

Turun yliopiston maantieteen ja geologian laitos

Minna Huovinen

**SÄÄOLOSUHTEIDEN JA MUIDEN ALUEELLISTEN
OMINAISPIIRTEIDEN VAIKUTUS ILMANLAATUUN
TURUN SEUDULLA**

Maantieteen pro gradu -tutkielma

Asiasanat: ilmanlaatu, kaupunki-ilmasto, synoptinen klimatologia,
maankäytön regressiomalli, Turku

Turku 2012

TURUN YLIOPISTO
Matemaattis-luonnontieteellinen tiedekunta
Maantieteen ja geologian laitos

HUOVINEN, MINNA: Sääolosuhteiden ja muiden alueellisten ominaispiirteiden vaikutus
ilmanlaatuun Turun seudulla

Pro gradu -tutkielma, 92 s., 7 liites.

40 op

Maantiede

Kesäkuu 2012

Kaupunkialueilla on yleensä heikompi ilmanlaatu kuin ympäröivillä maaseutumaisilla alueilla teollisuuden, energiantuotannon sekä liikenteen takia. Huono ilmanlaatu ei kuitenkaan johdu pelkästään saastelähteistä, vaan myös sääolosuhteista ja muista ympäristökiteistä. Yli puolet maailman ihmisistä asuu nykyään kaupungeissa. Muun muassa ilmansaasteiden terveysvaikutukset tekevät ilmanlaadun parantamisesta ja siihen liittyvästä alan tutkimuksesta merkityksellistä ja ajankohtaista.

Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää Turun seudun ilmanlaadun ajallista ja alueellista luonnetta vuosina 2001–2010 sekä tutkimusalueen ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä sään ja muiden alueellisten ominaispiirteiden näkökulmasta. Menetelminä ovat muun muassa suursäätilanteiden luokittelu ja maankäytön regressiomalli ("Land-use Regression Model, LUR").

Tulokset havaintoasemien välisistä eroista ilmanlaadussa osoittavat, että tutkimusalueen huonoin ilmanlaatu löytyy Turun Kauppatorilta. Ilmanlaatu vaihtelee kuitenkin vuosittain tutkimusjaksolla. Ajallinen vaihtelu vuosien ja vuodenaikojen välillä selittyy pääasiassa sään vaihtelulla. Sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten korkeisiin ilman pitoisuuksiin vaikuttaa vähäsateinen ja heikkotuulinen sää. Korkeiden typpidioksidipitoisuuksien aikana tuulee pääasiassa lounaasta, kun taas hengitettävien hiukkasten korkeiden pitoisuuksien aikana tuulee pääasiassa idästä. Tulosten perusteella on tunnistettavissa kaksi erilaista suursäätilannetta, jotka vallitsevat typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten ilman pitoisuuksien ylittäessä numeeriset ohje- ja raja-arvot.

Maankäyttömuotojen ja ilman typpidioksidi- sekä hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien välisten korrelaatiokertoimien perusteella voidaan päätellä, että Turun seudun ilmanlaatua heikentää erityisesti ihmisen aiheuttama toiminta ja liikenne. Vapaa-ajan alueet ja virkistysalueet sekä maa- ja metsätalouden alueet puolestaan parantavat ilmanlaatua eniten. Maankäytön regressiomallin tavoite oli ennustaa käytettävissä olevien aineistojen avulla ilmanlaatua alueille, joilla ei ole ilmanlaadun havaintoasemaa. Pienen otoskoon takia regressiomallin tuloksia ei kuitenkaan voida pitää luotettavina.

Asiasanat: ilmanlaatu, kaupunki-ilmast, synoptinen klimatologia, maankäytön regressiomalli, Turku

UNIVERSITY OF TURKU
Faculty of Mathematics and Natural Sciences
Department of Geography and Geology

HUOVINEN, MINNA: The impact of weather and other spatial characteristics on air quality
in the region of Turku

Master's thesis: 92 p., 7 appendixp.
40 ECTS
Geography
June 2012

Air quality is often worse in urban environments than in rural areas due to industry, power production and traffic. Poor air quality situations are formed not only because of the pollution sources. Also weather and other environmental factors have a substantial impact on air quality. Today, over half of the world's population lives in cities. Due to the negative impact of pollution on e.g. health, air quality control and research are important and timely.

The objective of this thesis is to study the spatiotemporal aspects of air quality in the region of Turku in the years 2001–2010 and the factors affecting poor air quality situations during this time using synoptic weather patterns and more stable environmental factors, namely land-use and topography. The methods include for instance classification of the synoptic weather patterns and land-use regression (LUR) model.

The results indicate that air quality has been variable during the study period without any trend. Turku market square has the worst air quality of the monitoring stations. Annual and seasonal fluctuations of the air quality can be explained by changes in the weather. Nitrogen dioxide and particulate matter concentrations are high during dry and calm weather. Southwesterly winds are predominant during hours with high concentrations of nitrogen dioxide while easterly winds are predominant during days with high concentrations of particulate matter. The results indicate that there are at least two different synoptic weather patterns coinciding with high concentrations of nitrogen dioxide and particulate matter.

Based on the correlation coefficients between topography, land-use and air quality, land-use forms reflecting intensive human activities and traffic typically coincide with high concentrations of nitrogen dioxide and particulate matter (i.e. poor air quality). On the contrary, correlation coefficients indicate that land-use forms such as recreational areas, agriculture and forestry improves air quality. The results of the land-use regression model that was used for assessing air quality in the region of Turku cannot be considered reliable because of the small amount of sampling sites.

Keywords: air quality, urban climate, synoptic climatology, land-use regression (LUR) model, Turku

Sisällysluettelo

1	JOHDANTO	1
2	KAUPUNGIN ILMANLAATU	4
2.1	Ilmakehän rajakerros	4
2.2	Ilmanlaadun erityispiirteet kaupungissa	5
2.2.1	<i>Esimerkkejä kaupungin yleisistä ilmansaasteista</i>	5
2.2.2	<i>Ilmanlaatuun vaikuttaminen</i>	8
2.3	Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät.....	10
2.3.1	<i>Sään vaikutus ilmanlaatuun</i>	14
2.3.2	<i>Muiden alueellisten ominaispiirteiden vaikutus ilmanlaatuun</i>	18
3	TUTKIMUSALUE	20
3.1	Alueelliset ominaispiirteet	20
3.2	Ilmanlaatu.....	22
4	AINEISTOT JA MENETELMÄT	24
4.1	Ilmanlaatuaineisto	24
4.2	TURCLIM-lämpötila-aineisto	25
4.3	Muut aineistot.....	25
4.3.1	<i>Säätilanteiden kuvaamiseen käytetyt aineistot</i>	25
4.3.2	<i>Alueellisten ominaispiirteiden kuvaamiseen käytetyt aineistot</i>	26
4.4	Ilmanlaadun ominaispiirteiden selvittäminen.....	27
4.5	Suursäätilanteiden kartoittaminen.....	28
4.6	Ilmanlaadun alueellisuuteen vaikuttavien ympäristötekijöiden tarkastelu.....	31
4.7	Maankäytön regressiomallin käytettävyyden arviointi	35
5	TULOKSET	36
5.1	Ilmanlaadun alueelliset ja ajalliset erityispiirteet	36
5.2	Säätila ja ilmanlaatu	41
5.2.1	<i>Yksittäiset sääparametrit huonon ilmanlaadun aikana</i>	41
5.2.2	<i>Sääparametrien ja ilmanlaadun välinen korrelaatio</i>	46
5.2.3	<i>Suursäätilanteet huonon ilmanlaadun aikana</i>	47
5.3	Muut alueelliset ominaispiirteet suhteessa ilmanlaatuun	58
5.4	Maankäyttöregressiomallinnuksen tulokset	62
6	TULOSTEN TARKASTELU	68
6.1	Ilmanlaadun ja suursäätilanteiden sekä alueellisten ominaispiirteiden yhteys	68
6.1.1	<i>Huonon ilmanlaadun tilanteet ajallisesti ja alueellisesti tarkasteltuna</i>	68
6.1.2	<i>Ilmanlaadun ja säätekijöiden välinen yhteys</i>	70
6.1.3	<i>Ilmanlaadun ja muiden alueellisten ominaispiirteiden välinen yhteys</i>	74
6.1.4	<i>Maankäytön regressiomallin käytettävyys ilmanlaadun ennustamisessa</i>	76
6.2	Jatkotutkimustarpeita	80
7	JOHTOPÄÄTÖKSET	83
	KIITOKSET	84
	LÄHTEET	85
	LIITTEET	93

1 JOHDANTO

Kaupunkialueiden paikallisilmasto muodostuu kaupunkien kasvun ja kaupunkeihin liittyvien toimintojen seurauksena. Maankäytön muutokset vaikuttavat kaupungin säteily- ja hydrologiseen tasapainoon, minkä vuoksi muutoksia lämpötilassa, kosteudessa ja aerodynaamisissa ominaisuuksissa on havaittavissa rakennetuissa ympäristöissä (Oke 1987: 272).

1800-luvulla alkaneen teollistumisen myötä myös ilmanlaatu on heikentynyt kaupungeissa. Syynä tähän ovat muun muassa teollisuuden ja energiantuotannon päästöt, fossiilisten polttoaineiden käyttö ja liikenteen määrän jyrkkä kasvu. Asia on erityisen huolestuttava juuri kaupunkialueilla, joissa suurin osa maapallon ihmisistä elää ja joissa monet ilmanlaadun vaikutuksista siten näkyvät (YK 2010). Ilmansaasteet vaikuttavat ihmisen, eläinten, kasvillisuuden ja muun ympäristön hyvinvointiin (esim. Bunn et al. 2001; Cohen et al. 2004; Pope et al. 2009). Lähes kaikki ilmansaasteet lisäävät esimerkiksi riskiä sairastua sydäninfarktiin jo muutaman päivän sisällä saastepitoisuuksien suurenemisesta (Mustafic´et al. 2012).

Huono ilmanlaatu syntyy usean tekijän vaikutuksesta, joista itse päästölähdettä ja sen aiheuttamien päästöjen määrää voidaan pitää vain yhtenä tekijänä. Huono ilmanlaatu johtuu myös sääolosuhteista ja alueen muista ympäristötekijöistä, jotka vaikuttavat esimerkiksi saasteiden leviämiseen, laimenemiseen ja poistumiseen ilmakehästä (Kalkstein et al. 1991; Greene et al. 1999).

Viimeisten vuosikymmenien aikana on pyritty eri keinoin vähentämään ilmansaasteita. Kansalliset säädökset ovat yksi esimerkki onnistuneista hallinnollisista keinoista parantaa ilmanlaatua (Ympäristöministeriö 2012). Tiettyjen ilmansaasteiden kohdalla tulokset ovat olleet positiivisia, mutta siitä huolimatta vuotuiset ohje- ja raja-arvot monella ilmanlaadun parametreilla ylittyvät yksittäisinä tunteina tai vuorokausina. Esimerkkejä nykyajan ongelmallisista ilmansaasteista ovat hiukkaset, typen oksidit ja alailmakehän otsoni.

Kehitysmaat kärsivät nykyään huonosta ilmanlaadusta kaikkein eniten. Kaakkois-Aasian suurissa kaupungeissa on monin paikoin erittäin huono ilmanlaatu, esimerkiksi Delhissä Intiassa on maailman korkeimmat keskimääräiset hiukkaspitoisuudet ($177 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Scapecchi 2008: 16). Suomessa ilmanlaatu on suhteellisen hyvää verrattuna moneen Keski- ja Etelä-Euroopan tai Aasian maahan (Anttila et al. 2003: 81). Täällä esiintyy

kuitenkin korkeille leveyspiireille tyypillisiä ilmanlaadun ongelmia, kuten inversiotilanteita ja hiekoituksesta johtuvaa katupölyä. Suomessa ilmanlaatua heikentävät eniten liikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden päästöt sekä puun pienpoltosta syntyvät päästöt. Ilmansaasteet kulkeutuvat myös kaukokulkeumina Suomen rajojen ulkopuolelta (Salmi et al. 2009: 6).

On hyödyllistä ymmärtää ilmansaasteiden ajallista ja alueellista vaihtelua, jotta olisi mahdollista kvantifioida ilmansaasteiden terveysvaikutuksia ja levinneisyyttä. Tietoa ilmanlaadun ajallisesta ja alueellisesta vaihtelusta tarvitaan esimerkiksi kehitettäessä kustannustehokkaita keinoja vähentää ilmanlaadun haittavaikutuksia, terveydellisen näkökulman omaavien säädösten ja ohjeistusten luomisessa, logistiikan ja maankäytön suunnittelussa, saastelähteiden tunnistamisessa, ilmanlaadun havaintoasemien sijoittelussa sekä luotettavaan ilmanlaatua koskevaan tiedottamiseen kansalaisille ja muille sidosryhmille (Brauer et al. 2003; Hoek et al. 2008). Ilmansaasteet ovat monimuotoinen ongelma, jonka hallitseminen on varsin problemaattista.

Suomessa tutkimusta ilmanlaadusta on tehty lähinnä Helsingissä (esim. Kukkonen et al. 1999; Pohjola et al. 2004), vaikkakin ilmanlaadun seuranta kuuluu jokaisen kunnan tehtäviin. Turussa ilmanlaatua on seurattu jo vuodesta 1986 ja ilmanlaadusta tiedotetaan nykyään niin sanomalehdissä kuin kuukausiraporteissakin. Turun seudun ilmanlaatuun vaikuttavista sää- ja muista ympäristötekijöistä ei ole juurikaan julkaistu tutkimuksia, eikä muiden kaupunkien tuloksia voida täydellisesti soveltaa Turkuun. Esimerkiksi Greene et al. (1999) mukaan saastepitoisuudet vaihtelevat huomattavasti riippuen suursäätilanteesta ja kaupungin sijainnista. Yhden paikan huonoon ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät eivät siis välttämättä vaikuta toiseen paikkaan. Tämän vuoksi on mielenkiintoista tutkia myös Turun aluetta, jossa vastaavia tutkimuksia ei ole tehty.

On olemassa menetelmiä, joiden avulla voidaan tutkia ilmanlaatuun vaikuttavia tekijöitä. Suursäätilanteiden näkökulmasta erilaiset luokittelumenetelmät ja pääkomponenttianalyysit ovat olleet suosittuja. Ympäristö- ja alueellisesta näkökulmasta maankäytön regressiomalli ja muut paikkatietomenetelmät antavat puolestaan mahdollisuuden tarkastella ilmanlaadun alueellista vaihtelua tarkemmin.

Tutkimuksen tavoitteena on selvittää Turun seudun huonon ilmanlaadun tilanteiden taustalla vaikuttavia sää- ja muita ympäristötekijöitä ajallisesta ja alueellisesta

näkökulmasta sekä tarkastella maankäytön regressiomallin soveltuvuutta tutkimusalueen ilmanlaadun ennustamiseen.

Tutkimusongelmaa lähestytään neljän tutkimuskysymyksen avulla:

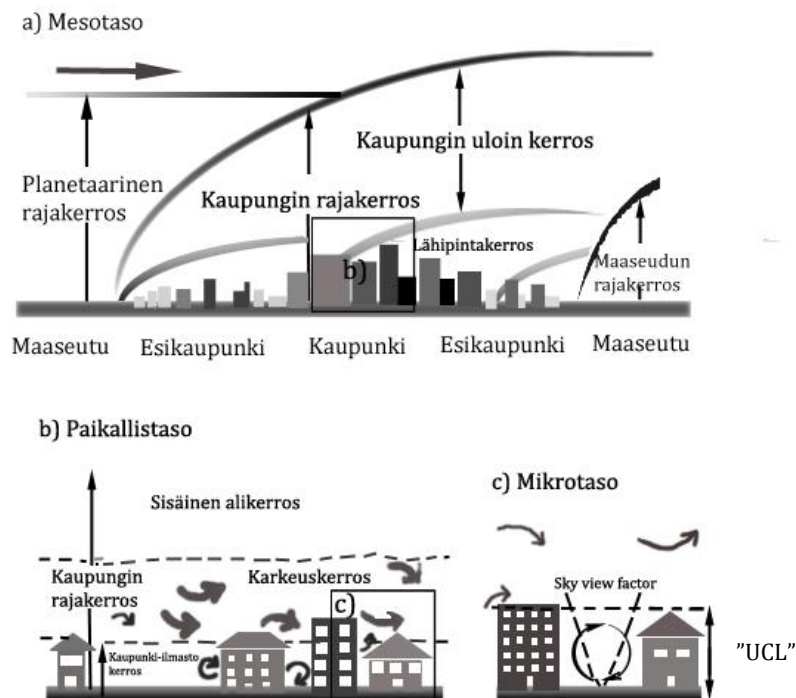
1. Millainen on ollut Turun seudun ilmanlaadun ajallinen ja alueellinen luonne vuosina 2001–2010?
2. Onko suursäätilan ja ilmanlaadun välillä havaittavissa ajallinen syy-yhteys?
3. Onko paikallisten tekijöiden (esim. maankäyttö ja topografia) ja ilmanlaadun välillä havaittavissa syy-yhteys?
4. Maankäyttöä kuvaavan regressiomallin soveltuvuus Turun ilmanlaadun alueellisessa seurannassa: miten hyvin malli kykenee ennustamaan ilmanlaatua eri paikoissa?

2 KAUPUNGIN ILMANLAATU

2.1 Ilmakehän rajakerros

Ilmakehän alinta kerrosta kutsutaan rajakerrokseksi (kuva 1a) ja sen paksuus vaihtelee riippuen ilmakehän tilasta (stabiili/epästabiili). Ilmakehän stabiilisuus tarkoittaa sen pystysuuntaista lämpörakennetta, joka vaikuttaa ilmakehän kykyyn sekoittaa pystysuuntaisesti (Salmi et al. 2009: 7). Rajakerros on suoraan yhteydessä esimerkiksi rakennuksiin. Näin ollen kaupungin toiminnoista syntyvät päästöt vapautuvat tähän ilmakehän kerrokseen, ja siksi sen rakenteesta on hyvä olla tietoinen ilmansaasteita tutkiessa (Salmi et al. 2009: 6). Rajakerroksen paksuus on Suomessa tyypillisesti alle kilometri, mutta kesällä se voi olla yli kaksi kilometriä. Matalimmat rajakerroksen paksuudet havaitaan yleensä talvella kovilla pakkasilla (Salmi et al. 2009: 6).

Maanpinnasta rakennusten yleiseen kattotasoon ulottuvaa kerrosta kutsutaan englanninkielessä nimellä "urban canopy layer" (UCL) (kuva 1c), jolle ei ole vakiintunutta termiä suomenkielessä. UCL muodostuu mikrotason ilmiöistä, jotka toimivat rakennuksien välisissä katukuiluissa ("street canyons"). Kanjoneissa tapahtuvat ilmakehän ilmiöt voivat olla hyvin erilaisia luonnolliseen ympäristöön verrattuna, koska niissä esiintyy esimerkiksi liikenteestä aiheutuvia ilmansaasteita, eikä ilma pääse niissä virtaamaan vapaasti. Kaupunkialueiden rakenne-erot luovat siis erilaisen jaon rajakerroksessa kuin ympäröivällä maaseudulla.



Kuva 1. Ilmakehän kerrokset kaupunkialueella. Kuva: Oke (1987) muunnettu.

2.2 Ilmanlaadun erityispiirteet kaupungissa

Ilmakehässä on aina ollut pieniä määriä saasteita, jotka syntyvät luonnollisten prosessien, kuten tulivuorenpurkausten kautta. Ihminen kuitenkin vaikuttaa toimintojensa kautta kasvaneisiin ilmansaasteiden pitoisuuksiin kaupunkialueilla. Esimerkkejä tällaisista toiminnoista ovat polttoprosessit energiantuotannossa ja liikenteessä (Oke 1987: 306). Kaupunkialueiden keskeisiä ilmansaasteita ovat typen oksidit, hiilimonoksidi, rikkidioksidi, alailmakehän otsoni ja erikokoiset hiukkaset (Oke 1987: 306.). Ilmansaasteet muokkaavat ilmakehän lämpöoloja, estävät auringonvalon kulkeutumista ja tarjoavat tiivistymisytimiä sateen synnyssä. Lisäksi ilmansaasteilla on erilaisia vaikutuksia ihmisten, eläinten ja luonnon hyvinvointiin. Vaikutukset voivat olla joko akuutteja lyhytaikaisesta altistumisesta johtuen tai vastaavasti kroonisia pitkäaikaisesta altistumisesta johtuen (Scapecchi 2008: 7). Ilman epäpuhtaudet onkin todettu suurimmaksi ympäristöperäisten kuolemien aiheuttajaksi (Jantunen et al. 2005: 11). Ilmansaasteisiin liittyvä riski ei ole kovin suuri, mutta ilmansaasteille altistuu valtaosa väestöstä, minkä vuoksi pienikin riski voi johtaa monien ihmisten sairastumiseen (Mustafic'et al. 2012).

2.2.1 Esimerkkejä kaupungin yleisistä ilmansaasteista

Typen oksidit

Luonnolliset typen oksidien päästöt (NO_x) ovat peräisin orgaanisesta hajoamisesta maaperässä ja meressä. Antropogeenisistä lähteistä peräisin olevat typen oksidien päästöt syntyvät paineen ja lämmön alaisista polttoprosesseista, kuten liikenteestä, hiilen ja biokaasun poltosta sekä lannoitteista ja räjähdetehtaista. Prosesseissa typpi ja happi yhdistyvät ja muodostavat typpimonoksidia (NO), jota voidaan pitää suhteellisen harmittomana kaasuna (Oke 1987: 308). Ilmakehässä typpimonoksidi kuitenkin hapettuu typpidioksidiksi (NO_2), joka on väriltään keltaruskea kaasu ja vaikutuksiltaan negatiivinen niin ihmisten, eläinten kuin kasvienkin hyvinvoinnille. Lyhytaikainenkin (30 min–25 h) altistus korkeille typpidioksidipitoisuuksille voi aiheuttaa vakavia sairauksia, kuten tulehduksia ja astmaoireita (EPA 2011). Typen oksidit toimivat myös osana alailmakehän otsonin muodostumisreaktiota. Alailmakehän otsonilla on puolestaan omat ympäristövaikutuksensa.

Osa (15–100 %) kaupungin typen oksideista on typpidioksidin muodossa (Pleijel et al. 2009). Typpimonoksidin ja typen oksidien määrästä ilmakehässä voidaan ennustaa, paljonko saasteista on peräisin liikenteestä (Grundström et al. 2011). Erityisesti 1990-

luvulta lähtien myös typpidioksidia päästöissään sisältävät ajoneuvot ovat lisääntyneet Euroopan kaupungeissa (Carslaw et al. 2007).

Hiukkaset

Noin 90 % kaikista ilmakehän hiukkasista ovat peräisin luonnollisista lähteistä, kuten tulivuorenpurkauksista ja metsäpaloista (Oke 1987: 306). Tästä huolimatta hiukkaset ovat nykyisin merkittävimpiä kaupunkien ilmanlaatuun vaikuttavista saasteista Suomessa (Salmi et al. 2009: 8). Hiukkasia pääsee ilmaan autojen pakokaasuista, jarruista, renkaista sekä energiantuotannosta ja teollisuuden päästöistä (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010: 11). Hengitettäviksi hiukkasiksi kutsutaan hiukkasia joiden halkaisija on alle 10 μm (PM_{10}) ja pienhiukkasiksi sellaisia hiukkasia, joiden halkaisija on alle 2,5 μm ($\text{PM}_{2,5}$). Euroopan unionissa tieliikenne ja energiantuotanto ovat vastuussa 27 %:sta hengitettävien hiukkasten kokonaispäästöistä (Krzyzanowski et al. 2005). Ilman hiukkaspitoisuuksiin vaikuttavat eniten liikenteen ja tuulen nostattama pöly (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010: 11). Erityisesti keväällä ja alkutalvesta pitoisuudet kasvavat kesään verrattuna moninkertaisiksi, koska kaduille ja jalkakäytävälle levitetty hiekoitushiekka pääsee resuspentoitumaan eli pölyttymään ilmaan. Pohjois-Euroopassa lumi voi sulaa useaan otteeseen ennen kuin pysyvä lumipeite saavutetaan. Tämä taas vaikuttaa ilman hiukkasmäärään, koska tällaisissa tilanteissa myös hiekoitetaan useaan otteeseen (Kukkonen et al. 1999).

Pienhiukkasia pidetään länsimaissa jopa haitallisimpana ympäristötekijänä ihmisen terveydelle (Salmi et al. 2009: 8). Maailmanlaajuisella tasolla hiukkasten arvioidaan olevan vastuussa vuosittain noin 800 000 ihmisen ennenaikaisesta kuolemasta (Cohen et al. 2004: 1354). Tätä väitettä tukevat monet julkaisut hiukkasten ja terveyden välisestä yhteydestä. Esimerkiksi Nawrot et al. (2011) ja Mustafic' (2012) tulosten mukaan liikenteestä syntyvillä hiukkasilla on aikaisempaa luultua suurempi merkitys sydäninfarkteihin.

Uusi mielenkiintoinen tutkimus on myös esittänyt hengitettävien ja pienhiukkasten yhteyden muistihäiriöihin erityisesti naisilla. Weuve et al. (2012) tekemän tutkimuksen mukaan pitkäaikainen altistuminen liikenteen ja teollisuuden aiheuttamille hiukkaspäästöille voi nopeuttaa muistin ja muiden mielentoimintojen heikentymistä ja aiheuttaa siten myös dementiaa. Tutkimuksen mukaan 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ kasvu ilman hiukkaspitoisuuksissa aiheuttaa iäkkäiden ihmisten aivotoimintojen heikentymistä tasolla, joka vastaa aivojen ikääntymistä kahdella vuodella. Altistumispuite tutkimuksessa

ovat kuitenkin keskimäärin suurempia kuin Suomessa, vaikka täälläkin pitoisuudet saattavat kohota etenkin keväisin hetkellisesti yli suositusten.

Hiukkasilla on myös monenlaisia vaikutuksia ilmastoon. Esimerkiksi sulfaatit heijastavat osan lyhytaaltoisesta tulosäteilystä takaisin avaruuteen ja aiheuttavat näin ollen negatiivista säteilypakotetta viilentäen ilmastoa paikallisesti (Oke 1987: 280). Pienhiukkaset toimivat lisäksi pilvissä pisaroiden tiivistysytiminä eli sitovat itseensä kosteutta, mikä lisää niiden heijastuskykyä. On osoitettu, että hiukkaset toimivat tästä syystä kasvihuoneilmiötä lieventäen (esim. Ramanathan & Feng 2009). Joidenkin tutkimusten mukaan asia ei ole kuitenkaan niin yksiselitteinen. Pilewskie (2007) on todennut pienhiukkasten absorboivan auringonsäteilyä 2–6 kilometrin korkeudella ilmakehässä aiheuttaen positiivista säteilypakotetta (päinvastoin kuin Ramanathan & Feng 2009 tutkimuksessa). Maanpinnalla erityisesti lumen ja jään päällä hiukkaset kuten musta hiili aiheuttaa puolestaan lämmön absorboitumista ja näin ollen edesauttaa lumen ja jään sulamista (Ramanathan et al. 2007). Tutkijat eivät näin ollen ole yhtä mieltä siitä, onko hiukkasilla suurempi negatiivinen vai positiivinen säteilypakote. On kuitenkin selvää, että ilmansaasteet ja niihin lukeutuvat hiukkaset tulisi huomioida ilmastopolitiikassa ja ilmastomuutoksen hillitsemisessä.

Rikkidioksidi, hiilimonoksidi ja sekundääriset ilmansaasteet

Rikkidioksidipäästöt (SO₂) syntyvät fossiilisten polttoaineiden käytöstä voimalaitoksissa (73 %), teollisuuslaitoksista (20 %) sekä pienemmässä mittakaavassa myös esimerkiksi laivaliikenteestä. Rikkidioksidi ja rikkihappo vaikuttavat hengitysteissä ärsyttävästi. Ympäristölle rikki- ja typpipäästöt ovat haitallisia, koska ne aiheuttavat maaperän ja vesistöjen happamoitumista. (EPA 2011.)

Suomessa rikkidioksidin pitoisuuksien hillitsemisessä on edistytty huomasti viimeisen kahdenkymmenen vuoden aikana. Rikkidioksidin pitoisuudet kaupunki-ilmassa ja jopa teollisuuslaitosten ympäristössä lähentyvät jo taustapitoisuuksia (Ympäristöministeriö 2011). Tämä on hyvä esimerkki tehokkaasta ja pitkäjänteisestä päästöjen rajoittamisesta.

Hiilimonoksidi (CO) eli häkä on toinen kaupunkialueelle tyypillinen ilmansaaste, joka syntyy erityisesti liikenteestä. Se on hajuton ja myrkyllinen kaasu, jota syntyy polttoprosesseissa hiilen palaessa epätäydellisesti liian vähäisessä happimäärässä tai liian korkeassa lämpötilassa. Hiilimonoksidi on haitallinen terveydelle, koska se heikentää

hapen kulkeutumista veressä. Erittäin korkeina pitoisuuksina hiilimonoksidi voi olla myrkyllistä (EPA 2011).

Sekundäärisiä ilmansaasteita puolestaan syntyy ilmakehässä, kun päästöt reagoivat keskenään tai muiden ilmassa olevien yhdisteiden kanssa. Alailmakehän otsoni (O_3) on esimerkki sekundäärisestä ilmansaasteesta, ja sitä esiintyy yleisesti kaupunkiseuduilla. Alailmakehän otsonia syntyy auringon vaikutuksesta typen oksidien (NO_x) reagoidessa hiilivetyjen kanssa ("Volatile organic compound, VOC"). Alailmakehän otsoni reagoi myös muiden ilmansaasteiden kanssa synnyttäen esimerkiksi typpidioksidia (EPA 2011). Korkeat alailmakehän otsonipitoisuudet ovat haitallisia ihmisen terveydelle aiheuttaen ylä- ja alahengitystiesairauksia. Lisäksi alailmakehän otsoni on haitallinen luonnolle vaurioittaen esimerkiksi puiden lehtiä ja neulasia sekä heikentäen metsien ja viljelyksien kasvua (Ilmatieteen laitos 2002).

2.2.2 Ilmanlaatuun vaikuttaminen

Ilmanlaatuun on pyritty vaikuttamaan hallinnollisin keinoin esimerkiksi lainsäädännön, teknologian, energiansäästämisen ja ympäristölle kestävien liikennesäädösten kautta (OECD 2004). Esimerkiksi Yhdysvalloissa vuonna 1955 aloitettu ensimmäinen kansallinen lainsäädäntö ilmanlaadun parantamiseksi, "Air Pollution Control Act", on saanut aikaan hyviä tuloksia. Tänä päivänä kyseinen asiakirja toimii nimellä "Clean Air Act", ja tutkimusten mukaan sen avulla on vuoteen 2020 mennessä ehkäisty jo noin 230 000 ihmisen ennen aikaista kuolemaa Yhdysvalloissa (EPA 2011).

Euroopan unioni toimii monella tavalla ilmansaasteiden vähentämisen puolesta, mikä vaikuttaa myös Suomeen. Ylemmällä tasolla pyritään yhteisötason lainsäädäntöön, kaukokulkeumien vähentämiseen, päästölähteisiin vaikuttamiseen, alueellisen ja paikallisen tahojen yhteistyön kehittämiseen sekä alan tutkimusten ja ilmanlaadun seuraamisen taloudelliseen tukemiseen. (Ympäristöministeriö 2011.)

Suomessa ilman typen oksidien pitoisuuksien aleneminen on seurausta erityisesti ajoneuvojen pakokaasupäästöjen hillitsemisestä. Esimerkiksi 1990-luvun lopulla otettiin käyttöön kolmitoimikatalysaattorit bensiinikäyttöisissä autoissa, mikä on yksi suurimmista tekijöistä typen oksidien päästöjen vähenemisessä. Typpidioksidin pitoisuudet ilmassa eivät kuitenkaan ole laskeneet yhtä selvästi. Tämä johtuu muun muassa dieselautojen määrän kasvusta. Dieselautoissa typpidioksidipäästöjä lisää niissä käytettävät hapettavat katalysaattorit. (Ympäristöministeriö 2011.)

Myös hengitettävien hiukkasten päästöt ovat vähentyneet paljon viimeisten vuosikymmenien aikana. Taloudellisen yhteistyön ja kehityksen järjestön OECD:n ("Organisation of Economic Co-operation and Development") raportin mukaan lähitulevaisuudessa erityisesti länsimaissa odotetaan entistä suurempia päästövähennyksiä ajoneuvojen kehittyvän moottoritekniikan avulla. Teollisuuden päästöjä kontrolloidaan yhä enemmän esimerkiksi käyttämällä biokaasun kaltaisia vain vähän rikkiä sisältäviä polttoaineita (Scapecchi 2008: 7). Katupölyn muodostumista ehkäistään erityisesti tehostetun katujen puhtaanapidon ja uuden puhdistuskaluston käyttöön ottamisen avulla (Ympäristöministeriö 2011).

Suomessa ilmanlaadun seuraaminen on kuntien vastuulla yhdessä toiminnanharjoittajien ja Ilmatieteen laitoksen kanssa. Järjestely perustuu ympäristönsuojelulakiin (YSL 86/2004), jonka mukaan kunnat ovat vastuussa alueidensa tarpeellisesta ilmanlaadun seuraamisesta ja tiedottamisesta järjestämisestä. Ihmisten terveyden ja viihtyvyyden lisäämiseksi sekä ekosysteemien suojelemiseksi ulkoilman saasteiden pitoisuuksille on asetettu rajoituksia (taulukko 1). Ohjearvot (Vnp 38/2011) ovat esimerkki valtiontason ilmansuojelun ohjaamisesta ja ne perustuvat terveydellisten sekä luontoon että viihtyvyyteen liittyvien haittojen minimointiin. Ohjearvoja on annettu usealle eri ilmanlaadun parametrille, ja ne huomioidaan esimerkiksi maankäytön ja liikenteen suunnittelussa.

Raja-arvot puolestaan perustuvat Euroopan unionin ilmanlaatudirektiiviin (EY 50/2008) ja ne on määritetty Valtioneuvoston asetuksessa (Vna 38/2011). Raja-arvojen alitus suunnitellaan ilmansuojelusuunnitelmien avulla. Esimerkiksi kunnat, joissa raja-arvot ylittyvät tai on vaarassa ylittyä, ovat vastuussa ilmansuojelusuunnitelmien laatimisesta ja toimeenpanemisesta. Raja-arvo katsotaan ylitetyksi vasta, kun numeroarvon ylityksiä on sallittua määrää enemmän. Esimerkiksi hengitettävien hiukkasten raja-arvo saa ylittyä 35 kertaa vuodessa. Numeroarvon ylityksistä on kuitenkin tiedotettava heti alueen asukkaille. Ilmatieteen laitoksen julkaiseman tutkimuksen mukaan Suomessa esiintyy raja-arvojen ylityksiä hyvin harvoin (Anttila et al. 2003: 81).

Raja- ja ohjearvojen lisäksi ilmanlaadulle on laadittu kynnysarvoja, joiden ylitymisestä on myös tiedotettava kansalaisia. Tässä tutkielmassa käsitellään ainostaan tilanteita, jolloin numeerinen ohjearvo tai paikoin myös raja-arvo on ylittynyt.

Taulukko 1. Ilmansaasteiden raja- ja ohjearvoja Suomessa vuonna 2011. Ohjearvojen tilastollinen määrittely perustuu rikki- ja typpidioksidin osalta kuukauden tuntiarvojen 99. prosenttipisteeseen ja hengitettävien hiukkasten osalta kuukauden toiseksi suurimpaan vuorokausiarvoon.

Yhdiste	Aika	Raja-arvo $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Sallitut raja- arvon ylitykset vuodessa	Ohjearvo $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Rikkidioksidi	Tunti	350	24	250
	Vuorokausi	125	3	80
Typpidioksidi	Tunti	200	18	150
	Vuosi	40	-	70
Hengitettävät hiukkaset	Vuorokausi	50	35	70
	Vuosi	40	-	-

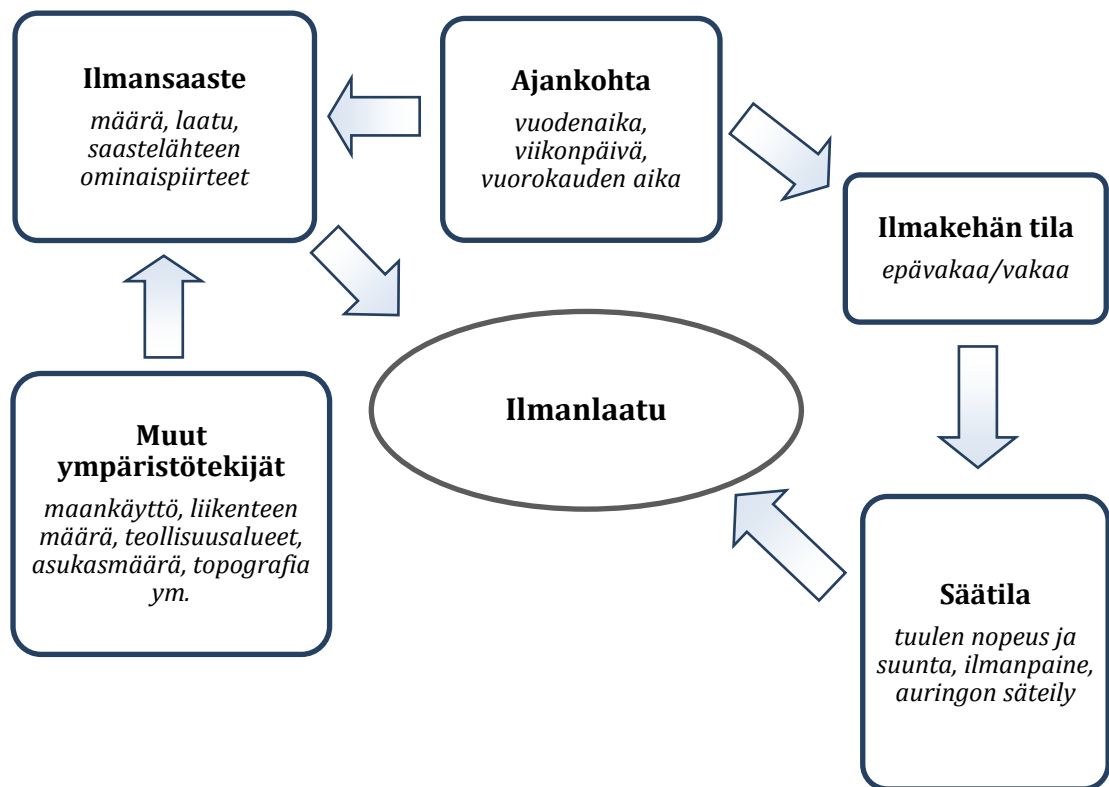
Nykyään kehitysmaat kärsivät huonosta ilmanlaadusta kaikkein eniten. Kaakkois-Aasian suurissa kaupungeissa on maailman huonoin ilmanlaatu ja esimerkiksi Delhissä Intiassa on maailman korkeimmat mitatut keskimääräiset hiukkaspitoisuudet ($177 \mu\text{g}/\text{m}^3$) (Scapecchi 2008: 16). Anttila et al. (2003: 81) ovat tutkineet Suomen ilmanlaatua suhteessa muuhun Eurooppaan ja kyseisen lähteen mukaan ilmanlaatu täällä on keskimäärin suhteellisen hyvä verrattaessa esimerkiksi Keski- tai Etelä-Eurooppaan, missä esiintyy isoja teollisuusalueita ja suurkaupunkeja. Suomessa esiintyy kuitenkin joitakin Pohjois-Euroopalle tyypillisiä ilmanlaadullisia ongelmia kuten talven inversiotilanteet ja taajamien korkeat hiukkaspitoisuudet keväisin hiekoitushiekasta johtuen. Suomessa ilmanlaatua heikentävät eniten liikenteen, energiantuotannon ja teollisuuden sekä puun pienpoltosta syntyvät päästöt. Ilmansaasteita, kuten alailmakehän otsonia ja maastopalojen savua, kulkeutuu myös kaukokulkeumina Suomen rajojen ulkopuolelta (Salmi et al. 2009: 6; Ilmatieteen laitos 2012a).

2.3 Ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät

Huonon ilmanlaadun tilannetta voidaan kuvailla tapahtumasarjaksi, jonka aikana ilman saastepitoisuudet kasvavat merkittävästi ylittäen esimerkiksi kansalliset ja kansainväliset kynnyksarvot. Tavallisesti huonon ilmanlaadun tilanteet voivat kestää tunneista jopa pariin viikkoon. Saasteet voivat olla peräisin paikallisista, alueellisista tai kaukaisemmista lähteistä. Tämän vuoksi on tärkeä ymmärtää taustalla vaikuttavat meteorologiset, fysikaaliset ja kemialliset prosessit, jotka voivat johtaa huonon ilmanlaadun tilanteisiin paikallisella, alueellisella tai suuremman mittakaavan tasolla. (Kukkonen et al. 2005.)

Päästöjen määrä on yksi tärkeimmistä ilmanlaatuun vaikuttavista tekijöistä. Ilman päästöjä ei myöskään olisi ilmanlaatuun liittyviä ongelmia. Päästöjen määrä tai laatu eivät

kuitenkaan yksin määrää ilmanlaatua kaupungeissa. Ilmanlaatu saattaa vaihdella alueella paljonkin, vaikka päästöjen määrä pysyisi samana. Suurimman osan ajasta ilmakehällä on suuri kyky levittää saasteita, mutta tiettyinä aikoina ja tietyissä paikoissa kyky saattaa olennaisesti heiketä (Davis & Kalkstein 1990; Greene et al. 1999). Tällaisten olosuhteiden vallitessa ilmansaasteet voivat aiheuttaa vakavia ongelmia. Erityisesti ilmakehän tila ja sää (sekä paikalliset että suuremman mittakaavan sääilmiöt), ajankohta ja muut ympäristötekijät kuten maankäyttö ja topografia vaikuttavat ilmakehän kykyyn kuljettaa, laimentaa ja poistaa saasteita ilmakehästä (kuva 2). Näitä kaikkia on siis syytä tarkastella, mikäli halutaan saada kokonaiskuva tietyn kaupungin ilmanlaadusta (Flocas et al. 2009).



Kuva 2. Ilmanlaatuun vaikuttavia sää- ja muita ympäristötekijöitä. Huomioitavaa on, että ilmanlaatuun vaikuttaa itse päästölähteen lisäksi myös esimerkiksi ajankohta, ilmakehän tila sekä sää ja muut ympäristötekijät. Kuva: Oke (1987: 305) ja Flocas et al. (2009), muunnettu.

Meteorologiset parametrit vaikuttavat ilman saastepitoisuuksiin, koska saasteiden laimeneminen on riippuvainen esimerkiksi tuulen nopeudesta, suunnasta ja planetaarisen rajakerroksen paksuudesta. Kemialliset reaktiot, jotka synnyttävät sekundäärisiä ilmansaasteita, ovat puolestaan riippuvaisia auringon säteilystä, lämpötilasta ja kosteudesta. Parhaat olosuhteet ilmansaasteiden sekoittumiselle ja laimenemiselle on yleensä tilanteissa, joissa ilmakehän tila on epävakaava, ja sekoittumiskerroksen on näin ollen

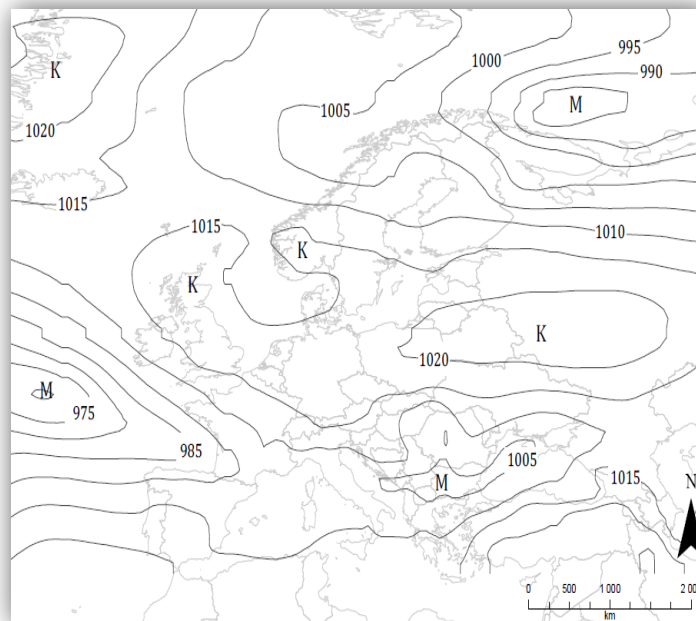
paksu. Tällaiset olosuhteet vallitsee aurinkoisina kesäpäivinä (Oke 1987: 310). Vastaavasti huonoa ilmanlaatua syntyy herkemmin lämpötilainversion aikaan, kun ilmakehän rajakerros on vakaa ja turbulentsisuus eli pyörteisyys vähäistä. Tällaisissa tilanteissa ilman ylöspäin suuntautuva liike ja ilmansaasteiden laimeneminen on olematonta (Oke 1987: 310). Ajankohdalla, kuten vuodenaikalla, viikonpäivällä ja vuorokauden ajalla, on siis myös vaikutusta ilmanlaatuun. Esimerkiksi ihmisen käyttäytyminen ja paikalliset vuodenaikaan liittyvät sääilmiöt vaikuttavat tutkimusten mukaan huonon ilmanlaadun syntymiseen (Madhavi Latha & Highwood 2000; Kukkonen et al. 2005).

Synoptinen klimatologia on tieteenala, joka yhdistää monia ilmakehän ilmiöitä, jotta voitaisiin paremmin ymmärtää esimerkiksi ilmansaasteiden ja klimatologisten olosuhteiden välistä yhteyttä. Synoptiset säätilanteet (suursäätilanteet) ovat holistisia yksiköitä ilmakehän ominaisuuksista, jotka tapahtuvat tietyssä paikassa ja aiheuttavat tiettyjä sään ja ilmanlaadun erityispiirteitä (Greene et al. 1999). Synoptinen klimatologia lähestymistapana on näistä syistä ideaalinen näkökulma tutkia huonon ilmanlaadun taustasyitä. Yksi mielenkiintoinen näkökulma synoptisessa klimatologiassa on selvittää yksittäisten sääparametrien lisäksi niiden yhdistelmiä eli luokkia, joiden aikana on havaittavissa suuremmalla todennäköisyydellä huonoa ilmanlaatua. Esimerkiksi Greene et al. (1999) uskovat, että sääparametrit toimivat enemmän yhdessä kuin erikseen aiheuttaessaan huonoa ilmanlaatua. Tämän vuoksi tulisi hyödyntää suursäätilanteita, mikäli halutaan tietää, mitkä tilanteet todennäköisemmin aiheuttavat huonon ilmanlaadun. Tietyn alueen synoptisten säätilanteiden tunnistamisesta voi olla hyötyä alueen ilmanlaadun hallintastrategian saavuttamiseksi, jonka avulla voidaan minimoida ilmansaasteiden negatiiviset ympäristövaikutukset.

Tutkimuksia tietyn kaupungin ilmanlaatuun vaikuttavista tekijöistä ei kuitenkaan voi yleistää paikastaa toiseen. Esimerkiksi Greene et al. (1999) ovat tutkineet synoptisia säätilanteita, jotka vaikuttavat neljään eri Yhdysvaltalaisen kaupungin huonoon ilmanlaatuun, ja huomanneet, että eroja löytyy myös maan sisällä. Esimerkiksi Watson & Chow (2002) tutkivat talvista huonon ilmanlaadun jaksoa Kaliforniassa, jossa pienhiukkaspitoisuudet ylittivät kynnyksarvot huonolle ilmanlaadulle kymmenen päivän ajan. Taustalla vaikuttavat syyt olivat kaukokulkeumat eli tuulen suunta sekä aamuiset lämpötilainversiotilanteet, jolloin ilmakehä oli hyvin stabiili. Puolestaan Itävallan Grazissa tehdyssä tutkimuksessa todettiin topografian olevan yhdessä päästöjen määrän kanssa yksi suurimmista ilmanlaatuun vaikuttavista tekijöistä. Grazissa otollinen säätila (esim.

korkeapaineen tilanne), paikalliset tuulijärjestelmät ja voimakas lämpötilainversio olivat kaikkein merkittävimmät ilmanlaatuun vaikuttavat tekijät (Almbauer et al. 2000).

Suomessa on paikoin tutkittu huonoon ilmanlaatuun vaikuttavia syitä synoptisesta näkökulmasta. Esimerkiksi vuosien 1995 ja 1996 vaihteessa oli hyvin huono ilmanlaatu monessa Suomen rannikkokaupungissa, jolloin sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten raja-arvot ylittyivät useaan otteeseen erityisesti Helsingissä. Korkeapaineen keskus ulottui jakson alkupäivinä Skandinavian lounaisosasta Länsi-Venäjälle asti (kuva 3). Matalapaineen keskus sijaitsi Suomen luoteispuolella. Korkeapaineen keskus pysyi Suomen eteläosan yllä koko huonon ilmanlaadun jakson ajan, aiheuttaen hyvin stabiilin ilmakehän tilan ja myös kohonneita ilmansaasteiden pitoisuuksia muissakin Suomen rannikkokaupungeissa (Pohjola et al. 2004). Esimerkiksi Turussa Kauppatorilla mitattiin kyseisenä ajanjaksona yli 400 µg/m³ typpidioksidin tuntikeskiarvoja (Pietarila et al. 1997: 56). Keskileveyskylien matalapaineet olivat myös suuntautuneet keskimääräistä eteläisemmälle reitille, mikä on havaittavissa tavallista alhaisemmasta NAO-indeksistä ("The North Atlantic Oscillation, NAO").



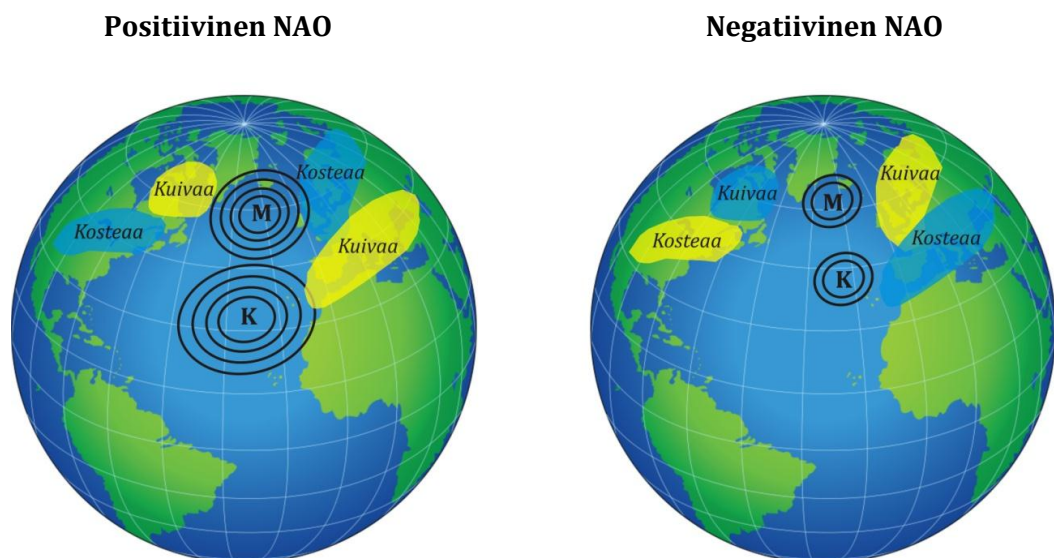
Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 3. Vallitsevien ilmanpainekeksuksien sijainnit 28.12.1995 klo 00.00, jolloin ilmanlaatu oli huono monin paikoin Suomen rannikkoalueella. Ilmakehän tila oli useiden päivien ajan stabiili ja voimakas lämpötilainversio oli läsnä. Tällaisessa tilanteessa saasteiden laimeneminen on vähäistä.

2.3.1 Sään vaikutus ilmanlaatuun

Ilmanpaine ja NAO-indeksi

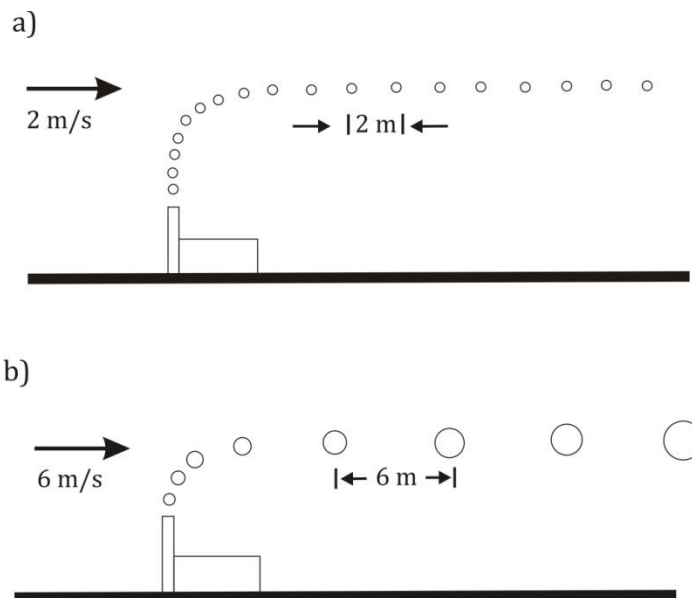
Suomen ja Pohjois-Euroopan talvien säähän vaikuttaa erityisesti länsivirtauksien voimakkuus, jota voidaan seurata Pohjois-Atlantin oskillaatioon ("North Atlantic Oscillation, NAO") perustuvan NAO-indeksin avulla (Nyman 2007: 15) (kuva 4). Indeksä voidaan laskea mille aikavälille tahansa, ja se perustuu Islannin matalapaineen ja Azorien korkeapaineen välisiin ilmanpaine-eroihin. NAO vaikuttaa erityisesti talvisin Koillis-Euroopan sääoloihin kuten lämpötilaan, sademäärään ja tuulisuuteen (Grundström et al. 2011). Indeksä ollessa positiivinen Azoreiden korkeapaineen ja Islannin matalapaineen välinen ilmanpaineen gradientti on suuri. Tällöin Pohjois-Euroopassa vallitsee keskimääräistä voimakkaampi läntinen tai lounainen ilmavirtaus ja sää on lauhaa sekä sateista (Nyman 2007: 16). Negatiivinen NAO puolestaan tarkoittaa Azoreiden ja Islannin välisen painegradientin olevan heikko. Kyseisinä ajankohtina länsituulet ovat heikot ja Pohjois-Eurooppaa hallitsee usein laaja korkeapaineen alue, mikä erityisesti talvisin tarkoittaa kuivaa ja kylmää säätä. Tällöin myös pitkät pakkasjaksot ovat mahdollisia (Chen & Hellström 1999). Korkean ilmanpaineen tilanteet ovat potentiaalisia huonon ilmanlaadun synnylle, koska niiden aikana esiintyy yleensä heikkoja tuulia ja erityisesti talvella ohut sekoittumiskerros eli stabiili ilmakehän tila (esim. Davis & Kalkstein 1990; Buchholz et al. 2009; Flocas et al. 2009).



Kuva 4. NAO-indeksiin vaikuttavat Pohjois-Atlantin oskillaation muutokset ilmanpainejärjestelmien voimakkuuksissa. Kuva: Windows to the Universe (CC-BY-SA 3.0), muunnettu.

Tuulen suunta ja nopeus

Tuulisuus on tärkeää erityisesti saasteiden horisontaalisen leviämisen kannalta kaupungin rajakerroksessa. Ilmakehän liikkeellä on kahdenlainen vaikutus ilmansaasteisiin. Ilma sekoittaa tai laimentaa saasteita, jos saastepilvi on suurempi kuin ilman pyörteiset liikkeet. Saastepilven ollessa pienempi kuin ilman pyörteiset liikkeet tuuli puolestaan kuljettaa saasteita (Oke 1987: 313). Kuvasta 5 näkee tuulen nopeuden vaikutuksen ilmansaasteiden laimenemiseen. Mitä suurempi määrä ilmaa liikkuu päästölähteen yli, sitä pienempi saastepitoisuus ilmassa tulee olemaan (Oke 1987 313–314). Tuulen suunta puolestaan määrittää saasteiden kulkeutumisreitit, ja tuulen suunnan vaihtelevuus kuvaa sitä aluetta, jonka kautta saasteet voivat levitä (Oke 1987: 305). Mikäli tuulen suunnassa on muita saastelähteitä, saattaa näiden yhteisvaikutus olla tiettyssä tuulen suunnassa voimakas.



Kuva 5. Tuulen nopeuden vaikutus ilman saastepitoisuuteen. Sekä kuvissa a että b päästöjä vapautuu ilmakehään samalla nopeudella, mutta kuvassa a tuulen nopeus on 2 m/s ja kuvassa b puolestaan 6 m/s. Kuva: Oke (1987: 315) muunnettu.

Otollisin tilanne huonon ilmanlaadun synnylle on tyyni sää, jonka vuoksi saasteet eivät liiku mihinkään. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä, että ilmansaasteiden pitoisuudet ilmassa kasvavat lineaarisesti ajan suhteen jos päästöjen määrä pysyy vakiona. Tätä tilannetta voi edelleen pahentaa alueen muut ominaispiirteet (luku 2.3.2).

Sadanta ja pilvisuus

Sadanta vaikuttaa olennaisesti ilmanlaatuun. Sadannan aikana ilmanlaadun on todettu olevan yleisesti ottaen hyvää. Tienpinnan sateen jälkeinen kosteus vähentää erityisesti hengitettävien hiukkasten resuspentoitumista ilmaan (esim. Munn & Bolin 1971; Michael 1997; Omstedt et al. 2005). Elminir (2005) on saanut tuloksia siitä, että myös typpidioksidipitoisuudet ovat korkeammat kuivien kausien aikana (RH < 40 %).

Pilvipeitteen esiintyminen liittyy olennaisesti vesisateeseen. Esimerkiksi Michael (1997) on tutkinut pilvisyyden ja sadannan yhteyttä alailmakehän otsoniin. Tutkimustulosten mukaan parametrien välillä on tilastollisesti merkitsevä negatiivinen korrelaatio tarkoittaen otsonipitoisuuksien olevan pieniä pilvisyyden ja sadannan kasvaessa. Tämä on tietenkin loogista huomioiden otsonin syntymekanismit, jossa auringonsäteily on merkittävässä roolissa.

Lämpötila

Ilman lämpötilan ja ilmanlaadun välisestä yhteydestä on olemassa erilaisia tuloksia ilmansaasteesta riippuen. Elminir (2005) mukaan yhteys on heikko tai olematon erityisesti rikki- ja typpidioksidin kohdalla. Sekundääristen saasteiden, kuten otsonin kohdalla, riippuvuus lämpötilaan on puolestaan selvä. Tutkimuksen mukaan korkeimmat otsonipitoisuudet havaitaan keväällä ja kesällä, kun taas alhaisimmat pitoisuudet havaitaan talvella (Elminir 2005). Tämä ilmiö on tietenkin selitettävissä otsonin syntymekanismien avulla, koska alailmakehän otsonin syntyreaktiossa tarvitaan auringonsäteilyä.

Ilmakehän stabiilisuus on yhteydessä lämpötilan pystysuuntaiseen jakaumaan, joten tästä näkökulmasta on myös tärkeää tarkastella lämpötilan ja ilmanlaadun välistä yhteyttä. Epästabiiliksi kutsutaan normaalia olosuhdetta, jolloin lämpötila laskee ylöspäin mentäessä. Inversiotilanteessa lämpötila päinvastoin nousee ylöspäin mentäessä (stabiili tilanne). Sekoittumiskerros on stabiileissa tilanteissa hyvin ohut, ja saasteet voivat jäädä normaalia matalammalle, koska yllä oleva lämmin ilmakerros estää ilman sekoittumisen ja saasteiden laimenemisen (Oke 1987: 310).

Lämpötilainversio voi syntyä alailmakehän jäähtymisen tai advektion kautta. Säteilyinversio syntyy maanpinnan jäähdyttyä alailmakehää ja se on kaupunkialueilla melko yleinen inversiotyyppi (Oke 1987: 311). Säteilyinversio yltää yleensä noin 50–100

metrin korkeuteen ja sitä tavataan erityisesti selkeinä ja vähätuulisina pakkasöinä. Korkeilla leveysasteilla inversiotilanne voi olla pysyvä usean päivän ajan (Oke 1987: 311). Pohjola et al. (2004) tutkivat alailmakehän lämpötilajakaumaa vuoden 1995 huonon ilmanlaadun jakson aikana, ja he saivat selville, että suurimmillaan lämpötilagradientti oli noin 15 °C maanpinnalta noin 30 metrin korkeudessa. Kyseisenä huonon ilmanlaadun jakson aikana vallitsi siis voimakas säteilyinversio (Karppinen et al. 2002). Inversiotilastojen mukaan tällaiset lukemat ovat hyvin poikkeuksellisia Etelä-Suomessa (Karppinen et al. 2001).

Inversion lisäksi lämpösaareke on toinen kaupungeissa havaittava lämpötilaan liittyvä ilmiö, johon vaikuttaa myös hyvin paljon suursäätilanteet kuten ilmanlaatuunkin. Lämpösaareke tarkoittaa kaupunkialueiden korkeampaa lämpötilaa maaseutuun verrattuna ja se syntyy rakenteellisista ja toiminnallisista eroista kaupungin ja maaseudun välillä. Ilmiön syntyyn vaikuttaa rakennusten lämmityksestä ja liikenteestä syntyvä hukkalämpö sekä kasvillisuuden ja ilmakehän saasteiden määrä kaupungissa (Oke 1987: 280–281). Lämpösaarekkeen voimakkuuteen vaikuttavat rakennusten pintamateriaalit, jotka voivat sitoa itseensä lämpöä päivällä. Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviraston mukaan yli yhden miljoonan kokoisissa kaupungeissa lämpösaarekkeen voimakkuus keskustassa voi olla jopa 12 °C lämpimämpi verrattuna ympäröivään maaseutuun (EPA 2012). Lämpösaareke syntyy erityisesti selkeiden ja heikkotuulisten öiden aikana (Oke 1987: 289), eli samoissa sääolosuhteissa, joissa huono ilmanlaatuunkin syntyy. Tämän takia lämpösaarekkeen voimakkuus voisi olla indikaattorina stabiilien ilmakehän tilanteiden havaitsemiseksi.

Toistaiseksi lämpösaarekkeen ja ilmanlaadun välistä yhteyttä ja käyttäytymistä on tutkittu hyvin vähän. Suuri osa tutkimuksesta on sijoittunut pääasiassa matalille leveysasteille (esim. Johnsson et al. 2004; Lai & Cheng 2009). Tutkimus Taichungista Taiwanista osoittaa tiettyjen suursäätilanteiden heikentävän ilmanlaatua ja voimistavan lämpösaarekeilmiötä (Lai & Cheng 2009). Tutkimus voimakkaasta lämpösaarekkeesta yhdessä huonojen ilmanlaadun tilanteiden kanssa on tärkeää, koska lämpötila vaikuttaa esimerkiksi ihmisten terveyteen. Erityisesti matalilla leveysasteilla sijaitsevilla kaupungeilla korkeat lämpötilat voivat lämpöstressin takia lisätä kuolleisuutta tietyillä riskiryhmiin kuuluvilla ihmisillä (Conti et al. 2004). Yhdessä huonon ilmanlaadun kanssa voimakas lämpösaareke voi siis olla hyvin haitallinen ilmiö.

2.3.2 Muiden alueellisten ominaispiirteiden vaikutus ilmanlaatuun

Kaupungin sisäiset vaihtelut ilmanlaadussa ovat joidenkin tutkimusten mukaan suuremmat kuin kaupunkien väliset vaihtelut (Miller et al. 2007). Suursäätilanteiden lisäksi on siksi tärkeä huomioida myös tutkimusalueen muut alueelliset ominaispiirteet huonoon ilmanlaatuun johtavien syiden selvittämiseksi. Laajasti tarkasteltaessa suursäätilanteilla voi olla tärkempi merkitys ilmanlaatuun kuin muilla ympäristötekijöillä, mutta esimerkiksi jonkin kaupungin sisäisten ilmanlaatuerojen selvittämisessä myös muut paikalliset ympäristötekijät tulevat yhä tärkeämmäksi.

Jotkin maankäytön muodot, kuten rakennetut ympäristöt (erityisesti teollisuusalueet ja liikennealueet) huonontavat ilmanlaatua (Buchholz et al. 2010). Puolestaan puistot ja muut vastaavat alueet, joilla on vähän ilmansaasteita aiheuttavia toimintoja voivat parantaa ilmanlaatua. Alueiden erilaisuuden takia on kuitenkin vaikea tehdä yleistyksiä yhden paikan ympäristötekijöiden vaikutuksista jonkin toisen paikan ilmanlaatuun. Esimerkkinä voidaan ottaa laivaliikenteen vaikutus ilmanlaatuun. Joissain paikoissa vaikutukset ovat merkittäviä: korkeita typpi- ja rikkidioksidipitoisuuksia voidaan havaita paikoin rannikkoseuduilla vilkkaasti liikennöityjen laivaväylien lähetyillä, tai kaukokulkeumien vaikutuksesta kauempana sisämaassa (Eyring et al. 2010). Toisaalta suuren konvektion takia ilmansaasteiden laimeneminen voi vesialueilla olla suurta. Jonkin maankäyttömuodon vaikutus ilmanlaatuun ei tästä syystä ole suoraviivaista.

Korkeuserot ovat toinen ilmanlaatuun paikoin merkittävästi vaikuttava ympäristötekijä. Esimerkiksi laaksoissa voi syntyä lämpötilainversiota, kun kylmä ilma jää lämpimän ilman alle. Saasteet eivät tällaisissa tilanteissa pääse sekoittumaan ympäristöön, koska lämmin ilma toimii eräänlaisena kattona kylmälle ilmalle laakson yläpuolella. Kuvassa 6 näkyy savusumua Los Angelesin kaupungin yllä, missä topografia on yksi tärkeimmistä huonon ilmanlaadun tilanteisiin vaikuttavista ympäristötekijöistä (Oke 1987: 333–335).



Kuva 6. Näkymä Los Angelesin kaupungista, jossa vallitsee voimakas inversiotilanteen aiheuttama savusumu. Kuva: David Iliff (CC-BY-SA 3.0).

Jotkut ympäristötekijät vaikuttavat myös suoranaisesti tiettyjen paikallisilmastojen syntyyn. Esimerkiksi vesistöjen läheisyys vaikuttaa maa- ja merituulen syntyyn, kun taas korkeuserot vaikuttavat vuori- ja laaksotuulien syntyyn. Oken (1987: 316) mukaan paikalliset tuulijärjestelmät eivät kuitenkaan ole hyviä saasteita laimentavia tuulijärjestelmiä. Ensinnäkin paikallisten tuulten nopeus on yleensä alhainen (< 7 m/s) ja toiseksi järjestelmät ovat suljettuja ja usein päinvastaisia päivisin ja öisin, mikä tarkoittaa sitä, että ilmanvaihto todellisuudessa on hyvin vähäistä. Oke (1987: 317) suosittelee mieluummin tarkastelemaan suursäätälanteita ilmansaasteisiin vaikuttavina tekijöinä kuin paikallisia järjestelmiä, koska ne johtavat säätilanteisiin, joissa tuulen nopeuden ja suunnan vaikutus saasteiden laimenemiseen on hyvin suuri.

3 TUTKIMUSALUE

3.1 Alueelliset ominaispiirteet

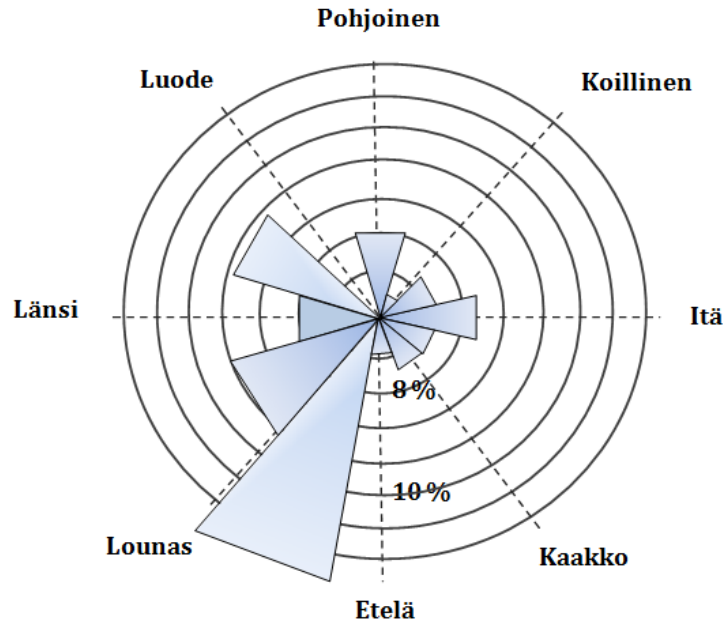
Tutkimusalueena toimii osa Turun ja sitä ympäröivien lähikuntien Kaarinan, Raision, Naantalin ja Paraisten alueesta (kuva 7). Tutkimusalueen pinta-ala on yhteensä 801 km². Asukkaita näissä viidessä kunnassa on yhteensä 268 797; Turku on kuntana väkiluvultaan suurin (178 630) (Väestörekisterikeskus 2012).



- Kuntaraja
- Tutkimuksessa käytetyt ilmanlaadun havaintoasemat

Kuva 7. Tutkimusalue koostuu osasta Turun, Raision, Naantalin, Kaarinan ja Paraisten kuntia. Kuvassa on merkitty pisteillä ilmanlaadun havaintoasemien sijainnit.

Kaikki tutkimusalueen kunnat ovat Itämeren rannikkokaupunkeja. Tutkimusalueen edustalla on iso saaristoalue, jonka vuoksi alueen ilmasto on sekoitus rannikon ja sisämaan ilmastoa. Mantereiset tai merelliset ominaispiirteet voivat tämän vuoksi olla vallitsevia riippuen suursääjärjestelmien sijainneista ja liikkeistä (Alalammi 1987). Turun vuotuinen sademäärä on 723 millimetriä, josta noin 30 % sataa lumena (Turun seudun yhteistyöryhmä 2010: 14; Ilmatieteen laitos 2012b). Tuulen nopeus on viimeisen vuosikymmenen aikana ollut keskimäärin 3,2 m/s ja tuulen suunta puolestaan pääosin lounaan ja etelän välistä (kuva 8).



Kuva 8. Tuuliruuus tuulen suunnasta vuosina 2001–2010 Turun lentoasemalla. Tuulen suunta on havaintojakson aikana ollut selkeästi pääosin lounaan ja etelän välistä.

Tutkimusalueen säähän vaikuttaa Islannin lähistöllä sijaitseva pysyvä matalapainealue ja Azoreiden korkeapainealue eli Pohjois-Atlantin oskillaatio (Rinne et al.: 176–177). Ilmiöstä johtuen Turussa, kuten muuallakin Skandinaviassa, länsituulet ja liikkuvat matalapainealueet ovat yleisiä ja tutkimusalueen sää voi tästä syystä vaihdella nopeasti.

Turun kaupunkirakenne koostuu ruutukaavasta, joka on suorakulmion muotoinen ja noin neljä kilometriä lounaasta koilliseen ja puolitoista kilometriä kaakosta luoteeseen. Pääasialliset maankäyttömuodot ruutukaava-alueella ovat asuintalokorttelit ja puistot. Turun keskusta ympäröi kauppatoria, joka sijaitsee keskellä ruutukaava-alueita. Suurin osa kaupungin puistoista sijaitsee Aurajoen eteläpuolella kun puolestaan teollisuusalueet sijoittuvat hajanaisesti kaupungin keskustan läntiselle ja pohjoiselle puolelle. Turun ja muiden tutkimusalueen kuntien keskustojen ulkopuoliset alueet ovat pääsääntöisesti lähioita, metsiä ja peltoja (Turun kaupunki 2001). Topografialtaan tutkimusalue on vaihtelevaa, mutta suhteellisen alavaa erityisesti Aurajoen ympäristössä ja muualla rannikolla. Korkeimmat kohdat sijoittuvat noin 65 metrin korkeudelle merenpinnasta ja koostuvat pääasiassa avokallioalueista.

Tutkimusalueella on havaittavissa suhteellisen voimakas lämpösaareke rakennetusta ympäristöstä johtuen. Lämpimin kohta on yleensä kaupungin keskusta kun taas tutkimusalueen viileimmät alueet ovat Turun keskustan ulkopuolella metsäisillä ja

maaseutumaisilla alueilla. Turun Kauppatorin ja siitä noin kymmenen kilometriä koilliseen sijaitsevan Niuskalan välillä on maksimissaan mitattu 11 °C lämpötilaero syyskuussa vuonna 2003 (Suomi 2005: 85).

3.2 Ilmanlaatu

Ympäristönsuojelulain 25 § mukaan (YSL 86/2000) kaikkien suurten kaupunkien on huolehdittava ilmanlaadun seurannasta ja raportoitava huonosta ilmanlaadusta asukkailleen. Turussa ilmanlaatua on mitattu jo vuodesta 1988. Vuosiraporteissa on todettu alueen ilmanlaatuun vaikuttavan eniten liikenne ja energiantuotanto (Turun kaupungin yhteistyöryhmä 2010: 1, 9). Energiantuotannon päästöt ovat määrällisesti suuremmat kuin liikenteen päästöt, mutta liikenteen päästöt ovat kuitenkin hengitettävän ilman laadulle haitallisemmat niiden matalan päästökorkeuden takia.

Merkittävimmät vaikuttajat tutkimusalueen rikkidioksidipitoisuuksiin ovat energiantuotannon, teollisuuden ja laivaliikenteen päästöt (Salmi et al. 2009: 29). Rikkidioksidipitoisuudet ovat kuitenkin pieniä ja alittavat raja- ja ohjearvot selvästi. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet syntyvät puolestaan autoliikenteen päästöjen ja kaukokulkeumien vaikutuksesta. Salmen et al. (2009: 30) mukaan autoliikenteen vaikutus hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin on Turun seudulla noin 20–30 %. Tunnittaisten typpidioksidin raja- ja ohjearvojen sekä hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvojen ylityksiä on havaittavissa yksittäisissä paikoissa Turun keskustan läheisyydessä vilkkailla risteysalueilla (Salmi et al. 2009: 1). Tällaisilla alueilla raja- ja ohjearvot eivät kuitenkaan päde. Vuonna 2009 hengitettävien hiukkasten yksittäiset vuorokauden raja-arvot ylittyivät Kauppatorilla seitsemän kertaa. Typpidioksidin yksittäisten tuntien raja-arvot, jotka saavat ylittyä 18 kertaa, ylittyivät kyseisenä vuotena Kauppatorilla vain kerran (Turun seudun yhteistyöryhmä 2010: 1). Kuvasta 9 nähdään, että Turun kaupungin yllä on ajoittain myös silmin havaittavissa lämpötilainversion vaikutuksesta syntyvää savusumua.



Kuva 9. Lämpötilainversion aiheuttamaa savusumua Turun kaupungin yllä 12.3.2004.

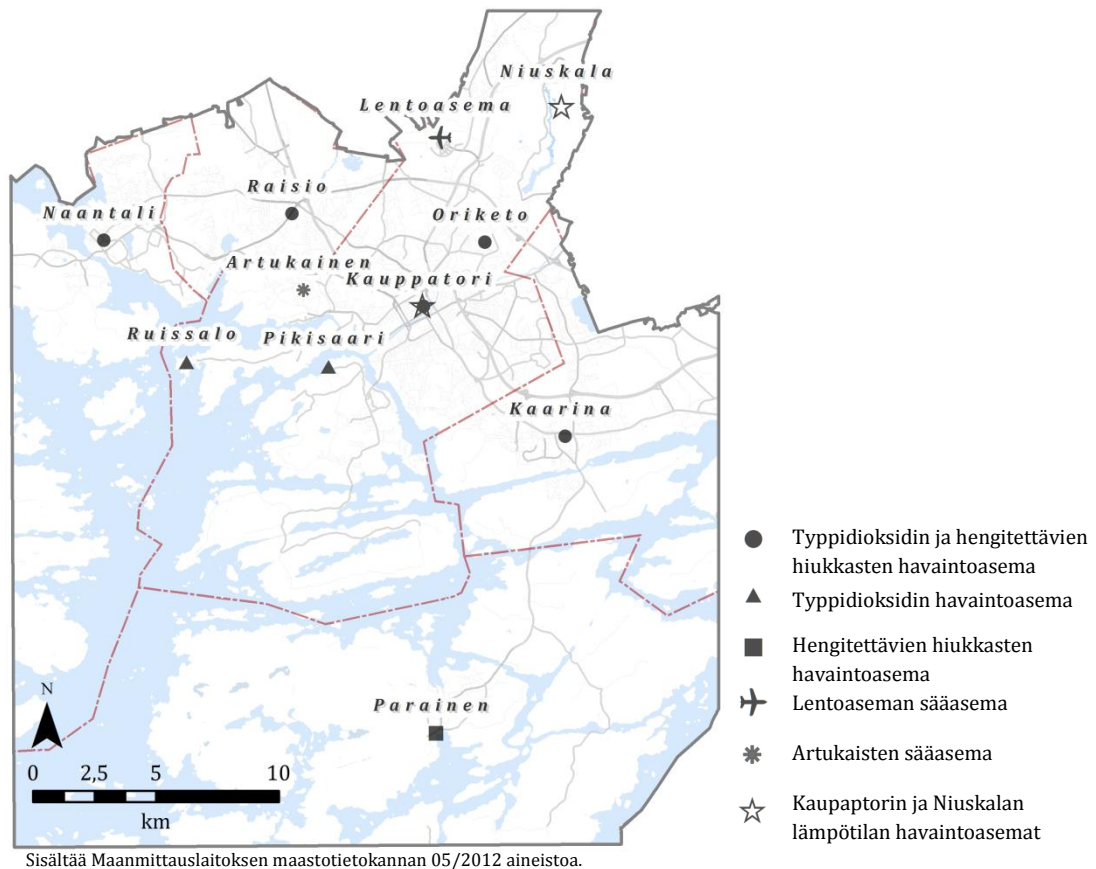
Kuva: J. Käyhkö (2004).

Turun seutua ei ole tutkittu ilmanlaadun näkökulmasta yhtä paljon kuin Helsinkiä. Turun seutua kuvaava leviämismalliselvitys on julkaistu vuonna 2009 (Salmi et al. 2009). Leviämismalliselvitys kuvaa ilmansaasteiden alueellista levinneisyyttä tiettyinä aikoina ja selvityksessä on myös arvioitu eri saastelähteiden aiheuttamia vaikutuksia ilmanlaatuun. Erona Turun kaupungin ilmanlaadun raportteihin on se, että leviämismalliselvityksistä voi saada tietoa ilmansaasteista myös sellaisilta alueilta, joilla ei ole pysyvää ilmanlaadun havaintoasemaa. Leviämismalliselvitys keskittyy kuitenkin lähinnä vuoteen 2007 eikä huonon ilmanlaadun tilanteita ole pyritty selittämään meteorologisesta näkökulmasta lainkaan. Selvityksen mukaan eri päästöjen määrissä (t/a) on vuosien välillä eroja, jotka johtuvat meteorologisten olosuhteiden vaihtelusta vuodesta toiseen. Mitään syvällisempää analyysia näistä ei kuitenkaan käydä läpi tutkimusalueen leviämismalliselvityksessä tai Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmän julkaisemissa vuosiraporteissa. Huonon ilmanlaadun tilanteiden kuvaaminen jää tähänastisissa julkaisuissa yleispiirteiseksi ja yleensä tarkastellaan vain yhtä vuotta kokonaisuutena yksittäisten huonon ilmanlaadun tilanteiden sijaan.

4 AINEISTOT JA MENETELMÄT

4.1 Ilmanlaatuaineisto

Tämän tutkimuksen tekemiseen on käytössä Turun kaupungin ympäristönsuojelutoimiston ilmanlaatuyksikön keräämä ilmanlaatuaineisto vuosilta 2001–2011. Aineisto koostuu typen oksidien, hengitettävien hiukkasten, hiilimonoksidin, rikkidioksidin, otsonin ja kokonaishiukkasmassan tuntikeskiarvoista, jotka ovat peräisin kunnan havaintoverkoston kuuluvilta havaintoasemilta. Tutkimuksessa käytetään vain typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten ilmanlaatuaineistoa, koska näiden parametrien alueellinen ja ajallinen kattavuus on suuri. Tutkimuskohteena on vain osa olemassa olevista ilmanlaadun havaintoasemista, koska pitkäaikaista havaintoaineistoa ei ole kaikilta havaintoasemilta. Tutkielmassa käsitellään ilmanlaatuaineistoa Turun Kauppatorilta, Raisiosta, Ruissalosta, Naantalista, Kaarinasta, Orikedolta, Pikisaaresta ja Paraisilta. Kuvassa 10 on tutkimuksessa käytettyjen ilmanlaadun havaintoasemien sijainnit, ja taulukossa 2 on puolestaan käytettyjen havaintoasemien tekniset tiedot. Alkuperäinen aineisto koostuu minuuttiarvoista, mutta tutkimuksessa käytetään tuntikeskiarvoa. Kaikki ilmanlaadun aineistot on muutettu aurinkoaikaan.



Kuva 10. Tutkimuksessa käytettyjen sääasemien, lämpötilan sekä ilmanlaadun havaintoasemien sijainnit.

Taulukko 2. Tutkimuksessa käytetty ilmanlaadun havaintoasemat, parametrit, tekniset tiedot ja havaintojakso.

Havainto- asema	Para- metrit	Mittauslaite (Automaattinen analysaattori)	Korkeus maan- pinnasta	Ajanjakso
Kauppatori	NO ₂ PM ₁₀	Environnement AC 32M TEOM 1400A	3,5 m	2001–2011
Raisio	NO ₂ PM ₁₀	Environnement AC 31M TEOM 1400A	3 m	2001–2011
Naantali	NO ₂ PM ₁₀	Environnement AC 31M TEOM 1400A	3 m	2001–2011
Ruissalo	NO ₂	Environment AC 31M	3 m	2001–2011
Kaarina	NO ₂ PM ₁₀	Environnement AC 31M ThermoESM FH 62 IR	3,5 m	2004–2011
Oriketo	NO ₂ PM ₁₀	TEI 42i TEOM 1405 DF	3m 4 m	2008–2011
Parainen	PM ₁₀	Thermo 5030 SHARP	4,5 m	2011
Pikisaari	NO ₂	Environment AC 31M	3 m	2011

4.2 TURCLIM-lämpötila-aineisto

Turun yliopiston maantieteen ja geologian laitoksen TURCLIM-kaupunki-ilmastoprojektin havaintoverkosto koostuu noin 70 lämpötilamittarista. Mittarit (Hobo H8 Pro) mittaavat lämpötilaa puolen tunnin välein. Mittaukset alkoivat vuoden 2001 alkupuolella, joten TURCLIM-tietokannasta on saatavilla lämpötilahavainnot koko tutkimusjakson ajalta. Lämpösaarekkeen voimakkuuden mittaamiseksi käytetään lähinnä Kauppatorin ja Niuskalan lämpötila-aineistoa eli havaintopisteiden lämpötilaeroa. Tutkimuksessa käytetään tuntikeskiarvoa, jotta havainnot olisivat vertailukelpoisia muiden aineistojen kanssa.

4.3 Muut aineistot

4.3.1 Säätilanteiden kuvaamiseen käytetyt aineistot

Tutkimuksessa on käytössä Ilmatieteen laitokselta saatu aineisto, joka sisältää havainnot ilmanpaineesta, tuulen suunnasta ja nopeudesta, sademäärästä ja pilvisyydestä Turun lentoasemalla. Vuoden 2006 heinäkuusta lähtien sademääräaineisto on peräisin Ilmatieteen laitoksen sääasemalta Artukaisista, joka sijaitsee noin viisi kilometriä Turun keskustasta luoteeseen. Aineistot ovat UTC-ajassa, mutta jatkotutkimusta varten aineistot

muutetaan aurinkoaikaan, jotta ne olisivat ajallisesti vertailukelpoisia muiden aineistojen kanssa. Sääaineiston tekniset tiedot on esitetty taulukossa 3.

Suursäätilanteiden selvittämisessä käytetään apuna Wetterzentralenin sääkartta-arkistoa (Wetterzentrale 2011) ja Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskukselta saatuja digitaalisia aineistoja ilmanpaineesta (ECMWF 2011). Molemmat aineistot ovat saatavilla UTC-ajassa (klo 00.00). Digitaaliset aineistot ovat alun perin GRIB-muodossa, mutta ovat muutettavissa esimerkiksi NOAA:n (”National Centers for Environmental Prediction”) Degrib-ohjelman avulla shapefile-muotoon, jotta ne voidaan analysoida paikkatieto-ohjelmistossa. Päivittäinen NAO-indeksi on puolestaan ladattavissa NOAA:n internet-sivuilta (CPC 2012).

Taulukko 3. Tutkimuksessa käytetyt sääaineistot ja niiden tekniset tiedot.

Sääparametri	Havaintoasema	Mittauslaite	Korkeus	Havaintoväli
Tuulen suunta	Lentoasema	Vaisala WAA151	10 m	3 h
Tuulen nopeus	Lentoasema	Vaisala WAV151	10 m	3 h
Ilmanpaine	Lentoasema	Vaisala PTB220	1 m	3 h
Sademäärä	Lentoasema	Vaisala FD12P	2,5 m	24 h (kum.)
	Artukainen (1.7.2006–	OTT Pluvio	1 m	12 h (kum.)
Pilvisyys	Lentoasema	Vaisala CL31	1,2 m	3 h
NAO-indeksi	-	-	-	24 h
Sääkartat	-	-	-	24 h (00.00)

4.3.2 Alueellisten ominaispiirteiden kuvaamiseen käytetyt aineistot

Ilmanlaadun ja muiden alueellisten ominaispiirteiden välisen yhteyden selvittämiseen käytetty aineisto löytyy taulukosta 4. Maankäytön ja ilmanlaadun yhteyden selvittämisessä hyödynnetään olemassa olevia paikkatietoaineistoja Turun seudulta. Maanmittauslaitoksen SLICES-maankäyttöaineiston avulla voidaan selvittää maankäytön vaikutusta ilmanlaatuun. Aineisto on rasterimuotoinen, ja sen hilakoko on 10 x 10 metriä. Korkeuserot selvitetään Maanmittauslaitoksen digitaalisen korkeusmallin avulla. Aineisto on rasterimuotoinen, ja sen hilakoko on 2 x 2 metriä. Korkeustiedon tarkkuus on puolestaan 0,3 metriä.

Taulukko 4. Ilmanlaadun ja muiden alueellisten ominaispiirteiden välisen yhteyden selvittämiseen käytetyt aineistot ja niiden tekniset tiedot.

Aineisto	Lähde	Vuosi	Resoluutio
SLICES	Maanmittauslaitos	2010	10 x 10 m
Korkeusmalli	Maanmittauslaitos	2010	2 x 2 m, korkeustieto 0,3 m

4.4 Ilmanlaadun ominaispiirteiden selvittäminen

Tutkimuksen kaksi ensimmäistä tutkimuskysymystä keskittyvät tilanteisiin vuosina 2001–2010, jolloin typpidioksidin pitoisuuden tunnin keskiarvo ylittää numeerisen ohjearvon ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuden vuorokauden keskiarvo ylittää numeerisen raja-arvon ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Aineistot yhdistetään ja muutetaan aurinkoaikaan, jotta ne olisivat ajallisesti vertailukelpoisia.

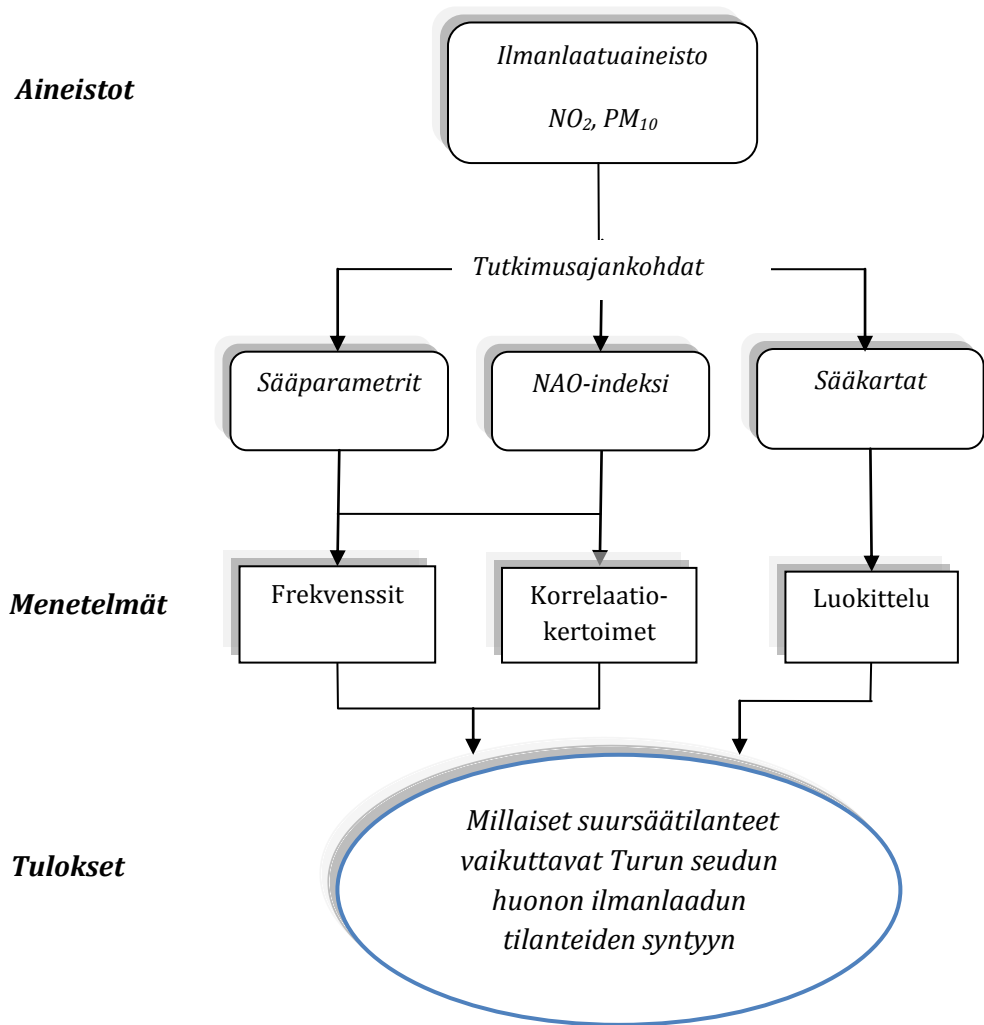
Ilmanlaadun yleisluonnetta tutkitaan tarkastelemalla frekvenssien avulla, miten ilmanlaadun parametrit käyttäytyvät vuosi-, viikko- ja vuorokausitasolla. Rikkidioksidin liittyvät huonon ilmanlaadun tilanteet on hylätty tutkimustapausten vähäisyyden vuoksi. Ilmanlaadun parametrien ja säätekijöiden välillä oleva mahdollinen ajallinen korrelaatio selviää laskemalla Pearsonin korrelaatiokertoimen kaikilla parametreilla. Pearsonin korrelaatiokerrointa on ennenkin käytetty ilmanlaadun ja sääparametrien välisen syy-yhteyden selvittämiseen (esim. Grundström et al. 2011). Korrelaatiokertoimet lasketaan kaikille muille parametreille, paitsi tuulen suunnalle, koska se on asteikoltaan erilainen kuin muut parametrit. Ilmanlaadun sekä tuulen suunnan välistä yhteyttä tarkastellaan tuuliruusujen avulla edellä mainitsemien huonon ilmanlaadun ajankohtina. Kyseessä olevia sääparametreja on hyödynnetty muissakin tutkimuksissa. Esimerkiksi Kalkstein et al. (1987) ovat sitä mieltä, että yhdistämällä edellä kuvatut parametrit (tuulen suunta, nopeus, pilvisuus, ilmanpaine, sadanta, lämpötila) pystytään parhaiten selvittämään huonon ilmanlaadun vaikuttavat säätilanteet. Typpidioksidin tutkimustapauksia on tässä tutkimusvaiheessa 32–56 kun puolestaan hengitettävien hiukkasten tutkimustapauksia on 198. Aineistojen seulomiseksi, frekvenssien ja korrelaatiokertoimien laskemiseksi sekä tulosten havainnollistamiseksi käytetään MS Excel- ja SPSS-ohjelmia. Tuuliruusujen luomiseksi käytetään WindPro 2.7-ohjelmaa.

4.5 Suursäätilanteiden kartoittaminen

Synoptisia säätilanteita on käytetty jo pitkään ilmanlaadun tutkimisessa. Aikaisemmin menetelmät olivat lähinnä manuaalisia, mutta nykyisin ne ovat entistä automaattisempia, ja tilastomenetelmien käyttö on yleistynyt. Vardoulakis ja Kassomenos (2008) ovat käyttäneet pääkomponenttianalyysia ilmanlaadun tutkimisessa kun taas satelliittikuvat, regressioanalyysi tai leviämismallintaminen ovat toimineet menetelminä toisissa tutkimuksissa (esim. Salmi et al. 2009). On mahdollista ennustaa tietyn alueen ilmanlaatua yhdistämällä synoptiset säätilanteet ilmanlaadulliseen näkökulmaan. Esimerkiksi Greene et al. (1999) kehittivät ajallisen synoptisen indeksin ("Temporal synoptic index, TSI"), jonka avulla voidaan ryhmitellä säätilanteita neljässä amerikkalaisessa kaupungissa suhteessa vallitseviin säätilanteisiin. TSI on automaattinen, ja sen avulla voidaan ennustaa nopeasti esimerkiksi tulevien päivien ilmanlaatua sääennusteen parametreilla.

Tutkimuksessa käytetään sääaineiston lisäksi myös sääkarttoja huonon ilmanlaadun taustalla vaikuttavien suursäätilanteiden selvittämiseen. Tarkoituksena on selvittää korkea- ja matalapainekeskuksien sijainnit huonon ilmanlaadun vallitessa, ja tarvittaessa sitä edeltävinä päivinä. Tämän perusteella pystytään vastaamaan siihen, millaiset suursäätilanteet aiheuttavat huonon ilmanlaadun tilanteita Turun seudulla, ja onko ilmanlaadun parametrien välillä eroja näissä tilanteissa. Kuvassa 11 on esitetty edellä mainitut tutkimuksen vaiheet sekä käytetyt aineistot ja menetelmät.

Typpidioksidin osalta tutkimukseen otetaan mukaan ne päivät, jolloin ohjearvo on ylittynyt yhdellä tai useammalla havaintoasemalla, koska ylityksiä on yhteensä suhteellisen vähän (n=32). Hengitettävien hiukkasten osalta tutkimukseen otetaan mukaan puolestaan vain ne tilanteet, jolloin vuorokausiraja-arvo on ylittynyt kahdella tai useammalla havaintoasemalla (n=44). Näin ollen typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten otoskoot ovat suurin piirtein yhtä suuret.

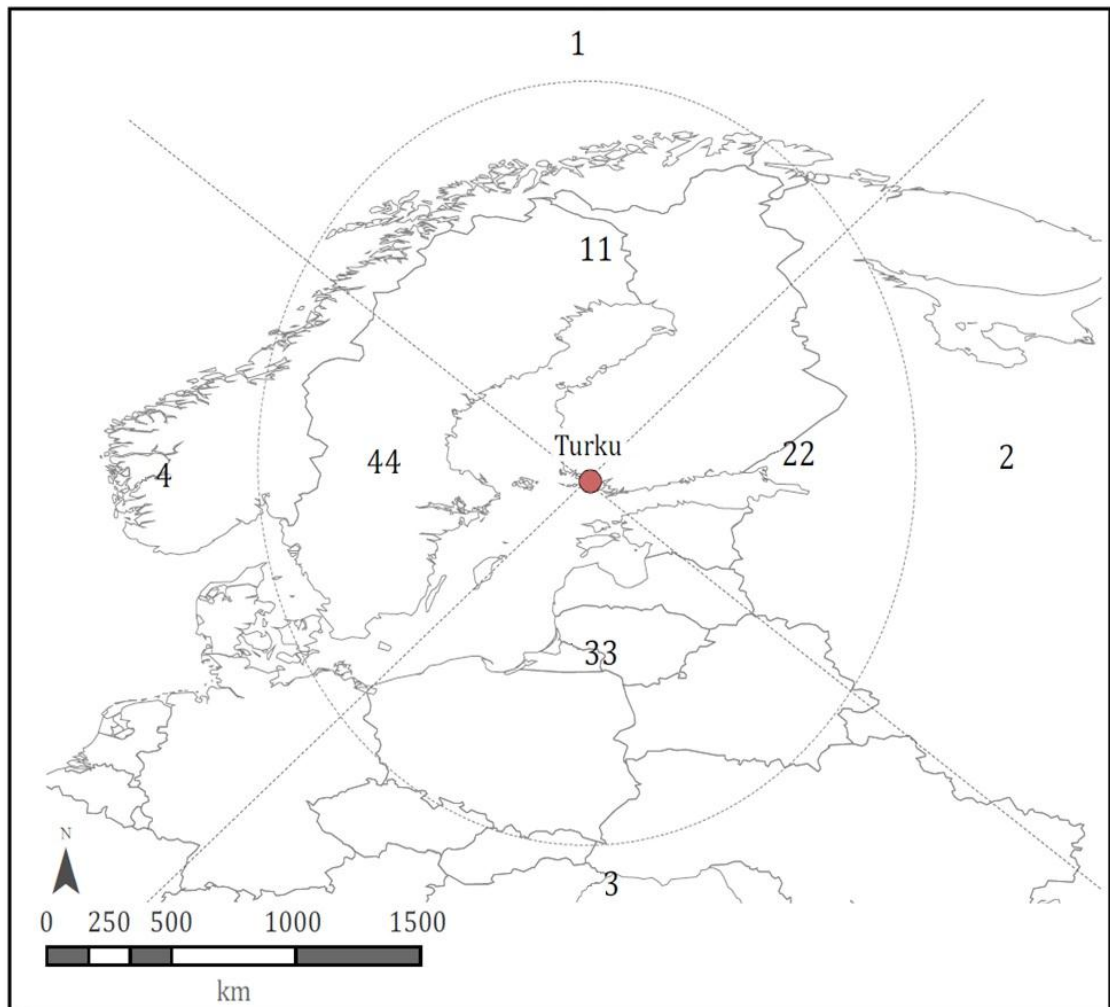


Kuva 11. Vuokaavio aineistoista ja menetelmistä, joita käytetään huonon ilmanlaadun taustalla vaikuttavien suursäätilanteiden selvittämiseksi.

Luokittelun perustana toimivat sääkartoista havaitut ilmanpainekeksuiksi sijainnit suhteessa tutkimusalueeseen (taulukko 5 ja kuva 12). Kvalitatiivinen luokittelu toimii perustana kvantitatiiviselle luokittelulle, joka tehdään käyttäen digitaalisia ilmanpaineaineistoja paikkatieto-ohjelmistossa. Tämä mahdollistaa tulosten havainnollistamisen sääkarttojen avulla. Ilmanpainejärjestelmien sijainnit luokitellaan jokaiselle vuorokaudelle, jonka aikana on esiintynyt huonoa ilmanlaatua. Kvantitatiivinen luokittelu suoritetaan Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskukselta saatujen ilmanpaineaineistojen perusteella ArcMap-ohjelmassa raster-laskimella (ECMWF 2011).

Taulukko 5. Kvalitatiivisessa luokittelussa käytetyt luokkajaot.

Luokka	Alueet
1	Jäämeri
11	Pohjois-Suomi
2	Venäjä
22	Itä-Suomi ja Karjala
3	Keski- ja Etelä-Eurooppa
33	Baltia
4	Atlantti
44	Ruotsi ja Norja



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 12. Kartta ilmanpainejärjestelmien luokitteluperusteesta. Mikäli Suomea lähin matalapaineen keskus sijaitsi Ruotsin yllä, se luokiteltaisiin luvuksi 44 (M44). Mikäli lähin korkeapaineen keskus sijaitsi Venäjällä, se luokiteltaisiin luvuksi 2 (K2). Tämä vuorokausi luokiteltaisiin M44:K2.

4.6 Ilmanlaadun alueellisuuden vaikuttavien ympäristötekijöiden tarkastelu

Ilmanlaatuun vaikuttavien muiden ympäristötekijöiden alueellisen ja ajallisen luonteen kuvaamiseksi on jo yli vuosikymmenen ajan hyödynnetty paikkatietomenetelmiä. Perinteisiä menetelmiä ovat esimerkiksi interpolointi ja leviämismallinnus (Briggs 1992). Paikkatietoaineistojen ja niihin liittyvien ohjelmistojen kehittyttyä alueellisten tilastollisten menetelmien käyttö on yleistynyt. Näistä osa soveltuu hyvin ilmanlaadun tutkimiseen. Esimerkiksi maankäytön regressiomalli ("Land Use Regression Model, LUR") eli LUR-malli on yksi käytetyimmistä menetelmistä.

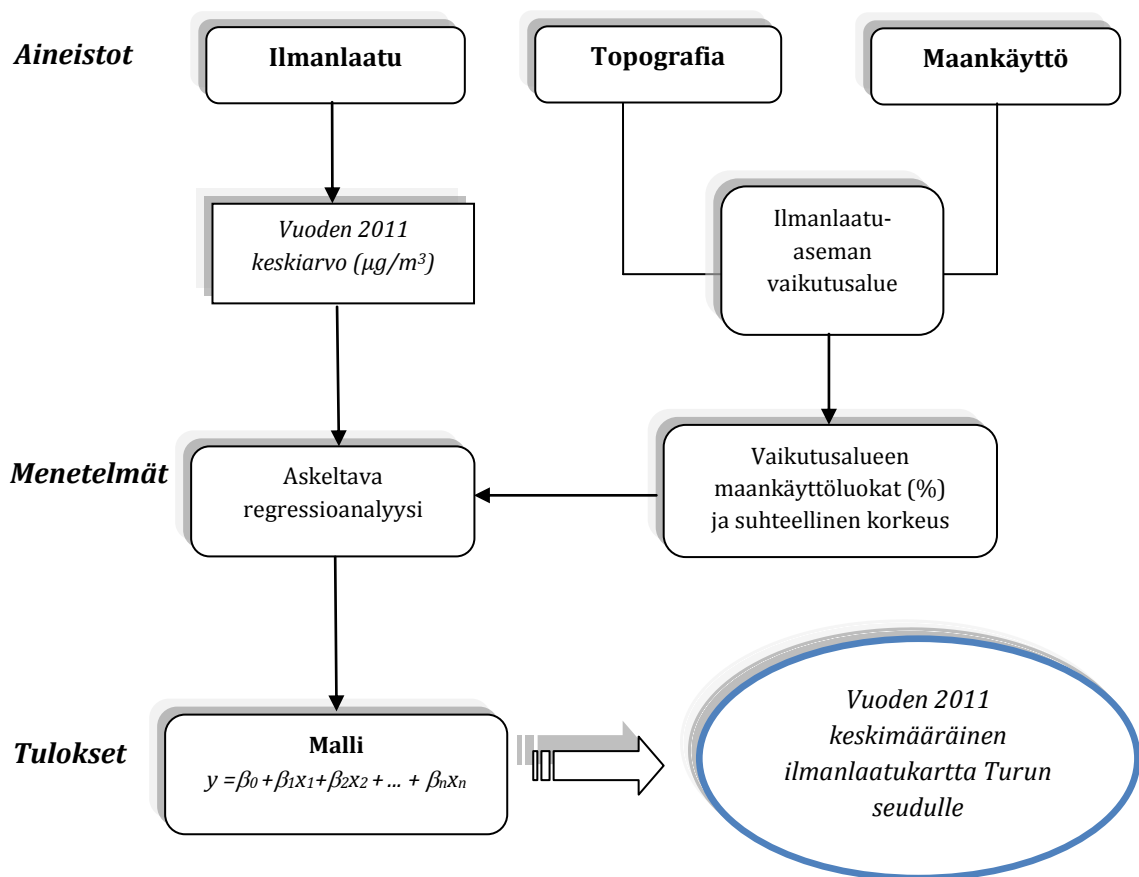
Briggs et al. (1997) käyttivät ensimmäisen kerran maankäyttöregressiota ilmansaasteiden kartoittamiseen tutkiessaan liikenteen päästöihin vaikuttavia ympäristötekijöitä neljässä eurooppalaisessa kaupungissa. Maankäytön regressiomallin tarkoituksena on selvittää, miten ja mitkä ympäristötekijät (riippumattomat muuttujat) selittävät mitattua ilmanlaatua (riippuva muuttuja) jollain alueella regressiomallin avulla. Regressiomallilla pystytään ennustamaan ilmanlaatua parametrien avulla myös paikoissa, joissa ei ole ollut ilmanlaadun havaintoasemaa. Tuloksia voidaan hyödyntää esimerkiksi maankäytön suunnittelussa, kuten koulujen ja asuinalueiden, sijoittelussa.

Maankäyttöregressiota on mielenkiintoista käyttää tutkimusalueen ilmanlaadun ja ympäristötekijöiden välisen riippuvuuden selvittämiseen, koska menetelmää ei ole aikaisemmin sovellettu Turun seudulla. Typpidioksidin ($n=6$) ja hengitettävien hiukkasten ($n=5$) vuoden 2011 aritmeettiset ilmanlaadun keskiarvot toimivat regressiomallissa riippuvina muuttujina. Aikaisemmissa tutkimuksissa otoskoko on ollut huomattavasti suurempi (20–100 havaintoasemaa) (Hoek et al. 2008). Tässä tutkimuksessa yhtenä tavoitteena on selvittää, miten malli toimii Turun alueella, vaikkei havaintopisteitä olekaan paljon.

Nimestään huolimatta maankäytön regressiomallissa voidaan käyttää maankäytön lisäksi myös muita muuttujia. Muuttujien valinta riippuu aina tutkimuksen näkökulmasta, saatavilla olevasta aineistosta ja tutkimusalueen erityispiirteistä. Hoek et al. (2008) tekemän kirjallisuuskatsauksen perusteella potentiaalisia ennustajamuuttujia ovat olleet eri liikenteeseen liittyvät muuttujat, väestötiheys, maankäyttö, korkeustiedot ja säähän liittyvät parametrit. Mahdollisina ennustajamuuttujina tässä tutkimuksessa toimivat taulukon 6 ympäristötekijät. Aineistojen lähteet ja tekniset tiedot on esitetty taulukossa 4. Jotkin aineistot on jouduttu alkuperäisestä suunnitelmasta huolimatta poistamaan huonon

saatavuuden tai liian suuren hilakoon vuoksi. Tällaisia ovat esimerkiksi liikenteen määrä ja väestötiheys.

Turun alueelta on saatavilla melko tarkalla resoluutiolla erilaisia ympäristökijöihin liittyviä paikkatietoaineistoja. Selittävinä muuttujina regressiomallissa toimivat maankäyttö ja suhteellinen korkeus. Maankäyttöloukille lasketaan prosentuaaliset osuudet erikokoisille puskurivyöhykkeille havaintoasemien ympärillä. Kuvassa 10 on maankäytön regressiomallissa käytetyt ilmanlaadun havaintoasemien sijainnit ja kuvassa 13 on puolestaan esitetty maankäyttöregressiomallin eri vaiheet ja aineistot.



Kuva 13. Vuokaavio, joka kuvaa maankäyttöregressioanalyysin eri vaiheet ja käytetyt aineistot. Tavoitteena on maankäytön regressiomallin avulla saada tuloksena vuodelle 2011 keskimääräinen ilmanlaatukartta Turun seudulle.

Puskurivyöhykekokojen valinta ei ole yksiselitteistä, vaan nämä vaihtelevat esimerkiksi muuttujasta ja ympäristöstä riippuen. Esimerkiksi teiden vaikutusta ilmanlaatuun on tutkittu hyödyntäen eri parametreja ja puskurivyöhykkeiden kokoja. Briggs et al. (1997) käyttivät kyseiseen tarkoitukseen etäisyyttä isoihin teihin ja teiden pituutta 350 metrin

puskurivyöhykkeen sisällä. Puolestaan Beelen et al. (2007) käyttivät muuttujana liikennemääriä 100 metrin puskurivyöhykkeen sisällä.

Tässä tutkimuksessa puskurivyöhykkeiden koot ovat suuruudelta 50 metristä kahteen kilometriin. Puskurivyöhykkeet luodaan ArcMap-ohjelmassa ja niiden sisältämien maankäyttöluokkien osuudet selvitetään Spatial Ecology -työkalulla, mikä on ArcMap-ohjelman lisäosa. Ohjelma laskee kaikille puskurivyöhykkeille niiden sisältämät SLICES-aineiston maankäyttöluokat neliömetreissä. Maankäyttöluokkien uudelleenluokittelu ja prosentiosuuksien laskeminen tehdään lopuksi MS Excel -ohjelmaa käyttäen.

Toinen selittävästä muuttujista on suhteellinen korkeus, eli havaintoaseman korkeus merenpinnasta suhteessa puskurivyöhykkeen keskimääräiseen korkeuteen merenpinnasta. Topografian vaihtelu tietyllä alueella kuvaa ilmansaasteiden kykyä levitä ympäristössä. Suhteellinen korkeus sopii absoluuttista korkeutta paremmin Turun seudun ennustajamuuttujaksi vähäisten korkeusvaihteluiden ja havaintoasemien vähäisyyden vuoksi. Suomi & Käyhkö (2012) käyttivät Turun seudulla myös suhteellista korkeutta tutkiessaan ympäristötekijöiden vaikutuksia lämpösaarekkeen voimakkuuteen eri vuodenaikoina. Puskurivyöhykkeiden keskimääräiset korkeudet voidaan selvittää ArcMap-ohjelman Zonal Statistics -työkalun avulla. Suhteelliset korkeudet lasketaan tämän jälkeen MS Excel -ohjelmalla.

Taulukko 6. Maankäytön regressiomallissa käytetyt muuttujat sekä eri puskurivyöhykkeiden koot.

	Muuttujat	Puskuri- vyöhykkeet (m)
<i>Riippuva muuttuja</i>	<u>Ilmanlaatu ($\mu\text{g}/\text{m}^3$):</u> Typpidioksidi Hengitettävät hiukkaset	50, 100, 200, 300, 400, 500, 750, 1000, 2000
<i>Riippumaton muuttuja</i>	<u>Maankäyttö (%):</u> 1. Kerrostaloalueet 2. Pientaloalueet 3. Viher- ja virkistysalueet alueet sekä maa- ja metsätalouden alueet 4. Liikerakennusten alueet 5. Toimistorakennusten alueet 6. Yleisten rakennusten alueet 7. Teollisuusalueet 8. Varastoalueet 9. Liikennealueet 10. Yhdyskuntateknisen huollon alueet 11. Kallio- ja maaperäainesten ottoalueet 12. Vesialueet Suhteellinen korkeus (m)	

Usean muuttujan lineaarisessa regressiossa määritetään lineaarinen yhtälö, joka kuvaa yhden riippuvan ja usean riippumattoman muuttujan välistä suhdetta. Tässä tutkimuksessa lineaarisen regressiomallin luominen tapahtuu IBM SPSS Statistics 19 -tilasto-ohjelman avulla. Algoritmina toimii askeltava regressioanalyysi, mitä suositellaan käytettäväksi, erityisesti kun muuttujien välisistä yhteyksistä ei ole mitään ennakkoletuksia. Askeltava regressioanalyysi lisää ja poistaa muuttujia mallista vaiheittain. Ensin malliin lisätään jokin muuttuja, minkä jälkeen malliin lisätään valituista muuttujista se, joka nostaa selitysastetta eniten. Prosessia jatketaan siihen saakka, kunnes tuloksena on tilastollisesti kaikkein parhaiten sopiva malli.

Regressioyhtälö näyttää seuraavalta:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_nx_n$$

<i>jossa</i>	y	= riippuva muuttuja
	β_0	= vakio
	$\beta_{1\dots n}$	= regressioparametreja
	$x_{1\dots n}$	= riippumattomia muuttujia

Regressioyhtälön avulla on mahdollista mallintaa tutkimusalueen ilmanlaatu ennustajamuuttujien ja mallin vakion avulla. Tässä tutkimuksessa käytetään raster-laskinta mallinnuksen työkaluna ArcMap-ohjelmassa. Lopputuloksena tutkimusalueelle on tarkoitus saada keskimääräinen ilmanlaatukartta tutkimusvuodelle 2011. Tuloksen avulla voidaan saada tietoa ilmanlaadusta myös paikoista, joissa ei alun perin ole ollut ilmanlaadun havaintoasemaa.

4.7 Maankäytön regressiomallin käytettävyyden arviointi

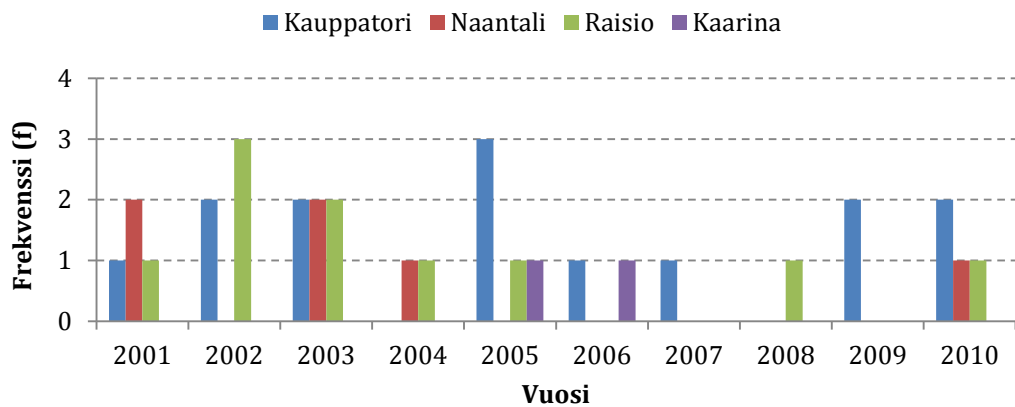
Maankäytön regressiomallin käyttökelpoisuuden ja luotettavuuden arvioiminen on tärkeää ennen laajojen johtopäätöksien tekemistä. Johtopäätökset edellyttävät seuraavia seikkoja: muuttujien välillä on lineaarinen riippuvuus ja jäännöstermien varianssi, jakauma sekä riippumattomuus toteutuvat. Lisäksi mallin tulee olla tilastollisesti merkitsevä, selityskertoimen mahdollisimman suuri ja painokertoimien luottamusvälin tarpeeksi pieni. Muuttujien välillä ei myöskään saa ilmetä multikollineaarisuutta. Muun muassa Taanila (2010: 13) on käyttänyt edellä mainittuja edeltävyyssehtoja kuvatessaan millä perustein lopullinen regressiomalli kannattaa valita.

Edellä mainitut edeltävyys ehdot täyttävä malli testataan lopuksi ristiinvalidoinnin avulla ("Leave-one-out cross-validation"). Ristiinvalidointia käytetään tilastollisen analyysin onnistumisen arvioinnissa. Ilmanlaadun tutkimisessa ristiinvalidointia on sovellettu esimerkiksi maankäytön regressiomallin tarkkuuden ja ennustavuuden arvioinnissa (Brauer et al. 2003; Hochadel et al. 2006). Menetelmässä regressiomallista jätetään pois yksi havaintoasema kerrallaan (n-1). Ennustajamuuttujien avulla ennustetaan tämän jälkeen ilmanlaatu kyseessä olevalle poisjätetyllä paikalla ja verrataan arvoa alkuperäiseen mitattuun tulokseen. Menettelyä toistetaan tietty määrä (n kertaa) ja näin saadaan yleiskuva mallin ennustaneen ja mitatun arvon välisestä vaihtelusta.

5 TULOKSET

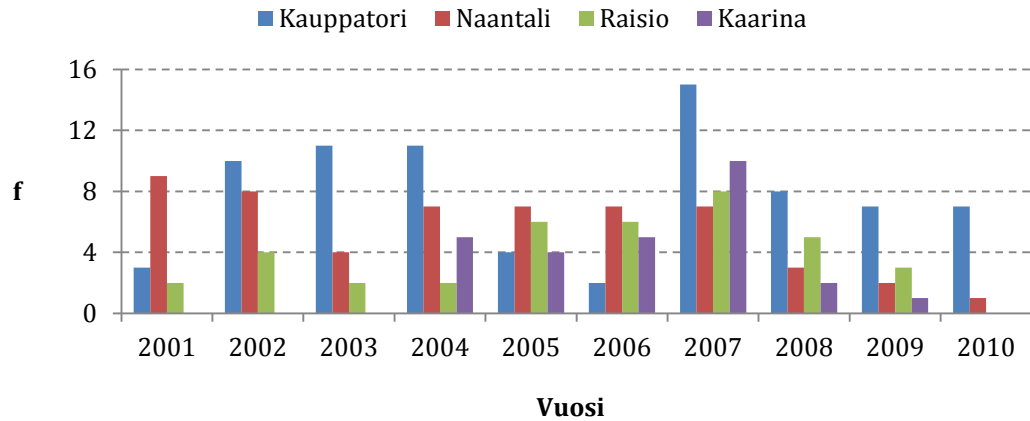
5.1 Ilmanlaadun alueelliset ja ajalliset erityispiirteet

Tutkimusjaksona on havaittavissa eroja vuosien välillä typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten aiheuttamissa huonon ilmanlaadun tilanteiden määrissä. Tulokset vuosien välisistä ilmanlaatueroista on esitetty kuvissa 14 ja 15. Voidaan havaita, että 2000-luvun alussa oli hieman enemmän yksittäisiä typpidioksidin ohjearvojen ylityksiä kuin vuoden 2005 jälkeen. Tiettyinä vuosina (esim. vuonna 2003) on kaikkien havaintoasemien kesken eniten ohjearvon ylittäviä tunteja. Vuodet, jolloin numeerisen ohjearvojen ylityksiä on ollut paljon sijoittuvat kuitenkin hajanaisesti tutkimusjaksolle. Kaiken kaikkiaan yksittäisten ohjearvojen ylitysten määrä on niin pieni (n=32), että on vaikea tehdä johtopäätöksiä siitä, mihin suuntaan ilmanlaatu Turun seudulla on kehittymässä.



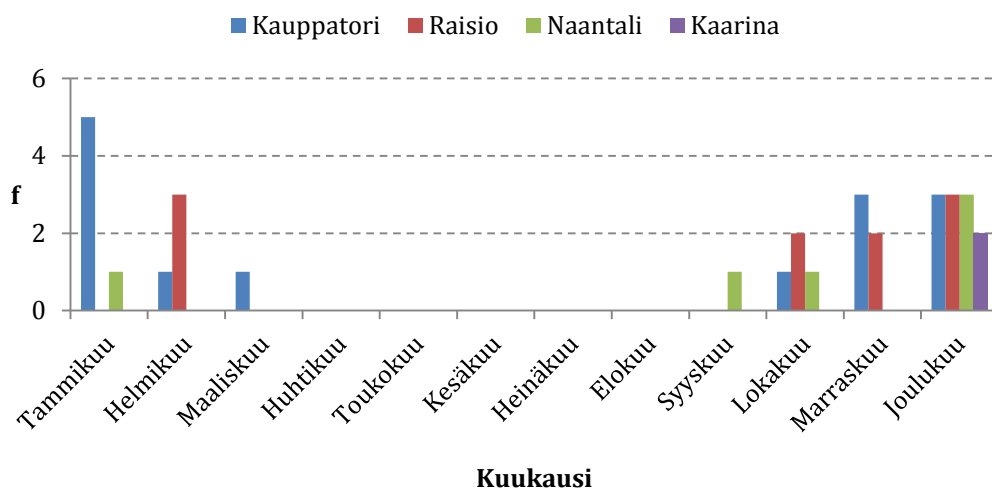
Kuva 14. Korkeita typpidioksidipitoisuuksia (> 150 µg/m³) sisältävien tuntien määrät eri havaintoasemilla Turun seudulla (n=32).

Hengitettävien hiukkasten osalta eniten huonon ilmanlaadun tilanteita (20 % kaikista tutkimusjakson raja-arvon ylittäneistä vuorokausista) esiintyi keväällä 2007. Vuonna 2001 ja 2009–2010 vastaavia vuorokauden raja-arvon ylittäviä vuorokausia oli puolestaan vain alle 10 % kaikista tilanteista. Tämä tarkoittaa sitä, että myös hengitettävien hiukkasten osalta on vaikea tehdä kehitykseen liittyviä yleistyksiä. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten vuotuisissa huonon ilmanlaadun tilanteiden määrissä ei myöskään näytä olevan mitään yhteyttä. Tämä tarkoittaa sitä, ettei hengitettävien hiukkasten kohdalla esiintyvillä korkeilla pitoisuuksilla ole vaikutusta typpidioksidin korkeisiin pitoisuuksiin (vrt. esimerkiksi vuosi 2007).

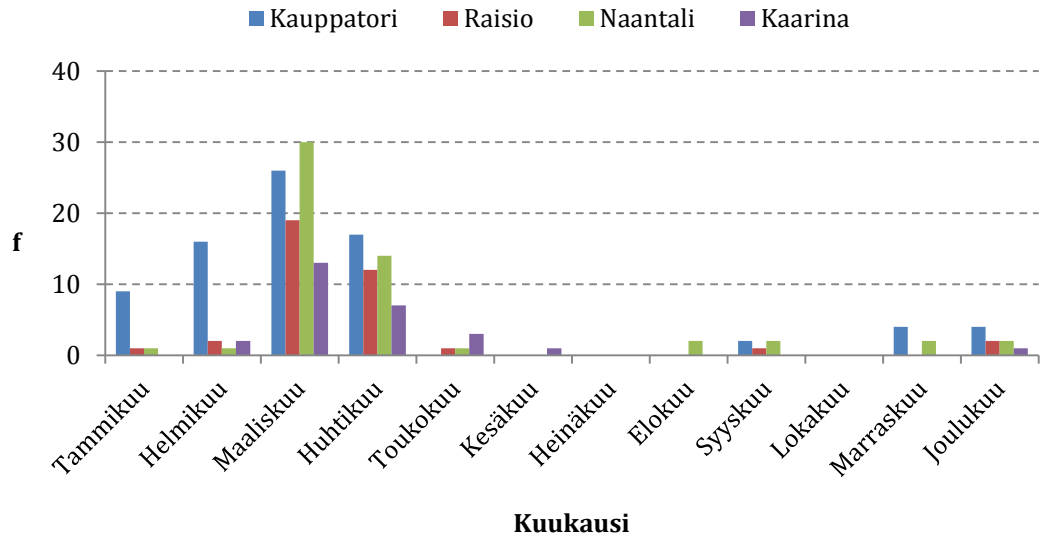


Kuva 15. Tutkimusjakson hengitettävien hiukkasten korkeiden pitoisuuksien vuorokausien määrät Turun seudulla (2001–2010) (n=198). Vuosien välillä on eroja, mutta mitään kehityssuuntaa ei kuitenkaan ole havaittavissa.

Vuosien sisäiset numeerisen ohjearvon ylitysjankohdat ajoittuvat typpidioksidin osalta erityisesti talveen (joulu-, tammi- ja helmikuu) (kuva 16). Hengitettävien hiukkasten yksittäiset vuorokauden raja-arvot ylittyvät puolestaan pääsääntöisesti keväällä (maalis- ja huhtikuu) kaikilla havaintoasemilla (kuva 17).

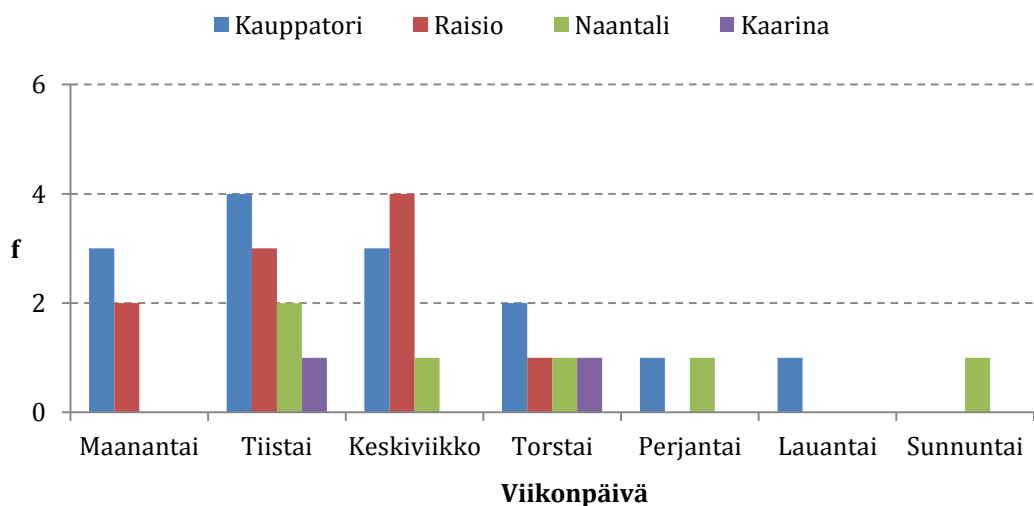


Kuva 16. Yksittäiset typpidioksidin ohjearvot ylittävät tilanteet Turun seudulla eri havaintoasemilla kuukausittain tarkasteltuna (n=32). Huonoa ilmanlaatua esiintyy pääasiassa talvella.



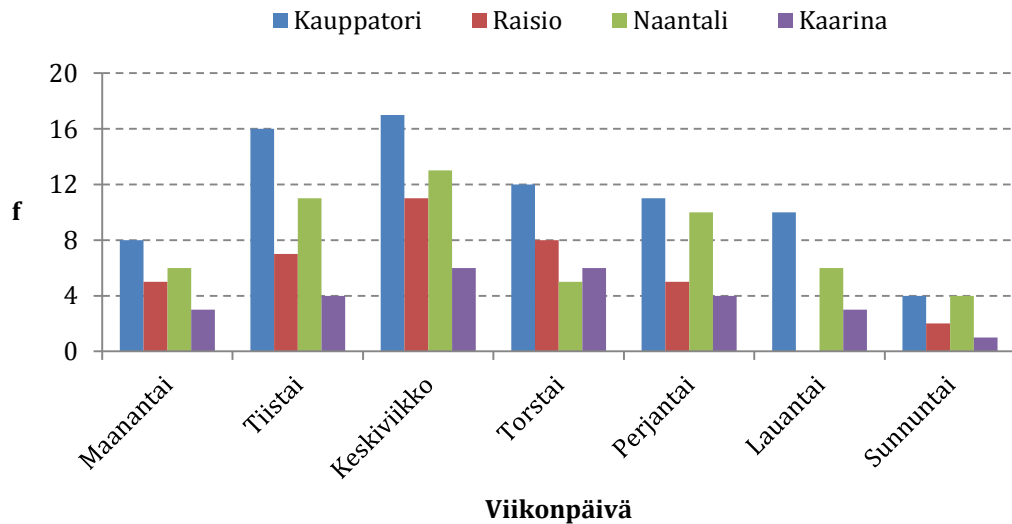
Kuva 17. Turun seudulla hengitettävien hiukkasten raja-arvot ylittäneet päivät kuukausittain tarkasteltuna (n=198). Huono ilmanlaatu on havaittavissa pääasiassa keväällä.

Päiväkohtaisesti tarkasteltuna voidaan todeta, että typpidioksidin yksittäisten tuntien ohjearvojen ylitykset ajoittuvat lähinnä arkipäiviin (kuva 18). Korkeita typpidioksidipitoisuuksia on alkuviikolla hieman loppuviikkoa enemmän. Kauppatorin ja Raision ilmanlaadun voidaan todeta olevan ajallisesti samankaltainen, koska korkeat typpidioksidipitoisuudet ajoittuvat pääosin alkuviikkoon molemmilla havaintoasemilla. Havaintoasemien väliset erot ovat melko pienet. Havaintojen kokonaismäärä on myös niin pieni, että niistä on vaikea tehdä luotettavia johtopäätöksiä Turun seudun viikon sisäisistä eroista ilmanlaadussa.



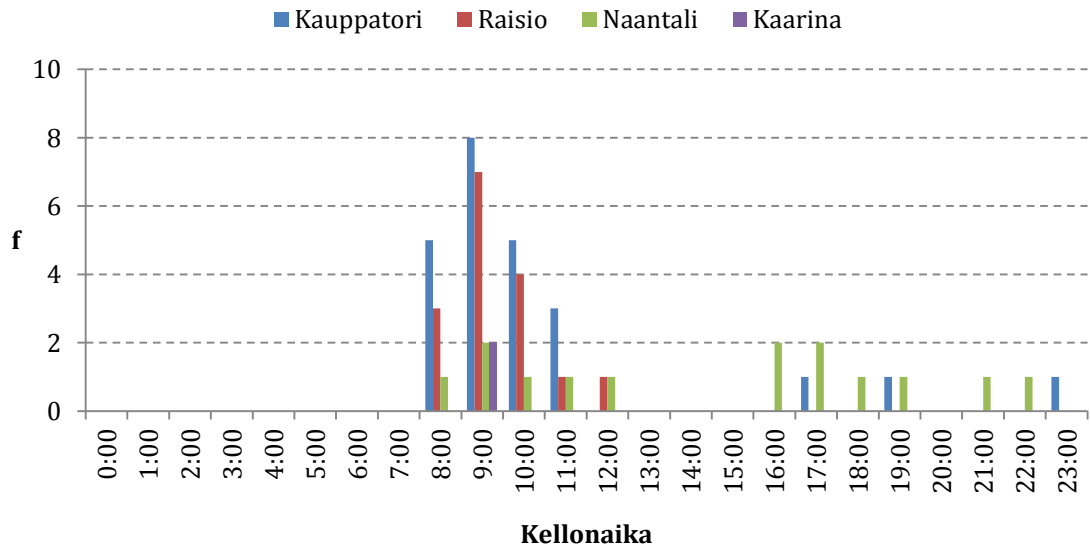
Kuva 18. Yksittäiset typpidioksidin ohjearvojen ylittäneet tilanteet Turun seudulla eri havaintoasemilla viikonpäivittäin tarkasteltuna (n=32). Huono ilmanlaatu ajoittuu pääasiassa alkuviikkoon.

Hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvojen ylitystilanteet ajoittuvat enimmäkseen arkipäiville typpidioksidin kaltaisesti (kuva 19). Keskiviikkoisin on eniten numeerisen raja-arvon ylityksiä. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten välillä on kuitenkin se ero, että hiukkasten osalta myös viikonloppuisin esiintyy jonkin verran huonoa ilmanlaatua lähes kaikilla havaintoasemilla.



Kuva 19. Yksittäisten hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvon ylittäneet tilanteet Turun seudun havaintoasemilla viikonpäivittäin tarkasteltuna (n=198). Huono ilmanlaatu ajoittuu kyseisen parametrin kohdalla pääasiassa arkipäiviin.

Huomionarvoisesti vuorokauden sisäisten typpidioksidin korkeiden pitoisuuksien tutkiminen osoittaa, että ohjearvot ylittävät tunnit ajoittuvat pääasiassa klo 07.00 ja klo 12.00 väliselle ajalle (kuva 20). Hengitettävien hiukkasten aiheuttama huono ilmanlaatu perustuu tutkimuksessa vuorokauden keskiarvoon. Vuorokauden sisäisiä pitoisuuksia ei siten hiukkasten osalta tarkastella lainkaan.



Kuva 20. Typpidioksidin aiheuttaman huonon ilmanlaadun jakauma vuorokauden aikana Turun seudun havaintoasemilla. Mukana on myös saman vuorokauden sisään ajoittuneet ylitykset (n=56), kun puolestaan muissa tutkimuksen kohdissa saman vuorokauden sisään ajoittuneet ohjearvojen ylitykset on laskettu yhdeksi tapaukseksi. Huono ilmanlaatu on tutkimusjaksona ajoittunut pääasiassa aamuun.

Turun ilmanlaadun alueellisuutta voidaan tarkastella vertailemalla havaintoasemien ilmanlaatua keskenään. Vuosina 2001–2010 Kauppatorilla oli eniten typpidioksidin ohjearvojen ylittäviä tunteja (n=14) verrattuna muihin havaintoasemiin (Raisio=10, Naantali=6, Kaarina=3). Erityisesti tammikuussa Kauppatorilla oli enemmän typpidioksidin ohjearvon ylittäneitä tunteja kuin muilla asemilla. Joulukuussa ohjearvon ylittäviä tilanteita oli puolestaan kaikilla havaintoasemilla lähes yhtä monta. Päivittäin tarkasteltuna Kauppatorilla ja Raisiossa oli eniten typpidioksidin ohjearvojen ylittäviä tunteja aamupäivisin, kun taas Naantalissa oli myös iltapäivään ja iltaan ajoittuvia ohjearvojen ylityksiä.

Hengitettävien hiukkasten osalta alueellinen jakauma oli samankaltainen kuin typpidioksidin osalta eli Kauppatorilla oli eniten raja-arvon ylittäviä vuorokausia (n=78) verrattuna muihin havaintoasemiin (Raisio=38, Naantali=55, Kaarina=27). Naantalissa on maaliskuussa ollut poikkeuksellisesti enemmän raja-arvon ylittäviä tunteja kuin Kauppatorilla.

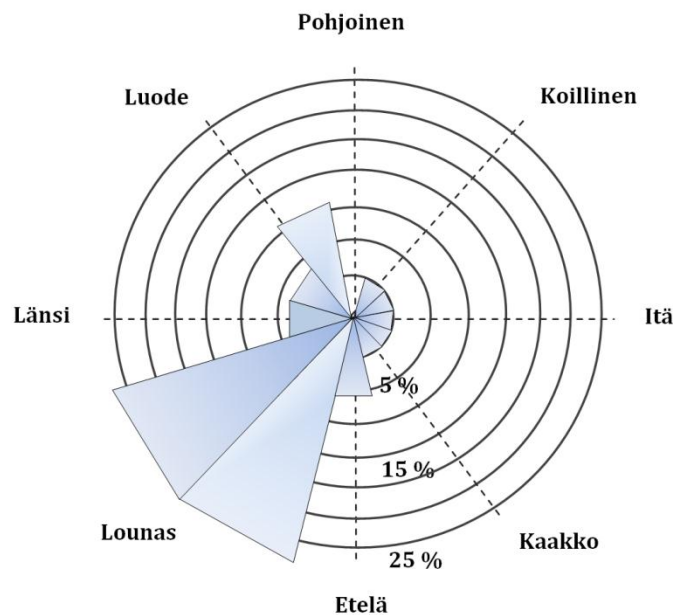
5.2 Säätila ja ilmanlaatu

5.2.1 Yksittäiset sääparametrit huonon ilmanlaadun aikana

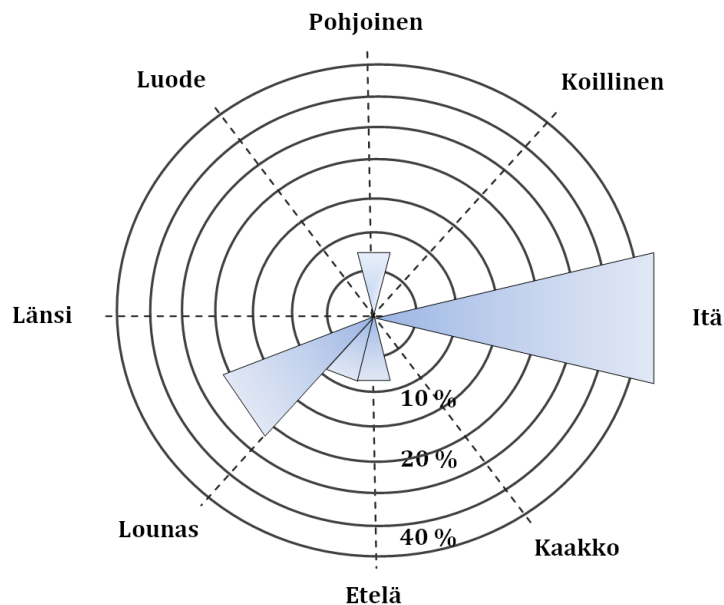
Tuuli

Kaikkien havaintoasemien huonon ilmanlaadun tilanteita tarkasteltaessa on havaittavissa joitain säännönmukaisuuksia. Esimerkiksi typpidioksidin ohjearvojen ylittävinä tunteina on aina ollut heikko tuuli (< 3 m/s). Tuulen nopeus on 63 %:ssa tapauksista ollut alle 1 m/s. Tuulen suunta on tutkimustilanteissa ollut pääasiassa lounaasta (kuva 21). Luoteen ja koillisen väliltä on puolestaan tuullut vähiten. Kuudelle tapaukselle ei ollut mahdollista määrittää tuulen suuntaa, joka vaihteli tuntien välillä liian paljon.

Hengitettävien hiukkasten raja-arvon ylittävinä päivinä tuulen nopeus on usein ollut heikkoa (1–2 m/s). Tuulen suunta oli 50 %:ssa tapauksista idästä ja 23 %:ssa tapauksista lännestä (kuva 22). Tuulen suunnan rajana luokitattelussa pidettiin, että 6/8 kyseisen vuorokauden havainnoista tulee olla samaan 90° tuulen suunnan sektorissa. Tarkkaa tuulen suuntaa oli mahdotonta määrittää 22 tilanteelle.



Kuva 21. Tuuliruusu typpidioksidin huonon ilmanlaadun tuntien aikana vallinneista tuulen suunnista. Tuulen suunta on ollut pääasiassa lounaasta.

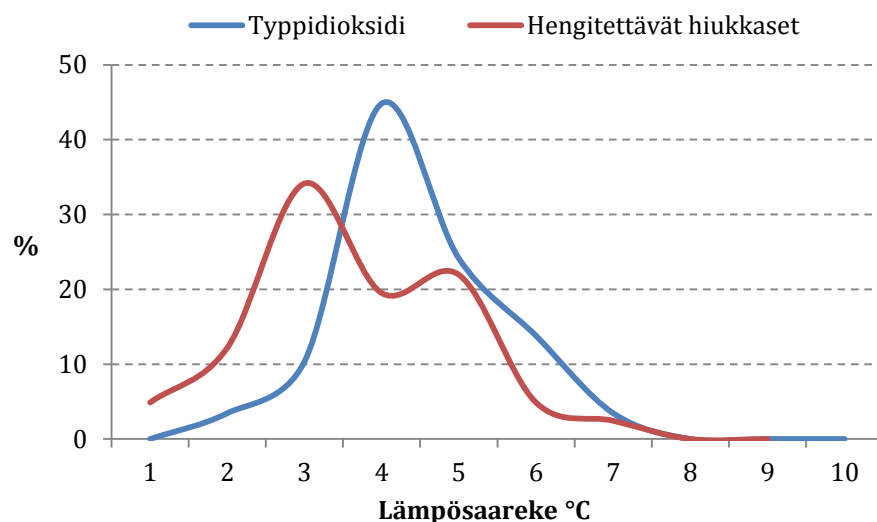


Kuva 22. Tuulirusu hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun vuorokausien aikana vallinneista tuulen suunnista. Tuulen suunta on ollut pääasiassa idästä.

Lämpösaareke

Lämpösaarekkeen voimakkuus saadaan laskemalla Kauppatorin (kaupunki) ja Niuskalan (maaseutu) välinen lämpötilaero. 83 %:ssa tilanteista, jolloin typpidioksidipitoisuudet ovat korkeat, lämpösaareke on voimakas ($> 5\text{ °C}$). Kaikissa typpidioksidin ohjearvon ylittäneissä tilanteissa lämpösaarekkeen voimakkuus on ollut yli kaksi lämpöastetta.

Lämpösaarekkeen voimakkuus on hengitettävien hiukkasten aiheuttaman huonon ilmanlaadun aikana vaihdellut nollan ja kuuden lämpöasteen välillä, sijoittuen pääasiassa yhden ja neljän lämpöasteen välille. Typpidioksidin aiheuttaman huonon ilmanlaadun aikana vallitseva lämpösaarekkeen voimakkuus saadaan vertailukelpoiseksi suhteessa hengitettävien hiukkasten vuorokautiseen lämpösaarekkeen keskiarvoon laskemalla typpidioksidin vastaavat vuorokautiset lämpösaarekkeen keskiarvot ($n=29$). Kyseessä olevien vuorokausien keskiarvo on $4,01\text{ °C}$. Kuvassa 23 on esitetty lämpösaarekkeen voimakkuuden ja ilmanlaadun välinen yhteys.

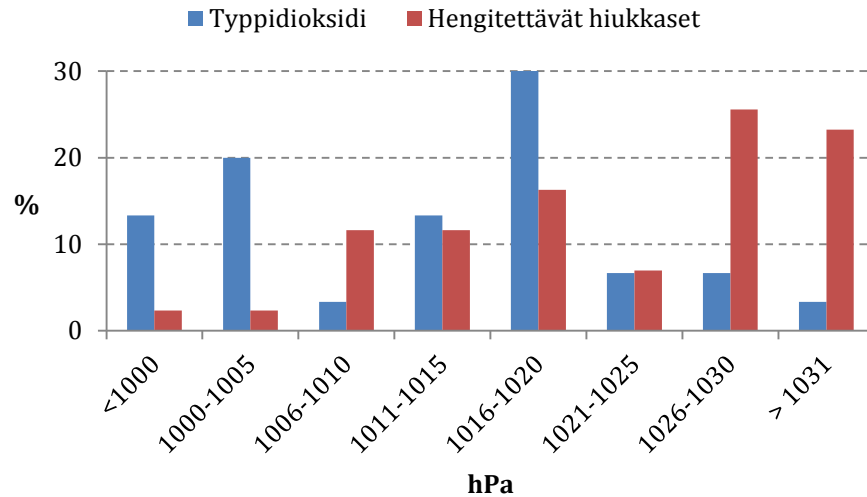


Kuva 23. Lämpösaarekkeen vuorokauden keskiarvo päivinä, jolloin typpidioksidin ohjearvo on ylittynyt jollain Turun seudun ilmanlaadun havaintoasemalla (n=29). Hengitettävien hiukkasten vuorokausiraja-arvo on ylittynyt ainakin kahdella ilmanlaadun havaintoasemalla (n=44). Kuvasta nähdään, että lämpösaareke on ollut suhteellisen voimakas molemmilla ilmanlaadun parametreilla huonon ilmanlaadun aikana.

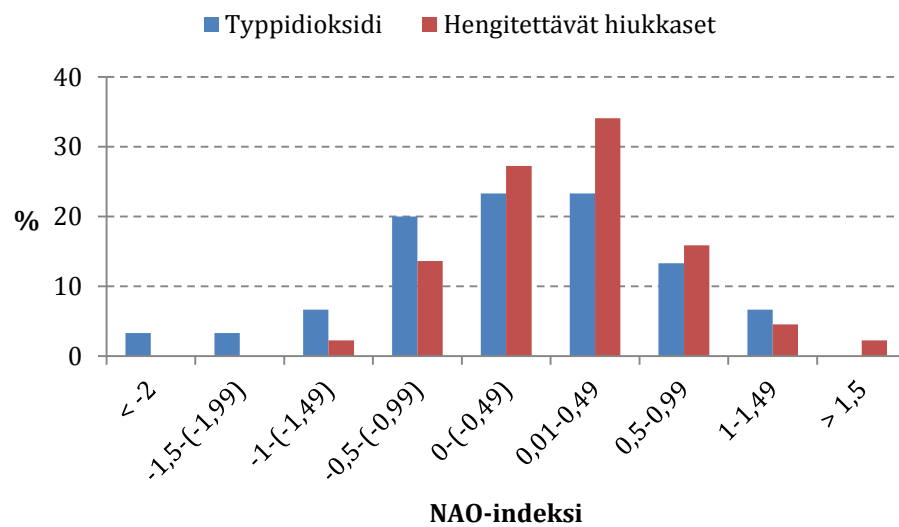
Ilmanpaine ja NAO-indeksi

Typpidioksidin aiheuttaman huonon ilmanlaadun aikana 43 %:ssa tapauksista on ollut matalapainetta (hPa < 1013,5) ja 57 %:ssa korkeapainetta (hPa > 1013,5) (kuva 24). Suurimmassa osassa tapauksista, jolloin typpidioksidin ohjearvo on ylittynyt, NAO-indeksi on vaihdellut +1 ja -1 välillä. Kaiken kaikkiaan NAO-indeksi on 43 %:ssa tilanteista ollut positiivinen ja 57 %:ssa tilanteista negatiivinen (kuva 25). Tilanne ei kuitenkaan ole aina ollut se, että NAO-indeksin negatiiviset lukemat merkitsevät korkeapainetta, vaikka edellä mainitut prosenttilukemat näin sattumoisin indikoivat.

Hengitettävien hiukkasten aiheuttaman huonon ilmanlaadun vuorokausina 81 %:ssa esiintyy korkeapainetta. Suuruudeltaan yli 1026 hPa korkeapainetta esiintyy yli 40 %:ssa tutkimuspäivistä. NAO-indeksin jakauma negatiivisen ja positiivisen välillä on samoin kuin typpidioksidin kohdalla ollut melko tasainen. NAO-indeksi on suurimmalta osin (56 %) ollut positiivinen vuorokausina, jolloin hiukkaspitoisuudet ovat olleet korkeat.



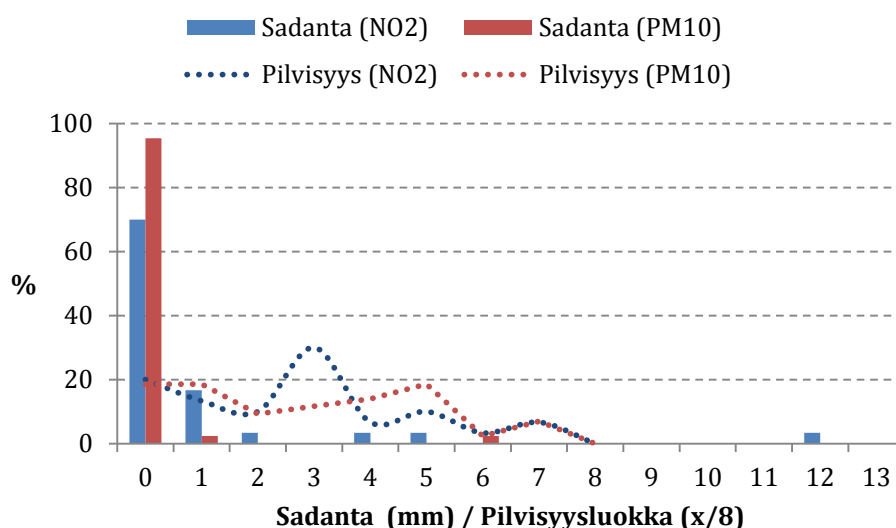
Kuva 24. Ilmanpaineen jakauma tapauksissa, jolloin ohjearvo on ylittynyt jollain Turun seudun ilmanlaadun havaintoasemista typpidioksidin osalta (n=30) tai vastaavasti hengitettävien hiukkasten osalta (vuorokauden raja-arvo ylittynyt kahdella tai useammalla ilmanlaadun havaintoasemalla, n=44). Kuvasta havaitaan, että hengitettävien hiukkasten aiheuttamissa huonon ilmanlaadun tapauksissa ilmanpaine on ollut korkeampi kuin typpidioksidin vastaavissa tapauksissa.



Kuva 25. NAO-indeksin jakauma typpidioksidin (n=30) ja hengitettävien hiukkasten (n=44) huonon ilmanlaadun tapauksissa. Tuloksesta nähdään, että NAO-indeksin jakauma ei ole ollut sen enempää negatiivinen kuin positiivinenkaan huonon ilmanlaadun aikana vaan on pikemminkin tasainen nollan molemmiin puolin.

Sadanta ja pilvisyys

Sateettomuuden ja huonon ilmanlaadun välinen yhteys on Turun seudulla merkittävä. Jopa 70 %:ssa typpidioksidin aiheuttamista huonon ilmanlaadun päivistä, jolloin typpidioksidin ohjearvo ylittyy jollain havaintoasemalla, on edeltävän vuorokauden kumulatiivinen sademäärä ollut nolla millimetriä. Pilvisyysluokkien välinen jakauma on tutkimustilanteissa puolestaan ollut melko tasainen, mutta erityisesti typpidioksidin huonon ilmanlaadun tilanteissa sää on ollut selkeästä verrattain selkeään (pilvisyysluokka ≤ 3). Hengitettävien hiukkasten aiheuttaman huonon ilmanlaadun aikana 95 %:ssa vuorokausista ei ole satanut yhtään ja pilvisyys on vaihdellut selkeästä pilviseen (pilvisyysluokka 0–7). Kuvassa 25 on havainnollistettu sadannan ja pilvisyyden yhteys huonon ilmanlaadun tilanteisiin.



Kuva 25. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten aiheuttaman huonon ilmanlaadun tapausten sademäärät (NO₂ n=30, PM₁₀ n=44 (pylväät)) ja pilvisyys (NO₂ n=30, PM₁₀ n=43 (katkoviivat)). Tuloksesta nähdään, että huonon ilmanlaadun aikana on ollut vähäsateista ja erityisesti typpidioksidin osalta selkeää tai puolipilvistä.

On mahdotonta esittää tuloksia typpidioksidipitoisuuksien havaintoasemien välisistä alueellisista eroista suhteessa ilmanlaatuun vaikuttavista säätekijöistä, koska tutkimustapauksia havaintoasemittain on vähän (Kauppatori n=15, Raisio n=10, Naantali n=5, Kaarina n=2). Hengitettävien hiukkasten kohdalla tutkimuskohteena on puolestaan vain ne vuorokaudet, jolloin raja-arvo on ylittynyt useammalla kuin yhdellä havaintoasemalla. Tämä tarkoittaa sitä, että alueelliset erot supistuvat entisestään kyseessä olevan ilmanlaadun parametrin kohdalla. Asemakohtaisia säätietoja ei lisäksi tutkimusjaksolta juuri ollut käytettävissä, vaan kaikkien havaintoasemien säätiedot

tulevat Turun lentoasemalta tai Artukaisista. Tämä tarkoittaa sitä, että sään paikallisia vaikutuksia olisi mahdotonta arvioida, vaikka alueellisia eroja olisikin havaittavissa.

5.2.2 Sääparametrien ja ilmanlaadun välinen korrelaatio

Kaikki sääparametrit (tuulen suunta ei mukana laskuissa) korreloivat tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,01$ tai $p < 0,05$) ilman typpidioksidipitoisuuksien kanssa (taulukko 7). Voimakkaimmat korrelaatiokertoimet esiintyvät typpidioksidipitoisuuksien ja lämpösaarekkeen sekä tuulen nopeuden välillä. Lämpösaarekkeen korrelaatio on positiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä lämpimämpi keskusta on verrattuna maaseutuun, sitä korkeammat ilman typpidioksidipitoisuudet ovat. Tuulen nopeuden ja typpidioksidipitoisuuden välinen korrelaatio on puolestaan negatiivinen, mikä tarkoittaa että mitä korkeammat typpidioksidipitoisuudet ovat, sitä heikompi tuuli on. Korrelaatiokerroin on suurin Kaarinan typpidioksidipitoisuuksien ja sääparametrien välillä ilmanpainetta lukuunottamatta kaikissa tapauksissa. Havaintoasemien väliset erot ovat kuitenkin marginaalisia.

Taulukko 7. Typpidioksidipitoisuuksien ja sääparametrien väliset korrelaatiokertoimet eri havaintoasemilla Turun seudulla. Typpidioksidipitoisuudet korreloivat tilastollisesti merkitsevästi kaikkien taulukossa esitettyjen sääparametrien kanssa.

Havainto- asema	Lämpö- saareke	Ilman- paine	Sadanta	Pilvisuus	NAO- indeksi	Tuulen nopeus
Kauppatori	0,30** (n=71 022)	0,14** (n=25 089)	-0,12** (n=3621)	-0,04** (n=22 596)	-0,07** (n=3621)	-0,31** (n=25 052)
Raisio	0,42** (n=69 245)	0,14** (n=23 172)	-0,14** (n=3551)	-0,06** (n=20 800)	-0,05** (n=3551)	-0,38** (n=23 136)
Naantali	0,30** (n=70 296)	0,18** (n=23 894)	-0,11** (n=3605)	-0,05** (n=21 439)	-0,04* (n=3605)	-0,30** (n=23 861)
Kaarina	0,50** (n=56 303)	0,15** (n=18 080)	-0,15** (n=2460)	-0,13** (n=15 613)	-0,10** (n=2460)	-0,42** (n=18 048)

** = Tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,01

* = Tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,05

Sääparametrit (tuulen suunta ei ole huomioitu laskuissa) korreloivat tilastollisesti merkitsevästi ($p < 0,01$) ilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien kanssa Turun seudulla Naantalien NAO-indeksiä lukuun ottamatta (taulukko 8). Korrelaatiokertoimet ovat suurimmassa osassa tapauksista samaa luokkaa, tai hiukan heikompia kuin typpidioksidin vastaavissa tapauksissa. Ainoastaan sadannan ja pilvisyyden

korrelaatiokertoimet ovat suurempia hengitettävien hiukkasten osalta kuin typpidioksidin vastaavat kertoimet. Suurin ero hengitettävien hiukkasten ja typpidioksidin välillä on se, että NAO-indeksin ja typpidioksidin välinen korrelaatio on positiivinen, kun taas hengitettävien hiukkasten vastaava korrelaatiokerroin on negatiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä positiivisempi NAO-indeksi on, sitä korkeammat ovat ilman hiukkaspitoisuudet. Voimakkaimmat korrelaatiot löytyvät hiukkaspitoisuuksien ja ilmanpaineen välillä. Havaintoasemien väliset erot korrelaatiokertoimien osalta ovat puolestaan marginaalisia. Suurimmat erot ilmanlaadun parametrien välillä löytyvät lämpösaarekkeen ja tuulen nopeuden korrelaatiokertoimista, jotka ovat huomattavasti voimakkammat typpidioksidin kuin hengitettävien hiukkasten osalta.

Taulukko 8. Korrelaatiokertoimet havaintoasemien hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien ja sääparametrien välillä. Korrelaatiokertoimet ovat useimmiten tilastollisesti merkitseviä.

Havainto- asema	Lämpö- saareke	Ilman- paine	Sadanta	Pilvisuus	NAO- indeksi	Tuulen- nopeus
Kauppatori	0,11** (n=73 095)	0,19** (n=25 426)	-0,17** (n=3590)	-0,13** (n=22 939)	0,05** (n=3590)	-0,08** (n=25 389)
Raisio	0,13** (n=73 375)	0,18** (n=25 508)	-0,14** (n=3618)	-0,12** (n=23 059)	0,04** (n=3618)	-0,11** (n=25 471)
Naantali	0,07** (n=74 012)	0,17** (n=25 742)	-0,15** (n=3626)	-0,09** (n=23 276)	0,06** (n=3626)	-0,06** (n=25 706)
Kaarina	0,15** (n=59 193)	0,13** (n=19 604)	-0,15** (n=2486)	-0,14** (n=17 130)	0,01 (n=2486)	-0,11** (n=19 569)

** = Tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,01

* = Tilastollisesti merkitsevä tasolla 0,05

5.2.3 Suursäätilanteet huonon ilmanlaadun aikana

Typpidioksidi

Kvalitatiivisen luokittelun perusteella Turun seudulla typpidioksidista johtuva huono ilmanlaatu syntyy kahdenlaisessa tilanteessa (taulukko 9) (ks. kuva 10 ja taulukko 11 luokitteluperusteista). Korkeita typpidioksidipitoisuuksia esiintyy kun matalapaineen keskus sijaitsee Atlantilla tai Länsi-Euroopassa, ja korkeapaineen keskus sijaitsee Keski-Euroopassa tai Baltiassa (M4:K3/33). Toisessa yleisimmässä tilanteessa lähin matalapaine keskus sijaitsee puolestaan Suomen pohjoisosassa tai pohjoispuolella Jäämerellä ja korkeapaine keskus Atlantilla tai Länsi-Euroopassa (M1/11:K4/44). Taulukossa 10 on esitetty kahden yleisimmän säätilanteen ajankohdat. Yleisimmät huonoa

ilmanlaatua aiheuttavat säätilanteet sijoittuvat eri aikaan, eikä esimerkiksi yhdelle monta päivää kestäväälle ajanjaksolle. Tämä tekee tuloksesta melko luotettavan suhteellisen pienestä otoskoosta huolimatta.

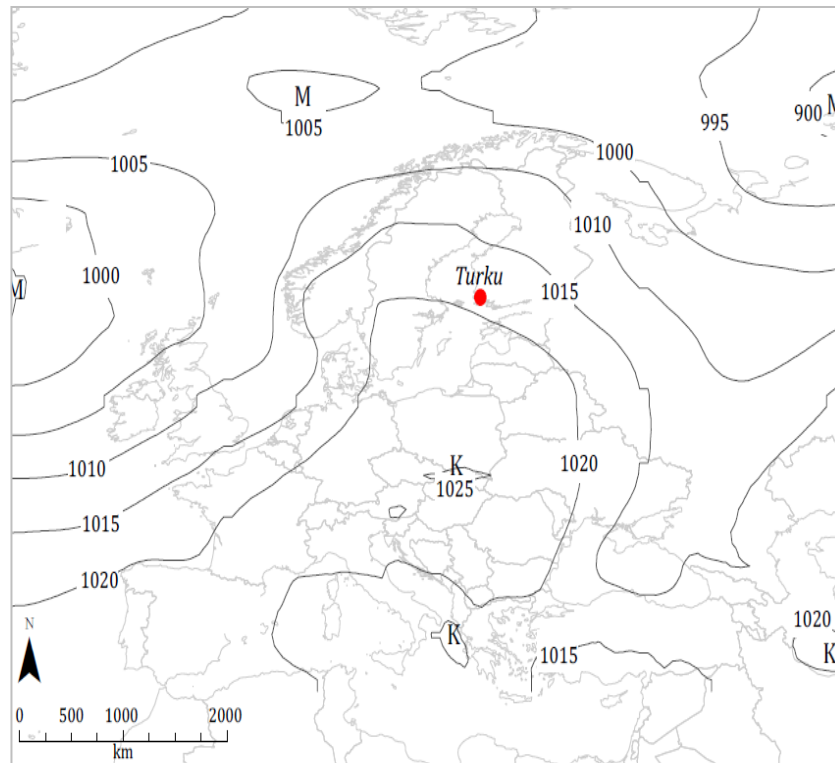
Taulukko 9. Kvalitatiivisen luokittelun tulokset typpidioksidin korkeiden pitoisuuksien aikana vaikuttavista suursäätilanteista (n=30). Taulukosta havaitaan kaksi säätilannetta, joita esiintyy useimmiten korkeiden typpidioksidipitoisuuksien aikana (M1/11:K4/44 ja M4:K3/33).

		Korkeapaine (K)							
		1	11	2	22	3	33	4	44
Matalapaine (M)	Luokka								
	1							4	1
	11			1				2	
	2					1		2	2
	22					1	1		
	3								
	33					1		1	
	4		1	1		6	1	2	1
44			1						

Taulukko 10. Kaksi yleisintä suursäätilannetta, jotka esiintyvät typpidioksidin numeerisen ohjearvojen ylittävänä vuorokausina, sekä niiden ajankohdat.

M4:K3/33	M1/11:K4/44
30.9.2001 (M4:K3)	1.3.2002 (M1:K4)
13.11.2003 (M4:K33)	16.11.2005 (M11:K4)
9.12.2003 (M4:K3)	14.12.2005 (M1:K4)
23.1.2004 (M4:K3)	19.12.2006 (M1:K4)
21.12.2004 (M4:K3)	5.1.2009 (M1:K44)
25.10.2005 (M4:K3)	8.1.2009 (M1:K4)
27.10.2010 (M4:K3)	8.11.2010 (M11:K4)

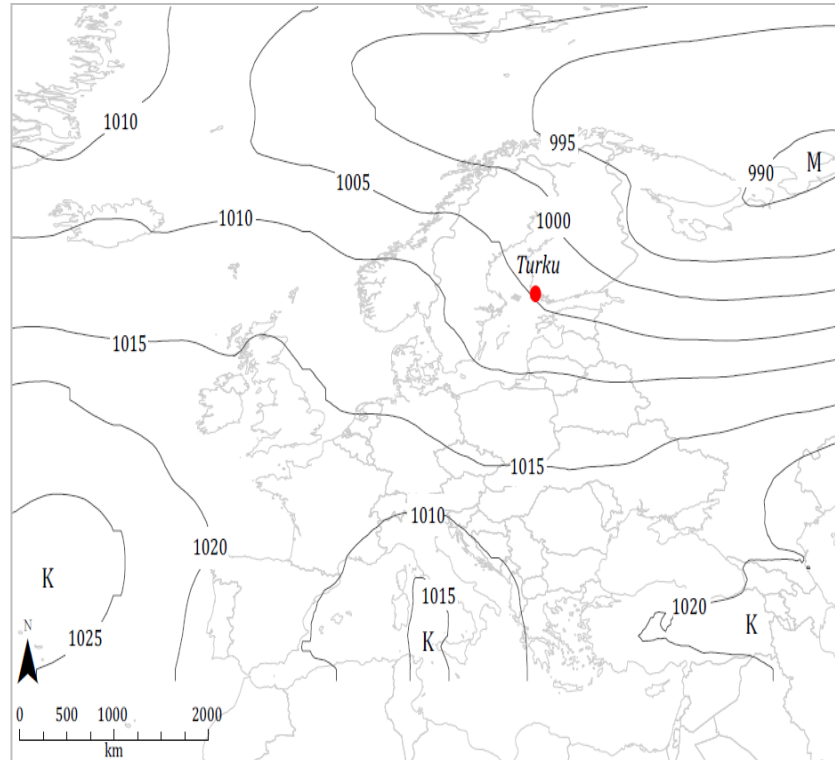
Kvalitatiivisen luokittelun tulosten perusteella laskettiin yleisimmille huonoa ilmanlaatua aiheuttaville säätilanteille ilmanpaineiden keskiarvot. Tulokset ovat typpidioksidin osalta esitetty kuvissa 26 ja 27. Tapauksessa M4:K3/33 Keski-Euroopan yllä on korkeapaineen keskus ja Pohjois-Atlantilla sekä Venäjän pohjoisosassa matalapaineen keskus. Tutkimusalue sijaitsee kahden ilmanpainekeksuksen välimaastossa, minkä takia ilmavirtaus on luoteesta tai lännestä. Isobaarien tiheydestä voi päätellä, että tuulen nopeus on ollut melko heikko.



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 26. Yksi kahdesta yleisimmästä säätilanteesta, jonka aikana on ollut typpidioksidin yksittäisiä ohjearvojen ylityksiä tutkimusjaksona ($> 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ($n=7$). Säätilannetta kuvaa matalapaineen keskuksen sijoittuminen Pohjois-Atlantille ja Pohjois-Venäjälle, sekä korkeapaine keskuksen sijoittuminen Keski-Euroopan yläpuolelle (M4:K3/33).

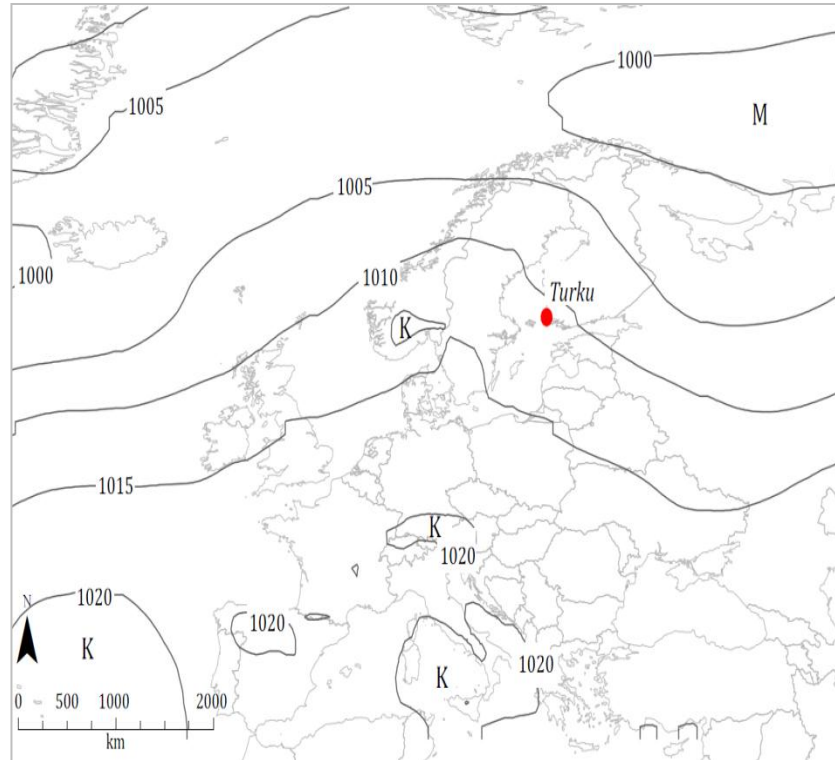
Toisessa yleisimmässä korkeiden typpidioksidipitoisuuksien yhteydessä esiintyvässä säätilanteessa Suomen koillispuolella on laaja matalapaineen keskus. Lähin korkeapaineen keskus sijaitsee Etelä-Euroopassa (M1/11:K4/44). Tuulet puhaltavat luoteesta, ja isobaarien tiheydestä päätellen tuulen nopeus on kyseisen säätilanteen vallitessa ollut heikkoa.



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 27. Toinen kahdesta yleisimmästä säätilanteesta, joka on aiheuttanut typpidioksidin numeerisen ohjearvon ylityksiä tutkimusjaksona ($n=7$). Säätilannetta kuvaa matalapaineen sijoittuminen tutkimusalueen koillispuolelle (M1/11:K4/44).

Kuvassa 28 on esitetty isobaarien keskiarvo kaikista vuorokausista, jolloin typpidioksidipitoisuus on ainakin yhtenä tuntina ylittänyt numeerisen ohjearvon yksittäisellä Turun seudun ilmanlaadun havaintoasemalla. Venäjän pohjoisosassa sijaitseva erittäin laaja matalapaineen alue sekä Euroopan keskiosassa sijaitseva korkeapaineen keskus näyttävät hallitsevan Suomen säätä. Muita selkeitä ilmanpainekeskuksia tutkimusalueen lähellä ei ole havaittavissa. Isobaarit kulkevat lähes itä-länsisuuntaisesti tutkimusalueen läpi. Isobaarien sijoittuminen ja pyörteisyys muistuttavat suihkuvirtauksia ja Rossbyn aaltojen pohjois-etelä-suuntaista aaltoliikettä. Rossbyn aallot syntyvät lämpötilaeroista johtuvan kylmän ilman liikkeessä päiväntasaajaa kohti ja lämpimän ilman liikkeessä napoja kohti. Suihkuvirtauksien kuviot ovat mielenkiintoisia siksi, että ne määräävät suursäätilyä koko Euroopan kokoiselle alueelle. Suihkuvirtauksien sijoittumista ja Rossbyn aaltojen käyttäytymistä huonon ilmanlaadun yhteydessä voisi tutkia isobaarikarttoja paremmin painepintojen korkeuskarttojen avulla.



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 28. Keskimääräinen ilmanpaine kaikkien typpidioksidin kohdepäivien aikana (n=30). Tilanteissa tutkimusalueen säätä hallitsee Venäjän pohjoisosassa sijaitseva laaja matalapaineen alue.

Huonoa ilmanlaatua voi tarkastella monesta näkökulmasta. Yksi tapa edellisten lisäksi on tarkastella sitä, mitkä säätilanteet aiheuttavat tutkimusjakson korkeimmat typpidioksidipitoisuudet. Kymmenen päivää, jolloin typpidioksidipitoisuudet ovat olleet tutkimusjakson korkeimmat, on esitetty taulukossa 11. Tulokset ovat samansuuntaisia kuin edellä on esitetty, eli toisin sanoen yleisimmät huonon ilmanlaadun aiheuttavat säätilat ovat myös yhteydessä tilanteisiin, jolloin on huonoin ilmanlaatu. Kolmessa tilanteessa matalapaineen keskus sijaitti lännessä ja korkeapaine etelässä (M4:K3). Huomioitavaa on myös, että kaikissa kymmenessä tilanteessa lähimmän korkeapaineekeskuksen sijainti on ollut joko tutkimusalueen etelä- tai länsipuolella.

Taulukko 11. Kymmenen päivää, jolloin on ollut korkeimmat typpidioksidipitoisuudet sekä näiden vuorokausien aikana vaikuttavat suursäätilanteet. Korkeimmat typpidioksidipitoisuudet aiheutuvat erilaisista säätilanteista.

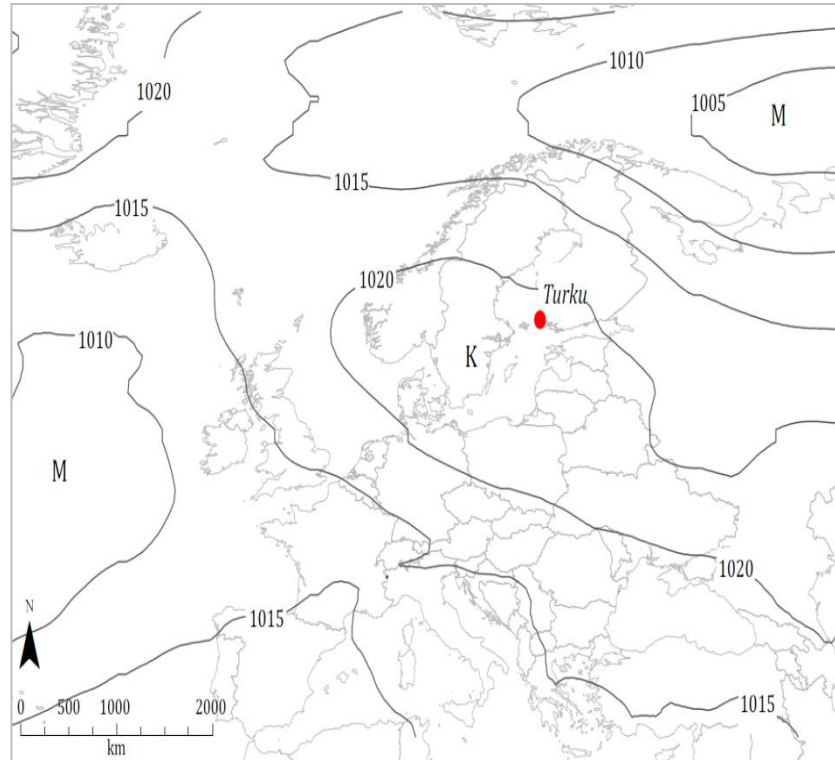
Top 10 NO ₂	Päivämäärä	Kellonaika	Sijainti	Pitoisuus (µg/m ³)	Luokka
1	25.11.2003	11-12	Raisio	253	M22:K33
2	8.11.2010	9-10	Kauppatori	236	M1:K4
3	8.1.2009	8-9	Kauppatori	214	M1:K4
4	10.11.2001	9-10	Kauppatori	201	M2:K4
5	9.12.2003	10-11	Naantali	194	M2:K3
6	23.12.2003	16-18	Naantali	184	M4:K3
7	30.10.2002	8-9	Raisio	182	M4:K3
8	13.11.2003	7-8	Raisio	179	M4:K3
9	29.1.2007	8-9	Kauppatori	178	M2:K4
10	1.12.2005	10-11	Kaarina	175	M33:K4

Hengitettävät hiukkaset

Hengitettävien hiukkasten osalta on havaittavissa kaksi tyypillistä säätilannetta, jotka esiintyvät raja-arvon ylittävien vuorokausien yhteydessä (> 50 µg/m³) (taulukko 12). Raja-arvon ylittäneinä vuorokausina matalapaineen keskus sijaitsee 23 %:ssa tapauksista tutkimusalueen pohjoispuolella Jäämerellä ja korkeapaineen selänne ulottuu aina Itä-Euroopasta tutkimusalueen länsipuolelle Ruotsin, Norjan ja Atlantin yläpuolelle (M1/11:K4/44) (kuva 29).

Taulukko 12. Kvalitatiiviseen luokitteluun perustuvat tulokset hengitettävien hiukkasten korkeiden pitoisuuksien aiheuttamista suursäätilanteista (n=44). Taulukosta havaitaan säätilanteiden M1/11:K4/44 ja M4/44:K2/22 olevan yleisimpiä säätilanteita hengitettävien hiukkasten aiheuttaman huonon ilmanladun aikana.

		Korkeapaine (K)							
Luokka		1	11	2	22	3	33	4	44
Matalapaine (M)	1			3	1			3	6
	11							1	
	2		2		1				3
	22					2			
	3			2	1			1	
	33								
	4	2		4	5		1	1	2
	44				1			2	

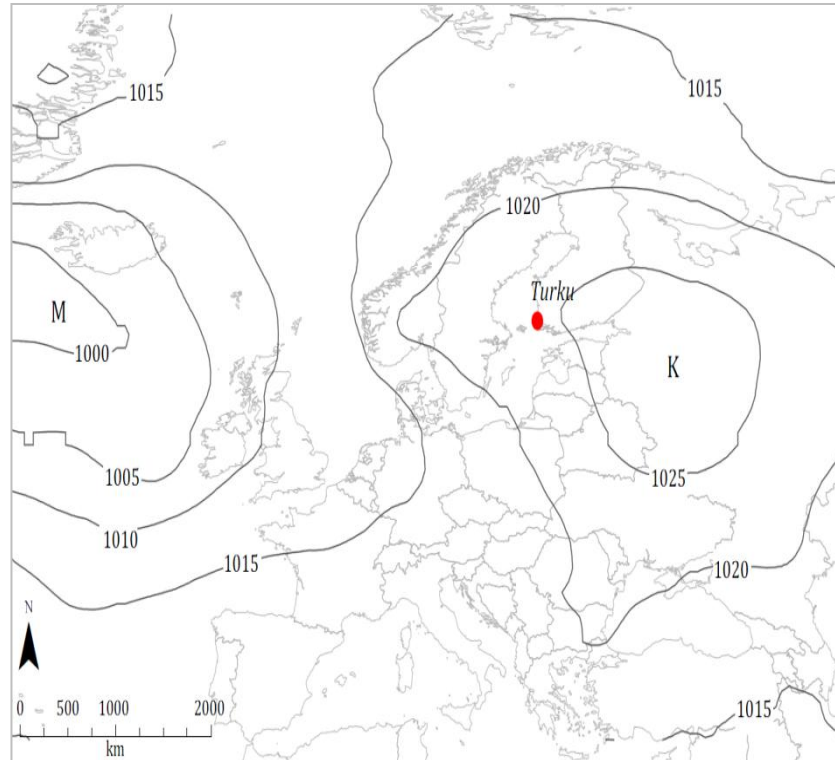


Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

Kuva 29. Ensimmäinen kahdesta yleisimmästä säätilanteesta, joka vallitsee hengitettävien hiukkasten vuorokauden numeerisen raja-arvon ylittäneinä päivinä ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ($n=10$). Säätilannetta kuvaa matalapaineen sijoittuminen tutkimusalueen pohjoispuolelle ja korkeapaineen selänteen sijoittuminen tutkimusalueen etelä- ja luoteispuolelle (M1/11:K4/44).

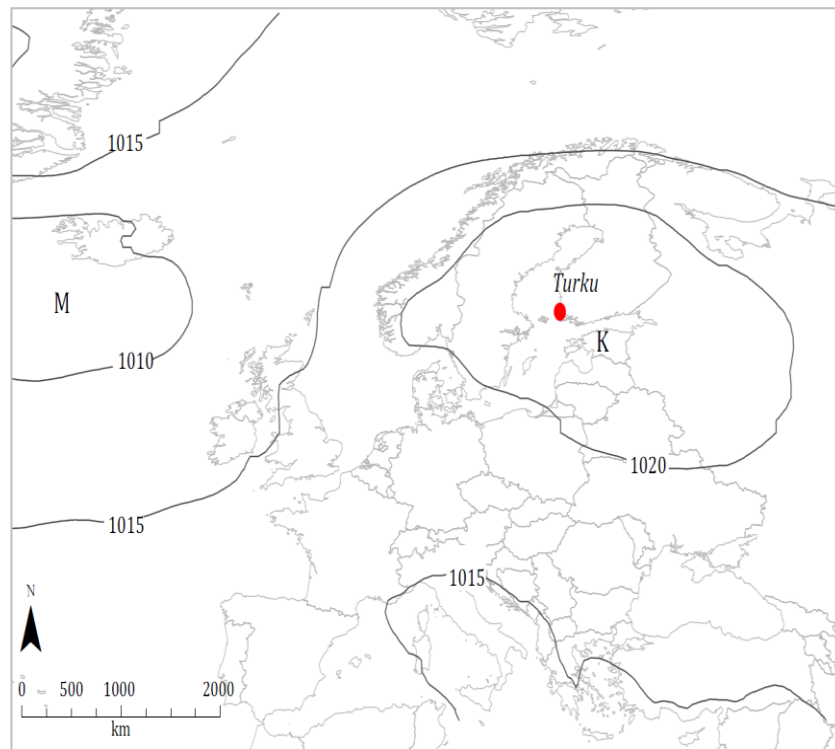
Hengitettävien hiukkasten raja-arvot ylittyvät 23 %:ssa tapauksista vuorokausina, jolloin matalapaineen keskus on tutkimusalueen länsipuolella (M4/44) ja korkeapaineen keskus puolestaan tutkimusalueen itäpuolella (K2/22) (kuva 30). Suurimmassa osassa näistä tapauksista korkeapaineen keskus sijaitsee Suomen itäosassa tai Karjalassa (K22).

Kuvassa 31 on esitetty ilmanpaineen keskiarvo niistä päivistä, jolloin hengitettävien hiukkasten raja-arvo on ylittynyt. Tulos tukee kuvien 29 ja 30 tuloksia siitä, että laaja korkeapaineen tilanne mataline tuulen nopeuksineen on vallitseva säätila, kun hengitettävien hiukkasten raja-arvot ylittyvät.



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA)

Kuva 30. Toinen yleisin säätilanne hengitettävien hiukkasten raja-arvon ylittävänä vuorokausina (n=10). Säätilaa kuvaa matalapaineen keskuksen sijoittuminen tutkimusalueen länsipuolelle ja korkeapaineen keskuksen sijoittuminen tutkimusalueen itäpuolelle (M4/44:K2/22).



Sisältää aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA)

Kuva 31. Kaikkien hengitettävien hiukkasten kohdepäivien keskimääräinen ilmanpaine (n=44). Hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun tilanteissa vallitsee selkeästi korkeapaine.

Taulukossa 13 on esitetty ne tutkimusjakson kymmenen vuorokautta, jolloin hengitettävien hiukkasten pitoisuus oli korkeimmillaan jollain Turun seudun ilmanlaadun havaintoasemalla. Viitenä vuorokautena kymmenestä on kuvan 30 tapainen säätilanne (M4:K2/22), eli matalapaine sijaitsee Atlantilla ja korkeapaine sijaitsee joko Suomen itäosassa tai Venäjällä. Seitsemänä vuorokautena korkeapaine sijaitsee aivan Suomen lähetyvillä joko idässä tai lännessä. Myös toinen kahdesta yleisimmästä säätilanteesta, joka esiintyy korkeiden hiukkaspitoisuuksien aikana (M1:K44), esiintyy kolmena kymmenestä huonoimman ilmanlaadun sisältämistä vuorokausista.

Taulukko 13. Kymmenen vuorokautta, jolloin hengitettävien hiukkasten pitoisuudet olivat korkeimmillaan vuosina 2001–2010.

Top 10 PM₁₀	Päivämäärä	Sijainti	Pitoisuus (µg/m³)	Luokka
1	13.12.2007	Raisio	174	M4:K44
2	3.4.2010	Kauppatori	140	M4:K2
3	27.3.2007	Raisio	117	M1:K44
4	3.4.2008	Kauppatori	113	M4:K4
5	4.3.2003	Kauppatori	114	M4:K22
6	13.3.2004	Kauppatori	114	M4:K22
7	2.2.2009	Kauppatori	114	M1:K22
8	2.4.2008	Kauppatori	111	M4:K2
9	26.3.2007	Raisio, Kaarina	102, 104	M1:K44
10	7.2.2007	Kauppatori	97	M44:K4

M= Matalapaine, K = Korkeapaine

Hengitettävien hiukkasten osalta on mahdollista tarkastella tilanteita, jolloin vuorokauden raja-arvo on pysytellyt korkeana kauemmin kuin yhden päivän. Tutkimusjakson pisin yhtämittainen aikaväli, jolloin vuorokauden raja-arvo ylittyi päivittäin, tapahtui 24.3.–30.3.2007. Alla on kuvailtu suursäätilanteiden käyttäytyminen huonon ilmanlaadun jakson päivinä. Taulukossa 14 on kyseessä olevien päivien kvalitatiiviseen luokitteluun perustuvat suursäätilanteet ja kuvassa 32 karttakuvasarja jakson ilmanpaineolosuhteista.

24.–25.3.2007 Matalapaineen keskus sijaitsi Suomen etelä-/länsipuolella ja korkeapaineen keskus Suomen itäpuolella. Tuulen nopeus oli noin 3 m/s huonon ilmanlaadun jakson ensimmäisenä päivänä, jonka jälkeisenä vuorokautena tuulen nopeus heikentyi puoleen. Tuuli puhalsi ensin idästä ja muuttui toisena päivänä kaakon ja lounaan

väliseksi. Ilmanpaine oli korkeimmillaan jakson ensimmäisinä vuorokausina (> 1036 hPa). NAO-indeksi oli positiivinen ja pilvisuus muuttui puolipilvisestä selkeään.

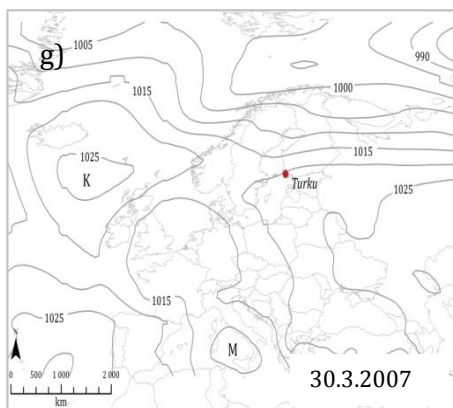
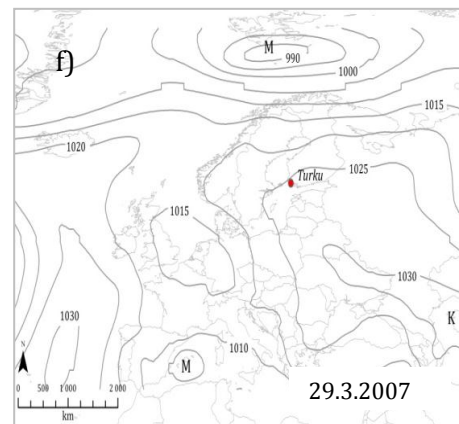
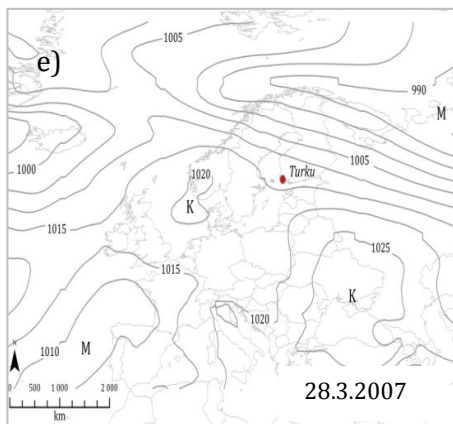
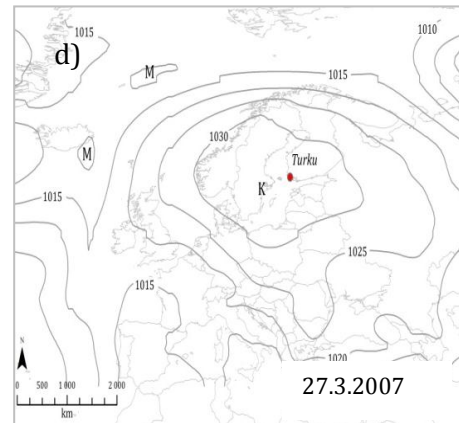
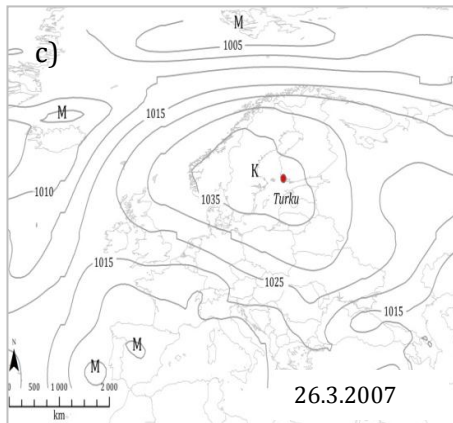
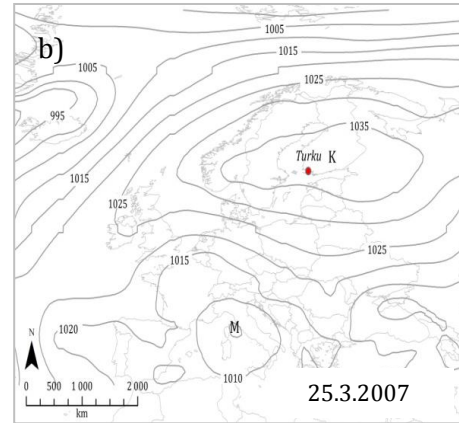
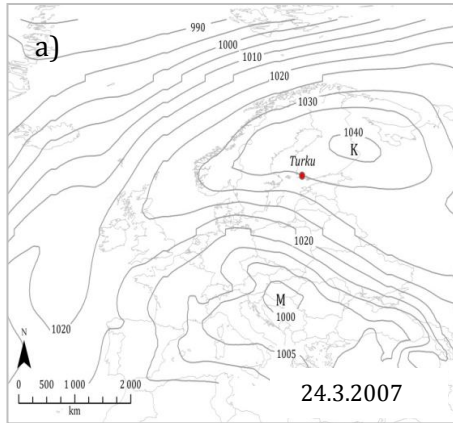
26.-27.3.2007 Matalapaine sijaitsi Suomen pohjoispuolella Jäämerellä ja korkeapaine Suomen lähettyvillä Skandinavian länsiosassa. Tuulen nopeus heikentyi entisestään, ja tuuli puhalsi ensin lännestä muuttuen 27. päivänä vaihtelevaksi. Ilmanpaine pysyi melkein samoissa lukemissa kuin edellisinä päivinä. NAO-indeksi läheni nollaa ja taivas oli pilvetön.

28.-29.3.2007 Matalapaine sijaitsi Suomen länsi-/pohjoispuolella Atlantilla ja korkeapaine liikkui Suomen eteläpuolelle Baltian maiden tienoille. Korkeapaine liikkui itään 29. päivän aikana. Tuulen nopeus kasvoi hieman, mutta pysyi silti heikkona (2–3 m/s) ja tuuli puhalsi etelästä. Ilmanpaine laski hieman. NAO-indeksin arvo oli lähellä nollaa ja taivas oli pilvetön.

30.3.2007 Matalapaine sijaitsi Suomen pohjoispuolella Jäämerellä ja korkeapaine sijaitsi Atlantilla. Tuulen nopeus kasvoi edelleen (4 m/s), ja tuulen suunta vaihteli lounaan ja luoteen välillä. Ilmanpaine heikkeni, mutta korkeapaine oli kuitenkin selkeästi vallitseva. NAO-indeksi kasvoi positiivisempaan suuntaan, mikä kertoo Islannin matalapaineen ja Azorien korkeapaineen ilmanpaine-erojen kasvamisesta.

Taulukko 14. Tutkimusjakson pisin yhtämittainen jakso, jolloin vuorokausiraja-arvot ylittyivät kahdella tai useammalla Turun seudun havaintoasemalla. Tutkimusalueella on koko ajanjakson ollut korkeapainetta, ja sää on ollut selkeä ja tuulet heikkoja.

Päivämäärä	Luokka	Tuulen nopeus (ka m/s)	Tuulen suunta (ka)	Ilmanpaine (ka hPa)
24.3.2007	M3:K22	3	itä	1036
25.3.2007	M4:K22	1,5	kaakko/lounas	1037
26.3.2007	M1:K44	1,12	länsi	1035
27.3.2007	M1:K44	1,13	satunnainen	1032
28.3.2007	M4:K33	1,75	etelä	1028
29.3.2007	M1:K2	2,62	etelä	1024
30.3.2007	M1:K4	3,62	lounas/luode	1020

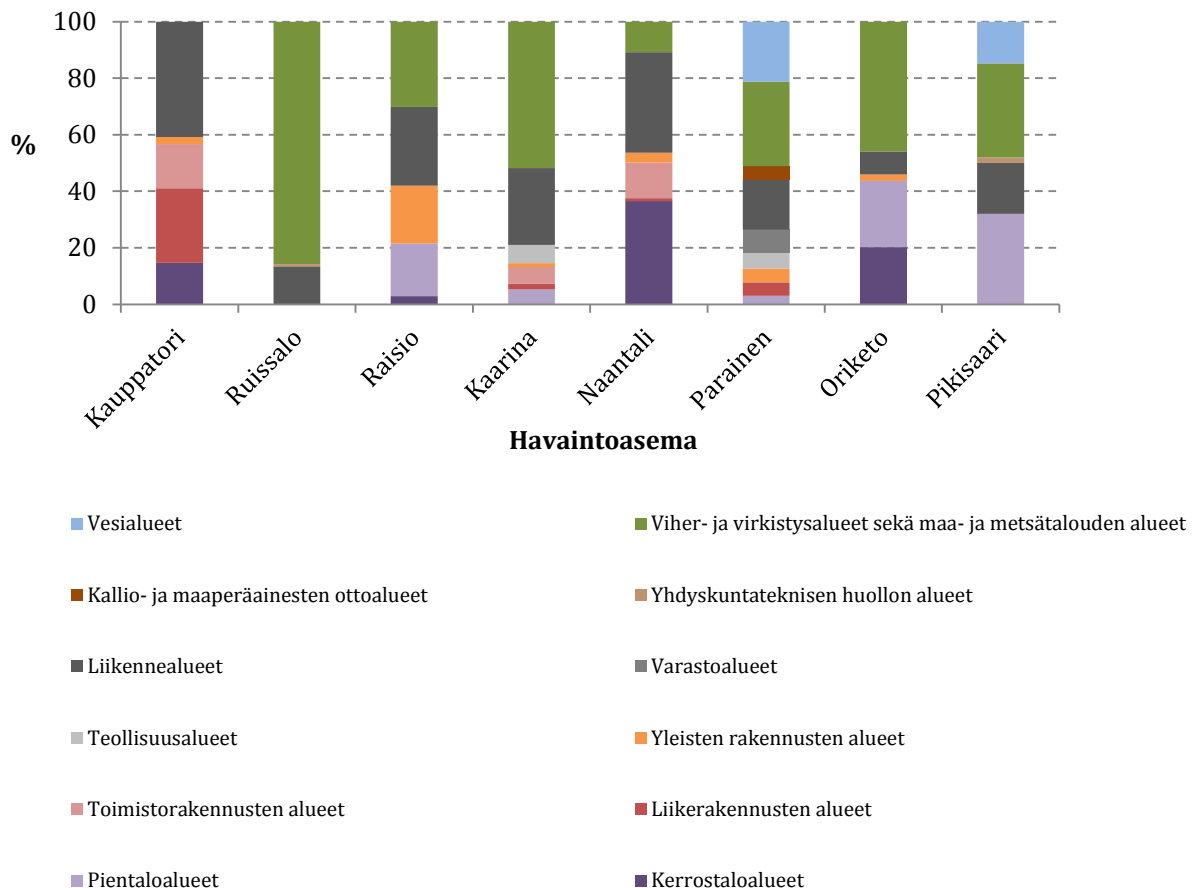


Kuva 32 a-g. Karttasarja 24.3–30.3.2007 vuorokausien ilmanpaineolosuhteista. Ajanjaksona hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvo ($> 50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittyi jokaisena vuorokautena kahdella tai useammalla Turun seudun ilmanlaadun havaintoasemalla.

Sisältävät aineistoa lähteestä ECMWF (2012) ja Thematicmapping.org (CC-BY-SA 3.0)

5.3 Muut alueelliset ominaispiirteet suhteessa ilmanlaatuun

Säätetekijöiden lisäksi muiden alueellisten ominaispiirteiden vaikutusta ilmanlaatuun tarkasteltiin maankäytön ja suhteellisen korkeuden avulla. Maankäyttöaineiston luokat yhdisteltiin ja päädyttiin 13 muuttujaan, jotka osoittautuivat hyviksi sillä perusteella, että kaikkia löytyi jo suhteellisen pienenkin puskurivyöhykkeen sisältä havaintoasemien ympäristöstä. Kuvassa 33 on havainnollistettu tutkimuksessa käytetyt maankäyttöluokat, jotka esiintyvät 200 metrin etäisyydellä ilmanlaadun havaintopisteistä. Diagrammi selventää minkä tyyppisissä ympäristöissä havaintoasemat sijaitsevat. Esimerkiksi Kauppatorin, Naantalin ja Raision havaintoasemien ympäristöt ovat maankäytöltään hyvin urbaaneja. Tämä tukee tutkimuksen aikaisempia tuloksia ilmanlaadun ajallisesta ja alueellisesta vaihtelusta. Kauppatorin, Naantalin ja Raision havaintoasemilla oli huonoin ilmanlaatu tutkimusjakson jokaisena vuotena.



Kuva 33. Maankäyttöluokat 200 metrin etäisyydellä vuonna 2011 toiminnassa olleilla kahdeksalla tyyppidioksidin- ja hengitettävien hiukkasten ilmanlaadun havaintoasemalla Turun seudulla. Tuloksesta nähdään havaintoasemien sijoittuvan maankäytöltään hyvin erilaisiin ympäristöihin.

Typpidioksidipitoisuudet korreloivat pääasiassa positiivisesti kerrostaloalueiden, yleisten rakennusten, liikerakennusten, toimistorakennusten ja liikennealueiden kanssa (taulukko 15). Nämä maankäytön muodot ovat yleensä urbaaneja alueita, joilla on paljon ihmisten harjoittamaa toimintaa ja liikennettä. Typpidioksidipitoisuudet korreloivat negatiivisesti erityisesti suhteellisen korkeuden (suurimmat puskurivyöhykkeet), vesialueiden, vapaa-ajan alueiden ja virkistysalueiden sekä maa- ja metsätalousalueiden kanssa. Ilmanlaatua näyttää siis parantavan erityisesti luonnolliset kasvillisuudesta koostuvat maankäytön muodot. Laivaliikenteen typpidioksidipäästöt eivät myöskään näytä vaikuttavan vesialueiden lähistöllä sijaitsevien rannikkoalueiden ilmanlaatuun (esim. Ruissalo ja Pikisaari). Epävarmimpina tuloksina voidaan pitää teollisuuden, yhdyskuntateknisten alueiden, suhteellisen korkeuden ja ilmanlaadun välisiä korrelaatiokertoimia. Tulosten perusteella myös nämä maankäyttöluokat parantavat ilmanlaatua. Tilastollisesti merkitseviä korrelaatiokertoimia esiintyy erityisesti kerrostaloalueilla suurimmilla puskurivyöhykkeillä (≥ 400 m), vapaa-ajan alueilla, virkistysalueilla sekä maa- ja metsätalouden alueilla (200–400 m), liikerakennusten alueilla, suurella osalla toimistorakennusalueilla, yleisten rakennusten alueilla (≥ 750 m) sekä kaikilla yhdyskuntateknisen maankäytön piiriin kuuluvilla alueilla.

Tarkastelemalla taulukon 16 korrelaatiokertoimia voidaan havaita hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia kasvattavan erityisesti suhteellinen korkeus (> 50 m puskurivyöhykkeet), kerrostaloalueet suurten puskurivyöhykkeiden osalta, liikerakennusten alueet sekä vesistöt (≤ 1000 m). Kaivos- ja maanottoalueiden tulos on epävarma, koska maankäyttömuotoa esiintyy ainoastaan Paraisten ilmanlaadun havaintoaseman ympäristössä. Vapaa-ajan alueiden ja virkistysalueiden sekä maa- ja metsätalousalueiden (> 50 m) maankäyttöluokka on ainoa selkeästi negatiivisesti riippuvainen hengitettävien hiukkasten pitoisuuksista. Tämä tarkoittaa sitä, että kyseinen maankäyttöluokka vaikuttaa ilmanlaatuun parantavasti. Mikään maankäytön muoto ei kuitenkaan korreloi tilastollisesti merkitsevästi ilman hiukkaspitoisuuksien kanssa.

Taulukko 15. Ympäristötekijöiden ja vuoden 2011 keskimääräisen typpidioksidipitoisuuden väliset korrelaatiokertoimet erikokoisissa puskurivyöhykkeissä havaintoasemien ympärillä. Typpidioksidipitoisuudet korreloivat positiivisesti erityisesti urbaanien maankäyttömuotojen kanssa ja negatiivisesti erityisesti luonnollisten kasvillisuudesta koostuvien alueiden kanssa.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	-0,12	-0,02	-0,31	-0,75	0,84*	0,84*	0,30	-0,22	-	0,85*	-	-	-
100	0,34	-0,07	-0,40	-0,68	0,84*	0,51	0,32	-0,22	-	0,89**	-	-	-
200	0,26	0,23	-0,30	-0,76*	0,83*	0,65	0,42	-0,22	-	0,76*	-0,48	-	-0,35
300	-0,16	0,52	-0,28	-0,79*	0,84*	0,75	0,61	-0,22	-	0,72	-0,60	-	-0,52
400	-0,35	0,76*	-0,37	-0,81*	0,92**	0,82*	0,63	-0,22	-	0,79*	-0,42	-	-0,49
500	-0,37	0,93**	-0,37	-0,82*	0,94**	0,91**	0,66	-0,32	-0,19	0,80*	-0,41	-	-0,50
750	-0,45	0,99**	-0,26	-0,71	0,98**	0,98**	0,91**	-0,27	-0,13	0,89*	-0,36	-	-0,52
1000	-0,48	0,99**	-0,02	-0,65	0,98**	0,97**	0,97**	-0,09	-0,20	0,95**	-0,41	-	-0,53
1500	-0,49	0,96**	0,39	-0,57	0,87*	0,95**	0,92**	0,08	-0,33	0,94**	-0,50	-	-0,51
2000	-0,53	0,92**	0,54	-0,53	0,95**	0,96**	0,91**	0,46	-0,17	0,91**	-0,30	-	-0,54

1. Suhteellinen korkeus 2. Kerrostaloalueet 3. Pientaloalueet 4. Vapaa-ajan- ja virkistysalueet sekä maa- ja metsätalouden alueet 5. Liikerakennusten alueet 6. Toimistorakennusten alueet 7. Yleisten rakennusten alueet 8. Teollisuusalueet 9. Varastoalueet 10. Liikennealueet 11. Yhdyskuntateknisen huollon alueet 12. Kaivos- ja maanottoalueet 13. Vesialueet

Taulukko 16. Ympäristötekijöiden ja vuoden 2011 keskimääräisen hengitettävien hiukkasten väliset korrelaatiokertoimet erikokoisissa puskurivyöhykkeissä havaintoasemien ympärillä. Hiukkaspitoisuudet korreloivat positiivisesti erityisesti korkeuserojen ja rakennettujen ympäristöjen kanssa sekä negatiivisesti erityisesti luonnollisten kasvillisuudesta koostuvien alueiden kanssa.

m	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
50	-0,29	-0,35	0,17	0,05	0,42	0,42	-0,31	-0,71	-	0,38	-	-	0,60
100	0,22	-0,31	0,17	-0,30	0,42	-0,12	-0,23	-0,71	0,60	0,30	-	-	0,60
200	0,37	-0,10	-0,1	-0,39	0,48	-0,12	-0,01	-0,17	0,60	-0,21	-	0,60	0,60
300	0,60	-0,02	-0,58	-0,39	0,37	0,07	-0,40	0,35	0,60	-0,34	0,12	0,60	0,60
400	0,72	0,03	-0,10	-0,47	0,39	0,17	-0,56	0,40	0,60	-0,20	0,08	0,60	0,67
500	0,73	0,15	-0,22	-0,51	0,44	0,26	-0,46	0,44	0,47	-0,22	-0,23	0,60	0,68
750	0,54	0,29	-0,42	-0,66	0,53	0,33	-0,09	-0,06	0,09	0,00	-0,33	0,60	0,68
1000	0,21	0,29	-0,21	-0,57	0,43	0,39	0,29	-0,25	0,00	0,16	-0,35	0,60	0,18
1500	0,05	0,33	-0,27	-0,44	0,27	0,46	0,41	-0,46	-0,21	0,22	-0,56	0,60	-0,01
2000	-0,36	0,43	-0,29	-0,26	0,36	0,46	0,46	-0,377	0,23	0,20	-0,19	0,60	-0,04

1. Suhteellinen korkeus 2. Kerrostaloalueet 3. Pientaloalueet 4. Vapaa-ajan- ja virkistysalueet sekä maa- ja metsätalouden alueet 5. Liikerakennusten alueet 6. Toimistorakennusten alueet 7. Yleisten rakennusten alueet 8. Teollisuusalueet 9. Varastoalueet 10. Liikennealueet 11. Yhdyskuntateknisen huollon alueet 12. Kaivos- ja maanottoalueet 13. Vesialueet

5.4 Maankäyttöregressiomallinnuksen tulokset

Parhaan regressiomallin löytämiseksi suoritettiin lineaarinen regressioanalyysi, jossa huomioitiin puskurivyöhykkeiden koot kahdella tavalla. Ensin käytettiin yhtä puskurivyöhykkekokoa kaikilla muuttujilla, minkä jälkeen eri puskurivyöhykkekokojen yhdistelmiä. Päämääränä oli löytää ainakin yksi tilastollisesti merkitsevä ja korkean selityksasteen sisältävä malli, jonka ennustajamuuttujia voitaisiin käyttää ilmanlaadun ennustamisessa typpidioksidille ja hengitettävälle hiukkasille Turun seudulla. Typpidioksidin kohdalla regressioanalyysin tuloksena syntyi useampi malli, kun puolestaan hengitettävien hiukkasten osalta mikään puskurivyöhyke- ja muuttujayhdistelmä ei tuottanut tilastollisesti merkitsevää mallia. Seuraavaksi esitetyt tulokset pätevät siis ainoastaan typpidioksidin osalta. Taulukoissa 17 ja 18 on esitetty kolme varteenotettavaa mallia tilastollisine tunnusarvoineen.

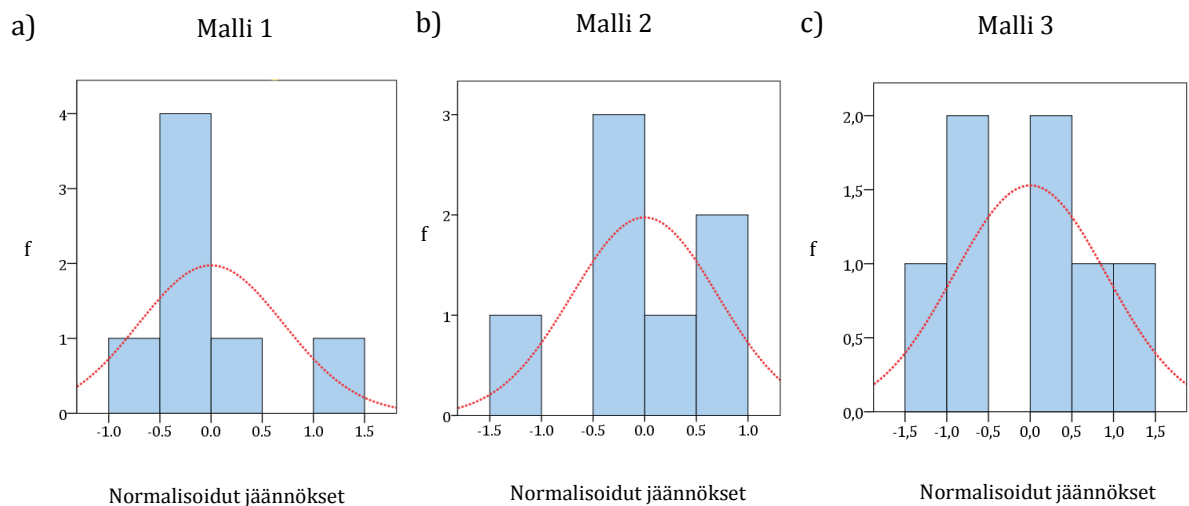
Taulukko 17. Kolmen regressiomallin (NO₂) ennustajamuuttujat, merkitsevyytasot ja vakiokertoimet. Kaikki mallit vaikuttavat merkitsevyytasoiltaan ($p < 0,05$) ja selityksasteiltaan potentiaalisilta.

Malli	Ennustajamuuttuja	Puskuri- vyöhyke (m)	Vakio	β	R ²	Korj. R ²	p- arvo
1	Liikerakennusten alueet	750 m	11,54	287,66	0,999	0,998	0,000
	Yleisten rakennusten alueet	100 m		13,48			
	Luonnolliset alueet	100 m		-3,93			
2	Liikerakennusten alueet	200 m	9,44	68,25	0,999	0,997	0,000
	Yleisten rakennusten alueet			57,38			
	Kerrostaloalueet			8,39			
3	Liikennealueet	100 m	4,68	35,60	0,783	0,740	0,000

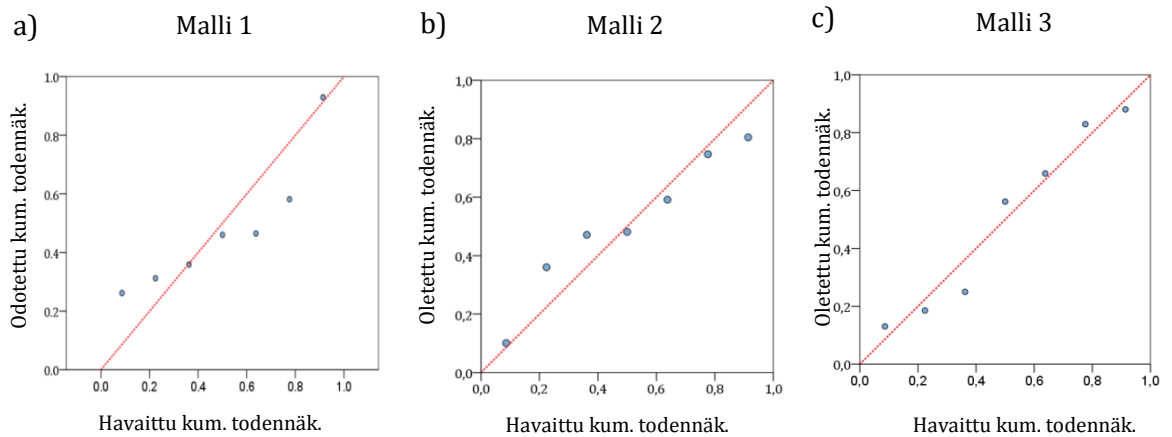
Taulukko 18. Kolmen erilaisen maankäytön regressiomallin (NO₂) ennustajamuuttujien luotettavuuden ja multikollineaarisuuden arvioinnissa käytettäviä tunnuslukuja. Erityisesti multikollineaarisuuden osalta malli 2 osoittautuu luotettavammaksi (D-W lähellä lukua 2).

Malli	Ennustajamuuttuja	Luottamusväli	D-W	Multikollineaarisuus	
				Toleranssi	VIF
1	Liikerakennusten alueet	264,0–311,3	2,91	0,67	1,50
	Yleisten rakennusten alueet	8,97–18,00		0,97	1,03
	Luonnolliset alueet	-5,86–(-1,99)		0,66	1,51
2	Liikerakennusten alueet	62,95–73,56	1,86	0,97	1,03
	Yleisten rakennusten alueet	50,24–64,53		0,98	1,02
	Kerrostaloalueet	4,69–12,09		0,98	1,02
3	Liikennealueet		3,12	1	1

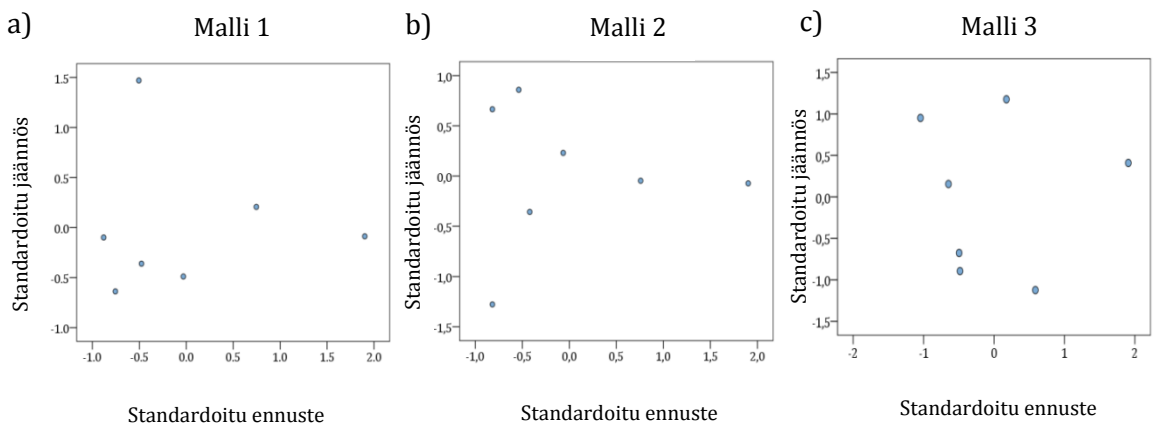
Ennen kuin regressiomallia voidaan käyttää Turun seudulla ilmanlaadun ennustamiseen, on sen käytettävyys arvioitava. Lineaarisuutta ja virhetermien varianssin suuruutta on mahdollista tarkastella jäännöskuvion avulla. Jäännöskuviossa pisteiden tulisi olla satunnaisesti jakaantuneita ilman säännönmukaisuutta. Kaikki kolme mallia ovat normaalisti jakautuneita ja lineaarisia (kuvat 34–35 a–c). Mallissa 1 on silmämääräisesti eniten lineaarisuudesta poikkeavia arvoja, ja virhetermien hajontakuviossa on havaittavissa sama ilmiö, eli malli 1 poikkeaa eniten normaalijakaumasta (kuva 36 a–c).



Kuva 34 a–c. Kolmen maankäytön regressiomallin keskihajonnat. Kaikki mallit ovat normaalisti jakautuneita.



Kuva 35 a–c. Kolmen maankäytön regressiomallin jäännösten lineaarisuuden tarkastelu. Mallissa 1 on kaikista eniten lineaarisuudesta poikkeavia havaintoja.



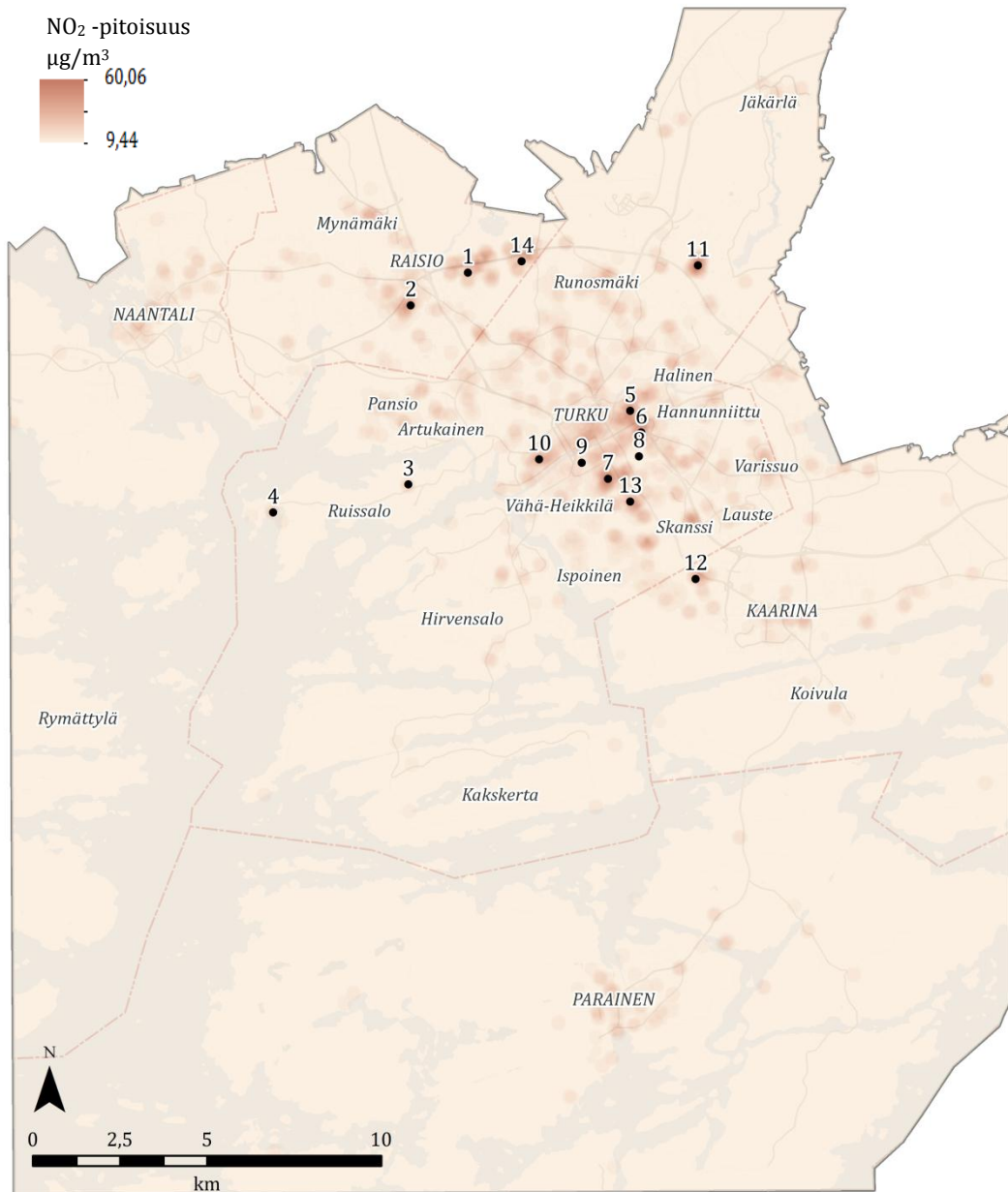
Kuva 36 a–c. Kolmen maankäytön regressiomallin jäännöskuvioiden tarkastelu. Mallin 3 jäännöskuvio on otollisin (suorakaiteen muotoinen).

Kaikkien mallien korjattu selityskerroin (korj. R^2) on lähellä selityskerrointa (R^2) ja näin ollen voidaan todeta mallien olevan yleistettävissä. Merkitsevyytasoltaan kaikki mallit ovat tilastollisesti merkitseviä ($p < 0,05$). Taulukon 18 Durbin-Watson (D-W) -sarakeesta voi tarkastaa, täyttävätkö virhetermit niille asetetut vaatimukset riippumattomuuden eli autokorrelaation osalta. Durbin-Watson saa arvoja nolasta neljään. Hyväksyttävät arvot sijoittuvat lukujen 1 ja 3 välille, josta luku 2 on optimi. Malli 2 on tämän perusteella optimaalisin, koska sen D-W-luku on kaikista lähimpänä tavoitelukua 2. Myös luotettavuustarkastelussa malli 2 on kaikkein otollisin, koska sen luottamusväli on pienin. Yleisesti ottaen mallia voidaan pitää sitä parempana, mitä pienempi vaihteluväli on. Mallissa 2 heikoin ennustajamuuttuja luotettavuuden osalta on kerrostaloalueet, koska sen luottamusväli vaihtelee eniten ($8 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Regressioanalyysissä on luonnollista, että selittävät muuttujat korreloivat jonkin verran keskenään. Multikollineaarisuus ei kuitenkaan saa olla niin suurta, että se aiheuttaa

ongelmia regressioanalyysin tulosten tarkkuuden kannalta. Kannattaa epäillä multikollinearisuutta, mikäli regressiomallissa ilmenee erityisen korkeita selitysasteita tai muuttujien välisiä korrelaatiokertoimia. Kollinearisuutta voidaan tarkastella sitä mittaavilla tunnusluvuilla tai korrelaatiokertoimien avulla. Tunnuslukuja ovat toleranssi ja VIF ("Variance Inflation Factor"). Toleranssi on se osuus selittävän muuttujan vaihtelusta, jota muut mallissa olevat muuttujat eivät selitä. On sitä parempi, mitä lähempänä toleranssi on lukua yksi. Yksikäsitteistä rajaa mallin kannalta haitalliselle toleranssille ja korrelaatiokertoimelle ei kuitenkaan ole. Taanila (2010) on ohjeistanut, että pieniin toleransseihin ($< 0,2$) ja itseisarvoltaan suuriin korrelaatiokertoimiin ($> 0,7$) kannattaa suhtautua kriittisesti. Tämän perusteella voidaan todeta, että multikollinearisuuden osalta kaikki mallit ovat hyväksyttäviä, vaikkakin suuret korrelaatiokertoimet ($> 0,7$) vaikuttavat epä johdonmukaisilta. Toleranssi on kaikilla parametreilla suurempi kuin $0,2$, joka on siis teorian mukaan rajana.

Edeltävyysehtojen perusteella malli 2 on kaikista kolmesta malleista luotettavin. Kuva 36 esittää ArcMap-ohjelmalla suoritettua mallinnuksen annetuilla ennustajamuuttujilla. Esimerkkinä on numeroitu ja listattu osa toiminnoista, jotka selvästi erottuvat kartalla joko huonona tai hyvänä ilmanlaatuna. Kartasta voidaan havaita tutkimusalueella sijaitsevien kuntien keskustojen ja lähiöiden erottuminen ilmanlaadultaan huonoimpina alueina. Ilmanlaatu vaihtelee tutkimusalueella taustapitoisuuden $9,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja maksimilukeman $60,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$ välillä. Paras ilmanlaatu löytyy ennustajamuuttujien mukaan alueilta, joilla on paljon luonnollisia päästölähteettömiä maankäyttömuotoja sekä vähän yleisiä rakennuksia, liikerakennuksia ja kerrostaloalueita. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi maaseutumaiset alueet ja kaupunkien puistoalueet kuten Turussa SampPALinnan ja Kupittaaan puisto. Regressiomallin tuloksen perusteella tutkimusalueen huonoin ilmanlaatu on Turun vankilan alueella ($60,06 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja kunnallissairaalan kohdalla. Myös esimerkiksi kuntien keskustojen, Turun yliopistollisen keskussairaalan, Yliopistonmäen, Kakolanmäen, Petreliuksen sekä isojen tavaratalojen lähetyvillä on mallin tulosten perusteella tutkimusalueen korkeimmat typpidioksidipitoisuudet.



Sisältää Maanmittauslaitoksen maastotietokannan 05/2012 aineistoa.

1. Kauppakeskus Mylly
2. Raision aikuiskoulutuskeskus, kirjasto, lukio, Vaisaaren koulu, kauppaopisto, ammattiopisto ja uimahalli
3. Kasvitieteellinen puutarha
4. Ruissalo golf
5. Turun yliopisto
6. TYKS
7. Kunnallissairaala
8. Kupittaaan puisto
9. Sampoalinnan puisto
10. Kakola
11. Turun vankila
12. Tarjoustalo, Biltema ym.
13. Luolavuoren koulu, Luolavuoren ja mäntyrinteen vanhainkodit, kuntoutuskeskus Petrea ym.
14. Ikea

Kuva 36. Maankäytön regressiomallin tulos typpidioksidin osalta karttapohjalle mallinnettuna kolmen ennustajamuuttujan avulla: liikerakennusten alueet, yleisten rakennusten alueet ja kerrostaloalueet.

Mallin luotettavuutta tarkastellaan lopuksi ristiinvalidoinnin avulla. Ristiinvalidointi osoittaa regressiomallin onnistuneen osittain hyvin, mutta myös heikkoja puolia on havaittavissa (taulukko 19). Kolmen havaintoaseman ristiinvalidointi ei onnistunut. Naantalin, Raision ja Kauppatorin havaintoasemien poisjättäminen muutti mallia siten, että ennustajamuuttujien määrä ja tyyppi ei enää ollut samanlainen kuin suoritettaessa regressioanalyysi kaikkien seitsemän havaintoaseman ilmanlaatuaineistolla. Tämä osoittaa, miten paljon havaintoasemien määrä vaikuttaa mallin lopputulokseen. Malli muuttuu radikaalisti otoskoon pienentyessä jo yhdellä havainnolla. Tästä herää tietenkin kysymys, miten paljon malli muuttuisi, jos havaintoasemia olisi enemmän. Neljän havaintoaseman kohdalla malli voitiin kuitenkin ristiinvalidoida. Mallinnuksen seurauksena havaintoasemille saatiin melko hyvät ennustearvot, jotka poikkeavat 0,76–2,86 µg/m³ mitatusta typpidioksidipitoisuudesta.

Taulukko 19. Ristiinvalidoinnin tulos maankäytön regressiomallissa. Mukana on kolme ennustajamuuttujaa (liikerakennusten alueet, yleisten rakennusten alueet ja kerrostaloalueet). Ristiinvalidointi onnistui hyvin Kauppatoria, Raisiota ja Naantalia lukuun ottamatta. Mitattu typpidioksidipitoisuus on vuoden 2011 keskiarvo kyseisiltä havaintoasemilta.

Havaintoasema	Ennuste (µg/m ³)	Mitattu NO ₂ -pitoisuus (µg/m ³)
Kauppatori	-	30,11
Raisio	-	21,42
Naantali	-	15,26
Kaarina	10,83	11,90
Ruissalo	9,7	8,93
Pikisaari	8,94	9,70
Oriketo	9,46	12,32

6 TULOSTEN TARKASTELU

6.1 Ilmanlaadun ja suursäätötilanteiden sekä alueellisten ominaispiirteiden yhteys

6.1.1 Huonon ilmanlaadun tilanteet ajallisesti ja alueellisesti tarkasteltuna

Turun seudun ilmanlaatu on hengitettävien hiukkasten ja typpidioksidin osalta ollut verrattain hyvä jos rajana hyvälle ilmanlaadulle pidetään numeeristen ohje- ja raja-arvojen ylittävien päivien määrää vuodessa. Esimerkiksi hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvo ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) saa ylittyä 35 kertaa ennen kuin virallisesti katsotaan raja-arvon ylityneen (Vnp 480/1996). Hengitettävien hiukkasten pitoisuudet eivät ole ylittäneet raja-arvoa sallittua määrää minäkään tutkimusjakson vuotena. Tuntien määrät, jolloin typpidioksidipitoisuus on ylittänyt $150 \mu\text{g}/\text{m}^3$, ovat vaihdelleet vuodesta toiseen (keskimäärin 1–2,4 ylitystä vuodessa havaintoasemasta riippuen). Tulokset ovat yhtenäisiä Anttilan et al. (2003: 34, 46) tulosten kanssa siten, että energiantuotannon, teollisuuden ja autoliikenteen aiheuttamat typenoksidien kokonaispäästöt ovat vähentyneet 1990-luvun puoliväliin verrattuna. Kyseisen lähteen mukaan esimerkiksi typpidioksidin koko vuoden keskiarvo Kauppatorilla oli vuonna 1992 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun taas hengitettävien hiukkasten osalta vuoden 1995 keskiarvo samalla havaintoasemalla oli $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Vuonna 2011 vastaavat luvut olivat typpidioksidin osalta $30,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja hengitettävien hiukkasten osalta $14,77 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Yksittäisiä hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvoja ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) on ylittynyt lähes kaikilla havaintoasemilla useammin kuin typpidioksidin tunnin ohjearvo ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) on ylittynyt. Hengitettävien hiukkasten korkeiden pitoisuuksien voidaan tämän takia todeta olevan suurempi ongelma Turun seudulla kuin korkeat typpidioksidipitoisuudet. Kauppatorilla on Turun seudun huonoin ilmanlaatu ohjearvot ja raja-arvojen yksittäiset ylitykset huomioiden ja vuoden keskimääräisiä pitoisuuksia tarkasteltaen. Tulos viittaa siihen, että liikenne ja sen nostattama katupöly ovat yksi suurimmista saastelähteistä ainakin Turun keskustassa. Tämä on linjassa Salmen et al. (2009: 1) tulosten kanssa siten, että Turun seudun korkeimmat typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet aiheutuvat enemmän autoliikenteen päästöistä niiden matalien päästökorkeuksien takia. Energiantuotannon ja teollisuuden päästöt ovat määrällisesti liikenteen päästöjä suuremmat, mutta aiheuttavat kuitenkin vain vähäisen lisän typpidioksidin ja hiukkasten hengitettävän ilman pitoisuuksiin.

Turun seudun ilmanlaadussa on eroja vuosien, viikkojen ja päivien välillä. Typpidioksidin yksittäiset ohjearvojen ylitykset ajoittuvat kaikilla havaintoasemilla lähinnä talveen, mikä

indikoi säätilanteiden, kuten inversion, vaikuttavan ilmanlaatuun Turun seudulla hyvin paljon. Hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvot ylittyvät puolestaan lähinnä maaliskuussa. Tutkimusalueen hengitettävät hiukkaset ovat tämän perusteella peräisin pääosin liikenteestä ja hiekoitushiekasta, jotka keväisin resuspentoituvat ilmaan. Keväisin esiintyy usein myös selkeitä korkean ilmanpaineen pakkasöitä, jolloin lämpötilainversiot ovat mahdollisia. Aikaisemmat tutkimukset tukevat näitä huomioita ilmanlaadun ja vuodenajan korrelaatiosta. Talvisin on todennäköisintä esiintyä korkeita typpidioksidipitoisuuksia, koska ilmacehä on tällöin stabiili ja sekoittumiskerros ohuempi kuin kesällä (Oke 1987: 310). Millán (2002) on todennut parametrien välillä olevan selkeitä ajallisia eroja, jotka liittyvät sekä saastelähteen että sään vuodenaikaisuuteen. Hiukkasten kasvaneet pitoisuudet kaupungeissa ovat yleisiä talvella ja keväällä johtuen hiekoituksesta syntyvästä katupölystä. Pohjois-Euroopassa on yleistä, että lumi sulaa moneen otteeseen, ennen kuin pysyvä lumipeite saavutetaan (Kukkonen et al. 1999). Talvien jäätymis-sulamis-sykli vaikuttavat hiekoitustarpeeseen, jonka voisi myös olettaa olevan yksi selittävä tekijä vuosittaisille eroille hiukkaspitoisuuksissa säätilanteiden vaihtelun lisäksi. Tutkimuksen ilmanlaadun parametrien vuodenajanvaihtelut eroavat esimerkiksi alailmakehän otsoin vuodenaikaisuuteen verrattuna. Alailmakehän otsonipitoisuudet ovat riippuvaisia auringon säteilyn määrästä, minkä vuoksi otsonipitoisuudet ovat korkeita erityisesti kesällä (Millán 2002).

Joulukuu on mielenkiintoinen kuukausi, koska typpidioksidin osalta numeerisen ohjearvon ylityksiä on tällöin suhteellisen paljon verrattuna muihin kuukausiin. Joulukuu ei yleensä ole talven kylmin kuukausi Turun seudulla (Ilmatieteen laitos 2012b). Ajallinen vaihtelu ilmanlaadussa on usein yhteydessä tutkimuksen kohdemaan työntekekulttuuriin, teollistumistasoon sekä uskonnolliseen ja kulttuuriseen taustaan. Joulunpyhät eivät kuitenkaan ole syy siihen, että tutkimusalueella on joulukuussa suhteellisen paljon typpidioksidin ohjearvojen ylityksiä. Tarkemmin tutkittaessa havaitaan, että huonon ilmanlaadun tilanteet eivät ole kertaakaan ajoittuneet joulunpyhiin, vaan hajanaisesti joulukuun alkupuolelle. On myös tärkeää huomioida otoskoko ennen kuin tehdään suuria johtopäätöksiä siitä, miksi jonain kuukautena on huonompaa ilmanlaatua kuin toisena. Tässä tutkimuksessa otoskoko on suhteellisen pieni ($n=11$). On tietenkin hyvä pitää joulukuuta silmällä, jos tutkitaan Turun seudun ilmanlaadun vuodenaikaista vaihtelua suuremmalla otoskolla.

Huonoa ilmanlaatua esiintyy sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten osalta pääasiassa arkipäivisin. Syynä tähän voidaan pitää työntekekulttuuria, koska ihmiset

liikkuvat Suomessa erityisesti arkipäivisin autoillaan töihin. Myös jotkin teollisuuden laitokset ovat arkipäivisin enemmän käytössä kuin viikonloppuisin. Samankaltaisia tuloksia ovat saaneet esimerkiksi Morawska et al. (2002), kun he tutkivat viikonlopun vaikutusta ilmanlaatuun Brisbanessa Australiassa. Ilmanlaadun parametrien välillä on kuitenkin havaittavissa joitain eroja. Typpidioksidin korkeat pitoisuudet ajoittuvat selkeämmin arkipäiviin kuin hengitettävien hiukkasten vastaavat tilanteet.

Vuorokauden sisäisiä eroja on myös havaittavissa Turun seudun ilmanlaadussa. Typpidioksidin ohjearvot ylittyvät lähinnä aamulla, mikä on tyypillistä maille, joissa suurin osa päästöistä on peräisin liikenteestä. Aamuhuippu ilman typpidioksidipitoisuuksissa kertoo aamuruuhkasta, eli tyypillisestä pendeliliikenteen vaikutuksesta ilmanlaatuun. Iltapäivän pendeliliikenteen vaikutusta ilmanlaatuun ei ole nähtävillä yhtä voimakkaasti Turun seudulla kuin esimerkiksi Tan et al. (2009) tutkimuksessa Taipei kaupungissa Taiwanissa, jossa oli selvästi havaittavissa liikenteen aamu- ja iltapäiväruuhkan huiput ilmanlaadussa. Turun seudulla iltapäivän huonon ilmanlaadun huipun poisjääminen voisi olla merkki siitä, että säätilanteet vaikuttavat ilmanlaatuun päästöjen määrää enemmän. Esimerkiksi inversiotilanteet, jotka ovat voimakkaasti yhteydessä huonon ilmanlaadun tilanteisiin, on yleensä voimakkaimmillaan aamuisin (Mayer 1999). On tietenkin hyvä muistaa, että tämän tutkimuksen aineistona toimivat vain tilanteet, jolloin ohjearvo on ylittynyt jollain ilmanlaadun havaintoasemista Turun seudulla. Tämä tarkoittaa sitä, että vaikka numeerinen ohjearvo ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ei ylitä iltapäivällä, niin ilmanlaatu voi kuitenkin olla keskimääräistä huonompi.

6.1.2 Ilmanlaadun ja säätekijöiden välinen yhteys

Typpidioksidin ohjearvojen ylitystunteina vallitsevat heikot lounaistuulet ja puolestaan hengitettävien hiukkasten vastaavina vuorokausina heikot itätuulet. Ilman hiukkaspitoisuuksien ollessa korkeat, tuulen nopeudet ovat olleet hieman suurempia kuin typpidioksidin vastaavissa tapauksissa. Molempien parametrien tutkimustilanteissa tuuli on kuitenkin ollut heikkoa. Turun lentoaseman keskimääräinen tuulen nopeus on havaintojaksona ollut 3,3 m/s. Ilmatieteen laitoksen tilastojen mukaan vuosilta 1981–2011 tuulen suunta on vaihdellut hieman vuodenajan mukaan. Esimerkiksi maaliskuu- ja huhtikuussa tuulen suunta ei ole yhtä selkeästi lounaasta kuin esimerkiksi kesäkuukausina (kesäkuu-elokuu). Maaliskuu- ja huhtikuussa on puolestaan viimeisen kolmenkymmenen vuoden aikana vain 11–12 % itätuulia (Ilmatieteen laitos 2012b: 47). Siinä mielessä tutkimuksen tulokset (itätuulten osuus > 40 %) ovat poikkeavia. Tämän

perusteella voidaan todeta molempien ilmanlaadun parametrien huonon ilmanlaadun ajallisesti korreloivan keskiveroa tynemmän sään kanssa.

Typpidioksidin osalta sääkartat ovat suhteellisen hyvin linjassa Turun lentoasemalta ja Artukaisista saatujen sääaineistojen kanssa. Esimerkiksi isobaarien tiheydestä päätellen kaikissa huonon ilmanlaadun aikana vallinneissa suursäätilanteissa on ollut heikkoa tuulta, mikä myös oli havaittavissa tuuliaineistosta. Hengitettävien hiukkasten osalta Euroopan keskipitkien sääennusteiden keskukselta peräisin olevat sääkartat ovat erityisesti tuulen nopeuden osalta ristiriidassa Turun lentoaseman sääaineiston kanssa. Sääkarttojen perusteella tuulen nopeus on alhaisempi kuin typpidioksidin huonon ilmanlaadun tilanteissa. Turun lentoaseman tuuliaineiston perusteella tuulen nopeus olisi kuitenkin hieman korkeampi kuin typpidioksidin vallitessa. Tuulen suunta hengitettävien hiukkasten tutkimustilanteissa on sääkarttojen mukaan myös selvästi idästä, kuten tuuliruusuista näkyy. Tuuli on heikkoa molempien ilmanlaadun parametrien osalta. Aikaisempien tutkimusten mukaan on yleistä, että tuulisuus vaikuttaa eri tavoin riippuen ilmanlaadun parametrilla. Liikenteestä syntyvien ilmansaasteiden pitoisuudet (kuten typpidioksidin ja alailmakehän otsonin) ovat korkeimmillaan alhaisessa tuulen nopeudessa (Elminir 2005). Saman tutkimuksen mukaan hiukkaset puolestaan voivat käyttäytyä myös päinvastaisesti. Egyptissä korkeampi tuulen nopeus sai partikkelit nousemaan aavikolta ilmaan aiheuttaen huonompaa ilmanlaatua tuulen nopeuden kasvaessa. Samanlainen ilmiö voi olla nähtävissä Pohjois-Euroopassa keväällä, kun katuja siivotaan hiekoitukshiekasta.

Lämpösaarekkeen keskiarvo oli tutkimusjakson aikana 1,9 °C. Tämä tarkoittaa, että jolloin typpidioksidin tai hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien ovat olleet korkeat, on ollut normaalia voimakkaampi lämpösaareke. Lai & Cheng (2009) ovat tutkineet lämpösaarekkeen, ilmanlaadun ja meteorologisten tekijöiden välistä yhteyttä Taichungissa Taiwanissa. Tutkimus osoittaa tiettyjen suursäätilanteiden heikentävän ilmanlaatua ja voimistavan lämpösaarekeilmiötä. Taichungin lämpösaareke on voimakkaimmillaan heikkojen pohjois- ja länsituulten aikana. Näinä aikoina joidenkin ilmansaasteiden pitoisuudet kohoavat merkittävästi lämpösaarekkeen voimakkuuden kasvaessa. Suomi (2005: 82) on saanut Turun seudulta tuloksen, että lämpösaareke on voimakas ilmanlaadun ollessa huono. Voimakkaiden lämpösaarekkeiden vallitessa tuulen suunta oli Lai & Chengin (2009) mukaan pääosin lännestä ja pohjoisesta. Turun seudulla samankaltaiset tuuli- ja pilvisyysolosuhteet olivat vallitsevia typpidioksidin korkeiden pitoisuuksien yhteydessä. Yhteys lämpösaarekkeen ja typpidioksidin korkeiden ilman

pitoisuuksien välillä oli korrelaatiokertoimen perusteella voimakkaampi kuin hengitettävien hiukkasten kohdalla. Lämpösaarekkeen esiintyminen voisi tutkimustulosten perusteella olla indikaattorina stabiilien ilmakehän tilanteiden löytämiseksi. Tällöin olisi myös otolliset olosuhteet huonon ilmanlaadun synnylle erityisesti typpidioksidin osalta. Korrelaatio lämpösaarekkeen ja ilmanlaadun välillä voisi toisaalta olla vieläkin voimakkaampi, jos korrelaatioita laskettaessa huomioitaisiin ajallinen viive parametrien välillä. Suomen (2005) tutkimuksen mukaan lämpösaareke on nimittäin Turun seudulla voimakkaimmillaan juuri auringonlaskun jälkeen. Ilmanlaatu on puolestaan huonoimmillaan vasta aamupäivällä.

Hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun vuorokausien yhteydessä esiintyy useammin korkeapainetta kuin typpidioksidin huonon ilmanlaadun tuntien aikana. Korkeapaineen ja hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun taustalla vaikuttavia ilmanpaineolosuhteita tukevat myös sääkartat huonosta ilmanlaadusta. Tuulen suunta on pääasiassa koillisen ja kaakon välistä, mikä kertoo korkeapaineen sijaitsevan joko tutkimusalueen pohjois- tai kaakkoispuolella. Kvalitatiivisen luokittelun perusteella tehdyt sääkartat vahvistavat ainakin osittain tämän, ja Turun lentoasemalla mitattu ilmanpaine on myös linjassa tämän kanssa.

Teorian perusteella voisi kuvitella NAO-indeksin olevan negatiivinen ilmanlaadun ollessa huono, koska korkean ilmanpaineen sekä typpidioksidi- ja hiukkaspitoisuuksien välillä on tilastollisesti merkitsevä korrelaatio. Tämä ei kuitenkaan välttämättä päde Suomen sääolosuhteisiin. Esimerkiksi Grundströmin et al. (2011) tutkimuksessa NAO-indeksi oli negatiivinen ilman typpidioksidipitoisuuden ollessa korkea. Tilastollisesti merkitsevä negatiivinen korrelaatio on myös havaittavissa Turun seudulla hengitettävien hiukkasten ja NAO-indeksin välillä. Turun seudun typpidioksidipitoisuuksien korrelaatio NAO-indeksin kanssa eroaa kuitenkin Grundströmin et al. (2011) saamasta tuloksesta. Korrelaatio koko havaintojakson typpidioksidiaineiston ja NAO-indeksin välillä on positiivinen. Tämä tarkoittaa sitä, että mitä positiivisempi NAO-indeksi on, sitä korkeammat ovat ilman typpidioksidipitoisuudet. Tämä on mielenkiintoinen tulos siksi, että korrelaatiokerroin ilmanpaineen ja typpidioksidipitoisuuksien välillä on positiivinen, mikä tarkoittaa sitä, että korkean ilmanpaineen vallitessa typpidioksidipitoisuudet ovat korkeita. Aikaisempien tutkimusten perusteella korkeapaine on ollut yhteydessä negatiiviseen NAO-indeksiin (Grundström et al. 2011). Syitä tähän poikkeavaan tulokseen voidaan hakea esimerkiksi siitä, että mukana on koko vuoden havainnot, eikä pelkästään talven havainnot, kuten Grundströmin et al. (2011) tutkimuksessa. Pohjois-Atlantin

oskillaatio vaikuttaa teorian mukaan Pohjois-Euroopan säähän erityisesti talvella. Mikäli tarkastelun kohteeksi otetaan pelkästään ohjearvon ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittäneet tilanteet, tulokset ovat enemmän yhteneväisiä teorian kanssa ollen kuitenkin päinvastaiset kuin Grundströmin et al. (2011) tulokset. Typpidioksidin ohjearvon ylittyessä on vallinnut matalapaine ja NAO-indeksi on ollut hieman enemmän positiivinen kuin negatiivinen. Syitä Turun seudun ja Grundströmin et al. (2011) tutkimuksen tulosten eroihin voidaan hakea joko pienestä otoskoosta ($n=30$) tai tutkimusalueen maantieteellisestä sijainnista. Göteborg, johon Grundströmin et al. (2011) tutkimus sijoittuu, on alttiimpi Atlantilla tapahtuville ilmanpainemuutoksille kuin idempänä Euroopassa sijaitsevat alueet. NAO-indeksin ja ilmanlaadun välisen korrelaation tutkimisessa olisi järkevää myös huomioida ajallinen viive, koska Atlantilla syntyvien ilmanpainekeksuksien vaikutukset säähän eivät välttämättä ole havaittavissa tutkimusalueella aivan heti. Nämä voivat ainakin olla osatekijöitä siihen, miksi yhteys NAO-indeksin ja ilmanlaadun välillä ei ole aivan samanlainen Turun seudulla kuin Göteborgissa.

Sateettomuus ja selkeä sää kulkevat käsi kädessä tutkimuksen huonon ilmanlaadun kanssa. Molempien parametrien osalta ohje- ja raja-arvot ylittyvät pääosin selkeästä verrattain selkeään olevassa säässä. Sateettomat päivät ovat yleisempiä hengitettävien hiukkasten vuorokauden raja-arvon ylittävinä päivinä kuin typpidioksidin osalta. Korrelaatiokerroin parametrien välillä osoittaa samanlaista tulosta. Turun lentoaseman ja Artukaisten säähavaintojen mukaan havaintojakson keskimääräinen sademäärä on ollut 1,9 millimetriä vuorokaudessa ja pilvisyys luokkaa viisi, minkä vuoksi voidaan todeta typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun syntyvän keskimääräistä kuivemmassa ja erityisesti typpidioksidin osalta myös keskivertoa selkeämmässä säässä. Aikaisemmat tutkimukset tukevat näitä tuloksia. Omstedt et al. (2005) mukaan kuiva sää johtaa todennäköisemmin huonoon ilmanlaatuun. Peräkkäiset sateettomat päivät kasvattavat lähes lineaarisesti ilman hiukkaspitoisuuksia (Buchholz et al. 2010). Esimerkiksi Saksan Trierissä ilman hiukkaspitoisuus oli yhden sateettoman päivän jälkeen $28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, kun se kahden sateettoman päivän jälkeen kasvoi $34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Omstedt et al. 2005). Samanlaisia tuloksia oli havaittavissa vuoden 2007 maaliskuun loppuun ajoittuneena hengitettävien hiukkasten huonon ilmanlaadun jakson aikana Turun seudulla. Vuorokauden keskimääräinen hiukkaspitoisuus oli 23.3.–31.3.2007 ajanjaksona yli $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ja sää oli sateeton 20.3.2007–3.4.2007.

Korkeisiin ilman typpidioksidin pitoisuuksiin Turun seudulla vaikuttaa erityisesti talvella heikkotuulinen matalapaine. Korkeita ilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia

synnyttää puolestaan selkeä korkeapaineen tilanne, jolloin tuulet ovat heikkoja ja puhaltavat idästä. Yhteneväisyyksiä ja eroavaisuuksia on havaittavissa muihin tutkimuksiin, mikä kertoo siitä, että tuloksia yhden alueen ilmanlaatuun vaikuttavista suursäätilanteista on vaikea yleistää toiseen. Esimerkiksi Van der Wal & Janssen (2000) ovat tutkineet Alankomaiden ilmanlaatuun vaikuttavia suursäätilanteita. Tulokset osoittavat, että ulkoilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien ollessa koholla, sää on talvella viileää ja kuivaa sekä tuulet puhaltavat pääosin idästä tai etelästä. Samoin kuin Turun seudulla myös Alankomaissa ilmanlaatu vaihtelee vuodesta toiseen, eikä mitään selvää suuntausta ilmanlaadun kehittymisestä ole havaittavissa. Tulokset viittaavat samaan asiaan kuin Turun seudullakin: suursäätilanteet vaikuttavat hyvin paljon alueen ilmanlaatuun ja ilmanlaadussa on havaittavissa eroja vuodesta toiseen sään vaihdellessa.

6.1.3 Ilmanlaadun ja muiden alueellisten ominaispiirteiden välinen yhteys

Turun seudulla on suursäätilanteiden lisäksi havaittavissa myös maankäytön ja korkeuserojen vaikutukset ilmanlaatuun. Maankäyttö ja topografia vaikuttavat parametrissa riippuen ilmanlaatuun kuitenkin eri tavoin. Kasvillisuuden alueet ja topografia (matala suhteellinen korkeus) vaikuttavat ilmanlaatuun parantavasti, kun taas maankäyttöluokat, joilla tai joille liikutaan autoilla, heikentävät ilmanlaatua. Tämä tulos vahvistaa aikaisempia päätelmiä siitä, että autoliikenteen päästöt vaikuttavat muita päästölähteitä enemmän ilmanlaatuun Turun seudulla (Salmi et al. 2009: 1).

Turun seudulta saadut tulokset ilmanlaatuun vaikuttavista ympäristötekijöistä vaikuttavat järkeviltä muualla tehtyihin tutkimuksiin verrattuna. Kasvillisuudesta koostuvilla alueilla on harvoin päästölähteitä, minkä vuoksi myös niiden ilmanlaatu on parempaa. Lisäksi kasvillisuudella on puhdistava vaikutus ilmansaasteisiin, koska se hidastaa ilmavirtauksia ja pidättelee esimerkiksi hiukkasten kulkeutumista. McPherson et al. (1994: 63–81) ovat tutkineet Chicagon kasvillisuuden vaikutuksia ilmanlaatuun. Tulosten mukaan ilmanlaatu oli tiheän kasvillisuuden alueilla 2,1 % parempi kuin muilla alueilla. Kasvillisuuden vaikutus ilmanlaatuun on suurinta toukokuussa, jolloin saastepitoisuudet ovat korkeat ja puiden lehdet ovat juuri puhjenneet.

Oken (1987: 333–335) mukaan topografia on yksi tärkeimmistä ilmanlaatuun vaikuttavista ympäristötekijöistä. Turun seudulla korkeuserot ovat pienet, koska tutkimusalue koostuu pääosin rannikkoalueesta ja Aurajoen lähistöllä sijaitsevista alavista alueista. Suhteellisen korkeuden vaikutus Turun seudun ilman typpidioksidipitoisuuksiin on kuitenkin havaittavissa negatiivisen korrelaatiokertoimien perusteella. Tämä tarkoittaa

sitä, että mitä korkeammalla ilmanlaadun havaintoasema on suhteessa ympäristöön, sitä alhaisempi on typpidioksidipitoisuus. Tämä tulos on yhteneväinen aikaisempien tutkimustulosten kanssa. Esimerkiksi Hamiltonin kaupungissa Kanadassa tehty tutkimus osoitti topografian vaikuttavan huomattavasti kaupungin ilmanlaadun alueellisiin eroihin (Wallace et al. 2010). Suuret korkeuserot estävät ilman sekoittumisen ja erityisesti inversiotilanteiden yhteydessä saasteet jäävät ”kattilaan” laaksoissa sijaitsevien kaupunkien ylle. Topografian korrelaatio hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin puolestaan vaihtelee puskurivyöhykkeen koosta riippuen ilman johdonmukaisuutta.

Kerrostaloalueilla ilmanlaatu on huonompaa kuin pientaloalueilla sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten osalta. Kerrostalot ovat yleisiä kaupunkien keskustoissa ja lähiöissä. Asukastiheys on yleensä näillä alueilla korkeampi kuin pientaloalueilla ja tästä johtuen myös autojen määrä on kerrostaloalueilla suuri, mikä voisi olla yksi taustatekijä kerrostaloalueiden huonolle ilmanlaadulle. Pientaloalueilla ilmanlaatu olisi siis negatiivisen korrelaatiokertoimen perusteella parempi kuin kerrostaloalueilla. Tämä on erityisesti hengitettävien hiukkasten kohdalla yllätyksellistä, koska yleensä omakotitaloissa harjoitetaan puun pienpolttoa. Esimerkiksi Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (2011) mukaan puunkäyttö lisälämmönlähteenä on kaupungeissa yleistä. Arvioidaan, että jopa 80 %:ssa pääkaupunkiseudun pientaloista poltetaan puuta takassa, kiukaassa tai leivinuunissa pääasiallisen lämmitystavan rinnalla. Puun pienpolton arvioidaan aiheuttavan noin kuudesosan kaikista Helsingin seudun hiukkaspäästöistä (Helsingin seudun ympäristöpalvelut 2011). Turun seudun korrelaatiokertoimet vaikuttavat siinä mielessä mielenkiintoiselta, koska ne poikkeavat hiukan teoriasta. Pienen otoskoon vuoksi on kuitenkin vaikeaa tehdä vielä tässä vaiheessa luotettavia johtopäätöksiä pientaloalueiden vaikutuksesta ilmanlaatuun Turun seudulla. Mikäli pientaloalueiden ja hiukkasten välistä korrelaatiota tarkasteltaisiin vuodenajoittain, voisi tulos olla erilainen, koska puun pienpolttoa harjoitetaan Suomessa todennäköisesti kovina pakkaspäivinä.

Liikennealueilla sekä liiketoiminnan ja hallinnon alueilla on tilastollisesti merkitsevä positiivinen korrelaatio lähes kaikilla puskurivyöhykkeillä. Syynä tähän voi olla, että typpidioksidipäästöt ovat pääosin peräisin liikenteestä, koska liikennealueilla sekä liiketoiminnan ja hallinnon alueilla on tavallisesti paljon liikennettä. Erityisesti pienten puskurivyöhykkeiden osalta korrelaatio typpidioksidipitoisuuksiin on voimakas. Tämä on yhteneväinen Yhdysvaltain ympäristönsuojeluviranomaisten tietojen kanssa siitä, että isojen teiden lähetyvillä (< 50 m) typpidioksidipitoisuudet ovat yleensä noin 30–100 %

korkeammat kuin kauempana teistä (> 50 m) (EPA 2011). Hengitettävien hiukkasten kohdalla korrelaatiokerroin edellä mainittuihin maankäyttöluokkiin vaihtelee puskurivyöhykkeen koosta ja luokasta riippuen nollan molemmin puolin ilman johdonmukaisuutta. Syitä tähän voi olla joko pieni otoskoko tai hengitettävien hiukkasten vuodenaikaisuus. Pelkästään kevätaikaa tarkasteltaessa hengitettävien hiukkasten korrelaatiokertoimet voisivat näyttää erilaiselta, koska hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat selvästi yhteydessä katupölyyn.

Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin ja kaivostoiminnan maankäytön välillä olevaa suhteellisen korkeaa positiivista korrelaatiota ei voida pitää luotettavana. Paraisten havaintoasema on ainoa kuudesta havaintoasemasta, jolla esiintyy kyseistä maankäyttöluokkaa. Havaintoasema on pystytetty seuraamaan läheisen kalkkikaivoksen hiukkaspitoisuuksia. Aikaisempien tutkimusten perusteella kaivostoiminnalla kuitenkin on vaikutusta ilman hiukkaspitoisuuksiin (esim. Schwegler 2008). Tämän vuoksi olisi mahdollisia jatkotutkimuksia ajatellen mielenkiintoista sijoittaa lisää ilmanlaadun havaintoasemia nimenomaan kaivosten ja maanottoalueiden läheisyyteen.

6.1.4 Maankäytön regressiomallin käytettävyys ilmanlaadun ennustamisessa

Tämän tutkimuksen lähtökohdat maankäytön regressiomallin onnistumiselle olivat erilaiset kuin aikaisemmissa tutkimuksissa. Vähäinen havaintoasemien lukumäärä aiheutti epäilyjä siitä, voidaanko regressiomallia toteuttaa ollenkaan. Hoekin et al. (2008) tekemän kirjallisuuskatsauksen mukaan yleensä on käytetty noin 20–100 ilmanlaadun havaintoasemaa regressiomallin luomiseen. Merbitz et al. (2012) käyttivät tutkimuksessaan kuitenkin ainoastaan yhdeksää havaintoasemaa tutkiessaan maankäytön ja muiden ympäristötekijöiden vaikutuksia ilman hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin Aachenin kaupungissa Saksassa.

Turun seudun ilmanlaadun havaintoverkostossa on monta hyvää puolta, joiden takia maankäytön regressiomallin soveltuvuutta Turun seudun ilmanlaadun ennustamisessa kannatti selvittää. Olemassa olevien ilmanlaadun havaintoasemien sijainnit edustavat monia eri maankäytön luokkia, kuten kuvasta 33 havaitaan. Havaintoasemat on sijoitettu tarkoituksella siten, että ne edustaisivat erilaisia ympäristöjä (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010: 12). Lisäksi vuosi 2011 oli aineiston perusteella otollinen tutkimusvuosi, koska silloin ilmanlaadun havaintoverkoston kuului kaksi kaupungin ulkopuolista havaintoasemaa (Ruissalo ja Pikisaari). Maaseutumaisetkin alueet olivat siis jokseenkin edustettuina. Pysyvässä havaintoverkostossa on lisäksi se hyvä puoli, että

tulokset ovat erittäin luotettavia ja ajallinen kattavuus on suuri. Taulukossa 2 esitellyiltä ilmanlaadun havaintoasemilta on saatavilla aineistoa koko vuodelta 2011. Ilmanlaadun vuoden keskiarvosta voidaan tämän vuoksi olla hyvinkin varmoja. Esimerkiksi Gonzales et al. (2005) ja Merbitz et al. (2012) käyttivät tutkimuksissaan vain lyhyitä muutaman viikon kestäviä havaintojaksoja. Lyhyissä ilmanlaadun havaintojaksoissa on ongelmana, että ilmanlaatuun voi vaikuttaa poikkeukselliset säätilanteet, minkä vuoksi tulokset eivät välttämättä ole päteviä edustamaan koko vuoden ilmanlaadun keskiarvoa.

Maankäytön regressiomallin luominen onnistui typpidioksidin osalta hyvin. Tuloksena saatiin monta mallia, joista parhaiten edeltävyys ehdot täyttävä malli mallinnettiin karttapohjalle. Tulos näyttää päällisin puolin totuudenmukaiselta. Mallin ennustajamuuttujat nostavat esille ihmistoimintaan liittyviä alueita (kaupalliset ja julkiset rakennukset, kerrostaloalueet) huonon ilmanlaadun omaaviksi alueiksi Turun seudulla, mikä teorian mukaan voisi pitää paikkansa, koska näille alueille (esim. Myllyn ja Ikean kauppakeskukset) tullaan yleensä autoilla. Tiettyjä ristiriitoja on kuitenkin havaittavissa tarkemmin tarkasteltaessa toimintoja kartan punaisimmilla alueilla. Esimerkiksi Yleisten rakennusten maankäyttömuotoon sisältyy myös rakennuksia, kuten sairaaloita ja kouluja, joilla ilmanlaatu saattaa olla mallin antamaa tulosta parempaa. Tällaisia alueita ovat esimerkiksi Raision uimahallin lähetyvillä sijaitseva alue, jolle on rakennettu kouluja ja päiväkoteja, Turun vankilan alue ja Petreliuksen alue vanhainkoteineen, kouluineen ja uimahallineen. Mallin mukaan kansalliset ilman typpidioksidipitoisuuden vuoden raja-arvo ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ylittyy paikoin edellä mainituissa paikoissa. Tämä ei voi pitää paikkaansa, koska Kauppatorin havaintoaseman ilman typpidioksidipitoisuus oli $30,11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuonna 2011. Malli yliarvioi siis erityisesti Yleisten rakennusten -maankäyttöluokan ilmanlaadun arvot, koska korkeimmat Turun seudun typpidioksidipitoisuudet ovat mallin mukaan yli 100 % korkeammat kuin Kauppatorilla mitattu typpidioksidipitoisuus. Kauppatorilla mitattuja typpidioksidipitoisuusarvoja voidaan aikaisempien tulosten perusteella pitää yhtenä Turun seudun huonoimman ilmanlaadun alueena (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010).

Tutkimusalueen alhaisimmaksi typpidioksidipitoisuudeksi ennustettiin $9,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, eli hieman todellisuutta suuremmaksi, koska Ruissalon typpidioksidin vuoden 2011 keskiarvo oli $8,93 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuonna 2011. Suomessa Utön saaren ilmanlaadun havaintoaseman tuloksia on käytetty yleisesti ottaen tausta-arvona. Saari sijaitsee noin 88 kilometriä Turusta lounaaseen. Utön typpidioksidin keskiarvo oli $2,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vuonna 2009 (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010: 18). Voidaan siis todeta, että

regressiomalli on yliarvioinut tutkimusalueen taustapitoisuuden. Näin käy helposti siksi, koska Utön kaltaisia ilmanlaadun havaintoasemia ei ollut mallin luomisessa mukana. Ruissalon ja Pikisaaren havaintoasemien typpidioksidipitoisuudet edustavat mallissa tällä hetkellä koko saaristoalueen typpidioksidipitoisuuksia, mutta todellisuudessa pitoisuudet ovat paljon matalammat rannikolta merelle päin kuljettaessa. Tulosten perusteella olisi voinut olla järkevää rajata tutkimusalue lähemmäksi rannikkoa.

Maankäytön regressiomallin heikko tulos johtuu tässä tutkimuksessa havaintoasemien vähäisestä lukumäärästä ja paikkatietoaineistojen soveltumattomuudesta. Ilmanlaadun havaintoasemien vähäisyyden vuoksi regressiomalli yliarvioi esimerkiksi Yleisten rakennusten -maankäyttömuodon vaikutuksen ilmanlaatuun. Yliarviointi johtuu siitä, että osa havaintoasemista on pystytetty nimenomaan seuraamaan tähän maankäyttöluokkaan kuuluvia rakennuksien, kuten koulujen, päiväkotien ja sairaaloiden ilmanlaatua (Turun seudun ilmanlaadun yhteistyöryhmä 2010: 12). Yleisten rakennusten maankäyttöluokka pitäisi saada pilkottua osiin esimerkiksi kaupan alan, terveyden ja koulutukseen liittyviin rakennuksiin tai vaihtoehtoisesti asettaa enemmän havaintoasemia muiden maankäyttöluokkien yhteyteen. Näin ollen olisi mahdollista saada realistisempi kuva siitä, mitkä maankäyttöluokat todellisuudessa vaikuttavat Turun seudun ilmanlaatuun.

Hengitettäville hiukkasille ei tässä tutkimuksessa pystytty luomaan maankäytön regressiomallia. Syy on todennäköisesti se, että havaintoasemien lukumäärä on tutkimuksessa liian pieni ($n=5$). Turun seudun käytettävissä olevista ilmanlaadun havaintoasemista ei esimerkiksi Ruissalossa tai Pikisaarella mitattu hengitettävien hiukkasten ilman pitoisuuksia lainkaan vuonna 2011. Tämä merkitsee sitä, että hengitettävien hiukkasten ilman pitoisuuksia mitattiin vain paikoissa, jotka koostuvat pääasiassa rakennetusta ympäristöstä. On vaikeaa luoda maankäytön regressiomalli hengitettäville hiukkasille olemassa olevalla ilmanlaadunaineistolla, koska maaseutumaiset alueet eivät ole aineistossa lainkaan edustettuina.

Aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa on käytetty maankäytön regressiomallia menetelmänä, on myös esiintynyt eroja ilmanlaadun parametrien välillä. Esimerkiksi Hoek et al. (2008) tekemän kirjallisuuskatsauksen perusteella on yleistä, että hengitettävien hiukkasten maankäytön regressiomallin selitysaste on alhaisempi kuin typpidioksidilla. Hoek et al. (2008) ovat spekuloineet, että alhaisempi selitysaste voi johtua kahdesta asiasta. Ensinnäkin tutkimuksissa hengitettävien hiukkasten havaintoasemien lukumäärä on ollut alhaisempi kuin typpidioksidin havaintoasemien lukumäärät, mikä voi selittää

alhaisemman selityksasteen. Toinen selitys voisi olla, että typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia mitataan usein samoissa paikoissa, vaikka ne eivät mahdollisesti sovellu samanlaisiin ympäristöihin, jos tarkoituksena on tutkia ympäristötekijöiden vaikutuksia ilmanlaatuun (Hoek et al. 2008).

Ilmatieteen laitos on tehnyt Turun seudulta ilmansaasteiden leviämismalliselvityksen vuonna 2007 (Salmi et al. 2009). Leviämismalliselvitys eroaa maankäytön regressiomallista siten, että leviämismallissa huomioidaan päästöjen tarkat määrät tonneissa päästölähteittäin, kun taas regressiomallissa huomioidaan vain mitatut ilmansaastepitoisuudet. Leviämismallin avulla saadaan maankäyttöregressiomallin tavoin ilmansaastekartta. Turun alueelta tehdyn päästöjen leviämismalliselvityksen mukaan huonoin ilmanlaatu on sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten osalta Satakunnantien ja Tampereentien risteyksessä Turun keskustan pohjoispuolella. Tällä alueella typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten vuoden raja-arvot ($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) saattavat ylittyä (Salmi et al. 2009: 59). Samansuuntaisia tuloksia saatiin myös regressiomallin avulla muilta paikoilta. Vaikka raja-arvot eivät laillisesti ole voimassa liikenneväylillä ja risteysalueilla, niin varsinkin kaupunkien sisäisillä risteys- ja liikenneväyläalueilla liikkuu ja oleskelee yleensä paljon ihmisiä. Tämän takia ilmanlaatua olisi mielenkiintoista seurata myös muilta paikoilta kuin Kauppatorilta.

Leviämismallin vertaaminen maankäytön regressiomalliin osoittaa leviämismallin huomioivan regressiomallia paremmin muun muassa ilmakehän prosesseja. Esimerkiksi typpioksidin kemiallinen muuttuminen on otettu huomioon Turun seudun leviämismallissa. Tämän lisäksi ajallisesta näkökulmasta leviämismalli toimii maankäytön regressiomallia paremmin ilmanlaadun tarkastelussa. Leviämismallin avulla pystytään esimerkiksi havainnoimaan, missä ja milloin ohje- tai raja-arvot ylittyvät tietyn ilmanlaadun parametrin kohdalla. Maankäytön regressiomallin tuloksena saadaan vain tietyn vuoden keskimääräinen ilmanlaatu, jos malliin ei ole syötetty tietoja ilmansaasteiden määrästä ja niiden päivittäisestä vaihtelusta. Regressiomalli on kuitenkin leviämismallia käyttökelpoempi hilakoon osalta. Esimerkiksi tutkimuksen tuloksena saatiin tietoa ilmanlaadusta koko tutkimusalueelta 10 x 10 metrin hilakoolla. Näin tarkkaa tietoa voidaan hyödyntää esimerkiksi maankäytön suunnittelussa tai ilmansaasteille altistumista selvittävässä tutkimuksissa.

6.2 Jatkotutkimustarpeita

Maailmanlaajuisesti tarkasteltuna Turun seudun ilmanlaatu on suhteellisen hyvää. Tämä ei kuitenkaan sulje pois jatkotutkimusten tarvetta alueen ilmanlaadusta. Tämän tutkimuksen myötä on saatu hyvä käsitys Turun seudun ilmanlaadun ajallisesta ja alueellisesta luonteesta vuosina 2001–2010, ja tutkimuksen tuloksia voisi esimerkiksi verrata vuosien 1991–2000 tai aikaisempien havaintojaksojen ilmanlaatuun. Täten olisi mahdollista saada paremman käsityksen ilmanlaadun kehityssuunnasta ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Tuloksia voi myös käyttää selvittäessä ilmastonmuutoksen vaikutuksia ilmanlaatuun. Stephenson et al. (2006) ovat tutkineet NAO-indeksin ja ilmastonmuutoksen välistä yhteyttä. Tulokset osoittavat, että hiilidioksidipitoisuuden kasvu vaikuttaa mahdollisesti NAO-indeksiin positiivisesti. Tämä tarkoittaa sitä, että ilmastonmuutos aiheuttaisi ilmanlaadun paranemista erityisesti hengitettävien hiukkasten osalta.

Tutkimus osoittaa, että on olemassa tiettyjä säätilanteita, joiden vallitessa todennäköisemmin esiintyy huonoa ilmanlaatua. Tämän takia olisi mielenkiintoista tutkia, onko ilmanlaadussa havaittavissa muutoksia myös muissa Suomen kaupungeissa Turun seudun huonoon ilmanlaatuun vaikuttavien säätilanteiden vallitessa. Näin voitaisiin tarkemmin selvittää, onko olemassa suursäätilanne, joka vaikuttaa nimenomaan Turun seudun ilmanlaatuun, ja mikä siihen on syynä. Huonon ilmanlaadun taustalla vaikuttavia suursäätilanteita voisi tarkastella myös muilla tilastollisilla menetelmillä kuin mitä tässä tutkimuksessa käytettiin. Esimerkiksi klusteri- ja pääkomponenttianalyysi ovat olleet merkittäviä tutkimusmenetelmiä muissa vastaavanlaisissa tutkimuksissa.

Turun seudulla ei ollut vielä tätä tutkimusta tehdessä mahdollista saada aineistoa lämpötilainversion voimakkuudesta. Tieto lämpötilainversion voimakkuudesta huonon ilmanlaadun tilanteissa olisi tärkeää, koska teorian mukaan inversiotilanteet vaikuttavat selvästi huonon ilmanlaadun syntyyn. Myös tämän tutkimuksen tulokset huonon ilmanlaadun tilanteiden ajankohdista (talvi/kevät, aamupäivä) osoittavat, että lämpötilainversion esiintyminen näissä tilanteissa on todennäköistä.

Tätä tutkimusta varten ei taloudellisista syistä ollut mahdollista hankkia lisää ilmanlaadun havaintoasemia. Tutkimuksen tulokset kuitenkin osoittavat, että mikäli maankäytön regressiomallia halutaan jatkossakin käyttää Turun seudulla, tulisi myös havaintoverkostoa laajentaa ja tihentää. Vertailua eri menetelmien kuten interpoloinnin, leviämismallinnuksen ja regressiomallinnuksen välillä olisi myös mahdollista tehdä,

mikäli ilmanlaadun havaintoasemien verkosto olisi tiheämpi. Havaintoverkosta laajennettaessa tulisi myös harkita meteorologisten parametrien käyttöä muuttujina maankäytön regressiomallissa. Esimerkiksi Su et. al. (2008) mukaan meteorologisten parametrien lisääminen maankäytön regressiomalliin parantaa huomattavasti mallin luotettavuutta. Tuulen suunnan ja nopeuden mittaaminen samoissa paikoissa, missä ilmanlaatuakin mitataan, antaisi selvemmän kuvan Turun seudun paikallisilmaston vaikutuksesta ilmanlaatuun. Turussa on olemassa laaja lämpötilan havaintoverkosto. Ilmanlaadun havaintoverkosta voitaisiin laajentaa paikkoihin, joissa mitataan lämpötilaa tai päinvastoin lämpötilan havaintoverkosta tihentää paikkoihin, joissa seurataan ilmanlaatua. Tällöin ympäristötekijöiden vaikutusten eroavaisuutta lämpötilan ja ilmanlaadun osalta voitaisiin tutkia paremmin, koska tutkimuksessa todistettiin, että voimakas lämpösaareke korreloi ajallisesti korkeiden ilmansaastepitoisuuksien kanssa Turun seudulla.

Maankäytön regressiomallin tulokset osoittavat myös muiden kuin ilmanlaatuaineistojen määrällisen puutteellisuuden. Mikäli halutaan kehittää luotettava maankäytön regressiomalli, olisi ehdottomasti saatava lisää ajankohtaisia paikkatietoaineistoja Turun seudun liikennemääristä. Tällä hetkellä aineistot ovat keskittyneet ainoastaan yleisten teiden tai Turun keskustan liikennemäärien mittaamiseen. Lähikuntien sisäisten liikenneverkostojen liikennemääristä olisi myös tärkeää saada tarkempaa tietoa.

Ilmanlaadun ennustamisen käytännön puolta voisi myös kehittää. Tutkimuksen tuloksista on vaikea luoda mitään automaattista mallia, jota voidaan käyttää sääennusteiden yhteydessä. Esimerkiksi Greene et al. (1999) ovat tutkimuksessaan kehittäneet indeksin ("Temporal Synoptic Index, TSI"), jonka avulla voidaan ennustaa tietyn paikan ilmanlaatua. TSI perustuu oikeaan säätulkintaan tietyssä paikassa, ja se on täysin automatisoitu, joten tieto päivän ilmanlaadusta saadaan nopeasti. Indeksien pohjalta on kehitetty tietokoneohjelma, joka huomioi sääennusteet, ja täten ihmisiä voidaan ajoissa varottaa mahdollisista huonon ilmanlaadun tilanteista. Kvantitatiivisuuden vuoksi menetelmä on myös hyvin objektiivinen. Suomessa on keväällä 2012 otettu käyttöön ilmanlaadusta tiedottava tekstiviestipalvelu (<http://www.ilmanlaatuviesti.fi>). Palvelun avulla on kuitenkin saatavilla ainoastaan tietoa Turun Kauppatorin havaintoasemalta. Mikäli tiedotusjärjestelmä yhdistettäisiin ilmanlaadun ennustamiseen sääennusteiden ja onnistuneen maankäytön regressiomallin kanssa, olisi mahdollista tiedottaa ihmisiä etukäteen ilmanlaadusta myös alueilla, joilla ei aktiivisesti mitata ilmanlaatua.

Sääennusteita vertailemalla voidaan saada käsitys siitä, ovatko tulevien päivien sääolosuhteet riski huonon ilmanlaadun synnylle.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

1. Turun seudun ilmanlaatu on ollut pääsääntöisesti hyvää vuosina 2001–2010. Typpidioksidipitoisuudet ovat ylittäneet numeerisen ohjearvon ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja hengitettävät hiukkaset numeerisen raja-arvon ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$) vaihtelevasti riippuen vuodesta. Hiukkaspitoisuuksien raja-arvot ovat kuitenkin ylittyneet vuosittain sallitun määrän (alle 35 kertaa) kaikilla Turun seudun havaintoasemilla. Alueellisesti tarkasteltuna Turun Kauppatorin ilmanlaadun havaintoasemalla on tutkimusalueen huonoin ilmanlaatu sekä hengitettävien hiukkasten että typpidioksidin osalta.

Ilman typpidioksidipitoisuus ylittää numeerisen ohjearvon pääasiassa talvella arkipäivisin. Hengitettävien hiukkasten osalta ilmanlaatu on huonointa keväällä arkipäivisin ja satunnaisesti myös viikonloppuisin.

2. Ilmanlaadun ja sään välillä on havaittavissa syy-yhteys Turun seudulla. Heikot lounaistuulet, selkeä ja kuiva sää aiheuttavat tutkimusalueella korkeita typpidioksidipitoisuuksia. Keskivertoa voimakkaamman lämpösaarekkeen voidaan myös todeta olevan läsnä sekä typpidioksidin että hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien ollessa korkeat. Tulosten perusteella on tunnistettavissa kaksi suursäätilaa, joiden vallitessa typpidioksidipitoisuudet yleisimmin ylittävät numeeriset ohjearvot ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Matalapaineen keskus sijoittuu näissä tilanteissa joko Pohjois-Atlantille tai Pohjois-Venäjälle ja korkeapaineen keskus puolestaan Etelä- tai Keski-Eurooppaan.

Heikot itätuulet, selkeä ja kuiva sää aiheuttavat tutkimusalueella korkeita hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia. Tulosten perusteella on tunnistettavissa kaksi suursäätilaa, joiden vallitessa hengitettävien hiukkasten pitoisuudet yleisimmin ylittävät vuorokauden numeeriset raja-arvot ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Matalapaineen keskus sijoittuu näissä tilanteissa joko tutkimusalueen pohjois- tai länsipuolelle ja korkeapaineen keskus puolestaan joko tutkimusalueen länsi- tai itäpuolelle.

3. Turun seudun ilmanlaadun, topografian ja maankäytön välillä on havaittavissa korrelaatiota, mutta syy-yhteys on pienen otoskoon takia vaikea varmuudella vahvistaa. Tutkimusalueen typpidioksidipitoisuuksiin vaikutti korrelaatiokertoimien perusteella vuonna 2011 ilmanlaatua parantaen eniten

alhainen suhteellinen korkeus, vesistöt, vapaa-ajan ja virkistysalueet sekä maa- ja metsätalouden alueet. Korkeat typpidioksidipitoisuudet esiintyvät erityisesti kerrostalo- ja liikennealueiden sekä liiketoiminnan ja hallinnon alueiden lähetyillä.

Tutkimusalueen hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin vaikutti vuonna 2011 ilmanlaatua parantaen eniten vapaa-ajan ja virkistysalueet sekä maa- ja metsätalouden alueet. Korkeat hengitettävien hiukkasten ilman pitoisuudet esiintyvät korrelaatiokertoimien perusteella erityisesti liikerakennusten läheisyydessä. Typpidioksidin yhteys topografiaan ja maankäyttöön on korrelaatiokertoimien perusteella paljon selvempi kuin hengitettävien hiukkasten osalta.

4. Maankäytön regressiomalli soveltuu tämän tutkimuksen perusteella hyvin ilmanlaadun ennustamiseen myös Turun seudulla, mutta havaintoasemien vähäisen lukumäärän ja joidenkin paikkatietoaineistojen puutteellisuuden vuoksi tuloksia ei kuitenkaan voida pitää luotettavina. Tilastolliset edeltävyys ehdot täyttävä malli saadaan aikaan typpidioksidin osalta käyttäen ennustajamuuttujina yleisten rakennusten, liikerakennusten ja kerrostaloalueiden maankäytön muotoja. Malli kuitenkin yliarvioi ilman typpidioksidipitoisuudet yleisten rakennusten maankäyttöluokan osalta. Maankäytön regressiomalli vahvistaa silti aikaisempia tuloksia ja johtopäätöksiä siitä, että liikenteen päästöt vaikuttavat eniten typpidioksidipitoisuuksiin Turun seudulla. Hengitettävien hiukkasten osalta ei pystytty luomaan yhtään tilastollisesti merkitsevää mallia. Ilmanlaadun havaintoverkoston laajentaminen ja tihentäminen olisi olennainen ensiaskel, mikäli Turun seudulle halutaan saada luotettava leviämismallin kaltainen alueellinen katsaus maankäytön regressiomallia käyttäen.

KIITOKSET

Kiitokset ohjaajilleni prof. Jukka Käyhkölle ja FM/KTM Juuso Suomelle, jotka ovat auttaneet minua tutkimusaiheen löytämisessä ja tutkimusprosessissa. Lisäksi haluaisin kiittää Turun kaupungin ympäristönsuojelutoimiston ilmanlaatuyksikön ilmanlaadun asiantuntijaa Miika Meretojaa, joka on luovuttanut käyttöön tämän tutkimuksen ilmanlaatuaineiston ja opastanut ilmanlaatuun liittyvissä kysymyksissä.

LÄHTEET

- Alalammi, P., Winqvist, S., Ahonen, K. (1987). *Suomen kartasto: 131, Ilmasto*. Maanmittaushallitus. 31 s. Helsinki.
- Almbauer, R.A., Oettl, D., Bacher, M., Sturm, P.J. (2000). Simulation of the air quality during a field study for the city of Graz. *Atmospheric Environment* 34, 4581–4594.
- Anttila, P., Alaviippola, B., Salmi, T. (2003). *Ilmanlaatu Suomessa – Mitatut pitoisuudet suhteessa ohje- ja raja-arvoihin sekä vertailuja Eurooppalaisiin pitoisuustasoihin*. Ilmatieteen laitos. 105 s. Helsinki.
- Beelen, R., Hoek, G., Fischer, P., van den Brandt, P.A., Brunekreef B. (2007). Estimated long-term outdoor air pollution concentrations in a cohort study. *Atmospheric Environment* 41, 1343–1358.
- Brauer, M., Hoek, G., van Vliet, P., Meliefste, K., Fischer, P., Gehring, U., Heinrich, J., Cyrus, J., Bellander, T., Lewne, M., Brunekreef, B. (2003). Estimating long-term average particulate air pollution: application of traffic indicators and geographic information systems. *Epidemiology* 14, 228–239.
- Briggs, D.J. (1992). *Mapping environmental exposure*. Geographical and Environmental Epidemiology. 158 s. Oxford.
- Briggs, D., Collins, S., Elliot, P., Fischer, P., Kingham, S., Lebret, E., Pyl, K., Reeuwijl, H.V., Smallborne, K., Veen, A.V.D. (1997). Mapping urban air pollution using GIS: a regression-based approach. *International Geographical Information Science* 11, 699–718.
- Buchholz, S., Junk, J., Krein, A., Heinemann, G., Hoffmann, G. (2010). Air pollution characteristics associated with mesoscale atmospheric patterns in northwest continental Europe. *Atmospheric Environment* 44, 5183–5190.
- Bunn, H.J, Dinsdale, D., Smith, T., Grigg, J. (2001). Ultrafine particles in alveolar macrophages from normal children. *Thorax* 56, 932–934.
- Carslaw, D.C., Beevers, S.D., Bell, M. (2007). Risks of exceeding the hourly EU limit value for nitrogen dioxide resulting from increased road transport emissions of primary nitrogen dioxide. *Atmospheric Environment* 41, 2073–2082.
- CC-BY-SA 3.0. Creative commons Attribution-ShareAlike 3.0. 26.5.2012.
< <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>>
- Chen, D., Hellström, C. (1999). The influence of the North Atlantic Oscillation on the regional temperature variations. *Tellus* 51, 505–516.
- Cohen, A.J., Anderson, H.R., Ostro, B., Pandey, K., Krzyzanowski, M., Künzli, N., Gutschmidt, K., Pope III, C.A., Romieu, I., Samet, J.M., Smith, K.R. (2004). Urban Air Pollution. In M.

- Ezzati et al.: *Comparative quantification of health risks: global and regional burden of disease attributable to selected major risks factors*. World Health Organization, 1353–1433.
- Conti, S., Meli, P., Minelli, G., Solmini, R., Toccaceli, V., Vichi, M., Beltrano, C., Perini, L. (2004). Epidemiologic study of mortality during the summer 2003 heat wave in Italy. *Environmental Reserach* 98, 390–399.
- CPC. (2012). Climate Prediction Center. NOAA, National Weather Service National Centers for Environmental Prediction. 06.04.2012. <<http://www.cpc.ncep.noaa.gov/>>
- Davis, R.E., Kalkstein, L.S. (1990). Using a spatial synoptic climatological classification to assess changes in atmospheric pollution concentrations. *Physical Geography* 11, 320–342.
- Dorling, S. R., Davies, T.D., Pierce, C.E. (1992a). Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry – method and applications. *Atmospheric Environement* 26, 2575–2581.
- Dorling, S. R., Davies, T.D., Pierce, C.E. (1992b). Cluster analysis: A technique for estimating the synoptic meteorological controls on air and precipitation chemistry – results from Eskdalemuir, south Scotland. *Atmospheric Environement*. 26, 2583–2602.
- ECMWF. (2011). European Center for Medium-Range Weather Forecast. 06.04.2012. <<http://www.ecmwf.int/>>.
- Elminir, T.H.K. (2005). Dependence of urban air pollutants on meteorology. *Science of The Total Environment* 350, 225–237.
- EPA. (2011). United States Environmental Protection Agency. 13.01.2012. <<http://www.epa.gov/>>.
- EY. (2008). Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivi 50/2008. 13.5.2012. <<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:152:0001:01:FI:HTML>>.
- Eyring, V.V., Ivar, S.A., Isaksen, B., Berntsen, T., William, J., Collins, D., James, J., Corbett, E., Endresen, O., Grainger, R.G., Moldanova, J., Schlager H., Stevenson, D.S. (2010). *Atmospheric Environment* 44, 4735–4771.
- Flocas, H., Kelessis, A., Helmis, C., Petrakakis, M., Zoumakis, M., Pappas, K. (2009). Synoptic and local scale atmospheric circulation associated with air pollution episodes in an urban Mediterranean area. *Theoretical and Applied Climatology* 95, 265–277.

- Forster, P.M., Solomon, S. (2003). Observations of a “weekend effect” in diurnal temperature range. *Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America* 100, 11225–11230.
- Greene, J.S., Kalkstein, L.S., Ye, H., Smoyer, K. (1999). Relationships between synoptic climatology and atmospheric pollution at 4 US cities. *Theoretical and applied climatology* 62, 163–174.
- Gonzales, M., Qualls, C., Hudgens, E.L., Neas, L.N. (2005). Characterization of a spatial gradient of nitrogen dioxide across a United States – Mexico border city during winter. *Science of the Total Environment* 337, 163–173.
- Grundström, M., Linderholm, H.W., Klingberg, J., Pleijel, H. (2011). Urban NO₂ and NO pollution in relation to the North Atlantic Oscillation. *Atmospheric Environment* 43, 883–888.
- Hidy, G.M., Mueller, P.K., Tong, E.Y. (1978). Spatial and temporal distribution of airborne sulfate in parts of the United States. *Atmospheric Environment* 12, 735–752.
- Hochadel, M., Heinrich, J., Gehring, U., Morgenstern, V., Kuhlbusch, T., Link, E., Wichmann, H.E., Kramer, U. (2006). Predicting long-term average concentrations of traffic-related air pollutants using GIS based information. *Atmospheric Environment* 40, 542–553.
- Hoek, G., Beelen, R., Hoogh, K., Vennaus, D., Gulliver, J., Fischer, P., Briggs, D. (2008). A review of land-use regression models to assess spatial variation of outdoor air pollution. *Atmospheric Environment* 42, 7561–7578.
- HSY. (2011). Helsingin seudun ympäristöpalvelut. 23.4.2012.
<<http://www.hsy.fi/seutu tieto/ilm an laatu/vaikuttav at tekij at/pien poltto/Sivut/default.aspx>>
- Ilmanlaatuportaali (2012). Tietoa ilmansaasteista. 23.3.2012.
<<http://www.ilmanlaatuportaali.fi>>
- Ilmatieteen laitos. (2002). Mitä hengitämme? 20.4.2012.
<http://www.fmi.fi/kuvat/Mita_hengitamme.pdf>
- Ilmatieteen laitos. (2012a). Pienhiukkasten vaikutus ilmastoon. 7.4.2011.
<http://www.fmi.fi/ilmastonmuutos/miksi_22.html>
- Ilmatieteen laitos. (2012b). Tilastoja Suomen ilmastosta 1981–2010. 19.4.2012.
<<http://ilmatieteenlaitos.fi/ilmastollinen-vertailukausi-1981-2010>>
- Jantunen M., Komulainen H., Nevalainen A., Tuomisto J., Venäläinen R., Viluksela M. (2005). *Selvitys elinympäristön kemikaaliriskeistä. Kansallisen kemikaaliohjelman taustaselvitys.* Kansanterveyslaitoksen julkaisuja 11. 257 s. Helsinki.

- Jonsson, P., Bennet, C., Eliasson, E., Lindgren, S. (2004). Suspended particulate matter and its relations to the urban climate in Dar es Salaam, Tanzania. *Atmospheric Environment* 38, 4175–4181.
- Kalkstein, L.S., Corrigan, P.R. (1986). A synoptic climatological approach for geographical analysis: assessment of sulfur dioxide concentrations. *Annals of the Association of American Geographers* 76, 381–395.
- Kalkstein, L. S., Tan G., Skindlov, J. (1987). An evaluation of objective clustering procedures for use in synoptic climatological classification. *Journal of Climate and Applied Meteorology* 26, 717–730.
- Kalkstein, L.S. (1991). A new approach to evaluate the impact of climate upon human mortality. *Environmental Health Perspectives* 96, 145–150.
- Karppinen A., Joffre, S.M., Kukkonen, J., Bremer, P. (2001). Evaluation of inversion strength and mixing heights during extremely stable atmospheric stratification. *International Journal of Environmental Pollution* 16, 603–613.
- Karppinen A., Joffre, S.M., Kukkonen J. (2002). Evaluation of meteorological data measured at a radio tower in the Helsinki Metropolitan Area. In: Piringer M., & Kukkonen J.: *Mixing Heights and inversions in urban areas*. Proceedings of the workshop 3 and 4 October 2001, Toulouse, France. COST Action 715. European Commission, 89–98. Brussels
- Krzyzanowski, M. (2005). *Health effects of transport-related air pollution: summary for policy-makers*. WHO. 12 s. Copenhagen.
- Kukkonen J., Salmi T., Saari H., Konttinen M. and Karstastenpää R. (1999). Review of urban air quality in Finland. *Boreal Environment Research* 4, 55–65.
- Kukkonen, J., Sokhi, R., Slordal, H.L., Finardi, S., Fay, B., Millan, M., Salvador, R., Palau, J.L., Rasmussen, A., Schayes, G., Berge, E. (2005). Analysis and evaluation of European air pollution episodes. In: Fisher, B. et al. (eds.): *Meteorology applied to urban air pollution problems. Final report COST Action 715*, 99-114. Bulgaria
- Lai, L-W., Cheng, W-L. (2009). Air quality influenced by urban heat island coupled with synoptic weather patterns. *Science of the total environment* 407, 2724–2733.
- Maastotietokanta. (2012). Maanmittauslaitos. Lupa: 21.5.2012.
<http://www.maanmittauslaitos.fi/avoindata_lisenssi_versio1_20120501>
- Madhavi Latha, K.M., Highwood, E.J. (2006). Studies on particulate matter (PM₁₀) and its precursors over urban environment of Reading, UK. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 101, 367–379.
- Mayer, H. (1999). Air pollution in cities. *Atmospheric Environment* 33, 4029–4037.

- McPherson, E.G., Nowak, D.J. & Rowntree, R.A. (1994). *Chicago's urban forest ecosystem: Results of the Chicago urban forest climate project*. United States department of agriculture. Randnor. 210 s.
- Merbitz, H., Buttstädt, M., Michael, S., Dott, W., Schneider, C. (2012). GIS-based identification of spatial variables enhancing heat and poor air quality in urban areas. *Applied Geography* 33, 94–106.
- Michael, P.Z. (1997). An analysis of the meteorological parameters affecting ambient concentrations of acid aerosols in Uniontown, Pennsylvania. *Atmospheric environment* 31, 869–878.
- Millaín M. Millaín*, M. José Sanz, Rosa Salvador, Enrique Mantilla. (2002). Atmospheric dynamics and ozone cycles related to nitrogen deposition in the western Mediterranean. *Environmental Pollution* 118, 167–186.
- Miller, K.A., Siscovick, D.S, Sheppard, L., Shepherd, K., Sullivan, J.H., Anderson, G.L., Kaufman, J.D. (2007). Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women. *The New England Journal of Medicine* 356, 447–458.
- Mustafić, H., Jabre, P., Caussin, C., Murad, M.H., Escolano, S., Tafflet, M., Périer, M-C., Marijon, E., Vernerey, D., Empana, J-P., Jouven, X., (2012). Main Air Pollutants and Myocardial Infarction. A Systematic Review and Meta-analysis. *The Journal of American Medical Association* 307, 713–721.
- Morawska, L., Jayaratne, E.R., Mengersen, K., Jamriska, M., Thomas, S. (2002). Difference in airborne particle and gaseous concentrations in urban air between weekdays and weekends. *Atmospheric Environment* 36, 4375–4383.
- Munn, R.E., Bolin, B. (1971). Global air pollution–meteorological aspects. A survey. *Atmospheric Environment* 5, 363–401.
- Nawrot, T.S., Perez, L., Künzli, N., Munters, E., Nemery, B. (2011). Public health importance of triggers of myocardial infarction: a comparative risk assessment. *The Lancet*. 377, 732–740.
- Nyman, H. (2007). *Arktisen ilmamassan aiheuttamat pakkasjaksot ja niihin liittyvä synoptinen säätilanne Suomessa 1950–2007*. 56 s. Julkaisematon Pro Gradu – tutkielma. Helsingin yliopiston fyysikaalisten tieteiden laitos, Helsinki.
- OECD. (2004). *Key Environmental Indicators*. Organisation for economic development and co-operation. 36 s. Paris.
- Oke, T.R. (1987). *Boundary layer climates*. 2nd edition. Routledge, London. 435 s.

- Omstedt, G., Bringfelt, B., Norrman, M., Johansson, C., (2005). A model for vehicle induced non-tailpipe emissions of particles along Swedish roads. Submitted to *Atmospheric Environment* 39, 6088–6097.
- Pietarila, H., Pesonen, R., Rasila, T., Rantakrans, E., Haarala, S., Lesojeff, K. (1997). *Turku, Raisio, Naantali, Kaarina. Turun seudun ilmanlaatu tutkimus*. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- Pilewskie, P. (2007). Aerosols heat up. *Nature* 448. 2.
- Pleijel, H., Klingberg, J., Bäck, E. (2009). Characteristics of NO₂ pollution in the city of Gothenburg, south-west Sweden – relation to NO_x and O₃ levels, photochemistry and monitoring location. *Water air and soil pollution focus* 9, 15–25.
- Pohjola, M.A., Rantamäki, M., Kukkonen, J., Karppinen, A., Berge E. (2004). Meteorological evaluation of a severe air pollution episode in Helsinki on 27–29 December 1995. *Boreal Environmental Research* 9, 75–87.
- Pope III, C.A., Ezzati, M., Dockery, D.W. (2009). Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States. *The New England journal of medicine* 360, 376–386.
- Ramanathan, V., Ramana, M.V., Roberts, G., Kim, D., Corrigan, C., Chung, C. & Winker, D. (2007). Warming trends in Asia amplified by brown cloud solar absorption. *Nature*. 448, 575–579.
- Ramanathan, V., Feng, Y. (2009). Air pollution, greenhouse gases and climate change: Global and regional perspectives. *Atmospheric Environment* 43, 37–50.
- Rinne, J., Koistinen, J., Saltikoff, E. (2001). *Suomalainen sääkirja - etanasta El Niñoon*. 253 s. Keuruu.
- Salmi, J., Lappi, S., Rasila, T., Lovén K., Hannuniemi, H. (2009). *Turun seudun päästöjen leviämismalliselvitys. Energiantuotannot, teollisuuden, laivaliikenteen ja autoliikenteen typenoksidi-, rikkidioksidi- ja hiukkaspäästöjen leviämislaskelmat*. 105 s. Ilmatieteen laitos, Helsinki.
- Scapecchi, P. (2008). *The Health Costs of Inaction with Respect to Air Pollution*. OECD Environment Working Papers. No. 2. 48 s. Paris.
- Schwegler, F. (2008). Air quality management: a mining perspective. In: *Air pollution XIV*. University of the West of England. United Kingdom. 205–212.
- Su, J.G., Brauer, M., Ainslie, B., Steyn, D., Larson, T., Buzzelli, M. (2008). An innovative land use regression model incorporating meteorology for exposure analysis. *Science of the total environment* 390, 520–529.
- Suomi, J. (2005). *Kaupungin lämpösaarekkeen ominaispiirteitä Turussa*. 89 s. Julkaisematon Pro Gradu -tutkielma. Turun yliopiston maantieteen laitos, Turku.

- Suomi, J. & Käyhkö J. (2012). The impact of environmental factors on urban temperature variability in the coastal city of Turku, SW Finland. *International Journal of Climatology* 32, 451–463.
- Taanila, A. (2010). *Lineaariset regressiomallit*. Haaga helian ammattikorkeakoulun opetusmoniste. 26 s. Helsinki.
- Tan, P-H., Chou, C., Liang, J-Y., Chou, C., Shiu, C-J. (2009). Air pollution "holiday effect" resulting from the Chinese New Year. *Atmospheric Environment* 43, 2114–2124.
- Turun kaupunki (2001). *Turun yleiskaava 2020*. Ympäristö- ja kaavoitusvirasto, yleiskaavatoimisto. 87 s. Turku.
- Turun seudun ilmansuojelun yhteistyöryhmä. (2010). *Turun kaupunkiseudun ilmanlaatu vuonna 2009*. 58 s. Painatuspalvelukeskus. Turku.
- van der Wal, J.T., Janssen, L.H.J.M. (2000). Analysis of spatial and temporal variations of PM 10 concentrations in the Netherlands using Kalman. *Atmospheric Environment* 34, 3675–3687.
- Vardoulakis, S., Kassomenos, P. (2008). Sources and factors affecting PM10 levels in two European cities: Implications for local air quality management. *Atmospheric Environment* 42, 3949–3963.
- Vnp 480/1996. Valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista ja rikkilaskeuman tavoitearvoista. 22.5.2012. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/1996/19960480>>
- Vna 38/2011. Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta. 22.5.2012. <<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2011/20110038>>
- Väestörekisterikeskus. (2012). Asukasluvut 31.12.2011. 25.5.2012. <<http://www.vrk.fi/default.aspx?id=278>>
- Wallace, J., Corr., D., Kanaroglou, P. (2010). Topographic and spatial impacts of temperature inversions on air quality using mobile air pollution surveys. *Science of the Total Environment* 408, 5086–5096.
- Watson J.G., Chow, J.C. 2002. A wintertime PM2,5 episode at the Fresno, CA, supersite. *Atmospheric Environment* 35, 465–475.
- Weuve, J., Puett, R.C., Schwartz, J., Yanosky, J.D., Laden, F., Grodstein, F. (2012). Exposure to Particulate Air Pollution and Cognitive Decline in Older Women. *Archives of Internal Medicine* 172,219-227.
- Wetterzentrale. (2012). Wetterzentrale. 06.04.2012. <<http://www.wetterzentrale.de/>>
- YK. (2010). *World urbanization prospects: The 2009 Revision*. United Nations. 47 s. New York.
- YSL. (2000). Ympäristönsuojelulaki 4.2000/86. 13.5.2012. <[http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086?search\[kohdistaja\]=koko&sear](http://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2000/20000086?search[kohdistaja]=koko&sear)>

*ch[all]=ilmanlaatu&search[any]=&search[phrase]=&search[without]=&search[type]=t
ekstihaku>.*

Ympäristöministeriö. (2011). 9.9.2011. <<http://www.ymparisto.fi>>

LIITTEET

Liite 1: Tutkimustapaukset typpidioksidin osalta havaintoasemittain ($\text{NO}_2 > 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$) ja vallitsevat suursäätilanteet kyseisen vuorokauden aikana.

Havaintoasemat	Päivämäärä	Klo	NO_2 -pitoisuus/t ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Suursäätila (/vrk)
Kauppatori	la 10.11.2001	8-9	184	M2:K4
		9-10	201	
	ke 2.1.2002	22-23	167	M33:K3
	pe 1.3.2002	8-9	158	M1:K4
		9-10	163	
	to 20.2.2003	7-8	157	M4:K44
		8-9	152	
	ti 23.12.2003	16-17	154	M2:K4
	ti 25.10.2005	8-9	157	M4:K3
	ke 16.11.2005	9-10	155	M11:K4
	ke 14.12.2005	7-8	157	M1:K4
		8-9	150	
		10-11	155	
	ti 3.1.2006	9-10	151	M4:K11
	ma 29.1.2007	7-8	152	M33:K4
		8-9	178	
ma 5.1.2009	10-11	163	M1:K44	
to 8.1.2009	7-8	170	M1:K4	
	8-9	214		
ma 8.11.2010	7-8	156	M11:K4	
	8-9	195		
	9-10	236		
	10-11	191		
ti 7.12.2010	18-19	157	M44:K2	
Raisio	ma 19.2.2001	7-8	158	M4:K4
		8-9	172	
		9-10	154	
	ma 25.2.2002	8-9	157	M4:K4
	ke 2.10.2002	8-9	153	M2:K44
	ke 30.10.2002	8-9	182	M2:K3
	to 13.11.2003	7-8	179	M4:K33
		8-9	168	
	ti 25.11.2003	9-10	177	M22:K33
		10-11	218	
		11-12	253	
ti 21.12.2004	9-10	156	M4:K3	
ke 14.12.2005	8-9	150	M1:K4	

Havaintoasemat	Päivämäärä	Klo	NO ₂ -pitoisuus/t (µg/m ³)	Suursäättilä (/vrk)
Raisio	ti 26.2.2008	7-8	162	M11:K2
	ke 1.12.2010	8-9	155	M2:K44
		9-10	163	M2:K44
Naantali	su 30.9.2001	20-21	185	M4:K3
		21-22	173	
	to 27.12.2001	8-9	154	M22:K3
	ti 9.12.2003	8-9	155	M4:K3
		9-10	174	
		10-11	194	
		11-12	158	
		16-17	155	
	ti 23.12.2003	15-16	159	M2:K4
		16-17	184	
		17-18	184	
18-19		154		
pe 23.1.2004	7-8	150	M4:K3	
ke 27.10.2010	15-16	158	M4:K3	
Kaarina	to 1.12.2005	10-11	175	M4:K2
	ti 19.12.2006	10-11	155	M1:K4

 = Ohjearvo ylittynyt kahdella ilmanlaadun havaintoasemalla saman vuorokauden aikana

Suursäättilanteiden luokitteluperuste

M = Matalapaine

K = Korkeapaine

Lähimmän korkea- ja matalapainekeskuksen sijainti suhteessa tutkimusalueeseen:

- | | |
|----|--------------------------|
| 1 | Jäämeri |
| 11 | Pohjois-Suomi |
| 2 | Venäjä |
| 22 | Itä-Suomi ja Karjala |
| 3 | Keski- ja Etelä-Eurooppa |
| 33 | Baltia |
| 4 | Atlantti |
| 44 | Ruotsi ja Norja |

Liite 2: Vallitseva sää typpidioksidipitoisuuksien ylittäessä numeeriset ohjearvot (150 µg/m³).

Päivämäärä	Tuulen suunta (°)	Tuulen nopeus (ka m/s)	Ilmanpaine (ka hPa)	Sademäärä (kum. 24 h mm)	Kokonaispilvisuus (x/8)	Lämpösaareke (°C /t)	NAO-indeksi
19.2.2001	300	0	1019	0,8	4	-	1,332
30.9.2001	65	1	1019	0,2	2	6,8	-0,705
10.11.2001	215	2	1009	0,5	3	6,4	0,593
27.12.2001	satunnainen	0	998	0	6	5,7	-0,612
2.1.2002	200	0	1036	0	2,7	7,4	-0,516
25.2.2002	200	2	986	0	5	7,1	1,196
1.3.2002	335	0,5	994	0	5	6,9	0,137
2.10.2002	230	1	1020	0	4	7	0,669
30.10.2002	250	2	1003	0	7	3,9	-0,464
20.2.2003	40	1	1023	0	1	6,1	0,302
13.11.2003	230	2	1027	0	0	6,7	0,084
25.11.2003	205	2	1014	3,8	3	6,3	0,010
9.12.2003	325	1	1021	0,7	1,7	5,9	0,143
23.12.2003	320	1	1017	0,6	3	9,0	0,748
23.1.2004	170	2	1018	0	0	8,3	0,095
21.12.2004	235	2	1015	0,7	4	2,8	0,398
25.10.2005	205	1	1016	11,6	3	6,9	-1,901
16.11.2005	satunnainen	1	988	0	1	4,8	-0,196
1.12.2005	220	1	1005	5,5	2	6,8	-0,161
14.12.2005	240	1	1011	1,8	3	5,9	-0,551
3.1.2006	170	1	1028	0	5	3,4	0,911
19.12.2006	290	1	1019	0	0	5,4	-0,134
29.1.2007	230	2	1002	1,2	1	8,1	-0,397
26.2.2008	230	3	1001	1,1	0	2,2	0,973
5.1.2009	220	1	1019	0	0	6,7	-1,262
8.1.2009	210	2	1012	0	3	5,7	-0,662
27.10.2010	100	3	1020	0	3	1,7	-0,468
8.11.2010	275	2	1002	0	0	6	-0,548
1.12.2010	260	2	1024	0	7	5	-2,043
7.12.2010	150	1	1000	0	1	7,1	-1,106

Liite 3: Tutkimustapaukset hengitettävien hiukkasten osalta (PM₁₀ > 50 µg/m³/vrk) ja vallitsevat suursäätötilanteet kyseisen vuorokauden aikana.

Havaintoasema	Päivämäärä	PM ₁₀ - pitoisuus/vrk (µg/m ³)	Suursäätötila (/vrk)
Raisio, Naantali	ke 21.3.2001	59, 54	M11:K4
Kauppatori, Naantali	ma 26.3.2001	52, 72	M3:K4
Kauppatori, Raisio, Naantali	ti 18.9.2001	52, 50, 56	M3:K2
Kauppatori, Naantali	ke 19.9.2001	54, 55	M3:K2
Kauppatori, Naantali	ke 20.2.2002	77, 78	M1:K2
Kauppatori, Naantali	su 24.3.2002	62, 65	M2:K44
Raisio, Naantali	ma 25.3.2002	50, 50	M2:K44
Kauppatori, Raisio, Naantali	ti 9.4.2002	52, 54, 53	M2:K11
Kauppatori, Raisio	ke 10.4.2002	52, 64	M4:K44
Kauppatori, Naantali	pe 29.11.2002	81, 64	M2:K11
Kauppatori, Naantali	ti 4.3.2003	114, 54	M4:K22
Kauppatori, Raisio, Naantali	su 25.3.2003	62, 62, 62	M1:K2
Raisio, Naantali	pe 28.3.2003	52, 62	M4:K2
Kauppatori, Naantali, Kaarina	la 13.3.2004	114, 55, 102	M4:K22
Kauppatori, Kaarina	la 3.4.2004	54, 54	M4:K22
Kauppatori, Raisio, Kaarina	ti 6.4.2004	53, 59, 61	M44:K4
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ke 7.4.2004	61, 64, 52, 74	M44:K22
Kauppatori, Naantali	ke 21.4.2004	54, 50	M4:K2
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ma 14.3.2005	50, 69, 60, 60	M22:K3
Kauppatori, Naantali	ti 29.3.2005	50, 93	M2:K22
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ke 30.3.2005	50, 76, 72, 51	M1:K44
Raisio, Naantali, Kaarina	to 31.3.2005	83, 50, 56	M1:K44
Raisio, Naantali, Kaarina	pe 1.4.2005	66, 52, 54	M1:K44
Naantali, Kaarina	ke 22.3.2006	52, 53	M1:K4
Raisio, Naantali, Kaarina	to 23.3.2006	61, 66, 94	M1:K4
Raisio, Naantali, Kaarina	to 27.4.2006	65, 66, 51	M4:K1
Raisio, Naantali, Kaarina	ti 2.5.2006	52, 62, 54	M4:K22
Kauppatori, Raisio, Kaarina	ke 7.2.2007	97, 51, 59	M44:K4
Kauppatori, Naantali, Kaarina	la 24.3.2007	76, 68, 50	M3:K22
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	su 25.3.2007	61, 67, 72, 60	M4:K22
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ma 26.3.2007	86, 102, 68, 104	M1:K44
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ti 27.3.2007	80, 117, 103, 107	M1:K44

Havaintoasema	Päivämäärä	PM ₁₀ - pitoisuus/vrk (µg/m ³)	Suursäättilä (/vrk)
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	ke 28.3.2007	51, 89, 54, 79	M4:K33
Raisio, Naantali, Kaarina	to 29.3.2007	71, 56, 57	M1:K2
Kauppatori, Raisio, Kaarina	pe 30.3.2007	51, 71, 56	M1:K4
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	to 13.12.2007	98, 174, 138, 149	M4:K44
Raisio, Naantali	ke 23.1.2008	60, 54	M22:K3
Kauppatori, Raisio	ke 2.4.2008	111, 65	M4:K2
Kauppatori, Raisio, Naantali, Kaarina	to 3.4.2008	113, 96, 77, 77	M4:K4
Raisio, Naantali, Kaarina	pe 4.4.2008	87, 54, 57	M4:K1
Kauppatori, Kaarina	ma 2.2.2009	114, 50	M1:K22
Kauppatori, Naantali	pe 27.3.2009	57, 52	M2:K4
Kauppatori, Raisio, Naantali	ke 2.12.2009	91, 57, 56	M1:K44
Kauppatori, Naantali	la 3.4.2010	140, 76	M4:K2

Suursäättilanteiden luokitteluperuste

M = Matalapaine

K = Korkeapaine

Lähimmän korkea- ja matalapainekeskuksen sijainti suhteessa tutkimusalueeseen:

- | | |
|----|--------------------------|
| 1 | Jäämeri |
| 11 | Pohjois-Suomi |
| 2 | Venäjä |
| 22 | Itä-Suomi ja Karjala |
| 3 | Keski- ja Etelä-Eurooppa |
| 33 | Baltia |
| 4 | Atlantti |
| 44 | Ruotsi ja Norja |

Liite 4: Hengitettävien hiukkasten numeerisen raja-arvon (50 µg/m³) ylittäneiden vuorokausien sää.

Päivämäärä	Tuulen suunta (°)	Tuulen nopeus (m/s)	Ilmanpaine (hPa)	Sademäärä (kum. 24 h mm)	Kokonaispilvisuus (x/8)	Lämpösaareke (°C /vrk)	NAO-indeksi
21.3.2001	etelä	3	1004,9	0,1	3,6	-	-0,317
26.3.2001	länsi	2	1017,25	0	2,1	-	-0,375
18.9.2001	itä	4	1027	0	4,3	1,2	0,369
19.9.2001	itä	5	1026	0	5	1,1	0,069
20.2.2002	pohjoinen	3	994	0	1,6	1,8	0,635
24.3.2002	pohjoinen	2	1036	0	1	1,7	0,087
25.3.2002	etelä	4	1030	0	4,1	2,2	0,562
9.4.2002	satunnainen	2	1030	0	3,4	2,4	1,180
10.4.2002	satunnainen	1	1028	0	1,3	3,1	1,529
29.11.2002	itä	5	1038	0,1	4,9	1,4	-0,539
4.3.2003	itä	2	1032	0	3,6	5	-0,152
25.3.2003	länsi	2	1014	0	3,9	1,9	0,655
28.3.2003	länsi	2	1015	0	4,8	2,6	0,309
13.3.2004	itä	3	1035	0	0,3	3,4	0,279
3.4.2004	etelä	3	1031	0	0	2,3	0,686
6.4.2004	itä	2	1007	0	6,8	2,5	0,042
7.4.2004	itä	4	1010	0	7,1	1,7	-0,189
21.4.2004	itä	3	1015	5,9	6,8	0,5	0,291
14.3.2005	satunnainen	1	1006	0	0,8	4,2	-1,486
29.3.2005	satunnainen	1	1028	0	5,3	1,3	-0,423
30.3.2005	satunnainen	1	1029	0	2,5	2,2	-0,437
31.3.2005	länsi	1	1030	0	0,8	2,1	-0,396
1.4.2005	satunnainen	1	1030	0	3	2	-0,455
22.3.2006	satunnainen	1	1006	0	2	3,7	-0,979
23.3.2006	satunnainen	1	1010	0	1	4	-0,742
27.4.2006	itä	3	1022	1	1,3	3,6	-0,604
2.5.2006	etelä	5	1024	0,1	5	1,3	0,905
7.2.2007	itä	2	1013	0	0	5,1	0,121
24.3.2007	itä	3	1036	0	3,1	2,4	1,200
25.3.2007	satunnainen	1	1038	0	0	3,3	0,749
26.3.2007	länsi	1	1035	0	0	3	0,391
27.3.2007	satunnainen	1	1032	0	0	3,6	0,287

Päivämäärä	Tuulen suunta (°)	Tuulen nopeus (m/s)	Ilman- paine (hPa)	Sade- määrä (kum. 24 h mm)	Kokonais- pilvisyys (x/8)	Lämpö- saareke (°C/vrk)	NAO- indeksi
28.3.2007	etelä	2	1028	0	0	3,6	0,011
29.3.2007	etelä	3	1024	0	0	3,	0,091
30.3.2007	länsi	4	1020	0	0,6	2,7	0,413
13.12.2007	itä	1	1038	0	1,5	3,6	-0,403
23.1.2008	satunnainen	2	1018	0	5	1,8	0,522
2.4.2008	itä	2	1017	0	1	3,4	-0,257
3.4.2008	satunnainen	2	1019	0	4,8	2,1	-0,488
4.4.2008	satunnainen	3	1016	0	5,9	0,4	-0,622
2.2.2009	satunnainen	2	1028	0	-	6,4	-0,424
27.3.2009	itä	4	1007	0	2,6	2,7	0,098
2.12.2009	satunnainen	1	1015	0,1	4	3,7	-0,889
3.4.2010	pohjoinen	2	1018	0	4,8	2,2	0,028