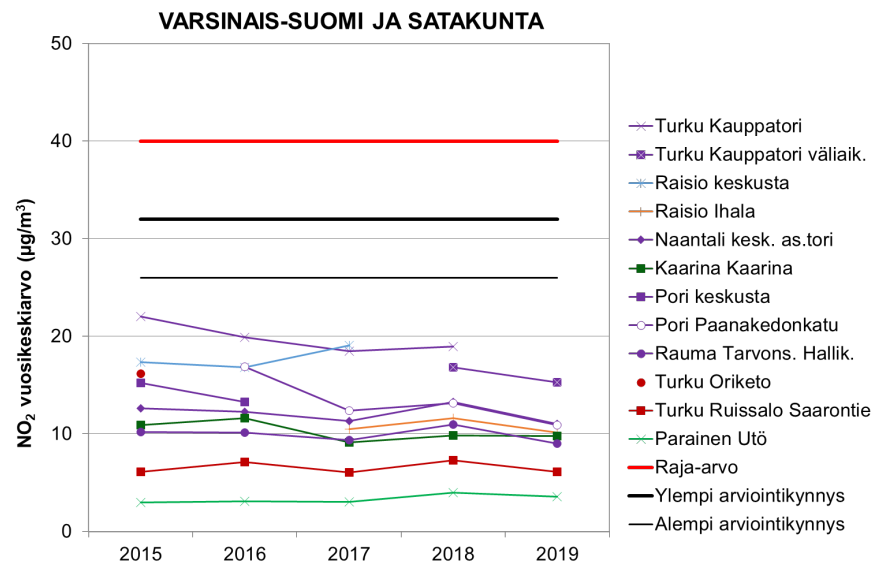
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/fin/ALL/?uri=CELEX:32015L1480>

LIITE 1: ILMANLAATUMITTAUSTEN TULOKSET SEURANTA-ALUEILLA

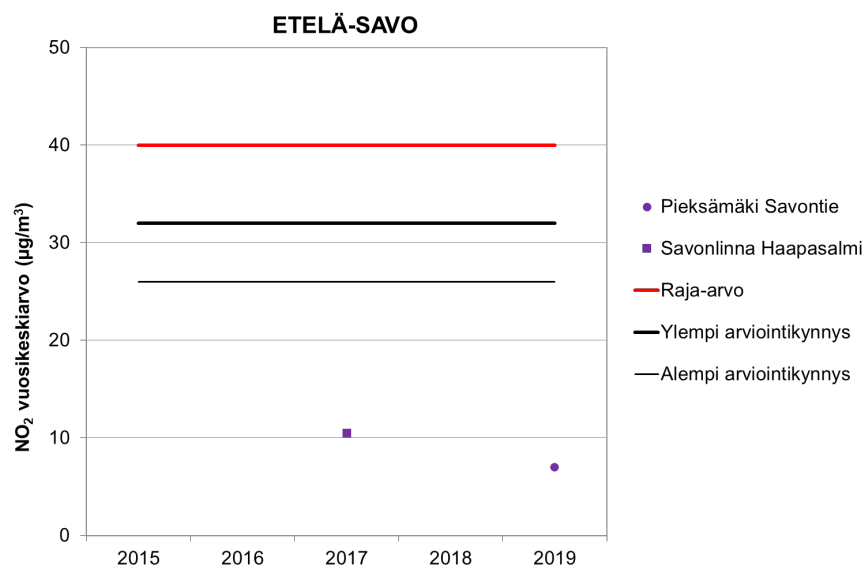
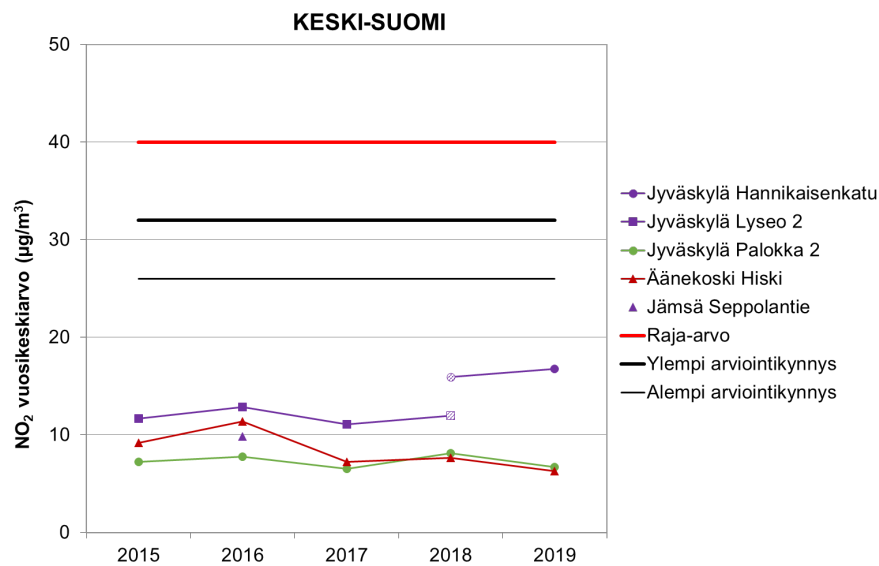
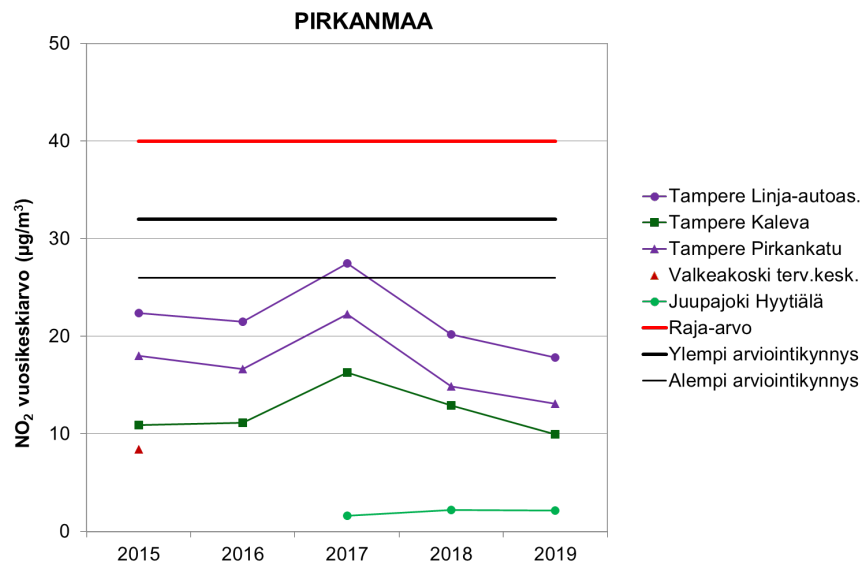
NO₂ vuosipitoisuudet



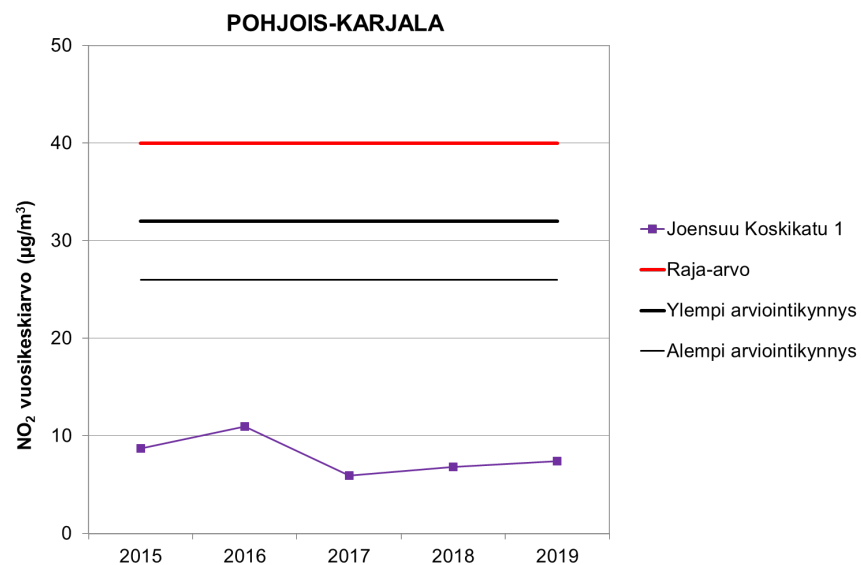
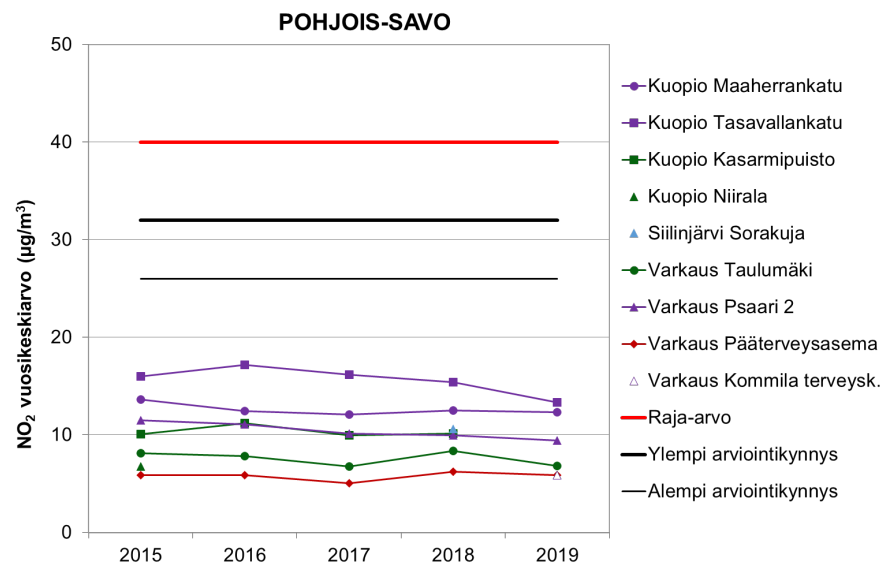
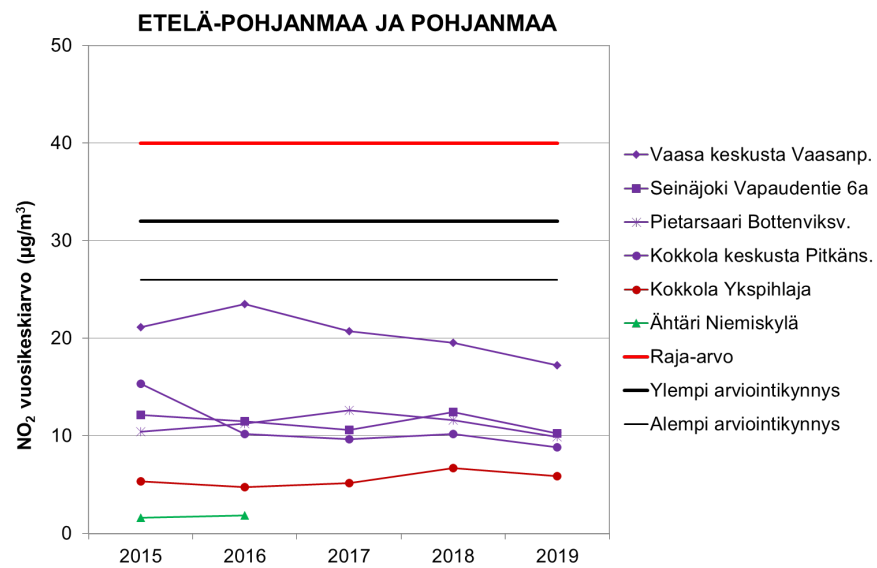
LIITE 1
77



LIITE 1
78

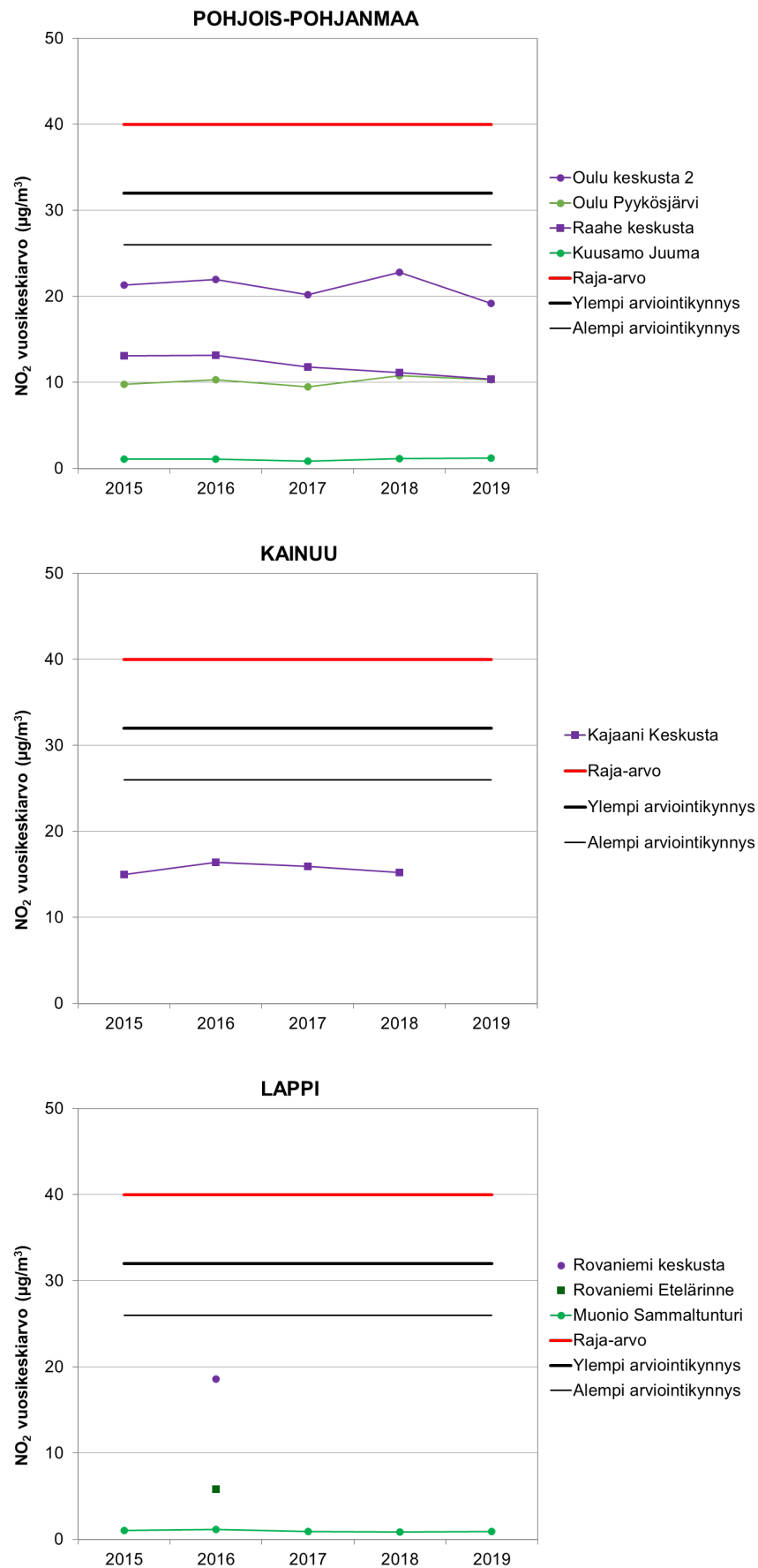


LIITE 1
79

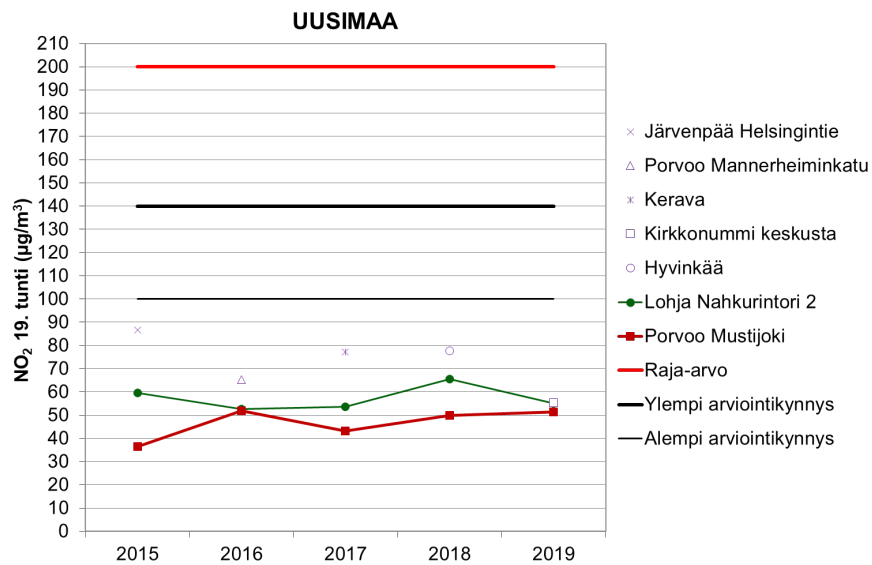
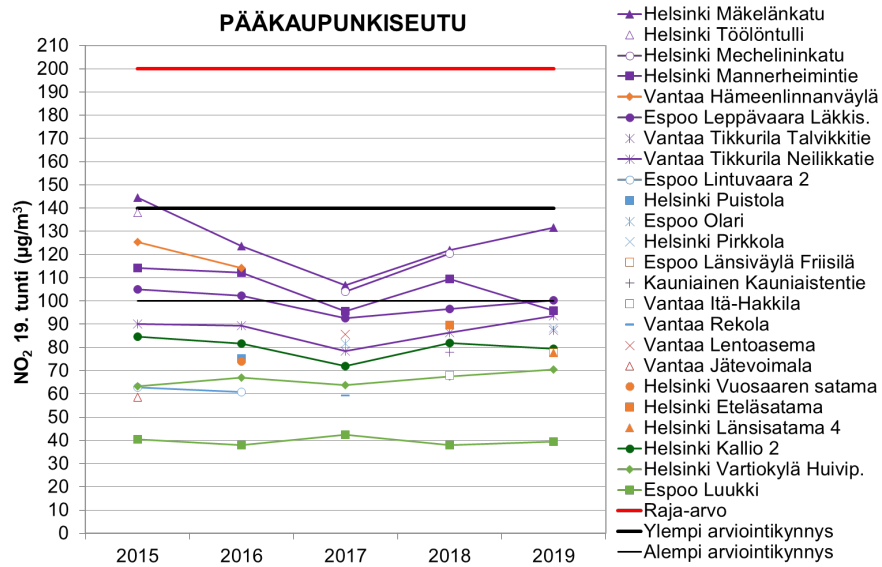


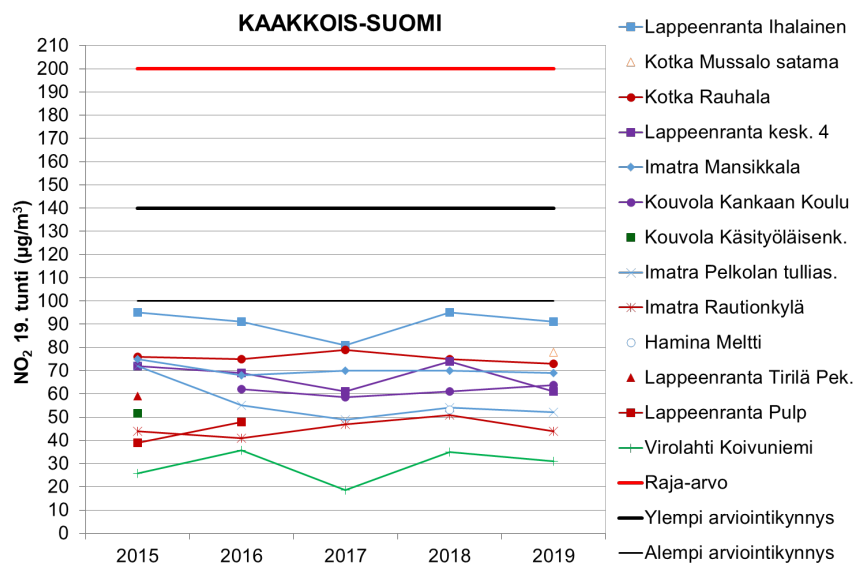
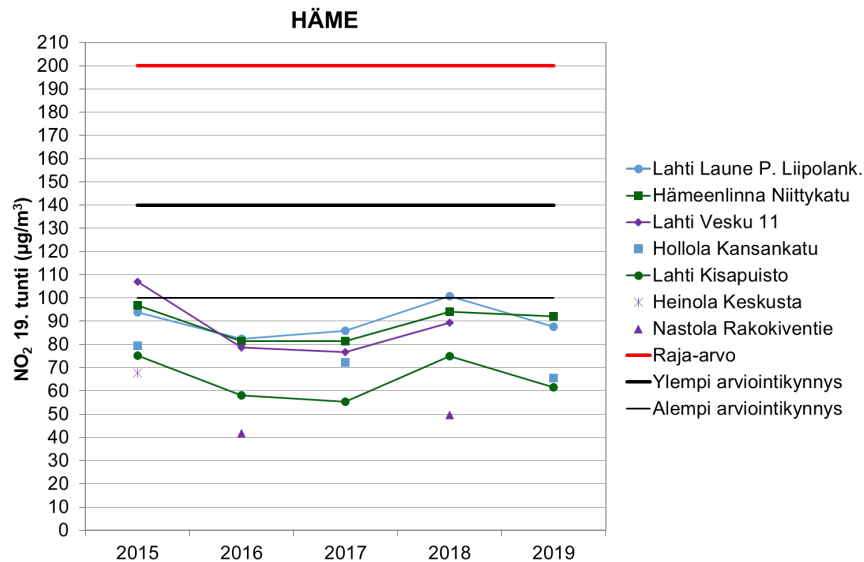
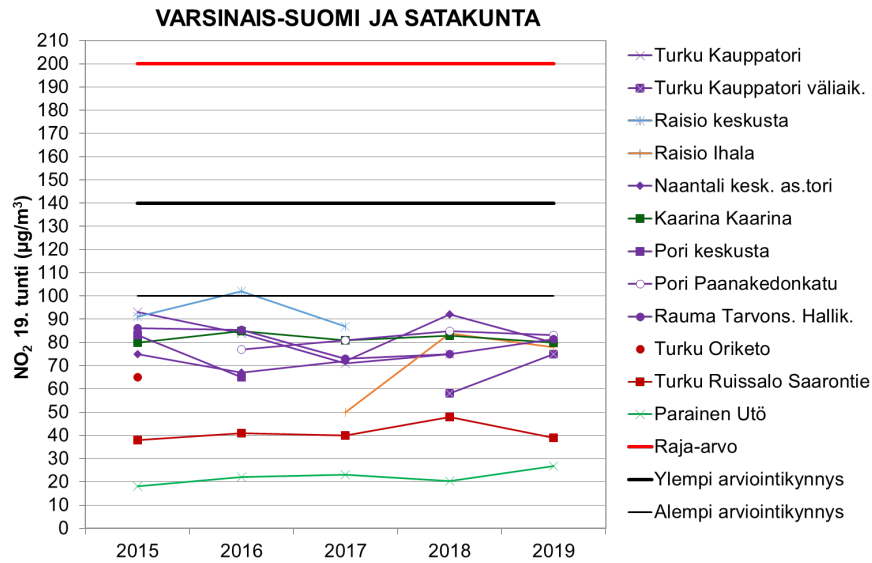
LIITE 1

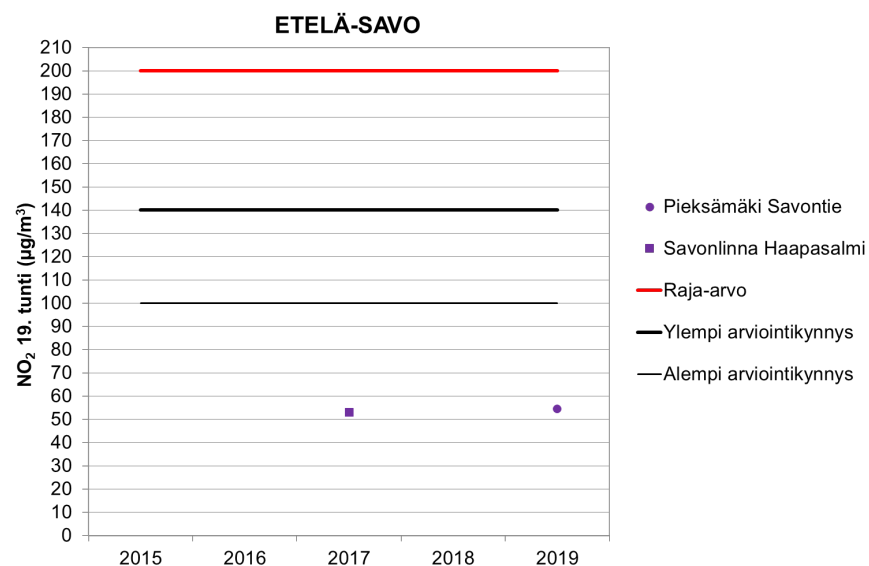
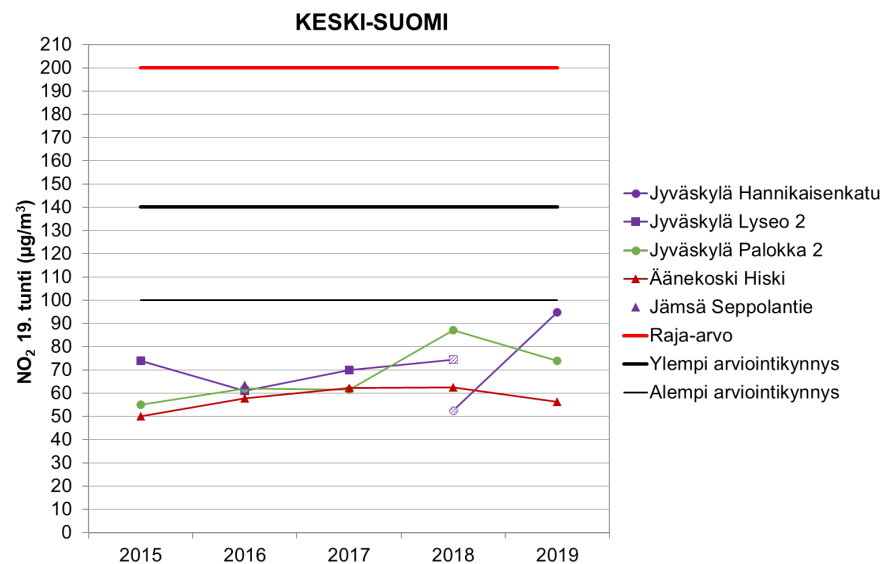
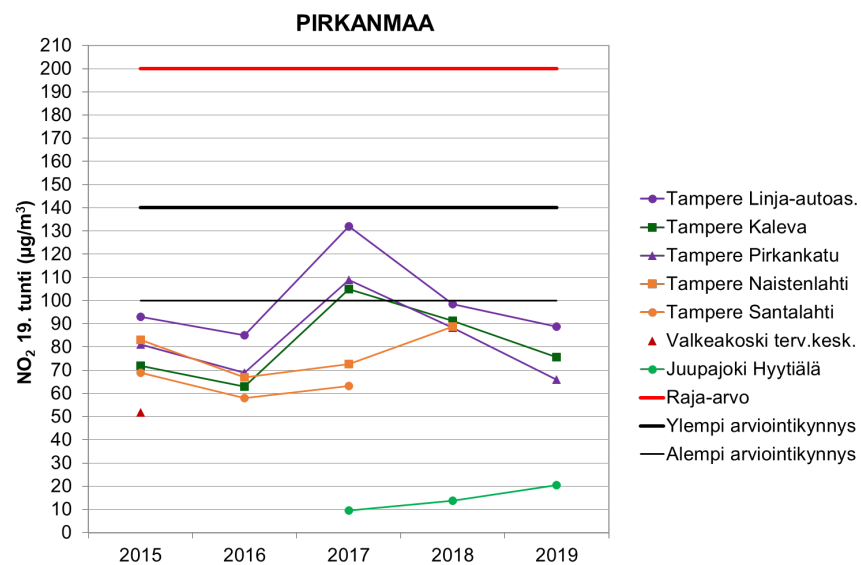
80



NO₂ tuntipitoisuudet

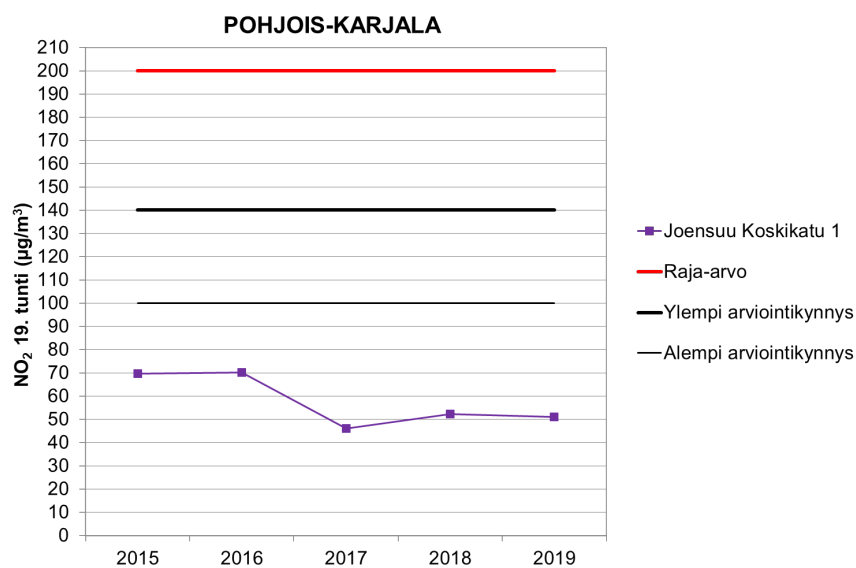
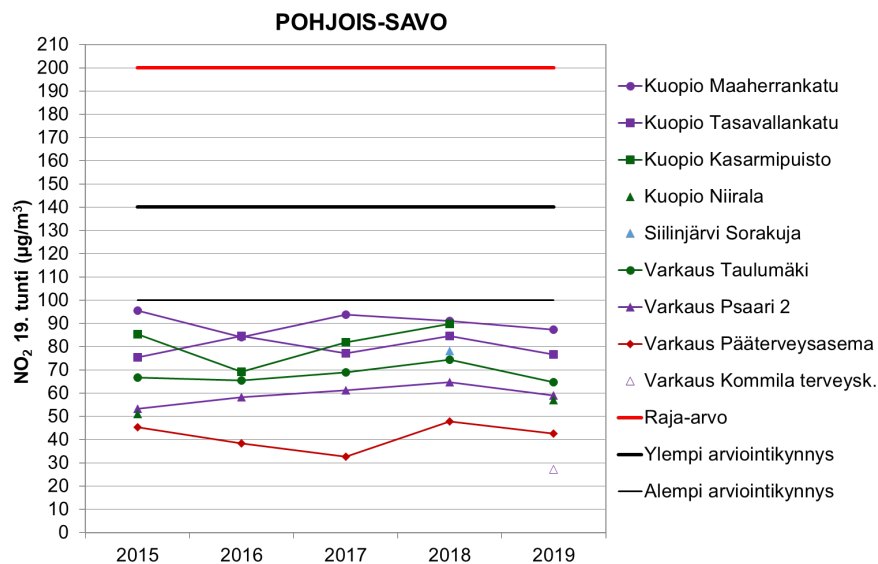
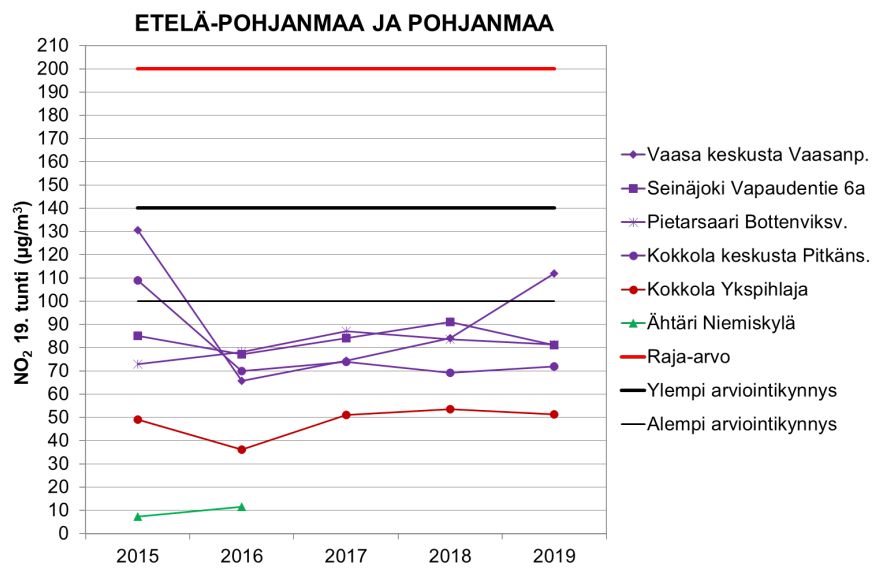






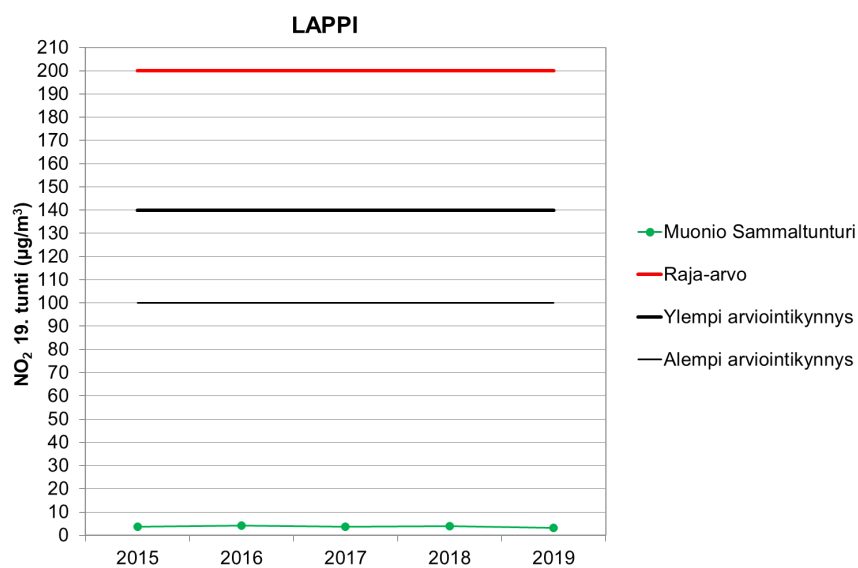
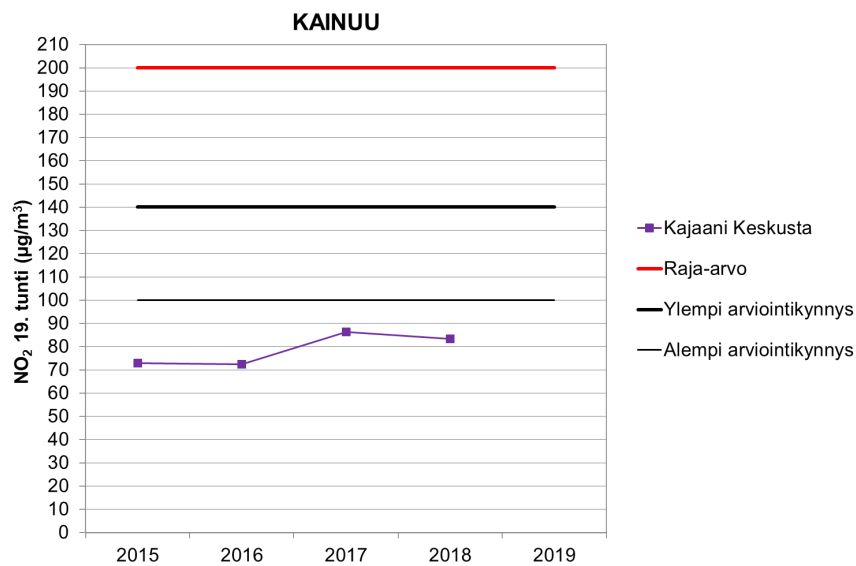
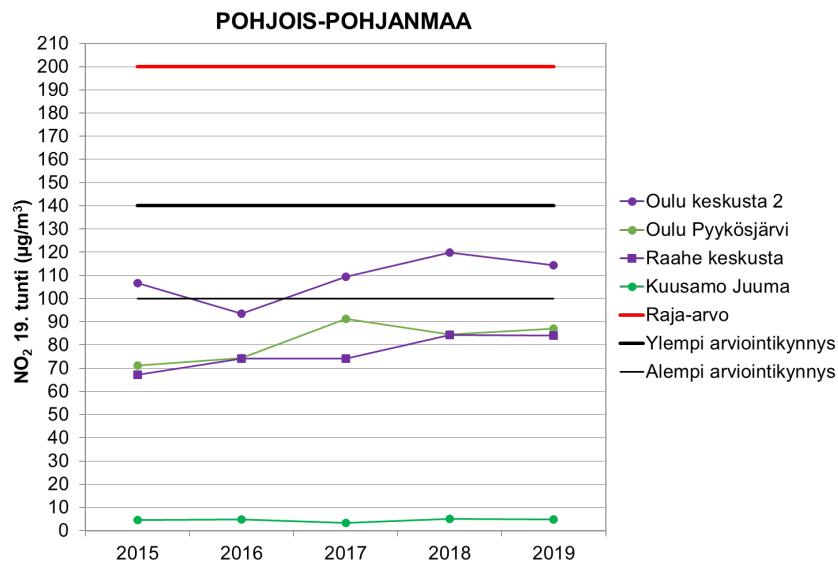
LIITE 1

84

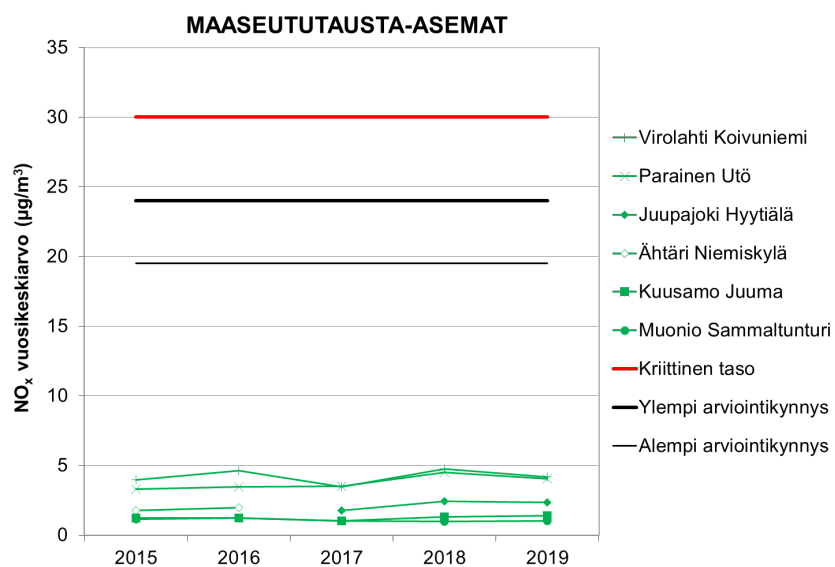


LIITE 1

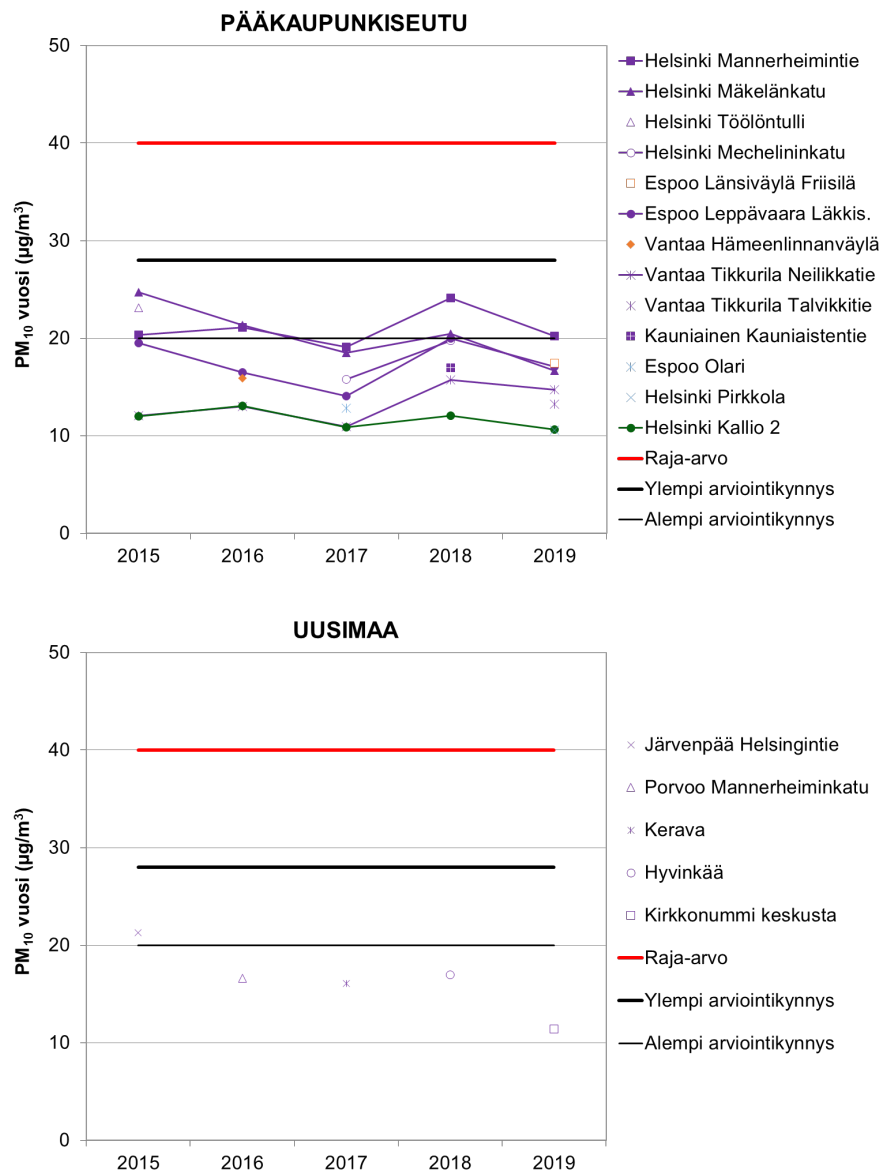
85

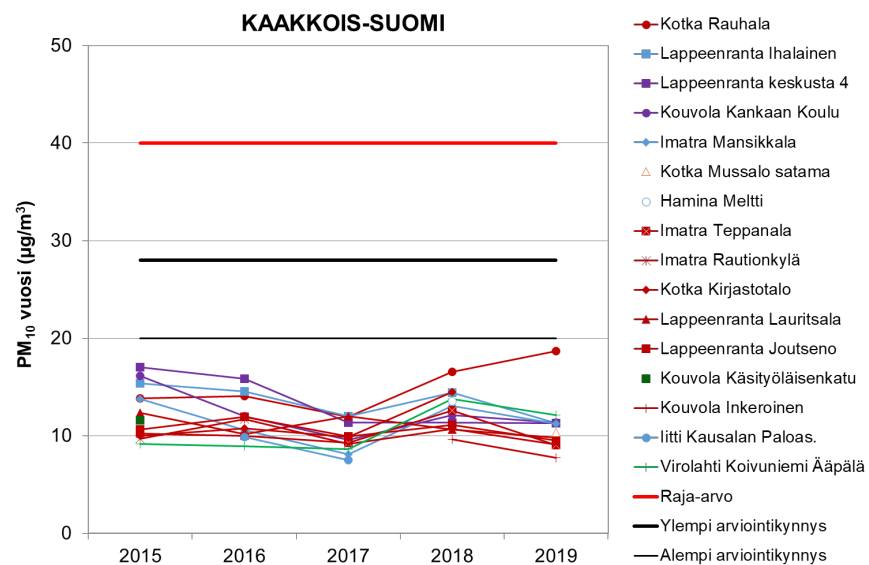
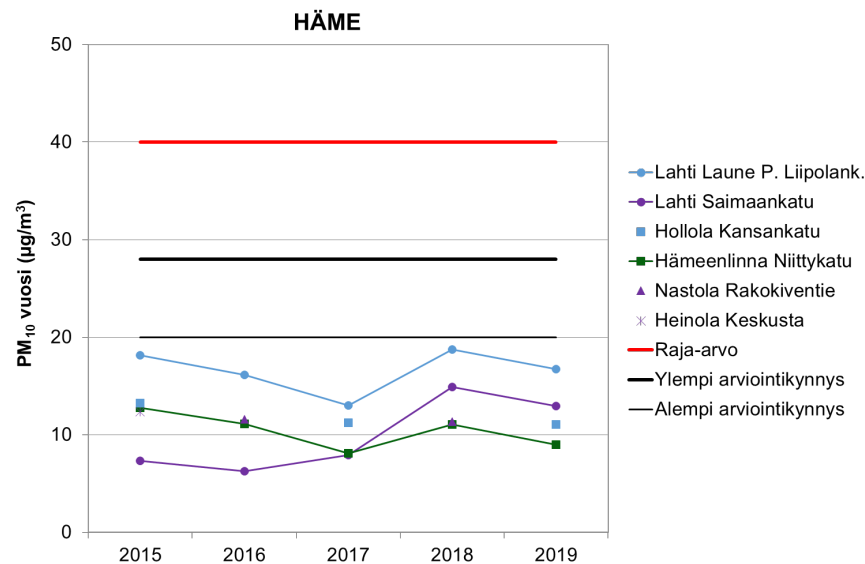
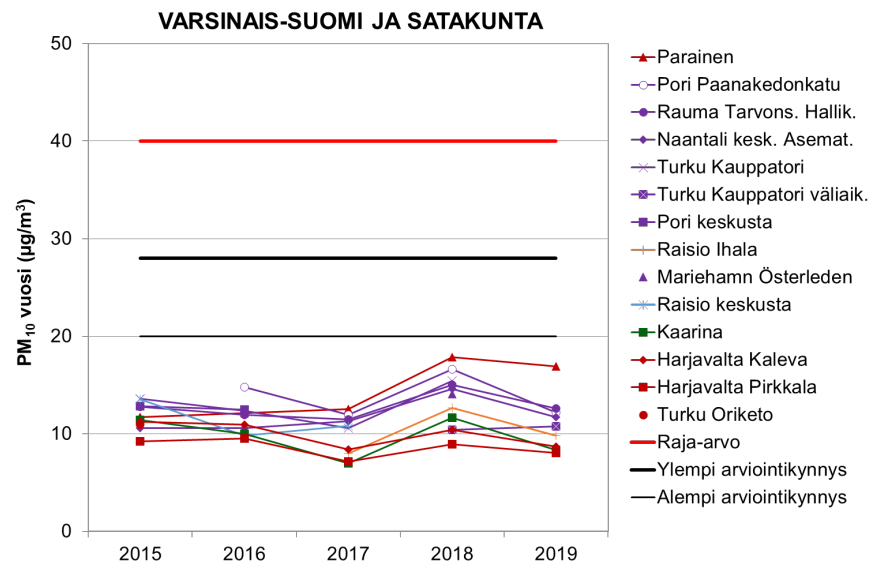


NO_x vuosipitoisuudet

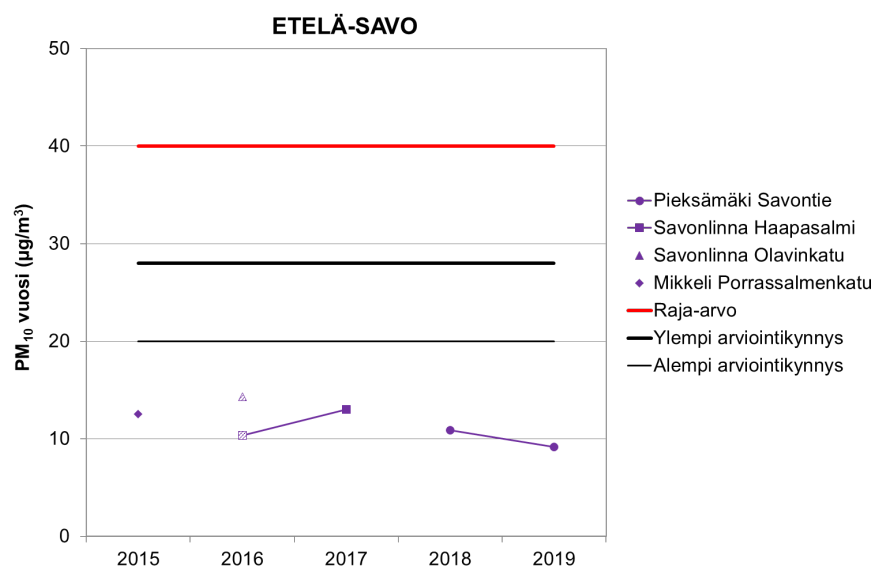
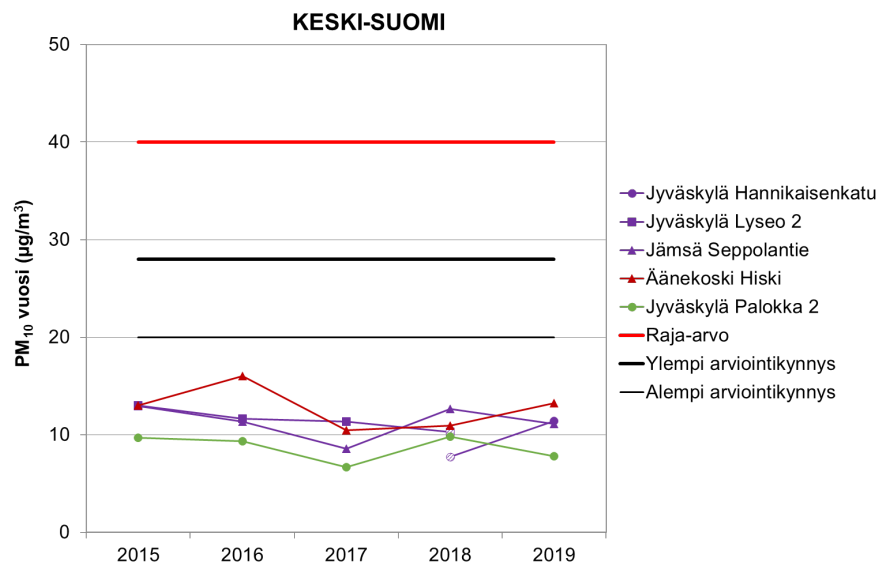
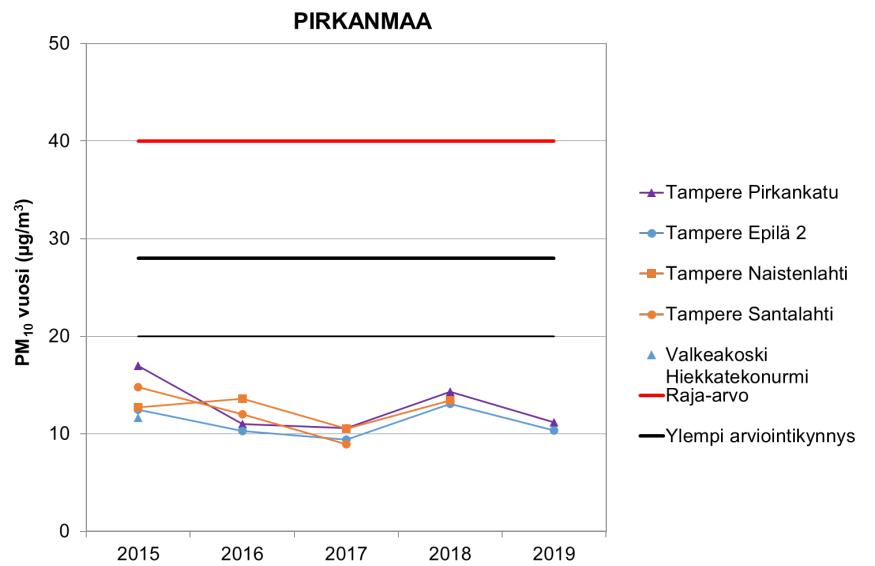


PM₁₀ vuosipitoisuudet



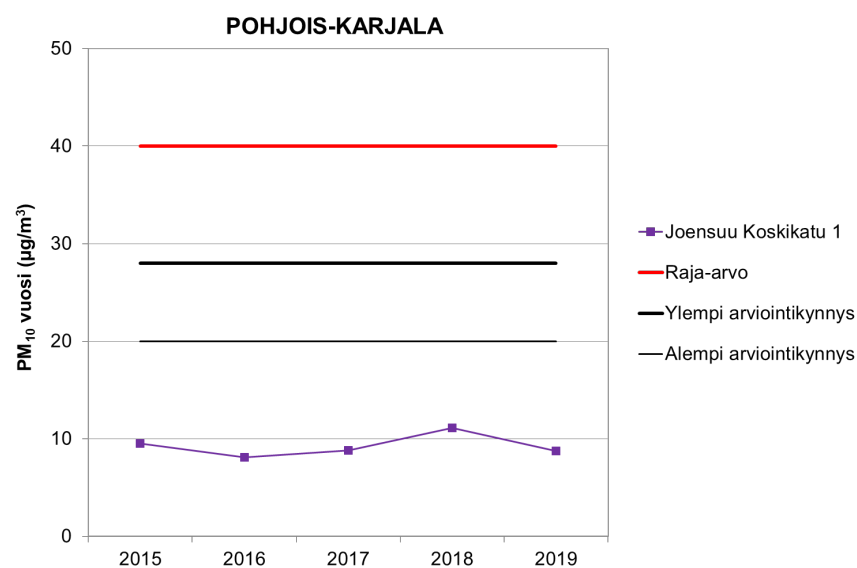
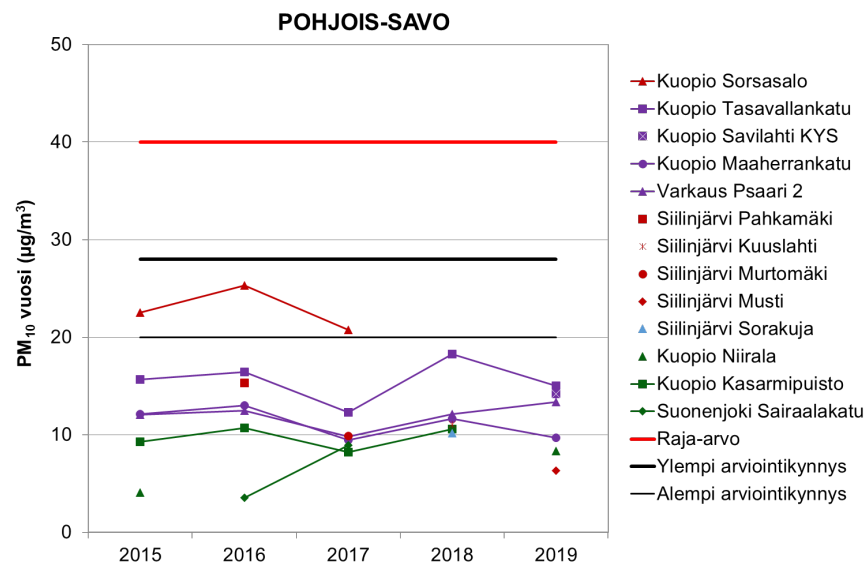
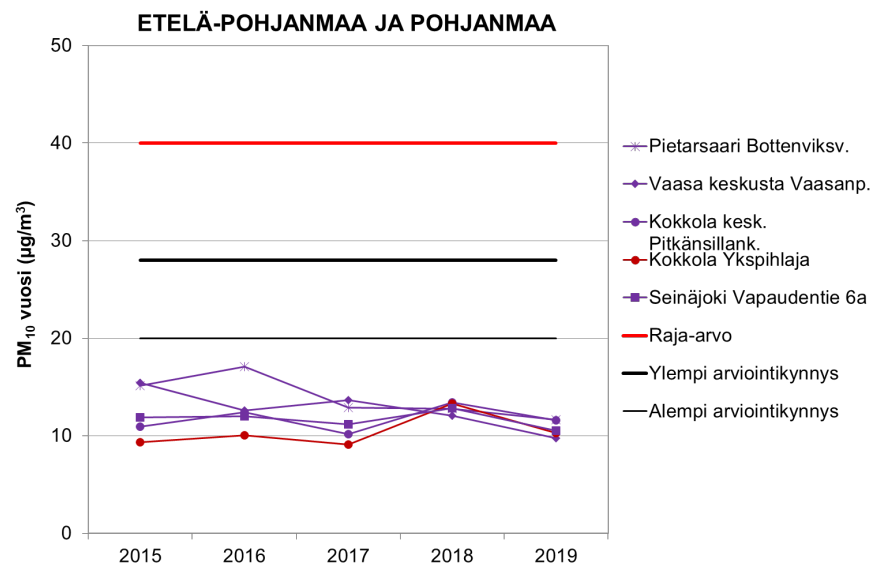


LIITE 1
89



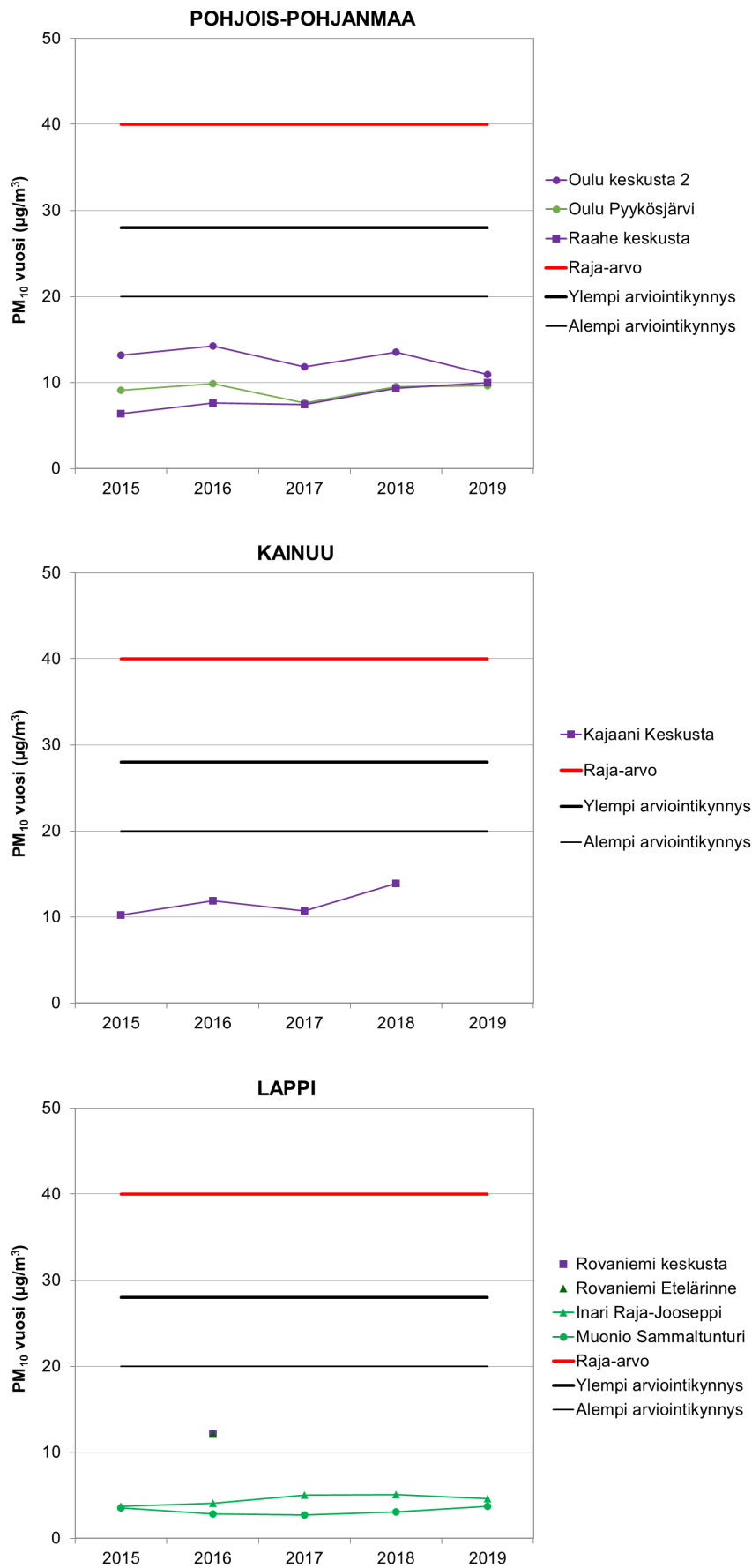
LIITE 1

90

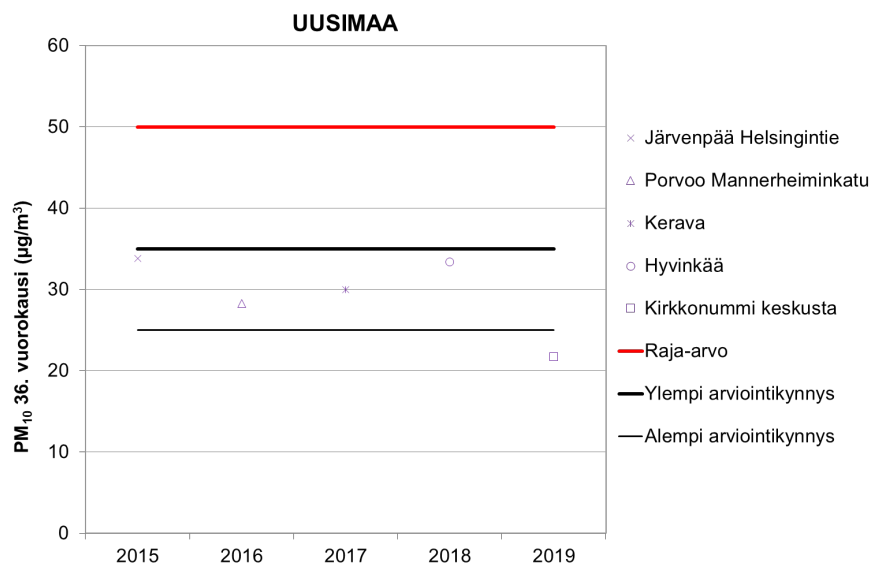
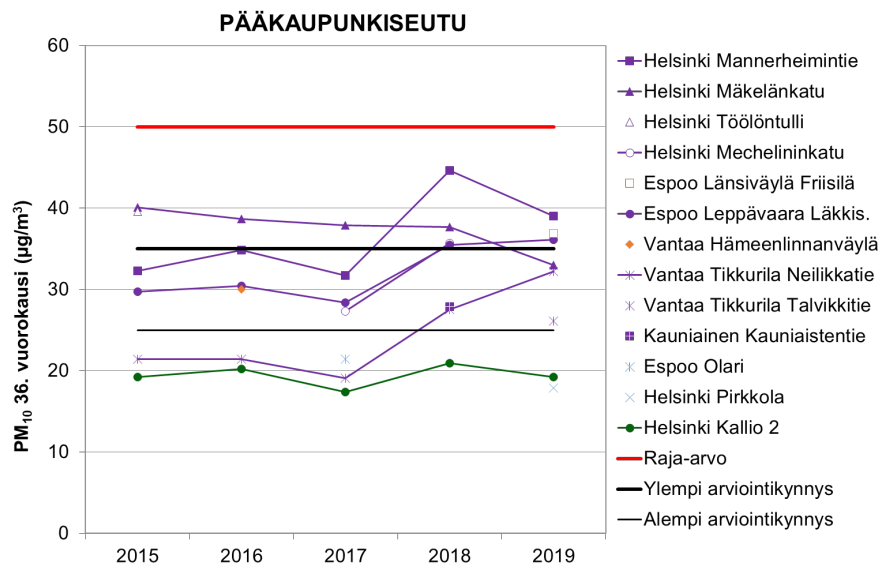


LIITE 1

91

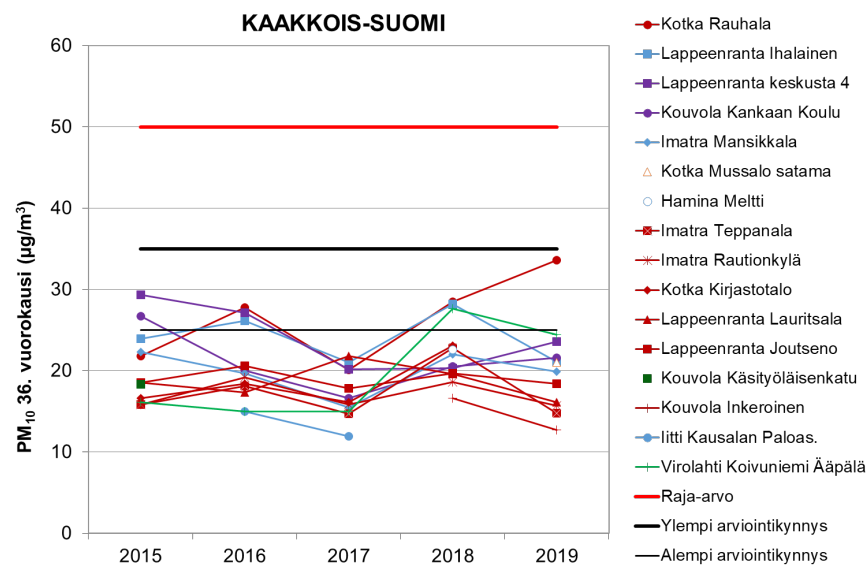
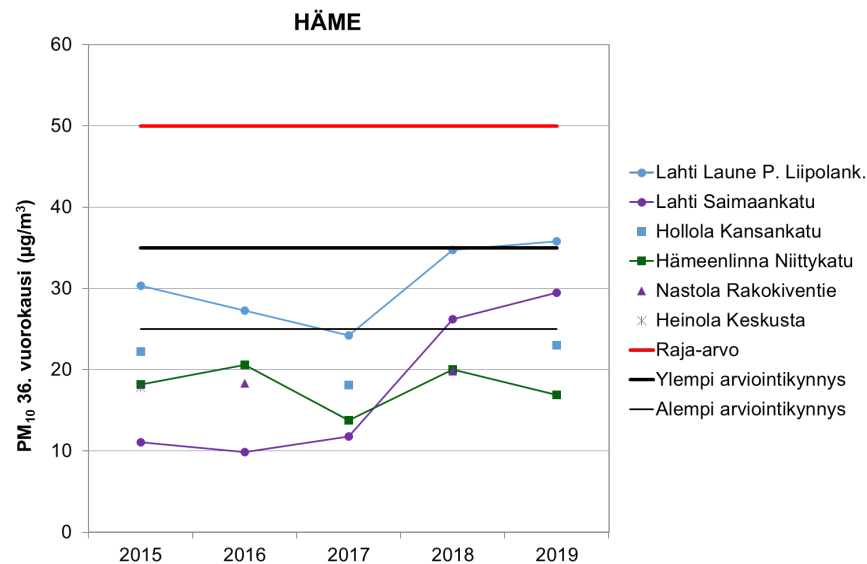
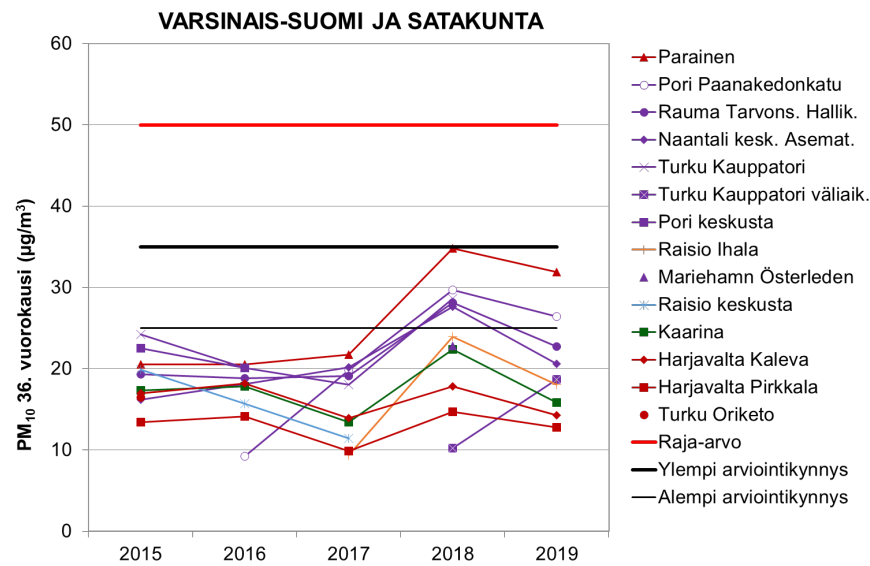


PM₁₀ vuorokausipitoisuudet



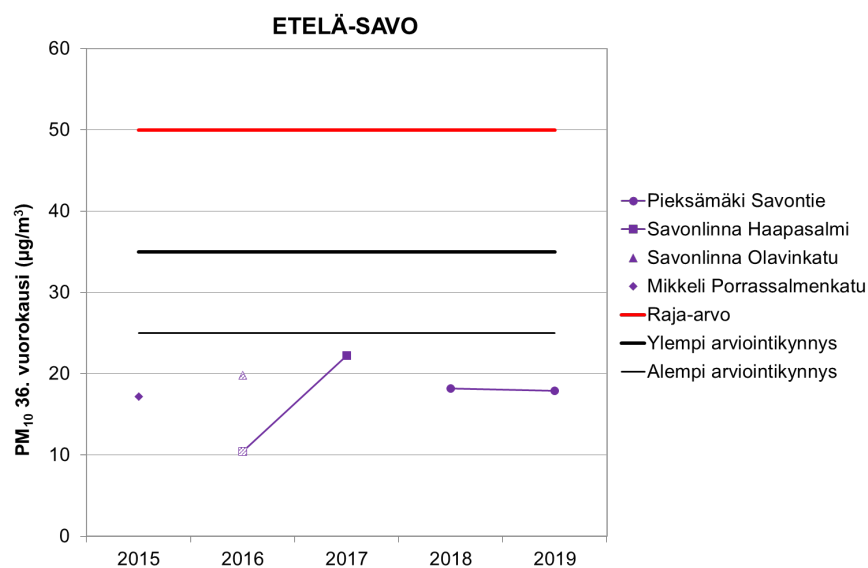
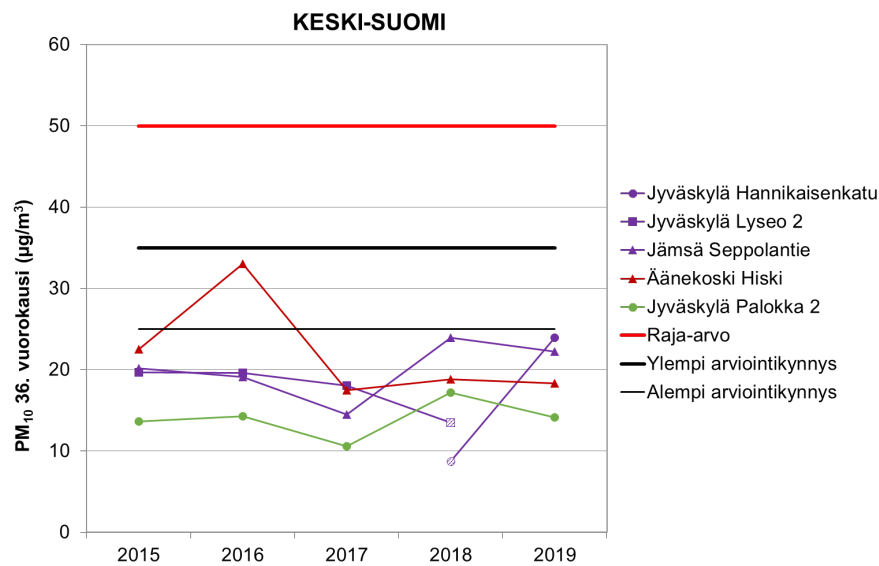
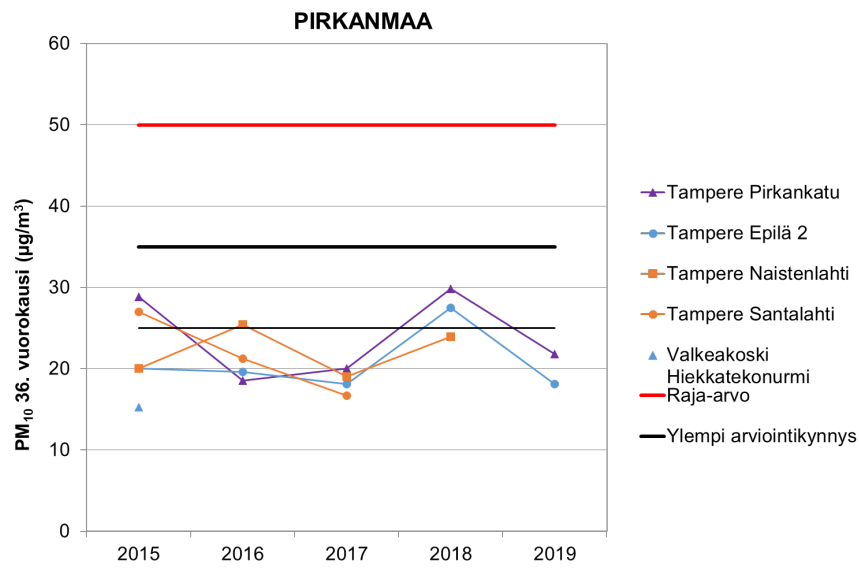
LIITE 1

93



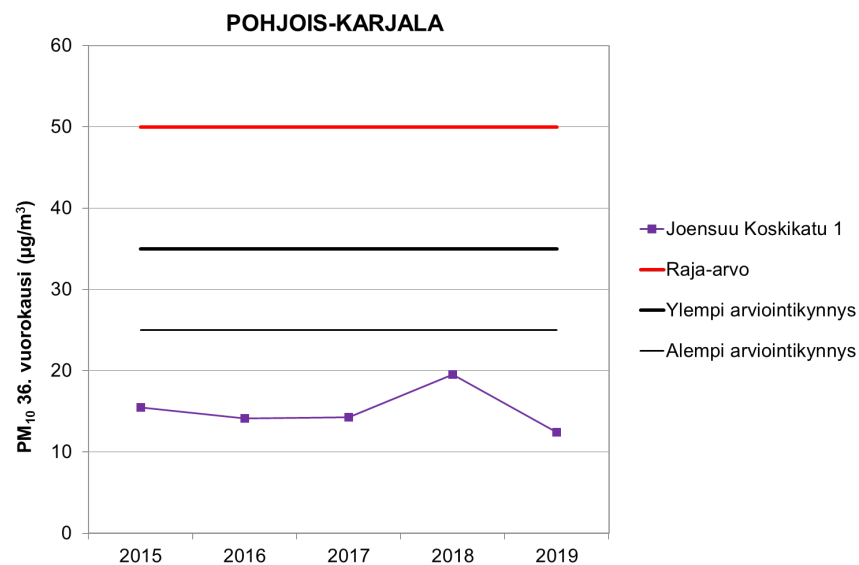
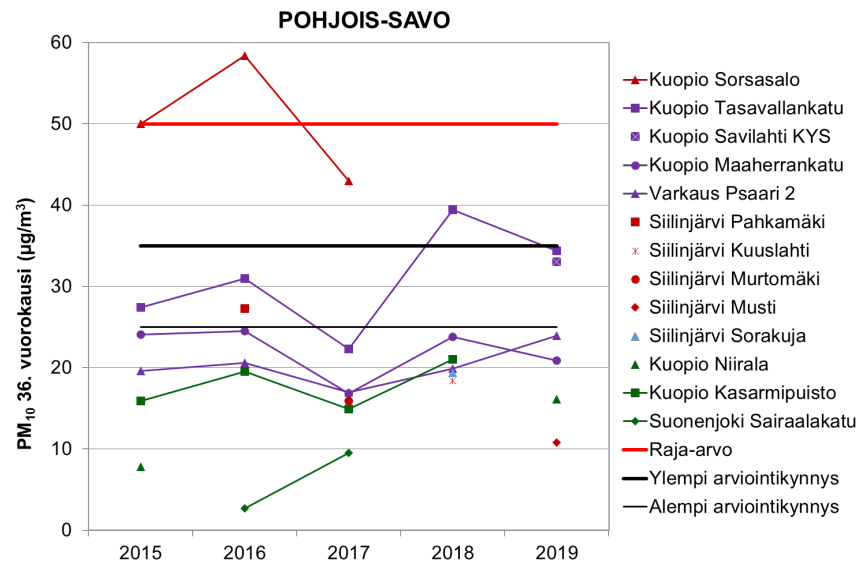
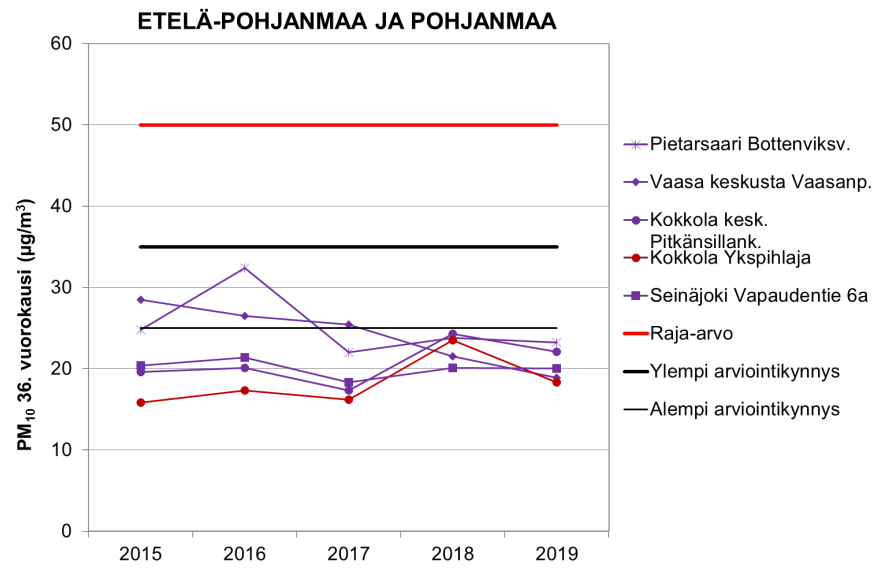
LIITE 1

94



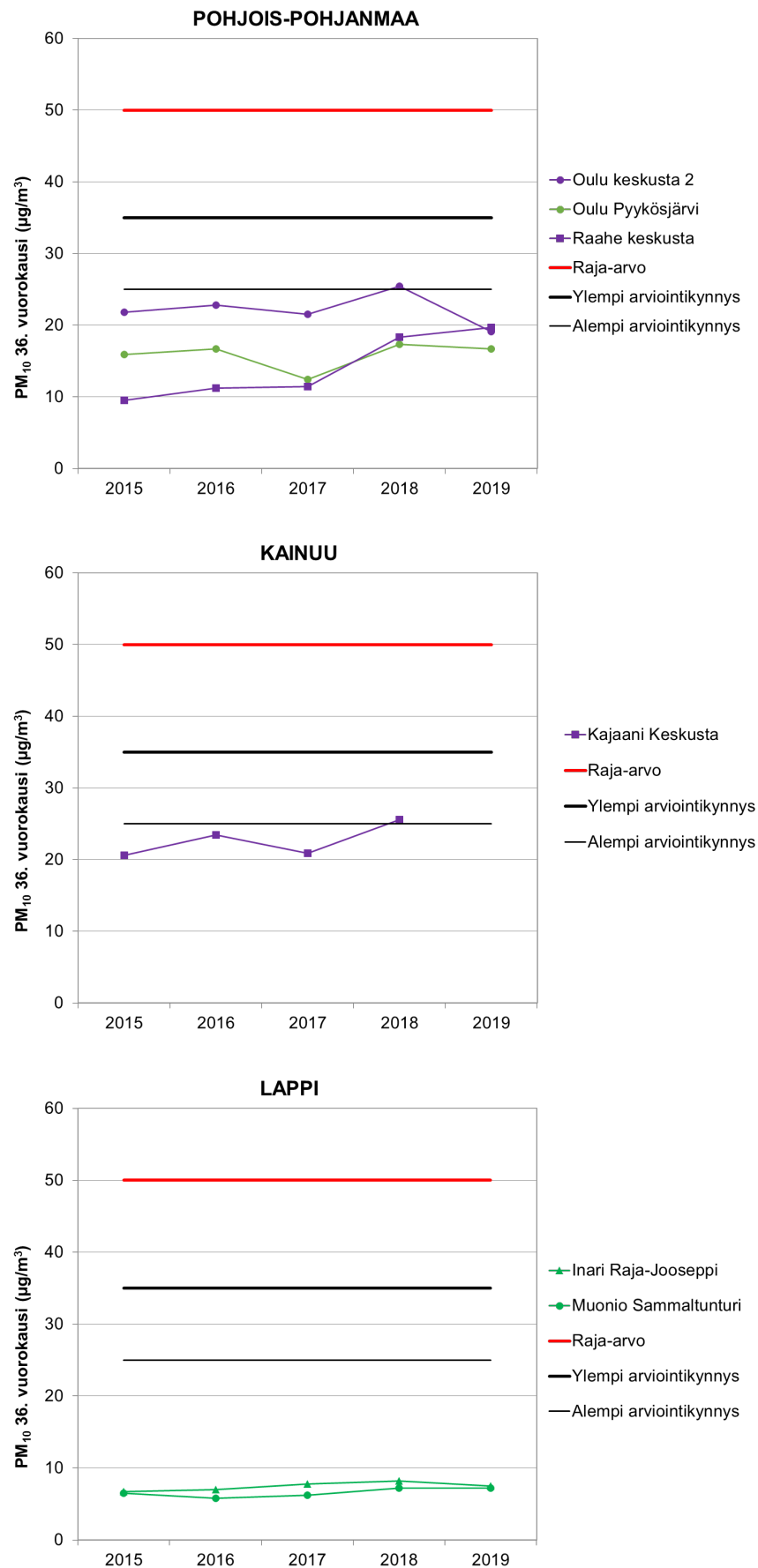
LIITE 1

95

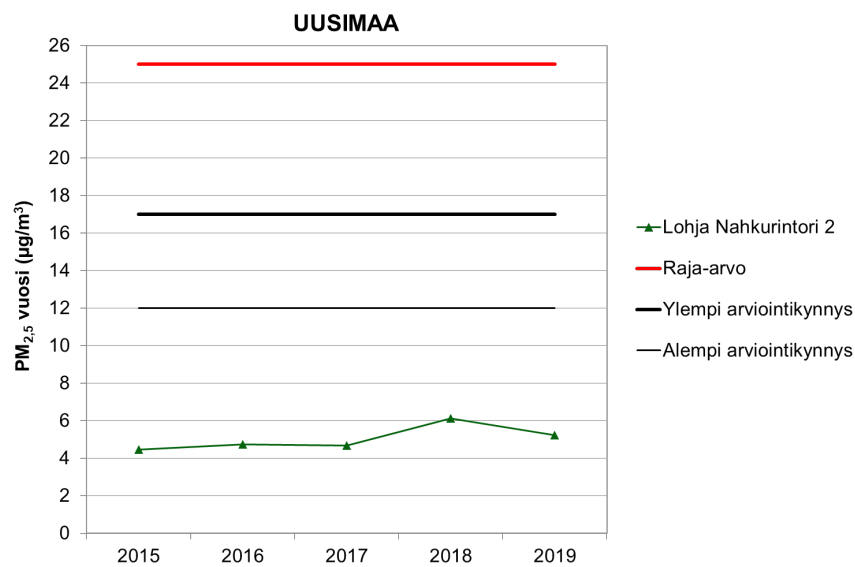
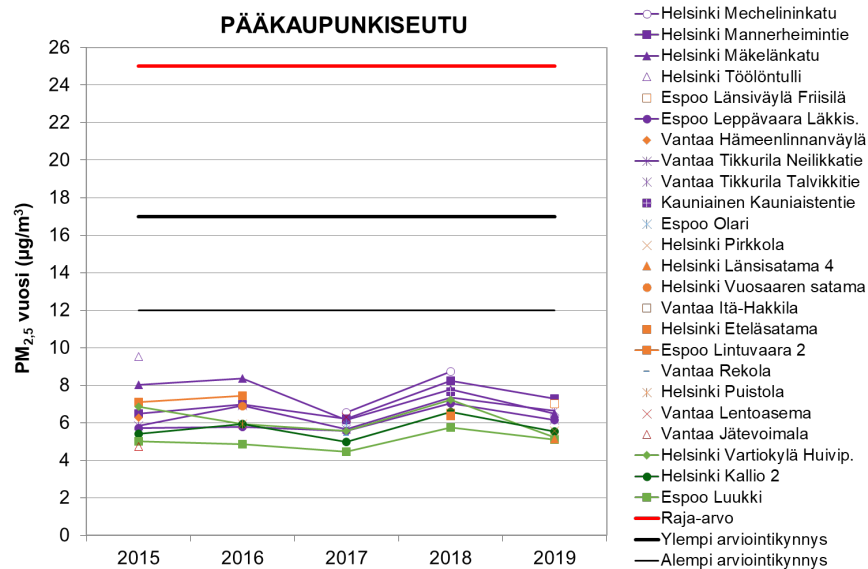


LIITE 1

96

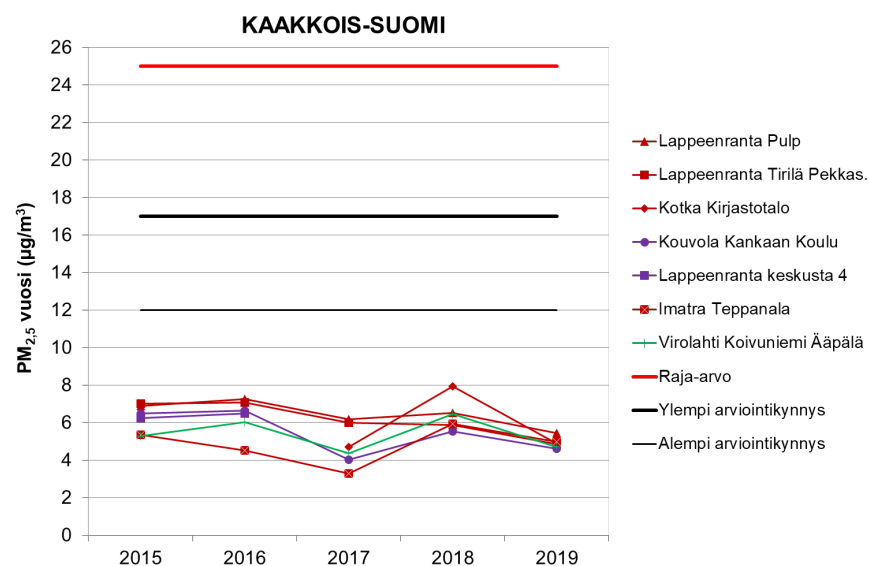
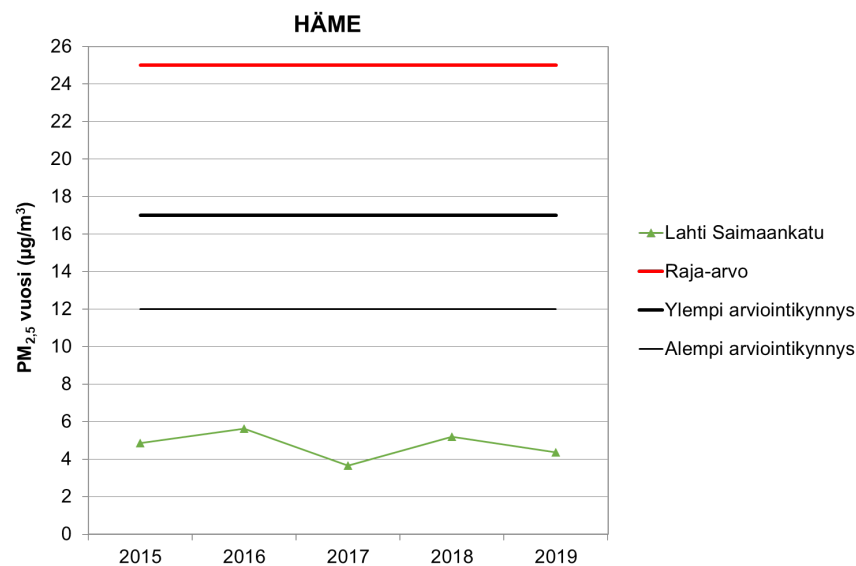
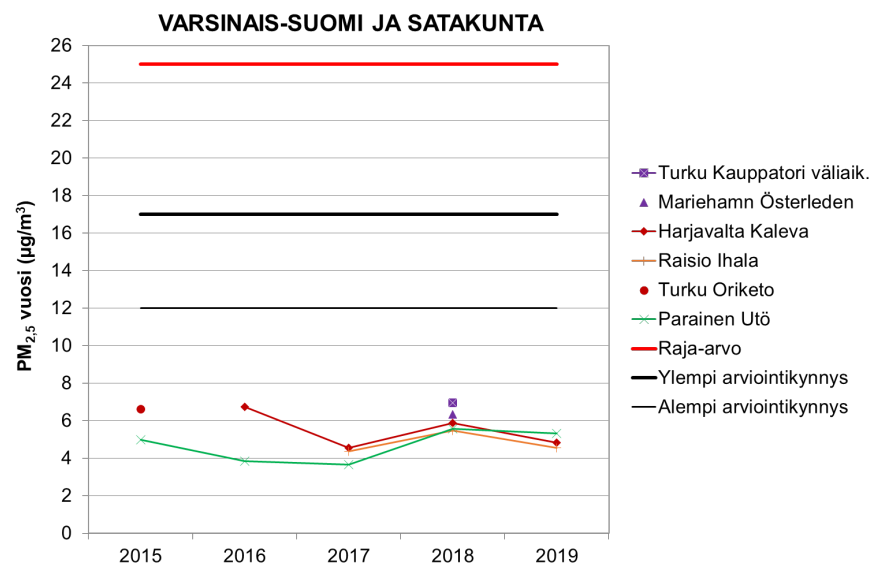


PM_{2,5} vuosipitoisuudet



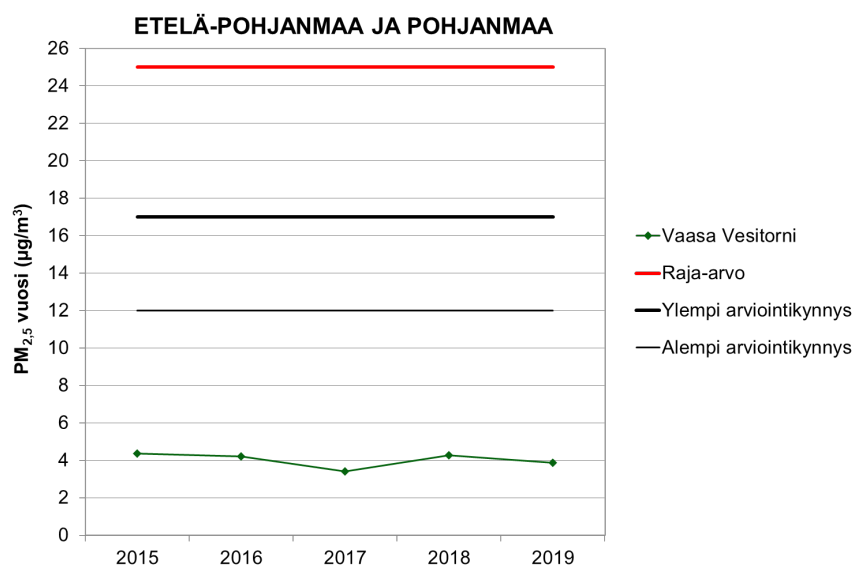
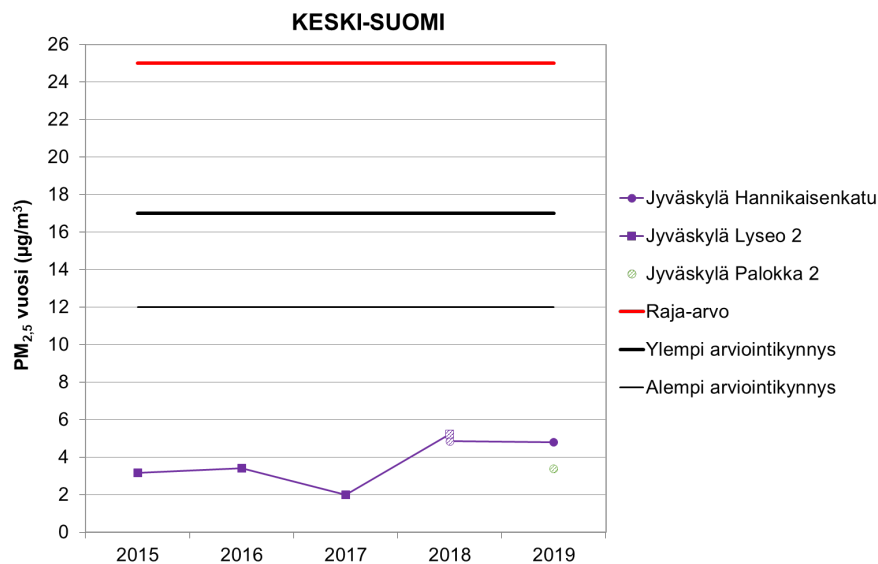
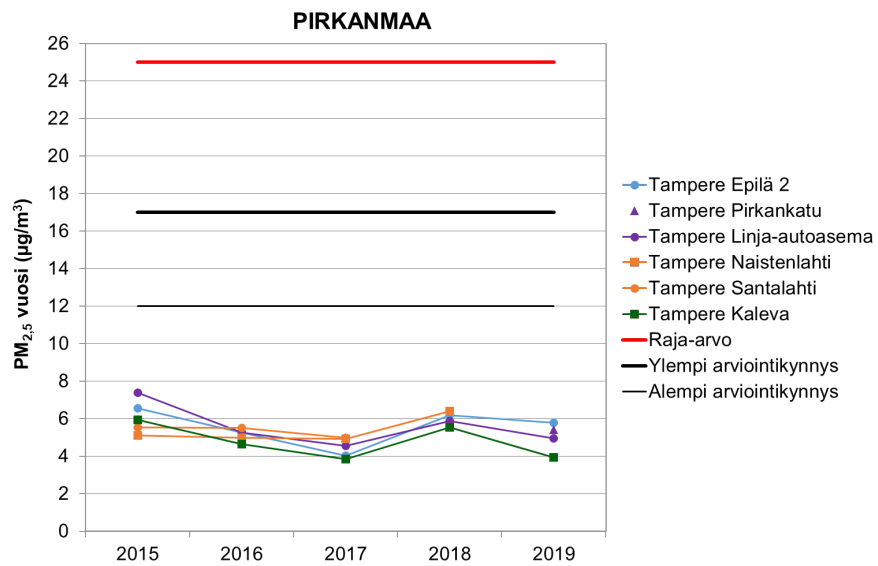
LIITE 1

98

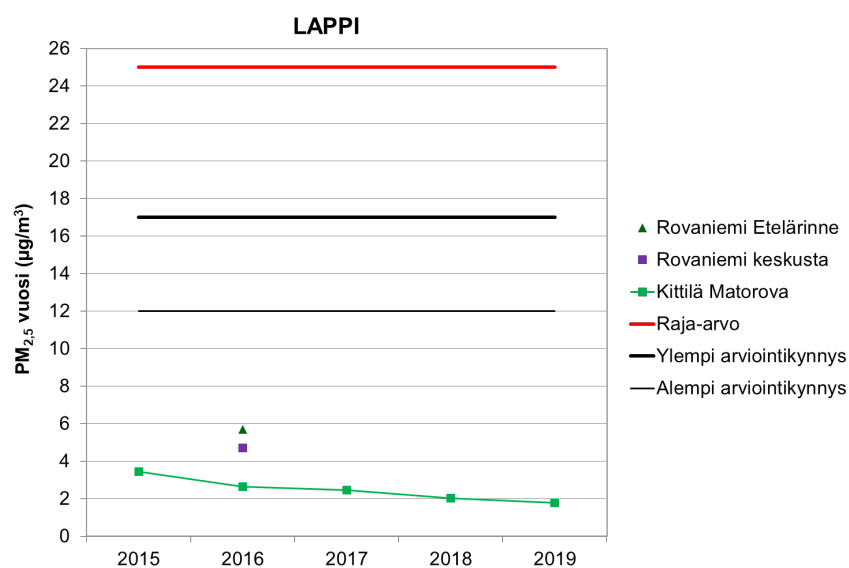
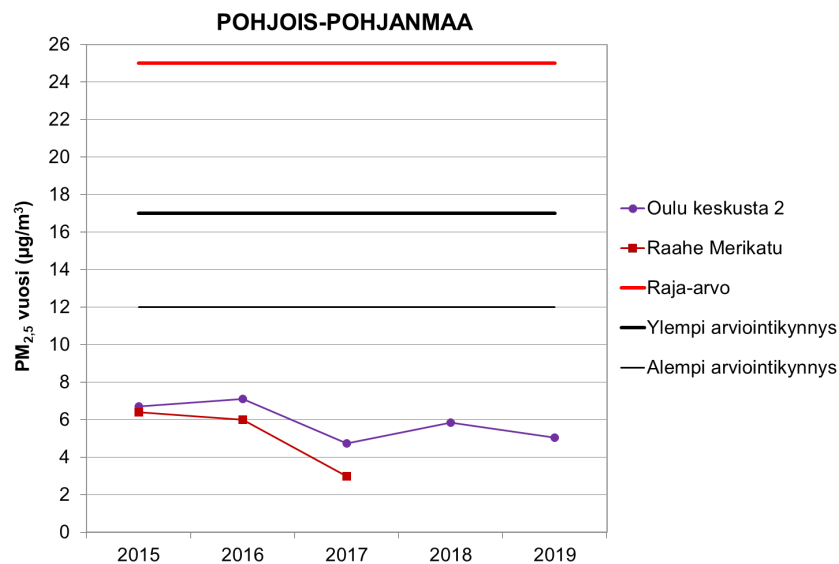
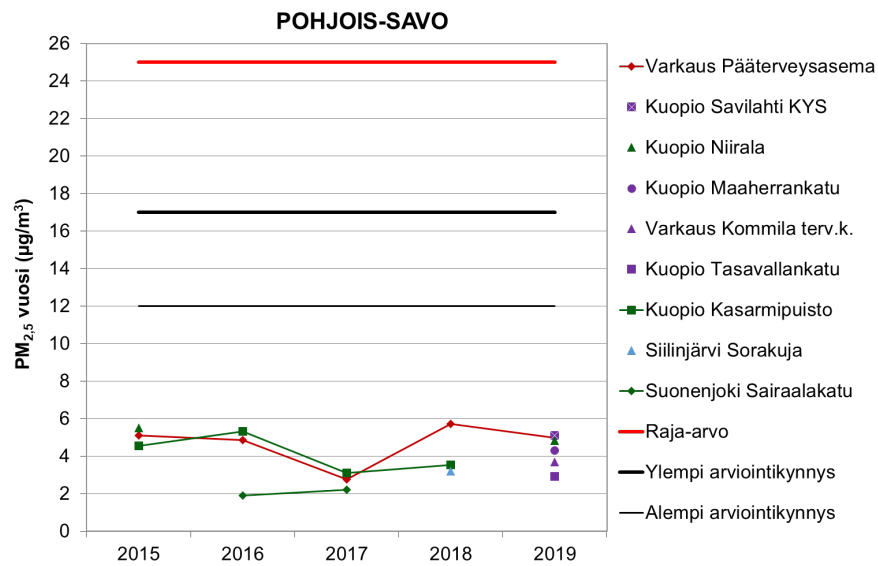


LIITE 1

99

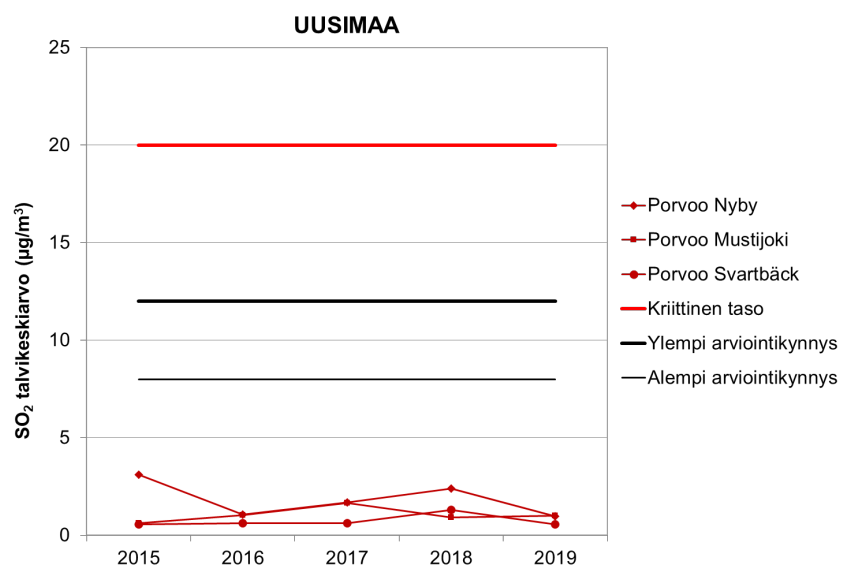
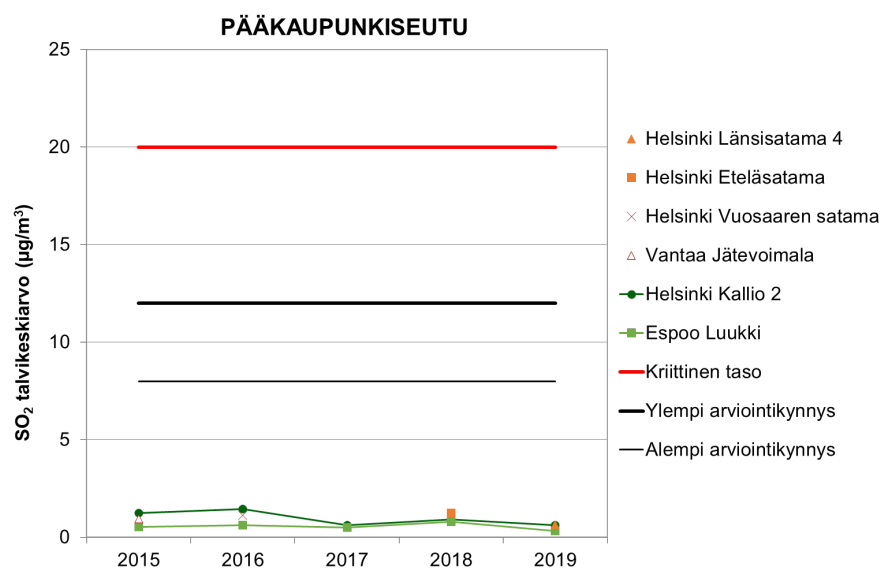


LIITE 1 100

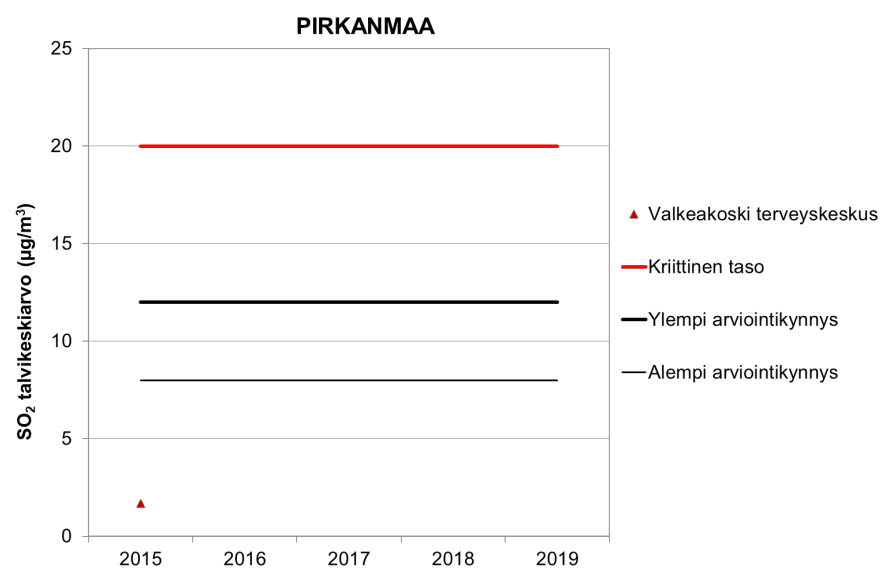
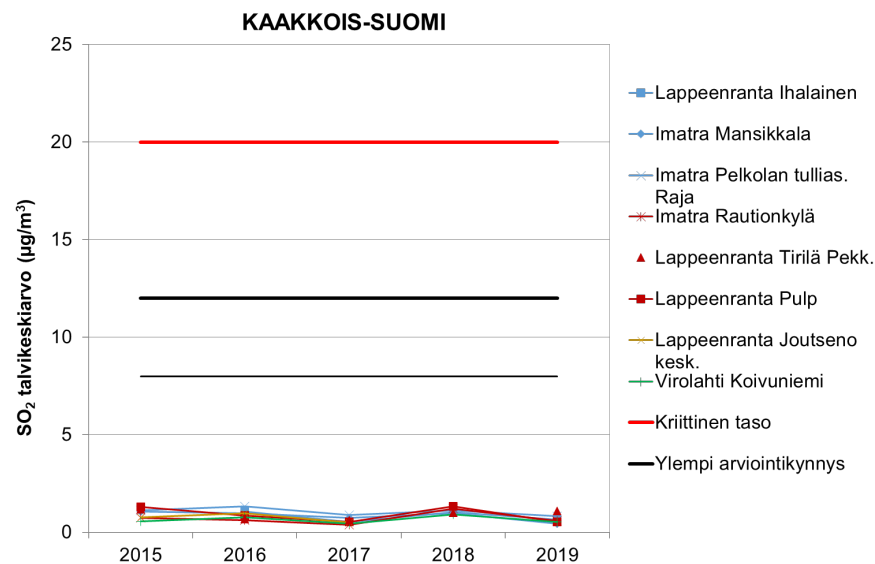
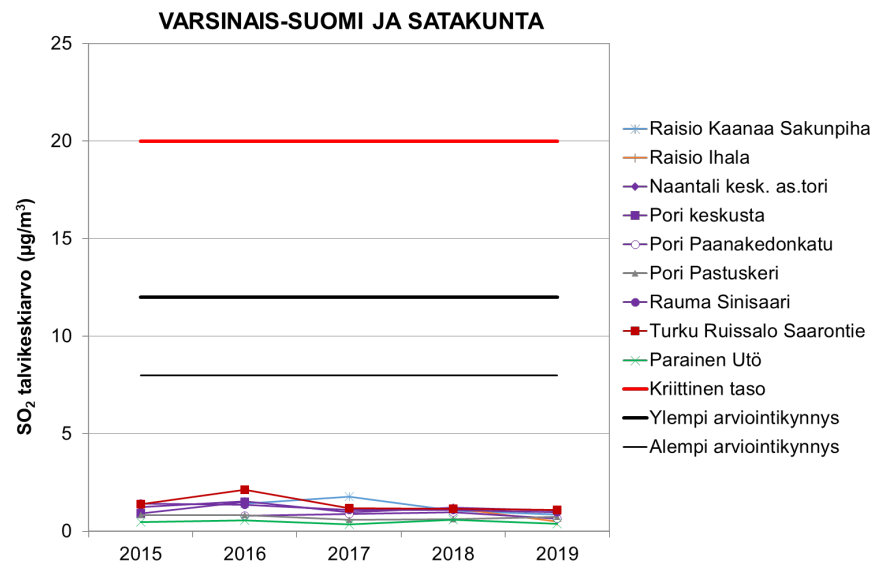


LIITE 1
101

SO₂ talvikausipitoisuudet

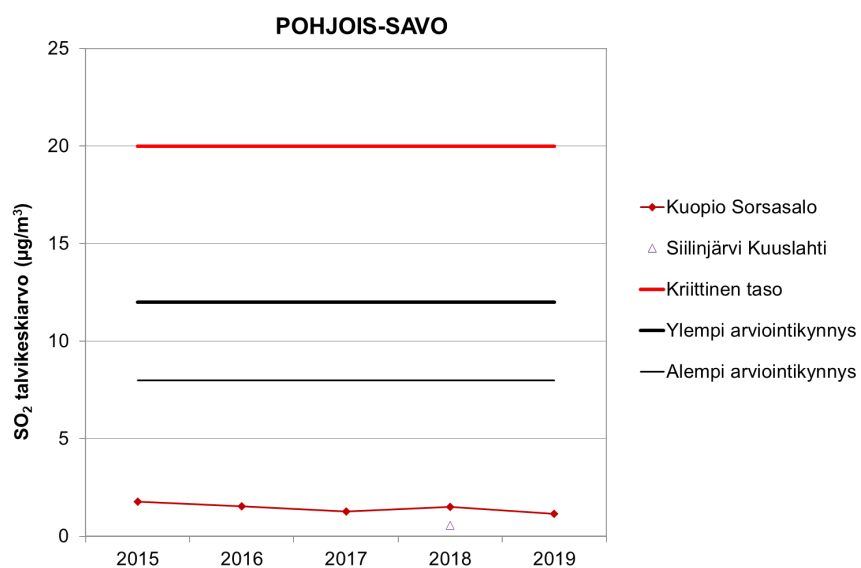
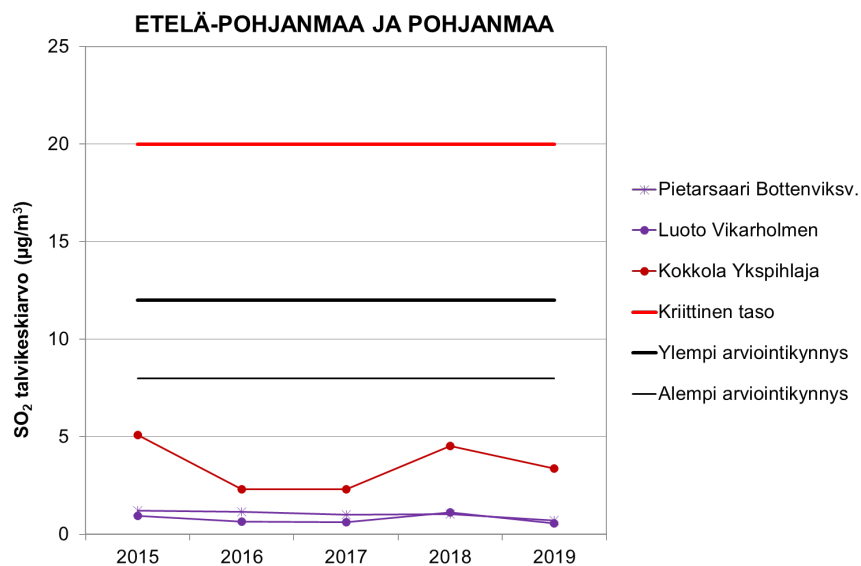
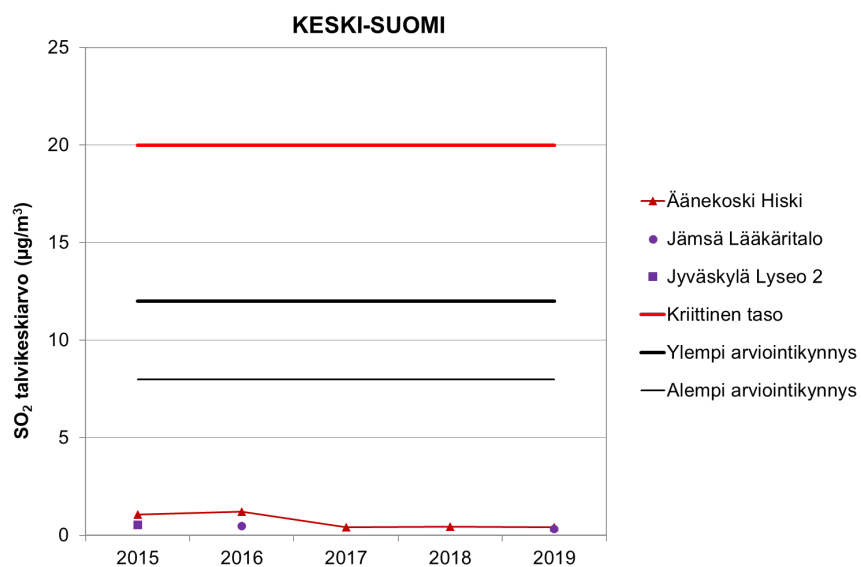


LIITE 1 102

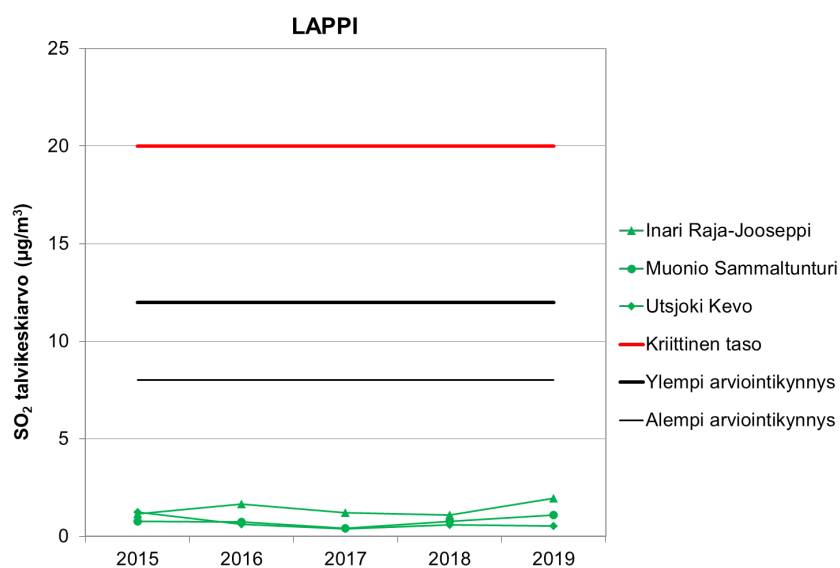
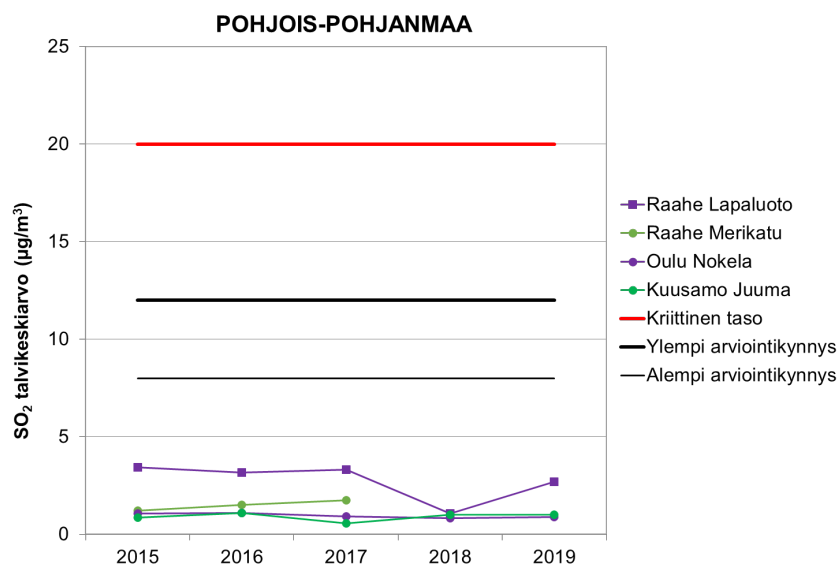
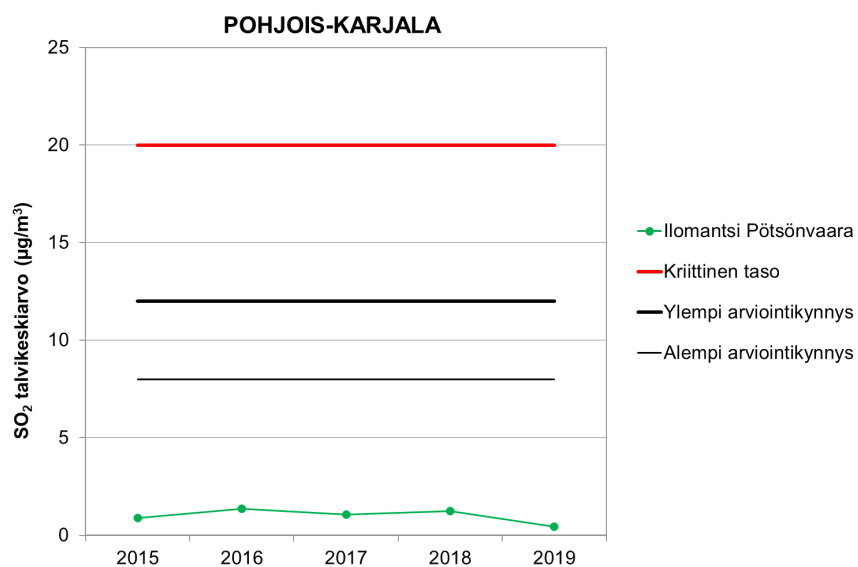


LIITE 1

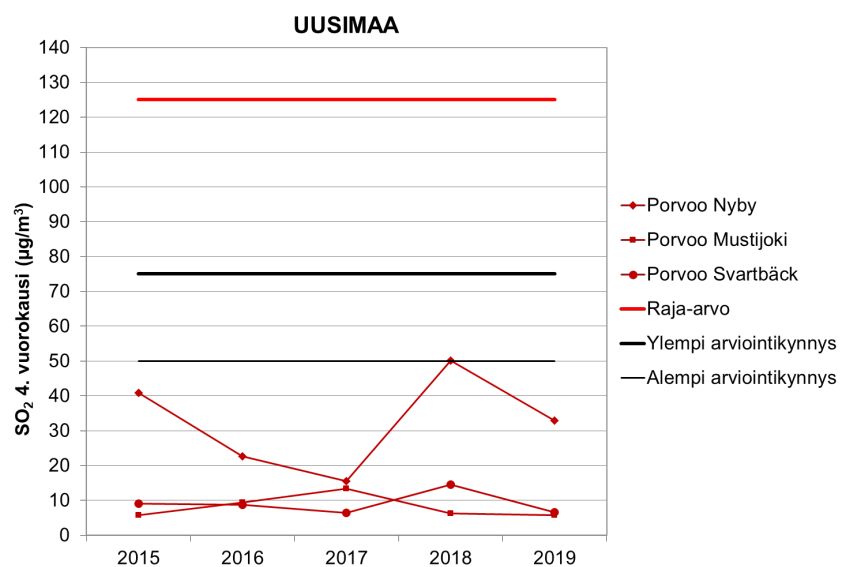
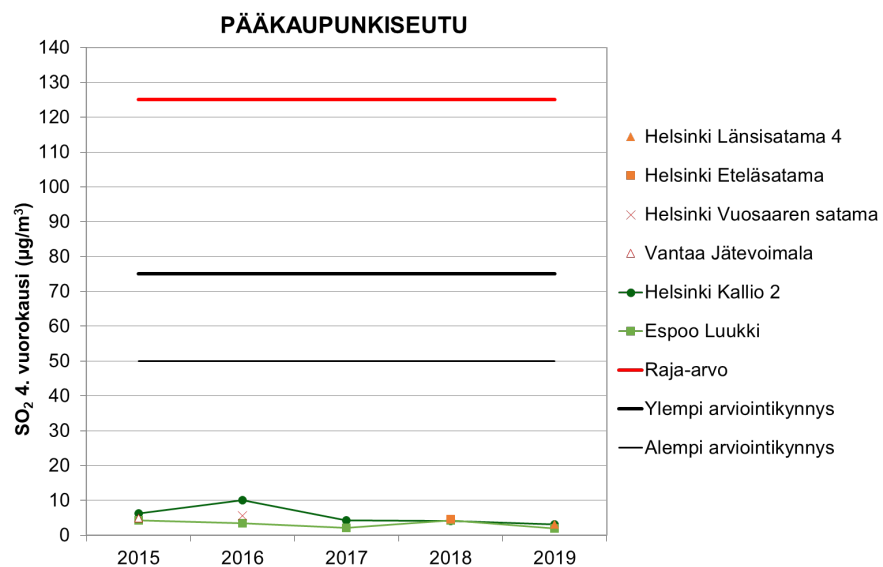
103



LIITE 1 104

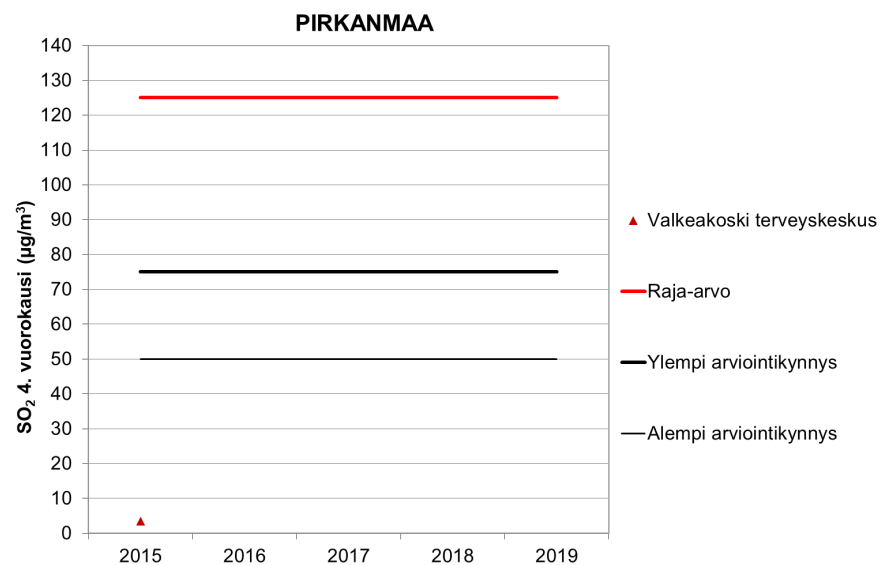
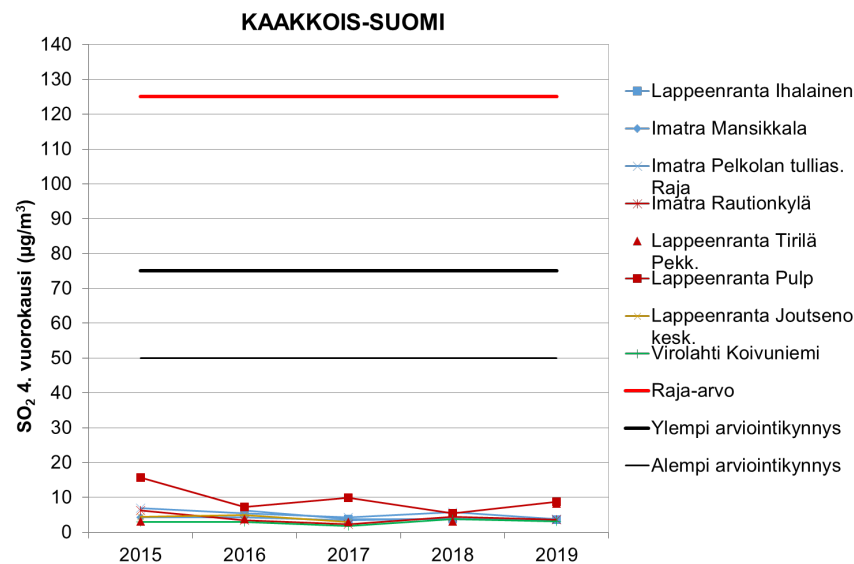
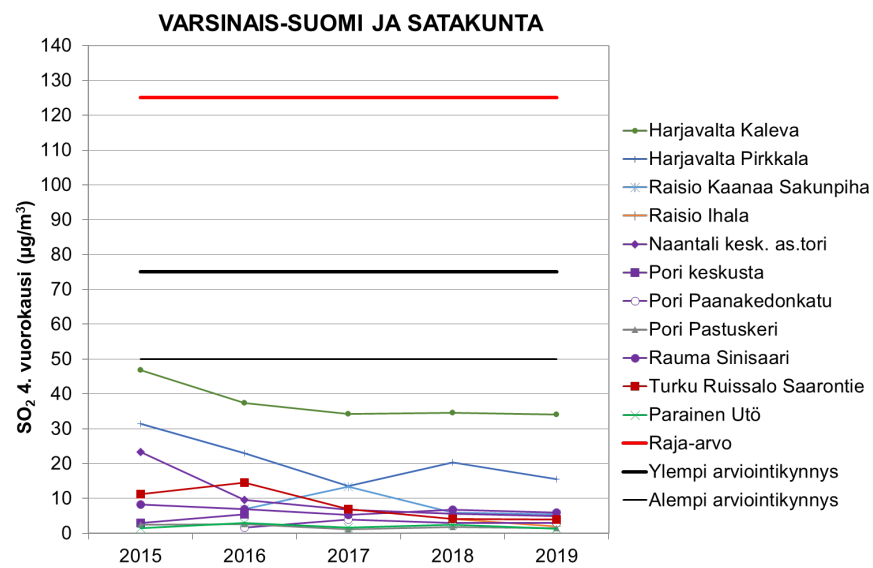


SO₂ vuorokausipitoisuudet

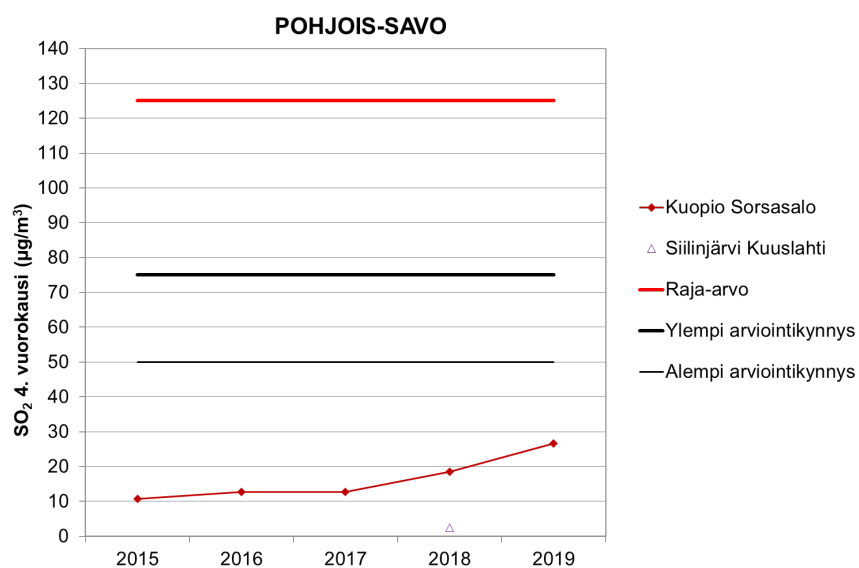
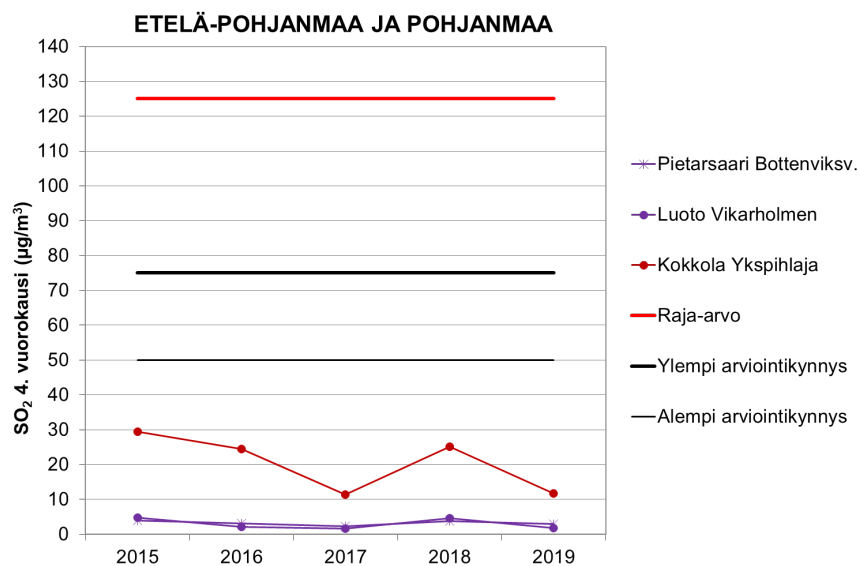
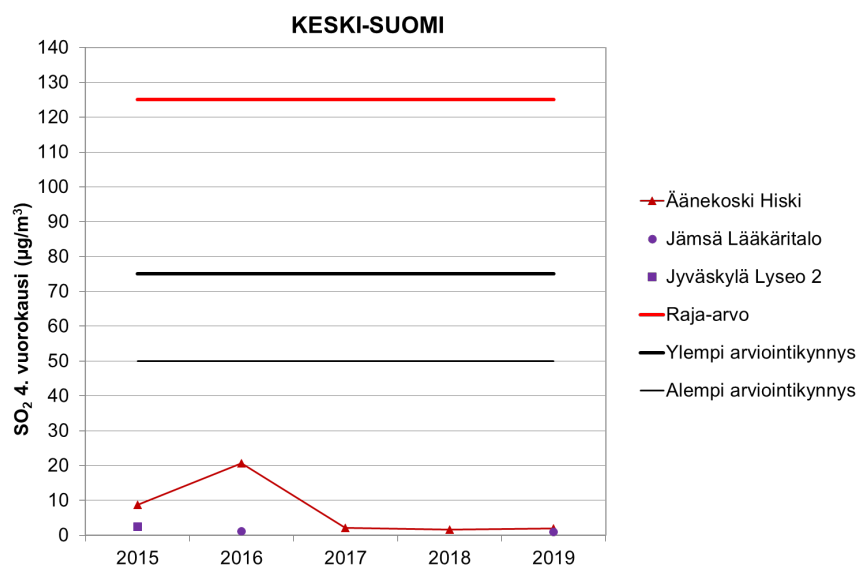


LIITE 1

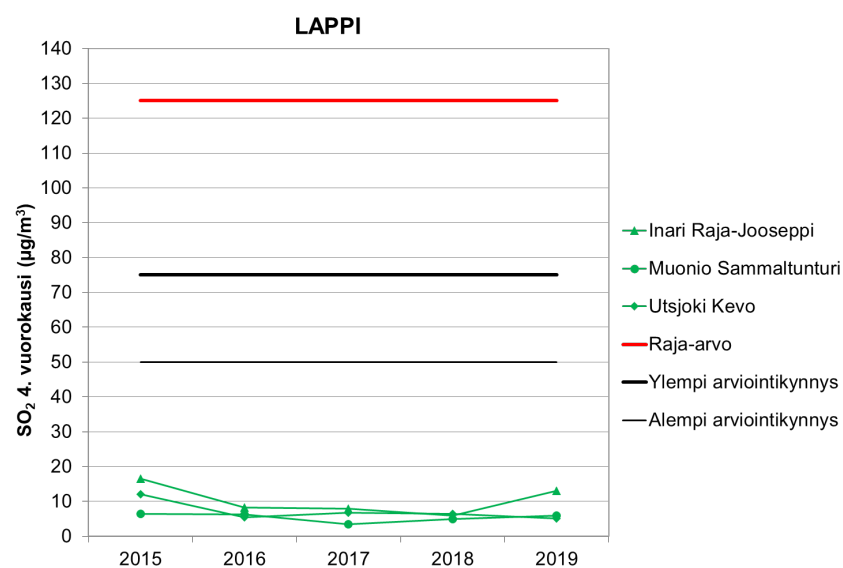
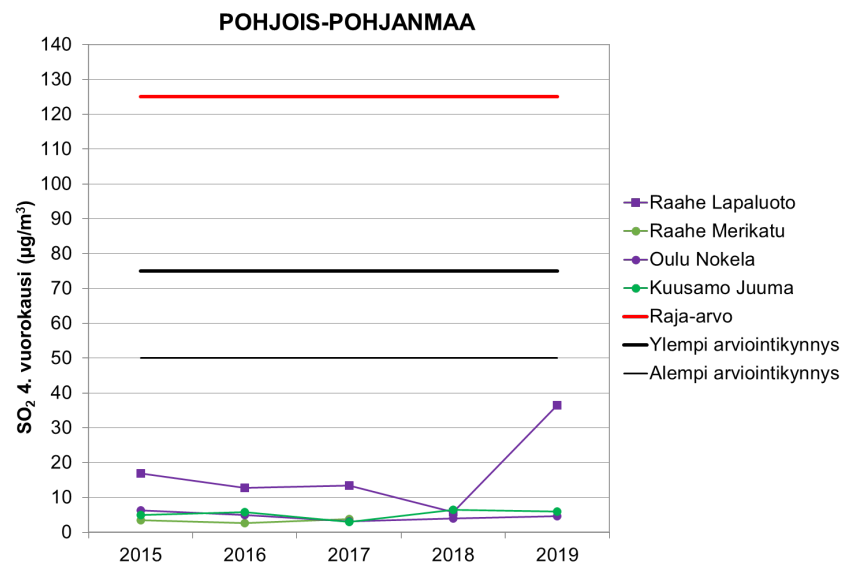
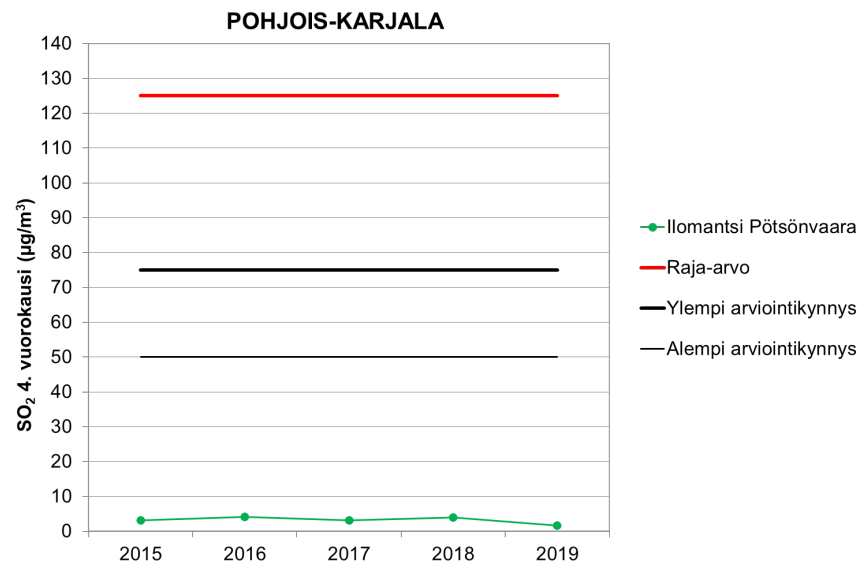
106



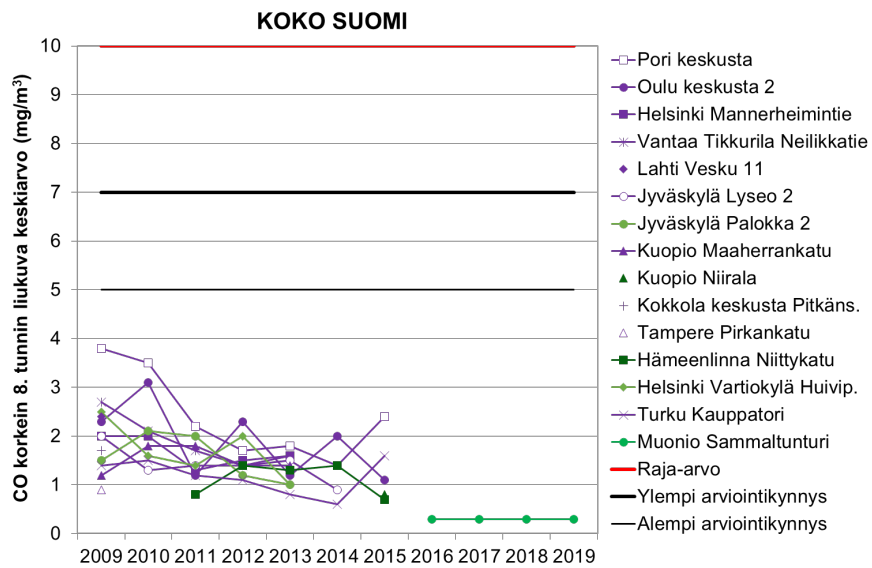
LIITE 1 107



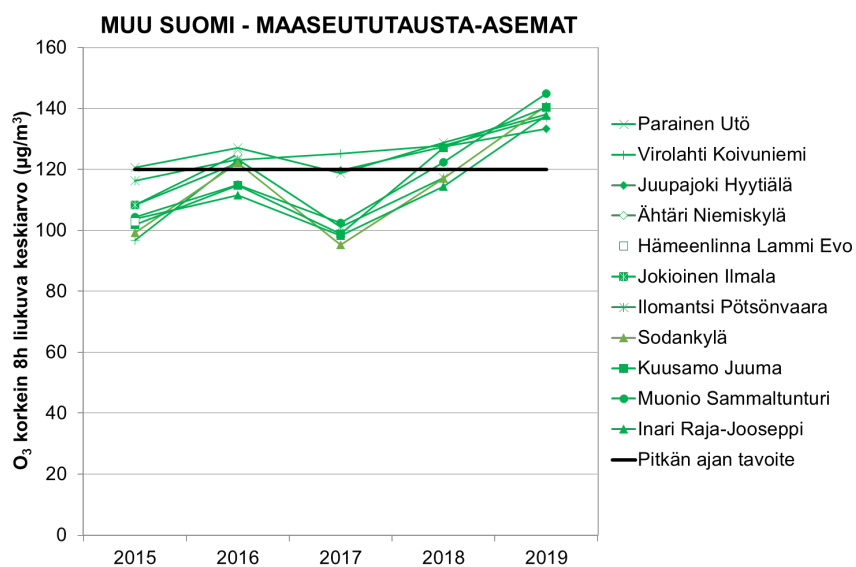
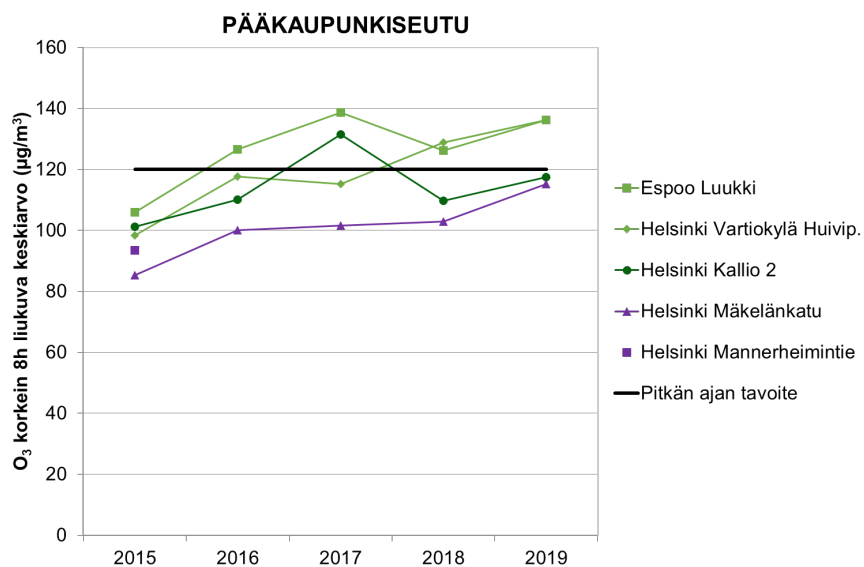
LIITE 1
108



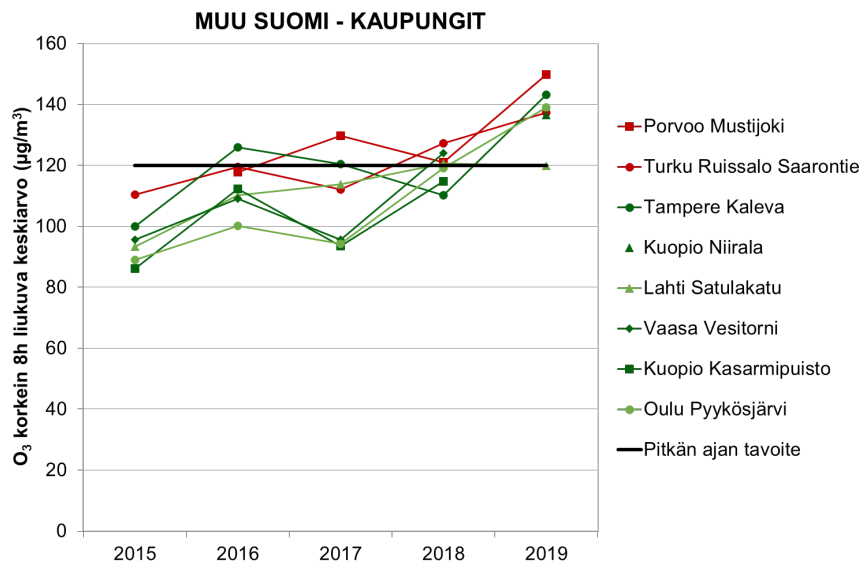
CO 8 tunnin pitoisuudet



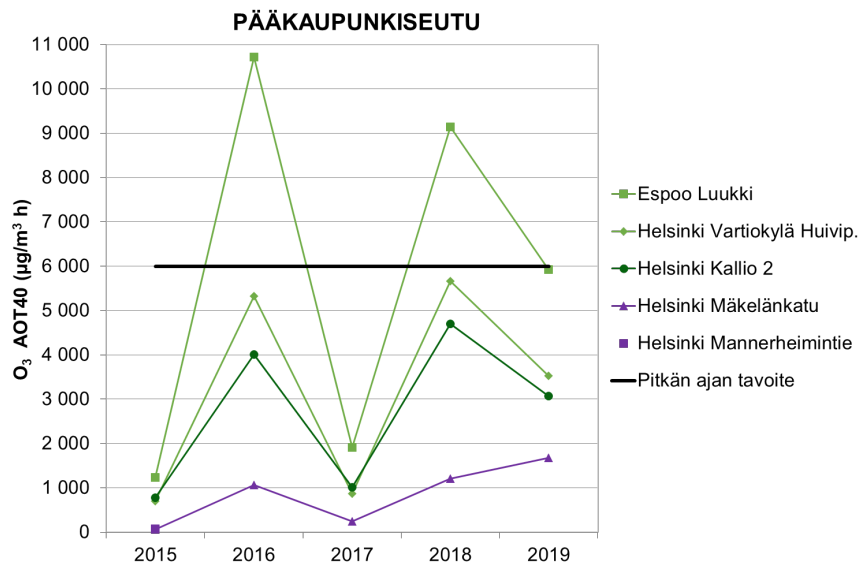
Otsonin 8 tunnin pitoisuudet



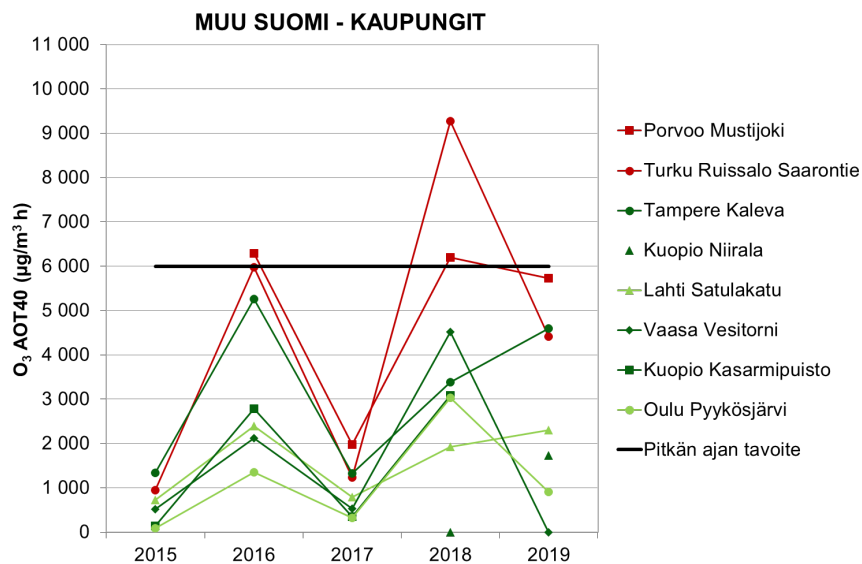
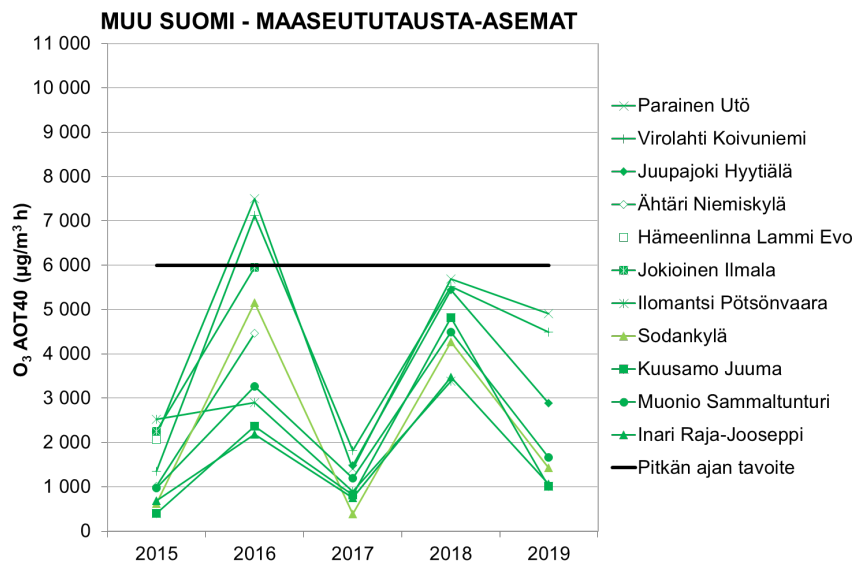
LIITE 1 111



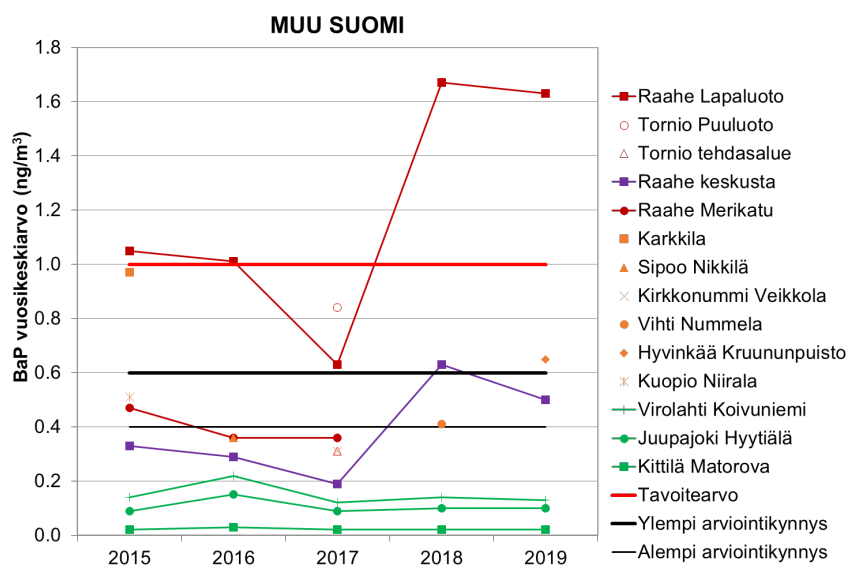
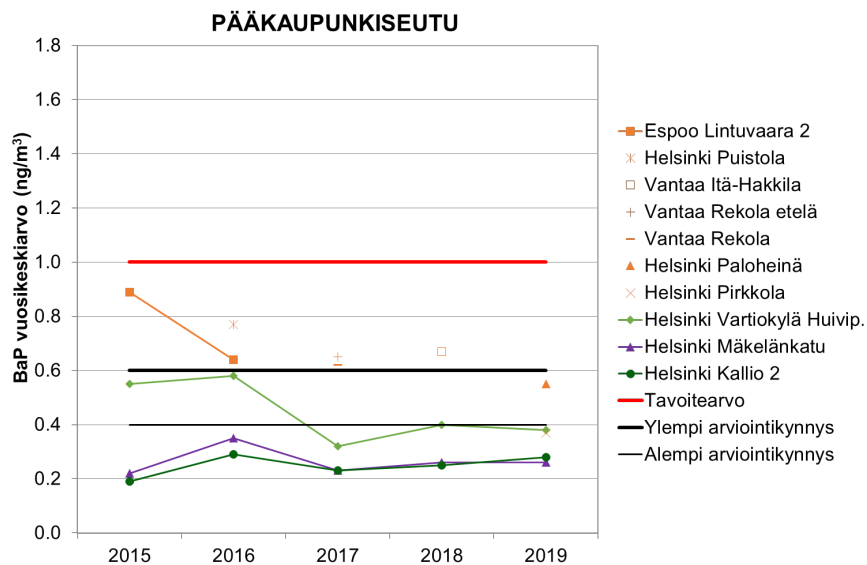
Otsonin AOT40-pitoisuudet



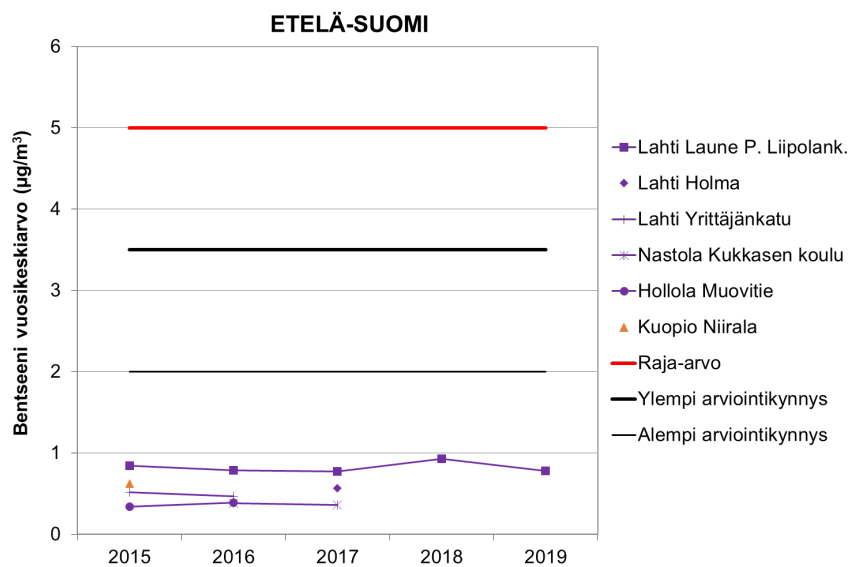
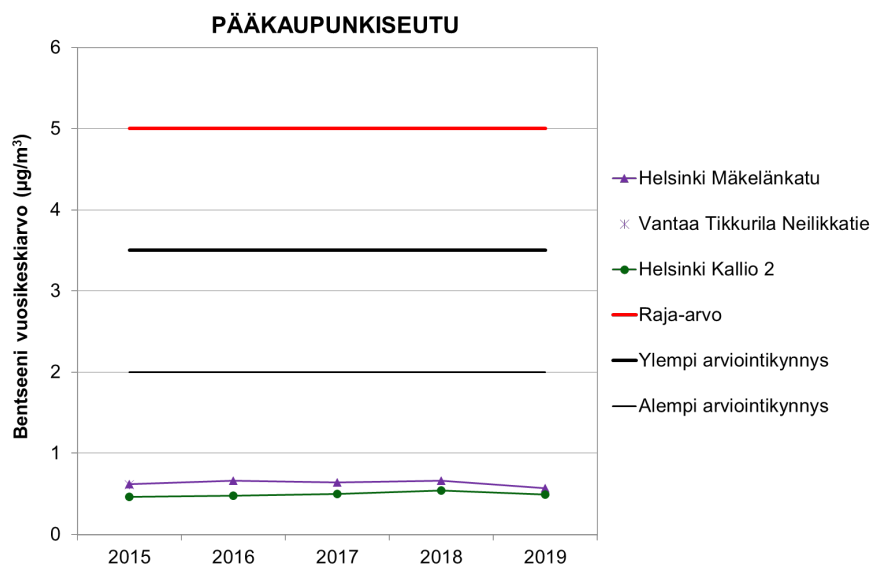
LIITE 1 112



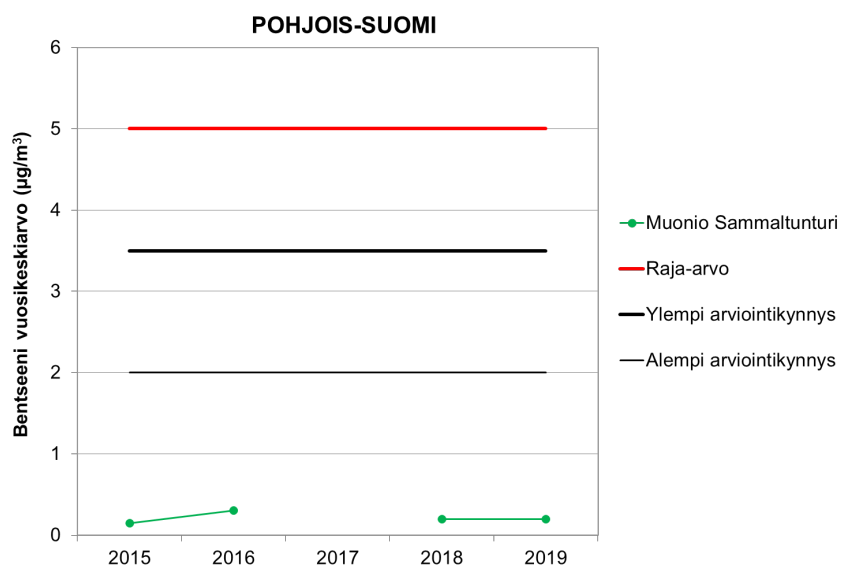
Bentso(a)pyreenin vuosipitoisuudet



Bentseenin vuosipitoisuudet

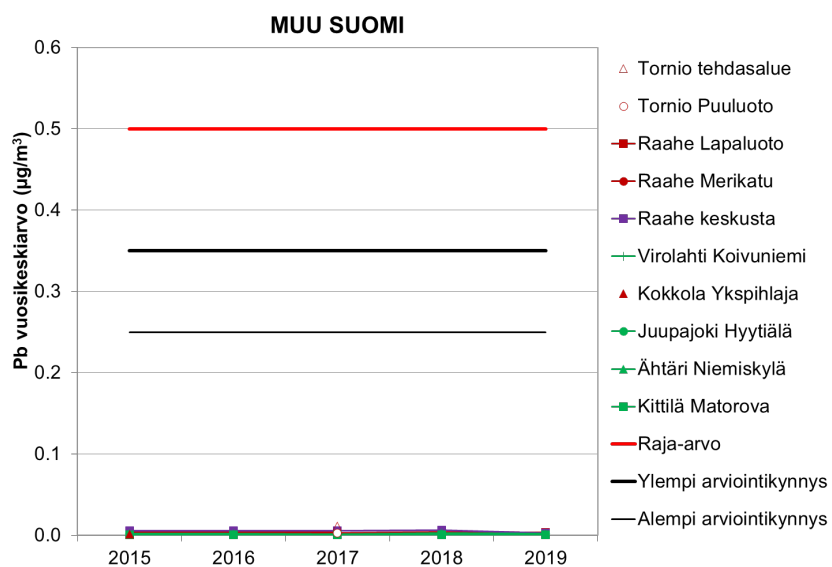
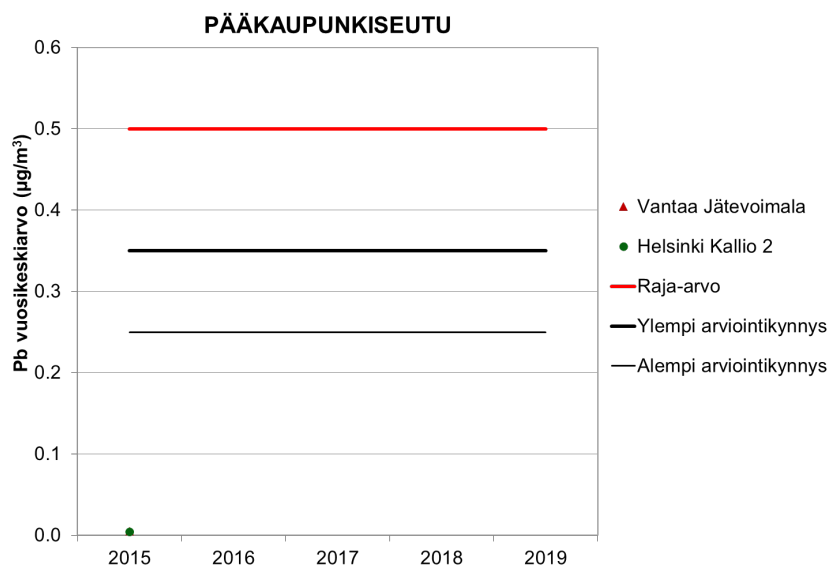


LIITE 1
115

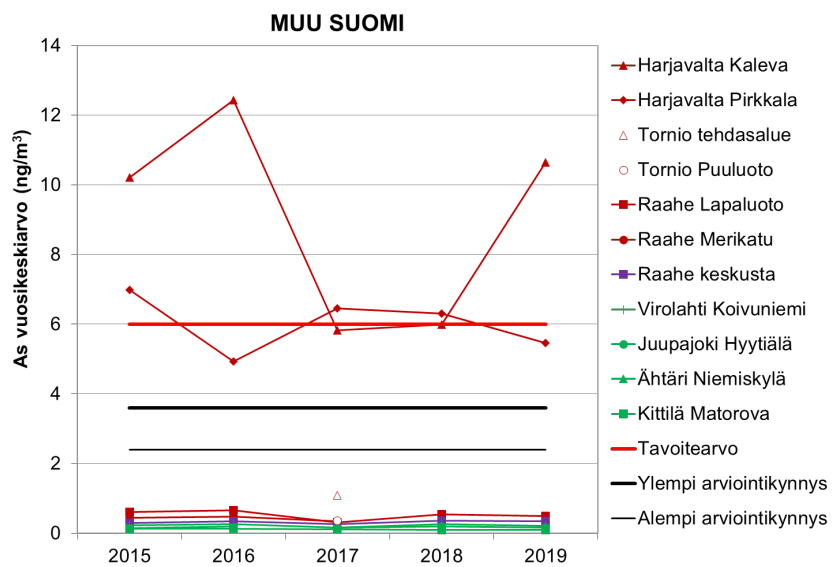
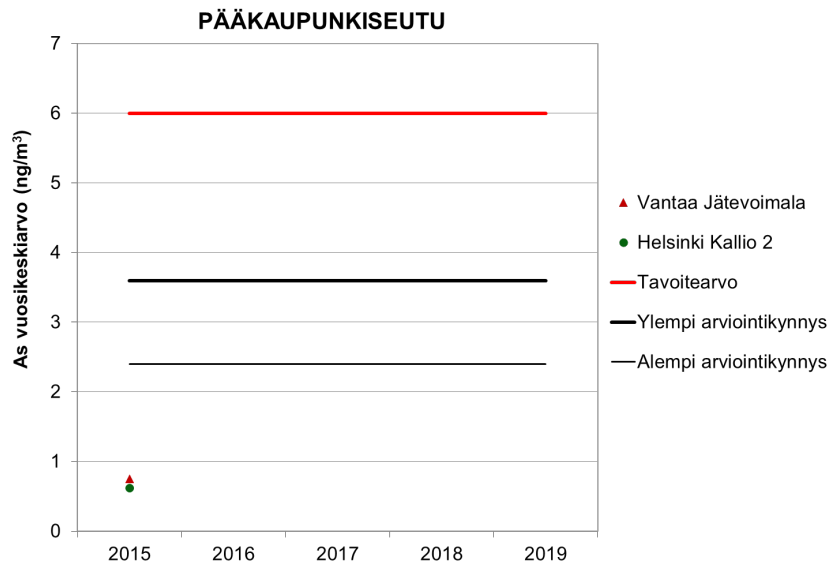


LIITE 1
116

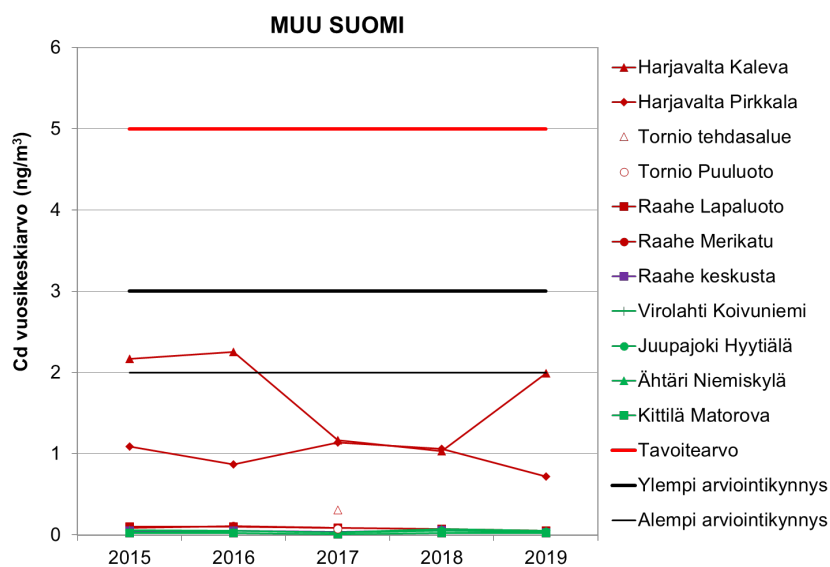
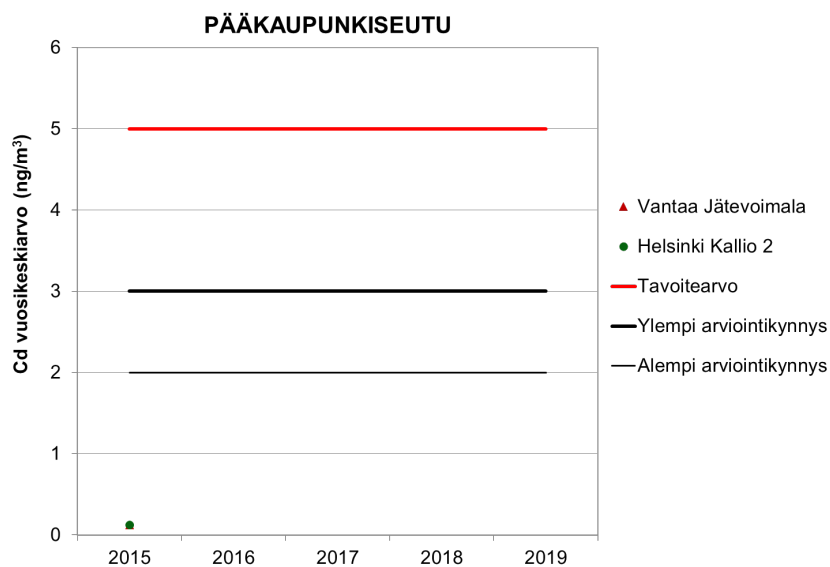
Lyijyn vuosipitoisuudet



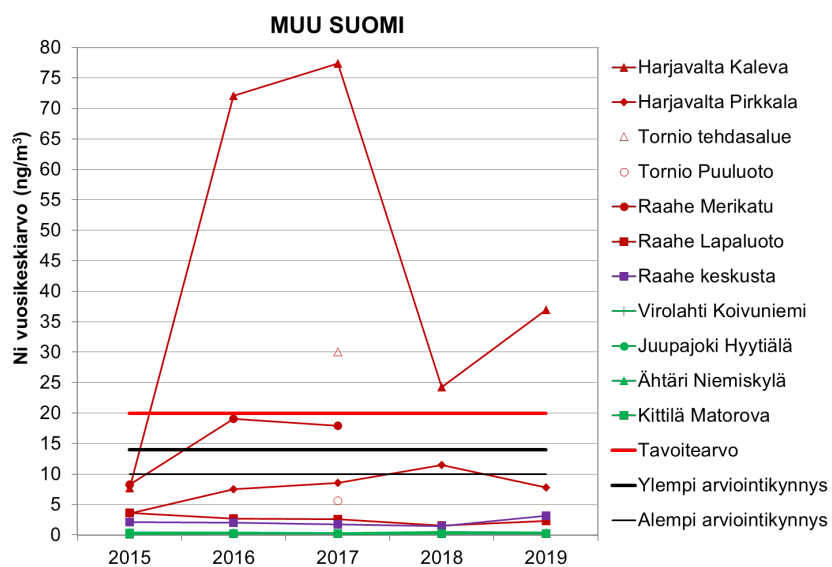
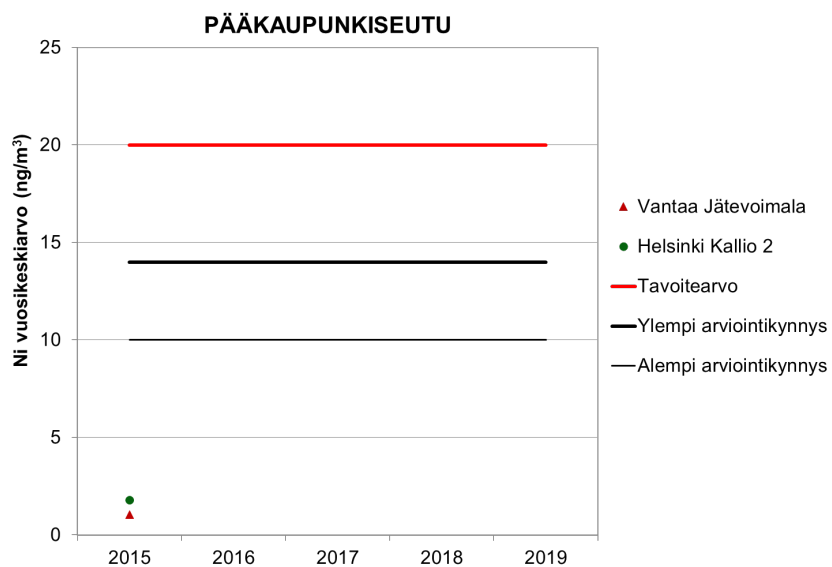
Arseenin vuosipitoisuudet



Kadmiumin vuosipitoisuudet

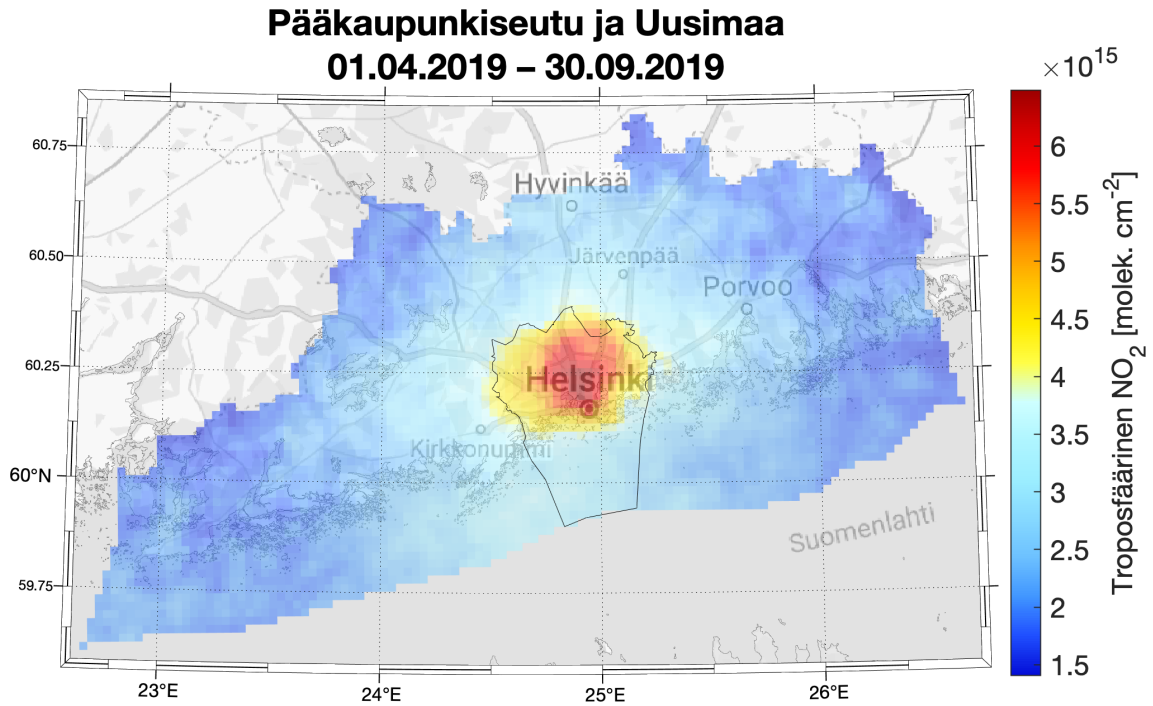


Nikkelin vuosipitoisuudet



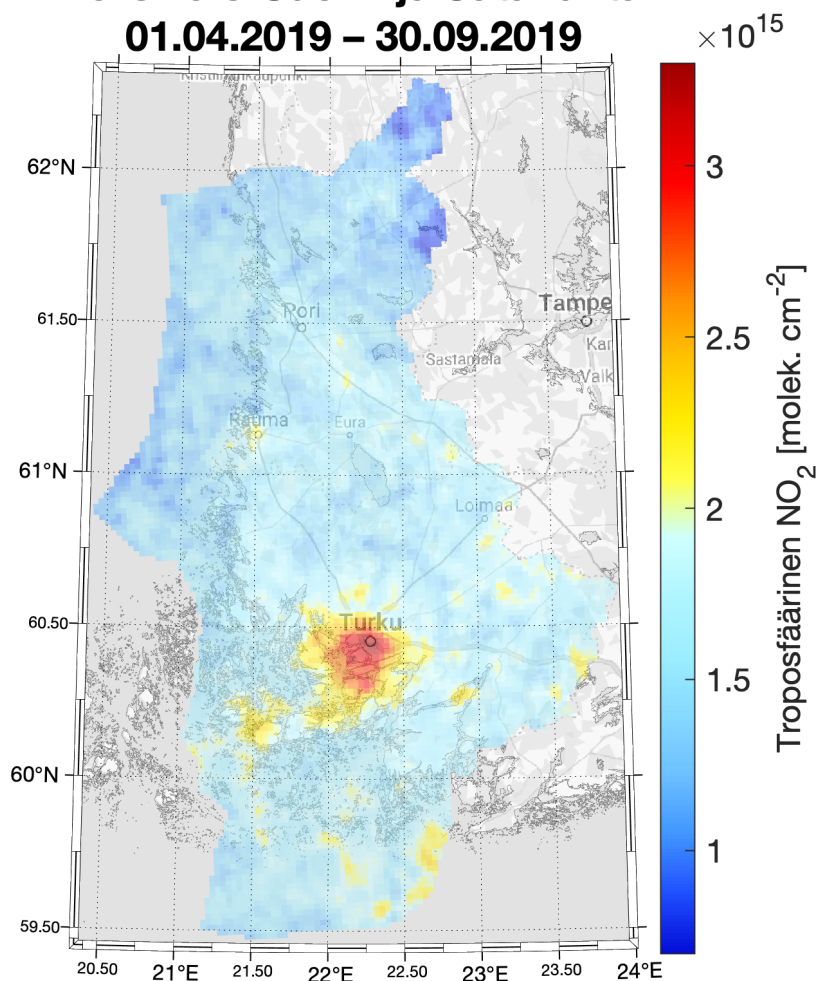
LIITE 2: SATELLIITTIMITTAUSTEN TULOKSET SEURANTA- ALUEILLA

NO₂ satelliittimittaukset

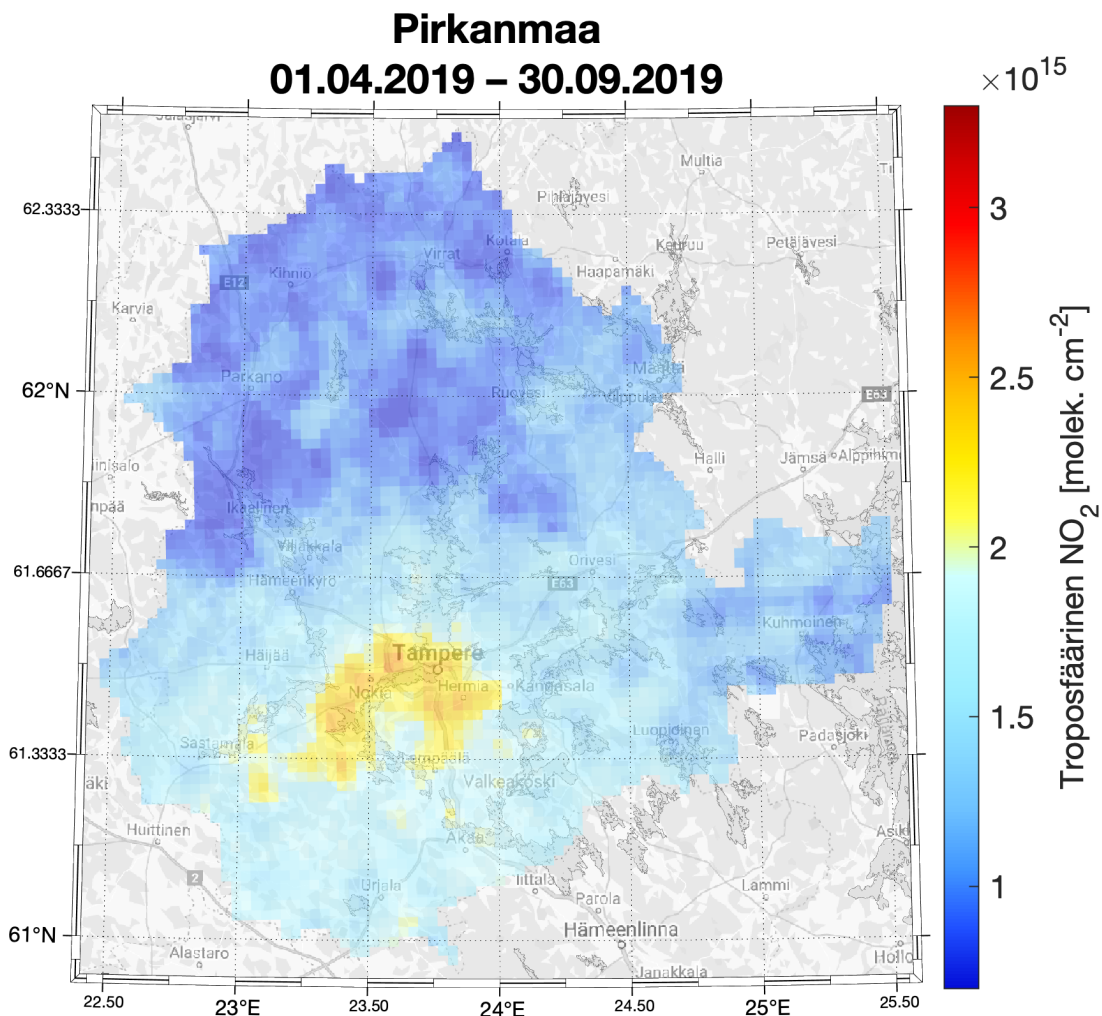


Kuva 51. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Uudenmaan ja pääkaupunkiseudun (rajattu alue) seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.

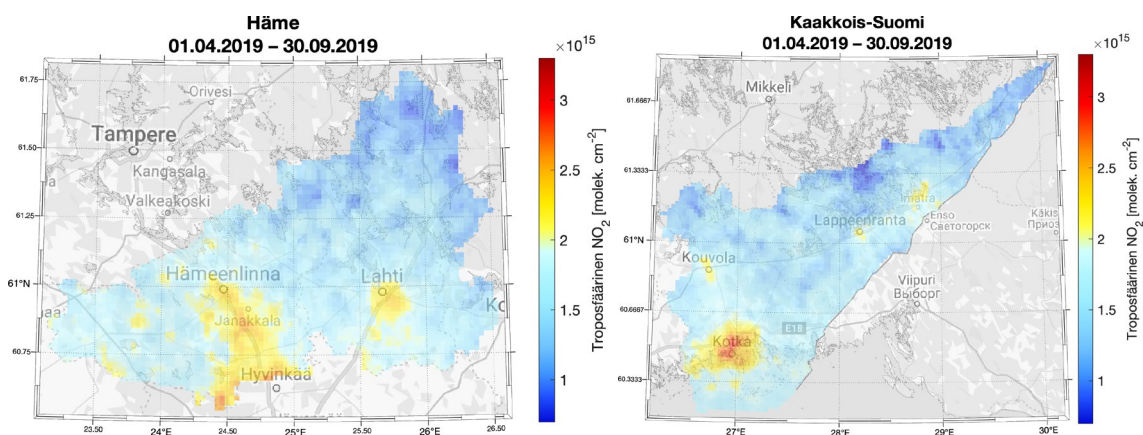
Varsinais-Suomi ja Satakunta
01.04.2019 – 30.09.2019



Kuva 52. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Varsinais-Suomen ja Satakunnan seuranta-alueella. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.

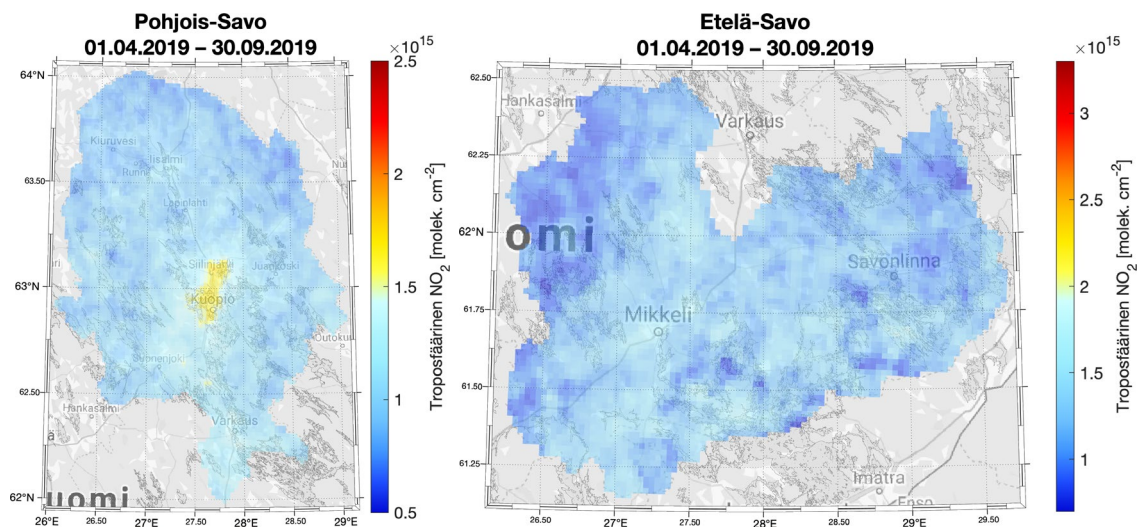


Kuva 53. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Pirkanmaan seuranta-alueella. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.

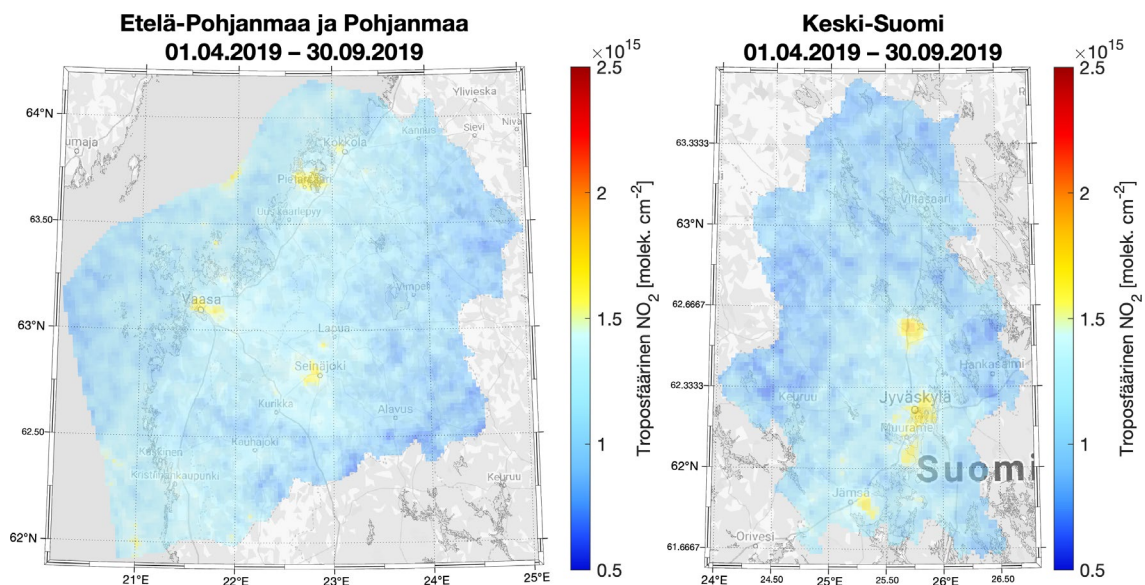


Kuva 54. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Hämeen ja Kaakkois-Suomen seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.

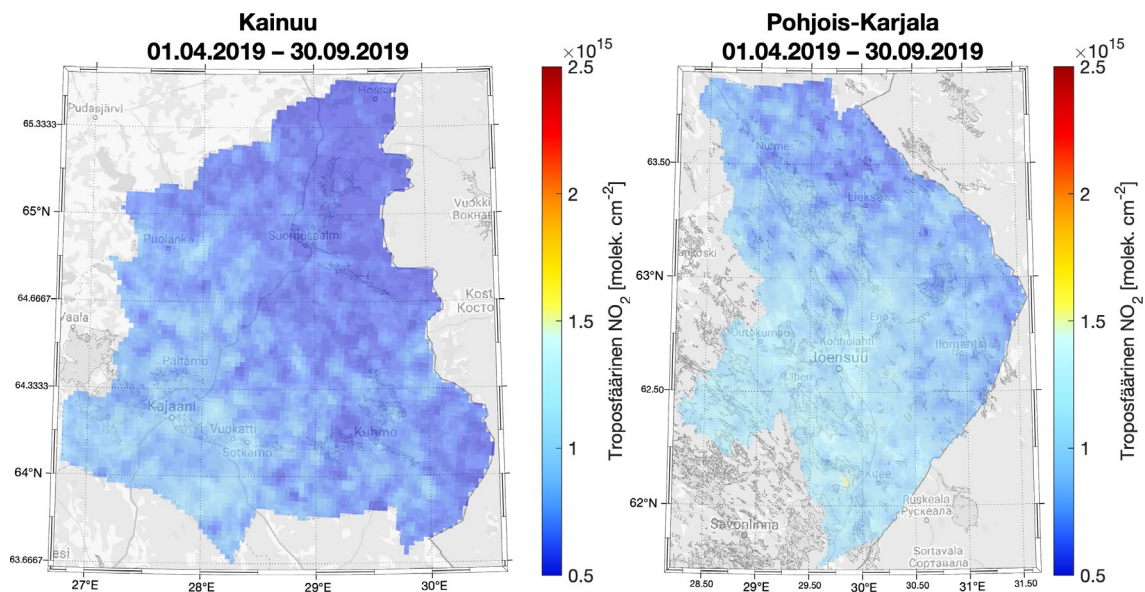
LIITE 1
123



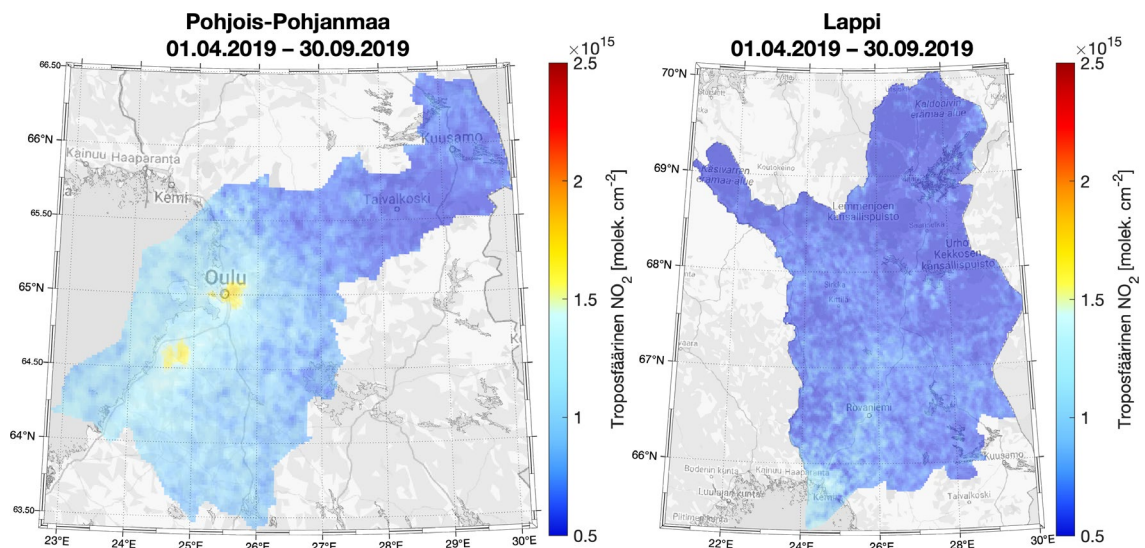
Kuva 55. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Pohjois- ja Etelä-Savon seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.



Kuva 56. NO₂:n keskimääräinen pitoisuus Etelä-Pohjanmaan ja Pohjanmaan sekä Keski-Suomen seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.



Kuva 57. NO_2 :n keskimääräinen pitoisuus Kainuun ja Pohjois-Karjalan seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.



Kuva 58. NO_2 :n keskimääräinen pitoisuus Pohjois-Pohjanmaan ja Lapin seuranta-alueilla. Pitoisuudet ovat samat kuin kuvassa 23, mutta väriskaalan rajoja on muutettu.



ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

Erik Palménin aukio 1

P.O. Box 503

FI-00560 HELSINKI

tel. +358 29 539 1000

WWW.FMI.FI

FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

REPORTS 2021:6

ISSN 0782-6079

ISBN 978-952-336-140-9 (pdf)

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523361409>

Helsinki 2021

