



Turun yliopisto
University of Turku

Typpidioksidin kaukokartoitus Suomessa ja Euroopassa NASA:n Aura-satelliitin OMI-instrumentin avulla

Suvi-Tuulia Haakana

Pro Gradu

Maantieteen ja geologian laitos

2021



Turun yliopisto
University of Turku

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -järjestelmällä.

The originality of this thesis has been checked in accordance with the University of Turku quality assurance system.

TURUN YLIOPISTO

Luonnontieteiden ja tekniikan tiedekunta
Maantieteen ja geologian laitos

HAAKANA, SUVI-TUULIA: Typpidioksidin kaukokartoitus Suomessa ja Euroopassa NASA:n Aura-satelliitin OMI-instrumentin avulla

Pro gradu, 48 sivua, 24 liitesivua (yht. 72)

40 op, maantiede

Ohjaaja: Risto Kalliola

Marraskuu 2021

Tutkimuksessa selvitetään geospaatialisen aikasarja-analyysin avulla mahdollisuutta hyödyntää satelliittikaukokartoitusta ilmanlaadun seurannassa Suomen alueella sekä OMI-instrumentilla kerätyn satelliittidatan soveltuvuutta Suomen ilmanlaadun tutkimukseen. Ilmanlaadun indikaattorina tutkitaan typpidioksidia (NO₂) ja tarkastellaan sen pitoisuuksissa tapahtunutta muutosta tutkimusjakson aikana, sekä geospaatialista jakaumaa Suomen ja Euroopan alueella.

Satelliittikaukokartoituksen avulla on mahdollista saada mitattua ilmanlaadun indikaattorien arvoja myös sellaisilta alueilta, joilta ei ole saatavilla tai joilla ei voida mitata dataa paikallisesti. Typpidioksidi aiheuttaa yhä edelleen Euroopassa ennenaikaisia kuolemia, sekä hengitys- ja verenkiertoelimistön sairauksia. Ilmanlaadun ja typpidioksidipitoisuuksien tutkimusta tarvitaan, jotta voidaan tunnistaa typpidioksidin päästölähteitä sekä kartoittaa korkean riskin altistumisalueita.

Tutkimuksessa tuotetaan karttamuotoinen aikasarja, jonka avulla pystytään seuraamaan ilmanlaadun kehitystä ja jakaumaa typpidioksidin osalta kahdella kohdealueella: Suomessa ja Euroopassa. Ilmanlaadun kehitystrendin analysoimisen tueksi luodaan tutkimusajanjaksolla typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneesta muutoksesta muutuskartat tutkimusalueilta. Lisäksi lasketaan tilastollisia tunnuslukuja ja diagrammeja, joiden avulla voidaan seurata typpidioksidipitoisuushavaintojen jakaumaa.

Tutkimuksessa selviää, että typpidioksidipitoisuudet Suomessa ovat muuhun Eurooppaan nähden melko alhaisia. Ilmanlaadun kehitys Suomessa vastaa suurelta osin Euroopan kehitystä ja noudattaa karkeasti myös asukastiheyttä maakuntatasolla tarkasteltuna. Typpidioksidipitoisuuksien jakaumassa ja muutoksessa on havaittavissa selkeä kahtiajako pohjois-etelä-akselilla. Tutkimusjakson aikana Suomen pitoisuudet ovat keskimäärin hieman nousseet, mutta viime vuosien aikana pitoisuuksien kehitystrendi on ollut laskeva.

ASIASANAT: Satelliittikaukokartoitus, geospaatialinen aikasarja-analyysi, ilmanlaadun indikaattori, OMI-instrumentti, typpidioksidi (NO₂) ilmansaasteena, *in situ* -mittaukset

UNIVERSITY OF TURKU

Faculty of Science and Engineering
Department of Geography and Geology

HAAKANA, SUVI-TUULIA: Remote sensing of nitrogen dioxide in Finland and Europe using NASA's Aura satellite's OMI instrument

Master's thesis, 48 pp, 24 appendix pp. (tot. 72)

40 ECTS, geography

Supervisor: Risto Kalliola

November 2021

The study uses geospatial time series analysis to investigate the possibility of utilizing satellite remote sensing to monitor air quality in Finland, and the suitability of satellite data collected with the OMI instrument for Finnish air quality research. Nitrogen dioxide (NO₂) is studied as an indicator of air quality and the change in its concentrations during the study period, as well as the geospatial distribution in Finland and Europe, are examined.

Satellite remote sensing enables to measure the values of air quality indicators also from areas where data are not available or where data cannot be measured locally. Nitrogen dioxide is still a cause of premature death in Europe, as well as respiratory and circulatory diseases. Research on air quality and nitrogen dioxide concentrations is needed to identify sources of nitrogen dioxide emissions and to identify high-risk exposure areas.

The study produces a time series in map format that can be used to monitor the development and distribution of air quality for nitrogen dioxide in two target areas: Finland and Europe. To support the analysis of the air quality trend, trend maps of the change in nitrogen dioxide concentrations during the study period are created from the study areas. In addition, statistical indicators are calculated, and diagrams are used to monitor the distribution of nitrogen dioxide concentration observations.

The study shows that nitrogen dioxide concentrations in Finland are quite low compared to the rest of Europe. The development of air quality in Finland largely corresponds to the development of Europe and roughly follows the population density at the provincial level. There is a clear dichotomy in the distribution and change of nitrogen dioxide concentrations on the north-south axis. During the study period, Finnish concentrations have increased slightly on average, but in recent years there has been a downward trend in concentrations in Finland.

KEY WORDS: Satellite remote sensing, geospatial time series analysis, air quality indicator, OMI-instrument, nitrogen dioxide (NO₂) as air pollution, *in situ* measurements

Sisällysluettelo

1. Johdanto	6
2. Teoreettinen viitekehys.....	8
2.1. Satelliittikaukokartoitukseen perustuva ilmakehän tutkimus	8
2.1.1. Kaukokartoitus tutkimusmenetelmänä	8
2.1.2. Ilmakehän satelliittikaukokartoitus	9
2.1.3. Ilmanlaadun tutkimuksen ja kaukokartoituksen kehitys.....	11
2.2. Ilmanlaadun indikaattorit ja ilmansaasteet	14
2.3. Typpidioksidi ilmansaasteena	15
2.3.1. Typpidioksidin päästölähteet.....	15
2.3.2. Typpidioksidin terveys- ja ympäristövaikutukset	16
2.4. Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät Suomessa.....	18
2.5. Euroopan ilmanlaatu	19
3. Aineistot ja menetelmät	21
3.1. Tutkimusalue	21
3.2. OMI-instrumentti ja KNMI:n QA4ECV-satelliittiaineisto.....	23
3.3. Aineistojen laatu ja käytettävyys	25
3.4. Kaukokartoitus- ja paikkatietoanalyysit.....	26
3.5. Tilastolliset menetelmät.....	28
4. Tulokset	30
4.1. Ilmanlaadun kehitys Suomessa vuosina 2005–2017	30
4.1.1. Ajallinen kehitys Suomen ilmanlaadussa	30
4.1.2. Alueelliset vaihtelut ilmanlaadussa	33
4.2. Tutkimusalueen NO ₂ -pitoisuuksien kehitystrendit	35
4.3. Aineiston soveltuvuus Suomen ilmanlaadun tutkimukseen.....	39
5. Keskustelu.....	40
6. Johtopäätökset	44
Kiitokset	45
Lähteet	46
Liitteet.....	49
Liite 1. Vuosittaiset karttakuvat Suomen NO ₂ -jakaumasta.....	49
Liite 2. Vuosittaiset karttakuvat Euroopan ilmanlaadusta.....	62
Liite 3. Muutoskartat Suomen ja Euroopan ilmanlaadusta	67
Liite 4. Suomen vuosittainen NO ₂ -havaintojakauma	71

1. Johdanto

Ilmansaasteilla ja ilmanlaadulla on monenlaisia ympäristövaikutuksia. Ne vaikuttavat paitsi luontoon, myös ihmisten terveyteen ja sitä myötä elämänlaatuun. Ilmansaasteet aiheuttavat myös vuosittain arviolta 7 miljoonan ihmisen kuoleman (WHO 2018). Ilmanlaadun vaikutukset ihmiseen ja ympäristöön näkyvät erityisesti kaupunkien ja teollisuusalueiden läheisyydessä ja vilkkaasti liikennöidyillä alueilla. Ilmanlaadun tutkimuksen kehittyminen on kiinnostavaa sekä ihmisten että luonnon hyvinvoinnin kannalta.

Euroopassa on viimeisen 15 vuoden aikana tapahtunut useita ilmanlaatuun vaikuttavia muutoksia, kuten kaupunkien kasvua, maatalouden ja liikennemäärien lisääntymistä sekä teollisuusalueiden laajentumista (Casquero-Vera *et al.* 2018). Kehitys Suomen alueella vastaa Euroopan kehitystä, mutta kokoluokat ja suhteet eri ilmanlaadun kuormittajien välillä vaihtelevat. Kuormittavien tekijöiden vaikutusta ja alueellista ilmanlaadun kehitystä tutkitaan, jotta voidaan tuottaa lisää ajantasaista tietoa eri alueiden ilmanlaadullisista oloista myös päätöksenteon ja alueiden kehittämisen tueksi (EPA 2018). Tutkimusalueen ilmanlaatuun vaikuttaa suuresti esimerkiksi alueen poliittinen päätöksenteko sekä uudet käytettävissä olevat teknologiat (Bernauer & Koubi 2008; Turnock *et al.* 2016). Tutkimuksen myötä uusi ajantasainen tieto ilmanlaadun kehityssuunnasta lisääntyy, ja tällöin voidaan tukea myös alueiden kehitystä kohti kestävämpiä ratkaisuja ilmanlaadun huomioimiseksi.

Paikallista ilmanlaatua kuvaava ilmanlaatuindeksi on yleisesti käytössä oleva mittari, jota käytetään ilmanlaadun arvioimisessa. Ilmanlaatuindeksi lasketaan ottamalla huomioon eri ilmanlaadun indikaattoreiden pitoisuuksia. Laskennassa voidaan ottaa huomioon rikkidioksidi (SO₂), typpidioksidi (NO₂), hengitettävät hiukkaset ja pienhiukkaset AOD (*Aerosol Optical Depth*), otsoni (O₃), hiilimonoksidi (CO) ja haisevat rikkihydriidit (TRS) (Kassomenos *et al.* 1998). Ilmanlaatuindeksin ilmoittavilla asemilla ei kuitenkaan mitata kaikkia indikaattoreita, vaan indeksi lasketaan vain osasta yhdisteistä. Ilmanlaatuindeksien avulla ei siis voida tuottaa absoluuttisesti vertailukelpoista dataa, jotta eri alueiden ilmanlaatua voitaisiin luotettavasti verrata (Ilmatieteen laitos 2018). Tämä ongelma voidaan korjata hyödyntämällä paikallisten *in situ* -mittausten rinnalla satelliittihavaintoja ja kaukokartoitusmenetelmiä. Kaukokartoitusmenetelmien avulla saadaan havaintoja ja mittaustuloksia myös niiltä alueilta, joilla ei ole paikallisia havaintoasemia tai joiden havaintoasemilta kerätty data on puutteellista.

Tässä tutkimuksessa keskityn ilmanlaadun indikaattoreista typpidioksiiniin (NO₂), ja selvitän sen määrää ilmakehässä Suomen ja Euroopan alueella. Typpidioksidin merkitys ilmakehässä ja ilmanlaadussa on merkittävä ja sen rooli myös muiden ilmalaatuun vaikuttavien tekijöiden ilmentymisessä on keskeinen (Franceschini *et al.* 2005; Baidar *et al.* 2013). Typpidioksidi on kiinnostava tutkimuskohde, sillä se vaikuttaa paitsi ihmisten terveyteen, myös ympäristön ja ekosysteemien hyvinvointiin (Hsu *et al.* 2013). Typpidioksidi aiheuttaa terveydellistä haittaa erityisesti hengitysteille (Casquero-Vera *et al.* 2018; WHO 2018). Ympäristövaikutuksista keskeisimpiä ovat typpidioksidin aiheuttama rehevöityminen ja happamoituminen sekä niistä

aiheutuvat ongelmat ekosysteemeille. Typpidioksidin pitoisuuden lisääntymisen on tutkittu enteilevän myös muiden ilmanlaadun indikaattorien pitoisuuksien lisääntymistä. Lisäksi typen oksideilla on vaikutusta alailmakehän otsonin muodostumiseen sekä pidemmällä aikavälillä yläilmakehässä tapahtuvaan otsonikatoon (Ilmatieteen laitos 2018).

Ilmanlaadun tutkimus Suomen ja Euroopan alueella on lisääntynyt, mutta hyödyntämätöntä avoimesti saatavilla olevaa ilmanlaadun dataa on edelleen paljon. Satelliittidatan hyödyntäminen ilmanlaadun tutkimuksessa erityisesti Suomessa on melko uusi tutkimusmuoto. Vuonna 2004 avaruuteen laukaistiin NASA:n (*National Aeronautics and Space Administration*) EOS-Aura-satelliitti, jonka mukana oli Suomen ja Hollannin yhteistyöprojektina rakentama OMI-instrumentti (*Ozone Monitoring Instrument*). OMI-instrumentista saatavaa dataa on kerätty yhtenäisesti vuodesta 2005 eteenpäin ja sen hyödyntämistä Suomen ilmanlaadun kartoittamisessa on tutkittu ensi kertaa vasta vuonna 2020 (Sundström *et al.* 2020). OMI-instrumentin keräämä typpidioksidihavaintojen sarja on pisin yhtenäinen satelliitin avulla kerätty havaintosarja Suomen ilmanlaadusta. OMI-instrumentin havaintoihin pohjautuva Alankomaiden kuninkaallisen meteorologisen instituutin (KNMI:n) tuottama QA4ECV-aineisto (*Quality Assurance for the Essential Climate Variables*) kuvaa algoritmin avulla typpidioksidin spatiaalista ja temporaalista jakaumaa globaalilla mittakaavalla (Boersma *et al.* 2018; NASA Aura 2020). Tutkin NASA:n EOS-Aura-satelliitissa olevan OMI-instrumentin tuottamien typpidioksidimittausten käytettävyyttä Suomen ilmanlaadun kehityksen seurannassa ja arvioinnissa, kun huomioidaan Suomen pohjoinen sijainti ja suhteellisen pieni koko. Käytän tutkimuksessani typpidioksidipitoisuuksien laskemiseen ja kartoittamiseen OMI-instrumentin keräämiä havaintoja ja siitä KNMI:n algoritmilla tuotettuja kuukausittaisia rasterimalleja.

Tutkimuksen päätavoitteena on tarkastella Suomen ilmanlaadun tilaa ja kehitystä tärkeän ja keskeisen ilmanlaatuindikaattorin, typpidioksidin (NO₂) avulla. Tutkimuksessa tuotetaan aikasarja-analyysinä vuosilta 2005–2017 NO₂-pitoisuuksien teemakarttasarja hyödyntäen koko OMI-instrumentin mittaushistorian pohjalta tuotettua QA4ECV-aineistoa. Näin saadaan tuotettua koko Suomen alueelta karttamuotoinen aikasarja alueellisesti kattavaa, yhtenäistä ja vertailukelpoista, havaintoasemista riippumatonta ilmanlaatuodataa. Suomen alueellisten ja ajallisten muutosten lisäksi tutkitaan samalla aikavälillä tapahtunutta muutosta koko Euroopan alueella ja peilataan siten Suomen ilmanlaadussa tapahtuneita alueellisia muutoksia koko Euroopan kehitystrendiin. Tutkimus antaa kuvan ilmanlaadun kehityskulusta pitkällä aikavälillä ja mahdollistaa ilmanlaatua heikentävien ilmiöiden ja lähteiden tarkemman paikantamisen kaukokartoitusteknologioiden avulla.

Tutkimuskysymykset:

1. Millaisia muutoksia Suomen typpidioksidipitoisuuksissa on tapahtunut vuosina 2005–2017?
2. Millaista alueellista vaihtelua typpidioksidipitoisuuksissa on havaittavissa Suomessa?
3. Miten OMI-instrumentti ja QA4ECV-aineisto soveltuvat Suomen typpidioksidipitoisuuksien tarkasteluun?
4. Millainen typpidioksidipitoisuuksien kehitystrendi on ollut Euroopassa vuoden 2005 jälkeen, ja miten Suomen kehitys vertautuu muuhun Eurooppaan?

2. Teoreettinen viitekehys

2.1. Satelliittikaukokartoitukseen perustuva ilmakehän tutkimus

2.1.1. Kaukokartoitus tutkimusmenetelmänä

Kaukokartoituksella tarkoitetaan sellaista mittaustapaa, jossa kohdetta havainnoidaan mittalaitteella välimatkan päästä. Kaukokartoitusta voidaan tehdä joko avaruudesta käsin satelliittien avulla tai ilmakuvauksella lentokoneiden tai dronien avulla. Kuvauslaitteet havainnoivat säteilyä ja tallentavat sen avulla dataa mitattavasta kohteesta (Aggarwal 2004). Etuna kaukokartoituksen käyttämisessä tutkimusmenetelmänä on laaja alueellinen (ja vertikaalinen) kattavuus, josta on kartoituksessa hyötyä (Sundström *et al.* 2020). Kaukokartoitusta voidaan hyödyntää monenlaisiin tarkoituksiin: esimerkiksi maankäytön ja peittävyiden kartoittamiseen, maatalouteen, maaperän kartoittamiseen, metsätalouteen, kaupunkisuunnitteluun, arkeologisiin, geomorfologisiin, geopoliittisiin tai ekologisiin tutkimuksiin, maanpeitteen muutosten tarkasteluun, kasvillisuusindeksien ja kasvillisuuden tilan seurantaan, vedenlaadun seurantaan, kaupunkien kasvun tarkasteluun ja suunnitteluun, korkeusmallien tekemiseen ja tulvien seurantaan.

Kaukokartoitusmenetelmät voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: aktiivisiin ja passiivisiin (Baidar *et al.* 2013). Aktiiviset anturit lähettävät energiaa omasta energianlähteestään skannatakseen kohteita ja alueita, minkä jälkeen anturi havaitsee ja mittaa kohteesta heijastuvan tai takaisin siroavan säteilyn. Esimerkkejä aktiivisesta kaukokartoituksesta, jossa mitataan säteilyn ja paluumatkan välinen aikaviive ja määritetään kohteen sijainti, nopeus ja suunta, ovat esimerkiksi LiDAR (*Light Detection and Ranging*) ja RADAR (*Radio Detection and Ranging*). Passiiviset anturit ovat riippuvaisia ulkoisesta energianlähteestä, joista yleisimmin hyödynnetty on auringosta tuleva säteily. Anturit keräävät säteilyä, jonka kohde tai ympäröivä alue lähettää tai heijastaa. Heijastunut auringonvalo on yleisin passiivisten antureiden mittaama säteilyn lähde. Esimerkkejä passiivisista kaukokartoitusmenetelmistä ovat valokuvat, infrapunakuvat, CCD-kennot (*Charge-Coupled device*) ja radiometrit. Tällaisia aktiivisia ja passiivisia menetelmiä hyödyntäviä mittalaitteita voi olla esimerkiksi drooneissa, lentokoneissa tai satelliiteissa. Yhdistävä tekijä kaikille kaukokartoitusmenetelmille laitteesta ja mittaustavasta riippumatta on se, että mittalaite kuvantaa kartoitettavaa kohdetta kaukaa.

Satelliittikaukokartoituksessa mittalaite, jota kutsutaan satelliitti-instrumentiksi, on kiinnitetty osaksi satelliittia, jonka mukana se lentää kiertoradalla. Satelliitti lentää kiertoradalla, jonka reitti määrittää mitattavan alueen (Sundström *et al.* 2020). Satelliitti-instrumentin rata koostuu yksittäisistä mittauksista, joiden arvot kuvataan pikselinä. Pikselin koko asetettuna maanpinnan tasoon määrittää satelliitin erotuskyvyn eli spatiaalisen resoluution. Yksittäinen satelliitti-instrumentin tekemä mittaus tuottaa siis havaintoarvon koko pikselin alueelle ja sen voidaan ajatella kuvaavan alueen keskimääräistä mittausravoa. Pikselien koko ei pysy satelliitin mittausradalla vakiona, vaan pikselikoko kasvaa ja siten spatiaalinen resoluutio laskee mittausradan reunoja kohti mentäessä. Spatiaalisen resoluution laskeminen johtuu maapallon pinnan kaarevuudesta.

Kaukokartoitusmenetelmiä käyttäen voidaan havainnoida maanpinnan kohteiden lisäksi myös ilmakehän ominaisuuksia. Ilmakehän kaukokartoitukseen voidaan hyödyntää satelliittien mittalaitteita, jotka kykenevät havainnoimaan ilmakehän ominaisuuksia. Ilmakehän kaukokartoitus perustuu satelliitti-instrumenttien kykyyn tunnistaa ja mitata ilmakehän yhdisteiden heijastuksia ja tuottaa niistä dataa (Martin 2008). Ilmakehän kaukokartoituksella voidaan saada maailmanlaajuisesti tietoa esimerkiksi ilmanlaadun indikaattoreiden pitoisuuksista alueen sijainnista riippumatta, jolloin dataa saadaan myös alueilta, joilla mittausten tekeminen ei ole mahdollista tai se on sijainnista johtuen vaikeaa (Sundström 2014). Tässä tutkimuksessa keskityn satelliittikaukokartoitukseen, jossa havainnoidaan ilmanlaadun indikaattoreita satelliitti-instrumenttien keräämien havaintojen avulla.

2.1.2. Ilmakehän satelliittikaukokartoitus

Satelliittien avulla on tehty ilmakehän kuvantamistutkimusta jo vuodesta 1960, kun ensimmäinen meteorologinen satelliitti laukaistiin avaruuteen (Aggrawal 2004). Satelliittikaukokartoitukseen pohjautuva ilmanlaatututkimus on kehittynyt paljon viimeisten vuosikymmenten aikana (Martin 2008). Satelliitti-instrumenteista saatavia havaintoja voidaan käyttää ilmakehän ominaisuuksien tutkimiseen, ja selvittää siten ilmakehän koostumusta. Satelliittikaukokartoituksen avulla kerättyjä havaintoja voidaan siis hyödyntää myös ilmansaasteiden kartoittamiseen, kuten eri ilmansaasteiden pitoisuuksien jakaumaan alueellisesti, ajallisesti ja vertikaalisesti, sekä näin seurata ilmansaasteiden leviämistä ja tunnistaa mahdollisia päästölähteitä. Ilmansaasteiden kartoitus, seuranta ja päästölähteiden tunnistaminen on tärkeää ilmastotyötä, ja sen hyödyt ylettyvät ilmaston sekä ihmisten ja luonnon hyvinvoinnin parantamiseen (Franceschini *et al.* 2005; Baidar *et al.* 2013; Casquero-Vera *et al.* 2018). Satelliittikaukokartoituksen yksi tärkeä sovelluskohde on myös mittaustulosten liittäminen osaksi sää- ja ilmanlaatumallien tuottamista, jotta voidaan tarkentaa mallien laskentaa ja siten myös parantaa ennusteiden paikkansapitävyyttä (Sundström *et al.* 2020).

Kaukokartoitussatelliitit, joiden avulla mitataan troposfäärin ilmanlaatua, lentävät usein aurinkosynkronisesti läheltä napoja (Martin 2008). Tyypillisesti lentokorkeus on matala: noin 700 km. Satelliitit käyttävät hyväkseen maan painovoimakenttää kiertoradalla pysymiseen. Satelliitit ylittävät päiväntasaajan kahdesti kiertoradallaan, kerran etelään ja kerran pohjoiseen, ja päivittäiset mittaussajakohdat pysyvät lähes vakioina. Mittaustaajuus ja havaintojen alueellinen kattavuus korkeilla leveysasteilla on polaariradan satelliiteilla suhteellisen suuri, koska maapallo pyörii saman aikaisesti oman akselinsa ympäri (Martin 2008; Sundström *et al.* 2020). Alailmakehän kaukokartoituksen mittausten menetelmät voidaan jakaa karkeasti kolmeen pääkategoriaan. Suurin osa satelliitti-instrumenteista hyödyntää passiivisia mittaustekniikoita havaiten joko auringonvalon takaisinheijastumaa tai lämpöinfrapunasäteilyä. Aktiivisia mittaustekniikoita hyödyntävät satelliitit lähettävät energiaa omasta energianlähteestään ja mittaavat sen takaisinheijastumaa (Baidar *et al.* 2013). Ilmakehän ominaisuuksia voidaan mitata parhaiten tällaisella aurinkosynkronisella passiivisella satelliitti-instrumentilla, joka kiertää polaarilla kiertoradalla ja käyttää mittaamiseen auringosta heijastunutta takaisinsirontaa tai lämpösäteilyä (Sundström *et al.* 2020).

Ilmanlaatua mittaava keskeytyksetön aikasarja aloitettiin vuonna 1995, kun Euroopan avaruusjärjestö (ESA) laukaisi GOME-instrumentin (*Global Ozone Monitoring Experiment*) maan kiertoradalle kartoittamaan ilmakehän koostumusta ja ilmanlaatua (ESA 2021). GOME-instrumentin spatiaalinen resoluutio oli nykyisiin satelliitti-instrumentteihin verrattuna karkea: sen vaihteluväli oli $40 \times 40\text{--}40 \times 320 \text{ km}^2$ (Burrows *et al.* 1999; ESA 2021). Nykyisin käytettävät korkeampiresoluutioiset satelliitti-instrumentit jatkavat tuolloin aloitettua yhtenäistä mittaussarjaa. GOME-instrumentin jälkeen kehitetty SCHIAMACHY-instrumentti (*Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography*) laukaistiin avaruuteen Envisat-satelliitin (*Environmental Satellite*) mukana vuonna 2002. Sen spatiaalinen resoluutio oli edeltäjänsä huomattavasti parempi: tyypillisesti noin $30 \times 60 \text{ km}^2$. GOME- ja SCHIAMACHY-instrumenttien ansiosta satelliittihavaintoja tyypidioksidista, rikkidioksidista ja aerosoleista on saatu 2000-luvun puolivälin jälkeen useista eri instrumenteista samanaikaisesti. Siten datan laatua on voitu arvioida ja spatiaalista resoluutiota parantaa.

Yksi ilmanlaadun kaukokartoituksen merkittävimmistä saavutuksista on OMI-instrumentin kehittäminen. OMI-mittalaite laukaistiin avaruuteen vuonna 2004 NASA:n Aura-satelliitin mukana, ja se on kerännyt dataa ilmakehän koostumuksesta yli 15 vuoden ajan (NASA Aura 2020). OMI-instrumentti ja Aura-satelliitti kiertävät iltapäiväradalla. Suomella ja Ilmatieteen laitoksella on ollut Alankomaiden meteorologisen instituutin ohella merkittävä rooli OMI-mittalaitteen kehittämisessä. OMI on NASAN sekä Suomen ja Alankomaiden yhteistyöprojekti. OMI-mittalaite tuottaa globaaleja havaintoja troposfäärin koostumuksesta keräten ilmanlaatudataa mm. tyypidioksidista, rikkidioksidista ja ilmakehän aerosoleista. Sen tuottamaa dataa on käytetty lukuisissa tieteellisissä tutkimuksissa (Levelt *et al.* 2018). OMI-instrumentin merkitys perustuu sen spatiaaliseen resoluutioon, joka on edeltäjiään huomattavasti tarkempi: $13 \times 24 \text{ km}^2$. Tarkempi spatiaalinen resoluutio mahdollisti ensimmäistä kertaa ilmakehän kaukokartoituksen historiassa ilmanlaadun kartoittamisen kaupunkitasolla ja siten myös ilmansaasteiden päästölähteiden tarkemman paikantamisen (Sundström *et al.* 2020).

Ilmanlaadun kaukokartoittamisessa on etuna havaintojen kerääminen ja mittaustulosten saaminen myös sellaisilta alueilta, joilta ei ole mitattavissa havaintoja muilla tavoin. Ilmanlaadun havaintoasemien verkosto on globaalilla mittakaavalla satelliittimittauksiin verrattuna harva ja epätasainen, ja siksi *in situ* -mittauksia ei ole saatavilla yhtä laajasti kuin satelliitti-instrumenttien ilmanlaatuhavaintoja (Bechle *et al.* 2012). Satelliittihavaintojen globaali kattavuus on mahdollista saavuttaa nykyisellä teknologialla jopa vuorokaudessa käytetystä satelliitti-instrumentista ja mittausalueen koosta riippuen (Martin 2016; Sundström 2014; Sundström *et al.* 2020). Korkeilla leveysasteilla ja lähellä napa-alueita polaariradan satelliitti-instrumentit voivat tuottaa alueellisia havaintoja useamman kerran päivässä, sillä instrumenttien alueellinen kattavuus on siellä suhteellisesti suurempi kuin lähellä päiväntasaajaa.

Satelliitti-instrumenttien avulla saadaan mitattua monia ilmanlaadun kannalta mielenkiintoisia parametreja, kuten typpidioksidia (NO₂), rikkidioksidia (SO₂), ilmakehän pienhiukkasia eli aerosoleja, hiilimonoksidia (CO) sekä otsonia (O₃) (Cooper *et al.* 2012). Aerosolien mittauksessa satelliitti-instrumentit keräävät havaintoja auringon valoa absorboivien aerosolien esiintyvyydestä, kuten savu, tuhka ja aavikkopöly (Sundström 2014). Koska aerosolien optisen paksuuden mittaaminen kykenee huomioimaan vain optisesti aktiivisia aerosoleja (halkaisija noin >0,1 µm), satelliittimittauksilla ei voida mallintaa sitä pienempiä hiukkasia. Aerosolien optista paksuutta havainnoidaan NASA:n MODIS Terra ja MODIS Aqua -instrumenteilla (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*). MODIS-instrumentit lentävät kahden eri polaariradan satelliitin mukana, ja tekevät havaintoja aamupäivällä (Terra) ja iltapäivällä (Aqua). Ilmakehän hiilimonoksidipitoisuutta (CO) havainnoidaan TROPOMI-mittalaitteen avulla, joka on ensimmäinen samanaikaisesti hiilimonoksidi- ja typpidioksidihavaintoja keräävä instrumentti. TROPOMI laukaistiin avaruuteen loppuvuonna 2017 ja sen spatiaalinen resoluutio on edeltäjänsä (OMI-instrumenttia) tarkempi: 7 x 3,5 km² (ESA 2021). Tässä tutkimuksessa keskitytään OMI-instrumenttiin ja sen keräämiin typpidioksidihavaintoihin Suomen ja Euroopan alueella.

2.1.3. Ilmanlaadun tutkimuksen ja kaukokartoituksen kehitys

Satelliittikaukokartoituksella on ilmanlaadun indikaattoreiden ja ilmansaasteiden tutkimuksessa monipuolinen historia. Vuonna 1967 Walter A. Lyons ja Rudolph B. Husar tutkivat GOES-satelliitin avulla ilmansaastejaksoa ja esittivät satelliitin tuottaman kuvan, josta voitiin havaita USA:n ilmakehässä suuri samea alue. Vuonna 1979 Todd *et al.* hyödynsivät tutkimuksessaan Landsat-satelliitista saatavaa maankäyttödataa ja täydensivät sitä maanpinnan monitoroinnilla määrittäessään ilmansaasteille altistuvan väestön määrää. Robert S. Frasier tutki vuonna 1976 satelliittimittausten avulla Saharasta kulkeutuvan pölyn määrää ilmakehässä ja vuonna 1984 Frasier *et al.* hyödynsivät GOES-instrumentin havaintoja suorittaakseen ensimmäiset maan yläpuoliset AOD-mittaukset (*Aerosol Optical Depth*) sekä käyttivät havaintoja tutkiakseen paikallista sumuilmiota itäisessä USA:ssa. Fishman *et al.* tutkivat ilmansaasteajanjakson erityispiirteitä hyödyntäen TOMS satelliitti-instrumentin (*Total Ozone Mapping Spectrometer*) otsonimittauksia vuonna 1987. Vuonna 1990 Fishman *et al.* jatkoivat troposfäärin otsonin tutkimista määrittämällä satelliittidatan avulla otsonipitoisuuden jakaumaa ilmakehässä. Uudemmassa tutkimuksessaan vuonna 2008 Fishman *et al.* tutkivat troposfäärin ilmansaasteita satelliittikaukokartoituksen avulla. Satelliittidataa ja kaukokartoitusta on hyödynnetty ilmanlaadun tutkimuskentällä jo pitkän aikaa. Satelliittidatan ja kaukokartoituksen sovelluksien ja teknologioiden kehitys on ollut huimaa viimeisten vuosikymmenten aikana.

Taulukko 1 kuvaa kaukokartoituksen varhaista kehitystä ja siinä tapahtuneita tärkeitä kehitysaskaleita. Käännekohtia kaukokartoituksen kehityksessä ovat olleet säteilyn tutkimuksen ja valokuvauksen keksimisen ohella tutkimusinfrastruktuurin, kuten satelliittiteknologioiden kehitys ja erilaisten kuvantamistutkimusten sovelluksien kehittäminen. Kehityskulku jakautuu vahvasti säteilytutkimukseen ja teknologioiden sekä niiden sovellusten kehittämiseen.

Taulukko 1. Taulukossa esitetään kaukokartoituksen ja tieteellisen kuvantamisen varhaista kehitystä ja sen tärkeitä käännekohtia (Aggrawal 2004).

Kaukokartoituksen varhaisen kehityksen merkittäviä edistysaskeleita

1800	Sir W. Herschel löysi infrapunasäteilyn
1839	Alettiin harjoittaa valokuvausta
1847	J.B.L. Foucault esitti infrapunaspektrin
1859	Valokuvaus kuumailmapalloista
1873	J.C. Maxwellin teoria sähkömagneettisesta spektristä
1909	Valokuvaus lentokoneista
1916	Ensimmäinen maailmansota: ilmatiedustelu
1935	Tutkan kehitys Saksassa
1940	Toinen maailmansota: Sähkömagneettisen spectrin näkymättömän osan sovellukset
1950	Sotilaallinen tutkimus ja kehitys
1959	Ensimmäinen avaruudesta otettu valokuva Maasta
1960	Ensimmäinen meteorologinen satelliitti TIROS laukaistiin
1970	Skylabin kaukokartoitushavaintoja avaruudesta
1972	Landsat 1 -satelliitin laukaisu: MMS-anturi
1972	Digitaalisen kuvankäsittelyn nopea kehitys
1982	Landsat -4:n lanseeraus: Landsat-sensoreiden uusi sukupolvi: TM
1986	Ranskalainen kaupallinen kaukokartoitussatelliitti SPOT
1986	Hyperspektristen antureiden kehittäminen
1990	Korkean resoluution avaruuspohjaisten järjestelmien kehittäminen
1999	EOS-satelliitin laukaisu: NASA:n kaukokartoitusprojekti
1999	Erittäin korkean spatiaalisen resoluution IKONOS-anturijärjestelmän julkaisu

Satelliittien avulla on tuotettu maailmanlaajuisesti dataa ilmakehän koostumuksesta ja ilmansaastepitoisuuksista jo usean vuosikymmenen ajan. Tutkimusmenetelmissä ja mittausteknologioissa tapahtunut kehitys on ollut satelliittikaukokartoituksen osalta nopeaa viime vuosikymmeninä. Myös havaintojen tarkkuus on parantanut spatiaalisen resoluution ansiosta satelliitti-instrumenteista saatavan datan laatua merkittävästi. Kehitys sekä menetelmissä, teknologioissa että datan laadussa on avannut uusia sovellusmahdollisuuksia satelliittidatan entistä monipuolisempaan hyödyntämiseen tutkimuskentällä.

Ensimmäiset satelliittikaukokartoituksen tutkimuskohteet ja sovellukset liittyivät pilvipeitteen havainnointiin ja sääilmiöiden kartoittamiseen (Sundström *et al.* 2020). Ensimmäisiä satelliitti-instrumenttien avulla havainnoitavia ilmakehän parametreja oli ilmakehän otsoni. Esimerkiksi 1980-luvulla Etelämantereen yllä ilmenneen otsoniaukon havainnointi ja tutkimus oli mahdollista toteuttaa hyödyntämällä satelliitti-instrumenttien avulla kerättyä dataa ilmakehän kokonaisotsonipitoisuudesta. Satelliitti-instrumenttien ilmakehän koostumuksesta keräämien havaintoparametrien määrä ja tarkkuus ovat moninkertaistuneet tultaessa 2000-luvulle. Nykyään tärkeitä sovelluskohteita ovat ilmanlaadun indikaattorien seuranta ilmansaastepitoisuuksien rajoittamisen ja raportoinnin avuksi sekä erilaisten nopeiden luonnonilmiöiden, kuten tulvien, metsäpalojen tai tulivuorenpurkausten ja niiden aiheuttamien tuhojen seuranta. OMI-mittalaitteen avulla voidaan tunnistaa tuliperäisen tuhkan ja rikkidioksidin pitoisuuksia yli 100 kertaa herkemmin kuin edeltävän TOMS-mittalaitteen avulla (NASA Aura, 2020). Havainnot ovat tärkeitä hyödyllisiä esimerkiksi lentoliikenteen turvallisuuden takaamiseksi. Tässä tutkimuksessa keskitytään niiden modernien satelliitti-instrumenttien, jotka on suunniteltu erityisesti troposfääriin ilmansaastepäästöjen tutkimukseen, tuottaman datan hyödyntämiseen.

Satelliitti-instrumentit mittaavat ilmanlaadun parametrien pitoisuuksia koko troposfääriin läpi leikkaavassa vertikaalisessa ilmakehäpylväässä. Ilmanlaatua tutkitaan kaukokartoituksen lisäksi myös paikallisesti havaintoasemilla, jotka mittaavat ilmanlaadun parametrien pitoisuuksia lähellä maanpintaa. Mittaustapojen eroavaisuuksista johtuen tulokset ilmoitetaan eri yksiköissä, ja siksi mittaustulokset eivät ole suoraan verrannollisia keskenään. Mittausten avulla on kuitenkin mahdollista tehdä vertailevaa tutkimusta ja kalibroida kerättyä dataa laadun parantamiseksi.

Satelliitti-instrumenttien ja niistä saatavien mittausten kehitys on ollut nopeaa erityisesti viime vuosien aikana. Vuonna 2004 avaruuteen laukaistu OMI-mittalaite mullisti havaintojen tarkkuuden spatiaalisen resoluution osalta. Toinen mullistus satelliitti-instrumenttien kentällä oli loppuvuonna 2017 ESA:n avaruuteen laukaiseman satelliitin mukana toiminut TROPOMI-mittalaite (*Tropospheric Monitoring Instrument*). Tämä pohjautuu teknologioiltaan edeltäneeseen OMI-laitteeseen, mutta TROPOMI:n spatiaalinen resoluutio on huomattavasti tarkempi ja mittauskanavat ylettyvät pidemmille aallonpituuksille, jotka mahdollistavat myös hiilimonoksidin ja metaanin pitoisuuksien mittaamisen (Ialongo *et al.* 2020). TROPOMI on tuotettu osana EU:n (*Euroopan Unioni*) Copernicus-tutkimusohjelmaa, jonka tavoitteena on yhdistää satelliiteista saatavia havaintoja maanpinnalta kerättyihin havaintoihin ja yhdistää siten tutkimusmalleja yhdeksi kokonaisuudeksi. Tutkimusohjelmassa keskitytään tutkimaan luontoa monipuolisesti kartoittamalla ilmakehää, vesikehää, maanpinnan muutoksia ja ilmastonmuutosta. Aiempaa tarkempi spatiaalinen resoluutio mahdollistaa pienempien alueellisten vaihteluiden ja yksittäisten päästölähteiden paremman tunnistamisen.

Tulevaisuudessa satelliitti-instrumenttien mittaustarkkuus, sekä spatiaalinen että temporaalinen resoluutio tulevat kehittymään entistä paremmiksi. Kehitteillä olevien Sentinel-4 ja Sentinel-5 satelliittien pääasiallinen tehtävä on mitata ilm (Sundström *et al.* 2020). Sentinel-4-satelliitti

laukaistaan geostationääriselle radalle, mikä tarkoittaa sitä, että se pysyy maapallon pyörimisvauhdin mukana ja mittaa ilmanlaatua Euroopan yllä, jolloin havaintojen temporaalinen resoluutio voi parantua päivittäisistä havainnoista muutaman tunnin välein saataviin havaintoihin. Myös Aasiassa ja Yhdysvalloissa on suunnitteilla vastaavia paikallisia mittauksia korkealla temporaalisella resoluutiolla tekeviä geostationäärisiä satelliitteja.

2.2. Ilmanlaadun indikaattorit ja ilmansaasteet

Ilmanlaatua arvioidaan ilmanlaadun indikaattorien pitoisuuksia mittaamalla ja eri kombinaatioiden avulla laskettujen ilmanlaatuindeksien avulla. Ilmanlaatuindeksi tarkoitetaan laskennallista arvoa, joka kuvaa ilmanlaadun tilannetta alueella. Ilmanlaatuindeksi voidaan laskea hyödyntämällä useamman ilmanlaadun indikaattorien pitoisuutta. Indeksien laskennassa hyödynnettäviä indikaattoreita ovat typpidioksidi (NO_2), rikkidioksidi (SO_2), pienhiukkasten määrä, otsoni (O_3), hiilimonoksidi (CO) ja haisevat rikkiyhdisteet (TRS), joista suurinta osaa voidaan havaita satelliitti-instrumenttien mittalaitteilla. Suomessa käytössä olevilla mittausasemilla ei mitata kaikkia ilmanlaatuindeksien laskentaan käytettäviä indikaattoreita, joten asemien tuottamat indeksiluvut eivät välttämättä ole keskenään vertailukelpoisia. Ilmanlaadun indikaattoreita ja ilmanlaatuindeksejä mitataan, jotta saadaan ympäristön ja ihmisen kannalta merkittävää tietoa ilmanlaadusta. WHO:n (*World Health Organization, 2018*) ja EPA:n (*The US Environmental Protection Agency*) mukaan nämä ilmanlaadun indikaattorit aiheuttavat vakavaa vaaraa ihmisten terveydelle, maatalouden tuottavuudelle ja ympäristölle.

Ympäristö ja sen myötä myös ihmiset altistuvat monitahoiselle sekoitukselle erilaisia ilmansaasteita, joita syntyy useista eri lähteistä ja jotka muuttuvat ilmakehän prosesseissa uusiksi ilmansaasteiksi. Useat näistä ilmansaasteista voivat aiheuttaa vakavia terveysongelmia ja ongelmia ekosysteemeille (Guerreiro et al. 2014). Ilmanlaadun parametrit kuormittavat ympäristöä monin tavoin, ja yhdisteiden kombinaatiot ovat keskeisessä osassa esimerkiksi ilmastonmuutoksen etenemisessä. Rikin ja typen oksidit aiheuttavat ympäristölle monenlaisia ongelmia, joista yhtenä merkittävänä ilmiönä voidaan mainita happosateet. Happosateisiin voidaan luokitella kuiva ja märkä laskeuma rikin ja typen oksideja (Bhola et al. 2010). Vaikka happosateiden määrät ovat Euroopan alueella laskemassa ilmiötä esiintyy edelleen. Muualla maailmassa laskeuman määrä saattaa jopa kasvaa riippuen rikin ja typen oksidien päästömääristä ilmakehässä. Happosateet aiheuttavat ongelmia ekosysteemille, sillä niiden on tutkittu mm. vaikeuttavan lintujen pesintää, happamoittavan maaperää ja pintavesiä sekä aiheuttavan pitkäaikaisvaikutuksia esimerkiksi kasvillisuuden hyvinvoinnille (Ciumasu & Costica 2010). Happamoittaminen aiheuttaa siten ongelmia myös ihmiselle esimerkiksi hankaloittamalla elinkeinojen harjoittamista. Oksidien laskeuma voi myös esimerkiksi lisätä raskasmetallien liikkumista maaperässä ja vesistöissä. Sen lisäksi, että happamat laskeumat voivat aiheuttaa suuria haittoja ekosysteemille, pienetkin nousut typpilaskeumissa voivat aiheuttaa muutoksia ekosysteemiin, sillä typen kierto on ekosysteemien toiminnan kannalta keskeistä. Lisääntynyt typen oksidien määrä myös edistää alailmakehän otsonin muodostumista ja vaikuttaa maaperän ravinteiden häviämiseen.

WHO (2021) on koostanut tärkeää tietoa ilmansaasteiden terveysvaikutuksista. Ilmansaasteet ovat suuri ja keskeinen ympäristöriski terveydelle aiheuttaen keskimäärin kaksi miljoonaa ennenaikaista kuolemaa vuodessa maailmanlaajuisesti. Ilmansaasteille altistuminen ei ole yksilön kontrolloitavissa, ja siksi ilmansaasteita hillitseviä toimenpiteitä vaaditaan paikallisilta, kansallisilta ja kansainvälisiltä toimijoilta. Yli puolet ilmansaasteiden päästökuormasta syntyy kehittyvien maiden ihmistoiminnan seurauksena. Ilmansaastepitoisuuksien vähentämisellä voidaan auttaa vähentämään merkittävästi hengitystieinfektioiden, sydänsairauksien ja keuhkosityövän esiintymistä väestössä. Krooninen altistuminen pienhiukkaspartikkeleille lisää sydän- ja verisuonitautien, hengitystiesairauksien ja keuhkosityövän riskiä (Gurjar et al. 2010). Altistuminen ilmansaasteille lisää kuolleisuutta erityisesti nuorten lasten ja vanhusten keskuudessa. WHO arvioi, että Euroopassa asuvilla on ilmansaasteille altistumisen seurauksena noin 5 % alentunut vitaalikapasiteetti (suurin mahdollinen ilman määrä, joka voidaan vapauttaa keuhkoista suurimman mahdollisen sisäänhengityksen jälkeen). Euroopan keskiarvoisessa kaupungissa asuvilla asukkailla elinajanodote laskee ilmansaasteille altistumisen seurauksena WHO:n arvion mukaan jo vuodessa.

2.3. Typpidioksidi ilmansaasteena

2.3.1. Typpidioksidin päästölähteet

Ilmakehässä yleisimmin esiintyvät alkuaineet typpi N_2 (78 %) ja happi O_2 (21 %) eivät normaalitilassa reagoi keskenään (Putrenko & Pashynska 2017). Typen oksideja NO_x syntyy pääasiassa erilaisten palamisprosessien seurauksena (Anttila et al. 2011). Palamisprosessissa happi reagoi typen kanssa ja siitä syntyvä pääasiallinen tuote on typpimonoksidi (NO). Typpidioksidia (NO_2) muodostuu, kun palamistuotteena syntynyt typpimonoksidi (NO) reagoi ilmakehässä olevan hapen (O_2) kanssa. Reaktiokaava on $2 NO + O_2 \rightarrow 2 NO_2$. Kaikista ilmakehän oksideista suurin osa koostuu nimenomaan typpidioksidista, joka on väritön ja hajuton kaasu ja jolla on ärsyttävä vaikutus hengityselimistöön (Putrenko & Pashynska 2017). Typpidioksidia syntyy lähes kaikessa palamisessa, vaikka lähtöaine ei sisältäisi typpeä, sillä ilmakehän typpi reagoi korkeissa lämpötiloissa helposti hapen kanssa.

Typpidioksidin päästölähteet voidaan jakaa karkeasti kahteen päätyyppiin: antropogeenisiin (ihmistoiminnasta peräisin oleviin) ja luonnollisiin. Valtaosa typpidioksidipäästöistä on antropogeenisiä, ja niiden päästölähteet voidaan jäljittää ihmistoiminnasta peräisin oleviksi (Kang et al. 2018). Suurimpia antropogeenisiä typpidioksidin päästölähteitä ovat polttoprosessit, kuten lämmitys, energiantuotanto, teollisuuden prosessit ja liikennevälineiden, kuten autojen, laivojen ja lentokoneiden moottorit. Näistä haitallisimpia ovat lähellä maanpintaa tapahtuvat prosessit, sillä typpidioksidipitoisuudet lähellä maanpintaa aiheuttavat eniten terveyshaittoja. Suuret antropogeeniset poltosta peräisin olevat päästölähteet johtuvat pääasiassa fossiilisten polttoaineiden ja biomassan polttamisesta ja ne ovat päällekkäisiä luonnollisten lähteiden, kuten maaperän mikrobiprosessien, salamoinnin ja stratosfääristä kulkeutuvan typpidioksidin kanssa (Jaeglé et al. 2005). Fossiilisten polttoaineiden palamisesta syntyvien typpidioksidipäästöjen määrä

tunnetaan melko tarkasti, mutta muiden päästölähteiden osallisuuden arviot ovat epävarmoja. Esimerkiksi biomassan polton ja maaperän sekä ilmakehän kaasunvaihdon osallisuus tunnetaan huonommin. Maailmanlaajuisesti voidaan arvioida biomassan poltosta aiheutuvien typen oksidien päästöjen osuudeksi noin 14 % maanpinnalta tulevista päästöistä. Tästä puolet aiheutuu Afrikassa syttyvien maastopalojen seurauksena.

Typpidioksidia voi esiintyä myös sisätiloissa, jolloin sitä esiintyy suoraan hengitysilmassa ja on siksi erityisen vaarallista (Tuomisto 2020). Typpidioksidin sisälähteitä ovat pienpolttoon liittyvät lähteet, kuten lämmitys ja ruuanlaitto. Esimerkiksi kodin tai saunan lämmitys puuta polttamalla, kaasuliesi, tai tupakan polttaminen sisällä synnyttävät hengitysilmaan myrkyllistä typpidioksidia. Lisäksi sisätiloissa käytettävät polttomootorit, kuten jäänhoitokoneet, trukit tai muut sisällä ajettavat kulkuvälineet voivat aiheuttaa hyvin korkeita typpidioksidin sisäilmapitoisuuksia.

Typpidioksidin päästölähteitä on tutkittu laajasti, sillä niillä on suuri merkitys ilmanlaadulle ja ihmisen terveydelle. Typpidioksidipäästöjen pistemäisiä lähteitä, kuten voimalaitoksia ja kaupunkialueita, on kartoitettu sekä tutkittu niiden yhteyttä otsonin muodostumiseen (Martin 2008). Korkeissa typen oksidien pitoisuuksissa haihtuvien orgaanisten yhdisteiden saatavuus rajoittaa haitallisen alailmakehän otsonin muodostumista, kun taas alhaisissa NO_x-olosuhteissa typen oksidien saatavuus säätelee otsonin muodostumisnopeutta. Paikallisella mittakaavalla tehtävä tutkimus on tärkeää, sillä typpidioksidipäästöt liikkuvat kaupunkien yli esimerkiksi tuulen mukana. Viimeisen vuosikymmenen aikana alailmakehän otsonipitoisuuden alentamiseen tähtäävä päästöpolitiikka on johtanut myös typpidioksidipäästöjen vähenemiseen Euroopassa. Kaupungistumisen myötä yli puolet maailman väestöstä asuu kaupungeissa, ja siksi kaupungeista on kehittynyt typpidioksidin päästölähteiden keskittymiä. Kaupungit tarjoavat kuitenkin myös mahdollisuuksia typpidioksidipitoisuuksien vähentämiseen esimerkiksi kehittämällä puhtaampia teknologioita teollisuuteen ja liikenteeseen.

2.3.2. Typpidioksidin terveys- ja ympäristövaikutukset

Typpioksididi on itsessään heikko kasvihuonekaasu. Sillä on kuitenkin merkittäviä vaikutuksia ilmanlaatuun, koska se toimii muiden indikaattorien, kuten alailmakehän otsonin, aerosolien ja happiradikaalien edeltäjänä (Gurjar *et al.* 2010). Alailmakehässä typen oksidit edistävät valokemiallisia reaktioita ja siten myös otsonin tuotantoa. Stratosfäärissä sijaitsevat typen oksidit taas toimivat katalyytteinä yläilmakehän otsonin hajoamisessa edistäen pitkällä aikavälillä otsonikatoa (Grewe *et al.* 2012). Typpidioksididi aiheuttaa myös erilaisia terveys ja ympäristöhaittoja, kuten hengitystieongelmia, rehevöitymistä ja happamoitumista. Ilmansaasteet vaikuttavat ihmisiin eri tavoin asettaen erityisen alttiiksi vanhukset, lapset ja ne, joilla on jokin sairaus (WHO 2021). Ilmansaasteiden altistuminen ei ole yksilöiden käsissä, mikä asettaa yhteiskunnan heikommassa asemassa olevat, joilla ei ole mahdollisuutta laadukkaaseen terveydenhuoltoon, alttiiksi ilmansaasteiden vaikutuksille.

Epidemiologiset tutkimukset ovat osoittaneet typpidioksidin aiheuttavan useiden hengityselimistön ongelmien ja sairauksien lisääntymistä (Gurjar et al. 2010). Tutkimuksissa voidaan esimerkiksi huomata, että astmaa sairastavien lasten keuhkoputkentulehduksen oireet lisääntyvät pitkäaikaisen typpidioksidille altistumisen yhteydessä. Typpidioksidi saattaa esimerkiksi voimistaa astmaa sairastavien ja allergikkojen reagoitua siitepölylle. Vähentynyt hengityskapasiteetti ja hengitystieoireiden kasvu liittyy myös typpidioksidipäästöihin sellaisilla pitoisuuksilla, joita voidaan tällä hetkellä mitata esimerkiksi Euroopan ja Pohjois-Amerikan kaupunkialueilla. Nykyinen WHO:n ohjeellinen typpidioksidipitoisuuksien vuosikeskiarvo, joka on asetettu väestön suojelemiseksi hengitysilman typpidioksidin terveysvaikutuksilta, on $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Euroopan Unionin asettama vuotuisen keskiarvon typpidioksidipitoisuusraja ilmanlaadulle on sama kuin WHO:n ojeaarvo ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja vastaava standardi alailmakehän otsonille on $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Martin 2008). Typpidioksidilla on lisäksi useita korrelaatiovaikutuksia: lyhyellä aikavälillä pitoisuuksien ylittäessä $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$, typpidioksidi on myrkyllinen kaasu, joka aiheuttaa merkittävää hengitysteiden tulehdusta. Typpidioksidi on otsonin ohella alahengitysteitä ärsyttävä kaasu, sillä se pääsee kulkeutumaan hengitysilman mukana myös pienimpiin keuhkoputkiin ja keuhkorakkuloihin (Tuomisto 2020). Altistuminen typpidioksidille hengitysilmassa lisää keuhkoihin päätyessään yleisten hengitystieoireiden, kuten yskän ja nuhan esiintymistä. Suurina pitoisuuksina typpidioksidi voi myös aiheuttaa esimerkiksi äkillisen keuhkopöhön linkittyen siten myös sydän- ja verisuonisairauksien esiintymiseen väestössä. Pitkäaikainen altistuminen aiheuttaa tutkitusti myös kuolleisuuden lisääntymistä väestössä (Hoek et al. 2013).

Ilmakehän typpidioksidilla on kauaskantoisia vaikutuksia maapallon ekosysteemiin. Kasvihuonekaasuna typpidioksidi lukeutuu heikkoihin kasvihuonekaasuihin, koska sillä ei ole itsessään suurta maapalloa lämmittävää vaikutusta (Solomon et al. 1999). Typpidioksidilla on kuitenkin suuri merkitys säteilyn kannalta, sillä typpidioksidi on tärkeä alailmakehän otsonin, aerosolien ja OH:n edeltäjä. NO_2 on tärkein nitraattiaerosolien lähde, joka muodostaa tärkeän osan hienoista hiukkasista ja ultravioletivalon läsnä ollessa alailmakehän otsonista (Gurjar et al. 2010). Alailmakehässä typpidioksidi edistää otsonin valokemiallista tuotantoa (Liu et al. 1987; Grewe et al. 2012), kun taas stratosfäärissä typpidioksidi edistää otsonikatoa ja varastoituvien halogeenien muodostumista (Crutzen et al. 1970). Alailmakehän otsonin lisääntymisen lisäksi typpidioksidi kiihdyttää aerosolien muodostumista, mikä vaikuttaa osaltaan ilmakehän hapettavaan vaikutukseen. Ilmastonmuutoksen lisäksi alailmakehän typpidioksidilla on tärkeä rooli ympäristön ja luonnon hyvinvoinnille. Typpidioksidin laskeuma ja pääsy ekosysteemiin aiheuttaa monia ympäristöä kuormittavia ongelmia, jotka vaikuttavat ekosysteemien rakenteeseen ja toimintaan (Galloway et al. 2003).

2.4. Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät Suomessa

Tärkeitä Suomen ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä ovat päästölähteet ja niiden kuormittavuus sekä sijainti, liikennemäärät ja käytetyn autokannan ikä, asukastiheys ja tuuliolosuhteet (Sundström *et al.* 2020). Myös väestönkasvu yhdessä kaupungistumisen, kaupunkien kasvun sekä rajallisten maatalous- ja viheralueiden rakennus-/teollisuuskäyttöön valjastamisen myötä johtavat kasvillisuuden tuhoutumiseen ja ekosysteemien köyhtymiseen. Viheralueiden ja luonnon tuhoutuminen yhdessä kasvavan väestön kanssa aiheuttaa väistämättä ympäristövaikutuksia, kuten ilmanlaadun heikkenemistä (Feizizadeh & Blaschke 2013). Nämä tekijät vaikuttavat paitsi typpidioksidipäästöjen määrään ja pitoisuuteen ilmakehässä, myös typpidioksidipäästöjen sijaintiin. Tässä tutkimuksessa keskitytään tarkastelemaan Suomen typpidioksidipäästöjä juuri pitoisuuksien ja alueellisen jakauman näkökulmasta tutkimusajanjakson aikana.

Kaupungistumisen, kaupunkien kasvun ja asukastiheyden merkitys typpidioksidipitoisuuksissa selittyy sillä, että suurin osa typpidioksidipäästöistä on ihmistoiminnasta aiheutuneita (Kang *et al.* 2018). Ihmistoiminnan keskittymissä typpidioksidi pääsee kohoamaan ympäröiviä alueita korkeammaksi, sillä teollisuus, liikenne, lämmitys ja muu polttotoiminta keskittyy alueille, joilla asukastiheys on korkeampi. Poikkeuksena voidaan pitää yksittäisiä pistemäisiä kuormittajia, jotka sijaitsevat kaupunkien ulkopuolella ja saattavat aiheuttaa paikallisesti korkeita pitoisuuksia (Komppula *et al.* 2021). Tällaisia kuormittajia voivat olla esimerkiksi tehtaat. Myös alueilla, joilla on suhteellisen pitkät välimatkat ja päivittäiseen liikkumiseen esimerkiksi työpaikoille ja ostoksille vaaditaan autoa, liikenteestä aiheutuvat typpidioksidipäästöt voivat olla asukastiheyteen suhteutettuna odotettua korkeampia. Erityisen hankalia ovat kylmät ja tyynyt talvipäivät, jolloin energiantuotannon päästöt, lämmityspäästöt ja henkilöliikennemäärät ovat korkeita, ja ilman kierto kaupunkialueella vähäistä (Ilmatieteen laitos 2018).

Typpidioksidipitoisuudet ovat korkeimpia suurimpien kaupunkien keskustoissa aiheuttaen eniten haittaa juuri suurten kaupunkien asukkaille. Suuri liikennemäärä aiheuttaa selvästi kohonneita typpidioksidipitoisuuksia, jotka tyypillisesti kohoavat ruuhka-aikoina, kuten aamu- ja iltapäiväruuhkissa työpaikkaliikenteen takia (Ilmatieteen laitos 2018). Ilmansaasteita kertyy erityisesti katukuiluihin, joissa ilman vaihtuvuus on heikkoa ja joihin ilmansaasteet jäävät loukkuun huonon vaihtuvuuden takia. Suomen autokanta on toistaiseksi verrattain vanhaa, mutta typpidioksidipäästöt ovat hiljalleen laskeneet esimerkiksi katalyysaattoreilla varustettujen autojen lisääntyessä. Autokannan hiljalleen uudistuessa voidaan odottaa myös liikenteestä syntyvien ilmansaastepäästöjen laskevan tiheään asutuilla alueilla.

Tuuli vaikuttaa havaittuun ilmanlaatuun kuljettamalla päästöjä laajemmalle alueelle, mutta myös pienentämällä paikallista ilmansaasteiden konsentraatiota (Sundström *et al.* 2020). Suuria kaupunkeja ympäröivillä alueilla havaitaan kohonneita ilmansaastepitoisuuksia asukastiheydestä huolimatta, sillä tuulet kuljettavat ilmansaasteita kaupunkien keskustoista ja levittävät niitä ympäröiville alueille. Kaupunkeja ympäröivät alueet saavat osansa päästökuormasta, mutta

toisaalta tuulet myös auttavat puhdistamaan kaupunkien ja muiden pistekuormittajien alueen ilmaa ja vähentämään päästöistä aiheutuvia paikallisia haittoja. Pääkaupunkiseudulla kaukokulkeuman eli alueen ulkopuolelta tulevan päästökuorman, osuus kaupungissa havaittavista typpidioksidipitoisuuksista on noin neljänneksen (Tuomisto 2020).

Duodecimin mukaan (Tuomisto 2020) typpidioksidipitoisuuksien ja ilmanlaadun kehitys pääkaupunkiseudulla on ollut lupaavaa. Pitoisuuksien huiput ja vuosikeskiarvot ovat pienentyneet merkittävästi viime vuosikymmeninä. WHO:n ja EU:n asettama typpidioksidin raja-arvo ylittyy vain harvoissa paikoissa. Entisestään laajentuva kaupungistumisilmiö ja lisääntyvä tieliikenne kuitenkin laajentavat niitä tiheään asutuksen alueita, joilla ilmansaastepitoisuudet ovat keskimäärin huomattavasti korkeampia kuin harvaan asutuilla maaseutuvoittoisilla alueilla. Pääkaupunkiseudun ulkopuolella päästöjen väheneminen on hitaampaa ja ilmanlaadun kehitys poikkeaa suuresti pääkaupunkiseudun kehityksestä, sillä ilmansaastepitoisuuksien lähtötaso on matala. Suomen suurissa kaupungeissa, kuten Turussa, Lahdessa ja Oulussa sekä Vantaalla ja Espoossa typpidioksidipäästöjen vuosikeskiarvojen on mitattu laskeneen 25–35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ noin 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ tuntumaan.

2.5. Euroopan ilmanlaatu

Euroopan ilmanlaadun ja siihen vaikuttavien seikkojen ymmärtämiseksi on tärkeää tukea Euroopan kansallista, alueellista ja kansainvälistä ilmastopolitiikkaa sekä sen toimeenpanoa (Guerreiro *et al.* 2014). Länsimaissa, mukaan lukien Eurooppa, yli kaksi kolmannesta väestöstä asuu kaupunkialueilla. Kaupungistuminen on edelleen kasvava ilmiö. Kuten aiemmin on todettu, kaupungistuminen lisää ilmansaasteiden määrää paikallisesti urbaaneilla ja tiheään asutuilla alueilla. Liikenne on suurin yksittäinen ilmansaasteinen päästölähde kaupunkialueilla, ja henkilöautojen määrät ovat edelleen kasvussa väestön lisääntyessä. Suurimmassa osassa Eurooppaa henkilöautojen määrä on ollut tasaisessa kasvussa (Focas & Christidis 2017). Muutamissa maissa, kuten Ruotsissa, huippu on saavutettu ja autojen määrä on kääntynyt laskuun (EEA 2020). Liikenteen ohella muita pienempiä päästölähteitä ovat energiantuotanto, maatalous ja jätteenkäsittely mukaan lukien jätevesihuolto.

Päästölähteiden lisäksi myös alueelliset ja paikalliset sääolosuhteet sekä tuulet voivat pahentaa ilmansaasteiden esiintymistä ja johtaa lämpö- (ja kylmä-) saarekkeisiin. Saarekeilmöiden esiintyminen voi vaikuttaa saasteiden kemialliseen muuttumiseen (Lai & Cheng 2008). Kaupunkien ilmanlaatu ja ilman saastuminen ovat monimutkaisia ilmiöitä, joihin vaikuttavat useat parametrit ja monenlaiset fysikaaliset, kemialliset, maantieteelliset, ympäristölliset ja meteorologiset prosessit. Kaupunkien ilmanlaatuun vaikuttavien tekijöiden moniulotteisuuden vuoksi ilmanlaatua ja ilmansaastepäästöjä sekä niiden vaikutuksia tutkitaan laajasti, mutta niiden välisiä linkittyymiä ei vielä kokonaan ymmärretä. Seurauksena tälle ilmakehän ilmanlaadun ja ilmansaasteiden tutkimus erityisesti kaupunkialueilla on kerännyt kasvavaa kiinnostusta. Se on kasvava ala luonnontieteiden ja lääketieteiden yhteisöissä Euroopan alueella (Basly & Wald 2000).

Vaikka vuosikymmenten mittaan toimivaksi ja tehokkaaksi osoittautuneella Euroopan ilmastolainsäädännöllä on saatu vähennettyä joidenkin päästöjen määrää, suuri osa Euroopan väestöstä asuu silti alueilla, joilla ilmansaastepitoisuudet ylittävät EU:n ja WHO:n asettamien standardien rajat (Guerreiro *et al.* 2014). Vähentyneisiin päästöihin lukeutuvat esimerkiksi rikkidioksidi, hiilimonoksidi, lyijy ja bentseeni. Toisaalta esimerkiksi liikenne, teollisuus, energiantuotanto, maatalous ja kotitaloudet aiheuttavat edelleen merkittäviä määriä ilmansaastepäästöjä. Nykyiset Euroopan ilmansaastepitoisuudet aiheuttavat kuitenkin edelleen merkittävää haittaa ihmisten terveydelle ja ekosysteemille. Keskeisillä aloilla tehtyjen päästövähennysten avulla on pystytty parantamaan ilmanlaatua kaikkialla Euroopassa (EEA 2020). Lähes kaikilla taloudellisilla, poliittisilla ja yhteiskunnallisilla toimilla on vaikutusta ilmansaasteiden päästömääriin.

EEA:n (European Environment Agency 2020) mukaan ilmanlaatu on parantunut Euroopassa merkittävästi viimeisen kymmenen vuoden aikana. Nopeaa edistymistä on tapahtunut teollisuudessa ja liikenteessä, kun taas rakennusten ja maatalouden osalta kehitys päästöjen vähentämisessä on ollut hidasta. Ilmansaastepitoisuuksissa tapahtuneen laskun ansiosta ilmanlaatu on parantunut ja ilmansaasteista johtuvat ennenaikaiset kuolemat ovat vähentyneet. Kehityksestä huolimatta ilmanlaatuarvioinnissa todetaan myös pienhiukkasten aiheuttavan Euroopassa edelleen suuren määrän ennenaikaisia kuolemia (noin 417 000 ennenaikaista kuolemaa vuonna 2018). Näistä tapauksista noin 54 000 katsottiin olevan typen oksideille altistumisesta aiheutuvia. Typpidioksidin aiheuttamissa kuolemissa on tapahtunut viimeisen vuosikymmenen aikana huima, noin 54 % muutos parempaan suuntaan. Muutos on suurimmalta osin Euroopan lainsäädännön ja ilmanlaadun kansainvälisen ja kansallisen seurannan yhteistyön tulos (Castellanos & Boersma 2012). Vastaavat toimenpiteet näyttelevät suurta roolia Euroopan ilmanlaadun kehityksessä myös tulevaisuudessa (Colette *et al.* 2011).

3. Aineistot ja menetelmät

3.1. Tutkimusalue

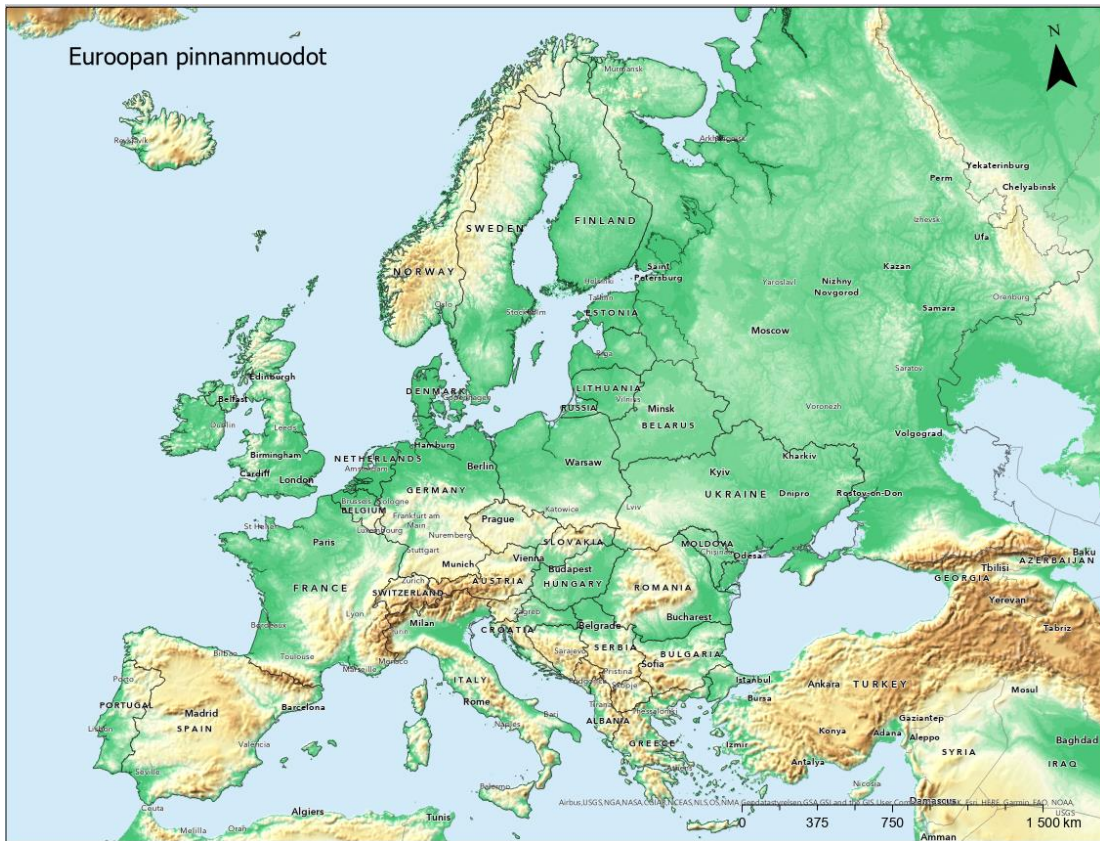
Tutkimus toteutetaan kahdessa mittakaavassa: Suomen mittakaavassa ja koko Euroopan mittakaavassa. Tutkimuksessa tehdään aikasarja-analyysejä molemmille tutkimusalueille ja vertaillaan siten alueiden välisiä eroja ja yhteneväisyyksiä. Maantieteellisesti Euroopan ja Suomen alueella on ilmanlaatuun ja ilmanlaadun tutkimukseen vaikuttavia erityispiirteitä, kuten väestön jakauma ja asukastiheys, maankäyttö, pinnanmuodot ja alueenkoko sekä sijainti.

Suomi ja Eurooppa sijaitsevat latitudinaalisesti pohjoisessa. Eurooppa sijaitsee noin 35°N:a pohjoiseen aina napapiirin yli ja Suomi sijaitsee latitudinaalisesti noin 60°N-70°N välillä. Pohjoisten leveysasteiden satelliittikaukokartoituksessa on tiettyjä erityispiirteitä, jotka tulee ottaa tutkimuksessa huomioon. Ilmansaasteiden kulkeutumiseen troposfäärin yläosassa vaikuttavat vallitsevat planetaariset tuulet, kun taas lähellä maanpintaa troposfäärin alaosassa trubulentitiset tuulet kuljettavat ilmansaasteita (Brown 1980). Satelliittikuvista voidaan myös havaita pohjoisilla leveysasteilla pysyviä pilvikuvioita ja lumimalleja, jotka vaikuttavat satelliittimittausten tulkintaan.

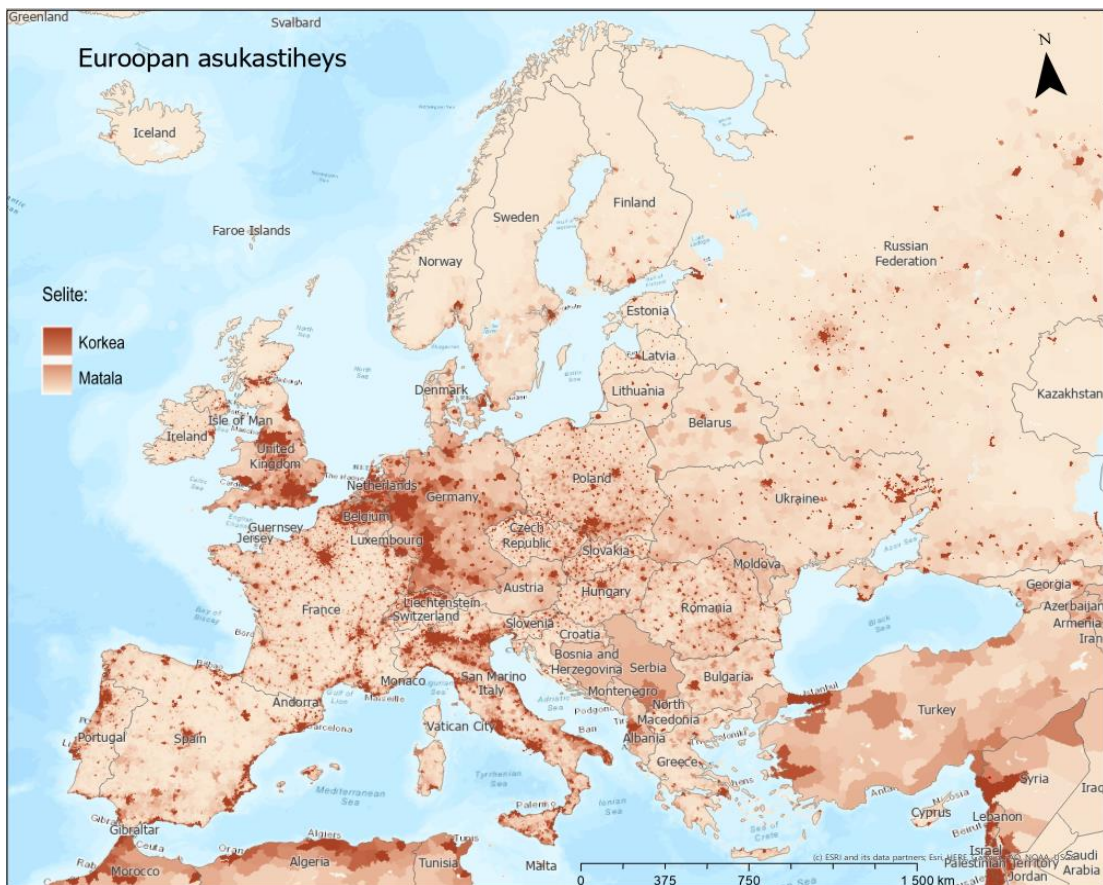
Pinnanmuodot vaikuttavat ilmansaasteiden jakautumiseen ja kulkeutumiseen. Tasaisilla alueilla ilmansaasteet jakautuvat tasaisemmin ja pääsevät kulkeutumaan paremmin tuulen mukana. Alueilla, joilla esiintyy maanpinnan korkeuden vaihtelua, myös ilmansaasteet voivat jäädä huippujen välisiin painanteisiin pitkiksi ajoiksi, sillä ilman vaihtuminen tuulten vaikutuksesta voi olla hidasta (Zhou *et al.* 2012). Ensimmäisessä kartassa (kuva 1) näkyy Euroopan pinnanmuodot ja niiden maantieteellinen sijainti. Erityisesti Alpit ja niiden eteläpuolelle jäävä tasainen laakso ovat merkittäviä ilmansaasteiden kannalta, sillä tuuli puhaltaa laakson suuntaan jonne ilmansaasteet pääsevät helposti kerääntymään. Vuoristoilla alueilla kuten Keski-Euroopan Alpeilla sekä Skandeilla, Uralvuorilla, Kaukasuksella ja Pyreneillä tuulet puhdistavat ilmaa eikä ihmistoiminta aiheuta ilmansaastepäästöjä. Suomen alueella korkeusvaihtelut ovat vähäisiä, joten tuulten ja ihmistoiminnan sijoittumisen merkitys korostuu (Wu *et al.* 2012).

Toisessa kartassa (kuva 2) kuvataan Euroopan asukastiheyttä. Typpidioksidipäästöt ovat yhteydessä ihmistoimintaan, kuten liikenteeseen, teollisuuteen ja polttotoimenpiteisiin. Siksi asukastiheyden maantieteellistä jakaumaa tulee tarkastella typpidioksidin jakauman yhteydessä (Stavrakou *et al.* 2008). Tiheään asuttuja alueita löytyy Keski-Euroopasta, ja erityisesti suurista kaupungeista. Pohjoinen Eurooppa on etelää harvaanasutumpaa. Suomessa asukastiheys mukailee muuta pohjoista Eurooppaa asukastiheyden ollessa Keski-Euroopan tasoon nähden alhainen.

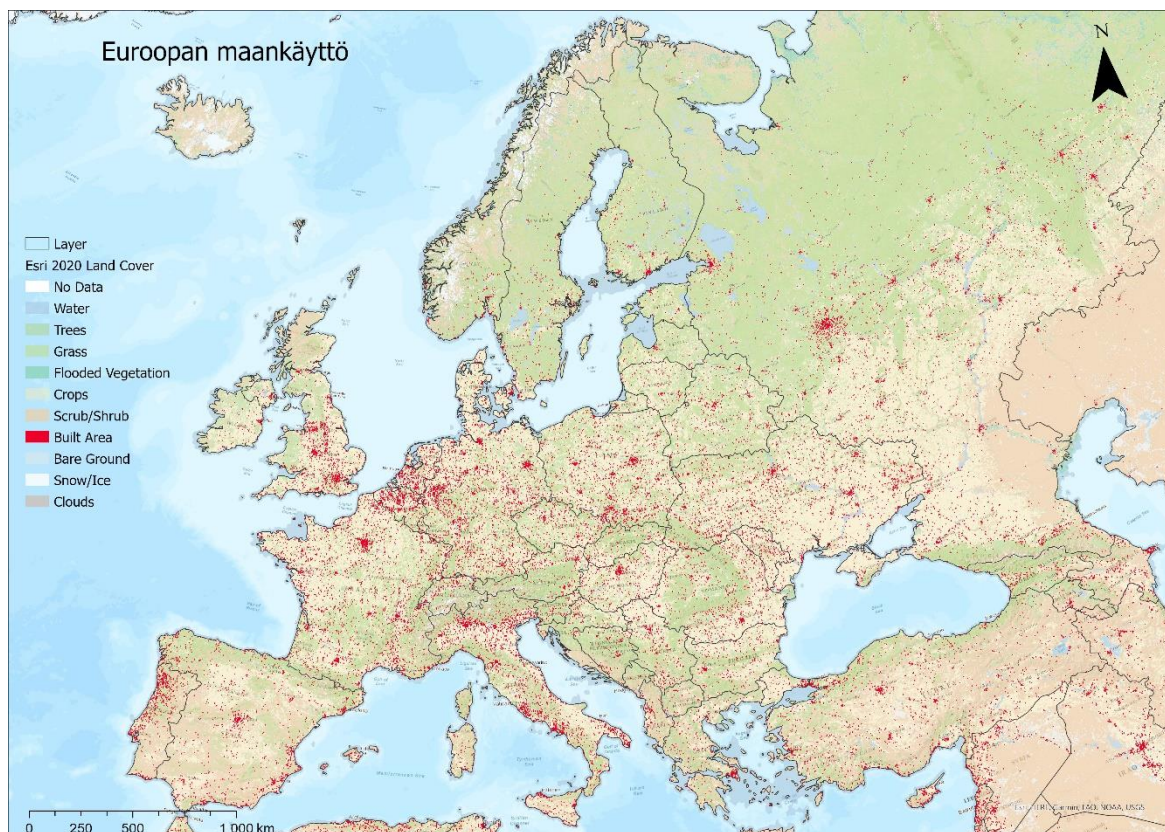
Kolmas kartta (kuva 3) havainnollistaa Euroopan maankäyttöä. Urbanit alueet ja teollisuusalueet ovat typpidioksidin päästölähteitä ja ne erottuvat kartassa samoilla alueilla kuin tiheään asutut alueet. Rakennetut alueet pitävät sisällään esimerkiksi kaupunkia, liikenneinfrastruktuuria ja teollisuutta, jotka ovat kaikki ilmansaasteiden päästölähteitä. Rakennetut alueet ovat jakautuneet Keski- ja Etelä-Euroopassa tasaisen hajanaisesti ja muutamia keskittymiä on mahdollista löytää tiheään asuttujen alueiden yhteydestä. Pohjois-Euroopassa Suomi mukaan lukien rakennetut alueet ovat vähäisiä.



Kuva 1. Euroopan pinnanmuodot. (Data: Esri 2020 Terrain: Elevation Tinted Hillshade, Living Atlas)



Kuva 2. Euroopan asukastiheys. Vaaleat värit tarkoittavat harvaan asuttuja alueita ja tummat värit tiheään asuttuja alueita. (Data: Esri World Population Density 2020, Living Atlas)



Kuva 3. Euroopan maankäyttö. Rakennetut alueet, kuten kaupungit ja teollisuusalueet on merkitty punaisella. (Data: Esri 2020 Land Cover, Living Atlas)

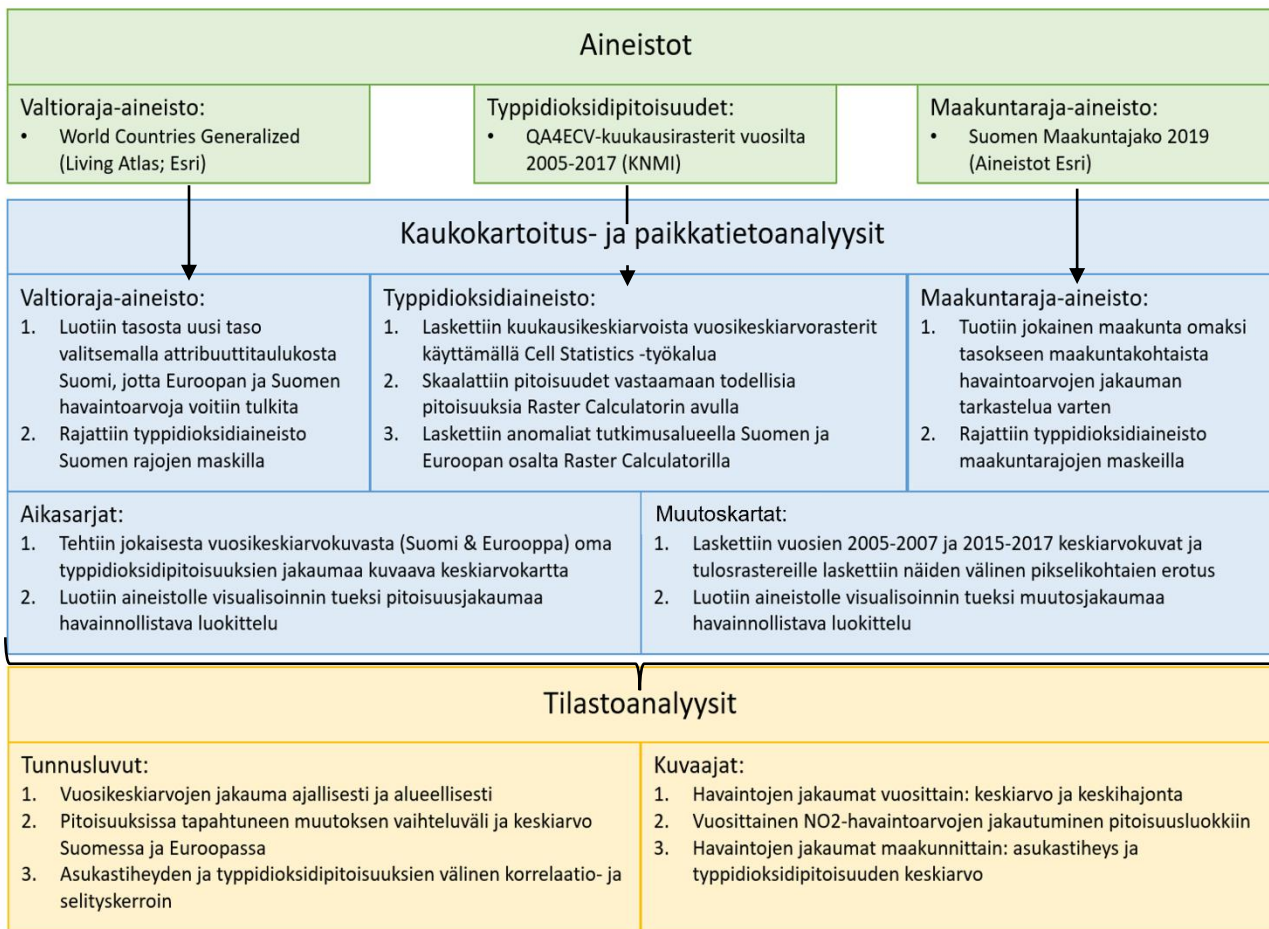
3.2. OMI-instrumentti ja KNMI:n QA4ECV-satelliittiaineisto

Tutkimus pohjautuu NASA:n EOS-Aura-satelliitin OMI-mittalaitteen havaintoihin ja satelliittikuvista kerättyyn aineistoon. OMI-mittalaite tunnistaa ja monitoroi ilmakehän aerosoleja, kuten savua, pölyä ja sulfiitteja sekä mittaa useiden ilmansaasteiden pitoisuuksia, kuten ilmakehän otsonia, typpidioksidia ja rikkidioksidia. OMI-laite tuottaa dataa hyperspektrisellä kuvantamismenetelmällä ja mittaa näkyvän valon sekä ultraviolettisäteilyn heijastusta. Hyperspektrinen kuvantaminen parantaa mittaustarkkuutta ja mahdollistaa sekä helpottaa pitkällä aikavälillä myös laitteen itsekalibrointia (Craven-Jones *et al.* 2011).

Aurinkosynkroniset satelliitit tuottavat havaintoja ilmakehän koostumuksesta päivittäin mittaussajakohdan pysyessä lähes samana (Sundström *et al.* 2020). Satelliittien mittaamista päivittäishavainnoista ei kuitenkaan voida suoraan laskea vertailukelpoisia tunnuslukuja pitkälle aikavälille, sillä satelliittien rata ja siten myös täsmällinen havaintopaikka vaihtelevat. Haasteita satelliittikuvien käytölle erityisesti Suomen alueella aiheuttaa myös esimerkiksi pilvi- ja lumipeite. Näiden epätarkkuuksia aiheuttavien tekijöiden huomioimiseksi OMI-laitteen tuottamaa dataa on jatkokäsiteltävä algoritmien avulla ennen sen hyödyntämistä tutkimuksessa. Pitkän aikavälin keskiarvojen alueellisen jakauman laskemiseksi satelliittihavainnot voidaan kerätä tasaväliseen hilaan, jolloin data saadaan asetettua maantieteellisesti oikeaan spatiaaliseen lokaatioon. Asettamalla alkuperäiset havainnot tuotettuun tasakokoiseen hilaruudukkoon, datan alkuperäinen spatiaalinen resoluutio heikkenee hieman. Tutkimuksessa OMI-mittalaitteen tuottama

alkuperäinen spatiaalinen resoluutio on 13 x 24 km² ja siitä johdetun rasterin solukoko on 0,125 x 0,125° (Boersma *et al.* 2018 & Torres *et al.* 2007).

Typpidioksidipitoisuuksien aineistona käytetään vuodesta 2005 eteenpäin saatavilla olevia OMI-mittalaitteen tuottamia satelliittikuvia ja niistä tuotettuja kuukausittaisia rastereita. Algoritmien avulla KNMI:n tuottamassa QA4ECV-datasetissä (kuva 4) on koko maapallon kattavat kuukausittaiset rasterit, jotka pitävät sisällään typpidioksidin keskiarvot (Boersma *et al.* 2018). KNMI:n kuukausittainen QA4ECV-aineisto on saatavilla vuoden 2005 tammikuusta vuoden 2017 joulukuuhun. Tutkimus kattaa koko aineiston laajuisen ajanjakson ja hyödyntää koko saatavilla olevan QA4ECV-aineiston vuodesta 2005 vuoteen 2017.



Kuva 4. Kaaviokuva tutkimuksessa käytetyistä aineistoista ja menetelmistä. Tutkimusprosessin kulkusuunta on kaaviossa ylhäältä alaspäin. Vihreällä alustalla on kuvattu lähdeaineistot ja niiden lähteet. Sinisellä alustalla on kuvattu aineistoille toteutetut paikkatietoanalyysit ja jatkokäsittely paikkatieto-ohjelmistossa. Keltaisella pohjalla on kuvattu paikkatietoanalyysien jälkeen saadulle datalle tehty tilastollinen jatkokäsittely ja tulkinta.

QA4ECV-aineiston tukena paikkatietoanalyysissä ja visualisoinnissa käytettiin Esrin Living Atlas -palvelusta saatavaa valtioraja-aineistoa, sekä Suomen maakuntaraja-aineistoa. Aineistojen avulla luotiin Suomen rajoista sekä maakuntien rajoista maskit. Maskeilla saatiin rajattua vuosikeskiarvorasterit ja siten tarkasteltua pitoisuuksia ainoastaan Suomen tai yksittäisten maakuntien tasolla.

3.3. Aineistojen laatu ja käytettävyys

Datan käytettävyyttä ja soveltuvuutta laaja-alaisten ilmanlaatuanalyysien ja aikasarjojen tuottamiseen analysoidaan spatiaalisen resoluution, datan laadun ja vaihtoehtoisten mittaustapojen näkökulmasta. Satelliitti-instrumenttien etu verrattuna muihin mittaustapoihin on typpidioksidipitoisuuksien mittaamisessa satelliittihavaintojen spatiaalinen kattavuus. Käyttämällä tutkimuksessa OMI-instrumentin tuottamia havaintoja saadaan yhtenäistä dataa paitsi koko mittausajanjaksolta, myös koko Suomen ja koko Euroopan kattavalta alueelta. OMI-instrumentin tuottama data on spatiaaliselta resoluutioltaan $13 \times 24 \text{ km}^2$, joka on pinta-alaltaan 312 km^2 . Tämä spatiaalinen resoluutio mahdollistaa yksityiskohtaisen havaintoverkon luomisen ja typpidioksidilähteiden tarkan paikantamisen sekä Euroopassa että Suomen alueella. Suomen kuntien keskiarvoinen pinta-ala on yli 1000 km^2 , joten OMI-mittausten spatiaalinen resoluutio on riittävä typpidioksidin alueellisen jakauman havainnointiin myös Suomessa.

Tuulen aiheuttama vaikutus hankaloittaa osaltaan typpidioksidin päästölähteiden tarkkaa paikantamista datan avulla. Tuuli vaikuttaa satelliitti-instrumenttien mittauksiin paikallisten havaintoasemien mittauksia voimakkaammin. Tämä selittyy sillä, että ilmanlaadun havaintoasemilla mitataan typpidioksidipitoisuuksia lähellä maan pintaa, kun taas satelliitti-instrumentit laskevat typpidioksidipitoisuuden läpileikkauksena koko alailmakehästä. Vuorokaudenaika vaikuttaa paitsi tuuliolosuhteisiin ja sitä kautta typpidioksidihavaintojen sijaintiin, myös typpidioksidipäästöjen määrään. OMI-instrumentti suorittaa mittaukset aina lähes samaan aikaan päivästä (Levelt *et al.* 2018). Typpidioksidin mittausajankohta kuitenkin vaikuttaa havaittuun päästömäärään, sillä päästöissä esiintyy vuorokaudenajan mukaan vaihtelua. Tätä vaihtelua voidaan selittää esimerkiksi liikennemäärillä, jotka ovat suurimpia työmatkaliikenteen ruuhkapiikkien aikana ja joista aiheutuu tiheään liikennöidyillä alueilla typpidioksidipäästöjä.

Satelliittimittausten tekemisessä käytetään erilaisia syöteparametreja, joiden avulla luodaan laskenta-algoritmeja datan tuottamiseksi. Syötetietoina käytetään esimerkiksi tietoja maanpinnan heijastavuudesta, pilvisyyden määrästä ja vertikaalisesta lämpötila- sekä typpidioksidijakaumasta alailmakehässä (Komppula *et al.* 2021). Syötetiedot tulevat tyypillisesti erilaisista laskennallisista malleista ja algoritmeista, joihin liittyy epävarmuuksia. Syötetietojen algoritmeihin liittyvät epävarmuudet saattavat aiheuttaa alueellista vaihtelua datan spatiaalisessa jakaumassa. Satelliittien tekemät mittaukset kuitenkin korreloivat pääasiassa hyvin paikallisilla havaintoasemilla tehtyjen *in situ* -mittausten kanssa (Sundström *et al.* 2020).

Satelliittien tuottaman ilmanlaatudatan etuna on avoin saatavuus ja siten rajoittamaton käytettävyys. OMI-mittalaitteen tuottama data on avoimesti saatavilla, ja myös siitä johdettu QA4ECV-aineisto on avointa ja läpinäkyvää dataa (Boersma *et al.* 2018). Datan läpinäkyvyys tarkoittaa QA4ECV-aineiston kohdalla sitä, että tuotantoprosessi ja algoritmit on dokumentoitu selkeästi ja dokumentit ovat kaikkien aineistosta tai sen hyödyntämisestä kiinnostuneiden saatavilla. Aineiston saa ladattua Esri grid -formaattissa, joka on rasterimuotoinen

paikkatietoformaatti. Paikkatietoaineiston käsittelyyn soveltuvia lisensoituja sekä avoimen lähdekoodin ohjelmistoja on saatavilla useita.

3.4. Kaukokartoitus- ja paikkatietoanalyysit

Tutkimuksessa tarkastellaan aikasarja-analyysin ja geospaatialisen analyysin avulla Suomen ja Euroopan typpidioksidipitoisuuden spatiaalista ja temporaalista jakaumaa sekä havaintojen absoluuttista ja suhteellista sijoittumista tutkimusalueella. Aikasarja-analyysillä tarkoitetaan prosessia, jossa kerätään ja analysoidaan dataa sekä määritetään, mitä on tapahtunut ja milloin (Wei 2006). Aikasarja-analyysissä tutkimustulokset järjestetään visuaaliseksi kronologiseksi aikasarjaksi. Aikasarja-analyysi sopii menetelmällisesti havainnollistamaan tutkimusajanjakson aikana tapahtunutta muutosta. Aikasarja-analyysiä tukevaksi paikkatietomenetelmäksi valikoitui geospaatialinen analyysi, joka sopii kaukokartoitus- ja paikkatietoaineistojen käsittelyyn ja yhdistelyyn.

Geospaatialisten analyysimenetelmien avulla voidaan havainnoida typpidioksidipäästöjen geospaatialista sijaintia. Geospaatialisella sijainnilla tarkoitetaan typpidioksidipitoisuuksien havaintojakauman absoluuttisen maantieteellisen sijainnin tarkastelua, mutta myös havaintojen sijoittumista suhteessa toisiinsa tai suhteessa muihin tutkittavan alueen piirteisiin tai ominaisuuksiin (Dempsey 2021). Geospaatialisen sijainnin voidaan siis ajatella tarkoittavan absoluuttisen ja suhteellisen sijainnin summaa. Geospaatialinen analyysi on laaja menetelmä, jota voidaan käyttää maantieteellisen tutkimuksen sisällä moniin eri tarkoituksiin. Geospaatialisen analyysin perustana on kuitenkin aina sellainen data, joka voidaan linkittää maantieteelliseen sijaintiin ja siten käyttää analyysitekniikoita, jotka hyödyntävät paikkatietojärjestelmien avulla maantieteellistä tietoa, tilastotietoa, sijaintitietoa, laskennallista geometriaa ja visualisointitekniikoita. Geospaatialinen analyysi pohjautuu sijaintitiedon ja ominaisuustiedon keräämiseen, yhdistämiseen ja analysointiin (Murayama 2012). Koska geospaatialisen analyysin avulla tuotettu tieto on aina vahvasti maantieteellisesti kytkettyntä, sen avulla voidaan tutkia maapallon alueellisia ilmiöitä laskennallisessa ja visuaalisessa muodossa. Geospaatialinen analyysi auttaa ilmiöiden parempaa ymmärtämistä ja ilmiöiden hallitsemista (Bodzin & Cirucci 2009; Murayama 2012).

Tutkimus toteutettiin käyttämällä paikkatietoanalyysiin Esri ArcGIS Pro -työpöytäohjelmistoa, jonka avulla rasteridataa analysoitiin, luokiteltiin ja visualisoitiin. Työnkulkujen pääasiallisena työkaluna datan tarkasteluun oli päällekkäisanalyysi. Päällekkäisanalyysi on menetelmä, jossa useita eri dataa voidaan asettaa kartalle päällekkäin erillisiksi karttatasoiksi ja yhdistellä dataa, jotta datasta saadaan etsittyä uutta tietoa. Päällekkäisanalyysillä voidaan siten analysoida eri datojen välisiä suhteita sekä eroja ja yhteneväisyyksiä. Käsitelty data jalostettiin lopulta kartoiksi ja niitä tukeviksi taulukoiksi ja diagrammeiksi. Aineistona käytetään OMI-satelliitin tuottamia havaintoja ja QA4ECV-rasteridataa, jonka pohjalta luodaan karttamuotoinen aikasarja Suomen typpidioksidipitoisuuksien muutoksista vuosina 2005–2017.

Aikasarja-analyysin pohjana toimii rasteriaineistosta tuotettu vuosittainen datasetti, joka pitää sisällään typpidioksidipitoisuuksien vuotuiset keskiarvot. Vuosikeskiarvot laskettiin *Cell Statistics* -työkalulla siten, että jokaisen vuoden osalta lähtöaineistoksi syötettiin kaksitoista kuukausikeskiarvorasteria ja päällekkäisanalyysin statistiikaksi valittiin *keskiarvo*. Työkalu laskee kaikille lähtötasorasterien päällekkäisille pikseleille keskiarvon ja tulostaa uuden rasteritason, joka pitää sisällään koko vuoden keskiarvon. Alkuperäisessä datassa typpidioksidipitoisuudet on ilmoitettu yksikköön nähden satakertaisina. Aineistolle laskettiin todenmukaiset käytössä olevaa yksikköä (10^{15} molekyyliä/cm²) vastaavat pitoisuudet käyttämällä *Raster Calculator* -työkalua. Syötetasoiksi valittiin vuosikeskiarvorasterit, joiden jokaisen solun arvo jaettiin sadalla. Näin saatiin tulokseksi uudet rasterit, joiden yksikkö vastasi käytössä olevaa typpidioksidipitoisuuden ilmoittamiseen käytettävää yksikköä.

Vuosikeskiarvoja käytetään tutkimuksessa keskeisenä aikasarja-analyysin elementtinä. Typpidioksidipitoisuuksien alueellisten erojen visualisoimiseksi ja havainnoimiseksi vuosikeskiarvokuville tehdään havaintojakauman arvoihin perustuva luokittelu. Suomen alueella typpidioksidipitoisuudet jakautuvat suurimmalta osin välille 1–5 [10^{15} molekyyliä/cm²], joten Suomen sisällä esiintyvien alueellisten erojen havainnollistamiseksi rastereille luodaan visuaalinen luokittelu manuaalisella välityksellä, joka on 0,1 [10^{15} molekyyliä/cm²]. Luomalla tarkka luokittelu saadaan esille pieniäkin alueiden välisiä pitoisuuseroja. Luokiteltu aineisto visualisoidaan käyttämällä väriskaalaa, joka tukee aineiston tulkintaa. Luokittelu ja visualisointi toistetaan jokaisen vuoden rasteritasolle. Suomen alueelta luodaan koko tutkimusjakson kattava karttakuvasarja, josta ilmenee visuaalisessa muodossa tutkimusjakson aikana tutkimusalueella tapahtunut vuosittainen muutos. Tätä muutosta tarkastellaan aikasarja-analyysin avulla, ja arvioidaan tutkimusjakson aikana ilmenneitä alueellisia ja ajallisia muutoksia. Karttakuvasarjan visualisoinnin tukena käytetään Esrin *Living Atlas* -palvelusta saatavia aineistoja, jotka sisältävät valtioiden rajat sekä Suomen maakuntarajat. Euroopan ja Suomen typpidioksidipitoisuuden kehityskulkujen vertaamiseksi tuotetaan Euroopan alueelta vastaava vuosittainen karttakuvasarja. Eurooppaa kuvaavissa kartoissa käytetään projektiota "*Europe Lambert Conformal Conic*" ja Suomea kuvaavissa kartoissa käytetään projektiota "*EUREF FIN TM35FIN*". Euroopan alueella typpidioksidiarvot jakautuvat välille 0–30 [10^{15} molekyyliä/cm²], joten luokittelua lavennettiin ja havaintoaineisto luokiteltiin 0,5 yksikön välein.

Typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneen ajallisen ja alueellisen muutoksen tarkemman tarkastelun tueksi lasketaan kummankin alueen osalta tutkimusjakson kolmen ensimmäisen vuoden keskiarvo, jota verrataan tutkimusjakson kolmen viimeisen vuoden keskiarvoon. Alkuvuosien ja loppuvuosien laskennallisten keskiarvokuvien avulla voidaan tuottaa muutostartta, josta näkyvät muutosalueet. Muutostartta tuotetaan vähentämällä alkuvuosien keskiarvorasteri loppuvuosien keskiarvorasterista käyttäen *Raster Calculator* -työkalua. Muutostartta kertoo millä alueilla muutoksia on tapahtunut, ja mikä on ollut kehityksen suunta ja suuruus. Muutostartta tuotetaan Suomen alueelta ja koko Euroopan alueelta, jotta Suomessa ja Euroopassa tapahtunutta kehitystä tutkimusjakson aikana voidaan verrata. Geospaatialisen aikasarja-analyysin avulla analysoidaan ilmanlaadun spatiaalisia sekä temporaalisia muutoksia ja voidaan tuottaa vertailukelpoista dataa

kahden eri alueen välille. Muutoskartta toimii hyvänä havainnollistajana ja apuna geospaatialisen aikasarja-analyysin tulosten tulkinnassa.

Spatiaalisella vaihtelulla tarkoitetaan typpidioksidipitoisuuksien alueellista jakaumaa ja siinä esiintyvää alueiden välistä vaihtelua pitoisuuksissa. Typpidioksidipitoisuuksien spatiaalinen vaihtelu kertoo alueiden välisistä eroista ja siitä, millä alueilla typpidioksidia päätyy ilmakehään. Spatiaalista vaihtelua tutkitaan tuottamalla visuaalista karttamuotoista dataa eri alueista ja kuvaamalla sekä kartta- että taulukkomuodossa eri alueilla havaittuja typpidioksidipitoisuuksia. Temporaalisella vaihtelulla tarkoitetaan typpidioksidipitoisuuksien määrällisiä vaihteluita tutkimusajanjakson aikana eri ajankohtina. Temporaalisella vaihtelulla voidaan kartoittaa typpidioksidipitoisuuksien kehitystrendin suuntaa ja suuruutta ajallisesti sekä kuvata, miten pitoisuuksien määrät ovat muuttuneet ajassa. Temporaalista vaihtelua tutkitaan aikasarjan lisäksi vertaamalla kartta- ja taulukkomuodossa typpidioksidihavaintojen kehitystä tutkimusajanjakson aikana.

3.5. Tilastolliset menetelmät

Tilastolliset menetelmät ovat hyödyllisiä rasterimuotoisen aineiston käsittelyssä, sillä niitä hyödyntäen on mahdollista syventyä rastereiden pikseleistä saatuun numeeriseen dataan. Tutkimuksella lasketaan kunkin vuoden osalta sekä Euroopan että Suomen vuosikeskiarvot erillisiin rastereihin, jotka koostuvat yksittäisistä pikseleistä, jotka pitävät sisällään numeerisen typpidioksidiarvon. Tutkimuksessa hyödynnetään tilastollisia menetelmiä erityisesti tilastollisten tunnuslukujen laskemiseen sekä tutkimustulosten esittämiseen. Tilastot, tunnusluvut, taulukot ja diagrammit tuotetaan käyttämällä *Microsoft Excel* -työpöytäohjelmistoa.

Tutkimuksen keskiössä on typpidioksidihavaintojen vuosittaisten keskiarvojen laskeminen Euroopan ja Suomen alueella. Havaintojen pohjalta tuotetun kartta-aikasarjan avulla tarkastellaan typpidioksidipitoisuuksien kehitystrendiä. Kehitystrendillä tarkoitetaan tutkimusajanjaksona typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneiden muutoksien suuntaa ja suuruutta. Kehitystrendin tueksi tuotetaan taulukkomuotoista dataa ja diagrammeja typpidioksidihavaintojen jakaumasta ja havaintojakauman tunnusluvuista. Suomen typpidioksidipitoisuuksien vuosittainen havaintojakauma esitetään kartta-aikasarjan lisäksi myös vuosittaisina pylväsdiagrammeina (Liite 4. Suomen vuosittainen NO₂-jakauma). Pylväsdiagrammit on tuotettu luokittelemalla koko havaintojakauma kunkin vuoden osalta viiteen tasaväliseen pitoisuusluokkaan: alle 1, 0–1, 1–2, 2–3, 3–4 ja 4–5. Havaintojen lukumäärä on esitetty Y-akselilla ja pitoisuusluokka X-akselilla, eli pylvään korkeus kuvastaa havaintojen määrää pitoisuusluokassa.

Typpidioksidin pitoisuuksien tarkastelussa käytetään keskiarvon lisäksi apuna myös muita tilastollisia muuttujia. Suomen alueen havaintojen tarkastelussa tutkitaan havaintojen keskihajontaa sekä pitoisuuksien alueellista jakaumaa maakunnittain. Vuosittainen keskiarvon ja keskihajonnan kehitys esitetään viivadiagrammina. Diagrammin avulla havainnollistetaan vuosittaisen keskiarvon ja keskihajonnan kehityskulkua tutkimusajanjakson aikana.

Typpidioksidin alueellisen jakauman yhtenä mahdollisena selittävänä tekijänä tarkastellaan asukastiheyttä. Asukastiheyden ja typpidioksidihavaintojen jakaumaa tarkastellaan ja verrataan toisiinsa tuottamalla asukastiheydestä ja typpidioksidipitoisuuksien keskiarvosta viivadiagrammit, joissa molemmat muuttujat on esitetty maakunnittain. Lisäksi näiden kahden muuttujan välistä yhteyttä tarkastellaan hajontakuviona, jonka avulla voidaan selvittää muuttujien välistä korrelaatiota. Asukastiheyksille ja typpidioksidipitoisuuden keskiarvoille lasketaan korrelaatiokerroin sekä selityskerroin. Selityskerroin kuvaa sitä, kuinka monta prosenttia asukastiheyden ja typpidioksidipitoisuuden korrelaatiosta voidaan tilastollisesti selittää asukastiheydellä.

4. Tulokset

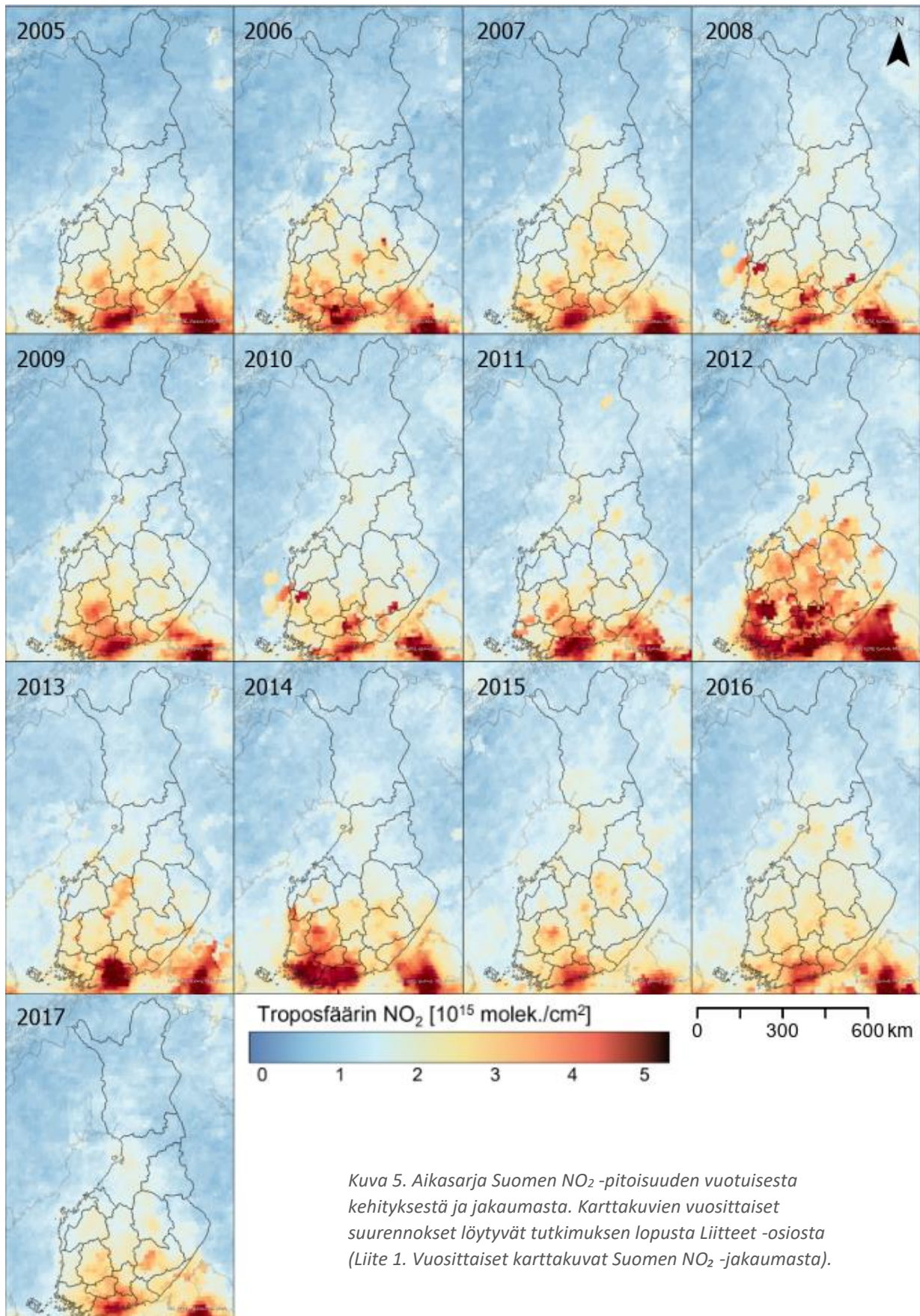
4.1. Ilmanlaadun kehitys Suomessa vuosina 2005–2017

4.1.1. Ajallinen kehitys Suomen ilmanlaadussa

Tutkimuksen päätavoitteena oli tarkastella OMI-instrumentin havaintoja hyödyntäen Suomen ilmanlaadun tilaa ja kehitystä typpidioksidin osalta sekä verrata sitä koko Euroopan kehitykseen geospaatialaisen aikasarja-analyysin avulla. Suomen typpidioksidipitoisuuksissa on tapahtunut tutkimusjaksolla sekä pitoisuuksien nousua että laskua, mutta keskimääräinen muutos koko Suomen aluetta tarkasteltaessa on 0,05 yksikön nousu pitoisuuksissa. Tutkimusjakson keskivaiheilla havaittiin myös selvää typpidioksidipitoisuuksien nousua, mutta viime vuosien aikana pitoisuuksien trendi on ollut laskeva. Tutkimusjakson aikana vuoteen 2005 verrattuna typpidioksidipitoisuudet ovat Suomen alueella tasoittuneet eli ilmanlaatu korkeiden pitoisuuksien alueella on hieman parantunut, kun taas ilmanlaatu pienten pitoisuuksien alueella on hieman heikentynyt.

Kuvassa 5 esitetään Suomen NO₂-pitoisuuksissa tapahtunut kehitys vuosina 2005–2017. Kuva havainnollistaa typpidioksidin vuosittaisten keskiarvojen maantieteellistä jakaumaa Suomen alueella sekä jakauman ajallista muutosta tutkimusajanjakson aikana. Troposfäärin typpidioksidipitoisuudet esitetään kartta-aikasarjassa visuaalisesti yksikössä NO₂[10¹⁵ molekyyliä/cm²]. Suomen alueella valtaosa typpidioksidipitoisuushavainnoista asettuu välille 0–5 yksikköä.

Aikasarjasta voidaan havaita, että vuosien väliset erot Suomen typpidioksidipäästöjen määrässä ovat melko vähäistä (kuva 5 ja liite 1). Korkeiden pitoisuuksien levinneisyys eteläisen Suomen alueella on hieman kutistunut vuoteen 2017 tultaessa. Erityisesti pääkaupunkiseudulla esiintyvien korkeiden pitoisuuksien alue on hieman pienentynyt. Pohjoisen Suomen alueella nähdään, että typpidioksidipitoisuudet ovat aikasarjan perusteella hieman nousseet tutkimusjakson aikana vuoteen 2005 verrattuna, mutta vuoteen 2017 tultaessa pitoisuudet ovat muutama aiempaan vuoteen nähden laskeneet. Aikasarjasta voidaan myös havaita, että vuosina 2012–2014 typpidioksidipitoisuudet ovat olleet korkeampia kuin tutkimusjakson alulla. Vuodet 2012 ja 2014 erottuvat joukosta epätavallisen suurella määrällä korkeita typpidioksidipitoisuushavaintoja, jotka kuitenkin laskevat vuoteen 2015 tultaessa. Vielä tutkimusjakson loppupuolella vuosien 2016 ja 2017 typpidioksidipitoisuuksien vuosikeskiarvoissa voidaan havaita selvä muutos. Vuonna 2016 alle yhden suuruisia pitoisuusarvoja havaittiin vuoteen 2017 verrattuna huomattavasti suppeammalla alueella.



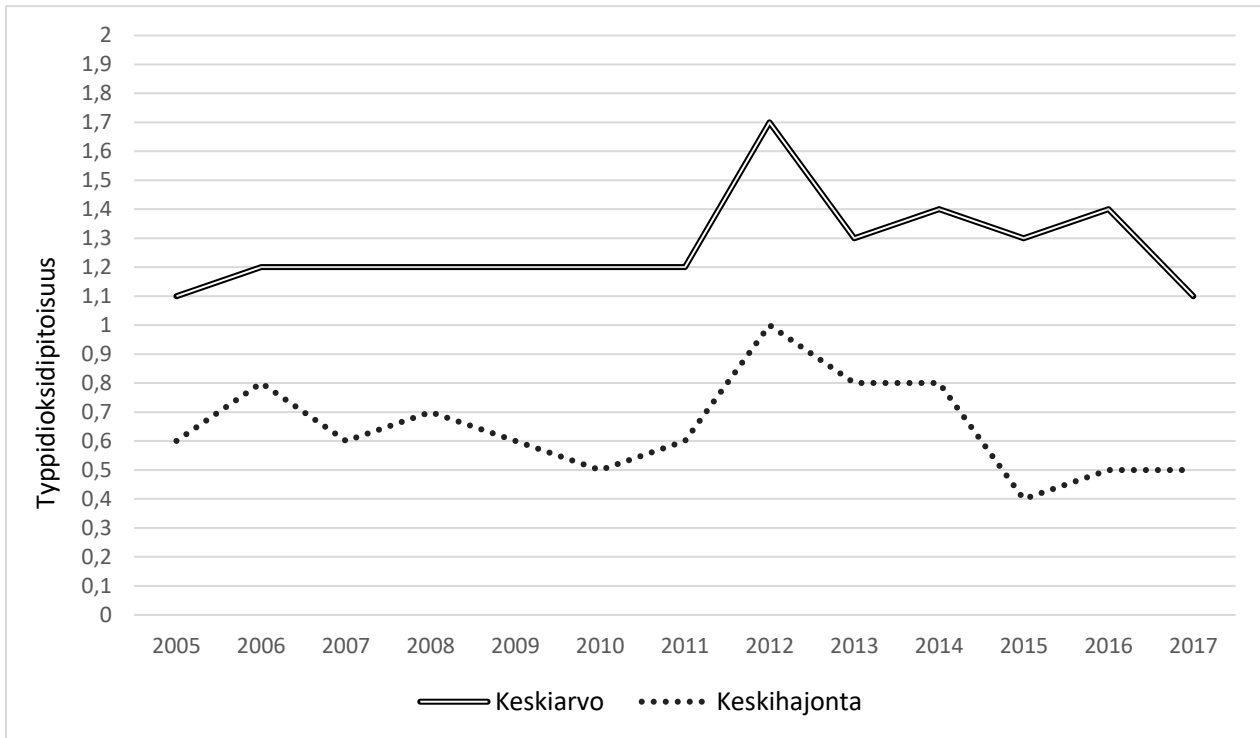
Kuva 5. Aikasarja Suomen NO₂ -pitoisuuden vuotuisesta kehityksestä ja jakaumasta. Karttakuvien vuosittaiset suurennot löytyvät tutkimuksen lopusta Liitteet -osiosta (Liite 1. Vuosittaiset karttakuvat Suomen NO₂ -jakaumasta).

Taulukko 2. Luokiteltu vuosittainen havaintojakauma Suomen NO₂-pitoisuuksista. Taulukossa on laskettu jokaisen vuoden keskiarvorasterin pikselit havaintoarvon mukaisiin havaintoluokkiin. Taulukko havainnollistaa kuinka monta havaintoa kussakin pitoisuusluokassa on tutkimusjakson eri vuosina.

<i>NO₂ -jakauman havaintoluokat [10¹⁵molek. /cm²]</i>											
Vuosi	alle 1	1–2	2–3	3–4	4–5	5–6	6–7	7–8	8–9	9–10	yli 10
2005	1949	1772	280	39	19	5	0	0	0	0	0
2006	2071	1575	333	55	8	10	6	2	0	4	0
2007	1553	2170	296	35	10	0	0	0	0	0	0
2008	1665	1870	407	119	3	0	0	0	0	0	0
2009	1933	1739	321	55	16	0	0	0	0	0	0
2010	1619	2165	208	67	5	0	0	0	0	0	0
2011	1977	1741	272	46	16	0	0	12	0	0	0
2012	1395	1385	903	247	97	33	4	0	0	0	0
2013	2026	1687	277	28	16	7	8	6	0	3	6
2014	2019	1451	400	105	84	4	1	0	0	0	0
2015	1257	2592	181	33	1	0	0	0	0	0	0
2016	1266	2506	243	49	0	0	0	0	0	0	0
2017	2006	1776	246	31	5	0	0	0	0	0	0

Aikasarja-analyysin tulkinna helpottamiseksi taulukossa on esitetty Suomen alueella mitattujen typpidioksidihavaintojen jakautuminen eri havaintoluokkiin tutkimusjakson aikana (taulukko 2). Taulukon arvot vahvistavat karttamuotoisesta aikasarjasta tehtyjä havaintoja. Siitä voidaan nähdä, että arvojen jakauma vuosina 2012–2014 on poikkeuksellinen. Arvoja esiintyy tavallista enemmän erityisesti luokasta 3–4 ylöspäin. Havaintoja näissä luokissa on vuonna 2012 9 %, vuonna 2013 2 % (joista yli puolet sijoittui havaintoluokissa välille 4–10) ja vuonna 2014 5 %. Vuodesta 2015 eteenpäin näiden luokkien havaintoluvut ovat pysyneet yhdessä prosentissa tai alle. Vuosien 2016 ja 2017 välillä tapahtunut muutos alle yhden suuruisen havaintojen määrässä on myös merkittävä. Vuonna 2016 alle yhden suuruisia havaintoja oli 31 % kun taas vuonna 2017 vastaavan suuruisia havaintoja oli 49 %.

Diagrammi (kuva 6) näyttää vuoden 2012 pitoisuuksissa tapahtuneen piikin ja toisen vuonna 2014 tapahtuneen loivemman nousun. Kun verrataan vuosien 2005 ja 2017 tunnuslukuja, voidaan huomata, että ne ovat pysyneet melko samana korkeampien pitoisuuksien ajoituksessa tutkimusjakson keskivaiheille. Keskiarvo on sama, kuin tutkimusjakson alussa, mutta keskihajonta on laskenut 0,1:llä. Keskimäärin tutkimusjakson typpidioksidipitoisuuksien keskiarvo ja keskihajonta on kuitenkin ollut vuoden 2017 pitoisuuksia korkeampi. Viime vuosien aikana diagrammissa voidaan havaita keskiarvojen ja keskihajonnan osalta laskeva trendi.



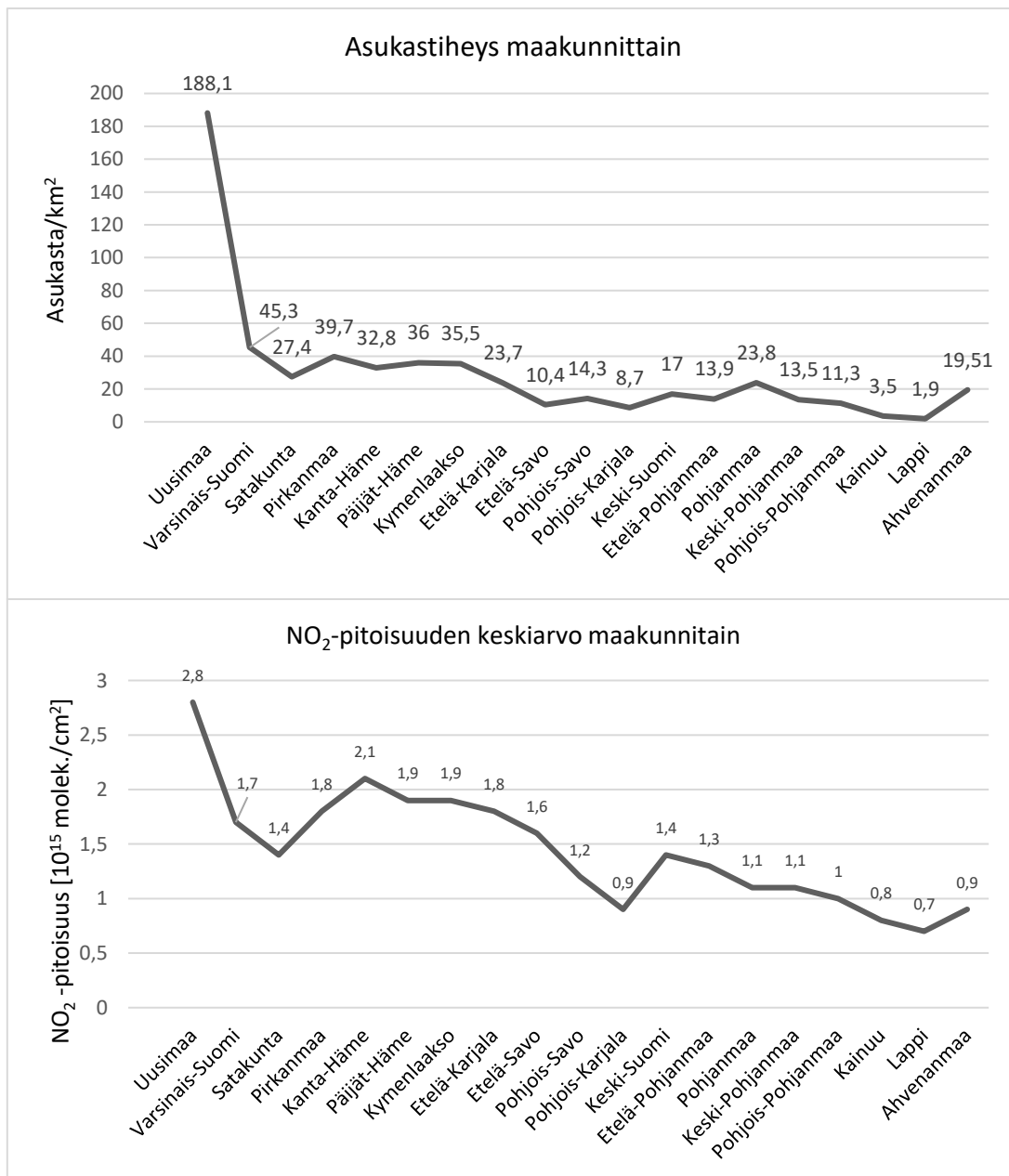
Kuva 6. Typpidioksidipitoisuuksien keskiarvon ja keskihajonnan muutos Suomessa vuosina 2005–2017. Y-akselilla on typpidioksidipitoisuuden keskiarvoja, ja x-akselilla on tutkimusvuosi. Kuvaajat havainnollistavat vuosittaista muutosta keskihajonnassa ja keskiarvossa tutkimusajanjakson aikana.

4.1.2. Alueelliset vaihtelut ilmanlaadussa

Alueellisesti pitoisuuserot voidaan jakaa karkeasti kolmeen luokkaan: pääkaupunkiseutu ja suuret kaupungit, muu eteläinen Suomi ja pohjoinen Suomi (kuva 5 ja liite 1. Vuosittaiset karttakuvat Suomen NO₂ -jakaumasta). Pääkaupunkiseudulla ja suurissa kaupungeissa typpidioksidipitoisuudet olivat huomattavasti muita Suomea korkeampia. Pitoisuudet erottuivat selvästi kohonneina kartoilta ja olivat suuruudeltaan yli kolme [10^{15} molek. /cm²]. Pääkaupunkiseudulla korkeat havaintoarvot ulottuvat myös pitkälle Suomenlahden ylle. Kartoista voidaan havaita erottuvan korkeita typpidioksidipitoisuuksia pääkaupunkiseudun lisäksi esimerkiksi Tampereen ja Turun seuduilla sekä useana vuonna myös Mikkelin ja Kuopion lähetyviltä. Typpidioksidipäästöt ovat keskittyneet lähelle tiheästi asuttuja ja liikennöityjä alueita, kuten suuret kaupungit ja valtatie. Muualla eteläisessä Suomessa pitoisuudet olivat pääkaupunkiseutua ja suuria kaupunkeja matalampia liikkuen kahden [10^{15} molek. /cm²] tietämillä. Pohjoisessa Suomessa pitoisuudet olivat sekä Suomen että Euroopan mittakaavalla matalia liikkuen 0–1 [10^{15} molek. /cm²] välillä.

Toinen tapa jäsenellä alueellisia pitoisuuseroja on tarkastella typpidioksidipitoisuuksia maakunnittain. Koska typpidioksidipäästöt ovat keskittyneet tiheään asutuille ja liikennöidyille alueille, typpidioksidijakauma noudattaa myös karkeasti asukastiheyden maantieteellistä jakaumaa Suomen alueella (kuva 7). Typpidioksidipitoisuuksien ja asukastiheyden alueellisen jakauman vertailu paljasti, että typpidioksidipäästöt selittyvät suurelta osin (61 %) asukastiheydellä ja

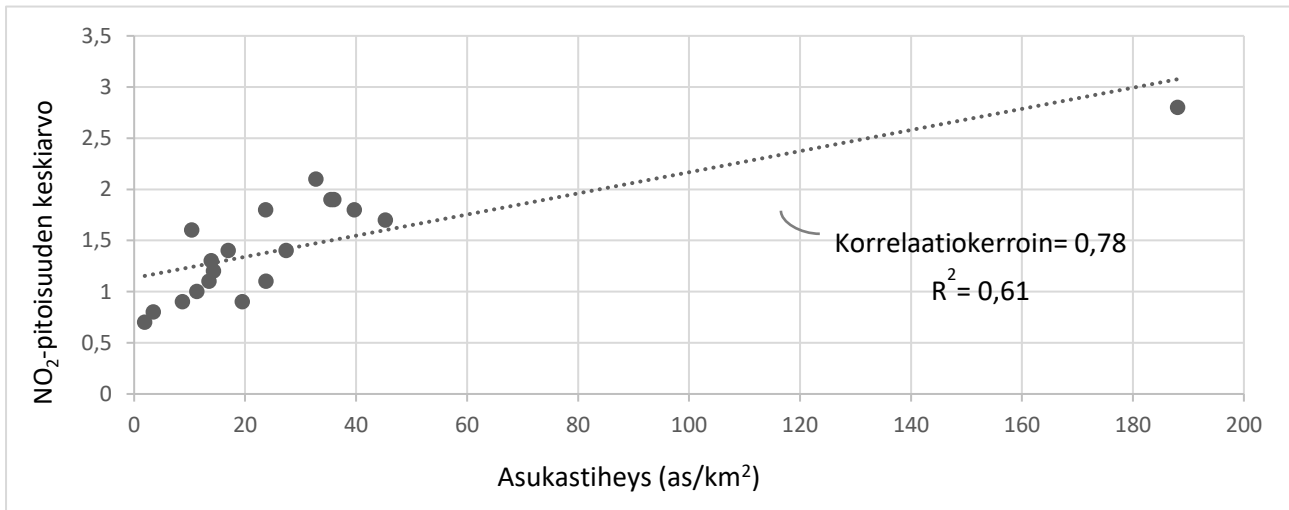
noudattavat siksi osin samaa kaavaa asukastiheyden jakauman kanssa. Poikkeuksia näihin tekivät Uudenmaan naapurimaakunnat, joissa asukastiheys on pieni, mutta liikenne esimerkiksi Uudenmaan alueelle on suurta ja siksi typpidioksidipitoisuudet asukastiheyteen nähden koholla. Diagrammeista nähdään asukastiheyden ja typpidioksidipitoisuuksien jakauma maakunnittain vuonna 2017. Jakaumat vastaavat suurelta osin toisiaan, mutta poikkeuksen tekevät Pohjois-Karjala, Kanta-Häme, Päijät-Häme ja Kymenlaakso. Pohjois-Karjalassa typpidioksidipitoisuudet ovat poikkeuksellisen matalia ja Kanta-Hämeessä, Päijät-Hämeessä ja Kymenlaaksossa pitoisuudet ovat poikkeuksellisen korkeita. Kanta-Hämeen, Päijät-Hämeen ja Kymenlaakson poikkeuksellisen korkeat tulokset saattavat osittain selittyä työmatkaliikenteellä kohti pääkaupunkiseutua, sillä ne ovat Uudenmaan naapurimaakuntia. Pohjoisessa Suomessa pitoisuudet laskevat suurilta osin alle yhden.



Kuva 7. Asukastiheys ja NO₂-pitoisuuksien jakauma maakunnittain vuonna 2017. X-akselilla on esitetty Suomen maakunnat asukasluvun mukaisessa järjestyksessä. Y-akselilla ylemmässä kuvassa on asukastiheys ja alemmassa kuvassa typpidioksidipitoisuuden keskiarvo maakunnittain.

Matalia arvoja esiintyykin erityisesti Lapissa, Kainuussa, Pohjois-Karjalassa ja jonkin verran myös Pohjois-Pohjanmaalla.

Diagrammi (kuva 8) kuvastaa maakunnittaisten arvojen jakautumista typpidioksidipitoisuuden ja asukastiheyden mukaan. Havainnot jakautuvat melko tasaisesti trendiviivan läheisyyteen muodostaen klusterin pitoisuusvälille 0,5–2. Asukastiheyden ja typpidioksidipitoisuuden välinen korrelaatiokerroin on 0,78 ja sille laskettu selityskerroin 61 %. Tämä tarkoittaa sitä, että tilastollisesti voidaan sanoa asukastiheyden selittävän 61-prosenttisesti typpidioksidin jakautumista Suomen maakuntiin.

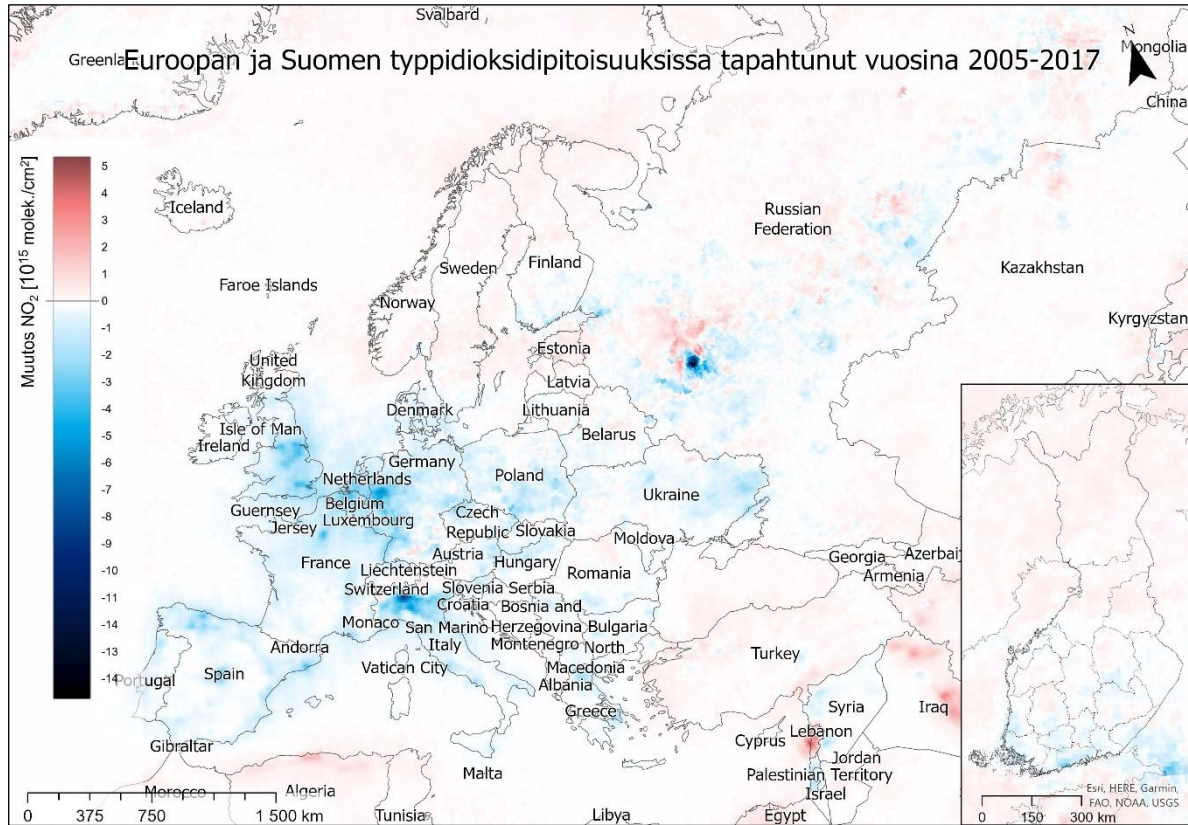


Kuva 8. Asukastiheyden ja NO₂-pitoisuuksien välinen riippuvuus, korrelaatio ja havaintojen jakauma lineaariselle trendiviivalle vuonna 2017. Havainnot kuvaavat yksittäisten maakuntien sijoittumista x-akselilla olevan asukastiheyden ja y-akselilla olevan typpidioksidipitoisuuden keskiarvojen suhteen.

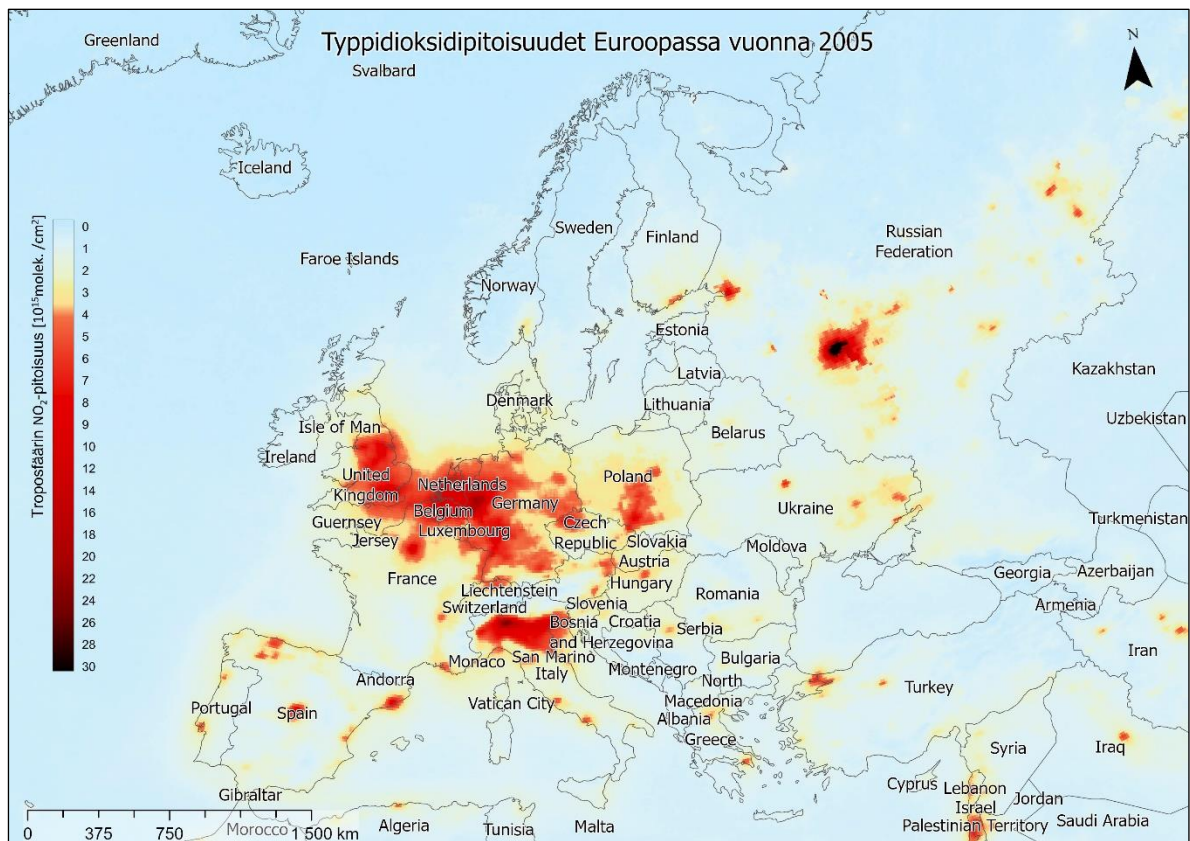
4.2. Tutkimusalueen NO₂ -pitoisuuksien kehitystrendit

Euroopan muutoskarttaa (kuva 9 ja liite 3. Muutoskartat Suomen ja Euroopan ilmanlaadusta) tarkasteltaessa voidaan huomata, että Suomen typpidioksidipitoisuuksien muutos vuodesta 2005 vuoteen 2017 on samankaltainen Euroopan kehityksen kanssa. Typpidioksidipitoisuuksien laskua on tapahtunut valtaosassa Eurooppaa, mutta erityisesti suurissa kaupungeissa on havaittavissa voimakasta laskua typpidioksidipitoisuuksissa. Muutoskartassa erottuu selkeästi sellaiset alueet, joilla on tutkimusjakson alussa ollut erityisen korkeita pitoisuuksia, kuten Moskova, Pohjois-Italia, Kölnin alue Saksassa sekä Lontoo ja Manchesterin, Leedsin ja Sheffieldin kaupunkikeskittymä. Myös Espanjassa ja Portugalissa näkyy selvää pitoisuuksien laskua suurissa kaupungeissa.

Pitoisuuskartassa (kuva 10) näkyy typpidioksidipitoisuuksien lähtötilanne Euroopassa tutkimusajanjakson alulla vuonna 2005. Näitä kahta karttaa vertailemalla voidaan todeta, että pitoisuuksissa tapahtuneet suuret laskut ovat tapahtuneet samoilla alueilla, joilla on havaittu tutkimusjakson alulla korkeimpia typpidioksidipitoisuuksia. Euroopan typpidioksidipitoisuuksien vuosittainen aikasarja löytyy tutkimuksen liitteistä (Liite 2. Vuosittaiset karttakuvat Euroopan ilmalaadusta).



Kuva 9. Muutoskartta Euroopan typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneista muutoksista vuodesta 2005 vuoteen 2017. Sininen väri merkitsee laskeneita ja punainen kohonneita NO_2 -pitoisuuksia. Kartta kuvaa pitoisuuksissa tapahtuneiden muutosten suuntaa ja suuruutta, sekä havainnollistaa muutosten alueellista jakaamaa.



Kuva 10. Typpidioksidipitoisuuksien jakauman lähtötilanne Euroopassa tutkimusjakson alussa vuonna 2005. (Liite 2. Vuosittaiset karttakuvat Euroopan ilmanlaadusta)

Suomessa typpidioksidipitoisuuksien laskua on havaittavissa erityisesti pääkaupunkiseudulla ja eteläisessä Suomessa. Pohjoisessa Suomessa muutos näyttää olevan nollan tuntumassa. Pitoisuuksissa tapahtuneet muutokset voidaan jakaa karkeasti kahteen luokkaan: eteläiseen ja pohjoiseen Suomeen. Tutkimusjakson aikana tapahtuneissa pitoisuuksien muutoksissa on havaittavissa selkeä pohjois-etelä-suuntainen kahtiajako, joka jakaa Suomen etelään, jolla typpidioksidipitoisuudet ovat laskeneet ja pohjoiseen, jolla pitoisuudet ovat nousseet.

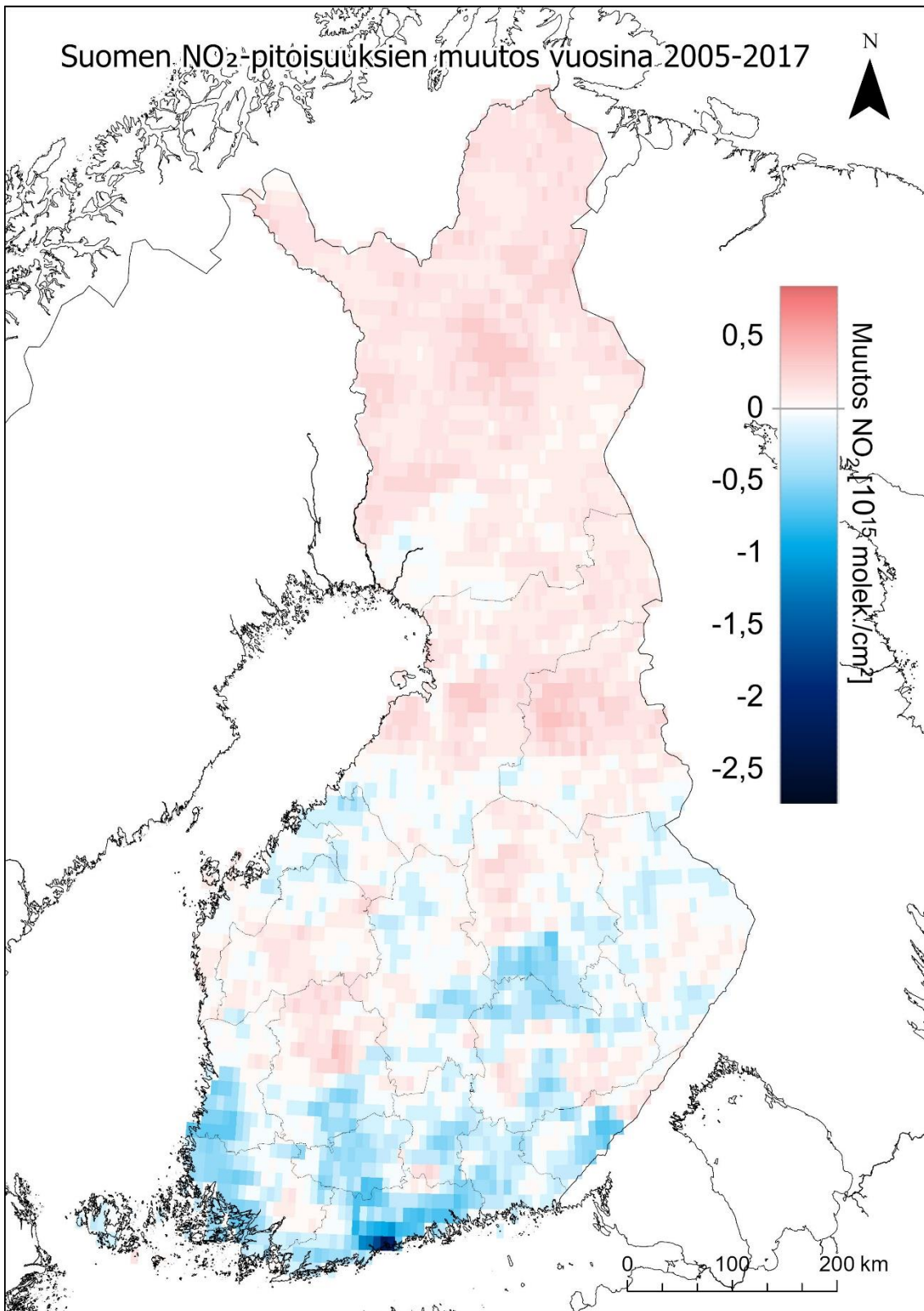
Tarkasteltaessa Suomen ja koko Euroopan typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneiden muutosten tunnuslukuja (taulukko 3) voidaan alueiden välillä havaita pieniä eroavaisuuksia. Koko Euroopassa typpidioksidipitoisuuden muutosarvot liikkuvat välillä -8,4 ja 1,5. Tutkimusjakson aikana Suomessa toteutunut vaihteluväli typpidioksidipitoisuuksien muutokselle on -2,7–0,5, joten muutokset pitoisuuksien laskussa ovat olleet suurempia kuin muutokset pitoisuuksien nousussa. Suomen typpidioksidipitoisuushavaintojen tarkempaa vuosittaista jakaumaa eri pitoisuusluokkiin voi tarkastella liitteestä 4 (Liite 4. Suomen vuosittainen NO₂ -havaintojakauma). Vaihteluvälien eroavaisuudet selittyvät sillä, että vain Suomen alueen ja koko Euroopan alueen välillä oli suuria eroja myös pitoisuuksien lähtöarvoissa tutkimusjakson alussa. Kiinnostava havainto tunnusluvuissa on keskiarvo, jonka mukaan typpidioksidipitoisuuksien keskiarvo Euroopassa on laskenut -0,2:lla, kun taas Suomessa typpidioksidipitoisuuksien keskiarvo on noussut tutkimusjakson aikana 0,05:llä.

Taulukko 3. Suomen ja Euroopan typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneen muutoksen tunnuslukuja. Luvut kuvaavat, kuinka monta yksikköä typpidioksidipitoisuus on noussut tai laskenut tutkimusalueella vuodesta 2005 vuoteen 2017. Luvuista selviää pitoisuuksissa tapahtuneen muutoksen vaihteluväli ja keskiarvo.

Muutoksen suuruus ja suunta Suomessa ja Euroopassa

	Minimiarvo	Maksimiarvo	Keskiarvo
<i>Eurooppa</i>	-8,37	1,47	-0,21
<i>Suomi</i>	-2,73	0,54	0,05

Suomessa havaitut pitoisuudet ovat koko Euroopan pitoisuuksiin verrattuna koko tutkimusjakson ajan suhteellisen matalia. Erot kaupunkien ja harvaan asuttujen alueiden välillä ovat kuitenkin selviä näkyen myös eroina pohjois-etelä-akselilla. Kuvassa 11 on esitetty Suomen alueen typpidioksidipitoisuuksien muutos muutoskarttana, jonka visualisoinnin luokitus on skaalattu kuvaamaan tarkemmin Suomessa havaittavia pieniä pitoisuuseroja. Muutoskartasta näkyy, että isossa osassa Suomea typpidioksidipitoisuus liikkuu hieman nollan yläpuolella. Eteläisen ja pohjoisen Suomen välillä on havaittavissa selkeä kahtiajako pitoisuuksien kehityksen suunnassa etelän noudattaessa Euroopan laskevaa trendiä pohjoisten harvempaan asuttujen alueiden pitoisuuksien noustessa. Muutos on odotettu, sillä pohjoisessa Suomessa pitoisuudet ovat olleet tutkimusjakson alkupuolella nollan tuntumassa, kun taas eteläisessä Suomessa ja pääkaupunkiseudulla on mitattu korkeampia pitoisuuksia.



Kuva 11. Muutoskartta Suomen alueella tapahtuneista typpidioksidipitoisuuksien muutoksista tutkimusajanjakson aikana. Muutoskartassa lasketaan tutkimusjakson alun (2005–2007) ja lopun (2015–2017) välinen erotus. Sininen väri merkitsee laskeneita ja punainen kohonneita pitoisuuksia. Kartta kuvaa pitoisuuksissa tapahtuneiden muutosten suuntaa ja suuruutta sekä havainnollistaa muutosten alueellista jakaumaa.

4.3. Aineiston soveltuvuus Suomen ilmanlaadun tutkimukseen

Aineiston käytettävyyttä ja soveltuvuutta laaja-alaisten ilmanlaatuanalyysien ja aikasarjojen tuottamiseen tutkittiin spatiaalisen ja temporaalisen resoluution, datan laadun ja vaihtoehtoisten mittaustapojen näkökulmasta. Satelliittimittaukset soveltuvat hyvin ilmanlaadun alueellisen jakauman tarkasteluun ja kehityksen seurantaan. OMI-mittalaitteen keräämä data soveltuu spatiaaliselta ja temporaaliselta resoluutioltaan hyvin Suomen ja Euroopan kokoisten alueiden ilmanlaadun pitkäaikaisen kehityksen seurantaan. Spatiaalinen resoluutio ei kuitenkaan ole riittävän tarkka kuvaamaan yksityiskohtaisesti pistemäisten typpidioksidilähteiden tai pinta-alaltaan Suomen pienempien kuntien pitoisuuksia.

Typpidioksidipitoisuuskarttojen tulkinnessa tulee ottaa huomioon satelliittihavaintojen ajallisen saatavuuden rajallisuus. Pitoisuusarvot riippuvat siitä, mille vuorokauden ajankohdalle satelliittimittaukset osuvat. Lyhytsykliset muutokset, kuten vuorokausivaihtelut jäävät siksi satelliittimittausten havainnointikyvyn ulkopuolelle. Tutkimuksessa tarkasteltujen vuosikeskiarvojen ja pitkän aikavälin pitoisuuksissa tapahtuneiden muutosten tarkasteluun mittaukset kuitenkin soveltuvat, sillä satelliitti tekee mittauksen aina lähes samaan aikaan päivästä.

Aineiston hyödyntäminen pohjoisilla leveysasteilla aiheuttaa raakadatan prosessointivaiheessa omanlaisiaan haasteita, sillä pohjoisilla alueilla raakakuville on laskettava erilaisia pilvi- ja lumimaskeja, joiden avulla saadaan parannettua datan laatua. Tutkimukseen käytetyssä KNMI:n tuottamassa QA4ECV-aineistossa OMI-mittalaitteesta saatu raakadata oli valmiiksi prosessoitua. Algoritmit maskien luomiseen ovat avoimesti saatavilla, joten aineistosta tuotettuja tuloksia voidaan tulkita luotettavasti. Aineistoa ei ole saatavilla vuoden 2017 jälkeen, joten mikäli halutaan tarkastella typpidioksidipitoisuuksissa tapahtunutta muutosta tätä myöhemmin, aineistona on käytettävä muita vaihtoehtoja.

Vaihtoehto satelliittimittauksille on paikan päällä tehtävät *in situ* -mittaukset, joita tehdään ilmanlaadun havaintoasemilla. Satelliittimittaukset sopivat laajojen alueiden pitoisuuksien tarkasteluun *in situ* -mittauksia paremmin, sillä niiden spatiaalinen ulottuvuus on kattavampi ja havainnot saadaan tasaisesti koko tutkimusalueelta. Lisäksi satelliittimittauksissa saadaan pitoisuusarvo koko troposfäärin läpi leikkaavasta vertikaalisesta pylvästä *in situ* -mittausten tuottaessa dataa vain mittauskorkeudelta.

5. Keskustelu

Menetelmällisesti geospaatialinen aikasarja-analyysi sopi tutkimuksen tekemiseen ja tulosten analysointiin hyvin. Aikasarja-analyysi sopii tutkimuksessa tehdyn kronologiseen ja visuaaliseen muotoon jäsennellyn datan analysointiin ja sen avulla oli mielekästä havainnoida ajassa tapahtunutta muutosta. Geospaatialinen analyysi toimi aikasarja-analyysin tukena, kun tarkasteltiin havaintojakaumaa geospaatialisesta näkökulmasta havainnoiden typpidioksidipitoisuuksien sijoittumista maantieteellisesti. Maantieteellisistä tutkimusalueiden erityispiirteistä relevantteja olivat erityisesti tutkimusalueen pohjoinen sijainti, alueiden pinnanmuodot ja ihmistoiminnan keskittymät sekä asutustiheys.

Typpidioksidipitoisuuksia kuvaavan geospaatialisen aikasarja-analyysin perusteella voidaan todeta, että OMI-mittalaitteen keräämillä havainnoilla pystytään tuottamaan merkityksellistä tietoa Suomen ilmanlaadussa tapahtuneista ajallisista ja alueellisista muutoksista (Krotkov *et al.* 2016). Käyttämällä ajallisen muutoksen tarkasteluun pidempää havaintojaksoa (vuosikeskiarvot) eri alueiden väliset pitoisuuserot ovat luotettavammin tarkasteltavissa. Satelliittihavaintojen etuna on laaja spatiaalinen kattavuus, mutta eroavaisuutena paikallisiin *in situ* -mittauksiin on, että satelliitin mittaama havaintoarvo edustaa koko ilmakehäpölyvään vertikaalista keskimääräistä arvoa, kun taas maanpinnalla tehdyt mittaukset kertovat pitoisuuden tarkasti tietyssä pisteessä (Bechle *et al.* 2012). Tämän keskeisen eron ymmärtäminen on tärkeää, jotta satelliittihavaintoja voidaan hyödyntää ilmanlaadun seurannassa. Eri puolilla Suomea tehdyt OMI-mittalaitteen tuottamat typpidioksidihavainnot ovat keskenään vertailukelpoisia, mutta esimerkiksi pohjoismaisten kaupunkien väliseen typpidioksidipitoisuuksien vertailuun data ei sovi sellaisenaan kovinkaan luotettavasti, sillä havaintoarvot riippuvat merkittävästi vallitsevista tuuliolosuhteista (Sundström *et al.* 2020).

Typpidioksidipitoisuuksien havainnointiin ja aineistojen käytettävyyteen vaikuttaa myös mittausajankohta ja sääolosuhteet. Erityisesti vuorokaudenaika ja tuuliolosuhteet vaikuttavat havaintojen sijaintiin sekä havaintoarvojen suuruuteen. Tuuli vaikuttaa sekä paikallisten havaintoasemien että satelliitti-instrumenttien mittauksiin, sillä se levittää typpidioksidipäästöjä laajemmalle alueelle tuulen suunnasta ja voimakkuudesta riippuen (Sundström *et al.* 2020). Pääkaupunkiseudulla korkeat havaintoarvot ulottuvat pitkälle Suomenlahden ylle. Osa tästä selittyy laivaliikenteellä ja veneilyllä, mutta osittain korkeat päästöarvot johtuvat typpidioksidin kulkeutumisesta merelle tuulten mukana.

Typpidioksidipitoisuuksien maantieteellinen jakautuminen Suomessa ja Suomen maakunnissa on kiinnostavaa, sillä siellä voidaan nähdä yhteyksiä asutuksen sijoittumiseen ja asukastiheyteen. Korkeimpia pitoisuudet ovat tiheään asutuilla alueilla, ja pitoisuuksien jakautuminen korreloi osin myös maakuntatasolla asukastiheyden kanssa. Harvaan asutuissa maakunnissa, kuten Lapissa, pitoisuudet ovat koko tutkimusjaksolla pysyneet alhaisina. Korkeita pitoisuusarvoja saavat Uudenmaan lisäksi myös sen naapurimaakunnat. Asukastiheys näissä maakunnissa ei selitä

pitoisuusarvoja, mutta osittain korkeita arvoja voidaan selittää päästöjen kulkeutumisella pääkaupunkiseudulta, sekä työmatkaliikenteellä pääkaupunkiseudun ja naapurimaakuntien välillä.

Tässä tutkimuksessa saatujen tulosten pohjalta Suomi jakautuu typpidioksidipitoisuudessa tutkimusjakson aikana tapahtuneissa muutoksissa selkeästi eteläiseen ja pohjoiseen Suomeen: eteläisessä Suomessa typpidioksidipitoisuudet ovat laskeneet, kun taas pohjoisessa Suomessa pitoisuudet ovat tulosten mukaan hieman kohonneet. Tulokset saattavat johtua esimerkiksi QA4ECV-aineiston lumimaskin algoritmista, joka saattaa vaikuttaa tulosten tarkkuuteen pohjoisilla lumisilla alueilla. Toisaalta tiheään asutun Etelä-Suomen alueella typpidioksidipitoisuuksien lähtötaso on ollut huomattavasti harvaan asuttuja alueita korkeampi. Siksi päästövähennystoimenpiteet vaikuttavat suuremmin juuri tiheään asutun Etelä-Suomen alueella. Pohjois-Suomessa typpidioksidipitoisuudet ovat olleet koko tutkimusjakson ajan hyvin alhaisia (0–1), joten merkittävää laskua typpidioksidipitoisuudessa ei ollut odotettavissa näillä alueilla.

Tutkimuksessa on myös havaittu Suomen alueella mahdollisesti pieniä eroavaisuuksia verrattuna esimerkiksi Ilmatieteen laitoksen vuonna 2020 julkaisemaan raporttiin (Sundström *et al.* 2020). Ilmatieteen laitoksen raportissa esitetään, että typpidioksidipitoisuudet ovat keskimäärin laskeneet vuodesta 2005 vuoteen 2018. Tässä tutkimuksessa muutosta tutkittiin aikavälillä 2005–2017, ja saatujen tulosten perusteella suurella osalla Suomea pitoisuudet olivat hieman nousseet keskimääräisen typpidioksidipitoisuuksissa tapahtuneen muutoksen ollessa koko Suomen alueella 0,05 [10^{15} molek./ cm^2] nousu. Näissä kahdessa tutkimuksessa on kuitenkin havaintojaksoissa yhden vuoden ero, joka saattaa selittää tuloksien välistä eroa. Myös vertailumenetelmät, joita tutkimusajanjakson alun ja lopun välillä on käytetty, saattavat poiketa näiden kahden tutkimuksen välillä. Koska kahden yksittäisen vuoden välillä tapahtuneiden muutosten vertailu ei ole tässä tutkimuksessa käytettyyn aikasarja-analyysin ja kehitystrendin tarkasteluun metodologisesti mielekästä, toteutin omassa tutkimuksessani vertailun laskemalla tutkimuksen kolmen alkuvuoden (2005–2007) keskiarvon ja kolmen loppuvuoden (2015–2017) keskiarvon, ja toteutin vertailun näistä saatujen tulosten pohjalta.

OMI-laite on kaukokartoituksen alalla merkittävä saavutus, sillä sen avulla voidaan saada erittäin laadukasta ja luotettavaa tietoa esimerkiksi ilmanlaadusta, ilmansaasteista ja päästöjen kulkeutumisesta sekä niiden spatiaalisesta ja temporaalisesta jakaumasta globaalilla mittakaavalla (Levelt *et al.* 2018). OMI-mittalaite on tuotettu yhteistyössä Alankomaiden Ilmailu- ja avaruusjärjestön (NIVR) sekä Suomen ilmatieteen laitoksen kanssa ja on ollut ensimmäinen laajaa UV-säteilyn ja näkyvän valon aallonpituuksia hyödyntävä satelliitti-instrumentti, joka on tuottanut vuorokaudessa havaintoja koko maapallolta (Sundström *et al.* 2020). OMI-mittalaitteen avulla on mahdollista tehdä pitkäaikaista seurantaa ja tuottaa maantieteellisesti vertailukelpoista dataa typpidioksidipitoisuuksista ja niiden alueellisista vaihteluista.

Kuntatason ja pistemäisten lähteiden typpidioksidipitoisuuksien tarkasteluun OMI-mittalaitetta soveltuvampi instrumentti on vuonna 2017 avaruuteen laukaistu TROPOMI-mittalaite, joka kykenee tarkemman spatiaalisen resoluutionsa ansiosta havaitsemaan pienemmissäkin kunnissa

tapahtuneita pitoisuuksien muutoksia ja eroavaisuuksia (Wang *et al.* 2020). Tutkimuksen aineistoksi valikoitui tästä huolimatta OMI-mittalaitteen keräämä data, sillä se soveltuu mittausjaksonsa puolesta paremmin pitkän aikavälin muutosten tarkasteluun, koska sen tuottamia mittauksia on saatavilla jo vuodesta 2005 lähtien. Kun tarkastellaan laajempien alueiden, kuten Euroopan tai Suomen, pitoisuuksia, myös spatiaalinen resoluutio on riittävän hyvä. Koska typpidioksidipitoisuuksilla tiedetään olevan päivittäinen sykli (Sundström *et al.* 2020), tulee tuloksia tarkasteltaessa huomioida, että satelliittikaukokartoituksen avulla pystytään havaitsemaan vain osa tästä päivittäisestä syklistä.

Euroopan ilmanlaatua on tutkittu paljon ja myös Suomessa kaukokartoitusosaaminen on vahvaa aina teknologioista tutkimukseen ja sovelluksiin (Böhling 2016). Ilmansaastepitoisuuksien valvomiseksi ja seuraamiseksi on kehitetty monenlaisia prosesseja ja lainsäädäntöjä (Colette *et al.* 2011; Guerreiro *et al.* 2014). Vaikka Euroopan ilmanlaadussa on tapahtunut kehitystä viimeisen vuosikymmenen aikana, pitoisuudet ovat silti paikoittain edelleen yli asetetun standardin. Tutkimuksessa voidaan havaita, että edelleen erityisen korkeita pitoisuudet ovat Euroopan tiheään asutuissa suurissa kaupungeissa sekä teollisuusalueilla (Liite 2. Vuosittaiset karttakuvat Euroopan ilmanlaadusta). Tästä johtuen suuri osa Euroopan asukkaista altistuu edelleen korkeille typpidioksidipitoisuuksille. Euroopan typpidioksidipitoisuuksien jakaumaa kuvaavista kartoista erottuu myös topografian vaikutus. Vuoristoalueilla, kuten Alpeilla, Skandeilla ja Pyreneillä typpidioksidipitoisuudet ovat matalia, ja esimerkiksi Pohjois-Italiassa Alppien eteläpuolella erottuu selkeä korkeiden pitoisuuksien alue. Myös kuvassa 3 esitetyt rakennettujen alueiden sijainnit vastaavat korkeiden typpidioksidipitoisuuksien alueita.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat tutkimusalan kannalta merkityksellisiä ja ovat pitkälti linjassa ilmanlaadun tutkimuskentällä Euroopan alueella tehtyjen ilmanlaaturaporttien ja ilmanlaadututkimusten, sekä Ilmatieteen laitoksen havaintojen kanssa. Esimerkiksi European Environment Agency:n havainnot (typpidioksidipitoisuudet vähentyneet merkittävästi Euroopassa ja suuri osa väestöstä asuu edelleen korkeiden pitoisuuksien alueilla) ilmanlaadun kehityksestä ovat linjassa tässä tutkimuksessa saatujen tulosten kanssa.

Puhtaasti maantieteellistä ja geospaatialista tutkimusta OMI-mittalaitteen tuottaman datan hyödyntämisestä Suomen ilmanlaadun tutkimuksessa ei ole tehty aiemmin, eikä Suomen typpidioksidipitoisuuden kehitystä OMI-dataa hyödyntäen ole verrattu muuhun Eurooppaan tai muualla maailmassa tapahtuneeseen kehitykseen. Myöskään QA4ECV-aineiston soveltuvuutta ja käytettävyyttä Suomen typpidioksidipitoisuuksien tutkimukseen ei ole aiemmin tutkittu.

OMI-mittalaite kiertää maata edelleen keräten jatkuvasti uusia typpidioksidihavaintoja. OMI-mittalaitteen keräämien havaintojen pohjalta olisi mielekästä jatkaa tutkimussarjaa pidemmän ajanjakson ajan, jotta saataisiin tietoa Suomessa ja Euroopassa tapahtuvasta typpidioksidipitoisuuksien kehitystrendistä myös tulevaisuudessa. Mielekästä olisi tuottaa tutkimuksessa käytetystä datasta myös jatkuva ja päivittyvä liukuva keskiarvo. Datan pohjalta on mahdollista verrata typpidioksidin ajallista kehitystä ja alueellista jakaumaa myös muihin kuin tässä

tutkimuksessa esiteltyihin muuttujiin. Sovelluskohteita voisivat olla esimerkiksi autokannan uudistumisen vaikutus, teollisuudessa käytettävien suodattimien vaikutus tai julkisen liikenteen käyttöasteen sekä henkilöautojen lukumäärän merkitys.

Koska datan tulkintaa parantavat algoritmit päivittyvät ja kehittyvät jatkuvasti, vastaavanlainen tutkimus olisi tärkeää tehdä aina, kun tällaisia uusia ja tarkempia algoritmeja on kehitetty. Tällainen menettely on tärkeää myös tutkimuseettisestä näkökulmasta, sillä uusilla tarkemmilla algoritmeilla on mahdollisuus päivittää ja tarkentaa myös tutkimuksesta saatuja tuloksia. Tulevaisuudessa vastaava geospaatialinen aikasarja-analyysi voidaan toteuttaa myös käyttäen spatiaaliselta resoluutioltaan tarkempaa TROPOMI-mittalaitetta sekä myöhemmin tulevia geostationäärisiä satelliitteja, jotta saadaan tarkempaa tietoa esimerkiksi typpidioksidipitoisuuksien päivittäisestä syklistä. Yhdistämällä usean mittalaitteen tuottamaa dataa voidaan saada nykyistä kattavampi kuva typpidioksidipitoisuuksien kokonaistilanteesta ja kehityksestä Suomessa ja Euroopassa.

6. Johtopäätökset

Suomen typpidioksidipitoisuuksissa on tapahtunut tutkimusajanjakson aikana sekä pitoisuuksien nousua että laskua (tutkimuskysymys 1). Koko tutkimusajanjaksoa tarkasteltaessa pitoisuudet ovat keskimäärin Suomen alueella hieman kohonneet. Pitoisuudet olivat korkeimpia tutkimusjakson keskivaiheilla vuosina 2012–2014, jonka jälkeen typpidioksidipitoisuudet ovat olleet Suomen alueella laskussa.

Suomessa typpidioksidin määrä vaihtelee alueellisesti pohjois-etelä-akselilla noudattaen osittain asukastiheyden jakaumaa (tutkimuskysymys 2). Pitoisuudet ovat korkeimpia pääkaupunkiseudulla ja suurissa kaupungeissa, kuten Turussa ja Tampereella. Muualla eteläisessä Suomessa pitoisuudet ovat hieman kohonneita, kun taas pohjoisessa Suomessa pitoisuudet ovat alhaisia. Alueellinen jakauma korreloi myös vahvasti maakuntien asukastiheyksien kanssa, lukuun ottamatta Uudenmaan ympärysmäakuntia, joilla pitoisuudet ovat asukastiheyteen nähden koholla. Tutkimusjaksolla pitoisuudet ovat eteläisessä Suomessa laskeneet, mutta pohjoisessa Suomessa nousseet.

OMI-mittalaitteen tuottamat satelliittihavainnot sopivat spatiaalisen ja temporaalisen resoluutionsa ansiosta hyvin Suomen ilmanlaadun tarkasteluun (tutkimuskysymys 3). Data on resoluutioltaan tarpeeksi tarkkaa, jotta alueellisia pitoisuuseroja saadaan esiin. Temporaalinen resoluutio sopii pitkän aikavälin muutosten tarkasteluun, mutta ei tuo esiin pitoisuuksissa esiintyvää vuorokausivaihtelua. QA4ECV-aineisto on (myös algoritmeiltaan) avoin käyttäjäystävällinen datasetti, ja sen valmiit pilvi- ja lumipeitemaskit tekevät datasta käyttövalmiin, luotettavan ja hyvin tutkimuskäyttöön soveltuvan.

Typpidioksidipäästöjen kehitystrendi Euroopan alueella on ollut laskeva (tutkimuskysymys 4). NO₂-pitoisuudet ovat laskeneet suuressa osassa Eurooppaa tutkimusjakson aikana. Suurimmat pitoisuuksien laskut näkyvät tiheään asutuilla alueilla ja suurissa kaupungeissa, kuten Moskovassa, Lontoossa, Madridissa ja Kölnin alueella. Matalimpien lähtöpitoisuuksien alueella on tapahtunut pientä nousua. Suomen ilmanlaadun kehitys on Euroopan kehitystrendin kanssa linjassa. Tiheään asutuilla alueilla on tapahtunut pitoisuuksien laskua, mutta matalien lähtöpitoisuuksien alueilla on tapahtunut pitoisuuksien nousua.

Kiitokset

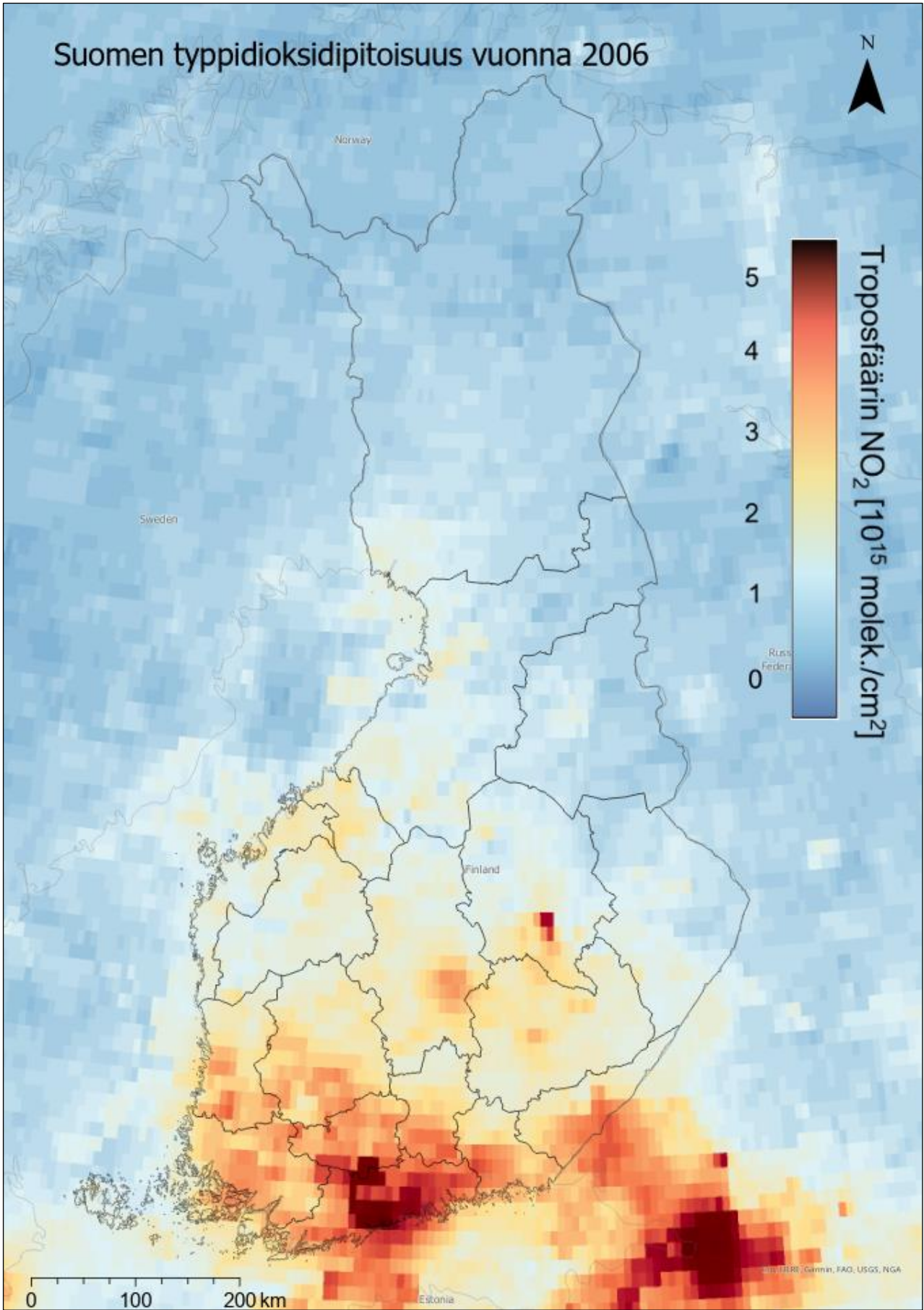
Tahtoisin esittää lämpimät kiitokset Ilmatieteen laitoksen avaruus- ja kaukokartoituskeskuksen henkilöstölle. Erityisesti haluan kiittää Johanna Tammista, joka antoi minulle vapaat kädet lähteä toteuttamaan itselleni mielekästä tutkimusta sekä Anu-Maija Sundströmiä, joka jakoi näkemyksiään tutkimuksen toteuttamiseen soveltuvista indikaattoreista ja saatavilla olevista datalähteistä. Lisäksi tahtoisin esittää kiitokset ohjaajalleni Risto Kalliolalle inspiroivista sanoista ja oivaltavista neuvoista sekä ystävälleni tutkija Hanna Salolle avusta tutkimuksen muotoseikkojen viimeistelyssä.

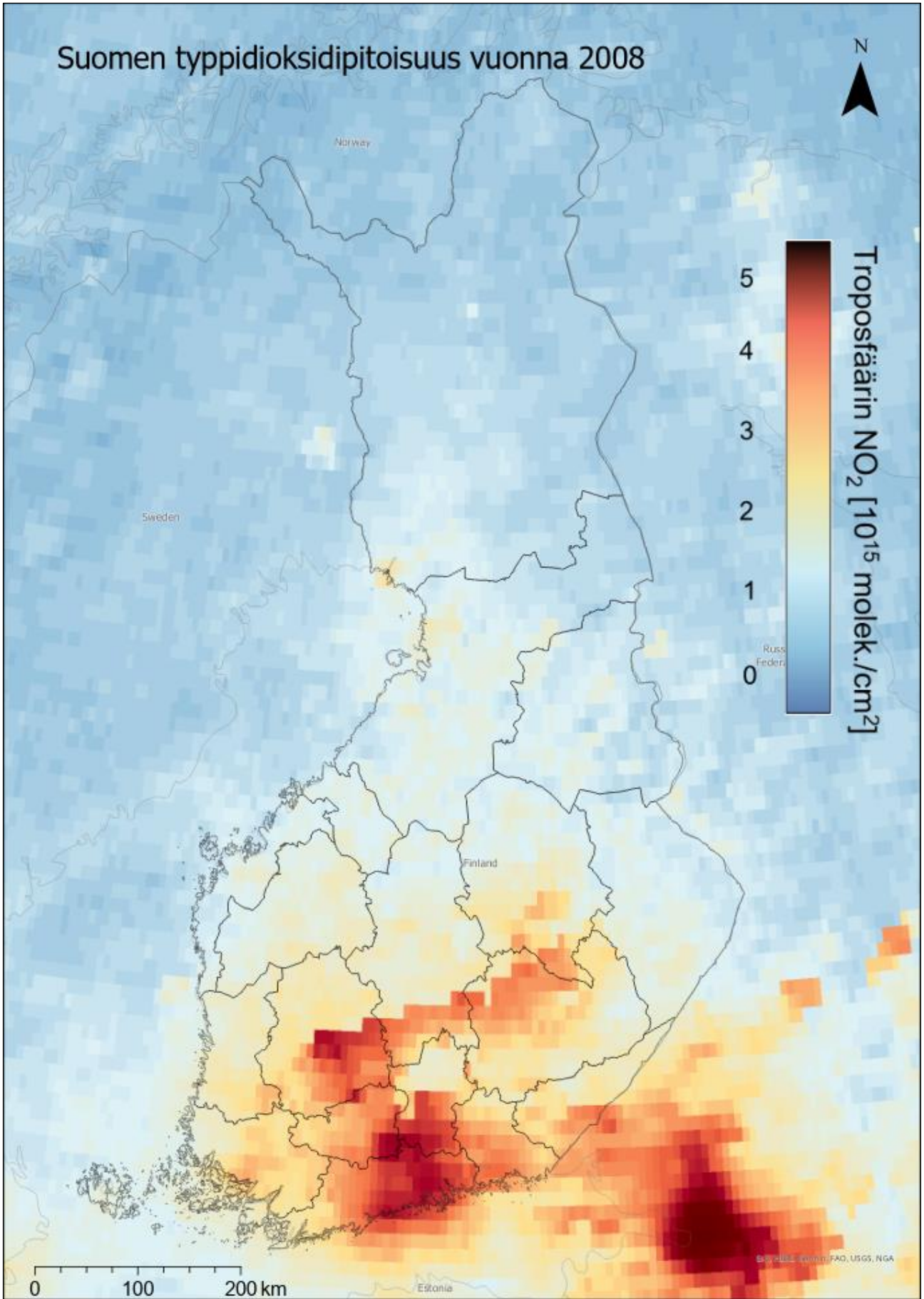
Lähteet

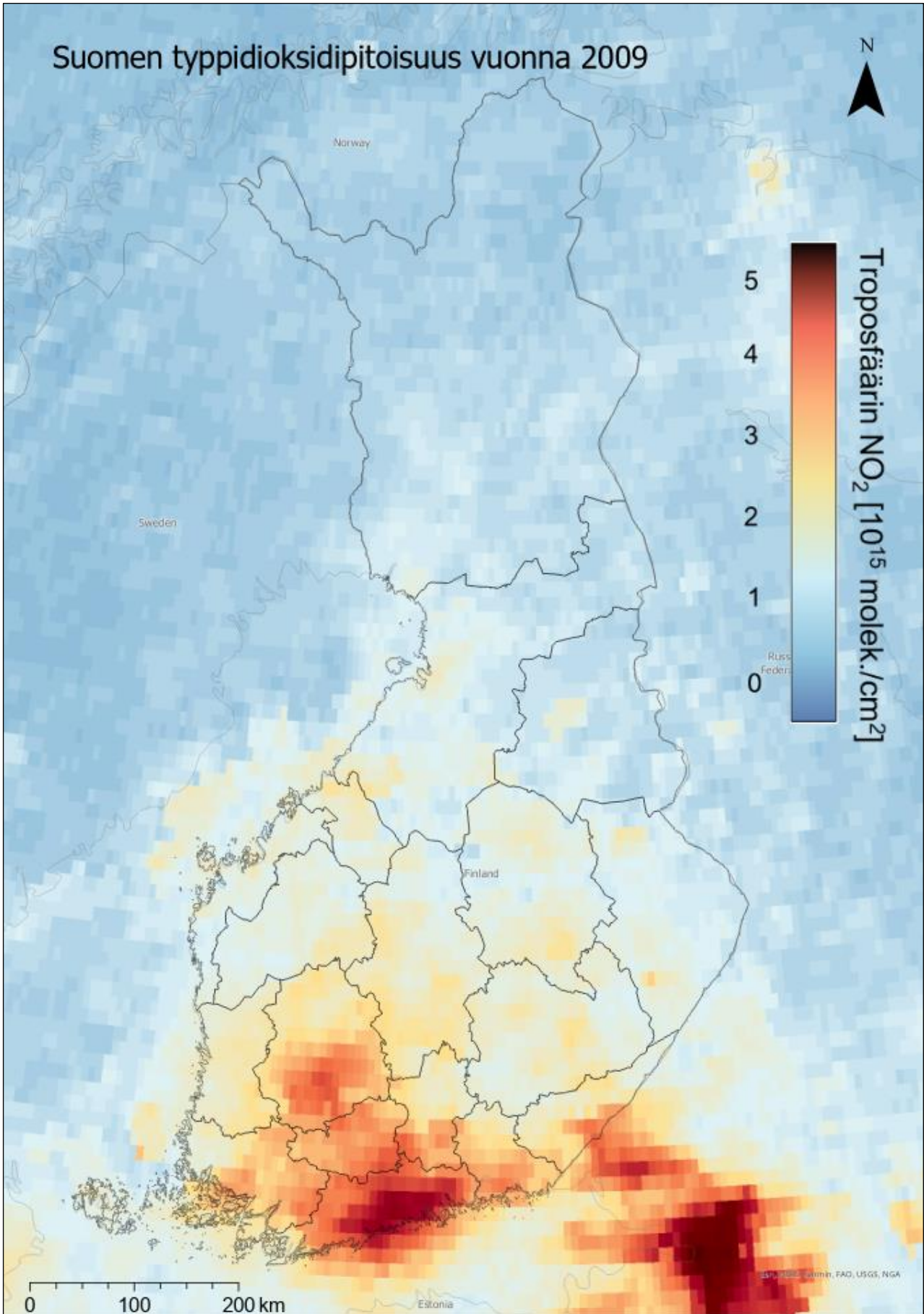
- Aggarwal, S. (2004). Principles of Remote Sensing. Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology. World Meteorological Organisation. Teoksessa Sivakumar, M.V.K., P.S. Roy, K. Harmsen & S.K. Saha (toim.): *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*, s. 23–38.
- Anttila, P., J. P. Tuovinen & J. V. Niemi (2011). Primary NO₂ emissions and their role in the development of NO₂ concentrations in a traffic environment. *Atmospheric Environment* 45:4, 986–992.
- Baidar, S., R. Volkamer, R. Alvarez, A. Brewer, F. Davies, A. Langford, H. Oetjen, G. Pearson, C. Senff & R.M. Hardesty (2013). Combining Active and Passive Airborne Remote Sensing to Quantify NO₂ and O_x Production near Bakersfield, CA. *British Journal of Environment & Climate Change* 3:4, 566–585.
- Basly L. & L. Wald (2000). Remote sensing and air quality in urban areas. *Proceedings of the 2nd international workshop on telegeoprocessing, TeleGeo'2000, Sophia Antipolis, France, May 10-12, 213–219.*
- Bechle, M. J., D. B. Millet & J. D. Marshall (2012). Remote sensing of exposure to NO₂: Satellite versus ground-based measurement in a large urban area. *Atmospheric Environment* 69, 345–353.
- Bernauer, T. & Koubi, V. (2009). Effects of political institutions on air quality. *Ecological economics* 68: 5, 1355–1365.
- Bodzin, A. M. & L. Cirucci (2009). Integrating Geospatial Technologies to Examine Urban Land Use Change: A Desing Partnership. *Journal of Geography* 108:4–5, 186–197.
- Boersma, K. F., H. J. Eskes, A. Richter, I. De Smedt, A. Lorente, S. Beirle, J. van Geffen, M. Zara, E. Peters, M. Van Roozendaal, T. Wagner, J. Maasakkers, A. R. J. van der, J. Nightingale, A. De Rudder, H. Irie, G. Pinardi, J.-C. Lambert & S. Compernelle (2018). Improving algorithms and uncertainty estimates for satellite NO₂ retrievals: results from the quality assurance for the essential climate variables (QA4ECV) project. *Atmos.* 11, 6651–6678.
- Brown, R. A. (1980). Longitudinal instabilities and secondary flows in the planetary boundary layer: A review. *Reviews of Geophysics*, 18:3, 683–697.
- Böhling, P. (2016). Onnistunut OMI – esimerkki suomalaisesta satelliittiosaamisesta. Atmos 27.6.2016. 1.10.2021. <<https://atmoslehti.fi/tutkimus/onnistunut-omi-esimerkki-suomalaisesta-satelliittiosaamisesta/>>
- Casquero-Vera, J.A., H. Lyamani, G. Titos, E. Borrás, F.J. Olmo & L. Alados-Arboledas (2018). Impact of primary NO₂ emissions at different urban sites exceeding the European NO₂ standard limit. *Science of the Total Environment* 646, 1117–1125.
- Castellanos, P. & K. F. Boersma (2012). Reductions in nitrogen oxides over Europe driven by environmental policy and economic recession. *Scientific Reports* 2, 265.
- Ciumasu, I. M. & N. Costica (2010). Impacts of Air Pollution on the Ecosystem and Human Health - A Sustainability Perspective. *Air Pollution - Health and Environmental Impacts* 16, 447–492.
- Colette, A., C. Granier, Ø. Hodnebrog, H. Jakobs, A. Maurizi, A. Nyiri, B. Bessagnet, A. D'Angiola, M. D'Isidoro, M. Gauss, F. Meleux, M. Memmesheimer, A. Mieville, L. Rouïl, F. Russo, S. Solberg, F. Stordal, & F. Tampieri (2011). Air quality trends in Europe over the past decade: a first multi-model assessment. *Atmospheric Chemistry and Physics* 11, 11657-11678.
- Cooper, M. J., R. V. Martin, A. von Donkelaar, L. Lamsal, M. Brauer & J. R. Brook (2012). A Satellite-based Multi-Pollutant Index of Global Air Quality. *Environmental Science & Technology* 46, 8523–8524
- Craven-Jones, J. M.W. Kudenov, M. G. Stapelbroek, & E. L. Dereniak (2011). Infrared hyperspectral imaging polarimeter using birefringent prisms. *Applied optics* 50:8, 1170–1185.
- Crutzen, P. J. (1970). The influence of nitrogen oxides on the atmospheric ozone content. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 96:408, 320–325.
- Dempsey, C. (2021). Absolute and Relative Location. *Geolounge, Geography* 101. 2.11.2021. <<https://www.geolounge.com/absolute-relative-location/>>
- EEA. European Environment Agency (2020). Air Quality in Europe – 2020 report. *EEA Report No 09/2020*. Luxembourg: Publications Office of the European Union.
- ESA. The European Space Agency (2021). Observing the Earth. 3.11.2021 <https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth>

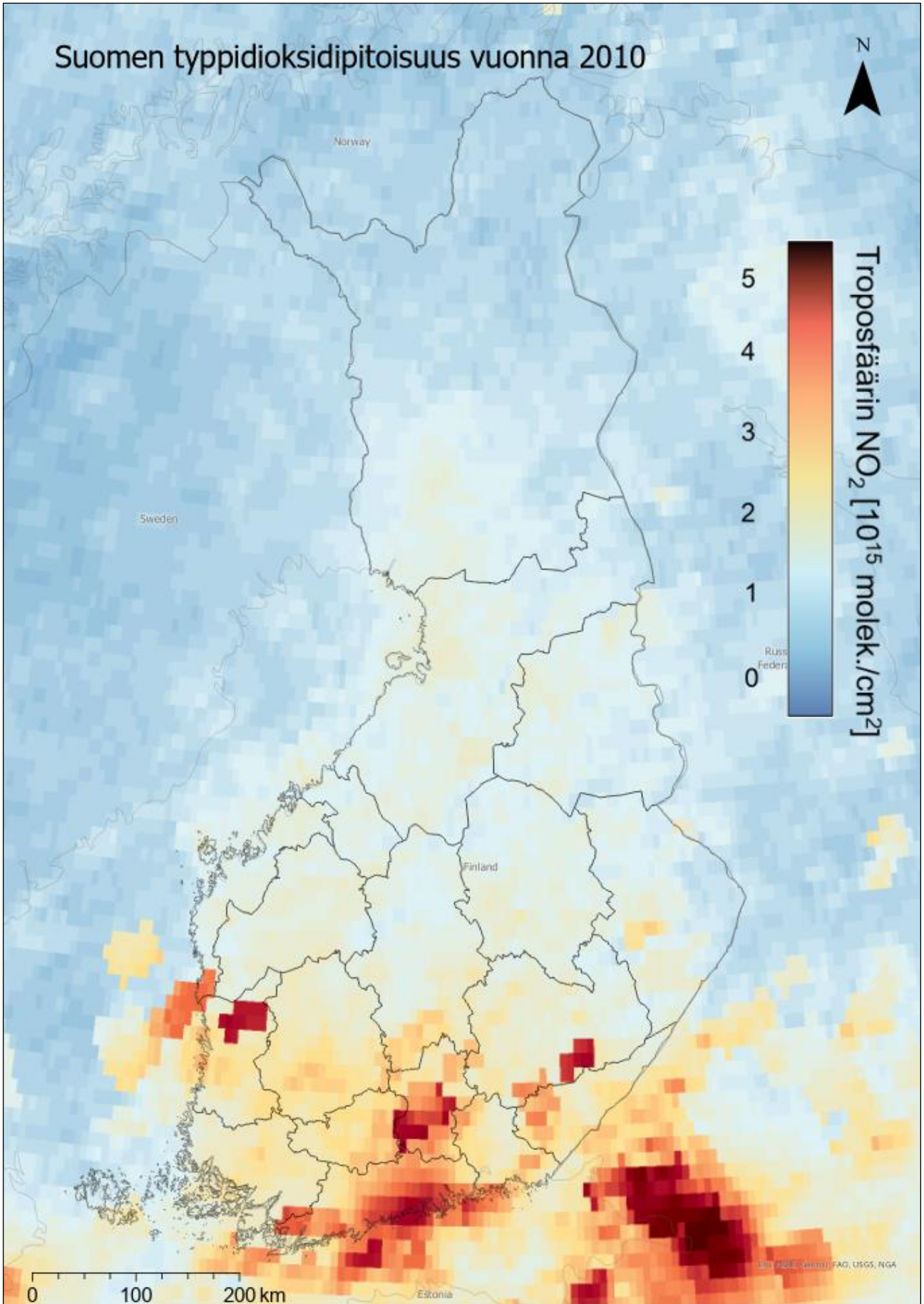
- ESRI. Environmental Systems Research Institute (2021). Living Atlas of the World. 4.11.2021
<<https://livingatlas.arcgis.com/en/home/>>
- Feizizadeh, B. & T. Blaschke. (2013). Examining Urban Heat Island Relations to Land Use and Air Pollution: Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis for Thermal Remote Sensing. *Journal of selected topics in applied earth observations and remote sensing* 6: 3, 1749–1756.
- Fishman, J., F. M. Vukovich, D. Cahoon & M. C. Shipman (1987). The characterization of an air pollution episode using satellite total ozone measurements. *Journal of Applied Meteorology* 26, 1638–1654.
- Fishman, J., C. E. Watson, J. C. Larsen & J. A. Logan (1990). Distribution of tropospheric ozone determined from satellite data. *Journal of Geophysical Research* 95, 3599–3617.
- Fishman, J., K. W. Bowman, J. P. Burrows, A. Richter, K. V. Chance, D. P. Edwards, ... & A. M. Thompson (2008). Remote sensing of tropospheric pollution from space. *Bulletin of the American Meteorological Society* 89: 6, 805–822.
- Focas, C., & Christidis, P. (2017). Peak car in Europe? *Transportation research procedia* 25, 531–550. Franceschini, F., M. Galetto & D. Maisano (2005). A short survey on air quality indicators: properties, use, and (mis) use. *Management of Environmental Quality: An International Journal* 16: 5, 490–504.
- Fraser, R.S. (1976). Satellite measurement of mass of Sahara dust in the atmosphere. *Applied Optics* 15, 2471–2479.
- Fraser, R.S., Y. J. Kaufman & R.L. Mahoney (1984). Satellite measurements of aerosol mass and transport. *Atmospheric Environment* 18, 2577–2584.
- Galloway, J. N., Aber, J. D., Erisman, J. W., Seitzinger, S. P., Howarth, R. W., Cowling, E. B., & Cosby, B. J. (2003). The nitrogen cascade. *Bioscience* 53:4, 341–356.
- Grewe, V., Dahlmann, K., Matthes, S., & Steinbrecht, W. (2012). Attributing ozone to NO_x emissions: Implications for climate mitigation measures. *Atmospheric environment* 59, 102–107.
- Guerreiro, C., V. Foltescu & F. de Leeuw (2014). Air quality status and trends in Europe. *Atmospheric Environment* 98, 376–384.
- Gurjar, B. R., L. T. Molina & C. S. P. Ojha (2010; toim.). *Air Pollution. Health and Environmental Impacts*. 544 s. CRC Press, Lontoo.
- KNMI. Hollannin meteorologinen instituutti (2019). Quality Assurance for Essential Climate Variables (QA4ECV). 12.4.2021. <<http://www.qa4ecv.eu/node/296>>
- Hsu, A., A. Reuben, D. Shindell, A. de Sherbinin & M. Levy (2013). Toward the next generation of air quality monitoring indicators. *Atmospheric Environment* 80, 561–570.
- Ialongo, I., H. Virta, H. Eskes, J. Hovila & J. Douros (2020). Comparison of TROPOMI/Sentinel-5 Precursor NO₂ observations with ground-based measurements in Helsinki. *Atmos. Meas. Tech.*, 13, 205–218.
- Ilmatieteen laitos (2018). Ilmansaasteiden terveystvaikutukset. 23.1.2020. <<https://ilmatieteenlaitos.fi/saasteet-ja-terveys>>
- Jaeglé, L., L. Steinberger, R. V. Martin & K. Chance (2005). Global partitioning of NO_x sources using satellite observations: Relative roles of fossil fuel combustion, biomass burning and soil emissions. *Faraday discussions* 130, 407–423.
- Kang, H., B. Zhu, C. Zhu, G. de Leeuw, X. Hou & J. Gao (2019). Natural and anthropogenic contributions to long-term variations of SO₂, NO₂, CO, and AOD over East China. *Atmospheric Research* 215, 284–293.
- Kassomenos, P., A. N. Skouloudis, S. Lukoudis & H. A. Flocas (1998). "Air-quality indicators" for uniform indexing of atmospheric pollution over large metropolitan areas. *Atmospheric Environment* 33, 1861–1879.
- Komppula, B., T. Karppinen, H. Virta, A-M. Sundström, I. Ialongo, K. Korpi, P. Anttila, J. Salmi, J. Tamminen & K. Lovén (2021). Ilmanlaatu Suomessa ilmanlaatumittausten ja satelliittihavaintojen perusteella. Ilmatieteen laitos. *Raportteja* 2021:6.
- Krotkov, N. A., C. A. McLinden, C. Li, L. N. Lamsal, E. A. Celarier, S. V. Marchenko & D. G. Streets (2016). Aura OMI observations of regional SO₂ and NO₂ pollution changes from 2005 to 2015. *Atmospheric Chemistry and Physics* 16: 7, 4605–4629.
- Lai, L-W. & W-L. Cheng (2008). Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. *Science of the Total Environment* 407:8, 2724–2733.
- Levelt, P. F., J. Tamminen, J. P. Veefkind, P. K. Bhartia, D. C. Stein Zweers, B. N. Duncan & K. Wargan (2018). The Ozone Monitoring Instrument: overview of 14 years in space. *Atmospheric Chemistry and Physics* 18:8, 5699–5745.

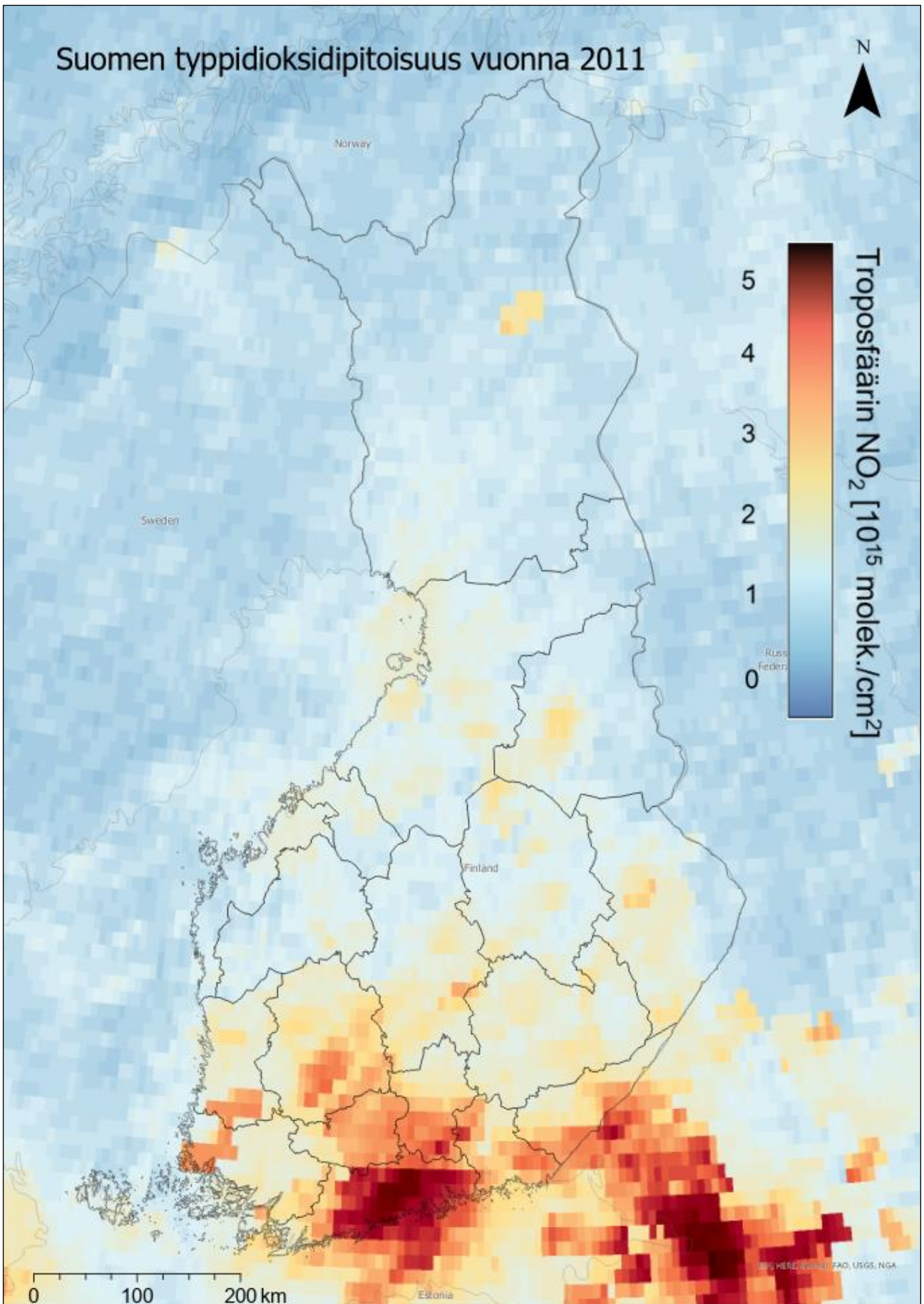
- Liu, S. C., Trainer, M., Fehsenfeld, F. C., Parrish, D. D., Williams, E. J., Fahey, D. W., G. Hübler & P.C. Murphy (1987). Ozone production in the rural troposphere and the implications for regional and global ozone distributions. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 92: D4, 4191–4207.
- Lyons, W. A., & R. B. Husar (1976). SMS/GOES visible images detect a synoptic-scale air pollution episode. *Monthly Weather Review* 104: 12, 1623–1626.
- Martin, R. V. (2008). Satellite remote sensing of surface air quality. *Atmospheric Environment* 42: 34, 7823–7843.
- Murayama Y. (2012). Progress in Geospatial Analysis. 292s. Springer Science & Business Media
- NASA Aura (2020). Ozone Monitoring Instrument (OMI). 3.12.2020. <<https://aura.gsfc.nasa.gov/omi.html>>
- Putrenko, V. V. & N. M. Pashynska (2017). The use of remote sensing data for modeling air quality in the cities. *ISPRS Annals of the Photogrammetry IV-5/W1*.
- Sivakumar, M. V. K., P. S. Roy, K. Harmsen & S. K. Saha (2004; toim.). *Satellite Remote Sensing and GIS Applications in Agricultural Meteorology*. 545 s. World Meteorological Organisation, Geneva.
- Solomon, R., W. Portmann, R. W. Sanders & J. S. Daniel (1999). On the role of nitrogen dioxide in the absorption of solar radiation. *Journal of Geophysical Research* 104, 12047-12058.
- Stavrakou, T., J. F. Müller, K. F. Boersma, I. De Smedt & A. R. J. Van Der (2008). Assessing the distribution and growth rates of NO_x emission sources by inverting a 10-year record of NO₂ satellite columns. *Geophysical Research Letters* 35: 10.
- Sundström, A.-M. (2014). *Remote Sensing of Aerosols: Applications for Air Quality and Climate Studies*. Väitöskirja. 47 s. Fysiikan laitos, Helsingin yliopisto.
- Sundström, A.-M., H. Virta, I. Jalongo & J. Tamminen (2020). Satelliittihavaintojen hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa. Ilmatieteen laitos. *Raportteja* 2020: 1.
- Todd, W.J., A. J. George & N. A. Bryant (1979). Satellite-aided evaluation of population exposure to air pollution. *Environmental Science & Technology* 13, 970–974.
- Torres, O., A. Tanskanen, B. Veihelmann, C. Ahn, R. Braak, P.K. Bhartia, J. P. Veefkind & P. F. Levelt (2007). Aerosols and surface UV products from ozone monitoring instrument observations: an overview. *Journal of Geophysical Research* 112, D24S47.
- Tuomisto, J. (2020). Voiko ilma palaa? Duodecim - Terveyskirjasto. Kustannus Oy Duodecim. <<https://www.terveyskirjasto.fi/asy00403>>
- Turnock, S. T., E. W. Butt, T. B. Richardson, G. W. Mann, C. L. Reddington, P. M. Forster, ... & Spracklen, D. V. (2016). The impact of European legislative and technology measures to reduce air pollutants on air quality, human health and climate. *Environmental Research Letters* 11: 2.
- EPA. United States Environmental Protection Agency (2018). Air Quality and Climate Change Research. 22.1.2019. <<https://www.epa.gov/air-research/air-quality-and-climate-change-research>>
- Wang, C., T. Wang, P. Wang & V. Rakin (2020). Comparison and Validation of TROPOMI and OMI NO₂ Observations over China. *Atmosphere* 11: 6, 636.
- Wei, W. W. (2006). Time series analysis. *The Oxford Handbook of Quantitative Methods in Psychology: Vol. 2*.
- WHO. World Health Organization (2018). Air Pollution. 23.1.2020. <<https://www.who.int/health-topics/air-pollution>>
- Wu, S., Mickley, L. J., Kaplan, J. O., & D.J. Jacob (2012). Impacts of changes in land use and land cover on atmospheric chemistry and air quality over the 21st century. *Atmospheric Chemistry and Physics* 12:3, 1597-1609.
- Zhou, Y., Brunner, D., Hueglin, C., Henne, S., & J. Staehelin (2012). Changes in OMI tropospheric NO₂ columns over Europe from 2004 to 2009 and the influence of meteorological variability. *Atmospheric Environment* 46, 482–495.

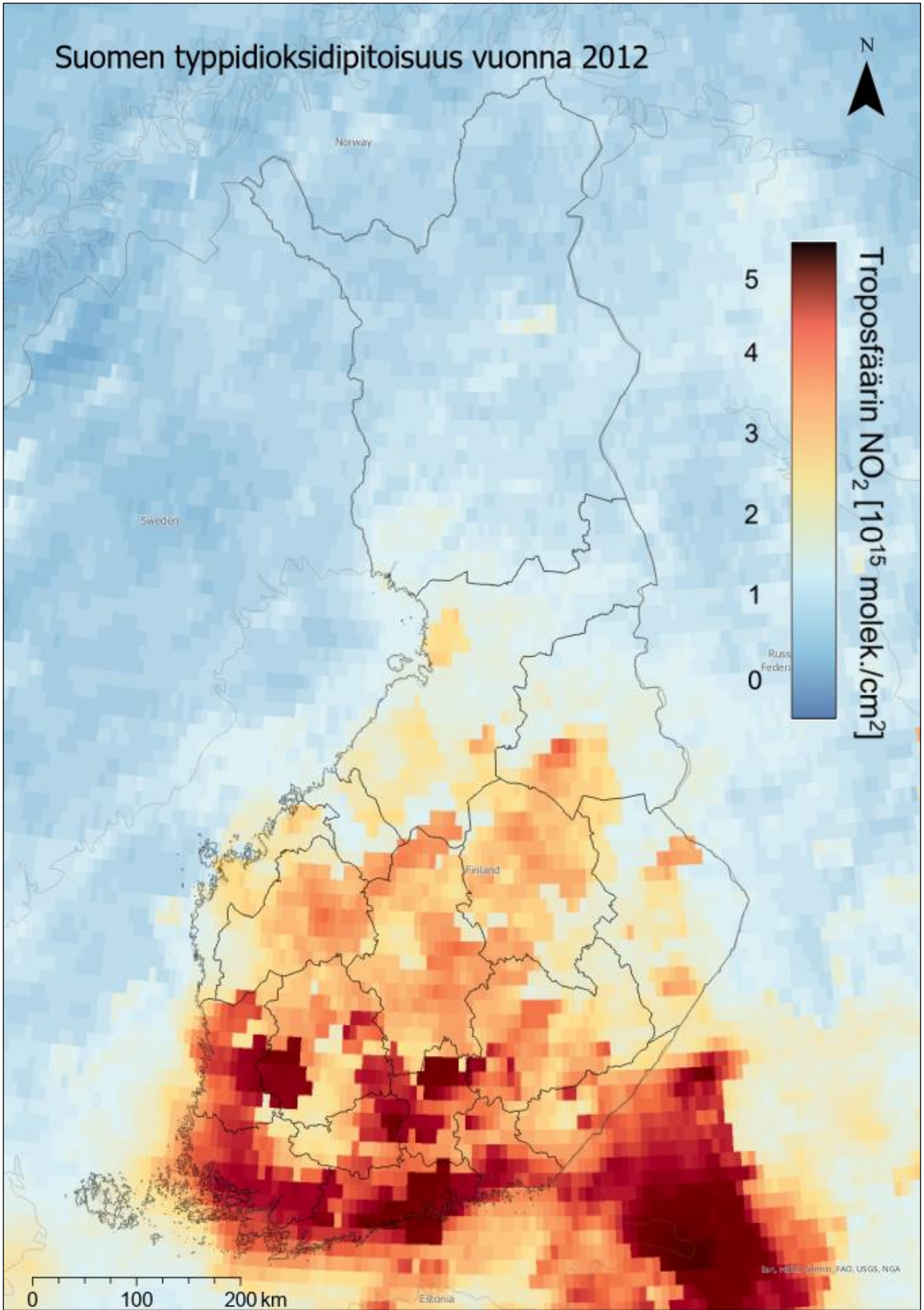


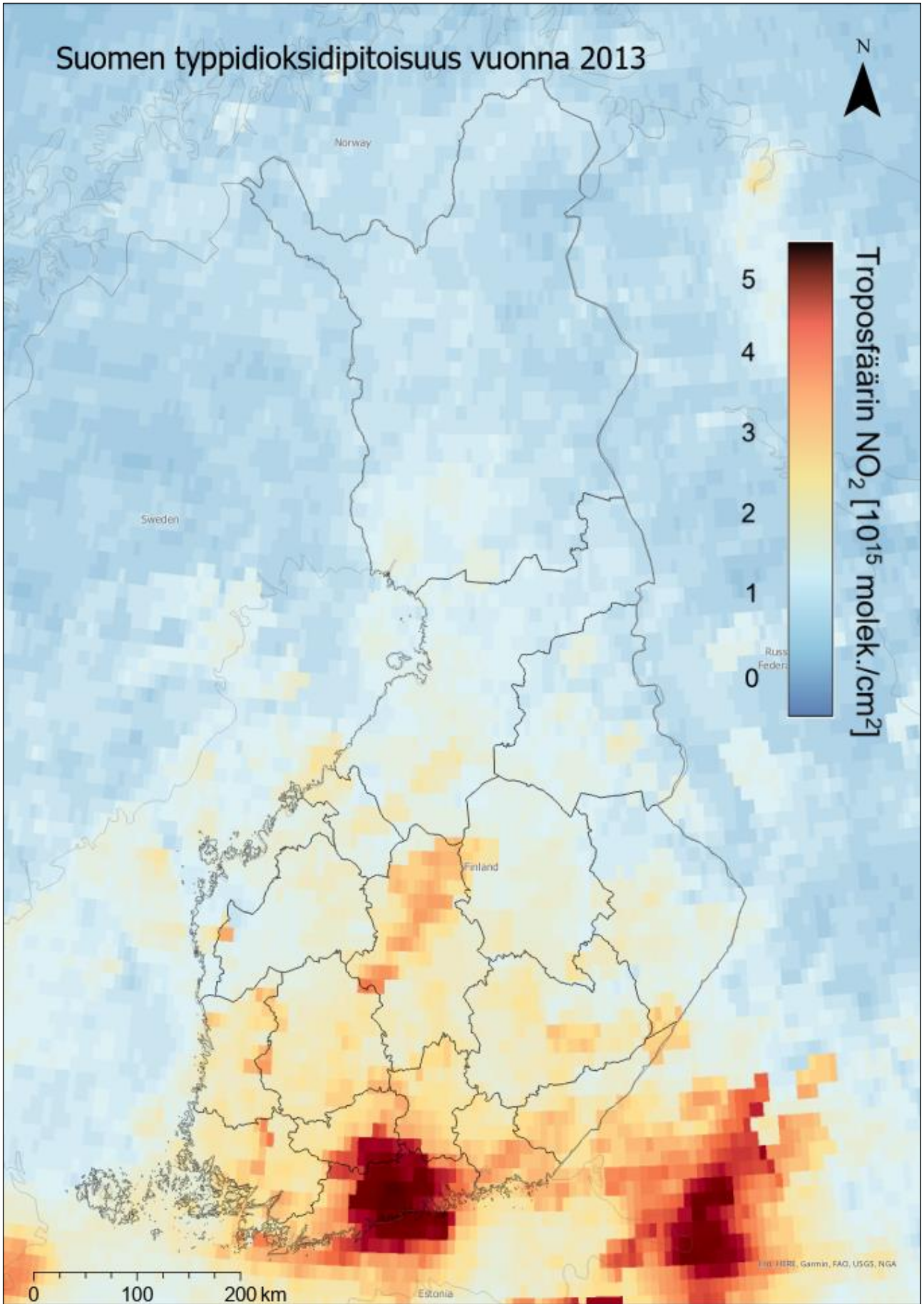


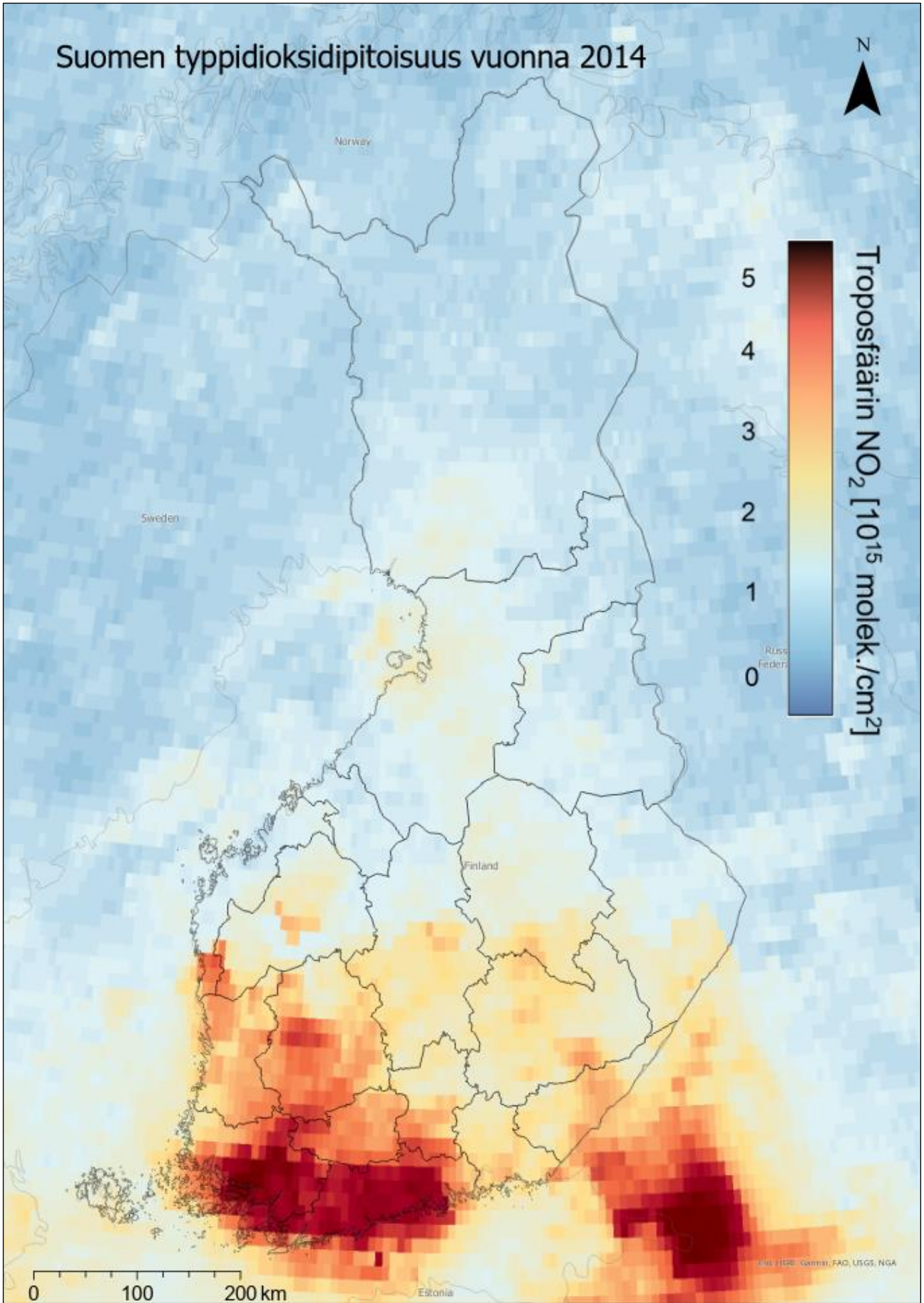


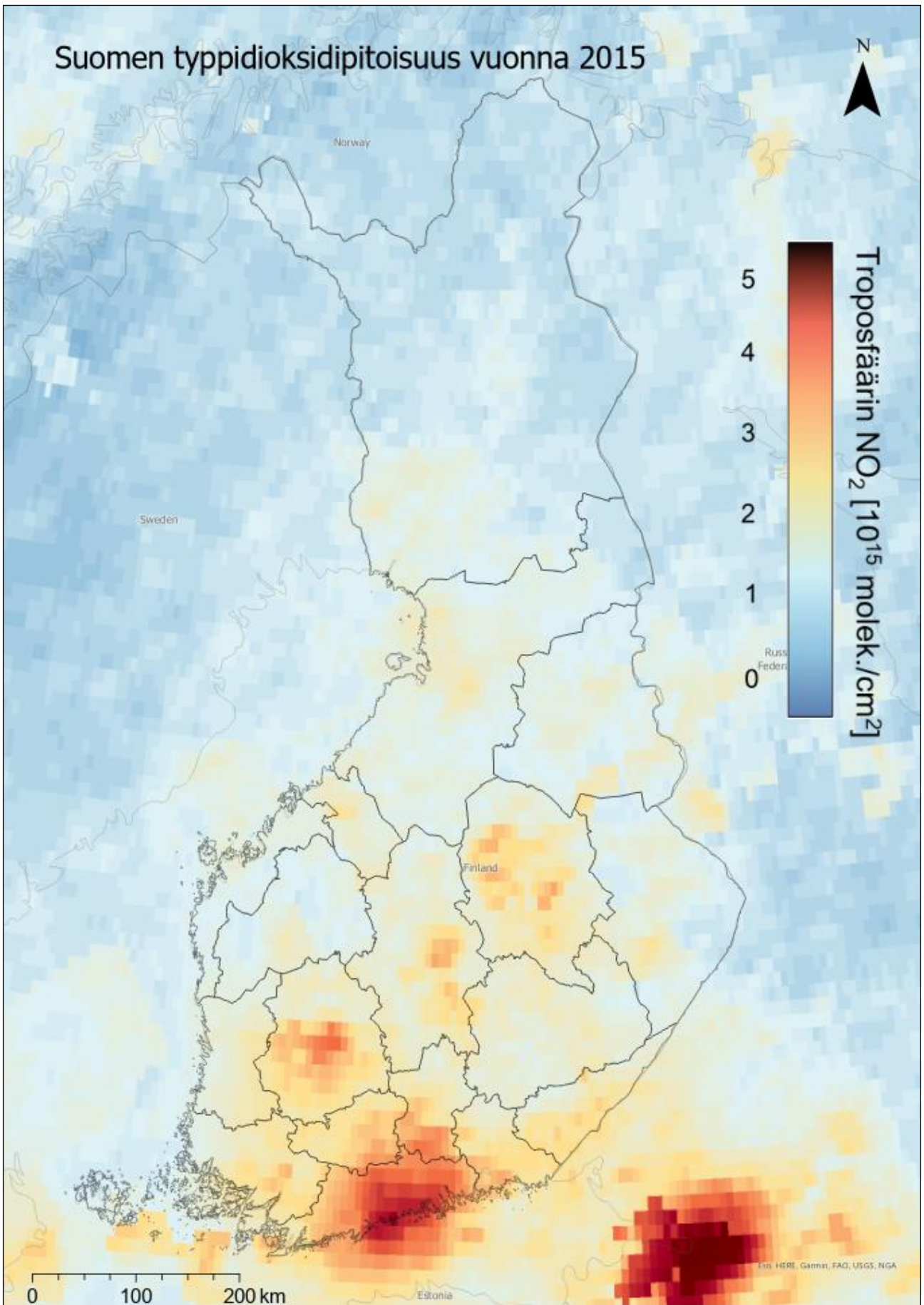


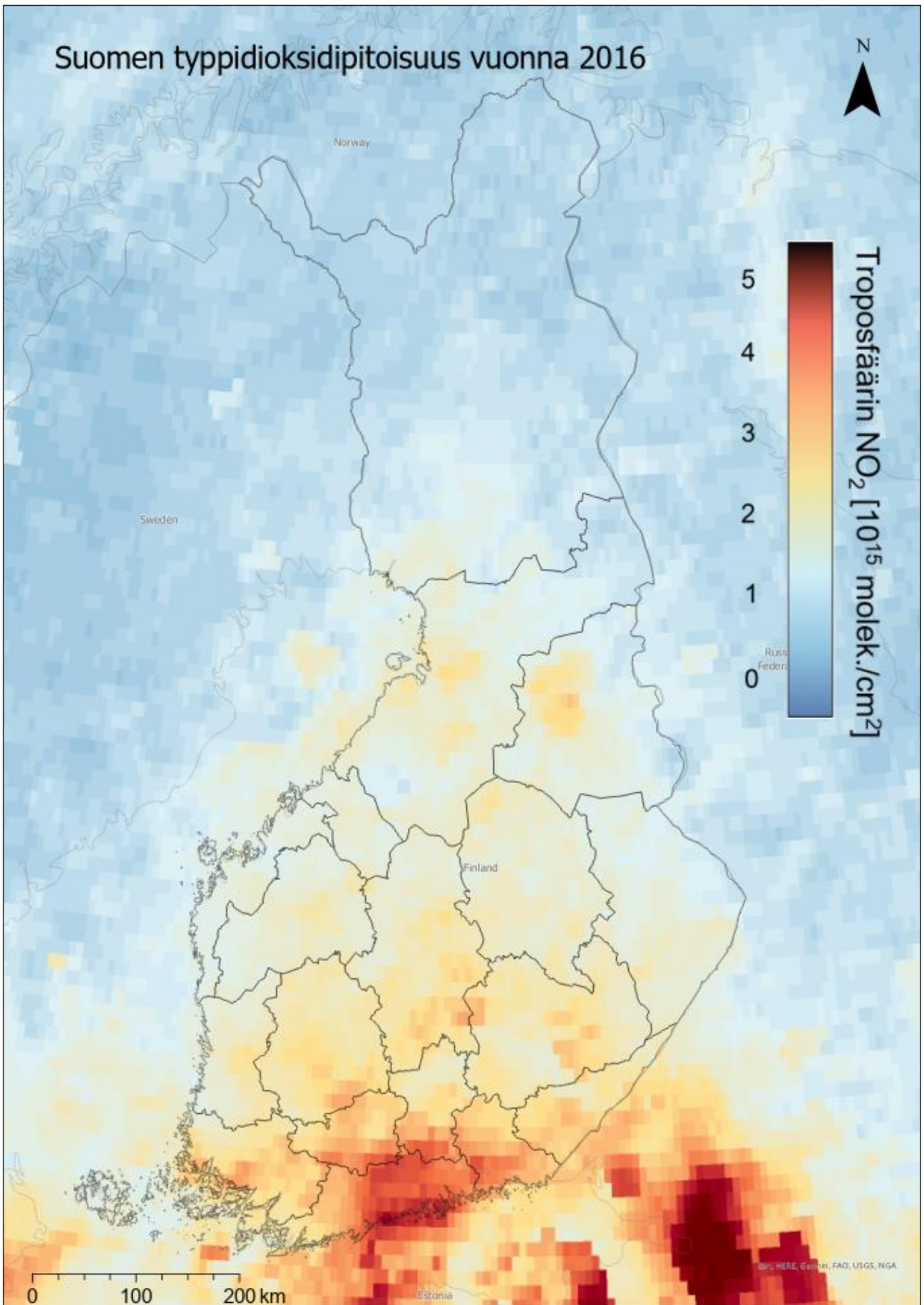


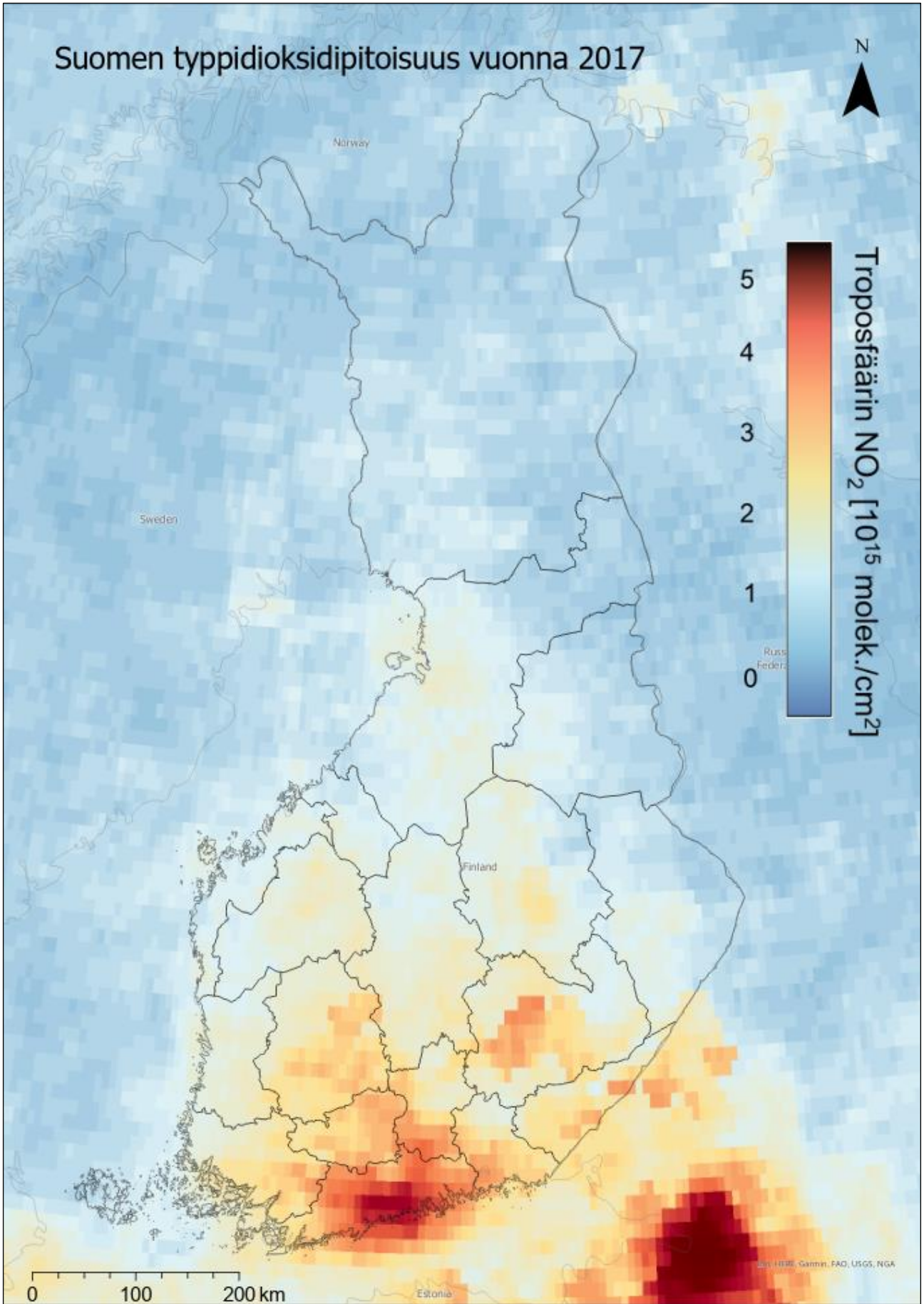




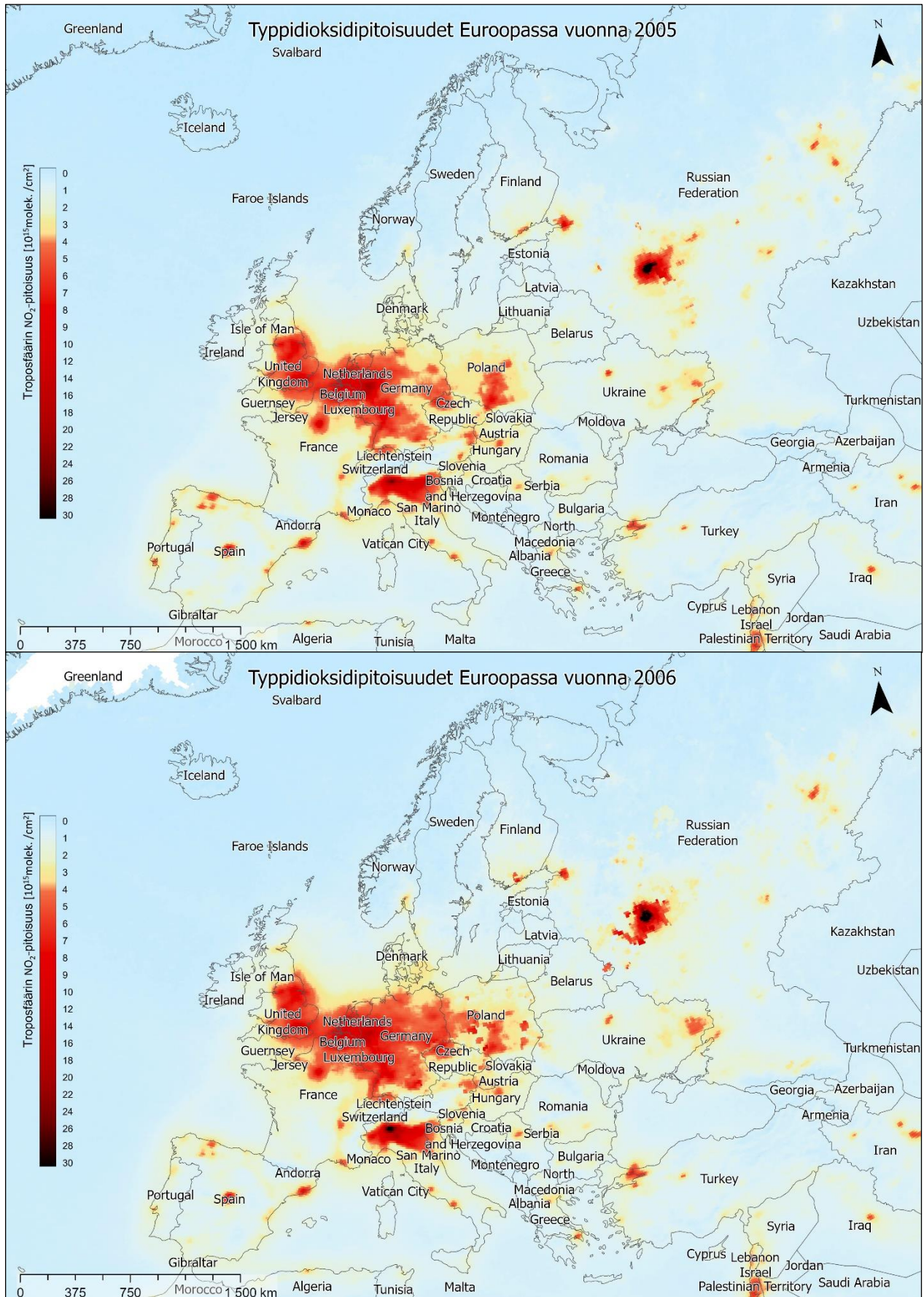


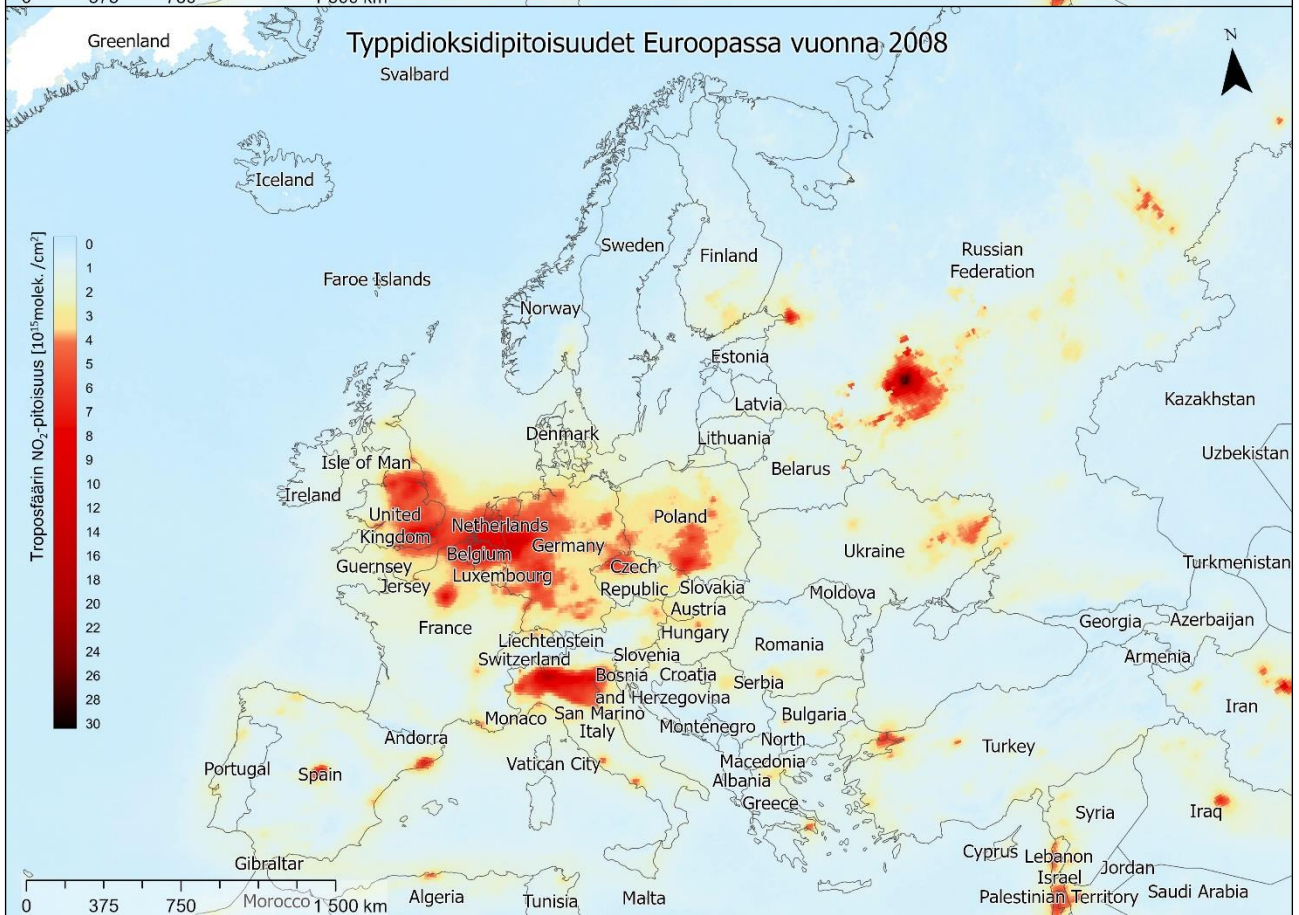
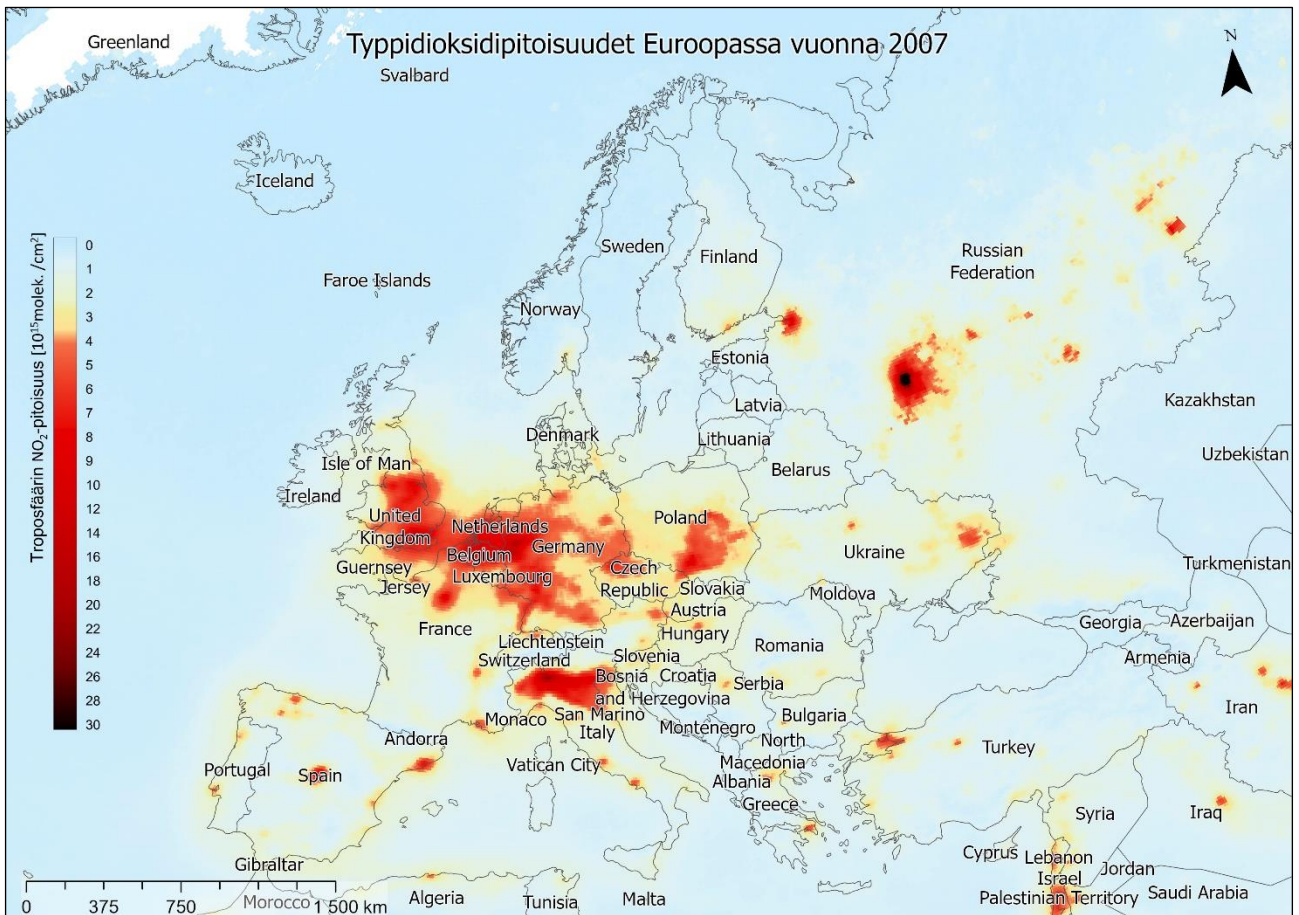


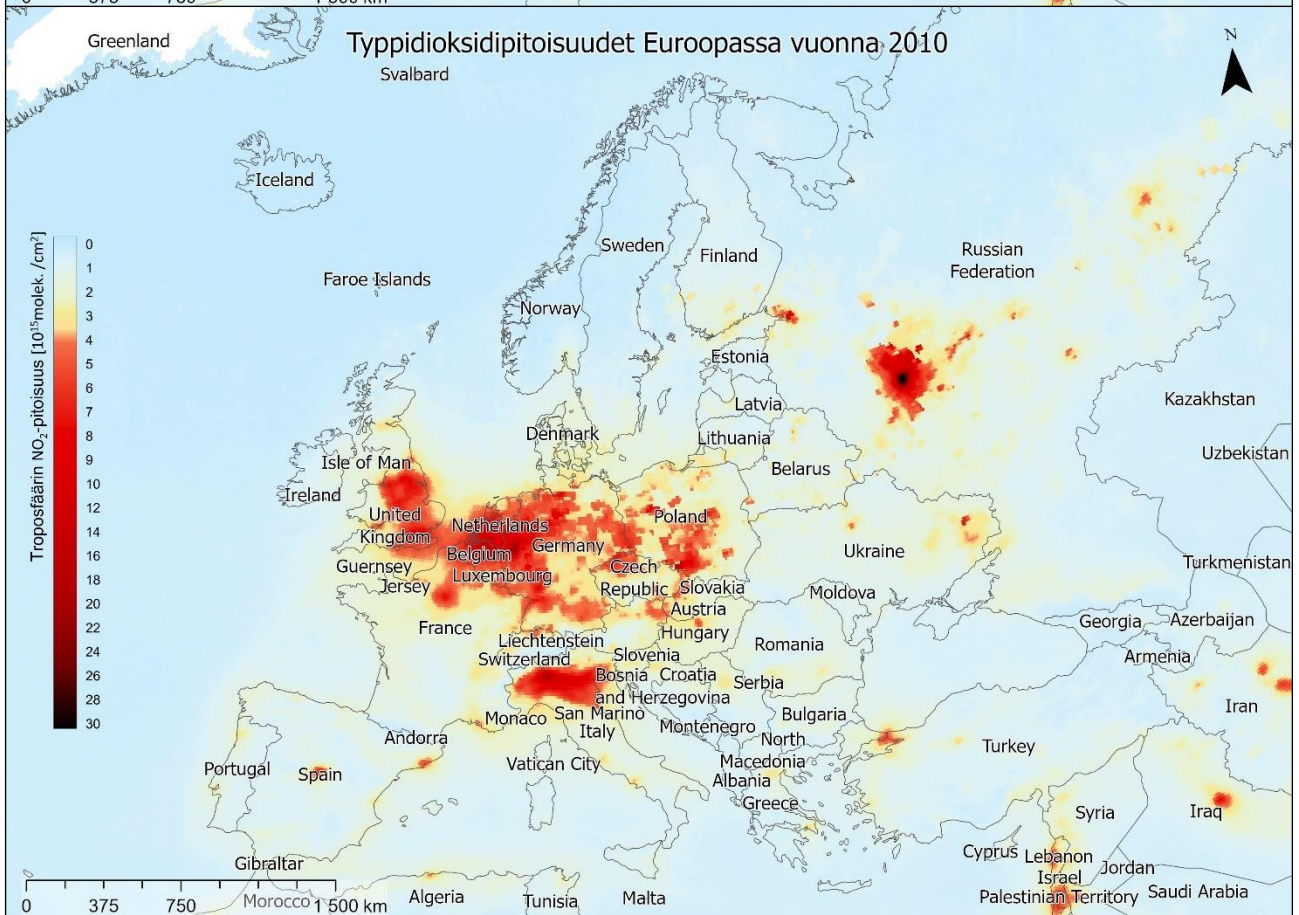
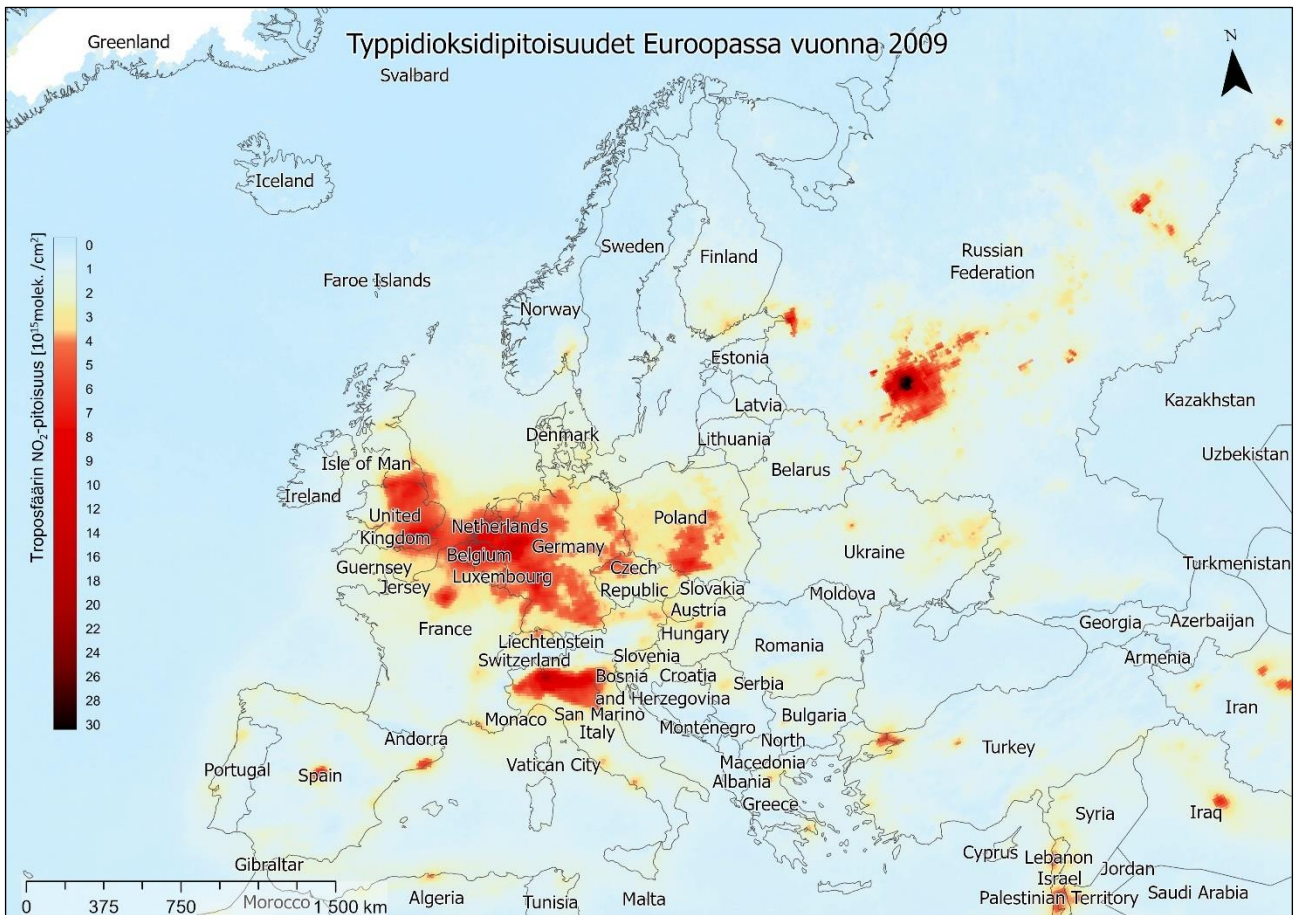


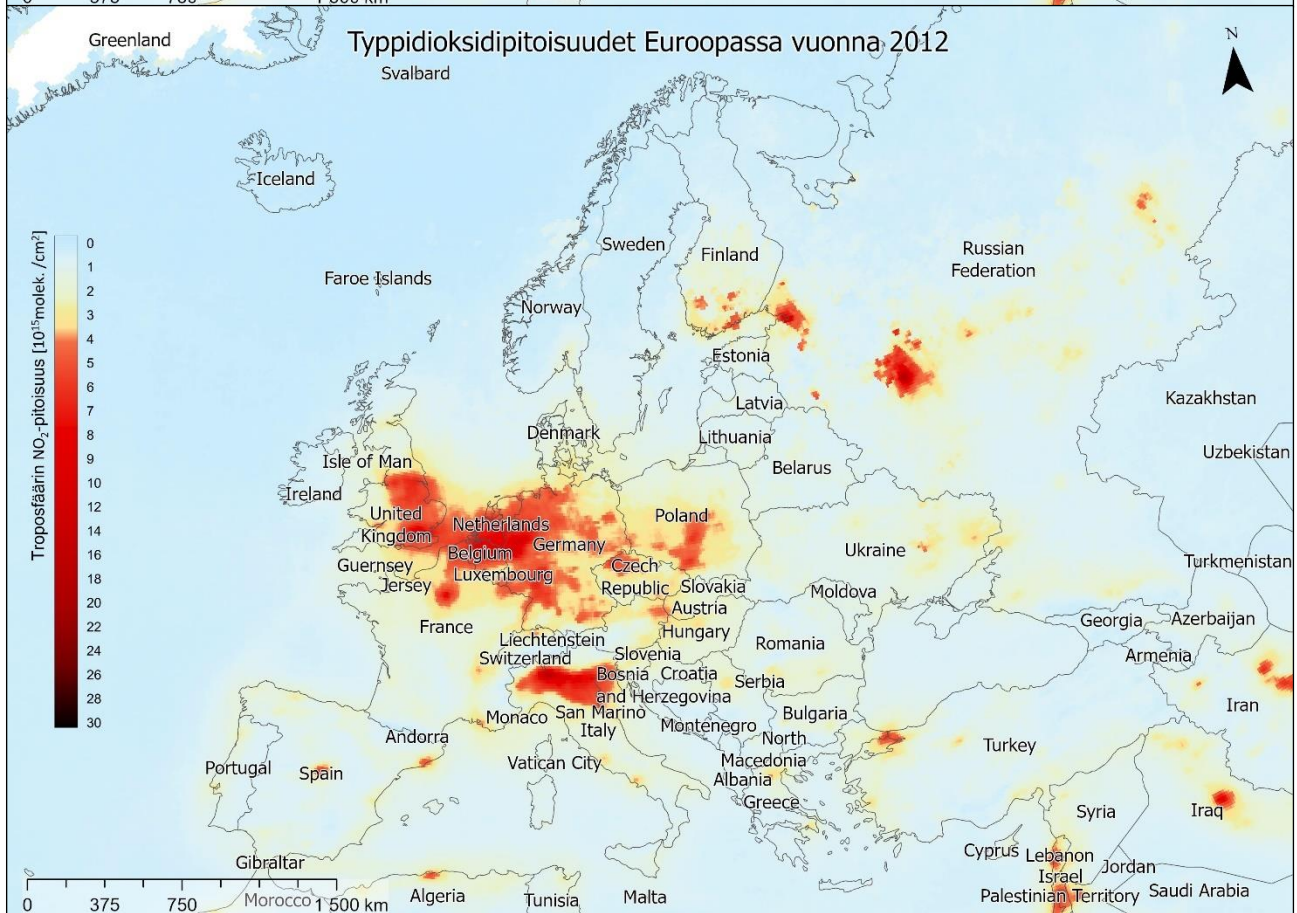
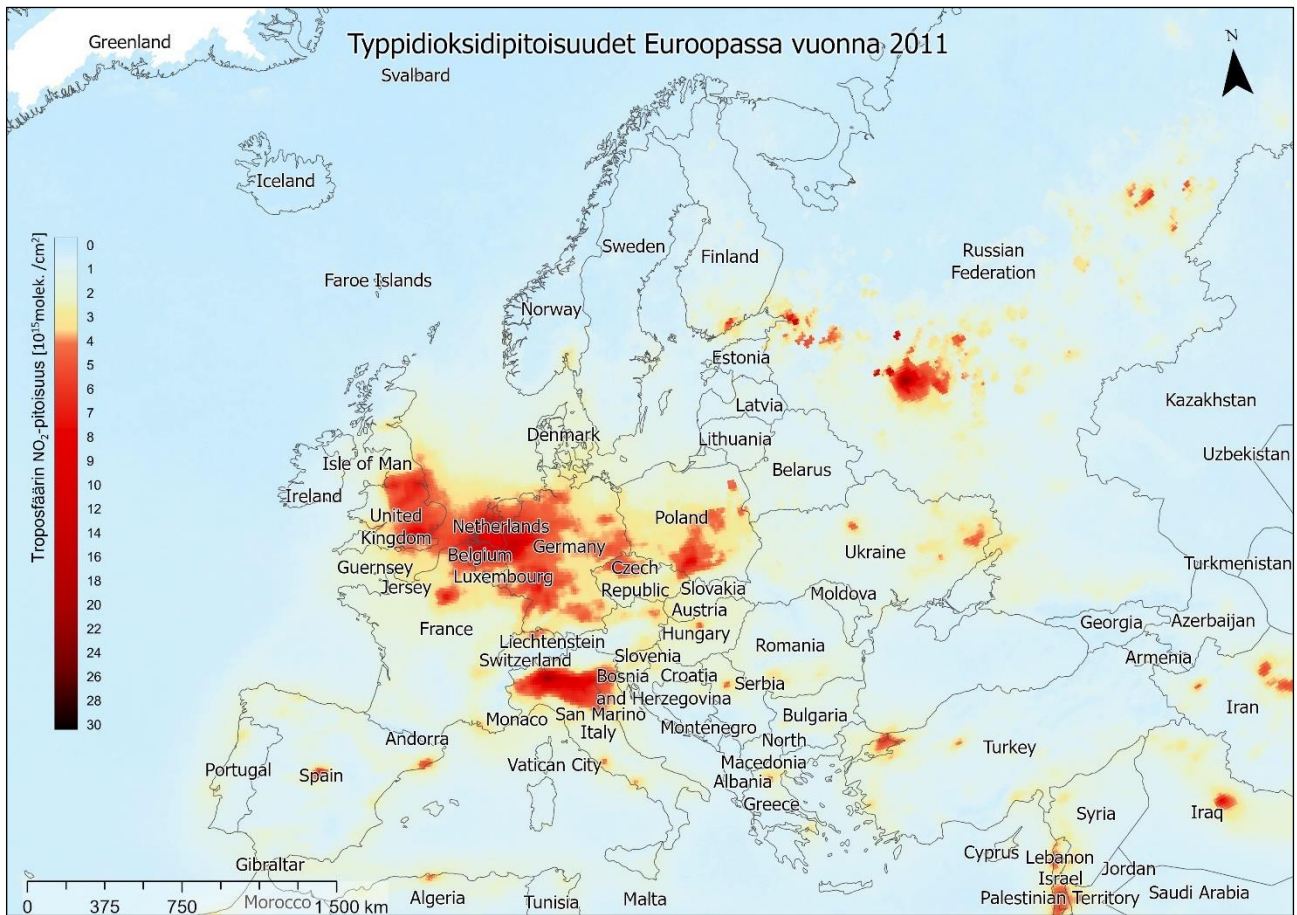


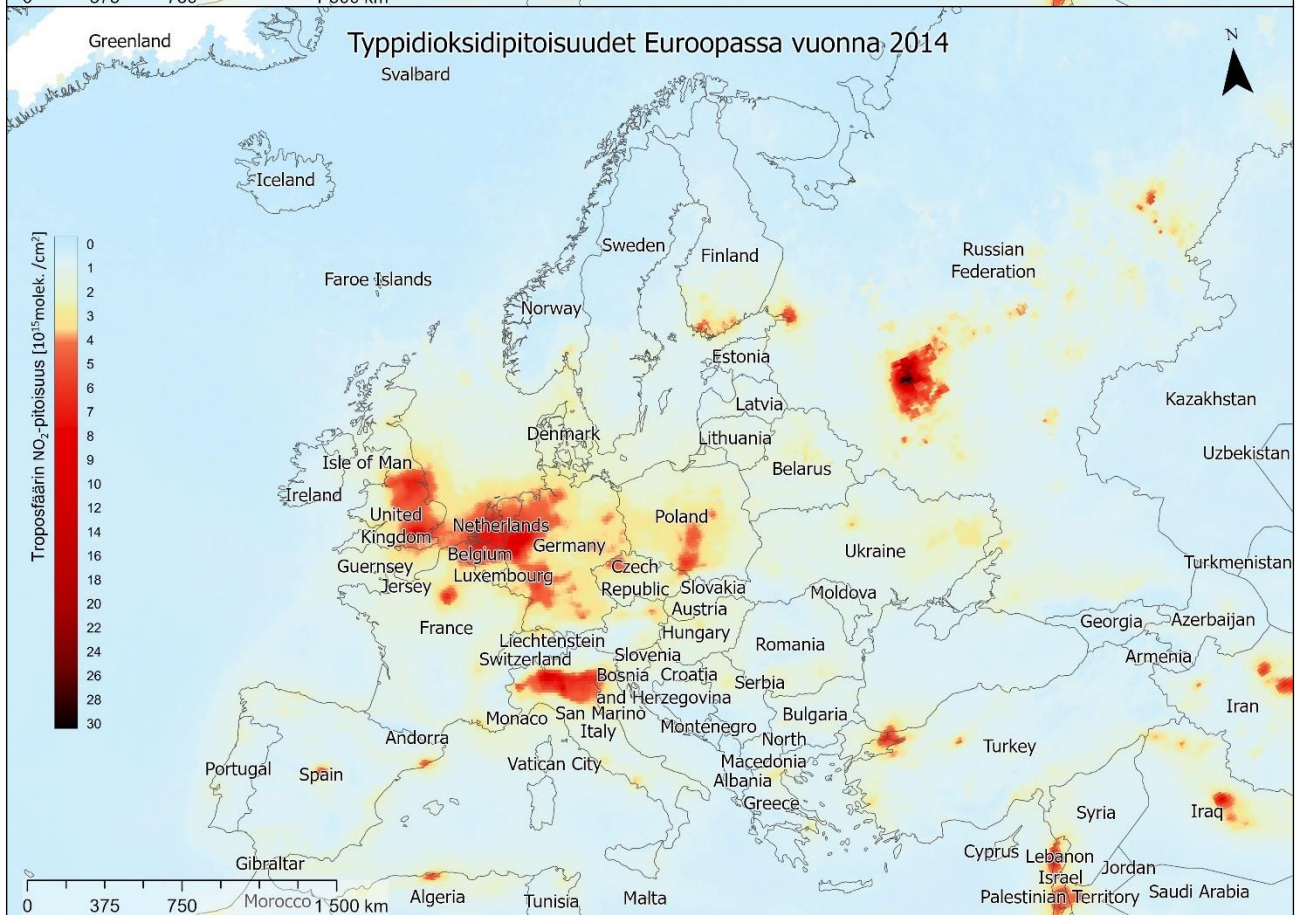
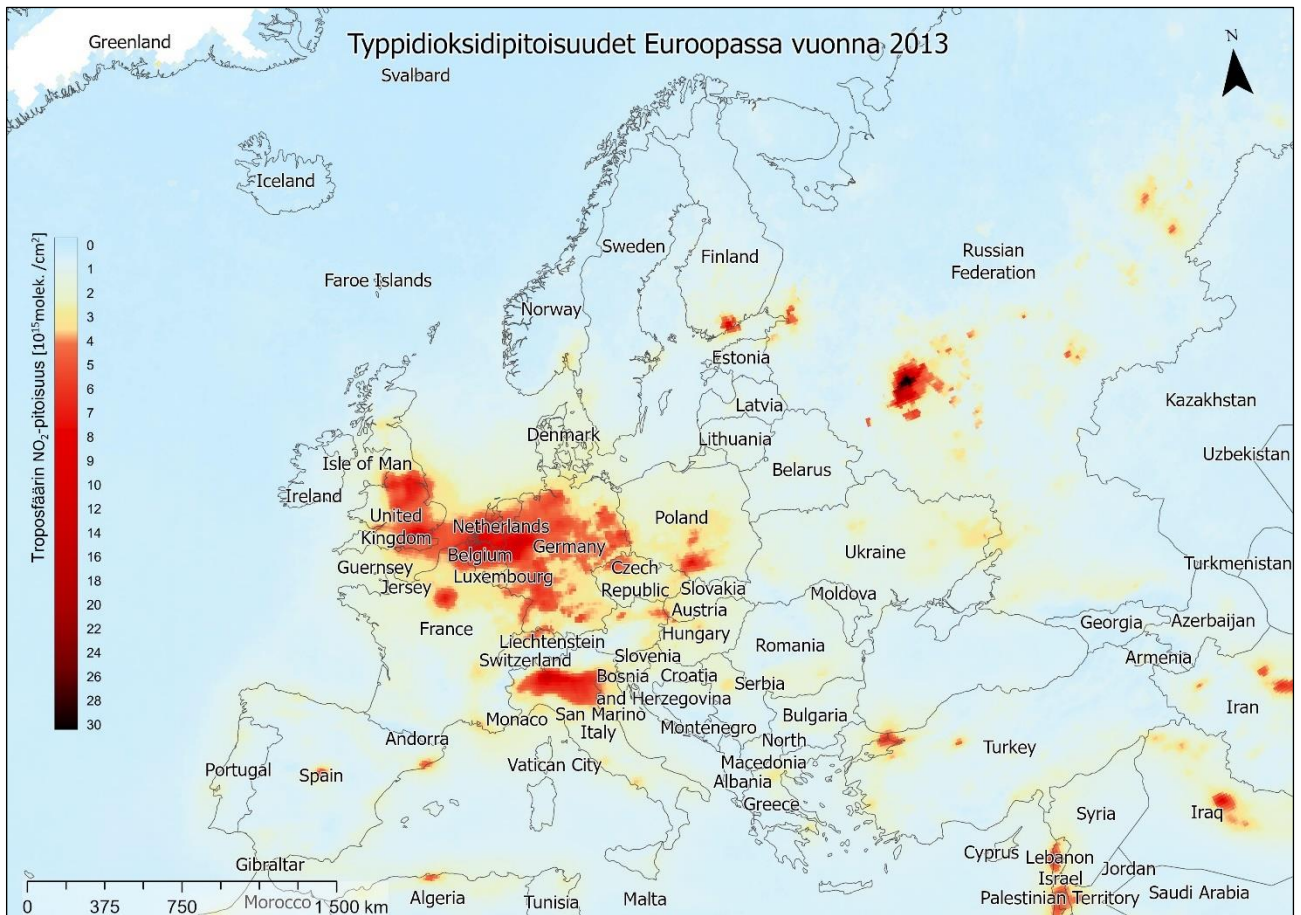
Liite 2. Vuosittaiset karttakuvat Euroopan ilmanlaadusta

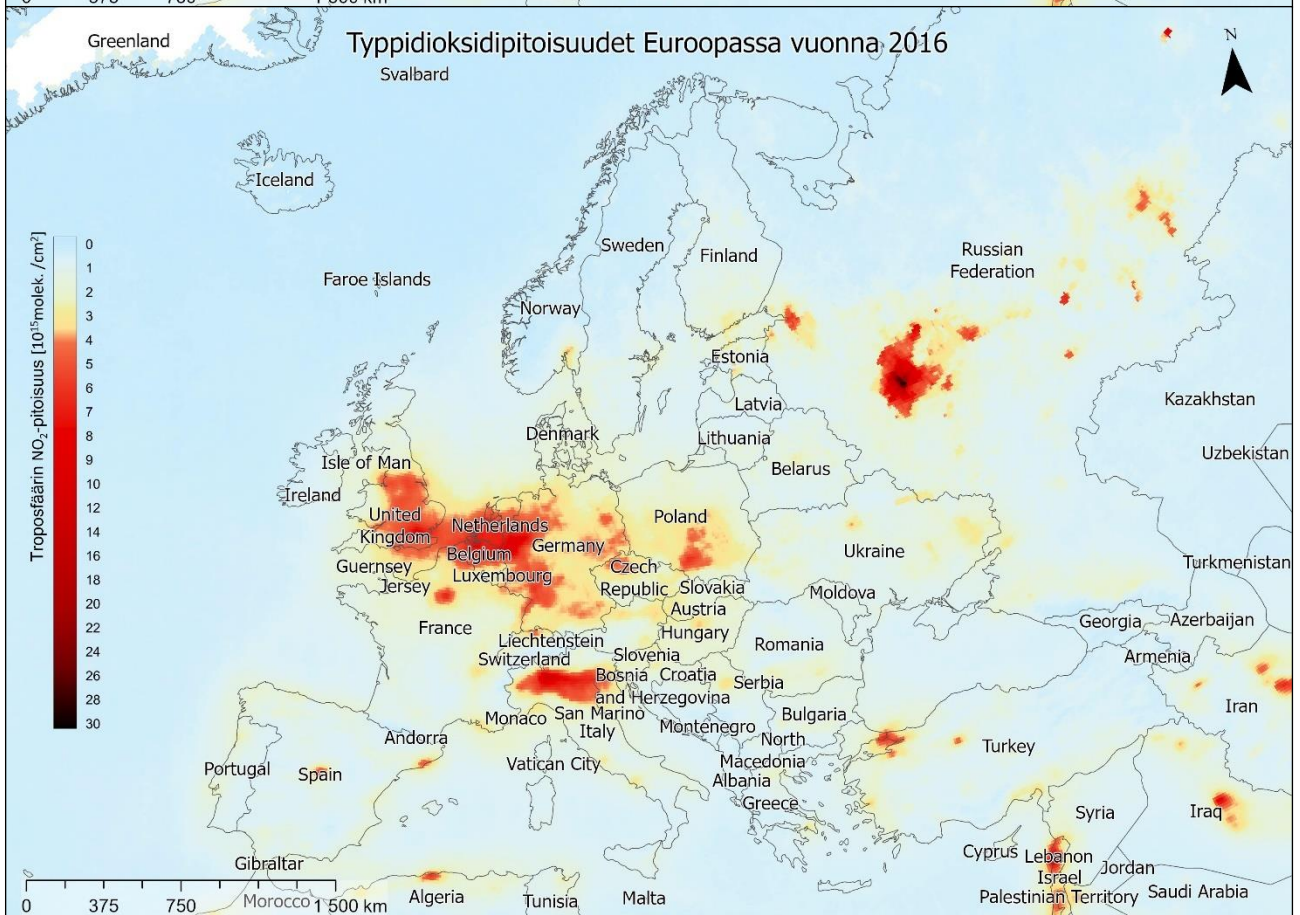
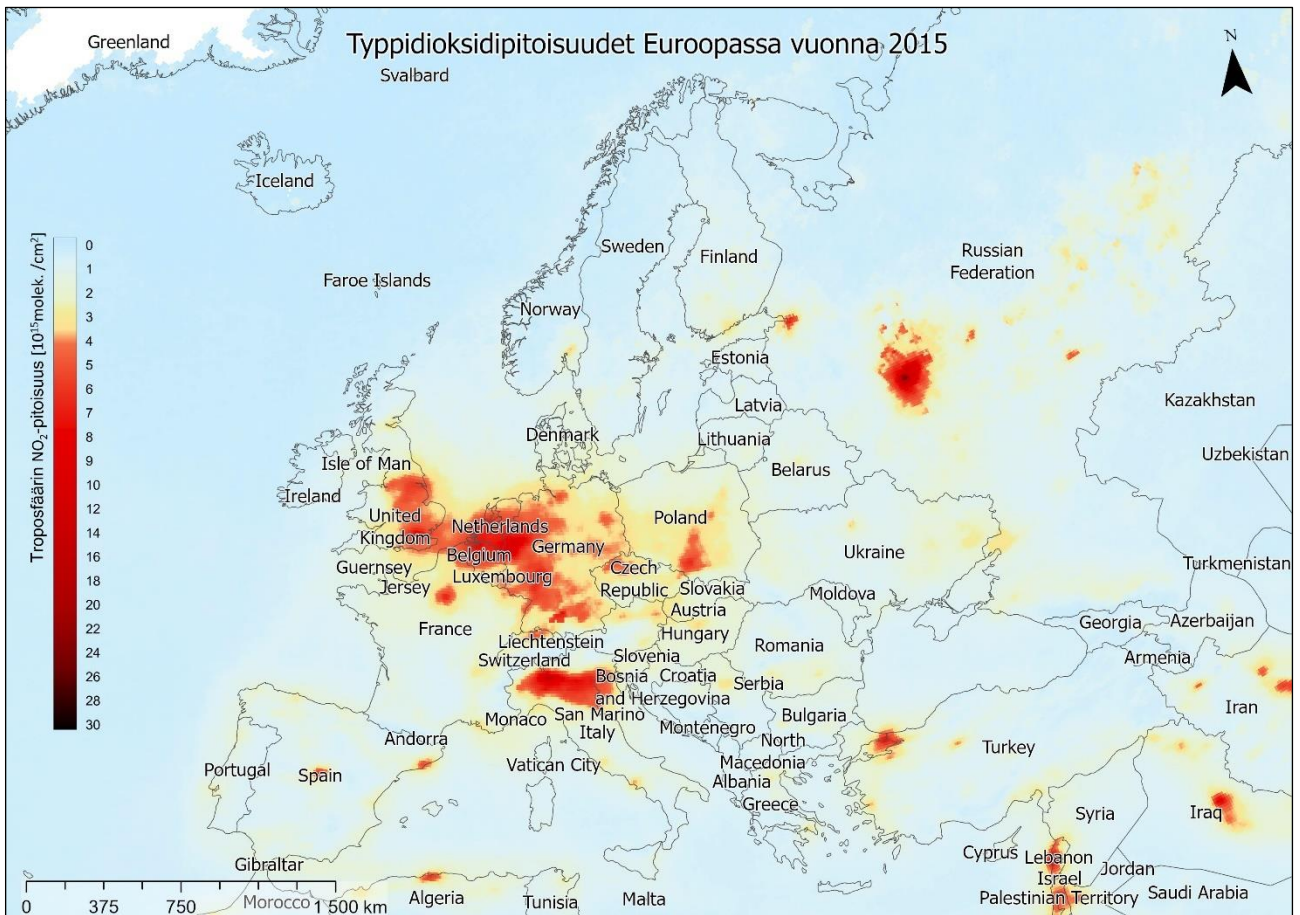


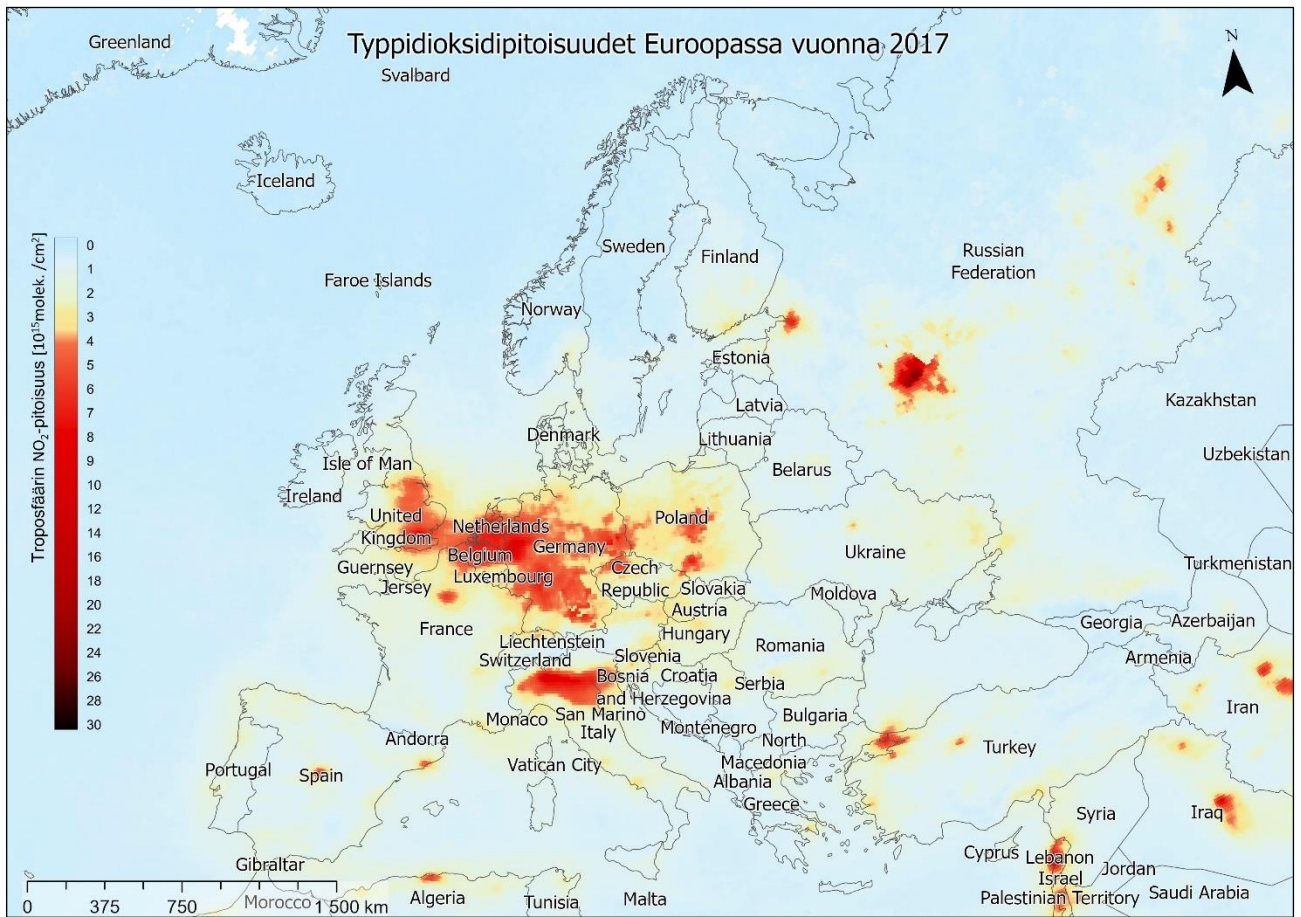




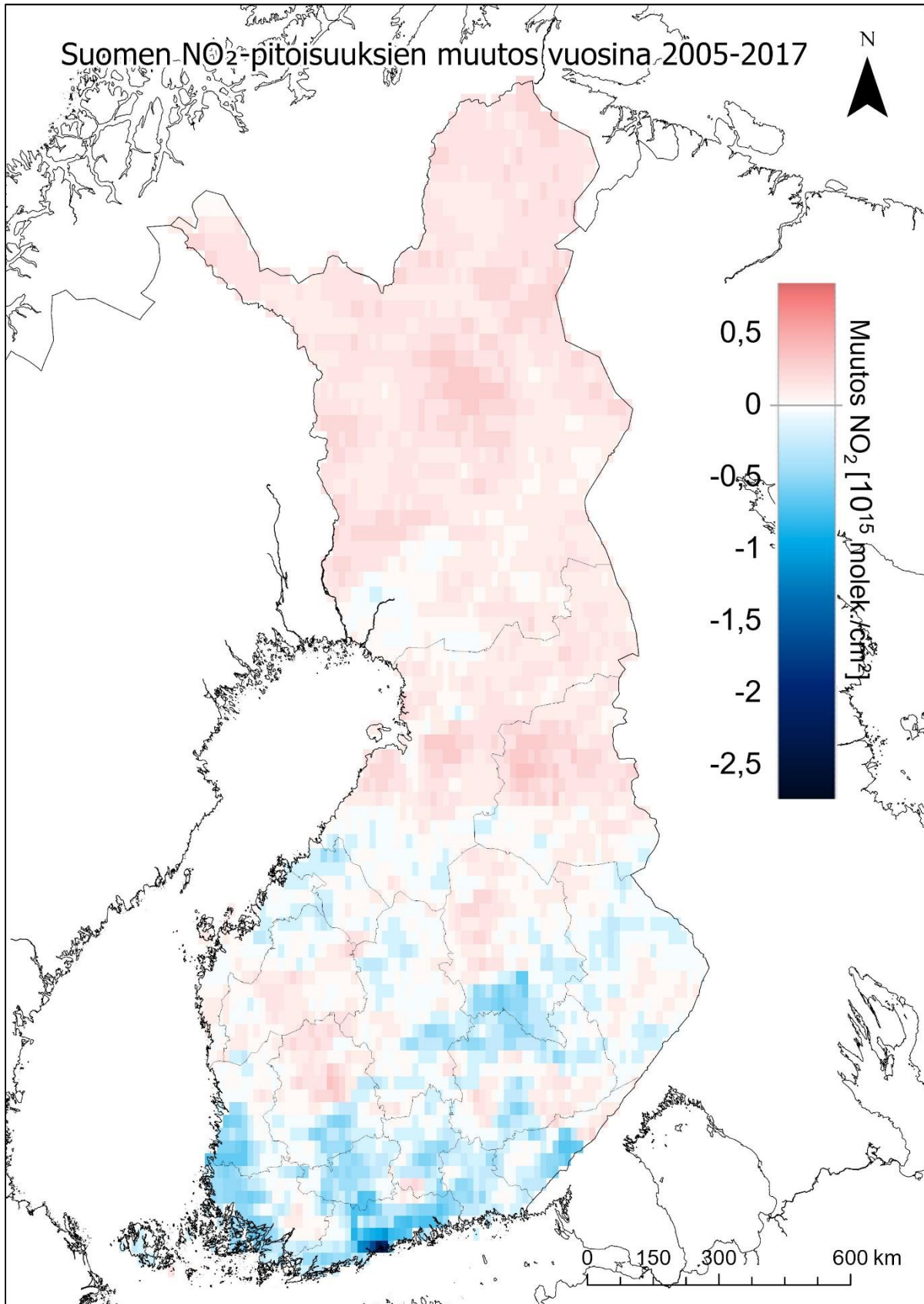




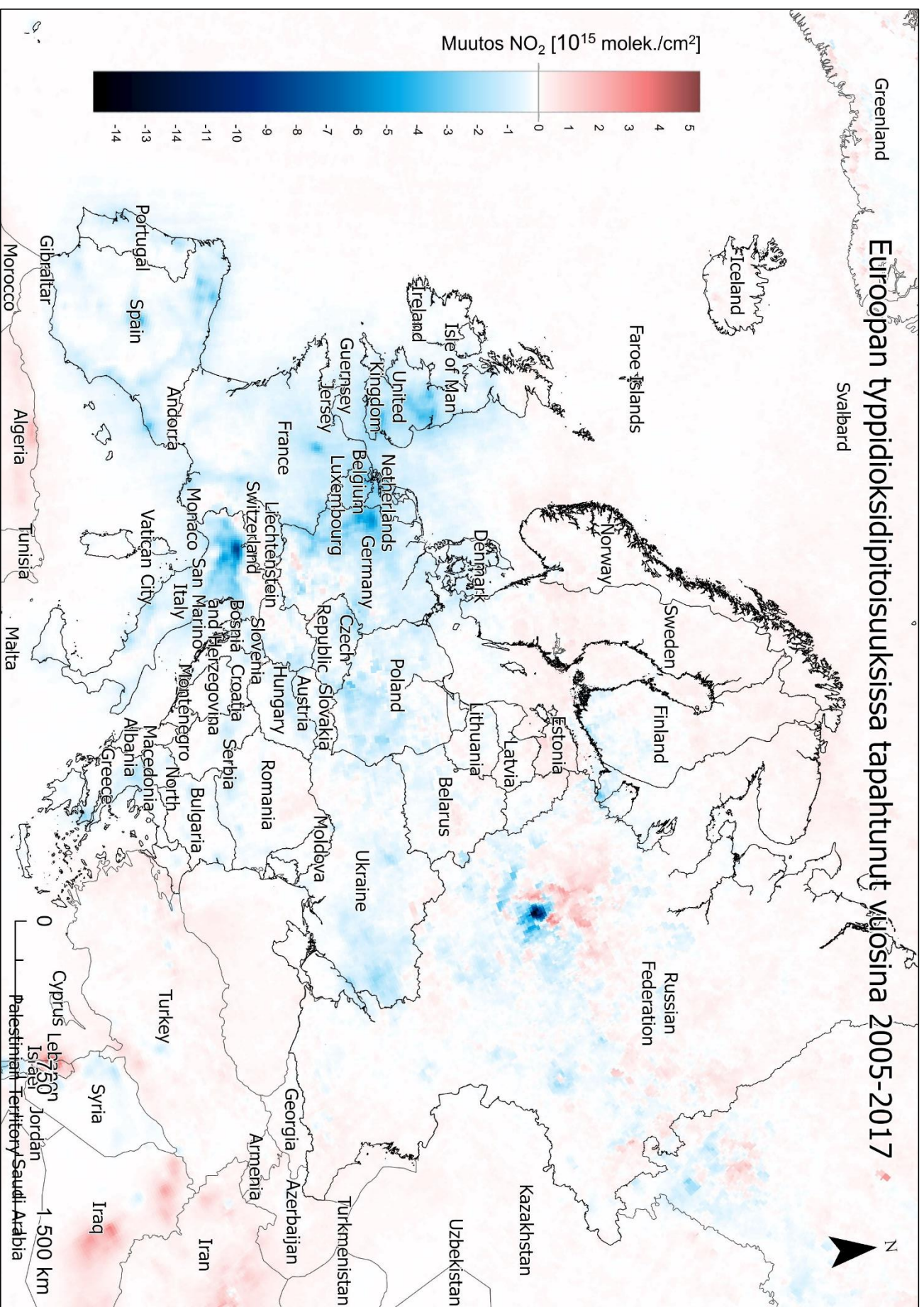




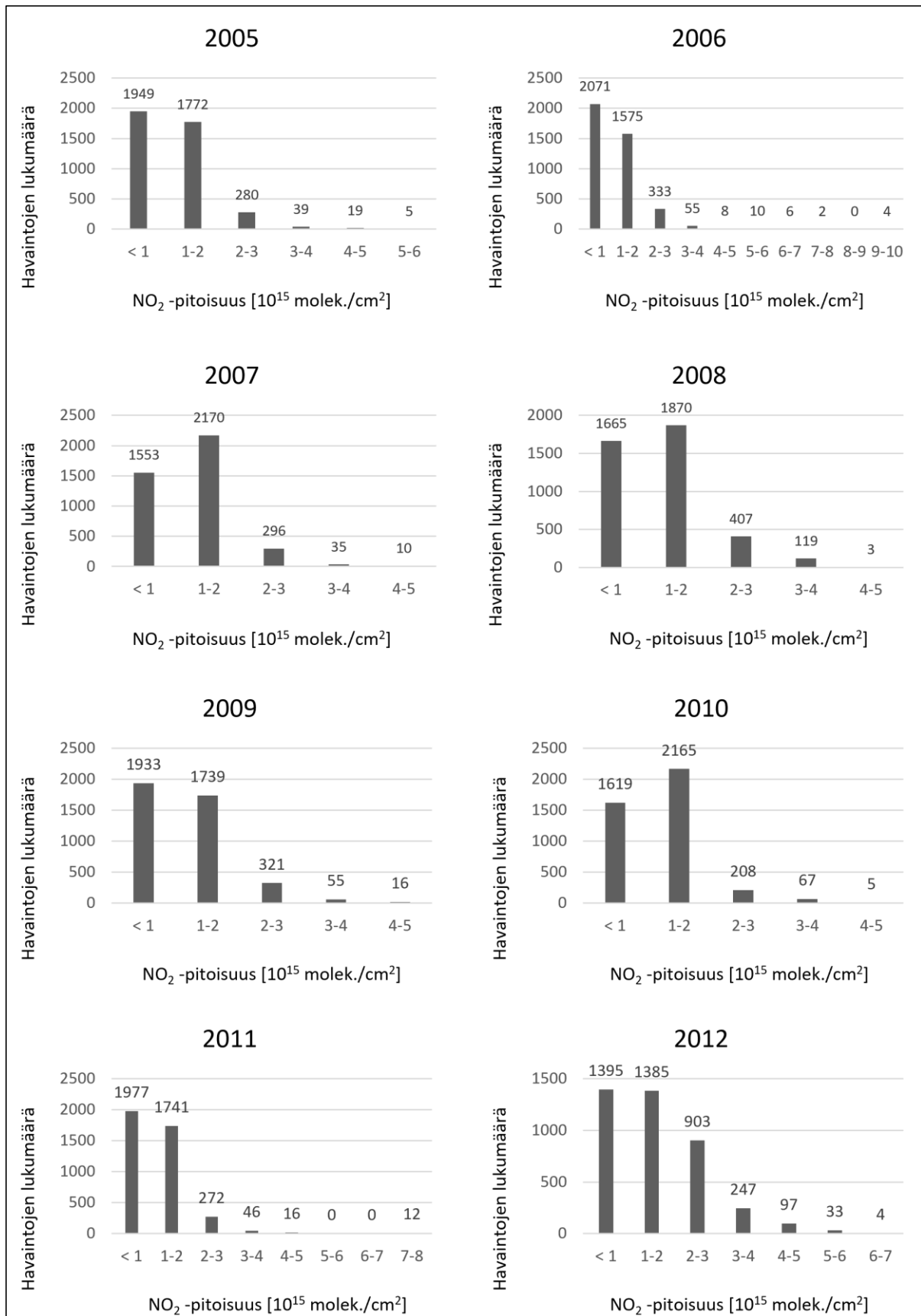
Liite 3. Muutoskartat Suomen ja Euroopan ilmanlaadusta



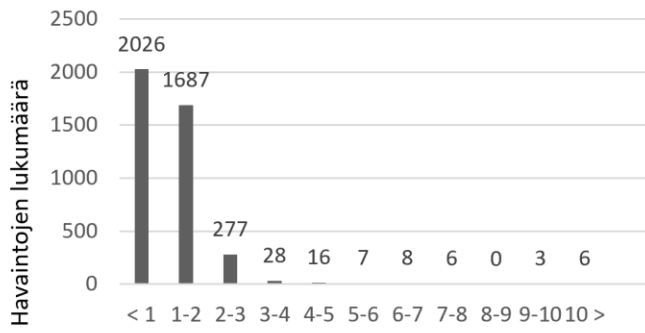
Greenland Svalbard Euroopan typpiidioksidipitoisuuksissa tapahtunut vuosina 2005-2017



Liite 4. Suomen vuosittainen NO₂-havaintojakauma

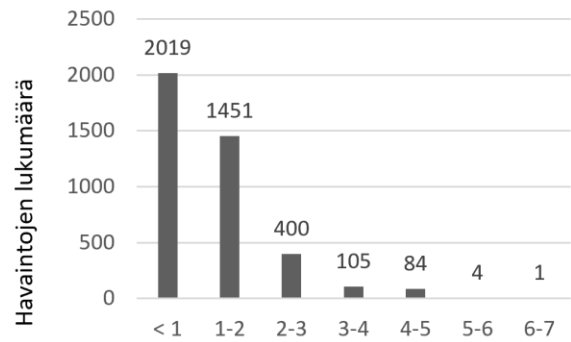


2013



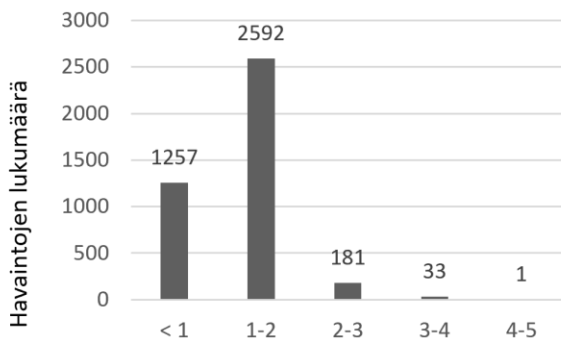
NO₂ -pitoisuus [10¹⁵ molek./cm²]

2014



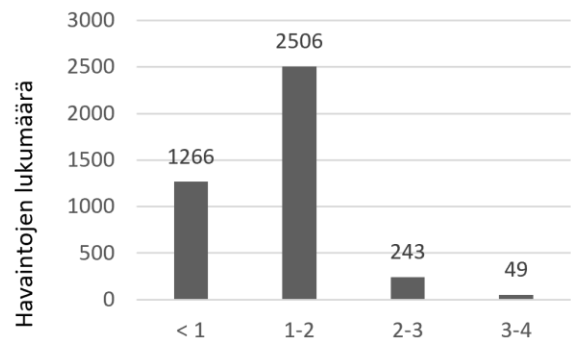
NO₂ -pitoisuus [10¹⁵ molek./cm²]

2015



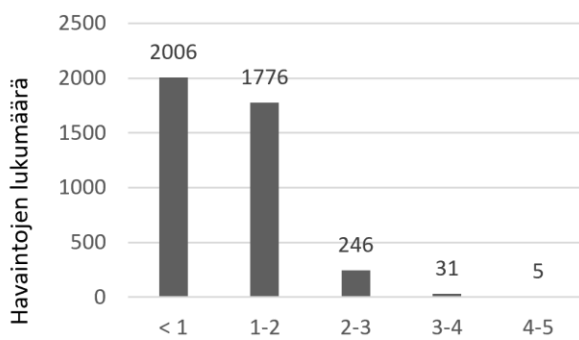
NO₂ -pitoisuus [10¹⁵ molek./cm²]

2016



NO₂ -pitoisuus [10¹⁵ molek./cm²]

2017



NO₂ -pitoisuus [10¹⁵ molek./cm²]