

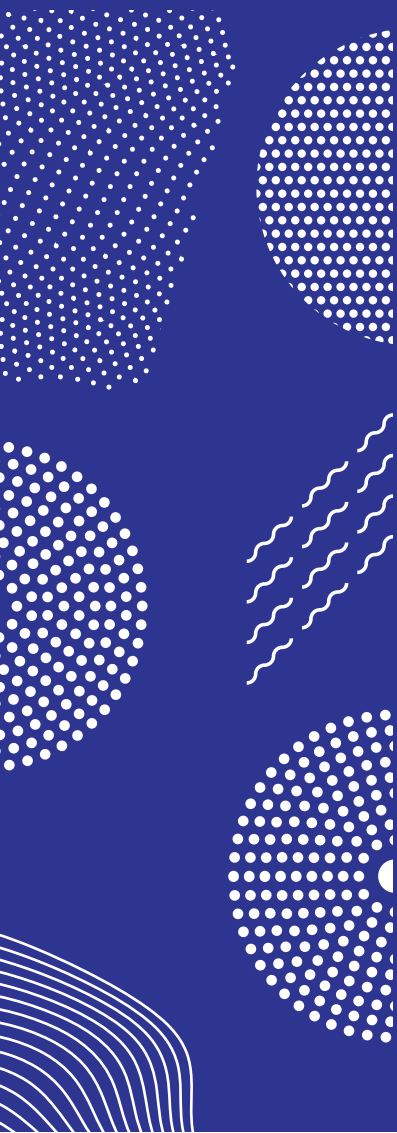


ILMATIETEEN LAITOS
METEOROLOGISKA INSTITUTET
FINNISH METEOROLOGICAL INSTITUTE

RAPORTEJA
RAPPORTER
REPORTS
2020:1

SATELLIITTIHAVAINTOJEN HYÖDYNTÄMINEN ILMANLAADUN SEURANNASSA

ANU-MAIJA SUNDSTRÖM
HENRIK VIRTA
IOLANDA IALONGO
JOHANNA TAMMINEN





Julkaisija	Ilmatieteen laitos (Erik Palménin aukio 1) PL 503, 00101 Helsinki	Julkaisun sarja, numero ja raporttikoodi Raportteja 2020:1 Päiväys 27.1.2020
------------	--	---

Tekijä(t)	Toimeksiantaja
Anu-Maija Sundström, Henrik Virta, Iolanda Ialongo, ja Johanna Tamminen	Ympäristöministeriö

Nimeke

Satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa

Tiivistelmä

Tässä selvityksessä kartoitetaan ensimmäistä kertaa satelliittimittausten hyödyntämistä ilmanlaadun seurannassa Suomessa. Satelliittien ehdottomana vahvuutena on ilmanlaatumuuttujien alueellisen jakauman kuvaaminen sekä ilmansaasteiden kulkeutumisen seuranta, joita tässä työssä on demonstroitu käyttämällä alailmakehän typpidioksidin (NO_2)-havaintoja TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) ja Ozone Monitoring Instrument (OMI) satelliitti-instrumenteista. 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 NASAn Aura-satelliitissa on puolestaan tuottanut maailmanlaajuisia havaintoja jo lähes 15 vuoden ajan.

Tämän työn tulokset näyttävät, että satelliittien avulla voidaan tarkastella typpidioksidin alueellista jakaumaa Suomessa sekä lähialueilla aina kaupunkitasolle asti. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun keskimääräisissä pitoisuuksissa voidaan erottaa alueellisia vaihteluita ja nähdä selvä ero viikonpäivien ja viikonloppujen välillä. OMI-instrumentin havainnoista puolestaan nähdään, että alailmakehän NO_2 -pitoisuudet ovat keskimäärin laskeneet koko maassa vuodesta 2005 vuoteen 2018.

Keskeisimpiä kysymyksiä satelliittidatan hyödyntämisessä ilmanlaadun seurannassa on se, kuinka hyvin satelliittihavainnot vastaavat *in situ* mittauksista nähtyjä vaihteluita. Vertailu TROPOMI-havaintojen ja pintamittausten välillä näyttää, että vaikka kaupungin sisällä yksittäisten asemien kohdalla yhteensopivuus voi vaihdella asemittain, korrelaatio on hyvä kun vastaavuutta tarkastellaan yhdistämällä kunkin kaupungin keskustan pintahavainnot. Tulos on samansuuntainen sekä Suomessa että myös muualla Euroopassa.

Julkaisijayksikkö

Kaukokartoitustutkimus

Luokitus (UDK)

502.3, 613.15, 528.88

Asiasanat

Satelliitit, ilmanlaatu, ilmanlaadun seuranta

ISSN ja avainnimeke

0782-6079 Raportteja - Rapporter – Reports

ISBN

978-952-336-098-3

DOI

<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523360983>

Kieli

Suomi

Sivumäärä

52

Sisällysluettelo

Tiivistelmä	2
1 Johdanto	3
2 Satelliittimittausten historiaa	4
3 Satelliittihavaintojen peruseriaatteet	7
3.1 Satelliittidatan keskiarvoistaminen	8
4 Satelliittihavainnoista määritetty troposfäärin typpidioksidin alueellinen jakauma	9
4.1 Suomi	12
4.2 Lähialueet	16
4.3 Pääkaupunkiseutu	18
4.3.1 Tuulten vaikutus	21
5 Troposfäärin typpidioksidin pitkäaikainen vaihtelu Suomessa ja lähialueilla	23
6 Satelliittihavaintojen vertailu maa-asemien havaintoihin	24
6.1 Satelliitti- ja maanpintainstrumenttien erot	25
6.2 Helsinki ja pääkaupunkiseutu	25
6.3 Suomi	32
6.4 Eurooppa	35
6.5 Referenssi-instrumentti Pandora	37
6.5.1 Vertailun tulokset	37
7 Muut ilmanlaadun satelliittimittaukset	41
8 Yhteenveto	45
Liite 1: Satelliittimittausten periaate	47
Lähdeluettelo	50

Tiivistelmä

Tässä selvityksessä kartoitetaan ensimmäistä kertaa satelliittimittausten hyödyntämistä ilmanlaadun seurannassa Suomessa. Satelliittien ehdottomana vahvuutena on ilmanlaatumuuttujien alueellisen jakauman kuvaaminen sekä ilmansaasteiden kulkeutumisen seuranta, joita on demonstroitu käyttämällä pääasiassa alailmakehän typpidioksidi (NO_2)-havaintoja TROPOspheric Monitoring Instrument- (TROPOMI) ja Ozone Monitoring Instrument (OMI) -satelliitti-instrumenteista. 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 NASAn Aura-satelliitissa on puolestaan tuottanut maailmanlaajuisia havaintoja jo lähes 15 vuoden ajan.

Tämän työn tulokset näyttävät, että satelliittien avulla voidaan tarkastella typpidioksidin alueellista jakaumaa Suomessa sekä lähialueilla aina kaupunkitasolle asti. Esimerkiksi pääkaupunkiseudun keskimääräisissä pitoisuuksissa voidaan erottaa alueellisia vaihteluita ja nähdä selvä ero viikonpäivien ja viikonloppujen välillä. OMI-instrumentin havainnoista puolestaan nähdään, että alailmakehän NO_2 -pitoisuudet ovat keskimäärin laskeneet koko maassa vuodesta 2005 vuoteen 2018.

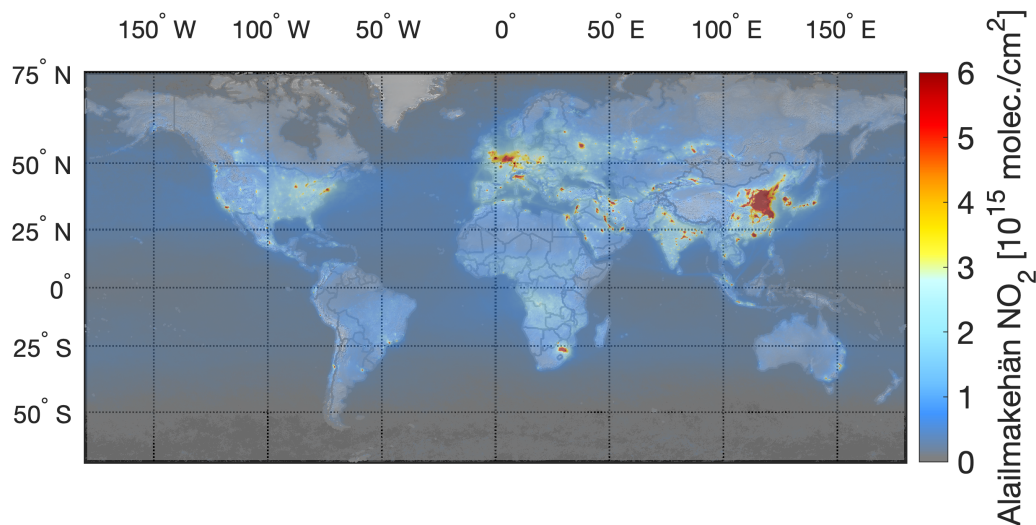
Keskeisimpiä kysymyksiä satelliittidatan hyödyntämisessä ilmanlaadun seurannassa on se, kuinka hyvin satelliittihavainnot vastaavat *in situ* mittauksista nähtyjä vaihteluita. Vertailu TROPOMI-havaintojen ja pintamittausten välillä näyttää, että vaikka kaupungin sisällä yksittäisten asemien kohdalla yhteensopivuus voi vaihdella asemittain, korrelaatio on hyvä kun vastaavuutta tarkastellaan yhdistämällä kunkin kaupungin keskustan pintahavainnot. Tulos on samansuuntainen sekä Suomessa että myös muualla Euroopassa.

Satelliittihavaintojen ominaispiirre on tulkinta-algoritmien jatkuva kehittyminen, joka tarkoittaa myös sitä, että havaintojen laatu paranee uudelleenprosessoinnin ansiosta. Tästä näkökulmasta satelliittihavaintojen ja maanpintamittausten jatkuva vertailu on tärkeä osa nykyistä satelliitti-infrastruktuuria. Toisaalta uusien missioiden myötä satelliittien mittaustarkkuus ja paikallinen erotuskyky tulevat yhä paranemaan. Copernicus-kaukokartoitusohjelman uudet satelliitit tulevat takaamaan jatkuvia operatiivisluonteisia, ilmaisia ja avoimesti saatavilla olevia ilmanlaadun havaintoja pitkälle 2030-luvulle asti, joten on odotettavissa, että myös EU:n tasolla satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa kasvaa tulevina vuosina.

1 Johdanto

Tässä julkaisussa raportoidaan ympäristöministeriön rahoittaman esiselvityksen tulokset liittyen satelliittien hyödyntämiseen ilmanlaadun seuraamisessa. Esiselvitystyö on tehty Ilmatieteen laitoksella vuoden 2019 aikana. Raportissa esitellään satelliittimittauksia ilmanlaadusta erityisesti Suomessa ja lähialueilla, sekä kuvataan satelliittihavaintoihin liittyviä mahdollisuuksia ja toisaalta myös niiden käyttöön liittyviä rajoituksia hyödynnettäessä havaintoja maantieteelliseen ja ajalliseen ilmanlaadun seuraamiseen.

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 satelliittidatan monipuoliseen hyödyntämiseen. Euroopan unionin rahoittaman Copernicus-kaukokartoitusohjelman uudet satelliitit tulevat takaamaan jatkuvia operatiivisluonteisia ilmanlaadun havaintoja pitkälle 2030-luvulle asti. On odotettavissa, että EU:n tasolla satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa kasvaakin tulevina vuosina. Tässä projektissa kartoitetaan ensimmäistä kertaa mahdollisuutta hyödyntää satelliittimittauksia ilmanlaadun havainnoinnissa Suomessa.



Kuva 1: Esimerkki TROPOMI-instrumentin havainnoimasta globaalista alailmakehän typpidioksidi-pitoisuudesta vuonna 2018.

Satelliittihavaintojen vahvuus on erityisesti mittausten alueellisessa kattavuudessa: havaintoja saadaan myös *in situ* -asemien ulkopuolelta, Suomeen sekä lähialueille, aina kaupunkitasolle asti. Satelliittihavaintojen käytön mahdollisuuksia on tässä projektissa pääasiassa demonstroitu käyttäen TROPOspheric Monitoring Instrument (TROPOMI) -instrumentin alailmakehän typpidioksidihavaintoja. TROPOMI

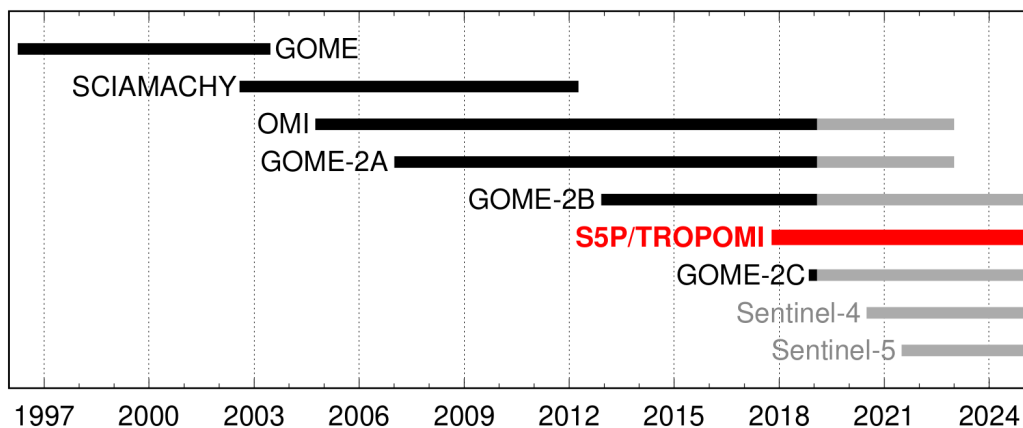
laukaistiin lokakuussa 2017 Copernicus-ohjelman Sentinel-5P -satelliitin mukana, ja se on tällä hetkellä paikalliselta erotuskyvyltään tarkin ilmanlaadun kannalta oleellisia kaasuja havainnoiva satelliitti-instrumentti (ks. kuva 1). NO₂:n pitkäaikaisia vaihteluita Suomessa ja lähialueilla on tarkasteltu Ozone Monitoring Instrument:in (OMI) NO₂-havaintoja käyttäen, joista on olemassa jo lähes 15 vuoden yhtäjaksoinen aikasarja.

Tämä raportti on koottu seuraavasti. Luvussa 2 käydään läpi lyhyesti satelliittimittausten historiaa sekä niiden kehitystä keskittyen erityisesti ilmakehän koostumuksen havainnointiin. Luvussa 3 esitellään satelliittimittausten peruseriaatteita sekä menetelmiä datan käsittelyyn. Luvussa 4 esitellään troposfäärin typpidioksidin alueellista jakaumaa Suomessa ja lähialueilla sekä pääkaupunkiseudulla käyttäen TROPOMI-instrumentin havaintoja. Typpidioksidipitoisuuden pitkäaikaista vaihtelua kuvaillaan luvussa 5 käyttäen OMI-havaintoja. Ilmanlaadun havainnoinnin kannalta on oleellista tarkastella kuinka satelliittimittaukset vertautuvat maanpintahavaintoihin. Tätä käsitellään luvussa 6. Luvussa 7 käydään esimerkein lyhyesti läpi satelliiteista saatavia muita ilmanlaadun kannalta hyödyllisiä mittauksia. Liitteessä on käyty tarkemmin läpi satelliittimittausten fysikaalista perustaa.

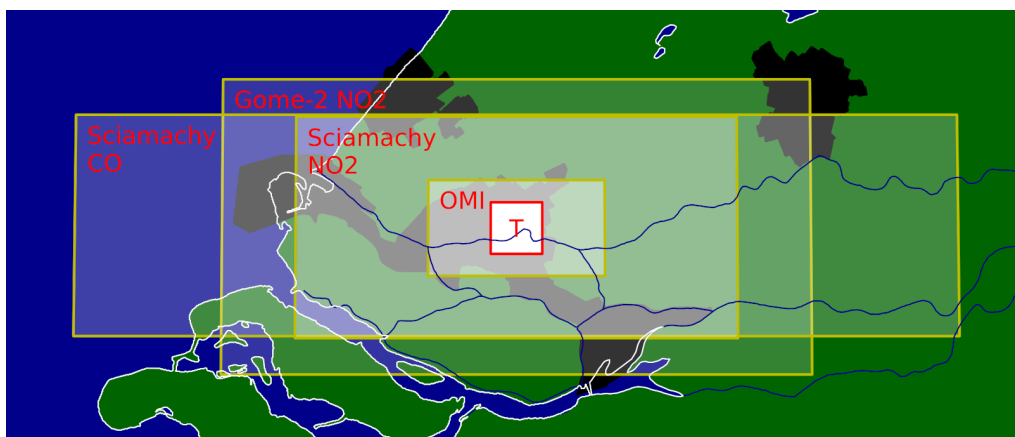
2 Satelliittimittausten historiaa

Satelliitteja on käytetty ilmakehän havainnointiin jo useita vuosikymmeniä. Ensimmäiset ilmakehän satelliittisovellukset liittyivät pilvien havainnointiin ja sääennusteisiin. Ilmakehän koostumuksen satelliittimittauksia on tehty aina 1970-luvun lopulta alkaen. Ensimmäisiä satelliiteista havainnoitavia parametrejä oli ilmakehän kokonaisotsoni (O₃), minkä vuoksi satelliittihavainnot olivatkin olennaisessa osassa 1980-luvun alkupuolella Etelämantereen otsoniaukon havaitsemisessa. Myöhemmin satelliiteista saatavien ilmakehän koostumusta kuvaavien parametrien määrä, tarkkuus ja paikallinen erotuskyky on moninkertaistunut, mikä on myös lisännyt satelliittihavaintoihin pohjaavia sovelluksia, palveluita ja tutkimuskohteita. Tärkeitä sovelluskohteita nykyään ovat mm. erilaisten nopeiden, mahdollisesti vaaraa aiheuttavien tapahtumien kuten tulivuorenpurkausten ja metsäpalojen seuraaminen. Satelliittihavaintoja voidaan myös käyttää ilmansaasteiden leviämisen seurantaan ja päästölähteiden tunnistamiseen, sekä päästöjen estimointiin. Tärkeä sovelluskohde on myös satelliittihavaintojen assimilointi eri ilmanlaatu- ja säämalleihin korjaamaan niiden laskennan lähtötilannetta sekä parantamaan itse ennusteita.

Nykyiset ilmanlaatua mittaavat satelliitti-instrumentit jatkavat keskeytyksetöntä aikasarjaa, jonka aloitti Euroopan avaruusjärjestön (ESA) vuonna 1995 laukaisema GOME-instrumentti (Global Ozone Monitoring Experiment) (kuva 2). GOME:n maaresoluutio oli kuitenkin hyvin karkea ($40 \times 320 \text{ km}^2$), minkä vuoksi modernien ilmanlaadun satelliittimittausten katsotaan käytännössä alkaneen vuonna 2002 ESAn SCIAMACHY-instrumentin laukaisun myötä (SCanning Imaging Absorption spectrometer for Atmospheric CHartography; maaresoluutio $30 \times 60 \text{ km}^2$). 2000-luvun puolivälin jälkeen satelliittihavaintoja typpi- ja rikkidioksidista sekä aerosoleista on saatu useasta eri satelliitti-instrumentista samanaikaisesti. Kuvassa 3 on havainnollistettu instrumenttien maaresoluutioon parantumista, eli yksittäisen mittauspikselin koon pienenemistä instrumentista toiseen.



Kuva 2: Entisten, nykyisten ja suunniteltujen Eurooppalaisten ilmanlaadun mittaukseen tarkoitettujen satelliitti-instrumenttien elinkaaret. Ilmanlaatua on seurattu satelliittien avulla katkeamattomasti vuodesta 1995 asti. (van Geffen ym., 2019)



Kuva 3: Valikoitujen satelliitti-instrumenttien NO_2 -mittausten pikselikokoja havainnollistettuna Rotterdamin (Alankomaat) yläpuolella. Keskimmäisenä olevan TROPOMI-instrumentin (T) pikseli on esitetty $7 \times 7 \text{ km}^2$ koossa, joka on TROPOMI:n metaanimittausten resoluutio. TROPOMI:n NO_2 -havainnot tehdään tarkemmalla, $3,6 \times 5,6 \text{ km}^2$ resoluutiolla. Kuvassa on lisäksi myös SCIAMACHY-instrumentin hiilimonoksidimittausten pikseli (CO). (KNMI, 2014)

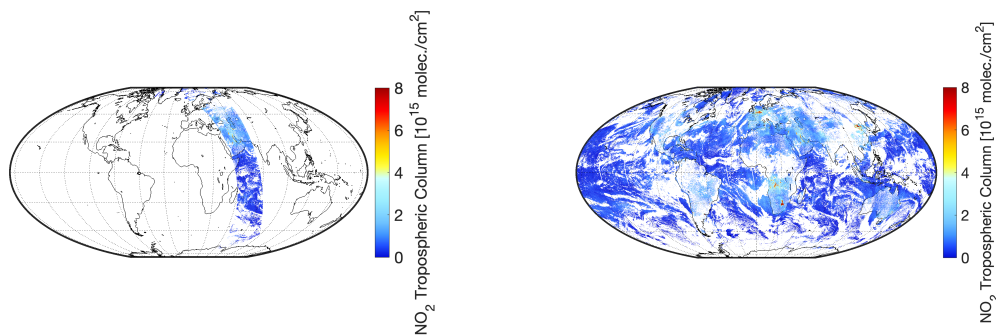
Yksi merkittävimmistä ilmanlaatua kartoittavista instrumenteista on hollanti-suomalainen Ozone Monitoring Instrument (OMI), joka on havainnoinut ilmakehän koostumusta nyt jo yli 15 vuoden ajan. OMI laukaistiin heinäkuussa 2004 NASAn Aura-satelliitin mukana, ja se on siitä asti tuottanut globaaleja havaintoja ilmakehän koostumuksesta. OMI-instrumentti mullisti omiana aikanaan ilmanlaadun satelliittipohjaisen monitoroinnin ja mahdollisti ensimmäistä kertaa mm. kaupunkitason päästöjen havainnoinnin parantuneen mittaustarkkuuden sekä paikallisen resoluutionsa vuoksi (pikselikoko $13 \times 24 \text{ km}^2$). OMI tuottaa troposfäärin NO_2 :n lisäksi havaintoja mm. rikkidioksidista (SO_2) sekä absorboivista aerosoleista, kuten metsäpalojen savuista ja tulivuorituhkasta, kokonaisotsonista, sekä maanpinnalle saapuvasta UV-säteilystä. OMI-instrumentin tuloksia on käytetty lukuisissa tieteel-

lisissä tutkimuksissa ja ilmanlaatusovelluksissa (Levelt ym., 2018). OMI-havaintojen avulla on esimerkiksi arvioitu ilmanlaadussa tapahtuneita pitkäaikaisia muutoksia, estimoitu päästöjä, sekä todennettu ilmanlaatusäädösten toteutumista (esim. Beirle ym., 2011; Castellanos ja Boersma, 2012; Streets ym., 2013; Lu ym., 2015; Lamsal ym., 2015; Duncan ym., 2016; Krotkov ym., 2016; Liu ym., 2017). Suomella ja Ilmatieteen laitoksella on ollut merkittävä rooli OMI-missiossa, jonka rahoittamista tuki rakennusvaiheessa Tekes. Ilmatieteen laitos, VTT ja Patria osallistuivat instrumentin rakentamiseen yhdessä hollantilaisien kumppanien ja NASAn kanssa. Ilmatieteen laitos on myös kehittänyt OMI:n UV-laskenta-algoritmin, jonka avulla arvioidaan maanpinnalle saapuvaa mm. terveydelle haitallista UV-säteilyä. Lisäksi Ilmatieteen laitos vastaa OMI:n ns. Very Fast Delivery -tuotteista, jotka perustuvat Sodankylässä vastaanotettuun ja analysoituun satelliittidataan joka jaetaan käyttäjille 20 min kuluessa varsinaisesta satelliittimittauksesta SAMPO-palvelun kautta (sampo.fmi.fi).

Erityisesti viimeisten vuosien aikana satelliittimittausten kehitys on ollut nopeaa. Syksyllä 2017 Euroopan avaruusjärjestö laukaisi Copernicus Sentinel-5 Precursor -satelliitin (S5P) mukana TROPospheric Monitoring Instrument (TROPOMI) -instrumentin, joka jatkaa edeltäjänsä OMI:n perintöä. TROPOMI:n toimintaperiaatteet perustuvat pitkälti OMI:n, mutta sen paikallinen erotuskyky on huomattavasti parempi. Lisäksi TROPOMI:ssa on mittauskanavia myös pidemmällä aallonpituuksilla, jotka mahdollistavat metaanin (CH_4) ja hiilimonoksidin (CO) havainnoinnin. TROPOMI:n alkuperäinen pikselikoko useimmille havainnoitaville parametreille (suoraan satelliitin alla) oli $3,6 \times 7 \text{ km}^2$, mutta elokuusta 2019 instrumentin vakauden ja mittausten tarkkuuden vuoksi paikallista resoluutiota voitiin nostaa $3,6 \times 5,6 \text{ km}^2$:iin. TROPOMI on osa Euroopan unionin Copernicus-ohjelmaa, joka yhdistää satelliitti- ja maanpintahavainnot sekä erilaiset fysikaaliset mallit yhdeksi kokonaisuudeksi. Copernicus-ohjelman puitteissa tutkitaan ilmakehää, meriä, maanpintaa ja ilmastomuutosta, sekä tuotetaan niihin sekä turvallisuuteen ja pelastustoimintaan liittyviä palveluita. Tämän selvityksen tulokset pohjautuvat pitkälti TROPOMI-instrumentin havaintoihin. Tarkemman paikallisen erottelukyvyn avulla satelliiteilla voidaan nähdä yhä pienempiä kohteita ja alueellista vaihtelua, joka avaa mahdollisuuden myös uudenlaisille sovelluksille. Lähivuosina on suunnitteilla useita eri satelliittimissioita, joiden myötä mittausten tarkkuus sekä paikallinen ja ajallinen erotuskyky tulevat yhä paranemaan. Copernicus-ohjelman puitteissa tullaan laukaisemaan uusia Sentinel-perheeseen kuuluvia satelliitteja, joista Sentinel-4 ja Sentinel-5 -satelliitit keskittyvät ilmanlaadun havainnointiin. Sentinel-4 tulee olemaan ensimmäinen eurooppalainen geostationäärisellä radalla oleva ilmanlaatusatelliitti. Geostationäärinen satelliitti pysyy koko ajan tietyn alueen — tässä tapauksessa Euroopan — yläpuolella, ja näin ollen havaintoja voidaan saada kyseiseltä alueelta useita kertoja tunnissa. Valitettavasti sen mittausero-geometria ei kuitenkaan ole optimaalinen Pohjois-Euroopan kannalta, ja on vielä epäselvää voidaanko satelliittihavaintoja hyödyntää edes Etelä-Suomen yltä. Vastaavia geostationäärisiä ilmanlaatusatelliitteja rakennetaan myös Yhdysvalloissa ja Aasiassa.

3 Satelliittihavaintojen peruseriaatteen

Ilmakehän koostumusta havainnoidaan parhaiten ns. aurinkosynkronisella polaari-radalla olevilla passiivisilla satelliitti-instrumenteilla, jotka mittaavat ilmakehästä ja maasta takaisinheijastunutta auringonvaloa tai lämpösäteilyä. Polaariradalla olevien satelliittien kiertorata kulkee napojen kautta. Koska maapallo pyörii samanaikaisesti akselinsa ympäri, polaariradan satelliiteista saatavien havaintojen alueellinen kattavuus on suuri (kuva 4). Havaintoja saadaan noin kerran päivässä suurinpiirtein samaan paikalliseen aikaan. Niin kutsutuilla aamupäiväradoilla olevat Euroopan sääsatelliittijärjestön EUMETSATin satelliitit (METOP-A, -B ja -C) tekevät havaintoja noin 9:30 paikallista aikaa. Copernicuksen TROPOMI-instrumentti Sentinel-5P satelliitissa sekä OMI-instrumentti NASAn Aura-satelliitissa puolestaan ovat ilta-päiväradalla ja tekevät havaintoja noin 13:30 paikallista aikaa.



Kuva 4: Esimerkki polaariradalla olevan TROPOMI-satelliitti-instrumentin troposfäärin NO₂-havainnoista 23.8.2019. Kussakin paikassa havainto on tehty noin 13:30 paikallista aikaa. Vasemmalla on esitetty havainnot yhdeltä radalta ja oikealla koko päivän kaikkien ratojen havainnot. Havainnoissa näkyy myös pilvien vaikutus (valkoiset alueet), jolloin mittauksia ei voida tehdä.

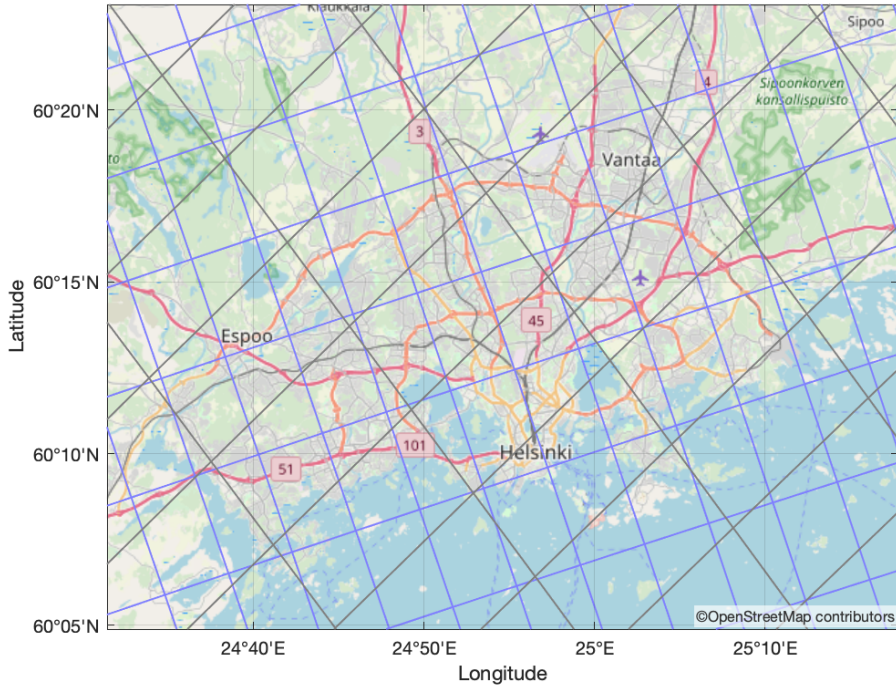
Satelliittien etuna on havaintojen saaminen alueilta, joilta ei ole saatavilla muita havaintoja. Korkeilla leveysasteilla lähellä napa-alueita polaariradalla olevien satelliitti-instrumenttien alueellinen kattavuus on parempi ja havaintoja voidaan saada jopa muutaman kerran päivässä. Instrumentista ja sen mittaaman alueen leveydestä riippuen maailmanlaajuinen havaintojen kattavuus voidaan saavuttaa jopa yhden päivän aikana (kuva 4). Satelliitin rata koostuu tuhansista yksittäisistä mittauksista, joita kutsutaan pikseleiksi. Satelliitti-instrumentin maanpintaresoluutiota eli erotuskykyä määrittää yksittäisen pikselin koko maanpinnalla. Satelliittimittauksen voidaan ajatella kuvaavan pikselin kattaman alueen keskimääräistä arvoa. Satelliitin radalla pikselien koko ei ole vakio, vaan niiden koko kasvaa (resoluutio muuttuu karkeammaksi) ratojen reunoja kohden maapallon kaarevuudesta johtuen. Kuten kappaleessa 2 on mainittu, instrumenttien resoluutio on parantunut vuosien kuluessa huomattavasti.

Passiiviset satelliittimittaukset perustuvat ilmakehästä ja maanpinnasta takaisin avaruuteen heijastuneeseen auringonvaloon. Havainnoitava parametri määrittää sen millä aallonpituuksilla mittauksia tehdään. Passiivisia satelliittimittauksia rajoittaa vähäinen auringon valon määrä ja pilvisuus, sekä tiettyjen parametrien kohdalla (esim. aerosolit) myös kirkas lumi- ja jääpinta. Passiivisista instrumenteista havainnotoja ei voida tehdä yöllä tai pohjoisessa pimeimpään talviaikaan. Runsas pilvisuus puolestaan vaikuttaa mitattavaan signaaliin niin paljon että se estää satelliitista katsottuna näkyvyyden pilvien alapuoliseen ilmakehään ja maanpinnalle. Tällöin arvioita esim. kaasujen kokonaispitoisuuksista ei voida tehdä.

Satelliittihavaintojen tuottaminen aina avaruudessa tehdystä säteilyn mittauksesta ilmakehää kuvaaviksi havainnoiksi ja edelleen ilmanlaatuanalyysiksi on monimutkainen ja monivaiheinen prosessi. Yksinkertaistettuna satelliitti-instrumenttien tekemät säteilyhavainnot vastaanotetaan maa-asezilla, joista ne siirretään edelleen prosessoitavaksi. Säteilymittausten muuntaminen ilmakehän koostumusta kuvaavaksi parametriksi on käänteisongelma ja sen ratkaisemiseen vaaditaan ns. tulkinta-algoritmi. Satelliittimittaus on siis aina epäsuora mittaus, ja näin ollen siihen liittyy myös tyypillisesti suurempia epävarmuuksia kuin *in situ* -mittauksiin. Algoritmien ja laskentamenetelmien kehitystyö on satelliittikaukokartoituksessa yksi keskeisimmistä tutkimusaiheista. Algoritmeja parannetaan jatkuvasti ja tästä syystä satelliittihavainnoista tuotetaan usein uudelleenprosessoituja havaintosarjoja käyttäen kaikkia satelliitin jo tekemiä havainnotoja. Kaikki satelliittipohjaisia ilmanlaatuhavainnotoja tuottavat osapuolet, ESA, NASA, sekä Copernicus, ovat sitoutuneita avoimen datan politiikkaan. Näin ollen kaikki satelliittidata (esim. kuva 4) on vapaasti kaikkien saatavilla Internet-pohjaisten palveluiden kautta. Satelliiteista saatava datan määrä on suuri ja sen käsittely vaatii osaamista. Esimerkiksi yhden päivän TROPOMin maailmanlaajuiset NO₂-havainnot ovat tiedostokooltaan noin 4,5 Gt. Datat analysoinnissa on puolestaan otettava huomioon satelliittihavaintojen erityispiirteet sekä kuhunkin mittaukseen liittyvät epävarmuudet.

3.1 Satelliittidatan keskiarvoistaminen

Polaariradoilla olevat aurinkosynkroniset satelliitit havainnoivat ilmakehän koostumusta päivittäin lähes samaan paikalliseen aikaan, mutta satelliittien rata ja pikseleiden täsmällinen paikka maanpinnalla vaihtelee (kuva 5). Näin ollen satelliiteista saaduista päivittäisistä havainnoista ei voida sellaisenaan laskea suoraan esimerkiksi keskiarvoa pidemmän ajanjakson yli tietylle alueelle. Yleisimpiä menetelmiä esim. vuosi- ja kuukausikeskiarvojen alueellisen jakauman laskemiseksi on satelliittihavaintojen kerääminen tasaväliseen hilaan. Hilan paikallinen tarkkuus tyypillisesti vaihtelee sovelluksen mukaan. Koko maapalloa kuvaavissa kartoissa satelliittidata voidaan esittää esim. $0,5 \times 0,5$ asteen (n. $50 \times 50 \text{ km}^2$ päiväntasaajalla) hilaruuduissa, jolloin keskiarvokartan alueellinen resoluutio on useimpien instrumenttien alkuperäistä resoluutiota karkeampi, mutta yleisesti riittävä ilmiöiden kuvaamiseen globaalissa skaalassa.



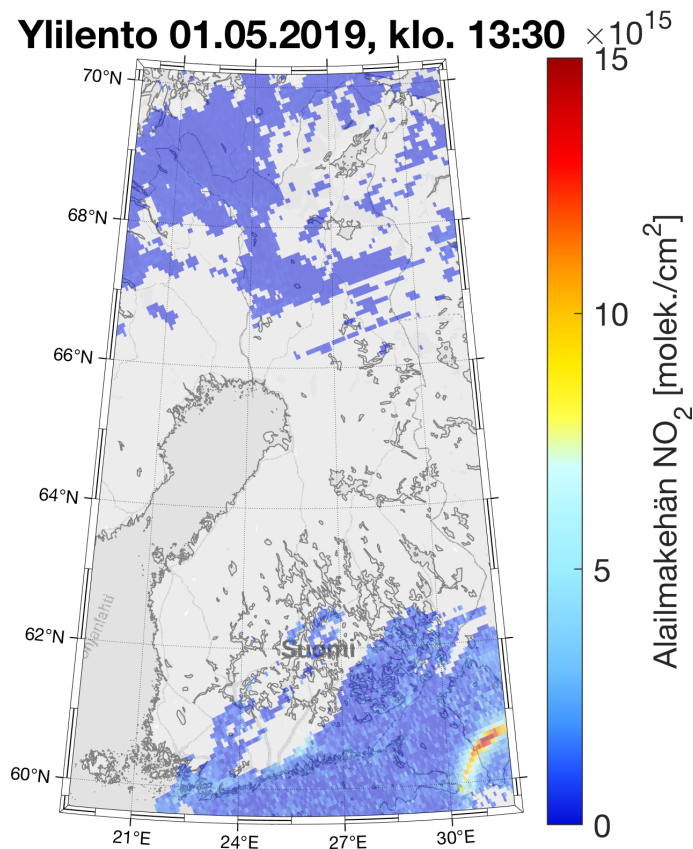
Kuva 5: TROPOMI-instrumentin pikseleiden ulottuvuus maanpinnalla kahtena peräkkäisenä päivänä. Sinisellä on kuvattu pikselit, jolloin satelliitin radan keskikohta on ollut suurinpiirtein Helsingin päällä ja pikseleiden koko on lähellä instrumentin parasta resoluutiota. Harmaalla on merkitty TROPOMI-pikselit radalta, jolloin vain radan reuna on kattanut Helsingin alueen ja näin ollen paikallinen resoluutio on huonompi kuin radan keskellä.

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, esim. $2 \times 2 \text{ km}^2$, jonka johdosta lopullisesta keskiarvokartasta saadaan alueelliselta erotuskyvyltään ”tarkempi” kuin mitä alkupe- räiset satelliittihavainnot ovat. Oversampling-menetelmä mahdollistaa pienen mitta- kaavan alueellisen vaihtelun tarkastelun kunhan keskiarvoistusaika on riittävän pitkä (esim. useampi kuukausi). Satelliittipikselien keräämisessä hienoresoluutioiseen hila- ruudukkoon käytetään erilaisia matemaattisiin menetelmiin perustuvia algoritmeja.

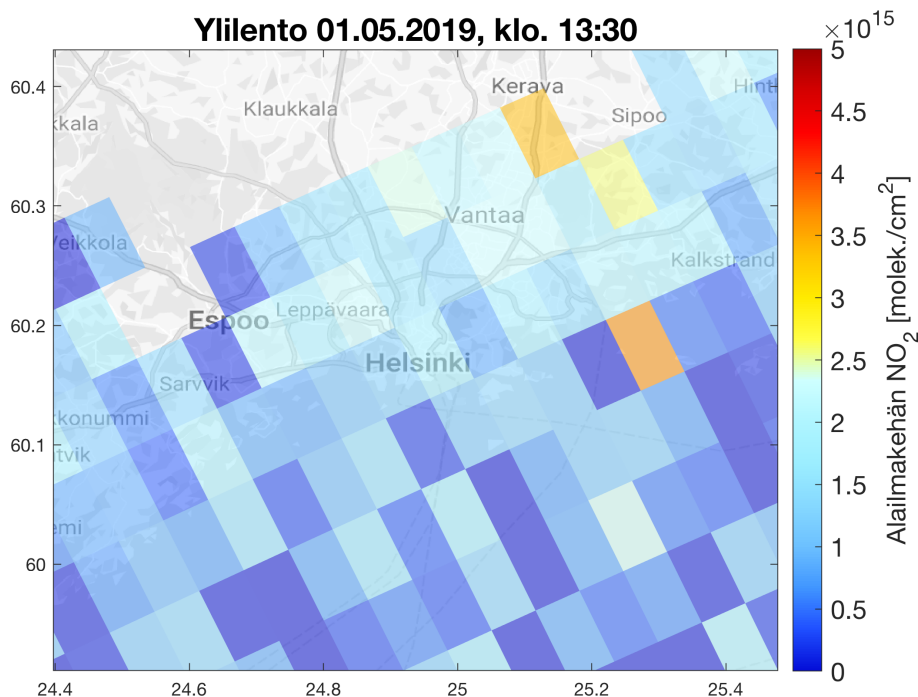
4 Satelliittihavainnoista määritetty troposfäärin typpidioksidin alueellinen jakauma

Tavallisin tapa havainnollistaa ilmakehän hiivenkaasujen satelliittimittauksia on piir- tää niiden avulla erilaisia pitoisuuskarttoja. Jos tarkasteltavan alueen pilvisuus sallii ja NO_2 - pitoisuudet ovat suhteellisen korkeita, voidaan jo yhden satelliitin ylilennon perusteella tehdä päätelmiä pitoisuuksien alueellisesta jakaumasta. Esimerkiksi ku- vassa 6 nähdään Pietarin päästöjen leviävän koilliseen tuulten vaikutuksesta. Jos

tarkasteltavan alueen pitoisuudet puolestaan ovat tyypillisesti alhaisia, kuten yleensä Suomessa, ei yksi ylilento välttämättä riitä erottamaan kartasta selviä pitoisuuseroja. Lisäksi, jos tarkastellaan esimerkiksi vain pääkaupunkiseutua, satelliitin pikselien koko rajoittaa tutkimuksia (kuva 7). Molemmat ongelmat voidaan kuitenkin ratkaista samaa menetelmää käyttäen. Jos usea perättäinen satelliitin ylilento keskiarvoistetaan yhteen, voidaan tuloksena saatavissa kartoissa erottaa myös pieniä pitoisuuseroja. Kuten kappaleessa 3 selitettiin, tämä keskiarvoistus on tehtävä johonkin tasaväliseen hilaan, joka voi olla resoluutioltaan satelliittipikseleitä tarkempi. Tällaisessa tapauksessa kyseessä on ”oversampling”-menetelmä, ja se mahdollistaa satelliitin resoluutiota pienempien pitoisuusvaihteluiden tarkastelun. Tämän kappaleen tarkasteluissa käytetään TROPOMI-instrumentin mittauksia, joka on tällä hetkellä tarkin NO₂:ta mittaava satelliitti-instrumentti (resoluutio 7 × 3,5 km²). Karttojen pohjana käytetään joko 2,5 × 2,5 km² (Suomi ja lähialueet) tai 1 × 1 km² (Helsinki) tasavälistä hilaa. Keskiarvoistusaika on 15.4.2018–30.6.2019.

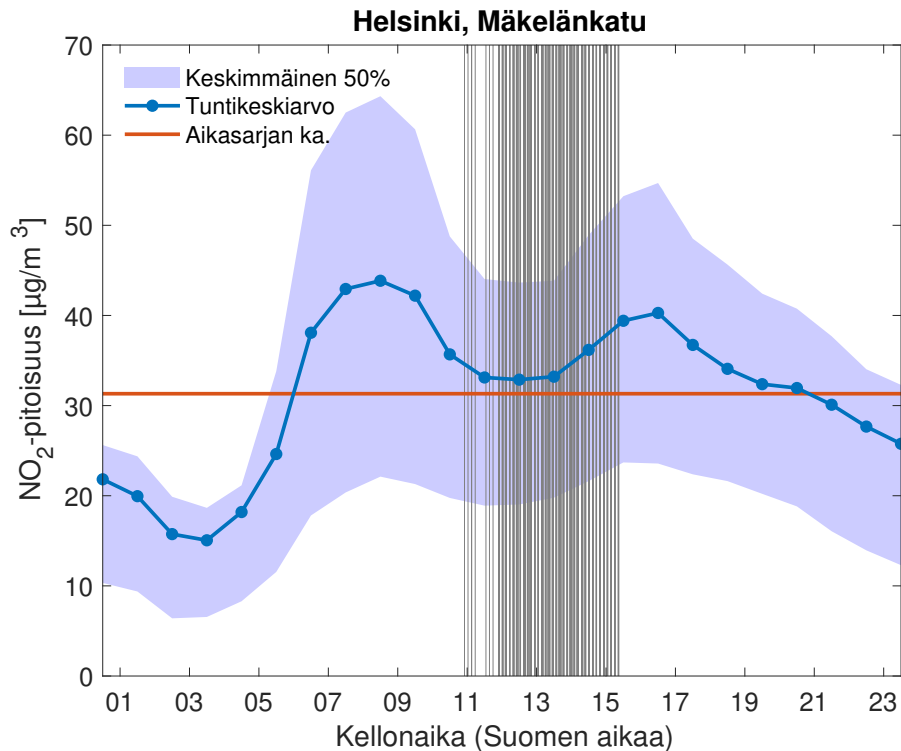


Kuva 6: Yhden S5P-satelliitin ylilennon TROPOMI-mittauksista piirretty NO₂-pitoisuuskartta Suomen yltä. Kuvaan on merkitty kellonaika, jolloin satelliitti ylitti Helsingin leveyspiirin. Datasta on poistettu huonolaatuiset mittauspikselit (esimerkiksi pilvien peittämät alueet). Samaa ylilentoa perustuva kartta pääkaupunkiseudulta on kuvassa 7.



Kuva 7: Yhden S5P-satelliitin ylilennon TROPOMI-mittauksista piirretty NO₂-pitoisuuskartta pääkaupunkiseudulla (Vappupäivänä 2019). Datasta on poistettu huonolaatuiset mittauspikselit. Havainnot ovat samalta ylilennolta kuin kuvassa 6, mutta käytetty väriskaala on eri.

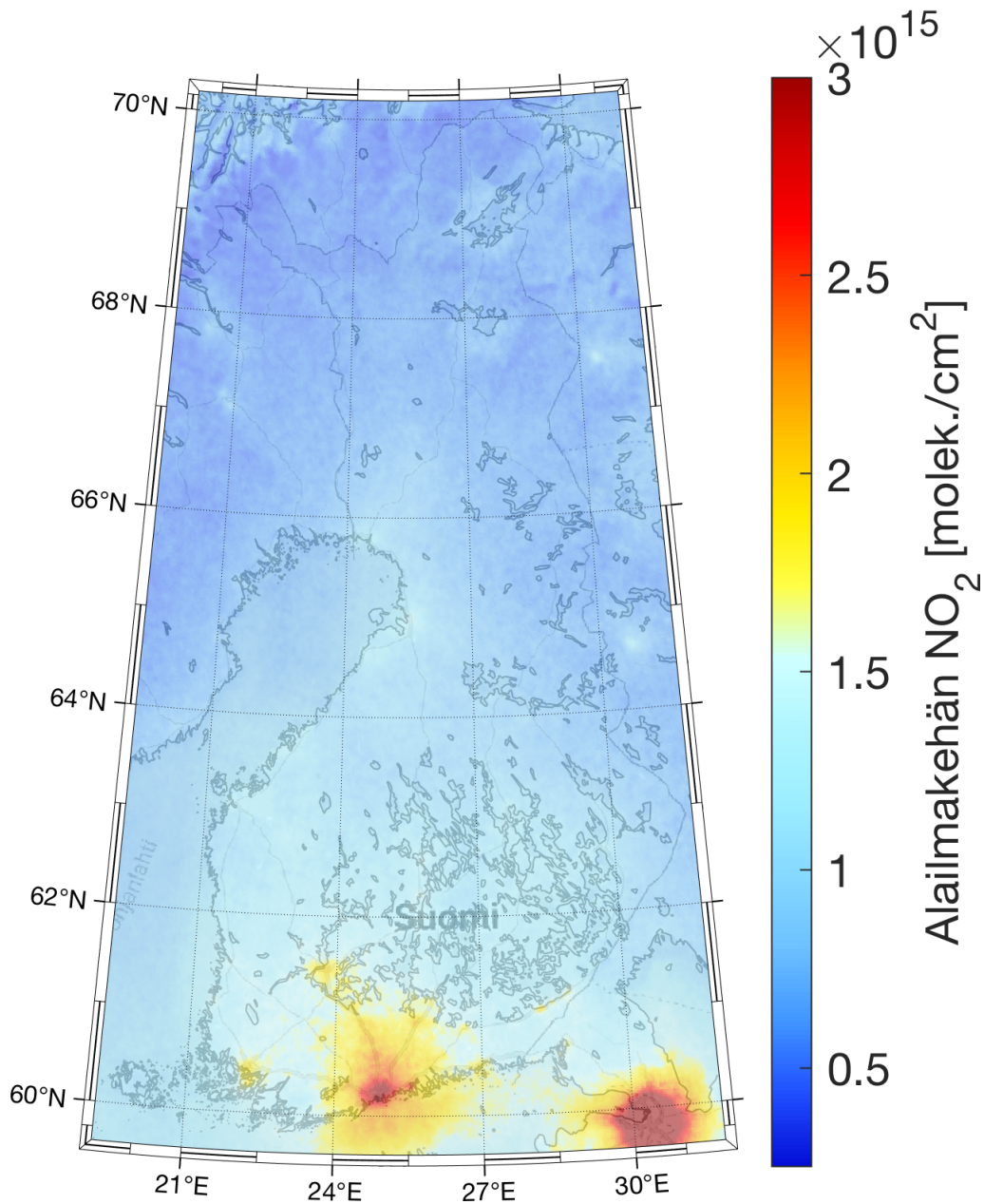
Pitoisuuskarttoja tulkittaessa on syytä ottaa huomioon satelliittihavaintojen rajallinen ajallinen kattavuus: aurinkosynkronisella kiertoradalla oleva Sentinel-5P ylittää Suomen 2–3 kertaa päivässä noin klo. 11–15 välisenä aikana. Sen kuljettama TROPOMI-instrumentti pystyy siis näkemään vain osan typpidioksidin pitoisuuksien tyypillisestä päivittäisestä syklistä, joka työmatkaliikenteestä johtuen koostuu kahdesta piikistä: ihmisten mennessä töihin, ja palatessa sieltä (kuva 8). TROPOMIn ylilennot osuvat näiden kahden piikin väliin. Lähivuosina laukaistava geosynkronisella radalla kiertävä Sentinel-4 tulee seuraamaan Euroopan NO₂-pitoisuuksia keskeytyksettä koko päivän kun auringonvalo on riittävästi saatavilla. Tällä hetkellä on kuitenkin vielä epäselvää voidaanko kyseisellä instrumentilla havaita Etelä-Suomen NO₂-pitoisuuksia, koska se on satelliitin näkemän alueen aivan pohjoisimmalla reunalla.



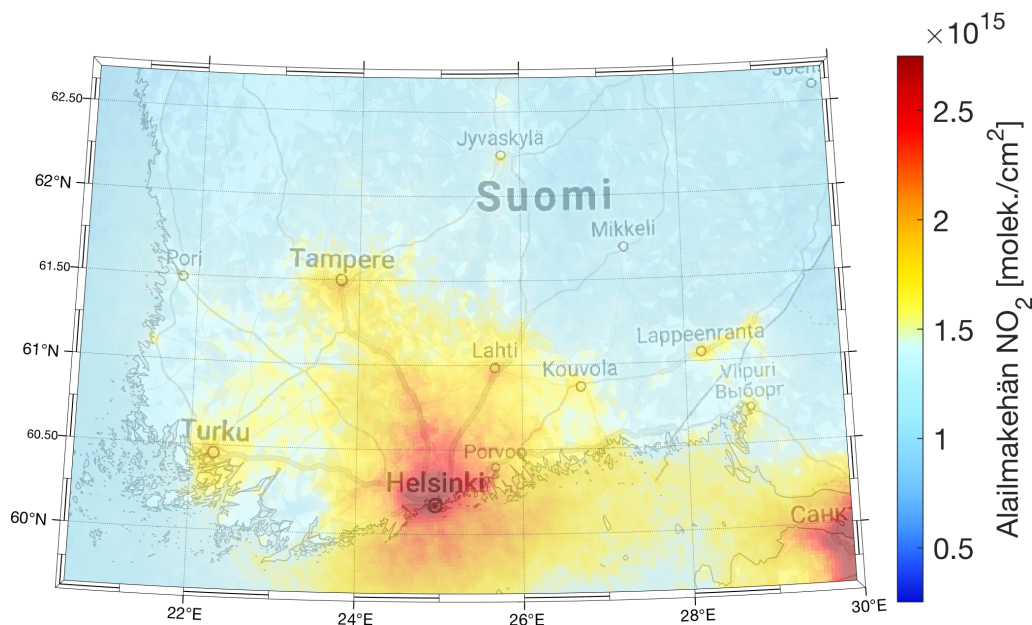
Kuva 8: Helsingin Mäkelänkadun ilmanlaatuaseman NO₂-mittausten keskimääräinen päivittäinen sykli aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Punainen viiva edustaa kaikkien mittausten keskiarvoa, sininen alue pitoisuuksien hajontaa (tuntikeskiarvon laskemisessa käytettyjen mittausten keskimääräinen 50 %, eli nk. kvartiiliväli). Harmaat pystyviivat osoittavat kellonaikoja, jolloin S5P-satelliitti on tällä aikavälillä ylittänyt Mäkelänkadun aseman.

4.1 Suomi

Kuvissa 9 ja 10 on esitetty TROPOMI-instrumentin alailmakehän NO₂-mittausten keskiarvo Suomen ja Etelä-Suomen alueella vuoden 2018 huhtikuulta vuoden 2019 kesäkuulle. Suomessa korkeimmat NO₂-pitoisuudet ovat keskittyneet lähelle suuria asutuskeskuksia, joissa on myös eniten liikenteen päästöjä. Suurimmat NO₂-arvot Suomessa havaitaan pääkaupunkiseudulla, Helsingissä keskimääräinen pitoisuus on noin $3,0 \times 10^{15}$ molek./cm². Myös pääkaupunkiseudulta pohjoiseen johtavat moottoritiet, erityisesti Tampereelle ja Lahteen, erottuvat kuvasta. Lähellä itärajaa erottuvat Lappeenrannan ja Imatran kaupungit, sekä niiden välinen tieosuus.



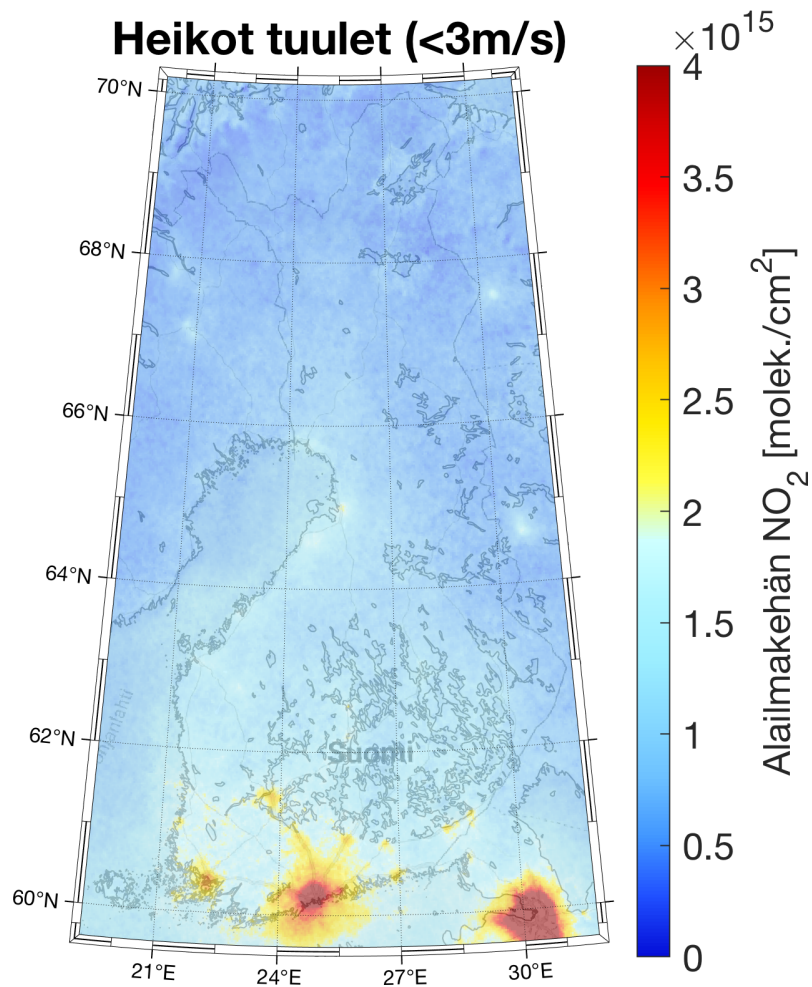
Kuva 9: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo Suomen alueella aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$. Kartan väriskaala on valittu siten että Suomessa nähdään alueellista vaihtelua. Skaalan yläraja on valittu pääkaupunkiseudun tyypillisen keskimääräisen arvon, $3,0 \times 10^{15}$ molek./ cm^2 perusteella. Tämä tarkoittaa myös sitä että tätä suuremmat arvot eivät erotu kuvasta. Esimerkiksi Pietarin keskimääräinen NO_2 -pitoisuus on yli kaksinkertainen Helsinkiin verrattuna.



Kuva 10: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo Etelä-Suomen alueella aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$. Väriskaalan maksimi-arvoa on laskettu hieman kuvaan 9 verrattuna, jotta pienimmät kaupungit erottuisivat paremmin.

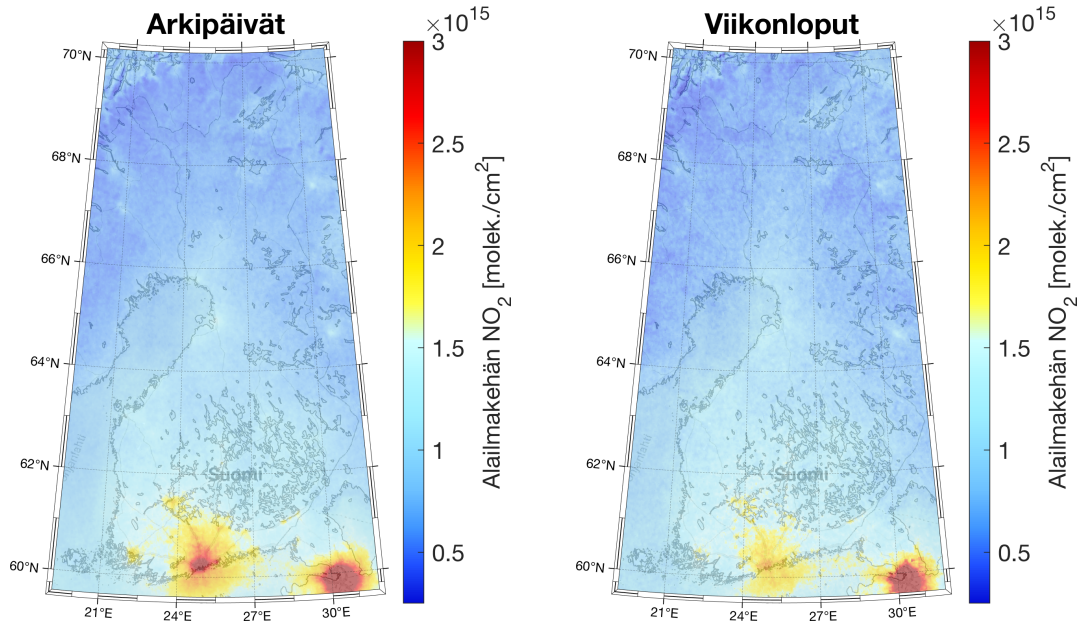
Korkeat NO_2 -pitoisuudet ulottuvat pääkaupunkiseudulla pitkälle meren päälle. Osa tästä on laivaliikennettä, mutta osittain syynä on pääkaupunkiseudun päästöjen kulkeutuminen meren ylle tuulten vaikutuksesta. Kun keskiarvoistuksessa huomioidaan ainoastaan heikkojen tuulten (alle 3 m/s) vallitessa tehdyt satelliittimittaukset (kuva 11), pitoisuudet keskittyvät lähemmäksi Helsinkiä. Typpidioksidin lähteet erottuvat siis tällaisessa keskiarvoistustavassa paremmin, koska voimakkaiden tuulten aiheuttamaa mahdollista kulkeutumista ei ole. Kuvaan 9 verrattuna pääkaupunkiseudulta Tampereelle ja Lahteen johtavat tiet erottuvat nyt selkeämmin, kuten myös pienemmistä kaupungeista Lahti, Kouvola, Kotka, Lappeenranta, Imatra, Rauma ja Oulu. Tamperetta ja Turku vertailtaessa näyttää siltä, että Turun NO_2 -päästöt ovat hieman Tamperetta suuremmat. Huomionarvoista on myös Turun ja Helsingin välisen moottoritien selvästi vähäisemmät päästöt verrattuna Tampereen ja Helsingin väliseen moottoritiehen. Väyläviraston mukaan Tampereen moottoritien liikennemäärät olivat vuonna 2018 noin 60–100 % suurempia verrattuna Turun moottoritiehen (Väylävirasto, 2018). Lisäksi kuvia 9 ja 11 vertailemalla nähdään, että absoluuttiset pitoisuudet ovat heikkojen tuulten kuvassa suuremmat. Tämä johtuu siitä, että voimakkaammat tuulet levittävät pitoisuuksia suuremmalle alueelle ja ilmakehässä tapahtuu sekoittumista.

Kuvassa 11 on käytetty Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskuksen (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) ERA5-uusanalyysituotteen perusteella laskettua tuulen nopeutta ilmakehän rajakerroksessa, joka on troposfäärin alin n. 1 km paksuinen kerros maanpinnalta katsottuna. Typpidioksidin suhteellisen lyhyen eliniän vuoksi sen maan pinnalta peräisin olevat päästöt (esim. liikenteestä) pysyvät yleensä pääosin rajakerroksessa.



Kuva 11: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO₂-mittausten keskiarvo aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019, kun vain heikkojen tuulten (alle 3 m/s) vallitessa tehdyt mittaukset on huomioitu. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$.

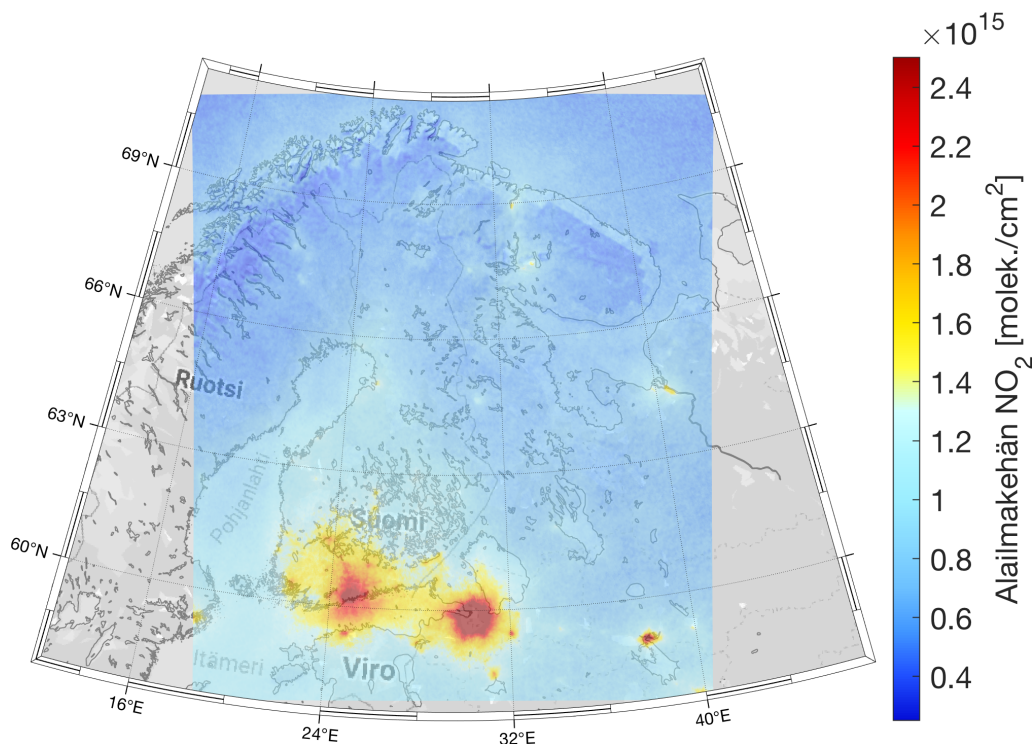
In situ -mittausten perusteella tiedetään, että typpidioksidin päästöt ovat alhaisempia viikonloppuina kuin arkipäivinä vähäisemmän työmatkaliikenteen vuoksi. Myös satelliitti-instrumentit pystyvät havaitsemaan tästä aiheutuvan eron NO_2 -pitoisuuksissa, kuten kuvasta 12 voidaan nähdä.



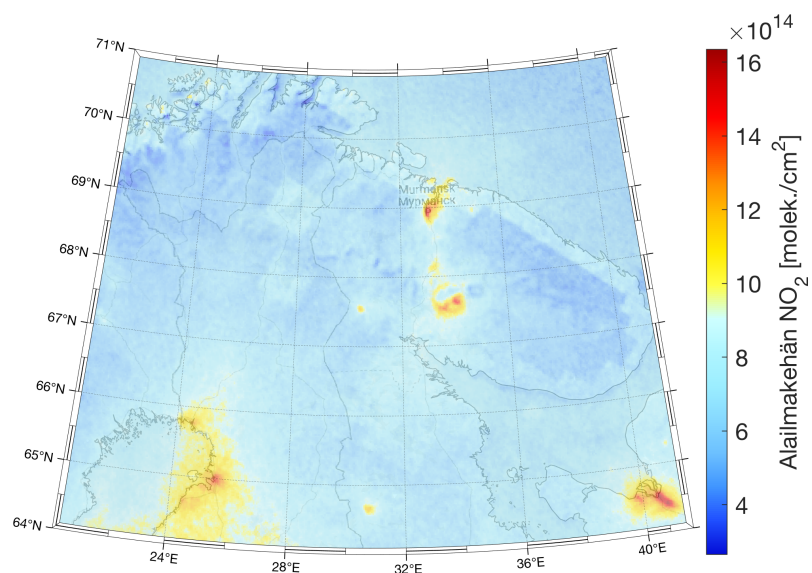
Kuva 12: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän typpidioksidin pitoisuusmittausten keskiarvo Suomen alueella arkipäivinä ja viikonloppuina aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$.

4.2 Lähialueet

Satelliittimittausten ehdottomana vahvuutena on niiden alueellinen kattavuus. Havaintoja on saatavilla maailmanlaajuisesti, ja näin ollen tarkastelualueita voidaan tarpeen mukaan muuttaa. Kuvassa 13 tarkastelualueita on laajennettu käsittämään Suomen lisäksi myös lähialueet, ja kuvassa 14 on valittu tarkempaan tarkasteluun Pohjois-Suomi sekä Kuolan niemimaa. Molempien kuvien väriskaalan ylä- ja alarajat on valittu NO_2 :n lähteiden korostamiseksi kyseisellä alueella. TROPOMIn havaitsemat NO_2 -arvot ovat kohonneita mm. Kostamuksen ja Kouteron kaivoskaupungeissa, Apatiitin kaivosalueella Kuolan niemimaalla, sekä itse Murmanskin kaupungissa. Idempänä Vienanmeren itärannalla erottuu Arkangelin kaupunki. Suomen lähialueilla suurimmat NO_2 -pitoisuudet havaitaan Pietarissa, jossa NO_2 -pitoisuudet ovat keskimäärin yli kaksinkertaiset Helsinkiin (noin $3,0 \times 10^{15} \text{ molek./cm}^2$) verrattuna. Pietarin kaakkoispuolella kohonneita arvoja nähdään Kirisin kaupungissa, jossa on muun muassa öljynjalostamoita ja maakaasuvoimala. Pietarista etelään erottuu myös Novgorodin kaupunki. Rybinskin tekojärven luoteispuolella voidaan erottaa selvästi Tserepovetsin kaupunki, jossa on Venäjän suurin terästehdas ja paljon kemianteollisuutta. Typpidioksidia syntyy korkean lämpötilan prosesseissa, minkä vuoksi esimerkiksi suuret väestönkeskittymät (paljon polttomootoreita), erilaiset lämpövoimalaitokset ja metallinsulatot näkyvät selkeästi satelliittimittauksissa.



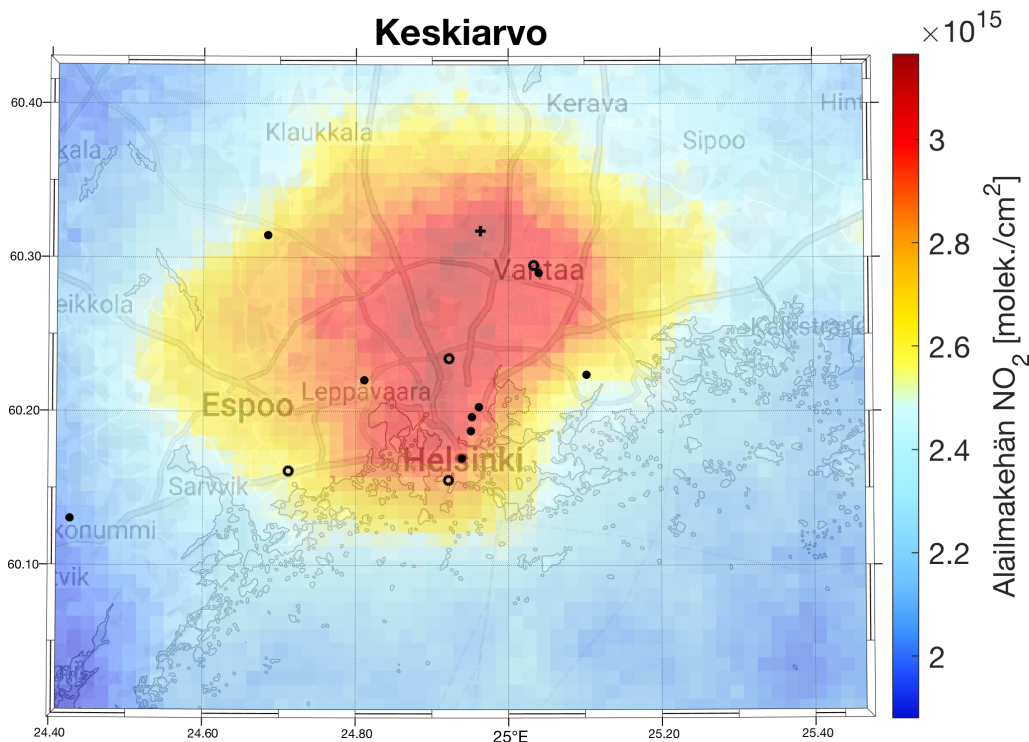
Kuva 13: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO₂-mittausten keskiarvo Suomessa ja lähialueilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$. Väriskaalan rajat on valittu itärajan takaisten kohteiden korostamiseksi.



Kuva 14: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO₂-mittausten keskiarvo Pohjois-Suomessa ja Kuolan niemimaalla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$.

4.3 Pääkaupunkiseutu

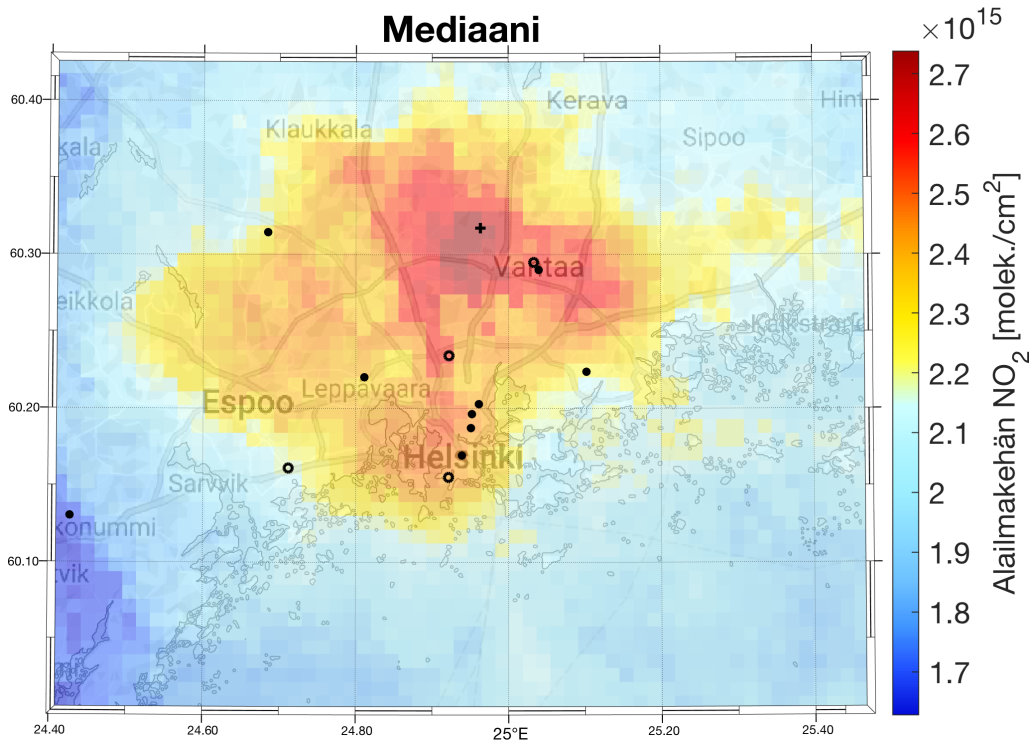
Pääkaupunkiseudun typpidioksidipitoisuuksia on tutkittu samoin menetelmin kuin laajemmille alueille, mutta nyt hilaruudukon kokona käytetään hienompaa $1 \times 1 \text{ km}^2$ hilaa. Kuvassa 15 on esitetty TROPOMI- mittausten keskiarvo. Nähdään, että suurimmat pitoisuudet ovat lähellä Helsinki-Vantaan lentokenttää, sekä etelässä Hämeenlinnanväylän varrella. Kuvaan on myös merkitty alueella olevat ilmanlaatuasemat. NO_2 :n jakaumasta nähdään että TROPOMI havaitsee suurimpia pitoisuuksia alueilla, joissa nykyisin ei ole pysyvää havaintoasemaa. Väliaikainen vuoden 2019 ajan toiminnassa ollut Pirkkolan asema näyttää kuitenkin olleen lähellä pääkaupunkiseudun korkeimpia pitoisuuksia. Lisäksi nähdään että luoteessa sijaitseva pääkaupunkiseudun tausta-asemana toimiva Espoon Luukin asema sijaitsee päästöjen vaikutusalueella.



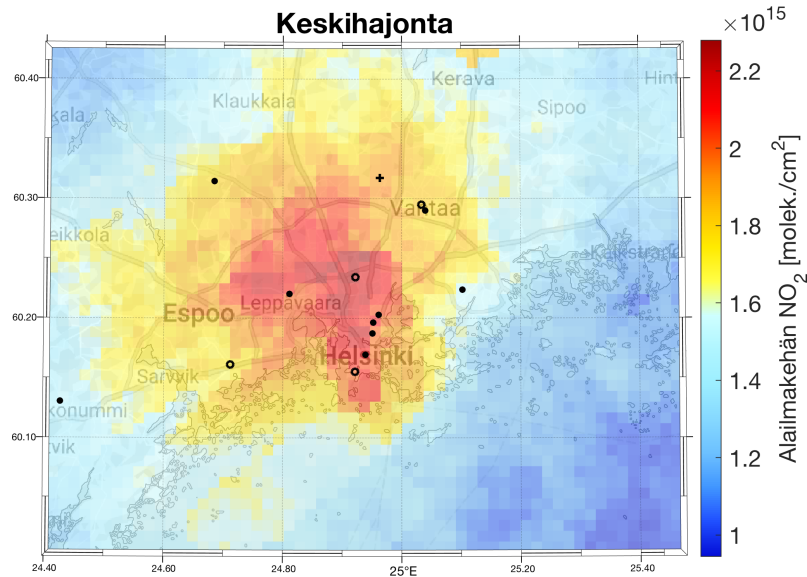
Kuva 15: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo pääkaupunkiseudulla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $1 \times 1 \text{ km}^2$. Kuvaan on merkitty mustilla pisteillä HSY:n ylläpitämät pysyvät ilmanlaadun mittausasemat, ympyröillä vuonna 2019 käytössä olleet väliaikaiset asemat, ja +-merkillä Helsinki-Vantaan lentokenttä.

Typpidioksidin pitoisuuksien tarkastelussa on tutkittu myös muita tilastollisia muuttujia. Kuvissa 16 ja 17 on esitetty NO_2 :n pitoisuusmittausten mediaani ja keskihajonta pääkaupunkiseudulla. Mediaani on vähemmän herkkä pitoisuuksien vaihteluille, eli muutama hyvin pieni tai hyvin suuri arvo ei juuri vaikuta mediaaniin toisin kuin keskiarvoon. Mediaani kuvastaa siis keskiarvoa paremmin eri alueiden tyypillisimpiä pitoisuuksia. Kuvasta 16 nähdään, että pääkaupunkiseudulla NO_2 -pitoisuuksien mediaani on suurimmillaan lähellä Helsinki-Vantaan lentokenttää sekä

Hämeenlinnanväylän varrella. Kuvasta 17 puolestaan nähdään, että pitoisuuksien vaihtelu on suurimmillaan Helsingin keskustassa, keskustan ja Kehä I:n välissä, sekä Kehä I:n pohjoispuolella Helsingissä ja Espoossa. Typpidioksidin pitoisuudet ovat siis jatkuvasti koholla lähellä lentokenttää, kun taas Hämeenlinnanväylällä ne vaihtelevat paljon korkeasta mediaanista huolimatta. Arvatenkin on siis paljon aikoja, jolloin tiellä kulkee joko erityisen paljon tai erityisen vähän ajoneuvoja. Pitoisuuksien keskihajonta on lisäksi varsin suurta Espoon Luukin asemalla ottaen huomioon, että sen on tarkoitus edustaa pääkaupunkiseudun taustapitoisuuksia.

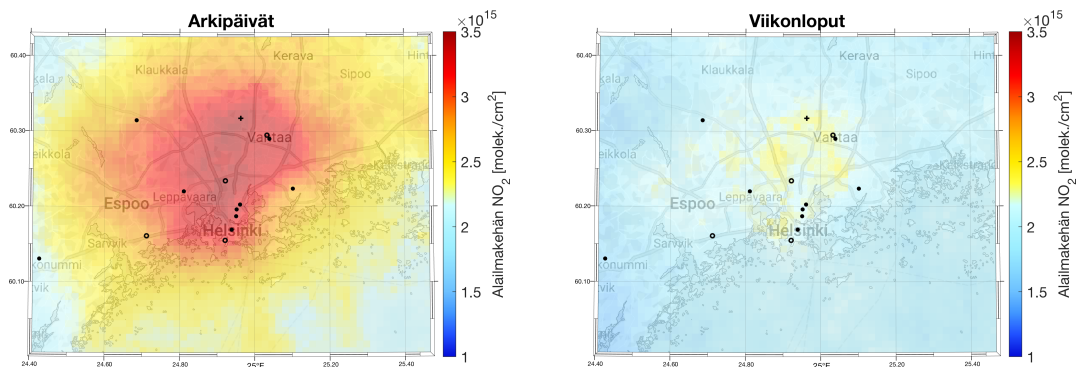


Kuva 16: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO₂-mittausten mediaani pääkaupunkiseudulla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on 1 × 1 km². Kuvaan on merkitty mustilla pisteillä HSY:n ylläpitämät pysyvät ilmanlaadun mittausasemat, ympyröillä vuonna 2019 käytössä olleet väliaikaiset asemat, ja +-merkillä Helsinki-Vantaan lentokenttä.



Kuva 17: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskihajonta pääkaupunkiseudulla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $1 \times 1 \text{ km}^2$. Kuvaan on merkitty mustilla pisteillä HSY:n ylläpitämät pysyvät ilmanlaadun mittausasemat, ympyröillä vuonna 2019 käytössä olleet väliaikaiset asemat, ja +-merkillä Helsinki-Vantaan lentokenttä.

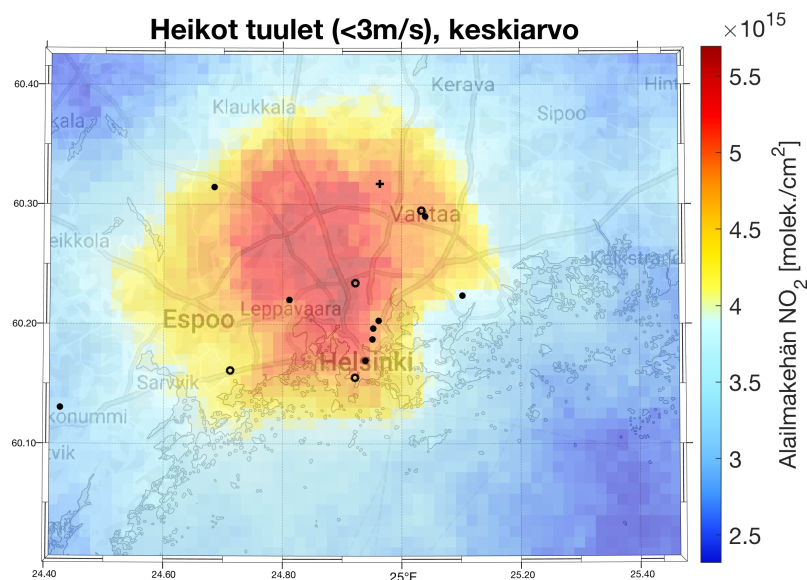
Kuten koko Suomen alueella myös pääkaupunkiseudulla typpidioksidin pitoisuudet putoavat selvästi viikonloppuisin (kuva 18). Lentoasema ei vaikuta olevan alueellisesti merkittävä päästölähde viikonloppuisin.



Kuva 18: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän typpidioksidin pitoisuusmittausten keskiarvo pääkaupunkiseudulla arkipäivinä ja viikonloppuina aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $1 \times 1 \text{ km}^2$.

4.3.1 Tuulten vaikutus

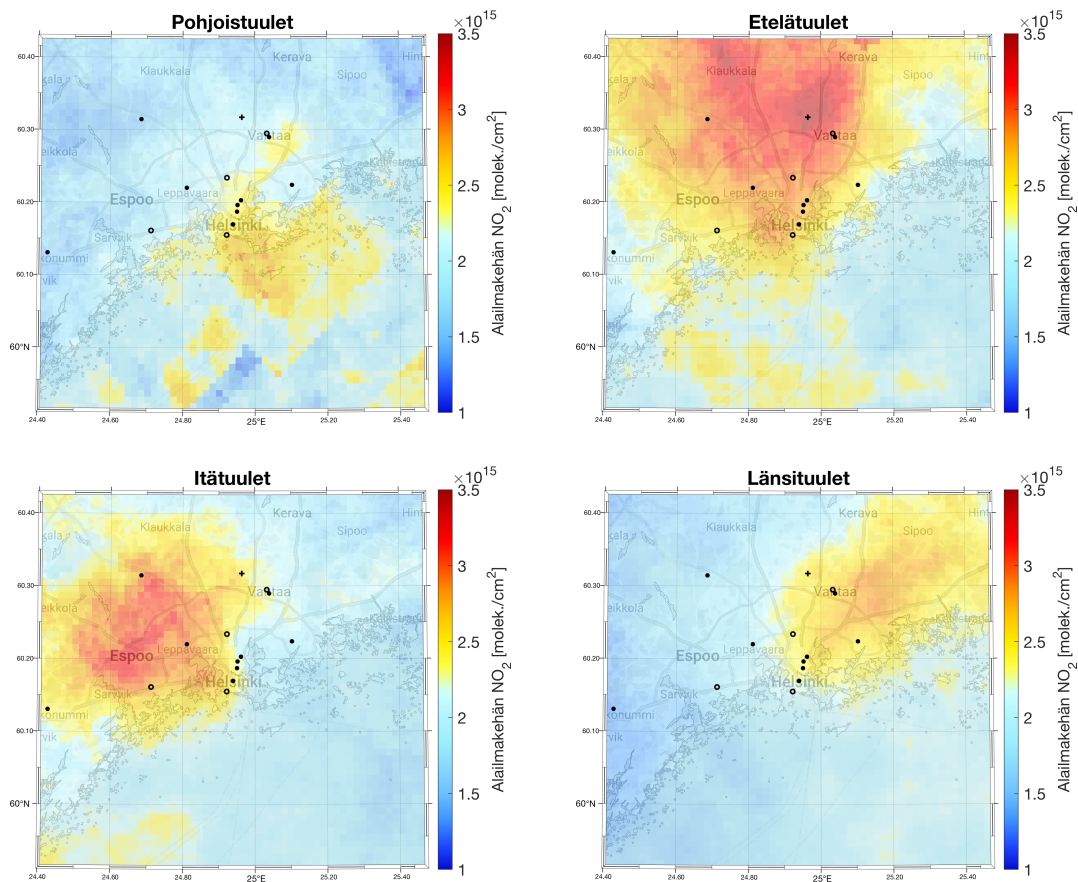
Edellä Suomen aluetta tarkasteltaessa tuulten vaikutusta mittauksiin tutkittiin keskittymällä vain heikkojen tuulten aikana tehtyihin mittauksiin, mikä korosti typpi-dioksidin lähteinä toimivia alueita kuten teitä. Vastaava kartta pääkaupunkiseudulle on kuvassa 19. Suurimmat NO_2 -päästöt näyttävät olevan lähellä Hämeenlinnanväylän ja Kehä I:n risteystä, sekä siitä etelään Hämeenlinnanväylän varrella. Väylävirasto (2018) mukaan Suomen vilkkaimmin liikennöity tieosuus vuonna 2018 oli Kehä I Hämeenlinnanväylän ja Tuusulanväylän välissä. Kuvassa 19 pitoisuudet ovat lisäksi korkeita Hämeenlinnanväylän ja Vihdintien ympäristössä Kehä I:n ja Kehä III:n välillä. Vuonna 2018 keskimääräiset liikennemäärät (ajoneuvoa vuorokaudessa) tällä välillä olivat noin 21 000 Vihdintiellä, 53 000 Hämeenlinnanväylällä ja 70 000 Tuusulanväylällä (Väylävirasto, 2018). Havaitut pitoisuudet ja liikennemäärät eroavat toisistaan, mikä voi selittyä satelliitin iltopäiväradalla: teiden liikennemäärien mukainen suuruusjärjestys voi erota keskimääräisestä satelliitin ylilentojen aikavälillä (noin klo. 11–15). Raskaan liikenteen määrän erot eri tieosuuksilla voivat myös osittain selittää havaittuja pitoisuuseroja, sillä ne tuottavat enemmän NO_2 -päästöjä.



Kuva 19: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo pääkaupunkiseudulla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019, kun ainoastaan heikkojen tuulten (alle 3 m/s) aikana tehdyt mittaukset on huomioitu. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $1 \times 1 \text{ km}^2$. Kuvaan on merkitty mustilla pisteillä HSY:n ylläpitämät pysyvät ilmanlaadun mittausasemat, ympyröillä vuonna 2019 käytössä olleet väliaikaiset asemat, ja +-merkillä Helsinki-Vantaan lentoasema.

Tuulten vaikutuksen tarkastelua voidaan jatkaa edelleen jakamalla mittaukset tuulen nopeuden lisäksi myös suunnan mukaan. Kuvassa 20 pitoisuusmittaukset on jaettu neljään eri tuulisektoriin pääilmansuuntien mukaan. Nähdään, että pääkaupunkiseudun NO_2 -päästöt leviävät lähialueille siten, kuin tuulen suunnan perusteella voi olettaakin. Satelliittimittausten avulla voidaan siis tutkia päästöjen leviämistä tuulten mukana. Pitoisuudet ovat selvästi alhaisempia pohjois- ja länsituulten

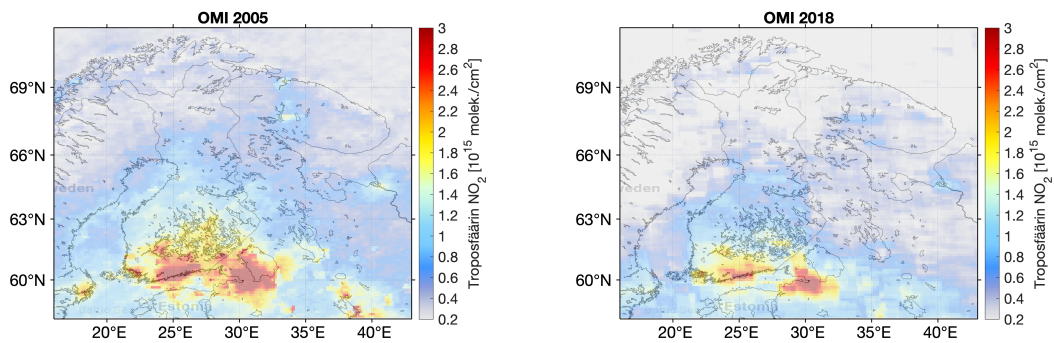
tapauksessa, mikä johtuu oletettavasti keskimäärin suuremmasta tuulennopeudesta (7,4 m/s ja 8,7 m/s, verrattuna etelä- ja itätuulten noin 6,2 m/s:iin). Tuulet ja niihin liittyvä turbulenssi levittävät päästöjä suuremmalle alueelle, mikä johtaa pienempiin pitoisuuksiin. Lisäksi pohjoistuulten tapauksessa vaikuttaa myös päästöjen leviäminen meren päälle, sillä merellä tuulee keskimäärin kovempaa kuin maalla. Pohjoistuulten kuvassa erityisesti meren yllä näkyvä pikselöityminen johtuu pienestä otoskoosta: tarkastellulla aikavälillä pääkaupunkiseudulla tuuli pääosin lännestä tai idästä (neljää pääilmansuuntaa tarkasteltaessa). Koska keskiarvon laskemiseen oli siten käytettävissä vähemmän satelliitin ylilentöjä, voi pohjoistuulten kuvassa vielä nähdä yksittäisten TROPOMIn pikselien muotoja.



Kuva 20: TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -pitoisuusmittausten keskiarvo pääkaupunkiseudun yllä aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $1 \times 1 \text{ km}^2$. Lisäksi mittaukset on jaettu pääilmansuuntien mukaan neljään eri tuulisektoriin sen perusteella, mistä suunnasta kullakin mittaushetkellä on tuullut. Tuulen nopeus on kaikissa kuvissa $>3 \text{ m/s}$.

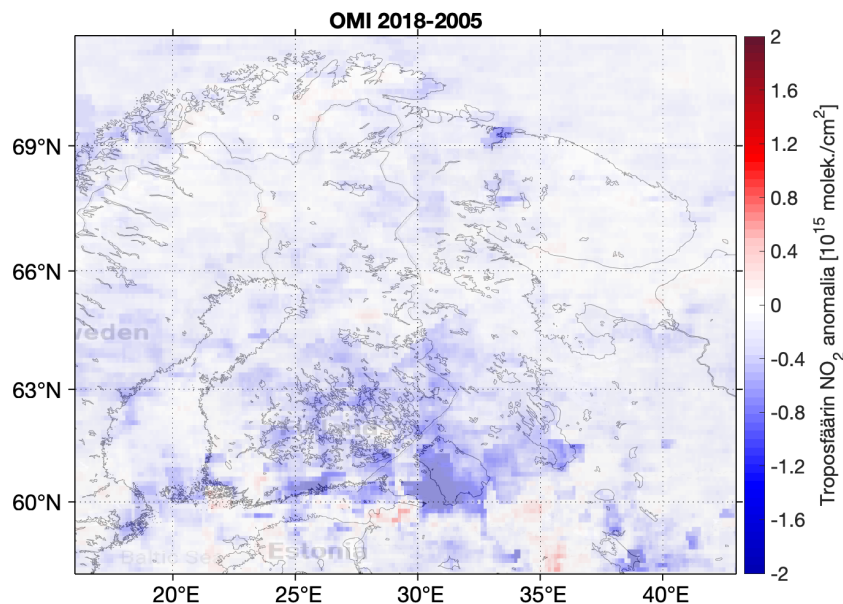
5 Troposfäärin typpidioksidin pitkäaikainen vaihtelu Suomessa ja lähialueilla

OMI-instrumentista saatu pitkän ajan (2005–2018) alailmakehän NO_2 -pitoisuuden mediaani koko Suomen alueella on noin $1,0 \times 10^{15}$ molek./ cm^2 ja Helsingissä noin $3,3 \times 10^{15}$ molek./ cm^2 . Suomen NO_2 -pitoisuudet ovat yleisesti suhteellisen matalia verrattuna esimerkiksi Keski-Euroopassa havaittuihin vastaaviin arvoihin. Suomessa erot NO_2 -pitoisuuksissa ovat selviä kaupunkien ja harvemmin asuttujen alueiden välillä, joka näkyy myös etelä-pohjoissuuntaisena erona. Kuvassa 21 on esitetty OMI-instrumentin mittaamat troposfäärin (alailmakehän) NO_2 -pitoisuudet vuosille 2005 ja 2018. Kohonneita NO_2 -arvoja nähdään pääasiassa suurimmissa kaupungeissa sekä niiden läheisyydessä. Suomen lähialueilta voidaan erottaa myös esimerkiksi Apatiitin kaivokset keski-Murmanskin alueella.



Kuva 21: OMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -mittausten keskiarvo Suomessa ja lähialueilla vuosina 2005 ja 2018. Mittaukset on sovitettu hilaan, jonka yksittäisen ruudun koko on $0,125^\circ \times 0,125^\circ$.

OMI-instrumentin pitkäaikaiset mittaukset osoittavat, että Suomessa alailmakehän NO_2 -pitoisuudet ovat keskimäärin laskeneet vuodesta 2005 vuoteen 2018 (kuva 22). Suurimpia muutoksia havaitaan mm. pääkaupunkiseudulla, jossa troposfäärin NO_2 -pitoisuus on laskenut noin $1,5 \times 10^{15}$ molek./ cm^2 :iin. Kehitys NO_2 -pitoisuuksissa on ollut samansuuntaista myös muualla Euroopassa.



Kuva 22: OMI-instrumentin mittauksista laskettu alailmakehän NO₂-pitoisuuden muutos vuodesta 2005 vuoteen 2018. Sininen väri merkitsee laskeneita, punainen nousseita NO₂-pitoisuuksia.

6 Satelliittihavaintojen vertailu maa-asemien havaintoihin

Edellä esitettyjen pitoisuuskarttojen avulla nähtiin, että satelliitit pystyvät erottamaan erikokoisia typpidioksidin lähteitä. Ilmanlaadun seurannan kannalta on kuitenkin hyvin olennaista tietää myös kuinka hyvin satelliittimittaukset vastaavat perinteisiä *in situ* -mittauksia. Tätä tarkastellaan erilaisten tilastollisten menetelmien avulla. Ensiksi keskitytään satelliitin ja maa-asemien vastaavuuden tarkasteluun pääkaupunkiseudulla, sitten yleisesti ottaen koko maassa, ja viimeiseksi tutkitaan tätä vastaavuutta eri puolilla Eurooppaa. Kaikissa tarkasteluissa satelliittidataa käytetään TROPOMI-instrumentin mittauksia. Maa-asemien mittaukset puolestaan koostuvat ensiksi perinteisten ilmanlaatuasemien mittauksista, mutta lopuksi tarkastellaan myös Ilmatieteen laitoksen operoiman Pandora-aseman mittauksia.

Kaikkien seuraavissa alakappaleissa tehtävien vastaavuustarkasteluiden pohjana toimii sama periaate: satelliitti-instrumentin ja maa-asemien mittaukset sovitetaan yhteen ajassa ja paikassa, jotta niitä voidaan vertailla keskenään. Paikassa tehtävä sovitus tehtiin valitsemalla ainoastaan ne satelliitin mittauspikselit, joiden alueella tarkasteltava maa-asema sijaitsee. Ajassa tehtävä sovitus tehtiin ilmanlaatuasemien tapauksessa interpoloimalla mittaukset valittujen satelliittipikselien mittausaikoihin. Ilmanlaatuasemien data oli käytettävissä tunnin keskiarvoina, eli interpolointi tehtiin enintään puolen tunnin päähän lähimmästä ilmanlaatuaseman mittauksesta. Pandora-aseman tapauksessa keskiarvoistettiin mittaukset 10 min sisällä satelliitin ylilennosta.

6.1 Satelliitti- ja maanpintainstrumenttien erot

Ennen satelliitin ja ilmanlaatuasemien mittausten vertailua on syytä käydä läpi itse instrumenttien välisiä tärkeimpiä eroja. Satelliittimittaukset koostuvat yksittäisistä pikseleistä, joilla jokaisella on jokin alueellinen kattavuus eli pinta-ala. Pikselit edustavat alueensa NO_2 -pitoisuuksien keskiarvoa, eli mitä suurempi pikseli, sitä huommin sen arvo kuvastaa yksittäisiä pikselin alueella olevia päästölähteitä. Tämän lisäksi ilmakehän sironnasta johtuen satelliitti-instrumentit ovat vähiten herkkiä lähellä maan pintaa oleville pitoisuuksille, missä pääosa typpidioksidista yleensä on. Ilmanlaatuasemat puolestaan tekevät mittauksia lähellä maan pintaa, ja ne ovat hyvin herkkiä lähellään oleville päästölähteille.

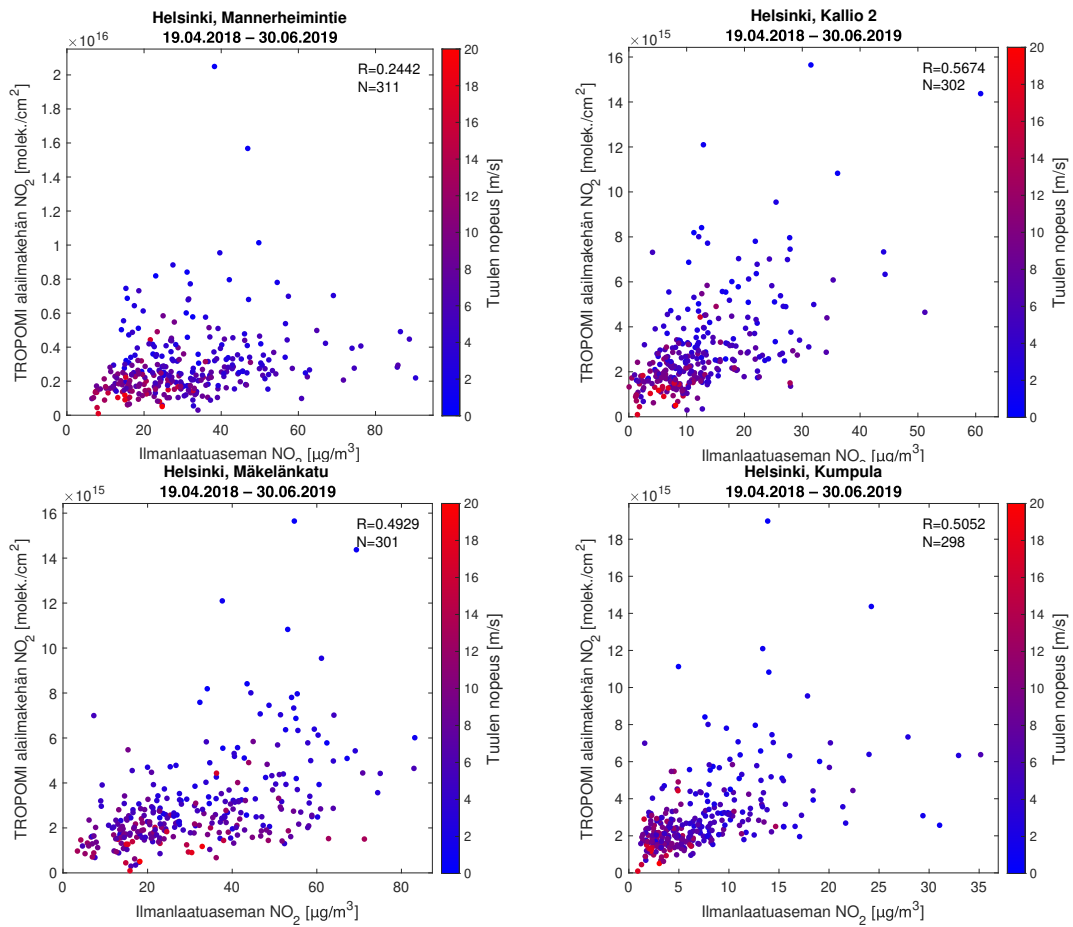
Ilmanlaatuasemat mittaavat kaasujen massapitoisuutta lähellään olevassa ilmassa, jolloin niiden mittausten yksikkö on kg/m^3 (tai yleisemmin $\mu\text{g}/\text{m}^3$). Satelliittinstrumentti puolestaan mittaa kaasun molekyylien lukumääräpitoisuutta koko troposfäärin läpi ulottuvassa ilmakehän pylväässä (tai stratosfäärin/koko ilmakehän), jolloin sen yksikkö on $\text{molek.}/\text{m}^2$, tai yleisemmin $\text{molek.}/\text{cm}^2$ (pinta-alayksikön yläpuolisessa ilmakehän pylväässä olevien kaasumolekyylien lukumäärä). TROPOMI ja ilmanlaatuasemat mittaavat siis NO_2 :n pitoisuutta eri yksiköissä, minkä vuoksi niiden mittausten keskinäinen vertailu ei ole yksikäsitteistä.

Ilmatieteen laitos operoi Pandora-nimistä instrumenttia, joka on osa laajempaa ESAn ja NASAn yhteistyössä koordinoimaa maailmanlaajuista Pandonia-asemaverkostoa (Pandonia Global Network, 2019). Sen tavoitteena on toimia satelliitti-instrumenttien validointiverkostona, eli todentaa satelliittien tekemät mittaukset vastaavaa mittaustekniikkaa käyttävillä maa-asemilla. Pandora on UV:n ja näkyvän valon aallonpituuksilla mittaava spektrometri, joka tekee mittauksensa aurinkoa kohti $1,6^\circ$ levyisellä näkökentällä. Kuten passiiviset satelliitti-instrumentit, myös Pandora määrittää ilmakehän kaasujen pitoisuuksia auringon valon avulla, se on siis maan pinnalta käsin operoiva kaukokartoitusinstrumentti. Pandora mittaa NO_2 :n pitoisuutta koko ilmakehän pylväässä, eli sen mittausten yksikkö on sama kuin satelliittimittauksissa. Tämä tekee Pandoran ja esim. TROPOMIn mittausten vertailusta yksinkertaisempaa ilmanlaatuasemiin verrattuna. Kapean näkökentän vuoksi Pandora on kuitenkin ilmanlaatuasemien tapaan herkempi paikallisten pitoisuuksien vaihteluille kuin TROPOMI. Ilmatieteen laitoksella on aiemmin tutkittu myös Pandora- ja TROPOMI-instrumenttien mittausten välistä vastaavuutta (Ialongo ym., 2020), ja tämän tutkimuksen tulosten yhteenveto esitetään tämän luvun lopuksi.

6.2 Helsinki ja pääkaupunkiseutu

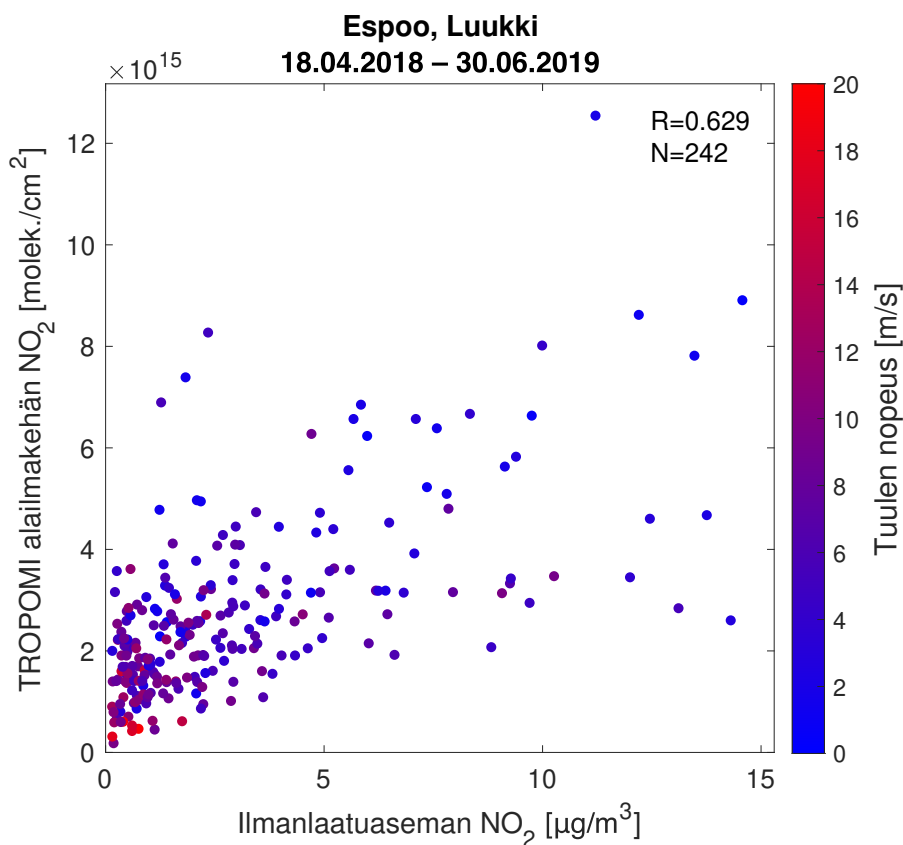
TROPOMIn ja ilmanlaatuasemien mittausten vastaavuuksien tarkastelu aloitetaan tutkimalla yksittäisiä pääkaupunkiseudulla sijaitsevia asemia. Kuvaan 23 on koottu neljän Helsingissä sijaitsevan aseman vertailut. Kaavioissa oleva korrelaatio (R) kuvaa TROPOMIn ja ilmanlaatuaseman mittausten välistä riippuvuutta. Kuvasta nähdään että paras korrelaatio on Kallion mittaasemalla (0,57), matalin puolestaan Mannerheimintiellä (0,24). Mannerheimintien matala korrelaatio voidaan selittää satelliittimittauksiin liittyvällä spatiaalisella keskiarvoistumisella (yksittäinen pikseli edustaa alueensa keskiarvoa) alueella, missä on paljon vaihtelevia paikallisia päästölähteitä. Kallion ja vilkkaasti liikennöidyn Mäkelänkadun hyvä korrelaatio on

kuitenkin yllättävää. Kaavioista nähdään myös tuulen vaikutus pitoisuuksiin: kovat tuulet levittävät päästöjä laajemmalle alueelle, mikä pienentää pitoisuuksia.



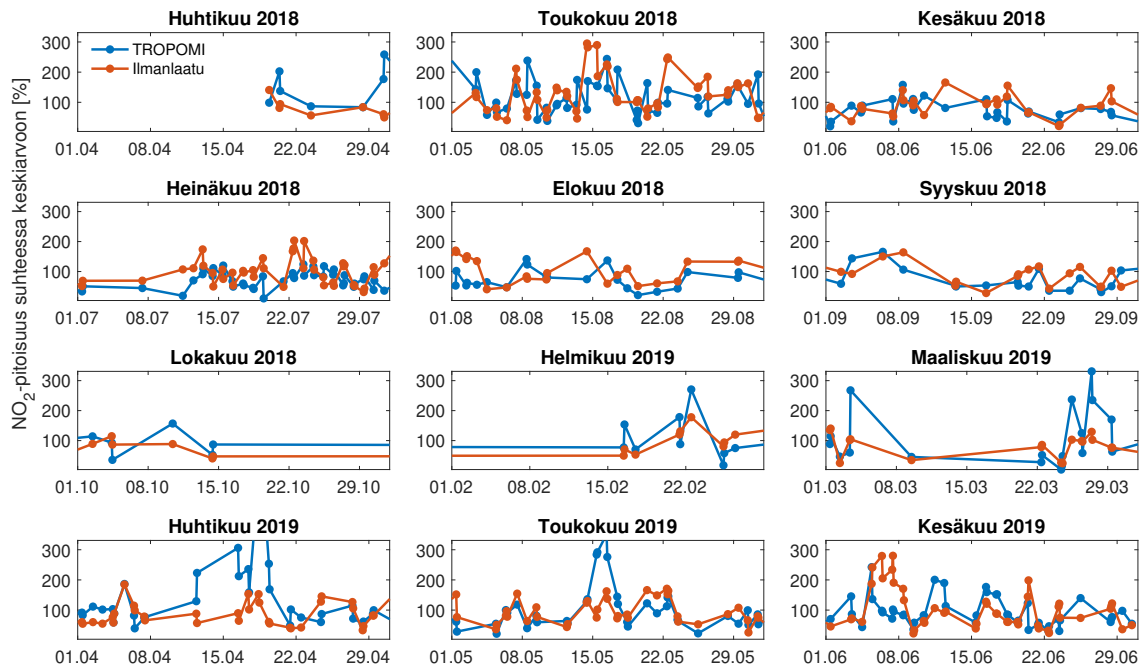
Kuva 23: Ajassa ja paikassa yhteensovitettuja typpidioksidin satelliitti- ja ilmanlaatuasemamittauksia neljällä eri asemalla Helsingissä. Kaavioiden ylänurkassa on mittausten välinen korrelaatio (R) ja niiden lukumäärä (N). Pisteiden värillä on merkitty kunkin mittauksen aikaan vallinnutta tuulen nopeutta.

Satelliitin ja ilmanlaatuaseman mittausten voidaan odottaa korreloivan parhaiten alueella, missä päästölähteiden suuruus ei vaihtele voimakkaasti ajassa ja paikassa. Pääkaupunkiseudun ilmanlaatumittausten tausta-asemana toimii Espoon Luukin asema, jonka vertailun tulos nähdään kuvassa 24. Asemalla saavutetaan odotusten mukaisesti pääkaupunkiseudun paras korrelaatio TROPOMIn mittausten kanssa: 0,63.

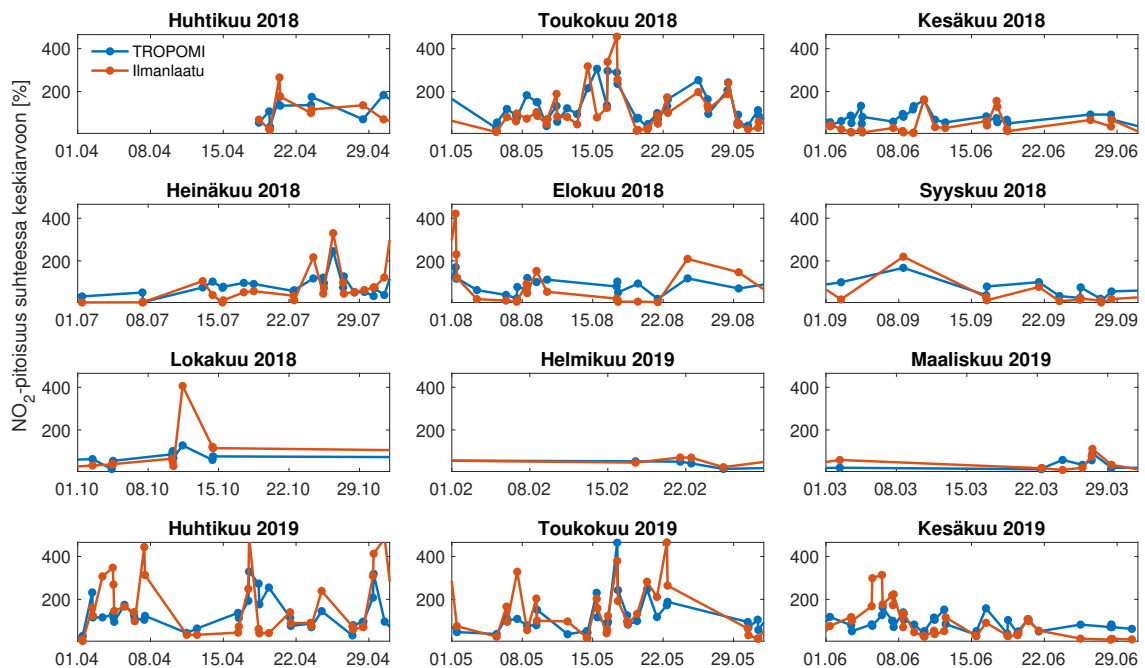


Kuva 24: Ajassa ja paikassa yhteensovitettuja typpidioksidin satelliitti- ja maa-ase-
mamittauksia Espoon Luukin ilmanlaatuasemalla. Kaavion ylänurkassa on mittaus-
ten välinen korrelaatio (R) ja niiden lukumäärä (N). Pisteiden värillä on merkitty
kunkin mittauksen aikaan vallinnutta tuulen nopeutta.

Satelliitin ja ilmanlaatuaseman mittausten korrelaatiota voidaan tarkastella myös
aikasarjan avulla. Kuvissa 25 ja 26 on aikasarjat Helsingin Mannerheimintien ja Es-
poon Luukin ilmanlaatuasemilta. Kuvissa olevat arvot ovat suhteessa kyseisen in-
strumentin koko aikasarjan keskiarvoon, sillä eri yksiköiden vuoksi niiden mittauksia
ei muuten voitaisi sijoittaa samalle akselille. Kuvista nähdään sama asia mikä todet-
tiin jo korrelaation perusteella: mittaukset seuraavat paremmin toisiaan Luukin ase-
malla. Huomionarvoista on myös, että molempien instrumenttien mittaukset ovat
pääsääntöisesti samaa kokoluokkaa suhteessa koko aikasarjan keskiarvoon, vaikka
ne tekevätkin mittauksensa kokonaan erilaisilla periaatteilla. Lokakuun ja maalisi-
kuun välisen ajan mittausten pieni määrä johtuu auringonvalon vähydestä, mikä
yleisesti vaikeuttaa mittauksia ja keskitalvella estää auringonvalon avulla tehtävät
hivenkaasujen satelliittimittaukset.

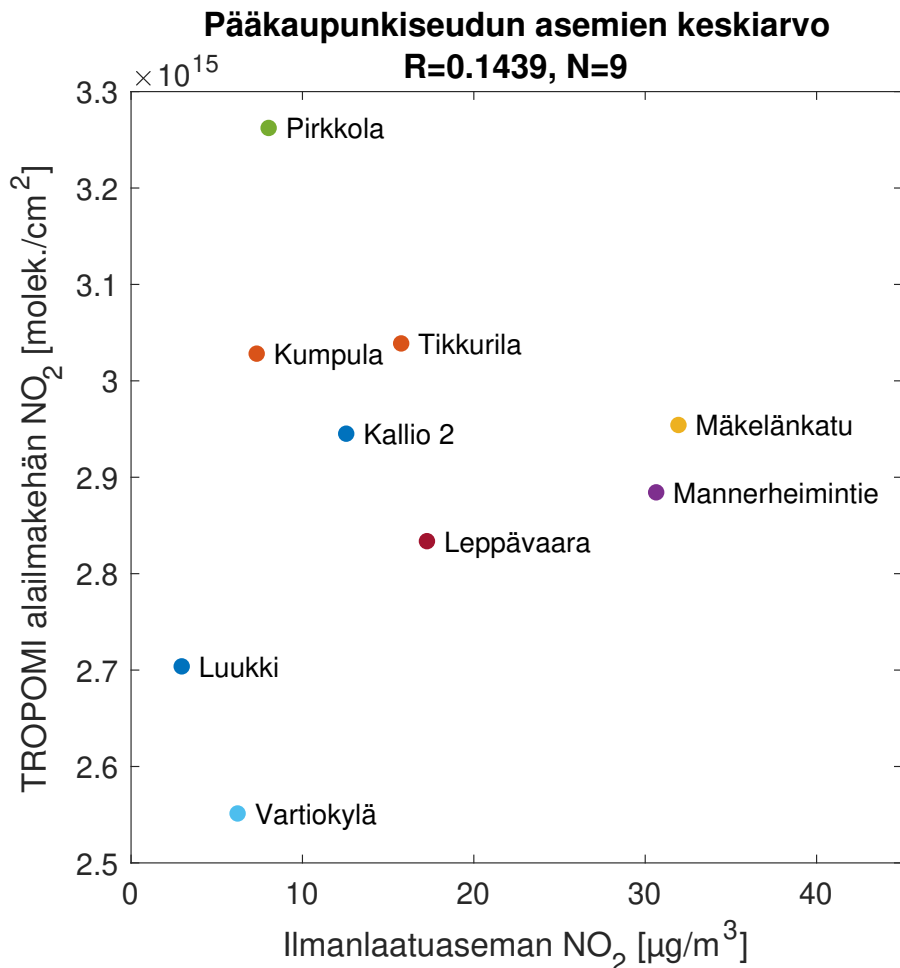


Kuva 25: Yhteensovitetujen TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten aikasarja Helsingin Mannerheimintien ilmanlaatuasemalla. Arvot ovat suhteessa kummankin instrumentin koko aikasarjan keskiarvoon.



Kuva 26: Yhteensovitetujen TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten aikasarja Espoon Luukin ilmanlaatuasemalla. Arvot ovat suhteessa kummankin instrumentin koko aikasarjan keskiarvoon.

Kuvassa 27 on yhteenveto yhteensovitettujen satelliitti- ja maa-asemamittausten keskiarvoista eri pääkaupunkiseudun ilmanlaatuasemilla. Ideaalitapauksessa kaikki pisteet olisivat samalla nousevalla suoralla, mutta eri asemien poikkeavista korrelaatioista johtuen näin ei ole. Yksittäisten asemien tapauksessa TROPOMIn ja ilmanlaatuaseman mittausten vastaavuus riippuu siis paljon aseman paikallisista olosuhteista.

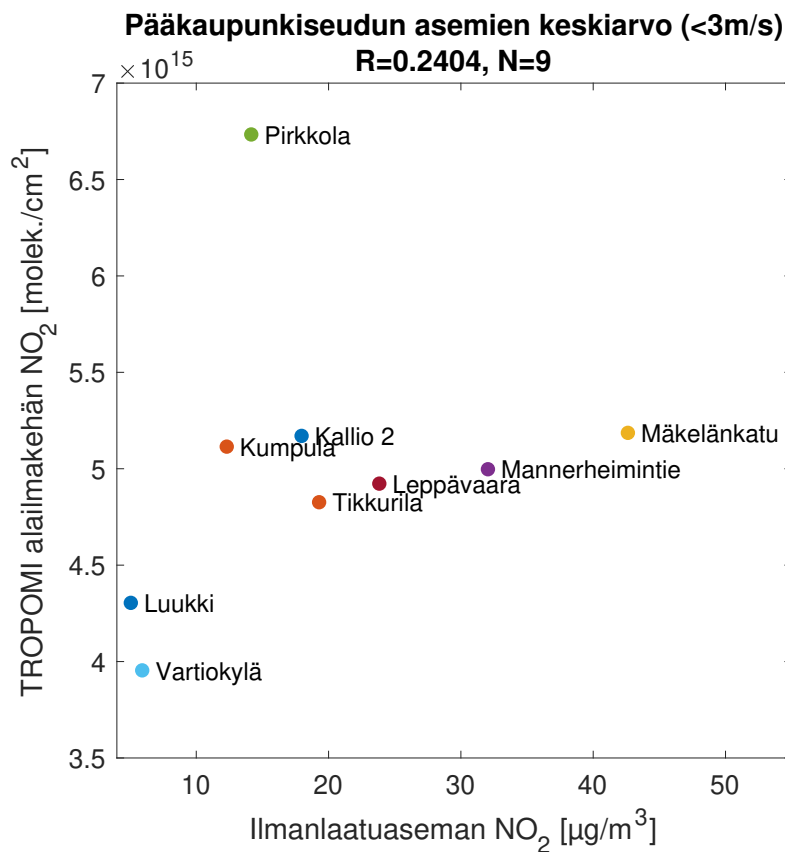


Kuva 27: Yhteensovitettujen TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo eri pääkaupunkiseudun ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Ylhäällä on asemien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N). Pirkkolan asema on vuoden 2019 ajan toiminnassa ollut siirrettävä asema, minkä vuoksi sen data kattaa vain aikavälin 16.2.–30.6.2019.

Tuuli vaikuttaa sekä ilmanlaatuasemien että TROPOMIn mittauksiin levittämällä NO₂:n päästöjä suuremmalle alueelle. Sillä on kuitenkin suurempi vaikutus satelliitin mittauksiin, sillä satelliitti mittaa pitoisuutta koko alailmakehän läpi ulottuvassa ilmakehän pylväässä, kun taas ilmanlaatuasema mittaa pitoisuutta lähellä maan pintaa. Tuuli on heikompi lähellä maata maan pinnan kitkan vuoksi, mihin vaikuttavat esimerkiksi erilaiset esteet kuten rakennukset ja puut. Jokainen asema sijaitsee tuuliolosuhteiltaan erilaisessa paikassa, mikä saattaa huonontaa niiden välistä korrelaatiota. Lisäksi satelliitti-pikselit edustavat laajemman alueen keskimää-

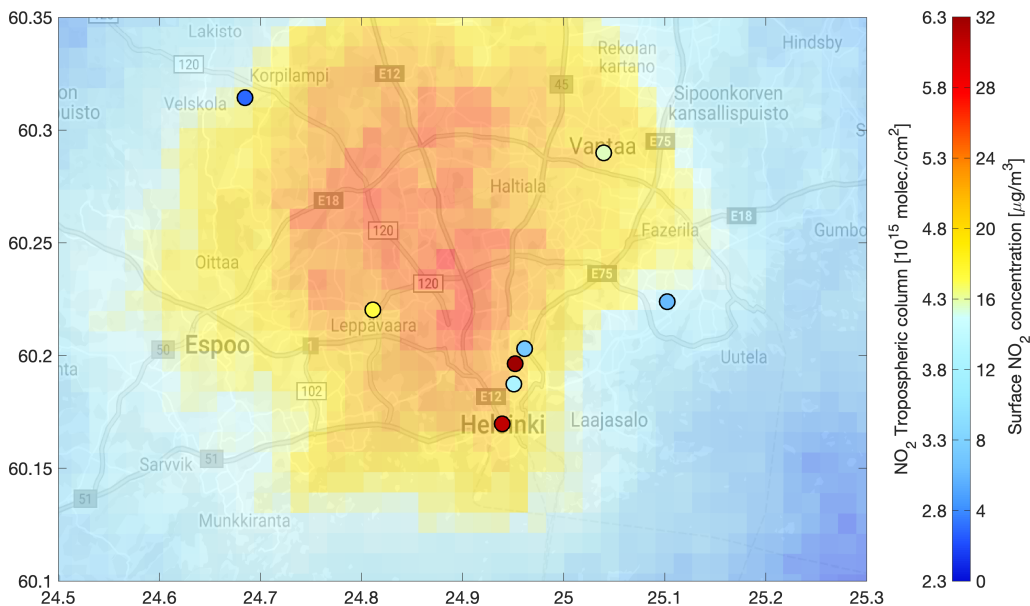
räistä arvoa. Tämän vuoksi on kiinnostavaa toistaa kuvan 27 tarkastelu ottaen huomioon ainoastaan heikkojen tuulten vallitessa tehdyt mittaukset (kuva 28). Tuulen nopeuden ylärajaksi valittiin 3 m/s. Asemien välinen korrelaatio on nyt huomattavasti parempi: ainoa varsinainen poikkeus on Pirkkolan väliaikainen asema, jota ilman korrelaatio on 0,69. Tuulella vaikuttaa siis olevan merkittävä vaikutus asemien väliseen korrelaatioon. Pirkkolan aseman poikkeava tulos saattaa johtua sen väliaikaisesta luonteesta: aseman mittaukset ovat saatavilla vasta 16.2.2019 alkaen, minkä vuoksi sen keskiarvo edustaa eri ajanjaksoa muihin asemiin verrattuna.

Hyvästä korrelaatiosta huolimatta asemien keskinäinen suuruusjärjestys ei ole kuvassa 28 kuitenkaan täysin yhtäläinen satelliitin ja ilmanlaatuasemien mittausten perusteella. Esimerkiksi Kumpulan ja Kallion keskimääräiset pitoisuudet ovat TROPOMI:n mukaan suurempia kuin Mannerheimintien, mutta maa-asemamittausten mukaan selkeästi pienempiä. Näitä eroja voi jälleen osaltaan selittää satelliittipikseleihin aina liittyvä spatiaalinen keskiarvoistuminen.



Kuva 28: Yhteensovitetun TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo eri pääkaupunkiseudun ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019, kun huomioon on otettu ainoastaan heikkojen tuulten (alle 3 m/s) vallitessa tehdyt mittaukset. Ylhäällä on asemien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N). Pirkkolan asema on vuoden 2019 ajan toiminnassa ollut siirrettävä asema, minkä vuoksi sen data kattaa vain aikavälin 16.2.–30.6.2019.

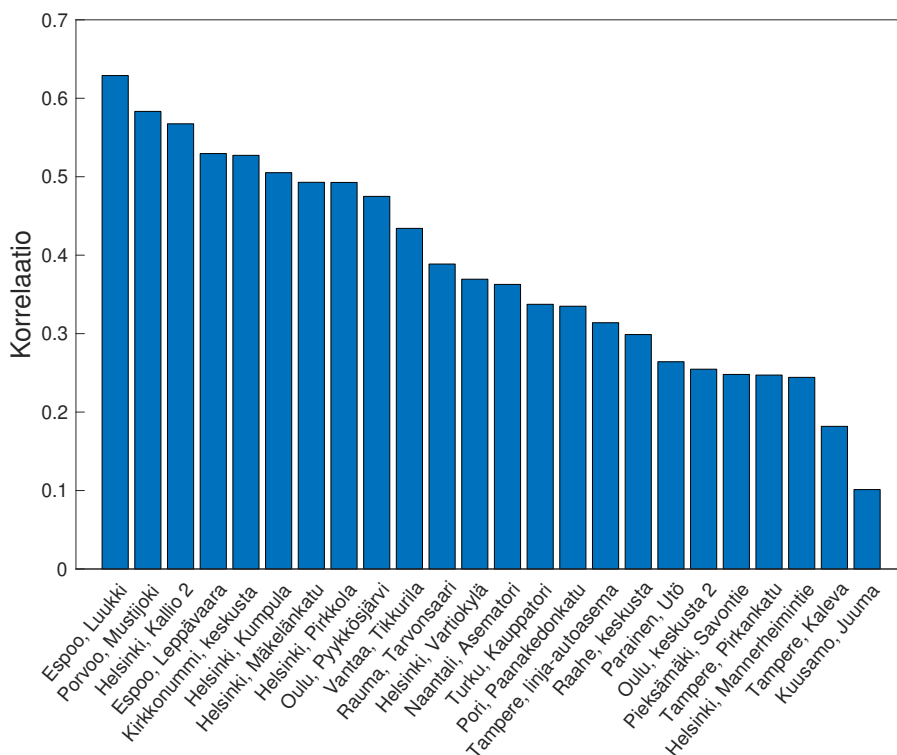
Kuvassa 29 on esitetty ilmanlaatuasemamittausten sekä TROPOMI-instrumentin mittaamien troposfäärin NO_2 -pitoisuuksien keskiarvot pääkaupunkiseudulla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Kokonaisuutena katsottuna korkeat maa-asemien mitaamat pitoisuudet (punaiset ympyrät) vastaavat suhteellisen korkeita TROPOMI:n mittaamia alailmakehän (troposfäärin) pylväspitoisuuksia, kun taas alhaiset pitoisuudet lähellä maanpintaa (siniset ympyrät) vastaavat suhteessa alhaisempia pylväspitoisuuksia pääkaupunkiseudun reunamilla. Kuvasta nähdään myös, että Mäkelänkadun aseman keskimääräinen pitoisuus on paljon korkeampi kuin sen lähellä sijaitsevien Kallion ja Kumpulan asemien vastaavat pitoisuudet, vaikka ero alailmakehän pylväspitoisuuksissa on pieni. Tämä on odotettua, sillä ilmanlaatuasemat ovat herkempiä pitoisuuksien vaihteluille kuin alueensa keskimääräistä pitoisuutta edustavat satelliittimittaukset. Esimerkiksi mäellä sijaitseva Kumpulan asema edustaa erilaisia olosuhteita lähellä maanpintaa kuin vilkkaan tien varrella sijaitseva Mäkelänkadun asema. Lopuksi voidaan huomioida, että Kehä I:n ja Kehä III:n välisellä korkeiden pylväspitoisuuksien alueella ei tällä hetkellä ole pysyviä ilmanlaatuasemia.



Kuva 29: Ilmanlaatuasemamittausten keskiarvot (värilliset ympyrät) sekä TROPOMI-instrumentin tekemien alailmakehän NO_2 -pitoisuusmittausten keskiarvo pääkaupunkiseudun yllä aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Sekä TROPOMI-instrumentin havainnot ($\text{molek.}/\text{cm}^2$) että ilmanlaatuasemamittaukset ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) on esitetty samalla vääriskaalalla, mutta eri yksiköistä johtuen niiden absoluuttinen skaala on eri (kuvassa oikealla).

6.3 Suomi

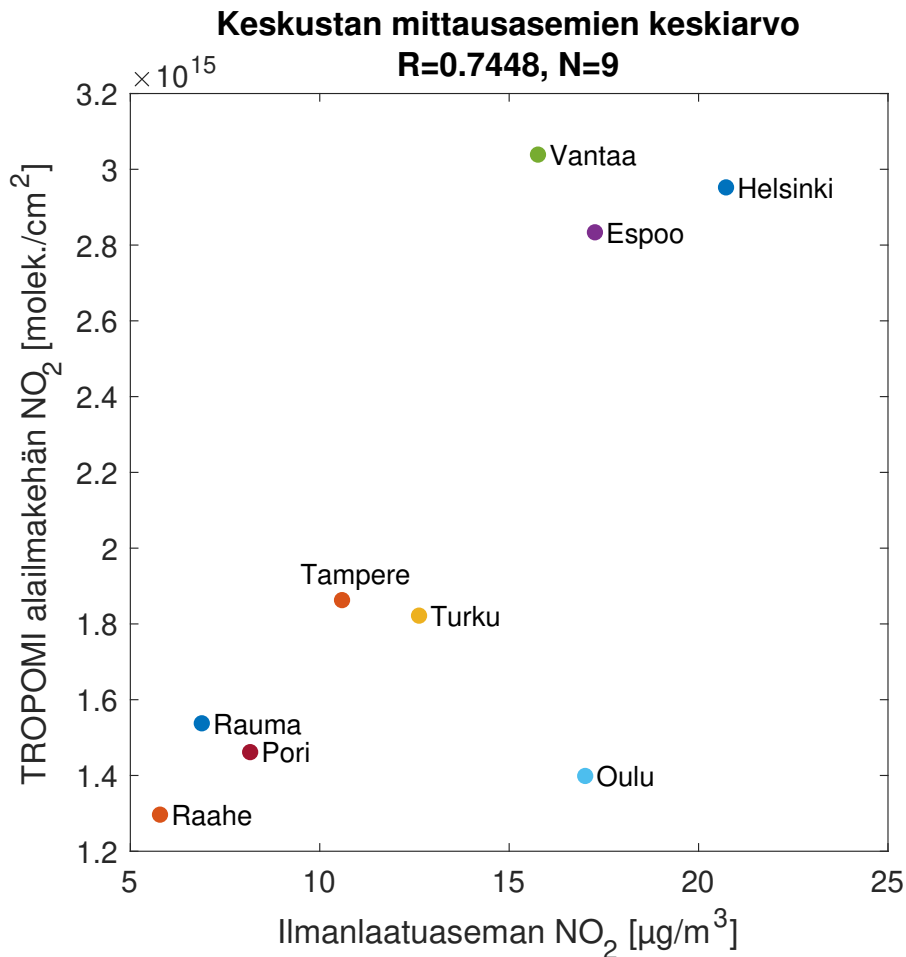
Ilmanlaatumittausten ja satelliittihavaintojen vastaavuustarkastelu toistettiin usealle ilmanlaatuasemalle eri puolella Suomea. Asemakohtaisia erillisiä kuvaajia ei kuitenkaan tässä näytetä, vaan tulokset esitetään kootusti. Kuvassa 30 on yhteensovitetettujen TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten välinen korrelaatio kaikilla tarkastelluilla asemilla. Vain kuudella asemalla korrelaatio ylittää 0,5, yhdeksällä se on yli 0,47. Vaikka poikkeuksia on (esim. Mäkelänkadun asema Helsingissä), yleisesti ottaen huonoin korrelaatio löytyy asemilta jotka sijaitsevat joko vilkkaasti liikennöidyllä alueella (esim. Mannerheimintie ja Tampere, Pirkankatu), tai vastavuoroisesti hyvin alhaisten pitoisuuksien alueella (esim. Kuusamo, Juuma ja Pieksämäki, Savontie). Kuten aiemmin mainittiin, merkittävästi vaihteleviin päästöihin liittyvä huono korrelaatio johtuu satelliitin vaikeudesta erottaa yksittäistä päästölähdettä, jollaiselle puolestaan ilmanlaatuaseman kaltainen *in situ* -instrumentti on hyvin herkkä (olettaen että lähde on aivan aseman vieressä). Jos taas pitoisuudet ovat lähellä tai alle TROPOMIn havaitsemisrajan (pienin pitoisuus jonka instrumentti pystyy luotettavasti mittaamaan), eivät mittaukset ole enää luotettavia ja korrelaatio heikenee. Paras korrelaatio löytyy siis keskimäärin niiltä asemilta, jotka ovat näiden kahden ääripään välissä.



Kuva 30: Yhteensovitetettujen NO₂:n satelliitti- ja maa-asemamittausten korrelaatio ilmanlaatuasemilla eri puolilla Suomea aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019.

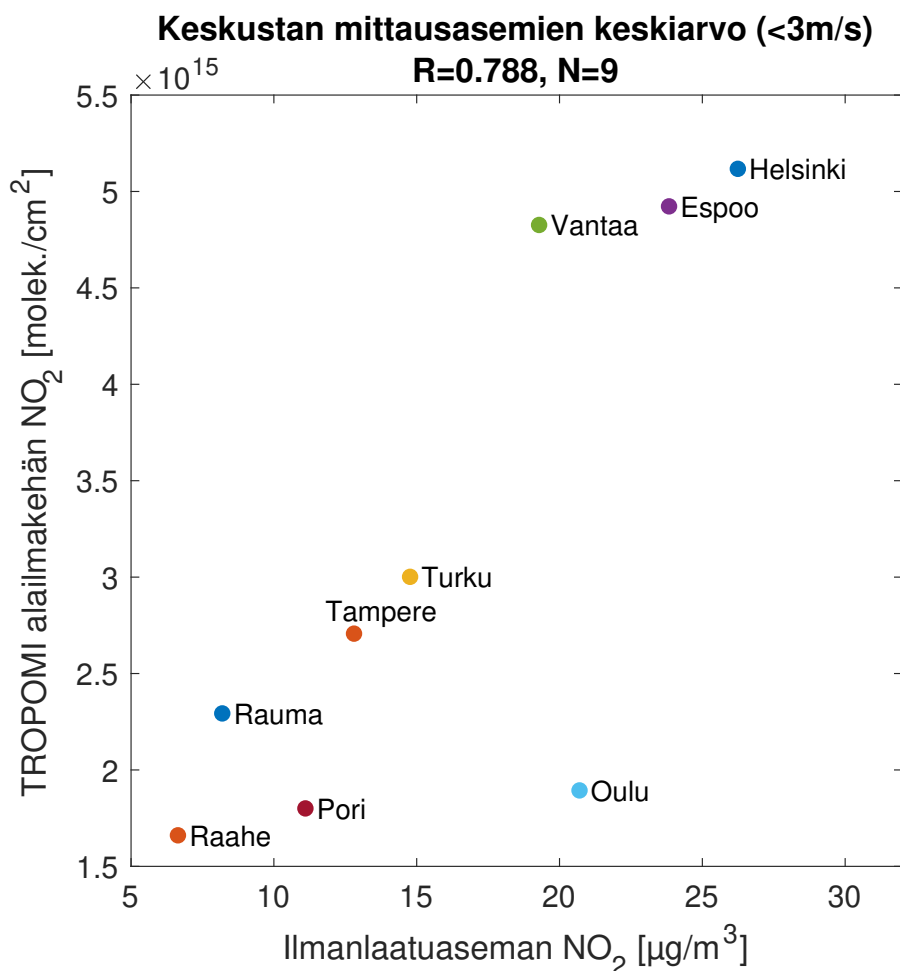
Mittausten vastaavuutta voidaan tarkastella yksittäisten asemien lisäksi myös asemien muodostamina kokonaisuuksina. Kuvassa 31 on joidenkin valittujen kaupunkien keskustojen mittausten keskiarvoja. Jokaisesta kaupungista on siis valittu yksi tai useampi ilmanlaatuasema edustamaan sen keskustan pitoisuuksia, jonka

jälkeen näiden asemien yhteensovitetuista mittauksista on laskettu kokonaisuutena keskiarvo. Taulukossa 1 on listattu kunkin kaupungin tapauksessa valitut asemat. Keskustojen mittaukset korreloivat hyvin keskenään, vain Oulu erottuu selkeästi muista: sen satelliittimittausten keskiarvo on liian alhainen suhteessa muihin kaupunkeihin. Syytä tähän ei tällä hetkellä tiedetä. Ilman Oulua korrelaatio nousee 0,94 asti, mikä on poikkeuksellisen hyvä tulos.



Kuva 31: Yhteensovitettujen NO₂:n TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo valittujen kaupunkien keskustojen ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Ylhäällä on kaupunkien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N).

Kuten kuvan 11 perusteella jo aiemmin pääteltiin, Turun pitoisuudet ovat Tampereetta korkeampia ilmanlaatuasemien mittausten perusteella. Sama ei kuitenkaan päde samanaikaisiin TROPOMI:n mittauksiin, joiden mukaan suuruusjärjestys on päinvastainen. Jos tarkastelu kuitenkin rajoitetaan kuvan 11 mukaisesti vain heikkojen tuulten aikana tehtyihin mittauksiin (kuva 32), kääntyy myös TROPOMI:n suuruusjärjestys odotetun kaltaiseksi. Myös Helsingin, Vantaan ja Espoon keskinäinen järjestys on nyt molempien mittausten mukaan sama, mutta toisaalta Porin ja Rauman mittaukset eroavat suhteessa vielä enemmän toisistaan. Kokonaisuutena voidaan kuitenkin sanoa, että tuulella on selkeä vaikutus ilmanlaatuasema- ja satelliittimittausten väliseen korrelaatioon.



Kuva 32: Yhteensovitetun NO₂:n TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo valittujen kaupunkien keskustojen ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019, kun huomioon on otettu ainoastaan heikkojen tuulien (alle 3 m/s) aikana tehdyt mittaukset. Ylhäällä on kaupunkien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N).

Erlaiset tuoliolosuhteet ja satelliittipikselien spatiaalinen keskiarvoistuminen hankaloittavat siis satelliittimittausten vertailtavuutta yksittäisillä ilmanlaatuasemilla. Laajempaa aluetta edustavat usean aseman kokonaisuudet ovat vähemmän alttiita molemmille vaikutuksille, ja siten paremmin vertailtavissa. Tämä ero tulee tulevaisuudessa kaventumaan, kun yhä tarkemman maaresoluution omaavia satelliittinstrumentteja otetaan käyttöön.

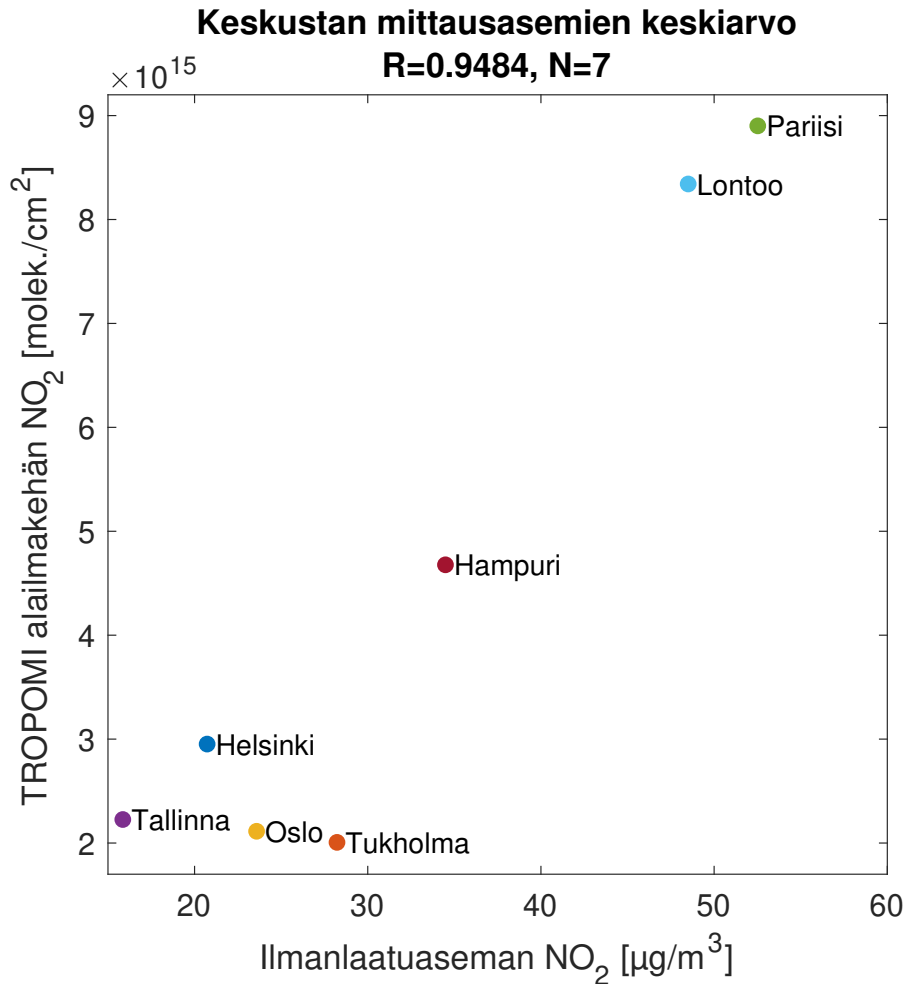
Taulukko 1: Kaupunkien keskustojen pitoisuuksia edustamaan valitut *in situ* -ilmanlaatuasemat kuvissa 31 ja 33.

Kaupunki	Valitut asemat
Espoo	Leppävaara Lökkisepänkuja
Helsinki	Kallio 2, Kumpula, Mäkelänkatu, Mannerheimintie
Oulu	Keskusta 2
Pori	Paanakedonkatu
Raahe	Keskusta
Rauma	Tarvonsaari Hallikatu
Tampere	Kaleva, Linja-autoasema, Pirkankatu
Turku	Kauppatori
Vantaa	Tikkurila Neilikkatie
Hampuri	Altona Elbhang, Kieler Straße, Max-Brauer-Allee II, Sternschanze, Stresemannstraße
Lontoo	Bloomsbury, Marylebone Road, Southwark A2 Old Kent Road, Tower Hamlets Roadside, Westminster
Oslo	Bygdøy Alle, Hjortnes, Kirkeveien
Pariisi	Av Champs Elysees, Boulevard Haussmann, PARIS 7eme, Place de l'Opéra, Quai des Celestins, Rue Bonaparte
Tallinna	Liivalaia, Õismäe
Tukholma	E4/E20 Lilla Essingen, Folkungagatan 70, Hornsgatan 108 Gata, St. Eriksgatan 83, Sveavägen 59, Torkel Knutssongatan

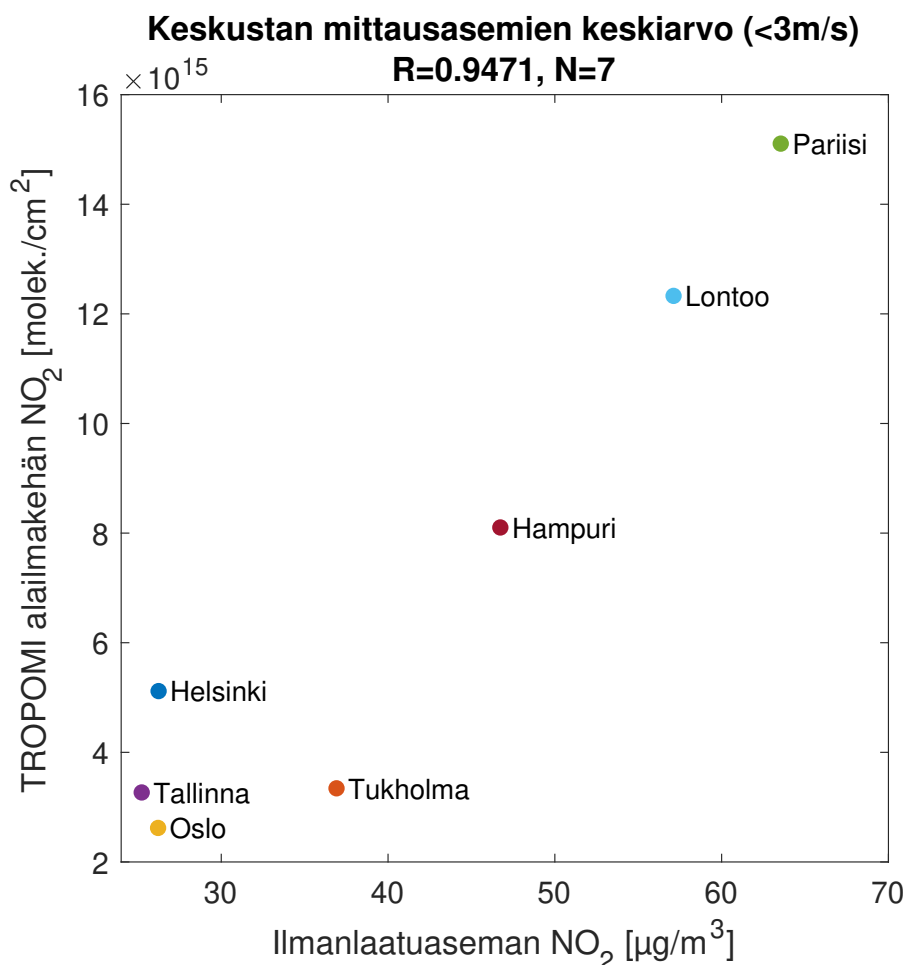
6.4 Eurooppa

Satelliitti-instrumenttien pääasiallisena etuna on niiden kyky tehdä mittauksia joka puolelta maapalloa. Mittauksissa tarvitaan syötetietona mm. tietoa maanpinnan heijastavuudesta, typpidioksidin ja lämpötilan pystyjakaumasta, sekä pilvisyydestä. Nämä tiedot tulevat esimerkiksi erilaisista malleista, minkä vuoksi on mahdollista että niihin liittyvä epävarmuus vaihtelee alueellisesti. On siis mahdollista, että satelliitti- ja maa-asemamittausten välinen vastaavuus vaihtelee suuremman maantieteellisen alueen sisällä. Tämän mahdollisuuden tutkimiseksi kuvaa 31 vastaava tarkastelu toistettiin usealle eurooppalaiselle kaupungille. Tulos on esitetty kuvassa 33, ja sitä varten valitut keskustojen ilmanlaatuasemat on listattu taulukossa 1. Tulos on pitkälti sama kuin kuvassa 31: keskustojen ilmanlaatuasemien ja TROPOMin mittaukset korreloivat erittäin hyvin eri kaupunkien välillä. Ainoana poikkeuksena näyttäisivät olevan Oslo ja Tukholma, joiden tapauksessa TROPOMin mittaukset ovat liian alhaisia ilmanlaatuasemien mittauksiin verrattuna. Tulos kuitenkin muuttuu, jos tuulen vaikutus jälleen kerran minimoidaan ottamalla huomioon ainoastaan heikkojen tuulien aikaiset mittaukset (kuva 34). Nyt Tukholma, Hampuri, Lontoo ja Pariisi ovat käytännössä kaikki samalla suoralla (korrelaatio 1,0), ja Helsinki, Tallinna ja Oslo sen yläpuolella. Tämän tuloksen mukaan, ilman tuulen vaikutusta, TROPOMin Helsingin mittaukset ovat siis liian suuria ilmanlaatuasemien mittauksiin

verrattuna. Syytä näihin eroihin ei tällä hetkellä tiedetä, mutta selittävänä tekijänä voivat olla esimerkiksi lumipeitteen tietokannan karkea maantieteellinen resoluutio, tai puutteelliset tiedot typpidioksidin lähteistä NO₂:n pystyjakaumaa mallintavassa ilmakehämallissa. Lisätutkimukset ovat tässä asiassa tarpeellisia. Satelliittimittausten algoritmeihin on jo kehitteillä parannus, joka ottaa pinnan heijastusominaisuudet selkeästi tarkemmin huomioon kuin tällä hetkellä.



Kuva 33: Yhteensovitetujen NO₂:n TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo eri Euroopan kaupunkien keskustojen ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019. Ylhäällä on kaupunkien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N).



Kuva 34: Yhteensovitetujen NO₂:n TROPOMI- ja ilmanlaatuasemamittausten keskiarvo eri Euroopan kaupunkien keskustojen ilmanlaatuasemilla aikavälillä 15.4.2018–30.6.2019, kun ainoastaan heikkojen tuulten (alle 3 m/s) aikana tehdyt mittaukset on huomioitu. Ylhäällä on kaupunkien välinen korrelaatio (R) ja lukumäärä (N).

6.5 Referenssi-instrumentti Pandora

Satelliittimittausten tarkkuuden luotettava arviointi edellyttää maa-asetilla tehtäviä ilmakehän pylvään NO₂-pitoisuuden mittauksia. Suomessa tällaisia mittauksia tehdään Ilmatieteen laitoksen operoimalla Pandora-instrumentilla, joka sijaitsee päätoimitalon katolla Kumpulassa, Helsingissä.

6.5.1 Vertailun tulokset

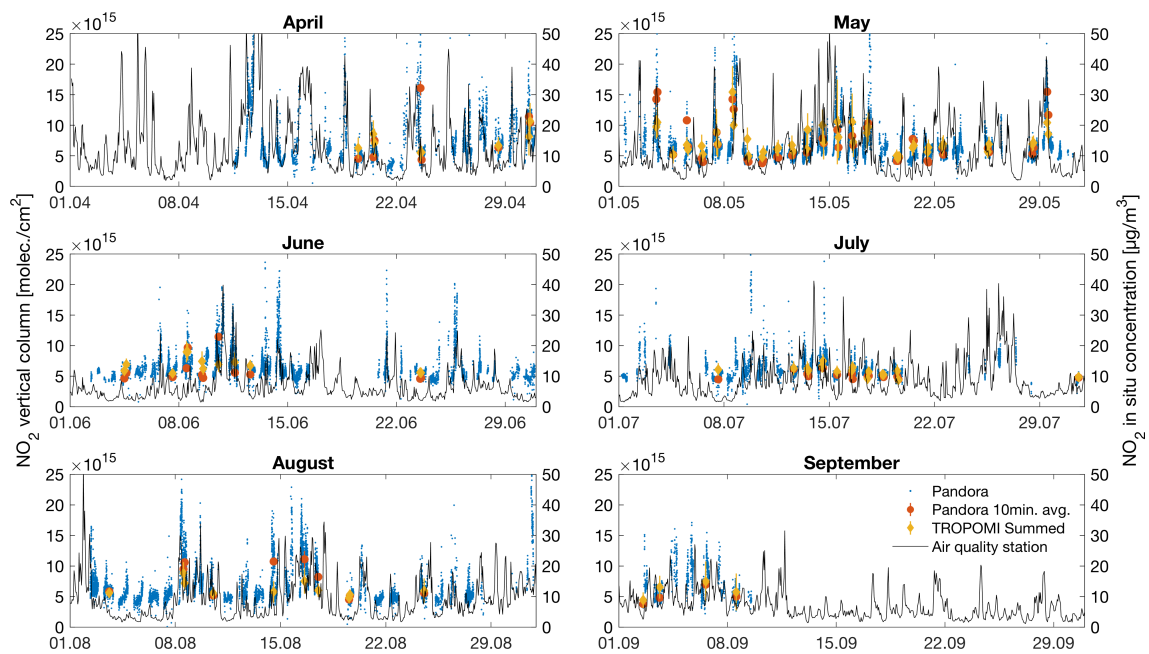
Kuvassa 35 on aikasarja eri instrumenttien typpidioksidimittauksista aikavälillä 15.4.–30.9.2018. Tarkastellut maa-asetat Pandora (siniset pisteet) ja Kumpulän ilmanlaatuasema (musta viiva, oikeanpuoleinen y-akseli) seuraavat hyvin toisiaan: molempien pitoisuuspiikit osuvat samoihin aikoihin, ja niiden suhteellinen korkeus on samaa luokkaa. Pandora kykenee siis seuraamaan lähellä maanpintaa tapahtuvia paikallisia pitoisuusvaihteluita samalla lailla kuin ilmanlaatuasema.

Samanaikaistetut Pandora- ja TROPOMI-instrumenttien mittaukset (punaiset ja keltaiset merkit) seuraavat pääosin hyvin toisiaan. Eniten ne eroavat silloin, kun NO₂:n pitoisuudet lähellä maan pintaa ovat suuria (mustalla viivalla merkityt ilmanlaatuaseman mittaukset). Tällaisissa tapauksissa TROPOMIn mittaukset ovat Pandoran mittauksia pienempiä, sillä yksittäinen satelliitin pikseli edustaa suhteellisen suuren alueen keskimääräistä pitoisuutta ja on siten vähemmän herkkä paikallisille pitoisuusvaihteluille.

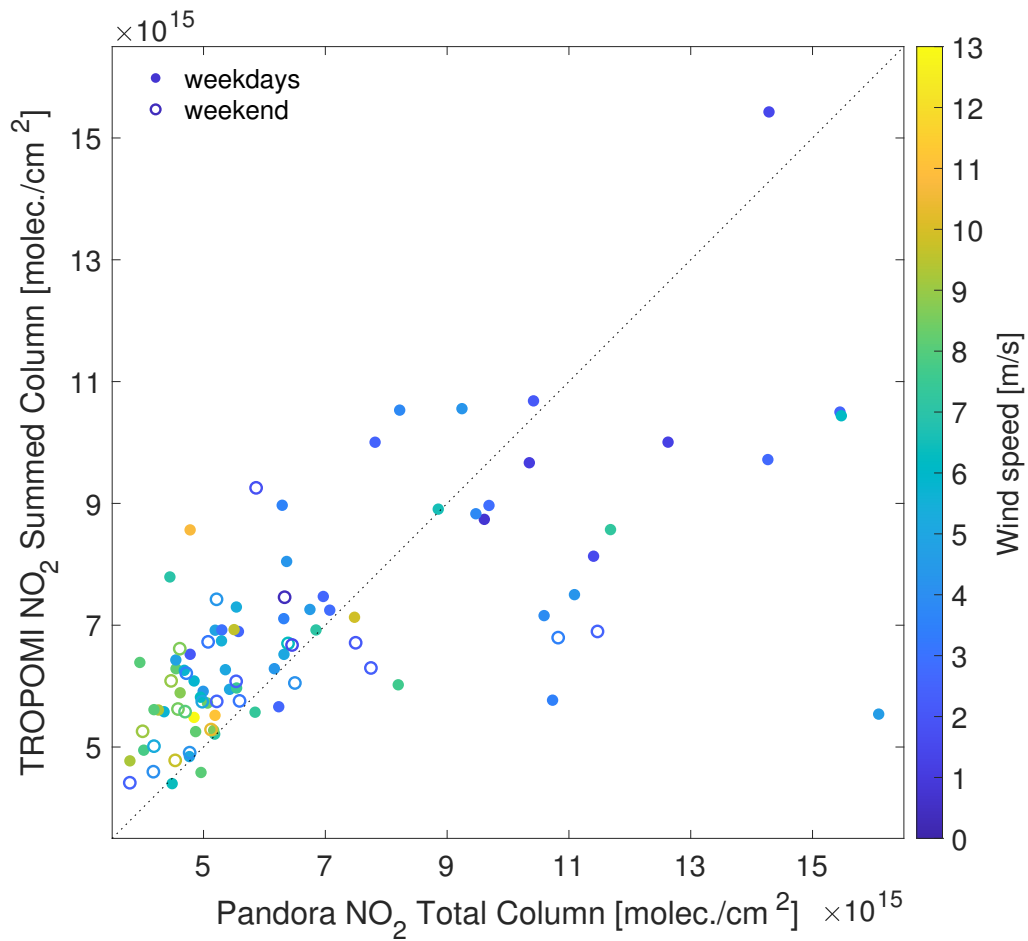
Kuvassa 36 on esitetty Pandoran ja TROPOMIn mittausten vertailu samaan tapaan kuin kuvissa 23 ja 24. Mittausten aikaista tuulen voimakkuutta on merkitty pisteiden värillä, arkipäiviä ja viikonloppuja sen mukaan ovatko pisteet täysinäisiä vai ontoja. Pienimmät pitoisuudet korreloivat jälleen voimakkaimpien tuulten kanssa (levittävät pitoisuuksia), sekä nyt myös erikseen tarkasteltujen viikonloppujen kanssa (ei työmatkaliikennettä). Pisteet ovat kaiken kaikkiaan varsin lähellä täydellistä korrelaatiota merkitsevää 1:1-katkoviivaa. Kauimpana tästä viivasta ovat pääosin arkipäiviä edustavat pisteet, joiden Pandoran mitaama pitoisuus on korkea ja tuulen nopeus alhainen. Tällaiset pisteet edustavat olosuhteita, jolloin paikalliset pitoisuudet ovat olleet korkeita ja tuulen pitoisuuksia levittävä vaikutus vähäinen. Tällaiset olosuhteet ovat erityisen hankalia satelliitin mitattaviksi, sillä sen pikselit erottavat huonosti hyvin paikallisia lähteitä.

Ialongo ym. (2020) tutkimus osoittaa, että Pandoran ja TROPOMIn mittausten välinen korrelaatio on noin 0,68. Tämä on selvästi parempi tulos kuin mitä on aiemmin saatu vastaavan vertailun tuloksena OMI-instrumentille (noin 0,5; Ialongo ym., 2016). TROPOMIn mittaukset ovat Helsingissä keskimäärin ($9,9 \pm 2,6$) % suurempia kuin Pandoran, eli se yliarvioi jonkin verran todellisia pitoisuuksia. Saatu tulos on ± 5 %-yksikön sisällä vastaavasta erosta Pandoran ja OMIn välillä. Pandora-asemien mittaukset ovat yleensä kaupungeissa suurempia kuin satelliittimittaukset, joten ilmeisesti Kumpulan alue Helsingissä edustaa vähemmän kaupungistunutta, semiurbaania ympäristöä.

Tutkimuksessa havaittu pitoisuuksien yliarviointi Kumpulan asemalla Helsingissä on yhtenevä kuvassa 34 esitetyn heikkojen tuulien alaisen vertailun kanssa. Pandora ja TROPOMI mittaavat molemmat ilmakehän pylvään pitoisuuksia, joten ne ovat samalla tavalla herkkiä tuulen vaikutukselle. TROPOMI ja ilmanlaatuasema ovat puolestaan eri tavalla herkkiä tuulelle, minkä vuoksi voidaan olettaa että kuvista 33 ja 34 jälkimmäinen, tuulen vaikutuksen minimoiva, on parhaiten verrattavissa Ialongo ym. (2020) tulosten kanssa. Tämän raportin ja Ialongo ym. (2020):n tulokset vaikuttavat siis olevan sopusoinnussa keskenään.



Kuva 35: Aikasarja Pandoran ja TROPOMIn NO₂-mittauksista aikavälillä 15.4.–30.9.2018. Kaikki saatavilla olevat Pandora-mittaukset on merkitty sinisillä pisteillä, 10 min ennen ja jälkeen S5P:n ylennyksen keskiarvoistetut Pandora-mittaukset punaisilla pisteillä, ja TROPOMIn mittaukset keltaisilla merkeillä (Pandora-aseman sisältävät pikselit). Kumpulan ilmanlaatuaseman mittaukset on merkitty mustalla viivalla (oikeanpuoleinen y-akseli). Mittausten virherajat on merkitty pystyviivoilla.

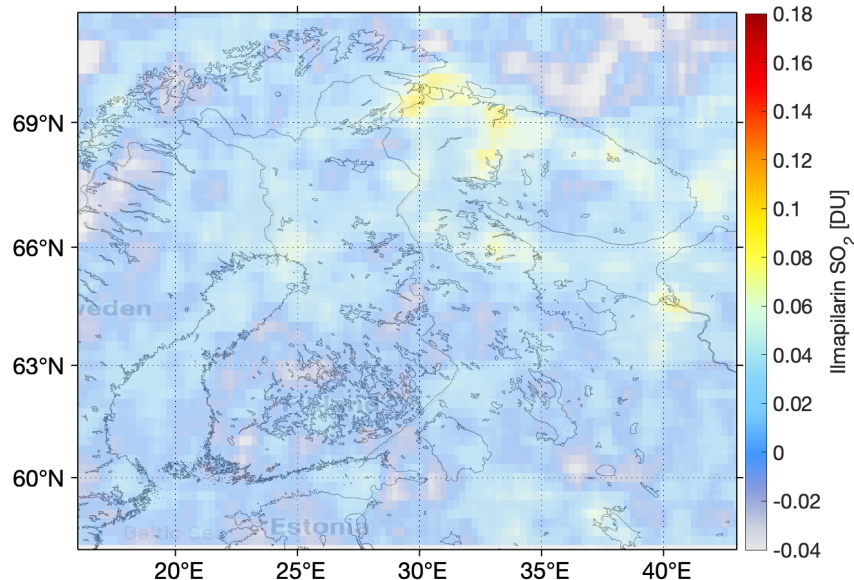


Kuva 36: Pistekaavio samanaikaisista Pandoran ja TROPOMIn NO₂-pitoisuusmittauksista aikavälillä 15.4.–30.9.2018. Täytetyt pisteet merkitsevät arkipäiviä, ontot pisteet viikonloppuja. Pisteiden värillä on merkitty mittaushetkellä vallinnutta tuulen nopeutta. Teoreettinen 1:1 -vastaavuus on merkitty katkoviivalla.

7 Muut ilmanlaadun satelliittimittaukset

Tässä raportissa on tarkasteltu pääasiassa TROPOMI- ja OMI-instrumenttien mitaamia troposfäärin NO_2 -pitoisuuksia Suomessa sekä lähialueilla. Satelliiteista saadaan myös muita ilmanlaadun kannalta mielenkiintoisia ja tärkeitä havaintoja esimerkiksi rikkidioksidista (SO_2) ja hiilimonoksidistä (CO) sekä ilmakehän hiukkasiesta, aerosoleista.

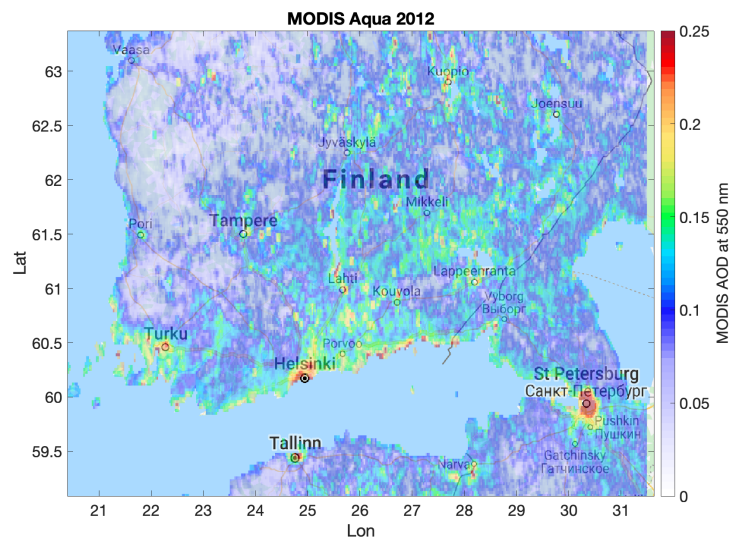
Havaintoja ilmakehän SO_2 -pitoisuuksista saadaan mm. OMI- ja TROPOMI-instrumenteista. Satelliitit ovat herkempiä havaitsemaan ilmakehässä ylhäällä esiintyvää SO_2 :ta joka on peräisin tulivuorenpurkauksista, kun taas tyypillisesti antropogeenisten lähteiden havainnointi saattaa olla hankalampaa ja vaatia esim. verrattaen pitkää keskiarvoistusaikaa. Tähän poikkeuksena ovat muutamat suuret yksittäiset antropogeeniset SO_2 -lähteet, kuten esimerkiksi Norilskin sulattamat Pohjois-Siperiassa Venäjällä tai öljynjalostamot Persianlahdella sekä Punaisella merellä. NO_2 -havaintoihin verrattuna satelliittien tekemiin SO_2 -havaintoihin liittyy tyypillisesti paljon suurempia epävarmuuksia ja mittaustuloksissa esiintyy hälyä. Tämä johtuu mm. siitä millä aallonpituuksilla SO_2 -satelliittimittauksia tehdään. Näin ollen hyvin vähäisten, maanpinnan lähellä olevien lähteiden havainnointi ei tämänhetkisillä instrumenteilla ole mahdollista. Kuvassa 37 on esitetty OMI-instrumentin havainnoiman ilmapilarin rikkidioksidipitoisuuden viiden vuoden (2014–2018) keskiarvo. Yleisesti ottaen SO_2 -pitoisuudet Suomessa ovat erittäin alhaiset, lievästi kohonneita arvoja havaitaan vain esimerkiksi Kemin seudulla. Suomen lähialueilla keskimäärin korkeampia SO_2 -pitoisuuksia havaitaan mm. Nikkelin, Murmanskin ja Severodvinskin (Arkangelin) alueilla.



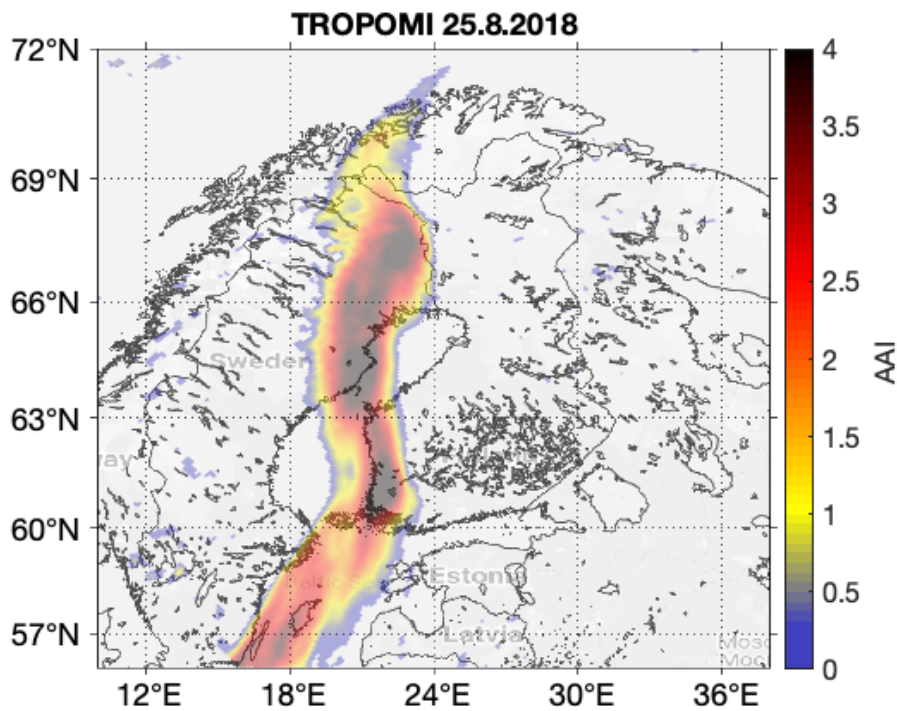
Kuva 37: OMI-instrumentin havaitseman ilmapilarin SO_2 -pitoisuuden keskiarvo Suomeen ja lähialueille 2014-2018 väliselle ajalle.

Satelliiteista saadaan tietoa myös ilmakehässä olevista hiukkasista, aerosoleista. Tyypillisimmät aerosoleja kuvaavat parametrit ovat aerosolien optinen paksuus (engl. aerosol optical depth, AOD) tai absorboivien aerosolien indeksi (absorbing aerosol index, AAI). Aerosolien optinen paksuus on kvantitatiivinen parametri, jonka avulla voidaan arvioida ilmakehän aerosolipitoisuutta. Aerosolien optisella paksuudella ei ole yksikköä, ja se ilmoitetaan yleensä näkyvän valon, esim. 550 nm aallonpituudella. On syytä korostaa että aerosolien optiseen paksuuteen vaikuttaa pitoisuuden lisäksi useita muita tekijöitä, kuten aerosolien koko- ja pystyjakauma, sekä niiden tyyppi. Lisäksi, nimensä mukaisesti aerosolien optinen paksuus on herkkä vain ns. optisesti aktiivisille aerosoleille (halkaisija karkeasti $>0,1 \mu\text{m}$), ja näin ollen satelliittimittauksilla ei kyetä havainnoimaan tätä pienempiä hiukkasia. Aerosolien optinen paksuus korreloi yleensä hyvin PM10 ja PM2.5 pitoisuuksien kanssa, mutta sen muuntaminen tarkaksi PM-konsentraatioksi ei ole suoraviivaista. Tämä onkin tällä hetkellä yksi aerosolikaukokartoituksen tärkeimmistä tutkimusaiheista. Muuntamisessa täytyy huomioida se, että satelliittien mittaamasta aerosolien optisesta paksuudesta ei voida tarkasti erotella haluttuja aerosolikokoja. Toisaalta satelliiteista saatu aerosolien optinen paksuus edustaa tilannetta vallitsevassa ilmankosteudessa, kun taas *in situ* PM-pitoisuudet on laskettu kuivista hiukkasista.

Aerosolien optista paksuutta on havainnointu mm. NASAn MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) -instrumenteilla kohta jo lähes 20 vuoden ajan. MODIS-instrumentteja on kahdessa eri polaariradalla olevassa satelliitissa: Terrassa, joka tekee havaintoja aamupäivällä, ja Aquassa, jonka mittaukset ajoittuvat ilta-päivään. Kuvassa 38 on esimerkki aerosolien optisesta paksuudesta Etelä-Suomessa vuonna 2012. Kohonneita arvoja nähdään mm. pääkaupunkiseudulla, sekä muissa suurissa kaupungeissa kuten Turussa ja Tampereella.



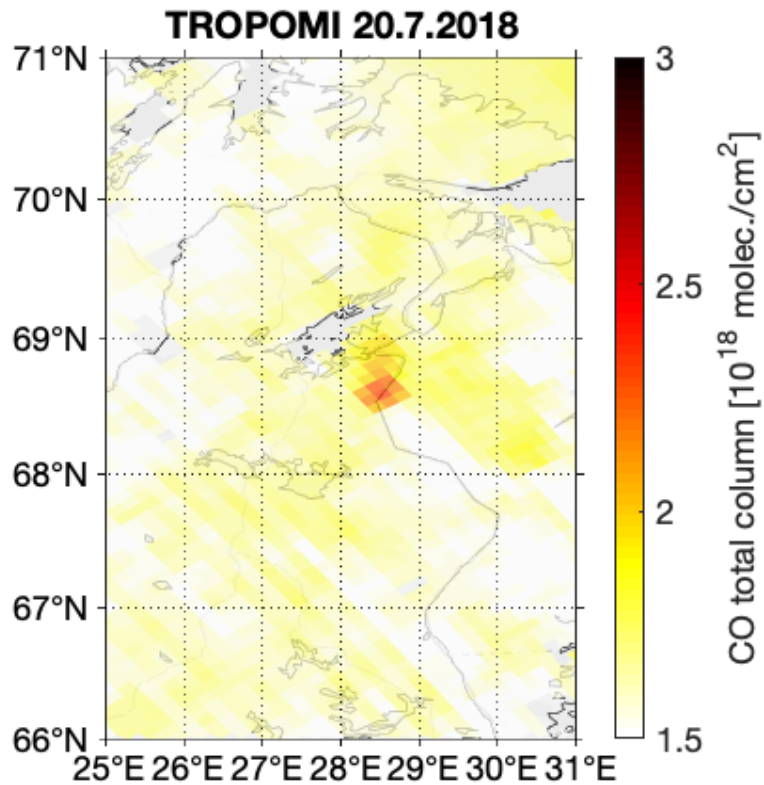
Kuva 38: MODIS Aqua-instrumentin havaitseman aerosolien optisen paksuuden keskiarvo Etelä-Suomeen (vain maan päällä olevat havainnot) vuodelle 2012.



Kuva 39: TROPOMI-instrumentin havaitsemat absorboivien aerosolien indeksit Suomessa 25.8.2018. Positiiviset arvot indikoivat kaukokulkeutunutta metsäpalojen savua Kanadasta. Tässä tapauksessa savu kulkeutui ylhäällä ilmakehässä eikä näin vaikuttanut ilmanlaatuun Suomessa.

Absorboivien aerosolien indeksi kuvaa nimensä mukaisesti auringon valoa absorboivien aerosolien esiintyvyyttä. Tällaisia aerosoleja ovat mm. metsäpalojen savut, tulivuorituhka ja aavikkopöly. Indeksini määritetään UV-aallonpituusalueen mittauksista ja sen arvo riippuu aerosolien pitoisuudesta, korkeudesta sekä absorptio-ominaisuuksista. Näiden useiden riippuvuuksien vuoksi indeksiä käytetään pääasiassa vain absorboivien aerosolien paikallistamiseen, eikä niinkään esim. pitoisuuden arviointiin. Koska aerosoli-indeksi parametrinä ei ole yhtä herkkä pilvien vaikutukselle kuin aerosolien optinen paksuus, se soveltuu hyvin erilaisten episodien, kuten metsäpalosavujen kulkeutumisen seurantaan. Aerosoli-indeksin havaintoja saadaan mm. TROPOMI- ja OMI-instrumenteista. Kuvassa 38 aerosoli-indeksin korkeat arvot indikoivat absorboivia aerosoleja, jotka tässä tapauksessa olivat kaukokulkeutunutta savua Kanadan laajoista metsäpaloista elokuussa 2018. Savu kulkeutui ylhäällä ilmakehässä, eikä se tässä tapauksessa vaikuttanut ilmanlaatuun Suomessa.

TROPOMI-instrumentista saadaan havaintoja myös ilmakehän hiilimonoksidipitoisuuksista (CO), koska instrumentin mittauskanavat ulottuvat lähi-infrapuna-aallonpituuksille. TROPOMI on ensimmäinen instrumentti, josta saadaan samanaikaisesti CO- ja NO₂-havaintoja, mikä laajentaa mahdollisuuksia tarkastella ilmanlaadun eri muuttujia samanaikaisesti yhtä instrumenttia käyttäen. Kuvassa 40 on esimerkki TROPOMI:n CO-havainnoista Lapissa. Raja-Joosepissa ollut metsäpalo näkyy havainnoista selvästi kohonneina pitoisuuksina.



Kuva 40: TROPOMI-instrumentin mittaama ilmapilarin CO-pitoisuus Suomessa 20.7.2018. Mittaukset näyttävät selvästi kohonneita CO-arvoja itärajan tuntumassa, jotka johtuvat Raja-Joosepissa olevasta metsäpalosta.

8 Yhteenveto

Tämän hankkeen tavoitteena oli kartoittaa ensimmäistä kertaa mahdollisuutta hyödyntää satelliittimittauksia ilmanlaadun seurannassa Suomessa. 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 satelliittidatan monipuoliseen hyödyntämiseen.

Tässä raportissa demonstroitii satelliittimittausten potentiaalia käyttämällä uusinta TROPOMI-instrumenttia (laukaistu v. 2017), joka on tällä hetkellä paikalliselta erotuskyvyltään tarkin, erityisesti ilmakehän eri kaasuja havainnoiva instrumentti. TROPOMI-havainnoissa keskityttiin erityisesti alailmakehän typpidioksidiin. TROPOMI:n NO₂-havainnoista tehtyjen pitoisuuskarttojen avulla voidaan todeta, että satelliitteilla pystytään havaitsemaan erikokoisia päästölähteitä Suomessa ja lähialueilla, sekä havaitsemaan päästöissä tapahtuvia ajallisia muutoksia. Nykyiset instrumentit kykenevät lisäksi oversampling-menetelmää käyttäen erottamaan itse satelliitin paikallista erotuskykyä pienempikokoisia lähteitä, kuten valtateitä ja lentokenttiä, kun keskiarvoistusaikana on noin vuoden pituinen ajanjakso. Eri suuruisten lähteiden, kuten kaupunkien, keskinäinen suuruusjärjestys on luotettavimmin erotettavissa, kun tuulen vaikutus saasteiden leviämiseen minimoidaan käyttäen vain heikkojen tuulien aikaisia mittauksia.

Satelliitti- ja *in situ* -mittausten oleellinen ero on siinä, että yksi satelliittimittaus edustaa pikselin rajaaman alueen keskimääräistä arvoa (esim. kaasun pitoisuutta) koko (tai osittaisessa) ilmapilarissa. *In situ* -mittaukset puolestaan kertovat tietyssä pisteessä tarkasti kaasujen pitoisuuksien vaihteluista maanpinnan lähellä. Jotta satelliittihavaintoja voitaisiin hyödyntää ilmanlaadun seurannassa, on tärkeää tietää kuinka satelliittimittaukset vastaavat *in situ* -mittauksissa havaittuja vaihteluita, vaikka mitattavat suureet eivät ole samoja. Ilmanlaatuasemien ja TROPOMI-instrumentin mittauksia vertailemalla nähdään, että niiden havainnot korreloivat yleensä parhaiten alueilla, joissa pitoisuudet ovat Suomen mittakaavassa keskiluokkaa ja vaihtelu on suhteellisen vähäistä. Asemien muodostamat kokonaisuudet (kaupunkien keskustat) korreloivat keskenään sen sijaan hyvin, eikä tämä muutu merkittävästi pelkästään heikkoja tuulia tarkasteltaessa. Eri puolilla maata tehtävät satelliittimittaukset ovat siis keskenään vertailukelpoisia. Eri Euroopan kaupunkien keskustojen välinen korrelaatio on pääosin erittäin hyvä, mutta Pohjoismaiden kaupunkien keskinäinen suuruusjärjestys riippuu selvästi tuulesta. Tällä hetkellä ei siis ole suositeltavaa vertailla eri Pohjoismaissa sijaitsevien kaupunkien satelliittimittauksia keskenään, ennen kuin syy havaittuihin eroihin saadaan selvitettyä. Kehitteillä on jo parannuksia satelliittien mittausalgoritmeihin, jotka saattavat selittää nämä havaitut erot.

Selvityksen tärkeimmät tulokset voidaan koota seuraavasti:

- Nykyiset satelliittimittaukset ilmanlaadusta ovat avoimesti saatavilla ja ilmaisia. Havaintoja on tyypillisesti päivittäin olettaen, että on pilvetöntä ja aurinгон valoa saatavilla. Maantieteellinen erottelukyky havainnoissa on parhaimmillaan yksittäisissä mittauksissa suuruusluokkaa $3 \times 5 \text{ km}^2$.

- Laadultaan tässä tarkastellut typpidioksidihavainnot ovat korkealuokkaisia ja hyödynnettävissä ilmanlaadun maantieteelliseen seuraamiseen, kulkeutumiseen sekä ajallisten vaihteluiden identifiointiin. Pääkaupunkiseudun keskimääräisissä pitoisuuksissa voidaan erottaa alueellisia vaihteluita ja nähdä selvä ero viikonpäivien ja viikonloppujen välillä. OMI-instrumentin havainnoista puolestaan nähdään, että alailmakehän NO₂-pitoisuudet ovat keskimäärin laskeneet koko maassa vuodesta 2005 vuoteen 2018.
- Satelliittihavainnot kuvaavat ilmakehän koostumusta pystypylväässä ja ovat siten luonteeltaan erilaisia kuin lähellä maanpinnan korkeutta tehtvät paikallisten ilmanlaatuasemien havainnot. Tästä erosta huolimatta korrelaatio mittausten välillä on hyvä. Paras korrelaatio nähdään heikoilla tuulilla ja silloin kun ilmanlaatuasemat edustavat hyvin myös lähialuetta laajemmin.
- Satelliittimittaukset soveltuvat ilmanlaadun alueelliseen tarkasteluun joten niitä voitaneen hyödyntää myös ilmanlaatuasemien edustavuuden arvioinnissa.
- Satelliittimittausten tulkinta kehittyi edellen jatkuvasti minkä vuoksi havainnoista julkaistaan parin vuoden välein uusia tarkastettuja ja parannettuja versioita. Tässä esitettyjen kaltaiset vertailut tuleekin toistaa aina uusien data-versioiden tultua jakeluun.
- Tulevien missioiden myötä satelliittien mittaustarkkuus ja paikallinen erotuskyky tulevat yhä paranemaan. Copernicus-kaukokartoitusohjelman uudet satelliitit tulevat takaamaan jatkuvia operatiivisluonteisia, ilmaisia ja avoimesti saatavilla olevia ilmanlaadun havaintoja pitkälle 2030-luvulle asti, joten on odotettavissa, että myös EU:n tasolla satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa kasvaa tulevina vuosina.

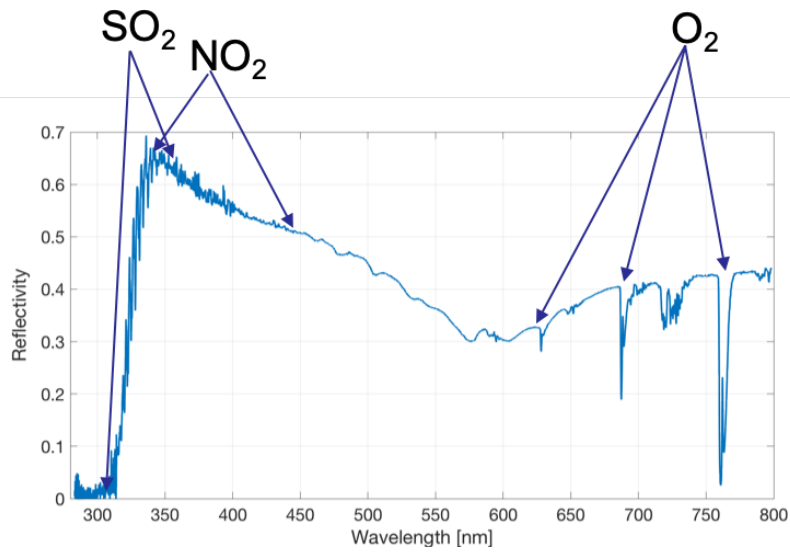
Liite 1: Satelliittimittausten periaate

Ilmakehän koostumuksen mittaaminen satelliittien avulla perustuu ilmakehän läpi kulkevan sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen eri aallonpituuksilla. Satelliiteilla tehtävät mittaukset ovat siis kaukokartoitusta: satelliitti ei ole suoraan kosketuksissa mitattavan kohteen kanssa (ilmakehä), eikä mittauksia tehdä suoraan halutusta suureesta (jonkin hivenkaasun pitoisuus), vaan jostain siihen kytköksissä olevasta suureesta (ilmakehän läpi kulkeneen säteilyn voimakkuus eri aallonpituuksilla).

Kun sähkömagneettinen säteily kulkee ilmakehän läpi, sen kulkua häiritsevät fotonien reitille osuvat ilmakehän kaasumolekyylit, aerosolihiukkaset, vesipisarat ja muut ilmakehässä olevat partikkelit. Tällaisen esteen kohdatessaan fotonit voi joko absorboitua (sen energia muuttuu johonkin toiseen muotoon, esimerkiksi lämmöksi) tai sirota (se uudelleenemittoituu uuteen suuntaan). Olettaen että siroaminen ei tapahdu täsmälleen samaan suuntaan kuin mihin fotonit oli alun perin matkalla, molemmilla näistä ilmiöistä on sama seuraus: suoraan säteilylähteen suunnalta tulevien fotonien lukumäärä on pienentynyt yhdellä. Säteilyn voimakkuus on siis vaimentunut. Jos ilmakehässä olevien erilaisten hiukkasten tehokkuus absorboijina ja sirottajina tiedetään, voidaan mitatusta ilmakehässä tapahtuneesta säteilyn vaimenemisesta päätellä ilmakehän koostumus.

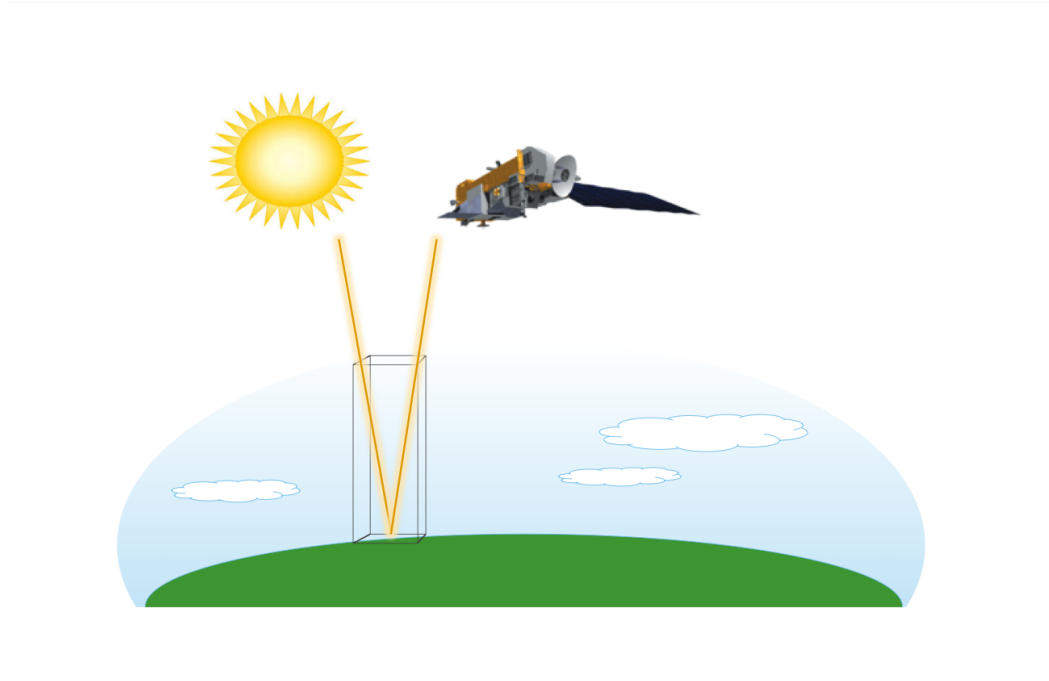
Tyypidioksidia mitataan niin kutsutuilla passiivisilla instrumenteilla, jotka eivät itse toimi mittaamansa säteilyn lähteenä. NO_2 -instrumentit mittaavat sekä suoraan auringosta että ilmakehästä tulevaa säteilyä. Ilmakehästä tuleva säteily on auringon säteilyä, joka on (hieman yksinkertaistaen) matkannut ilmakehän läpi kahdesti: ensin alas maan pinnalle, ja sieltä heijastuen takaisin ylös satelliitti-instrumenttiin. Ilmakehän läpi matkannut auringon säteily on kokenut absorptiota ja sirottumista, minkä vuoksi se on heikompaa kuin suoraan auringosta tuleva säteily. Näiden mittausten erosta nähdään ilmakehässä tapahtunut säteilyn vaimeneminen, joka on sitä voimakkaampaa, mitä enemmän ilmakehässä on erilaisia absorboivia ja sirottavia hiukkasia.

Eri kaasut vaimentavat säteilyä eri tehokkuuksilla aallonpituuden funktiona (kuva 41). Nämä ns. vaimennus- tai absorptiopiikit kullekin yhdisteelle on selvitetty keuhkallisesti ja ne tunnetaan tarkasti. Tämän tiedon ja fysikaalisten teorioiden avulla voidaan simuloida säteilyn vaimenemista ilmakehässä, kun läsnä on montaa eri yhdistettä samaan aikaan erisuuruuksina pitoisuuksina. Näissä simulaatioissa on olennaista tarkastella sellaista aallonpituusväliä, jossa mitattava yhdiste absorboi erityisen yksilöllisellä ja voimakkaalla tavalla (tässä yhteydessä puhutaan usein yhdisteelle tyypillisestä ”sormenjäljestä”). Tyypidioksidin tapauksessa tämä väli on noin 400–450 nm (kuva 41). Simulaatioissa on siis tarpeellista huomioida vain sellaiset yhdisteet ja prosessit, joilla on merkittävää vaikutusta tällä välillä. Nämä yhdisteet ja prosessit tunnetaan empiiristen mittausten, kemiallisten mallinnusten ja fysikaalisten teorioiden perusteella. Ainoaksi tuntemattomaksi jää siis jokaisen yhdisteen pitoisuus ilmakehässä mittaushetkellä, joita simuloidussa mallissa muutteleamalla voidaan löytää paras vastine mitatulle säteilyn vaimenemiselle. Samalla saadaan siten myös arvio tyypidioksidin pitoisuudelle ilmakehässä.



Kuva 41: Esimerkki satelliitin mittaamasta säteilyn spektristä. Vaaka-akselilla on mittauksen aallonpituus ja pystyakselilla säteilyn heijastuvuus. Kuvaan on myös merkitty muutamien kaasujen, kuten typpidioksidin absorptioaallonpituuksia.

Simuloidun mallin avulla saatu tulos on itse asiassa NO_2 :n pitoisuus ilmakehässä satelliitti-instrumenttiin saapuvien fotonien keskimääräisellä reitillä ilmakehän läpi. Tästä pitoisuudesta käytetään myös termiä SCD ("Slant Column Density"), ja se riippuu muun muassa satelliitin ja auringon asemasta taivaalla, maanpinnan heijastavuudesta ja pilvisyydestä. Koska nämä kaikki vaihtelevat mittauksesta toiseen, ei yksittäisiä SCD-arvoja voida vertailla keskenään. Tämä ongelma ratkaistaan ottamalla yllä mainitut mittauksiin vaikuttavat muuttujat huomioon erityisten tietokoneella ajettavien säteilynkulkumallien avulla. Nämä mallit simuloivat fotonien reittiä ilmakehän läpi erilaisissa mittausolosuhteissa. Tuloksena saadaan NO_2 :n pitoisuus suoraan mittauspisteen yläpuolella olevassa ilmakehän pylväässä, eli niin kutsuttu VCD ("Vertical Column Density"). Kuva 42 havainnollistaa tyypillisen NO_2 -mittauksen geometriaa, sekä SCD:n ja VCD:n eroa.



Kuva 42: Havainnekuva tyypillisestä passiivisella instrumentilla tehtävästä typpi-dioksidin satelliittimittauksesta. Kuvassa havainnollistetaan myös mittausgeometrian (slant column, keltaisen säteen polku ilmakehässä) ja pystypylvään (vertical column, kuvassa laatikko) määritelmien eroa. Mallina kuvassa on vuonna 2004 laukaistu Aura-satelliitti ja sen OMI-mittalaite. (Kuva Ilmatieteen laitos).

Koska typpidioksidi on ilmansaaste, on sen pitoisuus ilmakehän alimmassa osassa eli troposfäärissä (alin ~ 10 km) ilmanlaadun seurannan kannalta olennaista. Tämän vuoksi ennen SCD:n muuntamista VCD:ksi se jaetaan yleensä troposfääriseen ja troposfäärin yläpuoliseen SCD:hen, jotka sitten muutetaan erikseen vastaaviksi pystypylväspitoisuuksiksi. Jako troposfääriseen ja sen yläpuoliseen SCD:hen tehdään esimerkiksi käyttämällä kemiallista kuljetusmallia, joka mallintaa ilmakehän kemiaa, kuljetusprosesseja, sekä erilaisten yhdisteiden lähteitä. Mallista saadaan arvio troposfäärin yläpuoliselle SCD:lle kyseisessä mittauksessa, joka vähennetään alkuperäisestä SCD:stä. Tuloksena saadaan troposfäärinen SCD.

Lähdeluettelo

- Beirle, S., Boersma, K. F., Platt, U., Lawrence, M. G. ja Wagner, T. (2011). Megacity emissions and lifetimes of nitrogen oxides probed from space. *Science*, **333**(6050), 1737–1739. doi:10.1126/science.1207824.
- Castellanos, P. ja Boersma, K. F. (2012). Reductions in nitrogen oxides over Europe driven by environmental policy and economic recession. *Scientific Reports*, **2**, 265. doi:10.1038/srep00265.
- Duncan, B. N., Lamsal, L. N., Thompson, A. M., Yoshida, Y., Lu, Z., Streets, D. G., Hurwitz, M. M. ja Pickering, K. E. (2016). A space-based, high-resolution view of notable changes in urban NO_x pollution around the world (2005–2014). *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, **121**(2), 976–996. doi:10.1002/2015JD024121.
- Ialongo, I., Herman, J., Krotkov, N., Lamsal, L., Boersma, K. F., Hovila, J. ja Tamminen, J. (2016). Comparison of OMI NO₂ observations and their seasonal and weekly cycles with ground-based measurements in Helsinki. *Atmospheric Measurement Techniques*, **9**(10), 5203–5212. doi:10.5194/amt-9-5203-2016.
- 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. *Atmospheric Measurement Techniques*, **13**, 205–218. doi:10.5194/amt-13-205-2020.
- KNMI (2014). Comparative Pixel Size. <http://www.tropomi.eu/gallery/science-data-products-gallery>.
- Krotkov, N. A., McLinden, C. A., Li, C., Lamsal, L. N., Celarier, E. A., Marchenko, S. V., Swartz, W. H., Bucsela, E. J., Joiner, J., Duncan, B. N., Boersma, K. F., Veefkind, J. P., Levelt, P. F., Fioletov, V. E., Dickerson, R. R., He, H., Lu, Z. ja Streets, D. G. (2016). Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **16**(7), 4605–4629. doi:10.5194/acp-16-4605-2016.
- Lamsal, L. N., Duncan, B. N., Yoshida, Y., Krotkov, N. A., Pickering, K. E., Streets, D. G. ja Lu, Z. (2015). U.S. NO₂ trends (2005–2013): EPA Air Quality System (AQS) data versus improved observations from the Ozone Monitoring Instrument (OMI). *Atmospheric Environment*, **110**, 130–143. doi:10.1016/j.atmosenv.2015.03.055.
- Levelt, P. F., Joiner, J., Tamminen, J., Veefkind, J. P., Bhartia, P. K., Stein Zweers, D. C., Duncan, B. N., Streets, D. G., Eskes, H., van der A, R., McLinden, C., Fioletov, V., Carn, S., de Laat, J., DeLand, M., Marchenko, S., McPeters, R., Ziemke, J., Fu, D., Liu, X., Pickering, K., Apituley, A., González Abad, G., Arola, A., Boersma, F., Chan Miller, C., Chance, K., de Graaf, M., Hakkarainen, J., Hassinen, S., Ialongo, I., Kleipool, Q., Krotkov, N., Li, C., Lamsal, L., Newman, P., Nowlan, C., Suleiman, R., Tilstra, L. G., Torres, O., Wang, H. ja Wargan, K. (2018). The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space.

Atmospheric Chemistry and Physics, **18**(8), 5699–5745. doi:10.5194/acp-18-5699-2018.

Liu, F., Beirle, S., Zhang, Q., van der A, R. J., Zheng, B., Tong, D. ja He, K. (2017). NO_x emission trends over Chinese cities estimated from OMI observations during 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**(15), 9261–9275. doi:10.5194/acp-17-9261-2017.

Lu, Z., Streets, D. G., de Foy, B., Lamsal, L. N., Duncan, B. N. ja Xing, J. (2015). Emissions of nitrogen oxides from US urban areas: estimation from Ozone Monitoring Instrument retrievals for 2005–2014. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **15**(18), 10367–10383. doi:10.5194/acp-15-10367-2015.

Pandonia Global Network (2019). About. <https://www.pandonia-global-network.org/home/about/>.

Streets, D., Canty, T., Carmichael, G., de Foy, B., Dickerson, R., Duncan, B., Edwards, D., Haynes, J., Henze, D., Houyoux, M., Jacob, D., Krotkov, N., Lamsal, L., Liu, Y., Lu, Z., Martin, R., Pfister, G., Pinder, R., Salawitch, R. ja Wecht, K. (2013). Emissions estimation from satellite retrievals: A review of current capability. *Atmospheric Environment*, **77**, 1011–1042. doi:10.1016/j.atmosenv.2013.05.051.

van Geffen, J. H. G. M., Eskes, H. J., Boersma, K. F., Maasakkers, J. D. ja Veefkind, J. P. (2019). *TROPOMI ATBD of the total and tropospheric NO₂ data products*. Royal Netherlands Meteorological Institute (KNMI). S5P-KNMI-L2-0005-RP, CI-7430-ATBD, versio 1.4.0, <https://sentinels.copernicus.eu/documents/247904/2476257/Sentinel-5P-TROPOMI-ATBD-NO2-data-products>.

Väylävirasto (2018). Liikennemääräkartat koko maa vuosilta 2012–2018. <https://julkinen.vayla.fi/webgis-sovellukset/webgis/template.html?config=liikenne>.



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
RAPORTTEJA - RAPPORTER - REPORTS 2020:1
ISSN 0782-6079
ISBN 978-952-336-098-3 (pdf)
<https://doi.org/10.35614/isbn.9789523360983>

Helsinki 2020

