

# ILMANLAATU VILKASLIIKENTEISESSÄ KATUKUILUSSA JA SEN LÄHIYMPÄRISTÖSSÄ

Mittauksia eri korkeuksilla ja etäisyyksillä  
päästölähteestä

LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU  
Insinööri YAMK  
Kestävä kaupunkiympäristö  
Syksy 2018  
Nelli Kaski

## Tiivistelmä

Tekijä Kaski, Nelli	Julkaisun laji Opinnäytetyö, YAMK	Valmistumisaika Syksy 2018
	Sivumäärä 43 + 11 sivua liitteitä	
Työn nimi <b>Ilmanlaatu vilkasliikenteisessä katukuilussa ja sen lähiympäristössä</b> Mittauksia eri korkeuksilla ja etäisyyksillä päästölähteestä		
Tutkinto Insinööri YAMK, Kestävä kaupunkiympäristö		
Tiivistelmä <p>Tämä opinnäytetyö pohjautuu Helsingin seudun ympäristöpalveluiden (HSY) ja Helsingin kaupungin ympäristöpalveluiden yhteishankkeeseen nimeltä KAILA (Kaupunkibulevardien ilmanlaatugradientit). KAILA-hankkeesta tehdään myös Helsingin kaupungin ympäristöpalveluille oma loppuraportti, joka julkaistaan Helsingin kaupungin julkaisusarjassa.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä tutkitaan, kuinka voimakkaasti typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet laimenevat etäännyttäessä kadusta, eli päästölähteestä, pystysuunnassa ja minkälainen ilmanlaatu on rakennuksen takana sisäpihalla. Lisäksi tutkitaan typpidioksidipitoisuuksien laimenemista vaakasuunnassa etäännyttäessä kadusta. Kohteena oli Helsingissä Mäkelänkatu, joka on vilkasliikenteinen kaupunkibulevardimainen alue. Mittaukset aloitettiin elo-syyskuun vaihteessa vuonna 2017 ja ne kestivät vuoden. Korkeussuuntaiset mittaukset tehtiin Vaisalan AQT420 (Air Quality Transmitter) sensoreilla. Ilmansaasteiden laimenemista vaakasuunnassa etäännyttäessä kadusta tarkasteltiin typpidioksidin passiivikeräinmittauksilla.</p> <p>Katukuilussa ilmansaasteiden pitoisuudet olivat rakennusten yläosassa typpidioksidin osalta 82 prosenttia ja hengitettävien hiukkasten osalta 67 prosenttia hengityskorkeudella olevista pitoisuuksista. Kerrostalojen takana sisäpihan oleskelualueella typpidioksidipitoisuudet olivat 60 prosenttia ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet 47 prosenttia katukuilun pitoisuuksista. 125 metrin etäisyydellä kadusta typpidioksidipitoisuudet olivat laimentuneet jo noin puoleen, eli kaupunkitaustan tasolle.</p> <p>Opinnäytetyön aihe on ajankohtainen johtuen Helsingin kaupungin uudesta yleiskaavasta, jossa suunnitellaan osaa nykyisten Kehä I:n sisäpuolella kulkevien moottoritiemäisten liikenneväylien muuttamista kaupunkibulevardeiksi. Tämän opinnäytetyön tutkimustietoa voidaan hyödyntää kaupunkibulevardien ja muiden vilkasliikenteisten katu ympäristöjen kaavoituskohteiden tarkentamisessa. Mittaustuloksista on hyötyä mm. katutilan, parvekkeiden, ilmanottoa paikkojen ja piha- ja leikkipaikkojen suunnittelussa. Tässä opinnäytetyössä tehtiin myös kirjallisuuskatsaus, johon koottiin muiden samantyyppisten tutkimusten tuloksia.</p>		
Asiasanat ilmanlaatu, typpidioksidi, hengitettävät hiukkaset, kaupunkiympäristö, katukuilu, liikenteen päästöt, ilmanlaatugradientti		

## Abstract

Author Kaski, Nelli	Type of publication Master's thesis Number of pages 43 + 11 pages of appendices	Published Autumn 2018
Title of publication <b>Air quality in a busy street canyon and its surroundings</b> Measurements at different heights and distances from the source of emissions		
Name of Degree Master in Engineering, Urban Sustainability		
Abstract <p>This thesis is based on KAILA which is a co-project between Helsinki Region Environmental Services Authority (HSY) and the City of Helsinki. There will be also a separate KAILA report, which will be published in the City of Helsinki publication series.</p> <p>This thesis investigates how height and distance affect the concentrations of nitrogen dioxide and thoracic particles in street canyons. The focus on is how much better air quality is higher from the ground above emission sources and how much better it is in the inner courtyard than in the busy street. The measurement location was Mäkelänkatu, a busy street in Helsinki which is like a city boulevard. Measurements were made from the beginning of September 2017 to the end of August 2018. The measuring devices used were AQT420 (Air Quality Transmitter, Vaisala) sensors and passive samplers.</p> <p>In the street canyon, at a height of 14 meters, nitrogen dioxide concentrations were 82 percent and thoracic particle concentrations 67 percent of the street level concentrations. At the inner court, behind the buildings, nitrogen dioxide concentrations were 60 percent and thoracic particle concentrations 47 percent of the street level concentrations. At 125 meters horizontally away from Mäkelänkatu, concentrations decreased to about 50 percent of the street level concentrations.</p> <p>This study is of current interest because of Helsinki's new City Plan which is built upon the key strategy of urbanizing the city. This includes the gradual transformation of motorway-like entry routes into 'city boulevards'. The results of this study can be utilized in urban planning, when for example deciding where to place balconies, playgrounds, common outdoor areas, shops and restaurants in areas near busy streets. This thesis also contains a literature review of other similar studies.</p>		
Keywords air quality, nitrogen dioxide, thoracic particles, urban environment, street canyon, traffic emission, air quality gradient		

## SISÄLLYS

SANASTO .....	1
1 JOHDANTO .....	3
2 KIRJALLISUUSKATSAUS .....	6
2.1 Helsingin Runeberginkatu NO <sub>2</sub> vuonna 2004.....	6
2.2 Helsingin Hämeentie NO <sub>2</sub> vuonna 2014.....	7
2.3 Lahti CO ja NO <sub>x</sub> vuonna 1995 .....	8
2.4 Tukholma NO <sub>x</sub> ja NO <sub>2</sub> vuonna 2012 .....	8
2.5 Kiina CO ja NO <sub>x</sub> vuonna 1988.....	9
2.6 Kreikka CO vuonna 1985.....	9
2.7 Helsingin Mäkelänkatu droonimittaukset vuonna 2016 .....	9
2.8 Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto .....	10
3 TUTKIMUSHANKKEEN TAUSTA.....	11
4 TUTKIMUSHANKKEEN TAVOITE JA TARKOITUS .....	12
5 TUTKIMUSKOHDDE, MENETELMÄT JA AINEISTO .....	13
5.1 Tutkimuskohde .....	13
5.2 Mittausmenetelmät ja niiden luotettavuus .....	15
5.3 Tutkimusaineistot.....	20
6 TULOKSET.....	22
6.1 Etäisyyden vaikutus ilmanlaatuun hengityskorkeudella.....	22
6.2 Korkeuden vaikutus ilmanlaatuun katukuilussa ja sisäpihalla.....	24
6.2.1 Typpidioksidi NO <sub>2</sub> .....	24
6.2.2 Hengitettävät hiukkaset PM <sub>10</sub> .....	28
6.3 Ilmanlaatu eri vuorokaudenaikoina .....	31
6.4 Vertailut ohje- ja raja-arvoihin .....	33
7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA.....	37
LÄHTEET .....	41
LIITTEET .....	44

## SANASTO

### **Hengitettävät hiukkaset (PM<sub>10</sub>)**

Ilmassa leijuvia hiukkasia, joiden halkaisija on enintään 10 mikrometriä ( $\mu\text{m}$ ). Hengitettävistä hiukkasista käytetään lyhennettä PM<sub>10</sub> ja niille on säädetty raja- ja ohjearvot. Kaupungeissa hengitettävät hiukkaset ovat suurimmaksi osaksi liikenteen nostattamaa katu-  
pölyä ja pakokaasuja sekä kauempaa kulkeutuneita hiukkasia. Pitoisuudet ovat korkeita, kun vuorokauden keskiarvo on yli 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

### **Hiilimonoksidi, häkä (CO)**

Väritön, hajuton ja mauton kaasu, joka on myrkyllinen hengitettäessä. Muodostuu polttoaineen hiilen palaessa vajavaisesti heikoissa palamisolosuhteissa. Kaupunki-ilman hiilimonoksidi on valtaosin peräisin tieliikenteen pakokaasuista ja puunpienpolton päästöistä. Pitoisuudet ovat selkeästi laskeneet 1990-luvun alusta, jolloin katalysaattorit tulivat markkinoille. Nykyään Suomessa hiilimonoksidipitoisuudet ovat niin matalia, ettei niitä enää tarvitse mitata.

### **Ilmansaasteet**

Ihmisen toiminnasta peräisin olevia haittaa aiheuttavia kaasumaisia tai hiukkasmaisia aineita ilmassa.

### **Katukuilu**

Katu, jota molemmilta puolelta reunustavat korkeat, tiiviin muurin muodostavat rakennukset tai rakenteet. Mitä suurempi on rakennusten korkeuden suhde kadun leveyteen, sitä huonommin ilman epäpuhtaudet laimenevat. Katukuilun katsotaan olevan kapea, kun kadunvarren rakennusten korkeuden ja kadun leveyden suhde on suurempi kuin 0,7. Tällöin vähäisemmälläkin liikennemäärällä ja siten vähäisellä päästömäärällä ilman epäpuhtauksien pitoisuudet voivat kohota katukuilussa korkeiksi. Leveässä katukuilussa (korkeus/leveys -suhde < 0,7) ilman epäpuhtauksien pitoisuudet laimenevat paremmin, koska sekoittuminen katukuilun ja yläpuolisen ilman välillä on huomattavasti tehokkaampaa. Mäkelänkatu on leveä katukuilu.

### **Kaupunkitaustapitoisuus**

Kaupunkialueen taustapitoisuus (kts. alueellinen taustapitoisuus) kuvaa kaupungin yleistä ilmanlaatua ympäristöissä, missä liikenne tai muu lähilähde ei vaikuta pitoisuuksiin voimakkaasti. HSY mittaa Helsingin kantakaupungin ilmanlaadun kaupunkitaustapitoisuutta Kalliossa Brahenkentällä. Kalliossa vuonna 2017 typpidioksidin vuosikeskiarvo oli 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvo 11  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## **Ohjearvot**

Määrittelevät ilmansuojelutyölle ja ilmanlaadulle kansalliset tavoitteet, jotka on tarkoitettu ohjeiksi suunnittelijoille ja viranomaisille. Ohjearvot on määritelty tilastollisesti ja ne sallivat tietyn määrän ylitystunteja tai -vuorokausia kalenterikuukauden aikana.

## **Pitoisuus**

Epäpuhtauden määrä tietyssä yksikössä ilmaa. Esitetään yleensä mikrogrammoina epäpuhtautta kuutiometrissä ilmaa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Ilmasta mitataan pitoisuuksia. Vertaa päästö.

## **Päästö**

Epäpuhtauden purkautuminen ilmaan esim. pakoputkesta tai savupiipusta. Tyypillisiä yksiköjä ovat päästö määrä tietyssä ajassa (esim. tonnia/vuosi) tai ominaispäästö (esim. g/km tai g/polttoainemäärä). Päästöt laimenevat ja sekoittuvat sääolosuhteiden mukaan muodostaen pitoisuuden ulkoilmassa. Päästöjä mitataan esimerkiksi voimalaitoksen piipusta. Vertaa pitoisuus.

## **Raja-arvot**

Määrittelevät suurimmat hyväksyttävät ilman epäpuhtauksien pitoisuudet. Ilmansuojelusta vastaavien viranomaisten tulee huolehtia siitä, etteivät ne ylity. Raja-arvot perustuvat EU-säädöksiin. Ne on määritelty tilastollisesti vuosiraja-arvoja lukuun ottamatta ja sallivat tietyn määrän ylitystunteja tai -vuorokausia kalenterivuoden aikana.

## **Alueellinen taustapitoisuus**

Alueelliseen eli maaseututaustapitoisuuteen vaikuttaa pääasiassa ilmansaasteiden kaukokulkeuma, alueelliset päästöt ja luonnolliset lähteet, mutta siihen eivät vaikuta paikalliset lähipäästöt esimerkiksi liikenteestä ja tulisijoista. HSY mittaa pääkaupunkiseudun alueellista taustapitoisuutta Espoon Luukissa maaseudulla. Luukissa vuonna 2017 typpidioksidin vuosikeskiarvo oli  $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvo  $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## **Typenoksidit (NO<sub>x</sub>)**

Typenoksidit koostuvat typpimonoksidista (NO) ja typpidioksidista (NO<sub>2</sub>). Nämä molemmat ovat kaasuja, joita esiintyy pieniä määriä ilmakehässä luonnostaankin, mutta pääasiassa ne ovat ihmisen toiminnan aiheuttamia ilmansaasteita. Suurin osa hengitysilmän typen oksideista aiheutuu liikenteen päästöistä.

## **Typpidioksidi (NO<sub>2</sub>)**

Typpidioksidi on kaasumainen ilman epäpuhtaus, joka on hengitettynä terveydelle haitallinen. Sille on asetettu sekä raja- että ohje-arvot. Autoliikenteen pakokaasut ovat yleensä typenoksidien päälähde kaupunki-ilmassa. Typpidioksidia muodostuu ulkoilmassa typpimonoksidista, ja sitä on myös suoraan pakokaasuissa.

## 1 JOHDANTO

Tämä opinnäytetyö on tehty Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän (HSY) toimeksiannosta. Tämä työ pohjautuu HSY:n ja Helsingin kaupungin ympäristöpalveluiden yhteishankkeeseen nimeltä KAILA (Kaupunkibulevardien ilmanlaatugradientit). Helsingin kaupunki on hankkeen rahoittaja, ja HSY toimii tutkimuksen toteuttajana. Hankkeesta vastaa HSY:ssä ilmansuojeluasiantuntija Jarkko Niemi ja mittauksista vastaa mittausinsinööri Taneli Mäkelä HSY:n ilmansuojeluyksikön mittaustiimin kanssa. Tässä opinnäytetyössä analysoidaan ja raportoidaan mittauksen tulokset ja verrataan niitä muihin samankaltaisiin aiemmin tehtyihin mittauksiin Suomessa ja muualla maailmalla. Tässä työssä kaikki kuviot, missä ei ole lähdemerkintää ovat työn tekijän tekemiä. KAILA hankkeesta tehdään myös oma loppuraportti Helsingin kaupungin ympäristöpalveluille, ja se julkaistaan Helsingin kaupungin julkaisusarjassa.

KAILA-hankkeessa mitattiin ilmanlaatua eri korkeuksilla ja etäisyyksillä vilkasliikenteisessä katukuilussa ja sen lähiympäristössä. Kohteena oli Helsingissä Mäkelänkatu, joka on vilkasliikenteinen kaupunkibulevardimainen alue. Mittaukset aloitettiin elo-syyskuun vaihteessa vuonna 2017 ja ne kestivät vuoden. Koko vuoden pituisella mittausjaksolla saatiin tietoa ilmanlaadusta keskimäärin sekä eri vuodenaikoina.

Tämä tutkimus on hyödyllinen kaupunkisuunnittelun tueksi vilkasliikenteisten alueiden suunnitteluun sekä liikenteen ilmanlaatuvaikutusten arviointiin. Helsingin uusi yleiskaava hyväksyttiin syksyllä 2016 ja se esittää Helsingistä tiivistä kaupunkia, jonka kantakaupunki laajenisi kaupunkibulevardeiksi muutettujen moottoritie- ja väylä-alueiden varsille (Helsingin yleiskaava 2016). Korkein hallinto-oikeus kumosi Länsiväylän, Turunväylän, Hämeenlinnanväylän ja Lahdenväylän muuttamisen bulevardeiksi (Moilanen 2018). Vihdintien ja Tuusulanväylän bulevardeja kuitenkin suunnitellaan jo, joten tälle tutkimukselle on tarvetta. Tästä tutkimuksesta on myös yleisemmin hyötyä muiden vilkasliikenteisten katukuilujen sisältävien alueiden suunnitteluun ja ilmanlaatuvaikutusten arviointiin. Kun rakennetaan tiivistä kaupunkirakennetta vilkasliikenteisille alueille, on alueen ilmanlaatu otettava suunnittelussa huomioon.

Suomessa merkittävimmät kaupunkien ilmanlaatua heikentävät ilmansaasteet ovat erikoiset pienhiukkaset ( $PM_{2,5}$ ) ja hengitettävät hiukkaset ( $PM_{10}$ ), typpidioksidi ( $NO_2$ ), otsoni ( $O_3$ ) ja eräät polysykliset aromaattiset hiilivedyt (PAH). Vilkasliikenteisessä kaupunkiympäristössä ilmanlaatua heikentävät erityisesti pakokaasujen hiukkasmaiset ( $PM_{2,5}$  ja PAH) ja kaasumaiset (typenoksidit  $NO_x$ , haihtuvat orgaaniset yhdisteet VOC ja häkä CO) päästöt sekä hiekoituksesta ja katujen kulumisesta aiheutuvat hengitettävät hiukkaset. Typpidioksidia muodostuu ulkoilmassa typpimonoksidista, ja sitä on myös suoraan pakokaasuissa.

Suomeen kulkeutuu myös maan rajojen ulkopuolelta kaukokulkeumana ilmansaasteita, erityisesti pienhiukkasia ja otsonia.

Terveyshaittojen kannalta merkittävimpiä ilmansaasteita ovat pienhiukkaset. Pienhiukkas-ten pitoisuuteen pääkaupunkiseudulla vaikuttavat eniten liikenteen pakokaasut ja katu-pöly, puun pienpolton päästöt sekä ilmansaasteiden kaukokulkeutuminen. Suomessa il-mansaasteiden arvioidaan aiheuttavan yhteensä noin 1600 ennenaikaista kuolemanta-pausta vuodessa (Hänninen & al. 2016). Ilmansaasteet aiheuttavat merkittävästi suurem-malle määrälle ihmisiä lievempiä terveyshaittoja esim. sairaalakäyntejä voimien äkillisen huononemisen vuoksi, lisääntynyttä lääkityksen tarvetta, sydän- ja hengityselinoireita sekä aiheuttavat ärsytysoireita, kuten nuhaa ja yskää sekä kurkun ja silmien kutinaa ja kirvelyä (Aarnio & al. 2016, 19).

Kaupunkiympäristössä liikenteen päästöillä on suurin vaikutus alueen ilmanlaatuun. Pitoi-suudet ovat korkeimmillaan ruuhka-aikoina. Avoimilla alueilla päästöt laimenevat tuulen vaikutuksesta paremmin, koska siellä ei ole laimenemisesteitä. Tiiviisti katujen varrelle kiinni rakennetut rakennukset heikentävät liikenteen päästöjen leviämistä ja laimenemista, joten tällaisilla alueilla on korkeammat ilmansaastepitoisuudet kuin avarammilla alueilla samoilla liikennemäärillä (KUVIO 1).



KUVIO 1. Ilmansaasteiden pitoisuudet ovat erityisen korkeita kerrostalojen reunustamilla vilkasliikenteisillä katuosuuksilla (Helsingin ilmansuojelusuunnitelman esite).

Ilmanlaadulle on annettu raja- ja ohjearvoja alueille, joilla ihmiset altistuvat ilman epäpuh-tauksille. Kaupunkisuunnittelussa tulee huolehtia, ettei raja-arvoja ylitetä. Raja-arvon saa-

vuttaminen ei kuitenkaan vielä takaa terveellistä ympäristöä. Terveydellisten haittojen ehkäisemiseksi on säädetty kansallisia ohjearvoja, jotka tulee ottaa huomioon myös maankäytön ja liikenteen suunnittelussa. Lisäksi Maailman terveysjärjestön (WHO) ilmanlaadun ohjearvot on tarpeen huomioida myös kaupunkisuunnittelussa.

HSY mittaa ilmanlaatua kattavasti ja monenlaisissa ympäristöissä pääkaupunkiseudulla. HSY:llä on 11 ilmanlaadun mittausasemaa, joista seitsemän on pysyviä ja neljä vuosittain siirrettäviä. Lisäksi ilmanlaatua on mitattu pääkaupunkiseudulla passiivikeräimillä useissa sadoissa eri paikoissa. Uutena mittausmenetelmänä on otettu käyttöön myös ilmanlaatusensorit. Pääkaupunkiseudulta löytyy siis kattavasti ilmanlaadun mittausdataa. Korkeussuuntaisia mittauksia ei kuitenkaan ole tehty kovin paljoa. Korkeussuuntaisille mittaustuloksille oli tarvetta ja KAILA-hankkeessa päätettiin tehdä korkeussuuntaisia mittauksia uudella sensorimittausmenetelmällä.

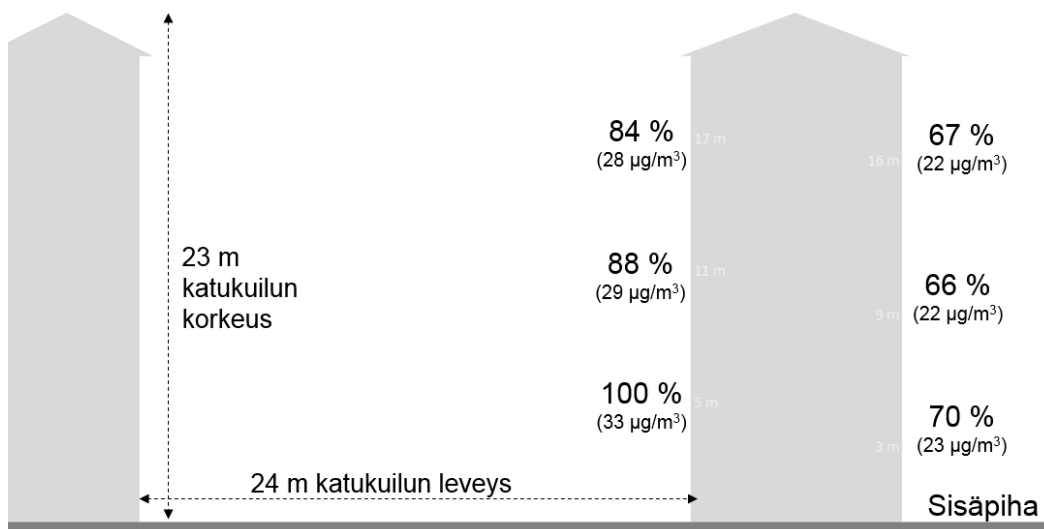
## 2 KIRJALLISUUSKATSAUS

Tässä kirjallisuuskatsauksessa referoidaan muita aiemmin tehtyjä KAILA:n tyyppisiä tutkimuksia Suomesta ja maailmalta. Tutkimuksia etsittäessä hakukriteereinä käytettiin katukuilumaista ympäristöä, korkeussuunnassa tehtyjä mittauksia sekä samoja ilmansaaste-komponentteja kuin KAILA-tutkimuksessa on mitattu. Kirjallisuuskatsaukseen yritettiin löytää vähintään vuoden pituisia mittausjaksoja, mutta niitä ei löytynyt kovin montaa. Tyypillisesti näissä tutkimuksissa mittaukset kestivät muutamasta päivästä maksimissaan kuu-kauteen.

Sopivia vertailututkimuksia etsittiin paljon ja tässä esitellään parhaimmat, mitä näillä haku-kriteereillä löytyi. Mittauksia on tehty varmasti paljon muitakin, esimerkiksi eri kaupunkien mittausraportit (kuten luku 2.4), mutta niiden löytäminen on haasteellisempaa. Siksi tämä kirjallisuuskatsaus koostuu lähinnä tieteellisistä tutkimuksista. Kirjallisuuskatsausta teh-dessä eteen osui paljon kiinnostavia tutkimuksia muun muassa sääolosuhteiden vaikutuk-sesta pitoisuuksiin sekä mittausten ja mallinnusten vertailua, mutta niitä ei otettu mukaan tähän kirjallisuuskatsaukseen.

### 2.1 Helsingin Runeberginkatu NO<sub>2</sub> vuonna 2004

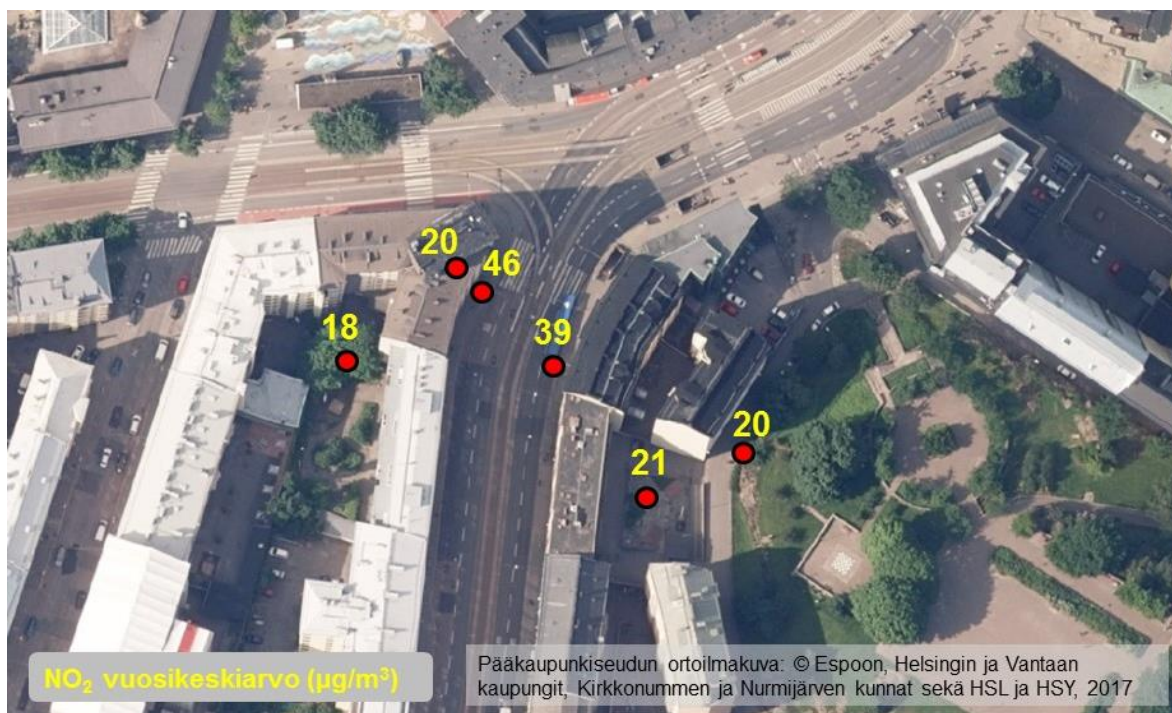
Runeberginkatu 47:ssä mitattiin passiivikeräinmenetelmällä typpidioksidipitoisuuksia koko kalenterivuoden 2004. Passiivikeräimiä oli sekä Runeberginkadun puolella katukuilun seinustalla, että sisäpihan puolella kolmella korkeudella. Keräimet olivat noin 0,5-1,3 met-rin etäisyydellä ulkoseinästä. Runebergin katukuilun geometria ja mittaustulokset näkyvät kuviossa 2. Runebergin katukuilu on hyvin kapea ja sen korkeuden ja leveyden suhde on 0,96. Runeberginkadulla on molempiin suuntiin kaksi kaistaa ja välissä on raitiovaunukis-kot (Mäkelänskadulla 3 kaistaa ja raitiovaunukiskot). Runeberginkadun liikennemäärä vuonna 2004 oli noin 23 100 ajoneuvoa vuorokaudessa (Mäkelänskadun liikennemäärä vuonna 2017 KAILA mittausten kohdalla oli noin 28 100 ajoneuvoa vuorokaudessa). Sisä-pihalla liikkui työkoneita lähes koko vuoden ajan. Oletuksena oli, että saasteet kulkeutuisi-ivat Runeberginkadulta rakennuksen yli sisäpihan puolelle, jolloin pitoisuudet pienenisivät alaspäin mentäessä. Sisäpihan työkoneet kuitenkin nostivat sisäpihan pitoisuuksia hie-man varsinkin alimmassa mittauspisteessä. (Malkki & Kousa 2005.) Näissä mittauksissa pitoisuudet olivat kadun puolella rakennuksen yläosassa (17 metrin korkeudella) 16 pro-senttia pienemmät ja sisäpihalla 30 prosenttia pienemmät kuin kadun puolella katutasolla. Vuosikeskiarvot löytyvät myös HSY:n karttapalvelusta <https://kartta.hsy.fi>.



KUVIO 2. Typpidioksidin pitoisuusgradientit passiivikeräimillä mitattuna Runeberginkadulla vuonna 2004. Vuosikeskiarvoista on poistettu helmikuun tulokset, koska silloin ei saatu dataa kaikista mittauspisteistä.

## 2.2 Helsingin Hämeentie NO<sub>2</sub> vuonna 2014

Vuonna 2014 mitattiin typpidioksidipitoisuuksia vilkasliikenteisen Hämeentien katukuilussa ja sen läheisyydessä. Hämeentien mittauspaiassa katukuilun korkeus on noin 25 m ja leveys 30 m, joten se on katukuilugeometrialtaan melko kapea kohde (korkeus / leveys = 0,83). Mittauspisteiden lähellä liikennemäärät olivat vuonna 2014 Hämeentiellä noin 14 600 ajon./vrk (raskasta liikennettä 23 %) ja Helsinginkadulla 4 500 ajon./vrk (12 % raskasta). Hämeentie 52 kohdalla katukuilussa keräimen etäisyys Helsinginkadun risteykseen oli 20 metriä ja Hämeentie 27 keräimen kohdalla etäisyys risteykseen oli 40 metriä. Molemmissa paikoissa keräimen etäisyys ajoradan laitaan oli 3 metriä. Muut keräimet olivat hengityskorkeudella, mutta osoitteessa Helsinginkatu 2, keräin oli katolla 8. kerroksen korkeudella. (Malkki & Loukkola 2015.) Typpidioksidipitoisuuksien vuosikeskiarvot näkyvät kuvioista 3 ja löytyvät myös HSY:n karttapalvelusta <https://kartta.hsy.fi>. Helsinginkatu 2:n keräin oli 8.kerroksen saunatiloista katolle mentäessä pienen parvekkeen tukipilarissa. Keräin oli selkeästi katolla, ei rakennuksen reunalla kattokorkeudella. Kadun länsipuolella pitoisuudet olivat katolla (25 m korkeudella) noin 57 prosenttia pienemmät ja alhaalla sisäpihalla noin 61 prosenttia pienemmät kuin kadunpuolella katutasolla.



KUVIO 3. Typpidioksidin pitoisuusgradientit passiivikeräimillä mitattuna Hämeentien katukuilussa vuonna 2014.

### 2.3 Lahti CO ja NO<sub>x</sub> vuonna 1995

Syyskuussa 1995 mitattiin Lahden keskustassa (lähellä Vapaudenkadun ja Vesijärvenkadun risteystä) CO ja NO<sub>x</sub> pitoisuuksia noin kaksi viikkoa. Vapaudenkadun liikennemäärä oli tuolloin noin 10 000 ja Vesijärvenkadun noin 15 000 – 19 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Mittauksia tehtiin katutasolla kolmessa metrissä ja katolla 22 - 25 metrissä. Katolla mittauksen etäisyys molemmista katukuiluista oli noin 10 metriä. Pitoisuusero katutason ja kattotason välillä oli suuri. Katutasolla oli keskimäärin noin viisi kertaa suuremmat pitoisuudet kuin katolla. Tässä tutkimuksessa huomattiin, että mittausajankohta ja sääolosuhteet vaikuttivat tulokseen huomattavasti. Näissä mittauksissa näkyi myös selvä vuorokausivaihtelu. Myös kattotason mittauksissa vuorokausivaihtelu oli aika samankaltainen kuin katutasolla. (Väkevä & al.1999.)

### 2.4 Tukholma NO<sub>x</sub> ja NO<sub>2</sub> vuonna 2012

Tukholmassa Sveavägen 88:ssa mitattiin typenoksideita ja typpidioksidia neljä viikkoa (viikot 13 - 16) vuonna 2012. Mittaukset tehtiin Ogawa-passiivikeräimillä. Näytteet analysoitiin viikoittain. Passiivikeräimiä oli kahden metrin välein 4 - 24 metrin korkeudella. Mittauk-

set tehtiin katukuilussa, jonka rakennukset olivat molemmin puolin 25 metriä korkeita. Rakennusten välissä oli 35 metriä, josta ajoväylän leveys oli 16 metriä. Typpidioksidin pitoisuudet pienenevät noin 40 prosenttia 4 metrin 35  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pitoisuuksista ylöspäin mentäessä 24 metriin, jossa pitoisuus oli 22  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Typenoksidipitoisuudet pienenevät myös noin 40 prosenttia 4 metrin 59  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pitoisuuksista 24 metrin 37  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  pitoisuuksiin. (SLB 2013.)

## 2.5 Kiina CO ja NO<sub>x</sub> vuonna 1988

Kiinassa Guangzhoun kaupungissa mitattiin tammikuussa ja heinäkuussa v. 1988 katutasolla ja 25 metrissä CO ja NO<sub>x</sub> pitoisuuksia kolmessa erityyppisessä katukuilussa. Ajoneuvoliikennemäärät näissä katukuiluissa olivat 26 000, 48 000 ja 74 000 ajoneuvoa vuorokaudessa. Mittaukset tehtiin yhdeksälle eri vuorokauden tunnille viitenä perättäisenä päivänä. Näissä mittauksissa katutason pitoisuudet olivat keskimäärin noin kaksi kertaa suuremmat kuin 25 metrin korkeudessa kattotasolla. Leveimmässä katukuilussa pitoisuudet laimenivat parhaiten. (Qin & Kot 1993.)

## 2.6 Kreikka CO vuonna 1985

Kreikassa toukokuussa 1985 tehdyissä CO-mittauksissa katutasolla pitoisuudet olivat keskimäärin noin 3-4 kertaa suuremmat kuin kattotasolla 29 metrissä. Mittauksia tehtiin jatkuvatoimisesti yhdeksällä eri korkeudella (noin 2 - 29 m) 20 päivää. (Zoumakis 1995.)

## 2.7 Helsingin Mäkelänkatu droonimittaukset vuonna 2016

Mäkelänkadulla, samassa paikassa kuin KAILA-mittaukset, kartoitettiin 14.-15. marraskuuta vuonna 2016 droonilla pienhiukkaspitoisuuksia. Drooniin oli asennettu ilmanlaatua mittaava sensori ja sitä lennätettiin maan tasolta (2 metriä) aina 50 metriin saakka, reilusti yli kattokorkeuden (19 metriä). Droonia lennätettiin näiden kahden päivän aikana ylös-alas yhteensä 48 kertaa. Tutkimuksessa mitattiin erityisesti keuhkoihin jäävän (englanniksi lung deposited surface area, LDSA) hiukkasaineksen pinta-alapitoisuutta katukuilussa. Pitoisuudet pienenevät 50 metrin matkalla ylöspäin mentäessä noin 65 prosenttia tutkimuskampanjan sääoloissa. Katutasossa LDSA pitoisuudet olivat 60  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ , kattotasolla 36 - 40  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$  ja 50 metrin korkeudessa 16 - 26  $\mu\text{m}^2/\text{cm}^3$ . Kattotasolla pitoisuudet olivat noin 37 prosenttia pienempiä kuin katutasolla. Näin lyhytaikaisissa tutkimuksissa sääolosuhteet ovat suuressa roolissa. Vastaavanlaisia pienhiukkasten katukuilumittauksia ei ole aiemmin tehty Suomessa. (Kuuluvainen & al. 2018.)

## 2.8 Kirjallisuuskatsauksen yhteenveto

Tähän kirjallisuuskatsaukseen on koottu parhaimmat löydetyt KAILA-mittauksia vastaavat tulokset. Vaikka olosuhteet, mittausmenetelmät ja mittauksien pituudet vaihtelevat, tästä koosteesta voi vertailla erilaisten mittausten tuloksia. Kuitenkaan tarkka vertailu eri mittausten välillä ei ole järkevää eri olosuhteiden ja mittaustapojen takia. Mm. liikenne- ja päästömäärät, katukuilun geometria, sääolosuhteet (mittausajankohta sekä mittausjakson pituus) ja kaupunkitaustapitoisuudet vaikuttavat oleellisesti pitoisuusgradienttien voimakkuuteen.

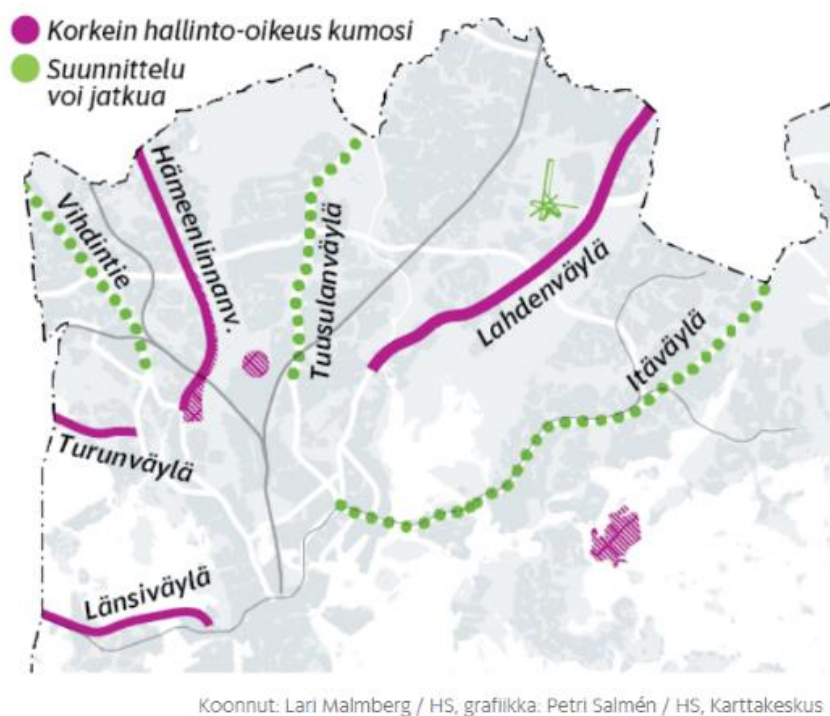
Yleisiä ja suuntaa antavia johtopäätöksiä näistä kaikista mittauksista voi johtaa, kuten muun muassa tutkijoiden Qin & Kot tekemät johtopäätökset kolmen eri katukuilun vertailussa, jossa leveimmässä katukuilussa pitoisuudet laimenivat parhaiten.

### 3 TUTKIMUSHANKKEEN TAUSTA

KAILA-hanke käynnistyi vuonna 2017 Helsingin uuden yleiskaavan kaupunkibulevardien vaikutus selvityksenä. Helsingin uusi yleiskaava hyväksyttiin syksyllä 2016 ja se esittää Helsingistä tiivistä kaupunkia, jonka kantakaupunki laajenisi kaupunkibulevardeiksi muutettujen moottoritiemäisten väylien varsille (Helsingin yleiskaava 2016).

Helsingin hallinto-oikeus kumosi 5.2.2018 osan yleiskaavasta bulevardien osalta (Länsiväylän, Turunväylän, Hämeenlinnanväylän ja Lahdenväylän muuttamisen bulevardeiksi) selvitysten puutteen vuoksi (Kuokkanen & Malmberg 2018; Siironen 2018).

Helsingin kaupunki valitti Helsingin hallinto-oikeuden päätöksestä korkeimpaan hallinto-oikeuteen. KHO piti bulevardien osalta Helsingin hallinto-oikeuden päätöksen voimassa (KUVIO 4). Korkein hallinto-oikeus julkisti päätöksensä 8.11.2018. (Moilanen 2018.)



KUVIO 4. Korkein hallinto-oikeus kumosi neljä seitsemästä suunnitellusta kaupunkibulevardista. (Moilanen 2018)

Vihdintien ja Tuusulanväylän bulevardeja kuitenkin suunnitellaan jo, joten tälle tutkimukselle on tarvetta. Tästä tutkimuksesta on myös yleisemmin hyötyä muiden vilkasliikenteisten katukuiluja sisältävien alueiden suunnitteluun ja ilmanlaatuvaikutusten arviointiin.

#### 4 TUTKIMUSHANKKEEN TAVOITE JA TARKOITUS

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena on saada uutta tietoa, jota voidaan hyödyntää kaupunkibulevardien ja muiden vilkasliikenteisten katu ympäristöjen kaavoituskohteiden suunnittelun tarkentamisessa. Tarkoitus on antaa suunnittelijoille tietoa, miten suunnitella ilmanlaadun kannalta mahdollisimman terveellistä asuinympäristöä, eli että tietoisuus lisääntyisi miten suunnittelun avulla voidaan vähentää vilkasliikenteisissä katu ympäristöissä asuvien ihmisten altistumista ilmansaasteille.

Pääkysymys tässä tutkimuksessa on, kuinka voimakkaasti ilmanlaatu paranee etäännyttäessä kadusta, eli päästölähteestä, pystysuunnassa ja minkälainen ilmanlaatu on rakennuksen takana sisäpihalla. Lisäksi tutkimuksessa käsitellään, miten ilmanlaatu paranee etäännyttäessä kadusta, eli päästölähteestä vaakasuuntaisesti noin 125 metrin etäisyydelle saakka. Tätä tarkastellaan passiivikeräimien tyypidioksidimittauksilla. Tutkimuksen pääkysymystä tarkastellaan eri saastekomponenttien sensorimittauksilla (typpidioksidi  $\text{NO}_2$  ja hengitettävät hiukkaset  $\text{PM}_{10}$ ).

Tällä hetkellä ei ole olemassa riittävän hyviä mallinnustyökaluja, joilla saisi mallinnettua ilmanlaatua pitkältä aikaväliltä kaupunkibulevardimaisessa kohteessa eri korkeuksilta ja etäisyyksiltä kadusta. OSPM-mallilla (Operational Street Pollution Model) ilmanlaatua voidaan mallintaa jopa vuoden keskiarvona, mutta OSPM ei pysty huomioimaan kovin tarkasti eroja erilaisissa korttelirakenteissa. LES-mallilla (Large Eddy Simulation) saadaan selvitettyä hyvin ilmavirtausten ja siten saasteiden kulkeutuminen erilaisissa korttelirakenteissa, mutta sillä ei vielä saada mallinnettua tarkkoja pitoisuuksia eikä pitkiä aikoja.

Mittauksilla saadaan tarkkaa tietoa ilmanlaadusta. Mittaustuloksia voidaan myös hyödyntää ilmanlaadun mallinnustyökalujen kehittämisessä ja validoimisessa. Suomessa on tähän mennessä tehty vain vähän ilmanlaatumittauksia eri korkeuksilla katukuiluissa (ks. luku 2).

## 5 TUTKIMUSKOHDE, MENETELMÄT JA AINEISTO

Tämä tutkimushanke koostuu tapaustutkimuksesta eli vuoden mittaisista ilmanlaatumittauksista Mäkelänkadun kaupunkibulevardimaisessa ympäristössä sekä samankaltaisten tutkimusten kirjallisuuskatsauksesta.

Tutkimusstrategiana tässä opinnäytetyössä on empiirinen tutkimus. Empiirisessä tutkimuksessa tutkimustulokset saadaan tekemällä konkreettisia havaintoja tutkimuskohteesta ja analysoimalla ja mittaamalla sitä. Empiirisessä tutkimuksessa konkreettinen ja koottu tutkimusaineisto on tutkimuksen keskiössä ja toimii tutkimuksen tekemisen lähtökohtana. (Jyväskylän yliopisto 2014b.)

Aineistonhankintamenetelmänä tässä opinnäytetyössä käytettiin pääasiassa seuranta- eli ilmanlaatumittauksia. Seuranta on aineistonhankintamenetelmä, jossa tutkittavasta kohteesta kootaan tietoa säännöllisesti ja toistuvasti tietyn ajanjakson ajan (Jyväskylän yliopisto 2014a). Lisäksi mittaustuloksia haluttiin verrata jo olemassa olevaan aineistoon, sekä perehtyä minkälaista tietoa tutkimuskysymyksestä on jo olemassa. Täten tehtiin aiheesta kirjallisuuskatsaus, jota tehdessä hyödynnettiin arkistoja ja kokoelmia.

### 5.1 Tutkimuskohde

Mäkelänkatu on vilkasliikenteinen kaupunkibulevardimainen kohde Helsingissä. HSY:llä on Mäkelänkadulla ilmanlaadun supermittausasema (KUVA 1), jossa mitataan ilmanlaatua monipuolisesti ja jatkuvasti. Supermittausasemalta ja sen ympäristöstä on paljon aiempaa mittaustietoa hengityskorkeudelta (4 m). Tämän tutkimushankkeen mittaukset ovat Mäkelänkadun mittausaseman vieressä ja tutkimushankkeen tuloksia tarkastellaan mittausaseman ja kirjallisuuskatsauksen muihin tutkimustuloksiin verraten. Noin kilometrin päässä Mäkelänkadun mittausasemasta on myös Helsingin kaupungin ylläpitämä liikennemäärän laskentapiste (LIITE 1a).



KUVA 1. Mäkelänkadun supermittausasema sulautuu ympäristöönsä. KUVA: Nelli Kaski/HSY

Mäkelänkadun mittausasemalla mitatut pitoisuudet edustavat tasoa, jolle ihmiset altistuvat Helsingin vilkasliikenteisissä katukuiluissa. Mittausasemalla mitataan laajasti eri ilmasaasteita ja niiden ominaisuuksia. Mittausaseman etäisyys viereisestä rakennuksesta on 3 metriä ja Mäkelänkadun ajokaistan reunasta alle 0,5 metriä.

Mittausaseman kohdalla Mäkelänkadun katukuilun leveys on 42 metriä ja ympäröivien rakennusten korkeus 17 metriä. Nopeusrajoitus mittausaseman kohdalla on 50 km/h. Vuonna 2017 keskimääräiset liikennemäärät olivat Mäkelänkadulla, mittausaseman vieressä noin 28 100 ajoneuvoa vuorokaudessa (Helsinki 2018). Raskaan liikenteen osuus on melko korkea (12 %), koska Mäkelänkadulla on vilkasliikenteiset bussikaistat. Ajokais-toja on yhteensä 3 kpl molempiin suuntiin ja lisäksi katutilan keskellä on raitiotiekaistat (KUVA 2).



Kuva 2. Näkymä Mäkelänkadun mittausaseman katolta Mäkelänkatua pohjoiseen päin.  
KUVA: Nelli Kaski/HSY

Mäkelänkadulla on mitattu ilmanlaatua vuodesta 2015 lähtien. Mäkelänkadun ilmanlaatuun vaikuttaa pääasiassa liikenteen pakokaasut ja katupöly. Typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat korkeita, mutta ilmanlaadun raja-arvot eivät kuitenkaan ylity Mäkelänkadulla.

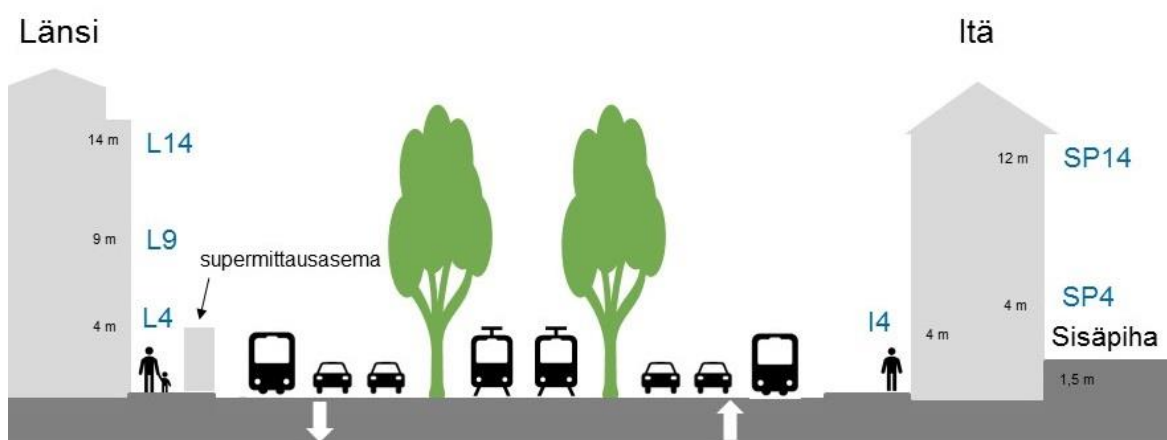
Kuviossa 5 on havainnollistettu Mäkelänkadun katukuilun katugeometria mittauspaikan kohdalta sekä tutkimusmittauksissa käytettävien ilmanlaatusensorien sijainnit rakennusten seinustoilla eri korkeuksilla. Kuviossa 6 on esitetty tutkimusalue laajemmin sekä passiivikeräinmittausten sijainnit.

## 5.2 Mittausmenetelmät ja niiden luotettavuus

Tutkimushankkeen aineiston keruussa käytettiin kahta erilaista mittausmenetelmää. Tutkimuksen pääkysymystä tarkastellaan AQT420 (Air Quality Transmitter, Vaisala) sensorimittauksin, joilla saadaan mitattua samanaikaisesti kuuden eri saastekomponentin pitoisuuksia (hengitettävät hiukkaset  $PM_{10}$ , pienhiukkaset  $PM_{2,5}$ , typpidioksidi  $NO_2$ , typpimoksidin  $NO$ , häkä  $CO$  ja otsoni  $O_3$ ). Tässä opinnäytetyössä on keskitytty hengitettäviin

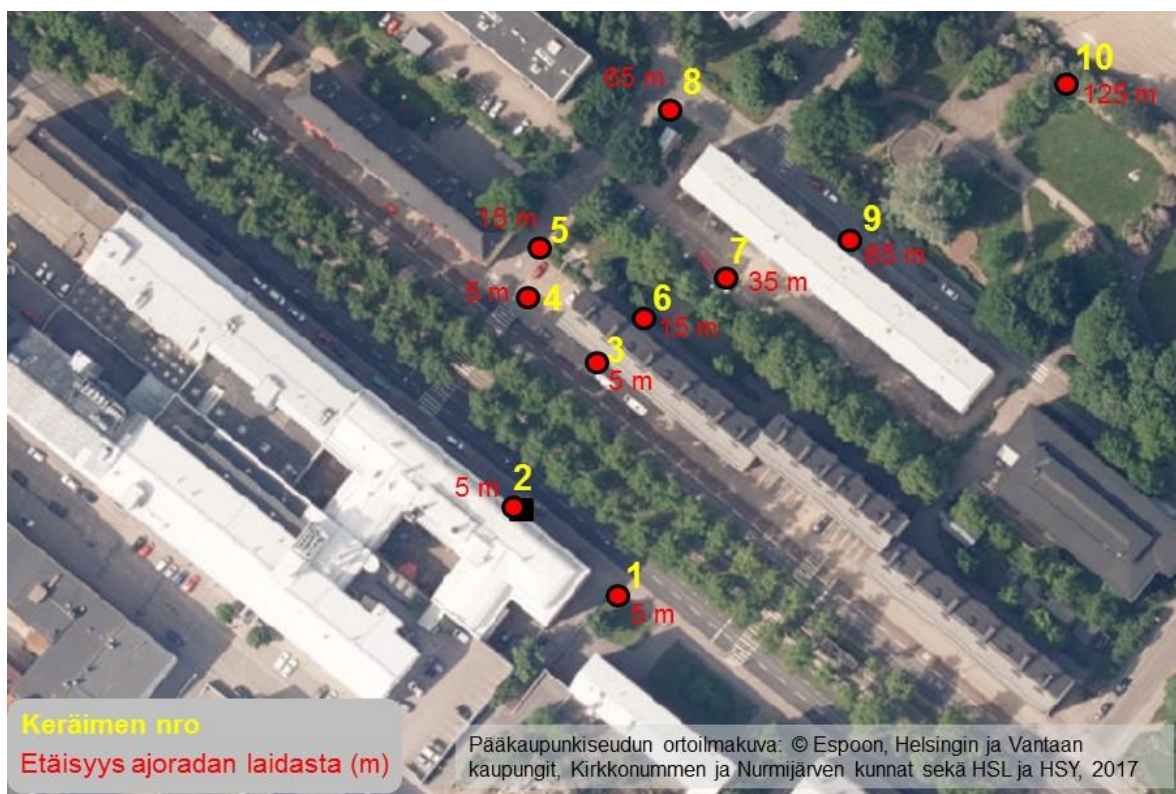
hiukkasiin ja typpidioksiiniin, koska näiden sensoriaineistojen laatu oli paras ja ne ovat tärkeimpiä kaupunkisuunnittelussa huomioitavia ilmansaasteita.

Sensorit mittaavat ilmanlaatua reaaliaikaisesti ja alkuperäisaineisto kerättiin talteen viiden minuutin resoluutiolla, joista laskettiin tunti-, vuorokausi- ja kuukausikeskiarvoja. Tässä tutkimuksessa AQT420-sensoreita oli mittaamassa vuoden ajan kuudessa paikassa rakennusten seinustoilla eri korkeuksilla ja etäisyyksillä kadusta (KUVIO 5). AQT420-sensorimenetelmästä löytyy tarkempi kuvaus Vaisalan verkkosivuilta.



KUVIO 5. Mäkelänkadun katugeometria ja AQT420-ilmanlaatusensorien sijainnit.

Ilmansaasteiden laimenemista vaakasuunnassa etäännyttäessä kadusta tarkasteltiin typpidioksidin passiivikeräinmittauksilla. Passiivikeräimet ovat edullinen ja luotettava mittausmenetelmä, mutta tulos ei ole reaaliaikaista dataa, vaan se täytyy analysoida laboratoriossa kuukausittain. Siksi passiivikeräimillä mitataan yleensä ilmanlaatua vain sillä korkeudella, mistä keräimet pystytään helposti vaihtamaan. Tässä tutkimuksessa passiivikeräinpaikkoja oli yhteensä 10 kappaletta, ja ne sijaitsivat noin 3-4 metrin korkeudella eri etäisyyksillä Mäkelänkadusta (KUVIO 6). Passiivikeräimillä mitattiin typpidioksidipitoisuuden kuukausikeskiarvoja, joista laskettiin myös vuosikeskiarvot. Passiivikeräinmenetelmästä tarkemmin Loukkola ym. 2004.



KUVIO 6. Passiivikeräinten sijainnit ja etäisyydet uloimman ajoradan laidasta. Mäkelänkadun mittausasema sijaitsee mustan neliön kohdalla.

- (1) Nokiankuja, kärkikolmio
- (2) Sininauhasäätiö
- (3) Mäkelänkatu 43, tien puoli
- (4) Rautalammintie liikennemerkki
- (5) Rautalammintie katuvalo
- (6) Mäkelänkatu 43, sisäpiha
- (7) Rautalammintie 4, sisäpiha
- (8) Rautalammintie mutka katuvalo
- (9) Rautalammintie 4 c, katuvalo
- (10) Vallilanpuisto

Typpidioksidin passiivikeräinmenetelmän luotettavuudesta on paljon tietoa, sillä HSY on tehnyt vuosittain vertailumittauksia jo vuodesta 2004 alkaen. Yleensä vuosikeskiarvot poikkeavat korkeintaan  $\pm 5$  prosenttia verrattuna referenssimenetelmään (HSY:n oma asiantuntija-arvio; Aarnio & al. 2013). Passiivikeräinmenetelmä yliarvioi yleensä pitoisuuksia hieman talvikuukausina ja aliarvioi niitä hieman kesäkuukausina. Myös KAILA-tutkimuksen yhteydessä tehtiin vertailumittauksia passiivikeräimille Mäkelänkadun supermittausasemalla koko vuoden ajan. Referenssimenetelmällä mitattu vuosikeskiarvo oli  $31,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$

ja kahdella erillisellä passiivikeräinsarjalla 32,5 ja 32,7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , eli passiivikeräintulosten laatu oli erittäin hyvä. Myös kuukausikeskiarvot olivat kohtalaisen luotettavia (ks. LIITE 2a).

HSY käytti AQT420-sensoreita ilmanlaatumittauksiin ensimmäistä kertaa KAILA-hankkeessa, joten hankkeen kuluessa saatiin myös arvokasta tietoa sensorimittausten tulosten luotettavuudesta. Ennen varsinaisen gradienttimittauskampanjan aloittamista kaikki sensorit olivat vertailumittauksessa Mäkelänkadun supermittausasemalla viisi viikkoa kesällä 2017 (KUVA 3). Sensorituloksia verrattiin referenssitasoisten analysaattoreiden mittaustuloksiin, ja havaittiin että eri sensoryksilöiden välillä on eroja mittaustuloksissa. Tämän vuoksi kaikille sensoryksilöille ja eri saastekomponenteille tehtiin omat korjausyhtälöt (LIITE 2b). Sensoreille tehtiin myös mittauskampanjan päätyttyä ja/tai sensorien vikaantumisten yhteydessä jälkivertailut mittausasemalla, joiden perusteella saatiin lisätietoa sensorien luotettavuudesta ja stabiiliudesta.



KUVA 3. Sensorit mittausasemalla vertailumittauksissa ennen KAILA hankkeen mittauksia. Kuva: Nelli Kaski/HSY

Sensoreiden  $\text{NO}_2$ -tulosten laatua arvioitiin vuoden mittauskampanjan aikana myös niin, että kolmessa sensoripaikassa oli rinnalla passiivikeräin (KUVAT 4 ja 5). Sensorien ja

passiivikeräinten kuukausikeskiarvoja verrattiin keskenään, ja tulokset osoittavat, että sensorit yliarvioivat joinakin kuukausina huomattavasti NO<sub>2</sub>-pitoisuuksia (LIITE 2a).



KUVA 4. SP4 sensori ja passiivikeräin 6 (sensorin alapuolella) sisäpihalla. Kuva: Nelli Kaski/HSY



KUVA 5. Sensori I4 ja passiivikeräin 3 Mäkeläntkadun katukuilussa itäpuolella. Kuva: Nelli Kaski/HSY

Sensoritulosten luotettavuuden arviointia hankaloitti se, että vuoden mittauskampanjan aikana sensoreita vikaantui useita kertoja. Tästä syystä sensoreita jouduttiin korvaamaan uusilla, myöhemmin syksyn ja talven kuluessa vertailumittatuilla sensoreilla. Eri vuodenaikoina tehtyjen sensorien vertailumittausten yhteydessä havaittiin, että valitettavasti myös vertailumittausjaksojen olosuhteet (esim. ilmansaastepitoisuudet ja erityisesti hiukkasten kokojakauma ja katupölymäärä) heijastuvat hieman sensorien mittaustuloksiin ja niistä johdettuihin korjausyhtälöihin. Tästä syystä vikaantumisten yhteydessä vaihdettujen sensorien tulokset eivät olleet enää täysin yhteneviä alkuperäisten, kesällä vertailumittattujen sensorien kanssa, ja osa tutkimuskampanjan aineistosta jouduttiin hylkäämään riittämättömän laadun vuoksi (ks. seuraava luku). KAILA-tutkimuksessa tulosten laatuvaatimus on erityisen korkea, koska esimerkiksi rakennuksen seinustan pystygradienteissa pitoisuuserot ovat pieniä, kuten esimerkiksi Runeberginkadun tutkimuksesta kävi ilmi kirjallisuuskatsauksessa (kuvio 2). AQT420-sensorien tuotekehitys on jatkuvaa Vaisalassa, joten uudet markkinoilla olevat AQT420-sensorisukupolvet ovat todennäköisesti entistä tarkempia ja stabiilimpia.

### 5.3 Tutkimusaineistot

Sensorimittauksia tehtiin rakennusten seinustoilla vuoden ajan elokuun lopulta 2017 elokuun loppuun 2018. Mittauksilla saatiin laaja aineisto raakadataa. Useita sensoreita vikaantui mittausten aikana ja niitä jouduttiin vaihtamaan, minkä vuoksi mittauksiin tuli katkoja (LIITE 3). Valitettavasti myös suuri määrä mittausdataa jouduttiin hylkäämään, koska eri vaiheessa vuotta vaihdettujen sensorien tulokset eivät aina olleet riittävän yhteneviä ja vertailukelpoisia. Lopulliseen tulosten analysointiin rajattiin vain aineistot, joissa sensoritulokset ovat luotettavasti vertailukelpoisia keskenään tarkan gradienttitutkimuksen näkökulmasta.



KUVA 6. Sensorit laitettiin paikoilleen nosturin avulla. SP14 sensorin asennus sisäpihalla.  
KUVA: Nelli kaski/HSY

Tässä opinnäytetyössä käsitellään kuuden sensorin  $\text{NO}_2$  ja  $\text{PM}_{10}$  tunti- ja vuorokausidataa sekä  $\text{NO}_2$  passiivikeräinten kuukausikeskiarvoja. Aineistosta tehtiin erilaisia saastepitoisuuksien gradienttitarkasteluja pysty- ja vaakasuunnassa. Sensoreilla saadaan vain suuntaa antavia tuloksia, joten niiden mittaamia pitoisuuksia ei voi verrata luotettavasti suoraan raja- ja ohjearvoihin. Tästä syystä myös Mäkelänkadun mittausaseman luotettavia mittaustuloksia hyödynnettiin (Kaski & al. 2016 ja 2017; Malkki & al. 2018), kun tehtiin arvioita ilmanlaadun raja- tai ohjearvoylityksistä eri etäisyyksillä kadusta (luku 6.4).

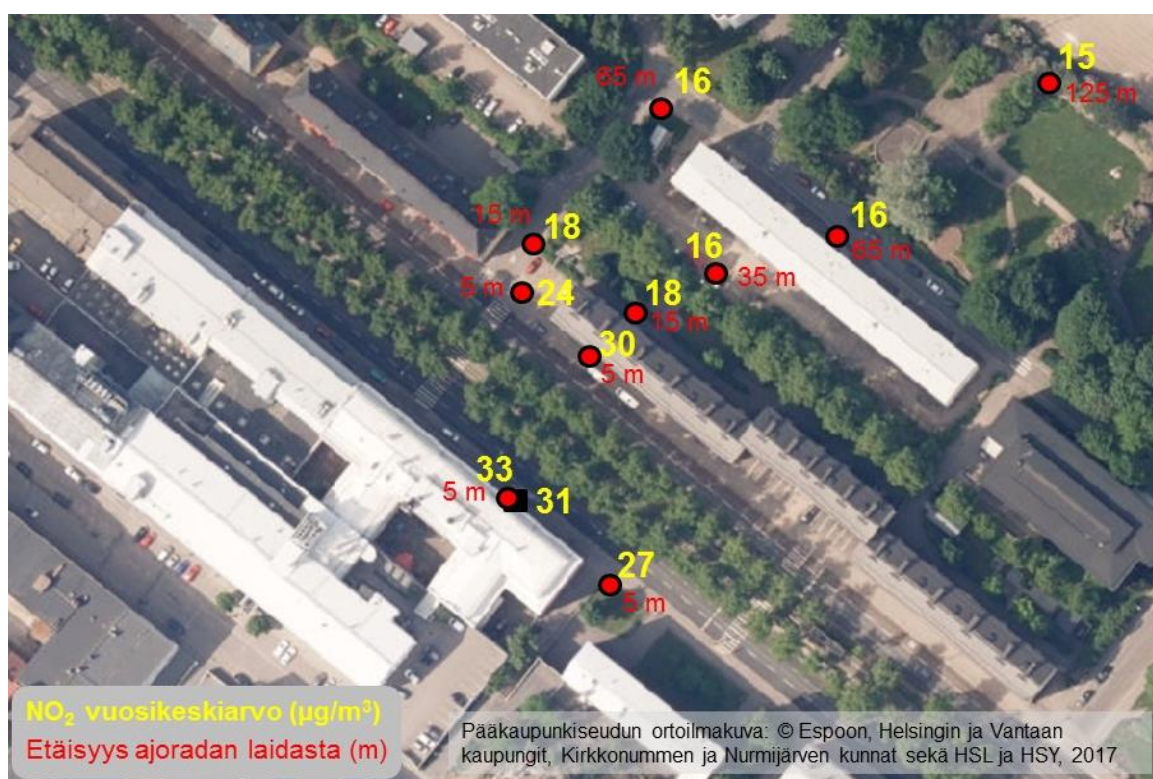
Liikenne ja siten liikennemäärä vaikuttaa eniten Mäkelänkadun ilmanlaatuun ja mittaustuloksiin. Noin kilometrin päässä Mäkelänkadun mittausasemasta on Helsingin kaupungin ylläpitämä liikennemäärän laskentapiste (LIITE 1a). Ilmanlaadun ja liikennemäärän yhteyttä eri vuorokaudenaikoina tarkastellaan myös lyhyesti tässä tutkimuksessa (luku 6.3). Liikennemäärätiedot saatiin Helsingin kaupungin Kaupunkiympäristön Liikenne- ja katusuunnittelusta Petri Blomqvistilta.

Kirjallisuuskatsausta varten etsittiin ja luettiin tämän tutkimuksen kanssa samankaltaisia tutkimuksia. Näistä referoitiin seitsemää eniten tämän tutkimuksen kanssa samankaltaista tutkimusta (luku 2).

## 6 TULOKSET

### 6.1 Etäisyyden vaikutus ilmanlaatuun hengityskorkeudella

Passivikeräimillä selvitettiin, kuinka paljon ilmanlaatu paranee etäännyttäessä liikenteestä eli päästölähteestä vaakasuuntaisesti lähellä maanpintaa 3-4 metrin korkeudella. Passiivikeräimiä sijoitettiin Mäkelänkadulle sensorien viereen sekä rakennusten aukkopaikkoihin. Lisäksi passiivikeräimiä sijoitettiin eri etäisyyksille Mäkelänkadusta aina 125 metriin saakka. Passivikeräimillä mitatut NO<sub>2</sub> pitoisuudet koko mittauskampanjan ajalta on esitetty kuviossa 7 ja kuukausikeskiarvot liitteessä 4.



KUVIO 7. Typpidioksidipitoisuuksien (NO<sub>2</sub>) loittonevat sarjat passiivikeräimillä. Kuvassa keltaisella koko mittausjakson pitoisuuksien keskiarvo ja punaisella etäisyydet ajoradan laidasta. Osalta keräimistä puuttuu jonkun kuukauden data. Puuttuvat ajanjaksot ja kunkin keräimen kuukausikeskiarvot näkee liitteestä 4. Kuvassa näytetään myös ilmanlaatuasemalla mitattu pitoisuus (31 µg/m<sup>3</sup>).

Typpidioksidipitoisuudet laskevat melko nopeasti etäännyttäessä kadusta. Kerrostalojen takana sisäpihan oleskelualueella on melko puhdasta, noin 40-46 % pienemmät pitoisuu-

det kuin kadun puolella (KUVIOT 7 ja 8). 125 metrin etäisyydellä Vallilan puistossa pitoisuudet ovat jo kaupunkitaustan tasolla. Kallion kaupunkitausta- asemalla vuonna 2017 NO<sub>2</sub> vuosikeskiarvo oli 15 µg/m<sup>3</sup>.



KUVIO 8. Typpidioksidipitoisuuden gradientit hengityskorkeudella etäännyttäessä kadusta. Keräimeltä nro 5, puuttui toukokuun 2018 kuukausikeskiarvo, joten tässä on vertailtu vain 11 kuukauden kuukausikeskiarvoja.

Korkeimmat pitoisuudet Mäkelänkadun katukuilussa on vallitsevan tuulen ja aamuruuhkan puolella (KUVIO 9). Vallitseva tuulensuunta on lounaasta ja katukuilupyörre (ks. LIITE 1b) aiheuttaa sen, että saasteet kerääntyvät enemmän Mäkelänkadun länsipuolelle. Länsipuolen ajoradoissa suunta on kaupunkiin päin ja itäpuolella kaupungista poispäin. Aamulla aamuruuhkan aikaan on myös heikommat tuuliolosuhteet, jolloin saasteet eivät laimene niin hyvin kuin muina aikoina. Lisäksi länsipuolella ajoradoilla on loivaa ylämäkeä ja itäpuolella alamäkeä.

Aukkopaikoissa saasteet pääsevät laimenemaan hyvin, joten pitoisuudet ovat niissä matalammat (KUVIO 9). Rakennukset taas heikentävät saasteiden laimenemista, joten niiden vieressä pitoisuudet ovat suuremmat.



KUVIO 9. Typpidioksidipitoisuuden gradientit hengityskorkeudella rakennusten kohdalla ja aukkopaikoissa viiden metrin etäisyydellä kadun laidasta. Osalta keräimistä puuttuu jonkun kuukauden data, joten tässä on vertailtu vain yhdeksän kuukauden dataa. Puuttuvat ajanjaksot ja kunkin keräimen kuukausikeskiarvot näkee liitteestä 4.

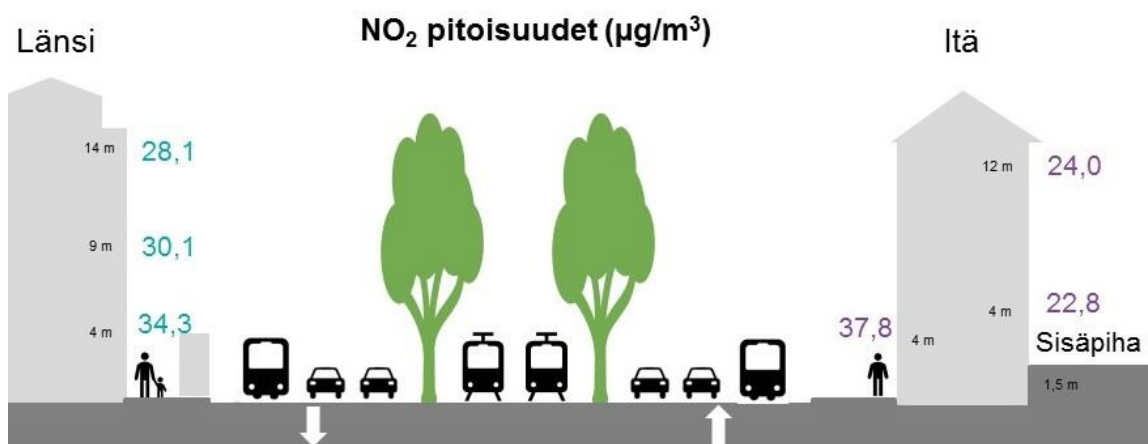
## 6.2 Korkeuden vaikutus ilmanlaatuun katukuilussa ja sisäpihalla

### 6.2.1 Typpidioksidi NO<sub>2</sub>

Sensorien vikaantumisten sekä niistä aiheutuvien mittauskatkojen vuoksi sensoreilla ei saatu laadukasta mittausdataa koko vuodelta. Sensorien mittauskatkoista ja vaihtoajankohdista on tarkemmin liitteessä 3. Jotta saatiin tuloksista raportoitua mahdollisimman pitkät mittausjaksot, raportoidaan tässä 1) länsipuolen katukuiluseinustan korkeussuuntaiset mittaukset ja 2) itäpuolen katukuiluseinusta vs. sisäpiha mittaukset omina mittausjaksoina.

Kummankin mittausjakson typpidioksidipitoisuuksien keskiarvot sensorikohtaisesti on esitetty kuviossa 10. Länsi- ja itäpuolen tulokset eivät ole keskenään verrattavissa, koska niissä on eri mittausjaksot. Eli kuviosta 10, ei voi verrata kummalla puolella Mäkelänkatua on suuremmat pitoisuudet. Hengityskorkeudella vuodenpituiset passiivikeräinmittaukset ovat luotettavampia ja keskenään verrattavissa. Passiivikeräinmittauksista nähdään, että

Mäkelänkadun länsipuolella on suuremmat pitoisuudet kuin itäpuolella (luku 6.1). Erikseen korkeussuunnassa sekä katutila vs. sisäpiha mittauksissa sensorit ovat keskenään verrattavissa.



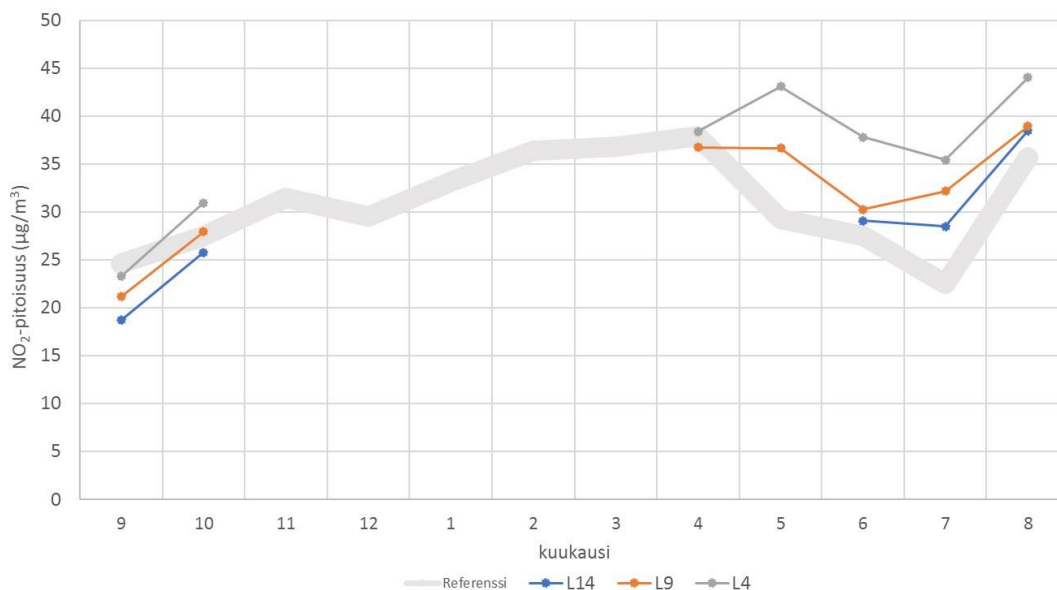
KUVIO 10. Sensorien typpidioksidipitoisuudet. Länsipuolen korkeussuuntamittauksissa (pitoisuudet turkoosilla) mittausjakso on noin 5 kuukautta (syyskuu - lokakuu 2017 sekä kesäkuu - elokuu 2018). Itäpuolen katutila vs. sisäpiha mittauksissa (pitoisuudet liilalla) mittausjakso on noin 8 kuukautta (syyskuu 2017 - huhtikuu 2018). Länsi- ja itäpuolen tulokset eivät ole keskenään verrattavissa, koska niissä on eri mittausjaksot.

Kuviosta 11 nähdään, että korkeussuunnassa pitoisuudet laimenevat neljästä metristä neljääntoista metriin 18 prosenttia. Ensimmäisen viiden metrin matkalla pitoisuudet laimenevat jo 12 prosenttia ja seuraavan viiden metrin matkalla enää vain kuusi prosenttia. Sisäpihalla pitoisuudet ovat noin 40 prosenttia pienemmät kuin katutilassa. Sisäpihan osalta sama tulos saatiin myös tässä hankkeessa tehdyillä passiivikeräinmittauksilla (luku 6.1). Samansuuntaisia tuloksia saatiin myös vuoden pituisilla passiivikeräinmittauksilla Runeberginkadulla ja Hämeentiellä (luku 2).

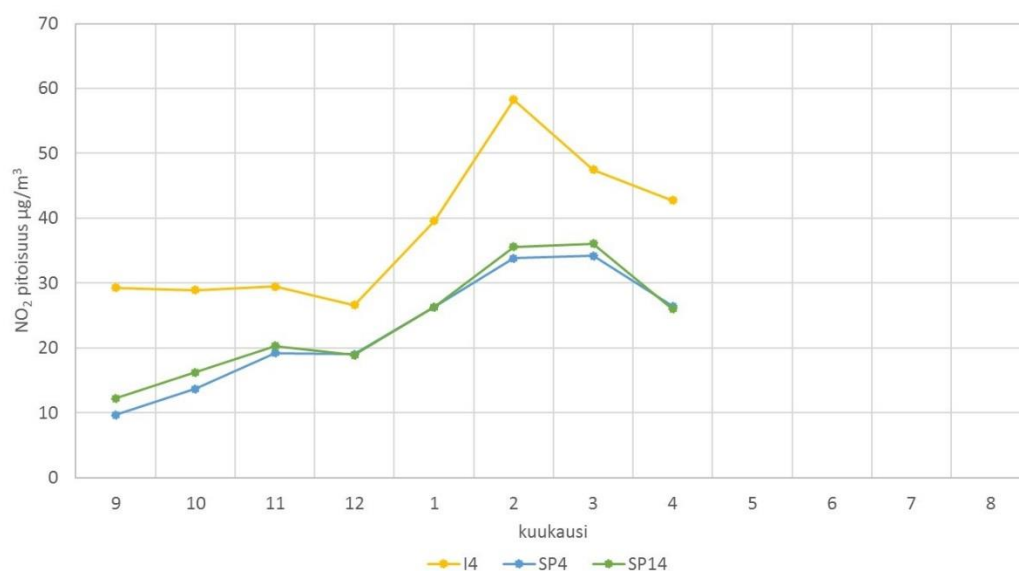


KUVIO 11. Typpidioksidipitoisuuksien laimeneminen sekä korkeussuunnassa (turkoosi) että sisäpihalla verrattuna katutilaan (liila). Keskenään verrattavien sensorien mittausjaksot ovat samat. Länsipuolen korkeussuuntamittauksissa (pitoisuudet turkoosilla) mittausjakso on noin 5 kuukautta (syyskuu - lokakuu 2017 sekä kesäkuu - elokuu 2018). Itäpuolen katutila vs. sisäpiha mittauksissa (pitoisuudet liilalla) mittausjakso on noin 8 kuukautta (syyskuu 2017 - huhtikuu 2018).

Tarkemmin eri sensorien mittaustulokset kuukausitasolla tarkasteltuna, näkyvät kuvioissa 12 ja 13. Korkeimmat pitoisuudet on mitattu neljässä metrissä itäpuolella (I4) helmikuussa  $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , maaliskuussa  $47 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja huhtikuussa  $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  sekä länsipuolella (L4) toukuussa  $43 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja elokuussa  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Sisäpihalla pitoisuudet ovat selvästi katutilan puoleisia mittauksia matalammat. Kaikkien sensorien kuukausikeskiarvot on raportoitu taulukkomuodossa liitteessä 4.



KUVIO 12. Typpidioksidipitoisuuksien (NO<sub>2</sub>) kuukausikeskiarvot sensoreilla mitattuna kadun länsipuolen (L) korkeusmittauksissa (4, 9 ja 14 m). Marraskuun 2017 ja maaliskuun 2018 välisenä aikana tulokset eivät olleet kunnolla vertailukelpoisia sensorien vikaantumisten ja vaihdosten takia (kts. LIITE 3). Vaalealla harmaalla taustalla Mäkelänkadun mitausaseman jatkuvatoimisen mittalaitteen referenssimittaus.



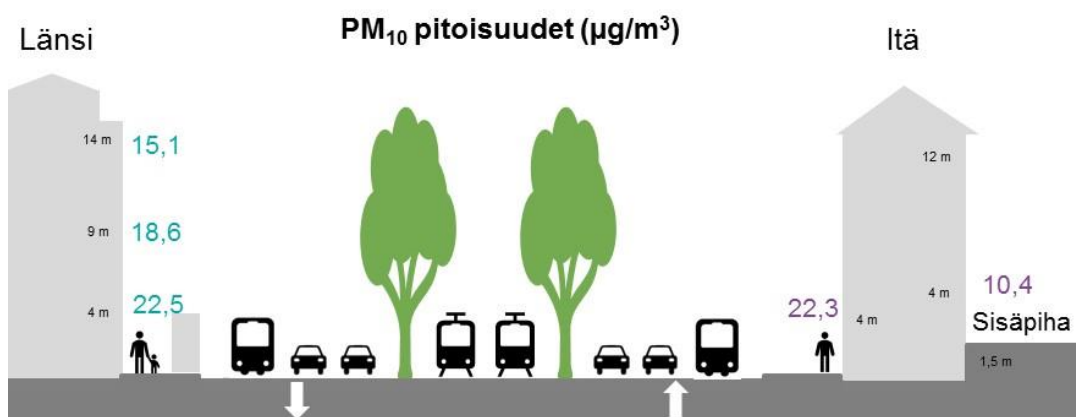
KUVIO 13. Typpidioksidipitoisuuksien (NO<sub>2</sub>) kuukausikeskiarvot sensoreilla mitattuna kadun itäpuolella (I) ja saman talon sisäpihalla (SP) hengityskorkeudella (4 m) sekä rakennuksen yläosassa (14 m).

## 6.2.2 Hengitettävät hiukkaset PM<sub>10</sub>

Kuten typpidioksidipitoisuuksien tarkastelussa, myös hengitettävien hiukkasten pitoisuuksia tarkastellessa, tarkasteltiin erikseen länsipuolen korkeussuuntaisia mittauksia sekä itäpuolen ja sisäpihan mittauksia. Länsipuolen ja itäpuolen mittauksissa on kummassakin omat tarkastelujaksot. Molempien puolien mittaustulokset ovat vain keskenään verrattavissa.

Hengitettävien hiukkasten osalta saatiin enemmän laadukasta dataa, kuin typpidioksidin osalta. Kuvioista 16 ja 17 näkee, miltä kuukautilta milläkin sensorilla saatiin lopullista, laadukasta dataa. Sensorien vikaantumisten sekä niistä aiheutuvien mittauskatkojen vuoksi sensoreilla ei saatu laadukasta mittaustuloksia koko vuodelta. Sensorien mittauskatkoista ja vaihtoajankohdista on tarkemmin liitteessä 3. Kaikki tulokset on taulukoitu liitteessä 4.

Länsipuolen korkeusmittauksissa hengitettävien hiukkasten pitoisuudet laimenevat kymmenen metrin matkalla neljästä metristä neljäentoista metriin 33 % (KUVIOT 14 ja 15). Sisäpihan puolella taas hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat 53 % matalammat kuin kadun puolella.



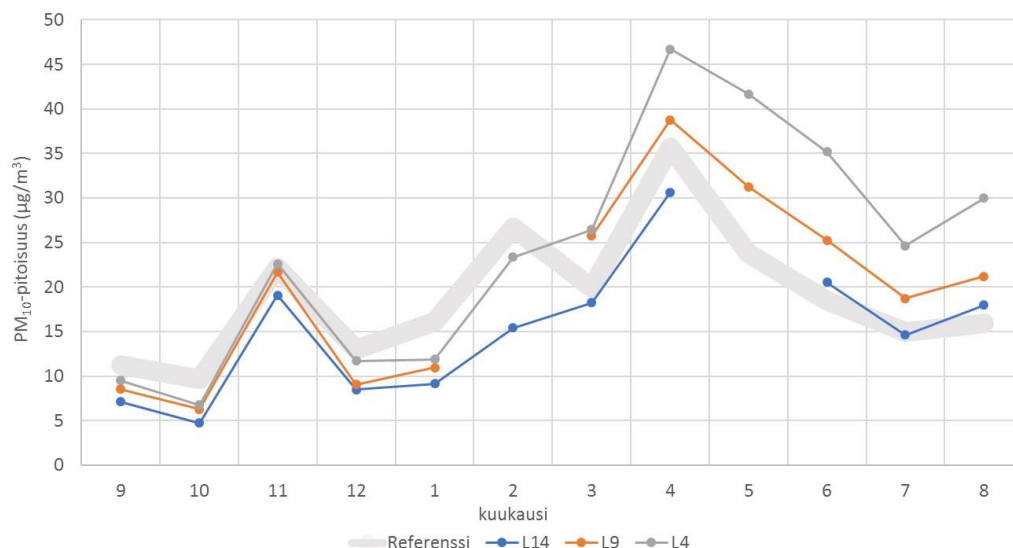
KUVIO 14. Sensorien hengitettävien hiukkasten pitoisuudet. Länsipuolen korkeussuuntaisissa mittauksissa (pitoisuudet turkoosilla) mittausjakso on 10 kuukautta (koko mittausjaksosta 9/2017-8/2018 ei ole mukana kuukausia 2/2018 ja 5/2018). Itäpuolen katutila vs. sisäpiha mittauksissa (pitoisuudet liilalla) mittausjakso on 9/2017-7/2018 eli 11 kuukautta. Länsi- ja itäpuolen tulokset eivät ole keskenään verrattavissa, koska niissä on eri mittausjaksot. SP14 sensorilla saatiin paljon vähemmän laadukasta dataa kuin muilla itäpuolen sensoreilla, joten jotta saatiin näytettyä mahdollisimman pitkän ajanjakson tulokset, jätettiin sisäpihan räystääskorkeuden (SP14) tulos pois.



KUVIO 15. Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksien laimeneminen sekä korkeussuunnassa (turkoosi) että sisäpihalla verrattuna katutilaan (liila). Keskenään verrattavien sensorien mittausjaksot ovat samat. Länsipuolen korkeussuuntamittauksissa (pitoisuudet turkoosilla) mittausjakso on 10 kuukautta (koko mittausjaksosta 9/2017-8/2018 ei ole mukana kuukausia 2/2018 ja 5/2018). Itäpuolen katutila vs. sisäpiha mittauksissa (pitoisuudet liilalla) mittausjakso on 9/2017-7/2018 eli 11 kuukautta. SP14 sensorilla saatiin paljon vähemmän laadukasta dataa kuin muilla itäpuolen sensoreilla, joten jotta saatiin näytettyä mahdollisimman pitkän ajanjakson tulokset, jätettiin sisäpihan räystäskorkeuden (SP14) tulos pois.

Liitteessä 4 on sekä typpidioksidipitoisuuksille että hengitettäville hiukkasille kaikista sensoreista samalta yhden kuukauden pituiselta ajanjaksolta pitoisuudet ja pitoisuuksien laimenemisprosentit. Näin pystytään vertaamaan kaikkia mittauspaikkoja keskenään. Ajanjaksoksi valittiin syyskuu, koska siltä ajanjaksolta on kaikista mittausdataa ja se vertautuu myös Mäkelänkadun mittausaseman referenssimittauksiin luotettavasti. Tällöin kuitenkin katupölyn pitoisuudet olivat hyvin matalia.

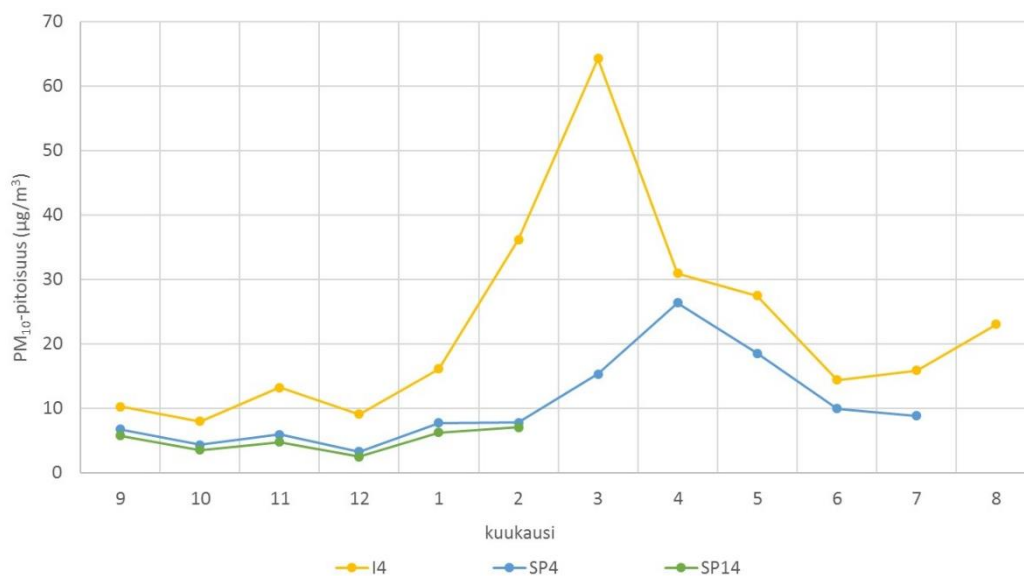
Kuvioissa 16 ja 17 on kadun länsipuolen korkeusmittauksien sekä kadun itäpuolen ja sisäpihan hengitettävien hiukkasten kuukausikeskiarvot. Kuviossa 16 on taustalla vaalealla harmaalla myös referenssimittaus, eli Mäkelänkadun mittausaseman jatkuvatoimisen mittalaitteen mittaama pitoisuus. Referenssilaitteen pitoisuuksia katsoessa, näkyy selvästi, että länsipuolen sensorien pitoisuudet ovat aluksi (syys- ja talvikuukausina) samaa luokkaa kuin referenssimittaus, mutta maaliskuusta 2018 alkaen sensoritulokset todennäköisesti yliarvioivat pitoisuuksia. Tämä on tärkeä huomioida sensorien absoluuttisia pitoisuustasoja tarkastellessa, mutta sensoritulosten suhteelliset erot (gradientit) ovat todennäköisesti kuitenkin hyvin vertailukelpoisia eri sensorien välillä. Sensorikohtaisiin PM<sub>10</sub> tuloksiin ja korjausyhtälöihin heijastuvat sensorien vertailujaksoille osuneet katupölypitoisuudet (luku 5.2 ja LIITE 2b).



KUVIO 16. Hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) kuukausikeskiarvot sensoreilla mitattuna kadun länsipuolen (L) korkeusmittauksissa (4, 9 ja 14 m). Vaalealla harmaalla taustalla Mäkelänkadun mittausaseman jatkuvatoimisen mittalaitteen referenssimittaus.

Korkeimmat hengitettävien hiukkasten pitoisuudet länsipuolella mitattiin referenssilaitteella ja sensoreilla huhtikuussa. Itäpuolen sisäpihan I4 sensori mittasi korkeita pitoisuuksia helmi- ja maaliskuussa. Pitoisuudet olivat Mäkelänkadun mittausaseman referenssimittauksista huomattavasti korkeampia (KUVIOT 16 ja 17). Tuolloin oli katupölykausi ja pitoisuudet olivat samaan aikaan muuallakin korkeita (esim. Leppävaarassa). Tulos on siis luotettava ja kertoo että Mäkelänkadun itäpuolella oli tuolloin enemmän katupölyä kuin länsipuolella.

Taustapitoisuus korostuu pienemmillä pitoisuuksilla ja silloin eri paikoilla ei ole niin suuria eroja. Suuremmilla pitoisuuksissa päästölähteen osuus on suurempi ja siten eri paikkojen erotkin ovat suuremmat.



KUVIO 17. Hengitettävien hiukkasten ( $PM_{10}$ ) kuukausikeskiarvot sensoreilla mitattuna kadun itäpuolella (I) ja saman talon sisäpihalla (SP) hengityskorkeudella (4 m) sekä rakennuksen yläosassa (14 m).

### 6.3 Ilmanlaatu eri vuorokaudenaikoina

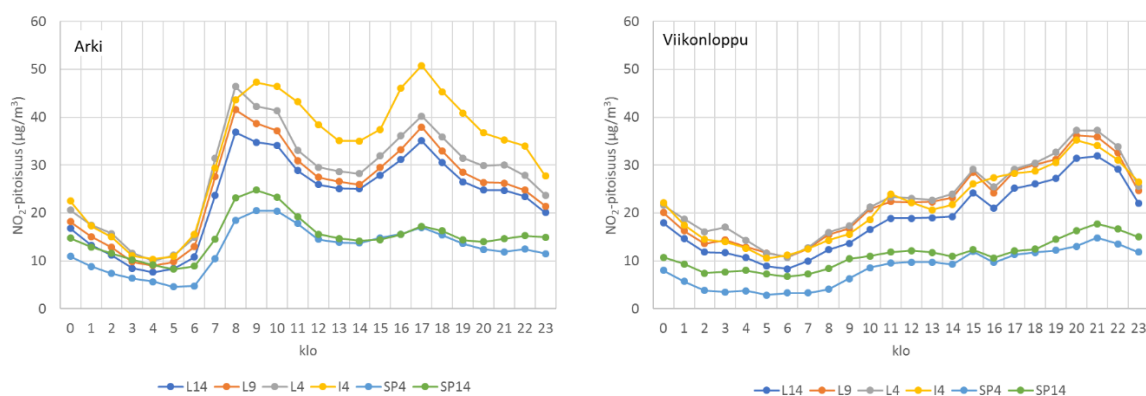
Ilmansaasteiden pitoisuudet vaihtelevat eri vuorokaudenaikaan. Tämä johtuu sekä ilmansaasteiden lähteiden (päästöjen) vuorokausirytmistä että myös sääolosuhteista. Mäkelänkadulla ilmanlaatuun vaikuttavat eniten liikenteen päästöt. Kuvioissa 18 ja 19 on esitetty kaikkien sensorien sekä typpidioksidipitoisuuksien että hengitettävien hiukkasten vuorokausivaihtelu Mäkelänkadulla arkena ja viikonloppuna. Pitoisuuksissa näkyy liikenteen rytmi (vrt. KUVIO 20).

Selkeimmin liikenteen rytmi näkyy typpidioksidipitoisuuksissa (KUVIO 18), sillä se on peräisin liikenteen pakokaasuista. Typpidioksidin pitoisuudet ovat korkeimmillaan aamu- ja iltapäiväruuhkien aikaan arkena. Viikonloppuisin liikennettä on tasaisemmin ja se keskittyy päivä- ja ilta-aikaan. Länsipuolella ajetaan kaupunkiin päin (aamuruuhka) ja itäpuolella ajetaan kaupungista poispäin (iltapäiväruuhka). Iltapäiväruuhka korostuu eniten itäpuolen I4 sensorin pitoisuuksissa (KUVIO 18a).

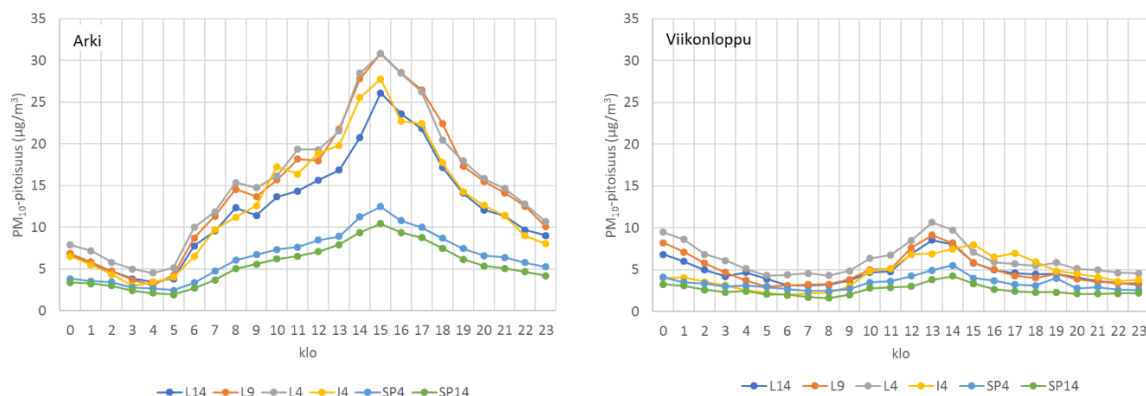
Hengitettävien hiukkasten osalta liikenteen rytmi ei näy yhtä selvästi, mutta on kuitenkin havaittavissa (KUVIO 19). Hengitettävien hiukkasten osalta liikenteen ruuhkauhput eivät erityisemmin korostu, vaan pitoisuudet ovat suurimmat päiväsaikaan. Hengitettävien hiukkasten pitoisuuksiin vaikuttaa erityisesti katupöly, ja katupintojen kosteus hillitsee pölyämistä useimmin yöllä ja aamulla.

Liikennemäärä ei kuitenkaan yksin vaikuta pitoisuuksiin. Sääolosuhteilla on myös merkitystä. Vaikka arkena iltapäiväruuhkan aikaan liikennettä on eniten, typpidioksidipitoisuudet ovat yleensä aamuruuhkan aikaan suuremmat. Tämä johtuu siitä, että aamulla sekoittumisolosuhteet ovat heikommät, joten ilmansaasteet eivät laimene niin hyvin.

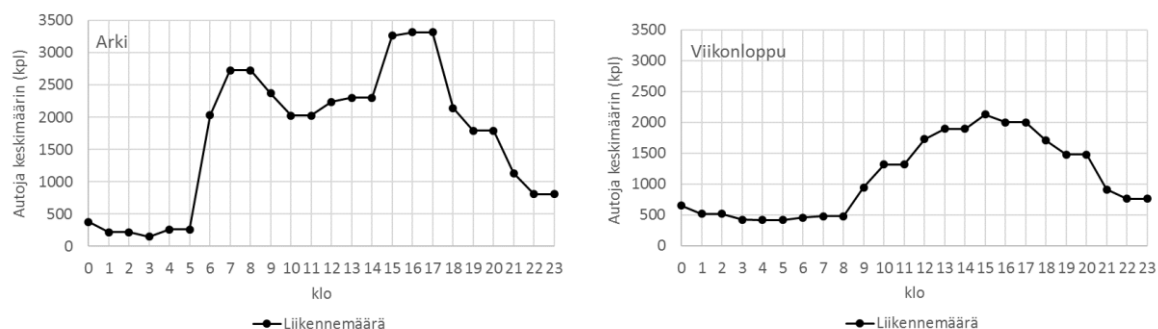
Liikenteen vaikutus näkyy ilmanlaadussa Mäkelänkadulla sensorimittauksilla myös korkeammalla rakennusten kattokorkeudella sekä rakennusten takana sisäpihalla. Sisäpihalla pitoisuudet ovat paljon katutilaa matalammat, mutta liikenteen rytmi näkyy sielläkin.



KUVIO 18 a ja b. Typpidioksidipitoisuuksien vuorokausivaihtelu kaikilla sensoreilla sekä a) arkena että b) viikonloppuna. Pitoisuudet ovat ajanjaksolta syys-lokakuu 2017.



KUVIO 19 a ja b. Hengitettävien hiukkasten vuorokausivaihtelu kaikilla sensoreilla sekä a) arkena että b) viikonloppuna. Pitoisuudet ovat ajanjaksolta syys-marraskuu 2017.



KUVIO 20. Liikennemäärän vuorokausivaihtelu Mäkelänkadulla sekä a) arkena että b) viikonloppuna. Kuvan liikennelaskennat ovat syyskuulta 2017 hieman pohjoisemmasta kohdasta Mäkelänkatua kuin ilmanlaatumittaukset (datalähde Helsingin kaupungin liikennelaskennat). Lisätietoja liikennemäärästä Liitteessä 1.

#### 6.4 Vertailut ohje- ja raja-arvoihin

Ilmanlaadulle on annettu raja- ja ohjearvoja alueille, joilla ihmiset altistuvat ilman epäpuhtauksille. EU on antanut ilmanlaadun raja-arvot ja ne on pantu täytäntöön ilmanlaadua koskevalla valtioneuvoston asetuksella (79/2017). Asetus määrittelee ilman epäpuhtauksille rajat, joiden alapuolelle pitää päästä määräajassa, ja joita ei saa sen jälkeen ylittää. Kaupunkisuunnittelussa tulee huolehtia, ettei näitä raja-arvoja ylitetä. (Airola & Myllynen 2015, 15; VN asetus 79/2017.)

Raja-arvon saavuttaminen ei kuitenkaan vielä takaa terveellistä ympäristöä. Siksi terveydellisten haittojen ehkäisemiseksi on säädetty kansallisia ohjearvoja, jotka on tarkoitettu otettavaksi huomioon myös maankäytön ja liikenteen suunnittelussa. Ohjearvot on annettu valtioneuvoston päätöksellä (480/1996), ja ne ilmaisevat ilmanlaadun tavoitteet sekä lyhyellä että pitkällä aikavälillä. WHO:n ohjearvoja (WHO 2006) voidaan käyttää myös osana terveysvaikutusten arviointia. (Airola & Myllynen 2015, 15; VN 480/1996; WHO 2006.)

TAULUKKO 1. Hengitettävälle hiukkasille ja typpidioksidille asetetut raja- ja ohjearvot

PM <sub>10</sub>	µg/m <sup>3</sup>		Asettaja
Vuosiraja-arvo	40	vuosikeskiarvo	VN asetus 79/2017
Vuosiohjearvo	20	vuosikeskiarvo	WHO 2006
Vuorokausiraja-arvo	50	saa ylittyä 35 kertaa vuodessa	VN asetus 79/2017
Vuorokausiohjearvo	50	ei sallittuja ylityksiä	WHO 2006
Vuorokausiohjearvo	70	saa ylittyä kerran kuukaudessa	VN asetus 480/1996

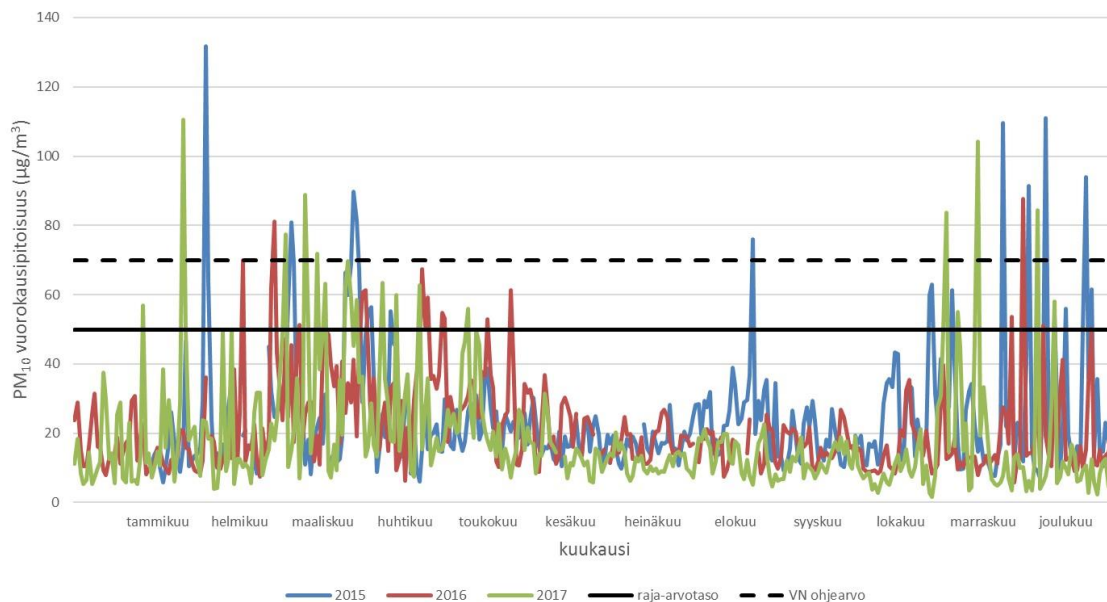
NO <sub>2</sub>	µg/m <sup>3</sup>		Asettaja
Vuosiraja-arvo	40	vuosikeskiarvo	VN asetus 79/2017
Tuntiraja-arvo	200	saa ylittyä 18 tuntia vuodessa	VN asetus 79/2017
Vuorokausiohjearvo	70	saa ylittyä kerran kuukaudessa	VN asetus 480/1996
Tuntiohjearvo	150	saa ylittää 1 % kuukauden tunneista	VN asetus 480/1996

Mäkelänkadulla on aloitettu mittaamaan ilmanlaatua vuonna 2015. Typpidioksidin vuosikeskiarvo on laskenut huomattavasti lyhyessä ajassa. Vuonna 2015 typpidioksidin vuosikeskiarvo oli 43 µg/m<sup>3</sup>, vuonna 2016 vuosikeskiarvo oli 37 µg/m<sup>3</sup> ja vuonna 2017 vain 33 µg/m<sup>3</sup>. Myös hengitettävien hiukkasten pitoisuudet ovat laskeneet. Vuonna 2015 hengitettävien hiukkasten vuosikeskiarvo oli 25 µg/m<sup>3</sup>, vuonna 2016 vuosikeskiarvo oli 21 µg/m<sup>3</sup> ja vuonna 2017 vain 18 µg/m<sup>3</sup>. Molemmilla ilmansaasteilla pitoisuudet ovat nykyään alle vuosiraja-arvon (40 µg/m<sup>3</sup>) ja hengitettävillä hiukkasilla myös alle WHO:n vuosiohjearvon (20 µg/m<sup>3</sup>). (Malkki & al. 2018.)

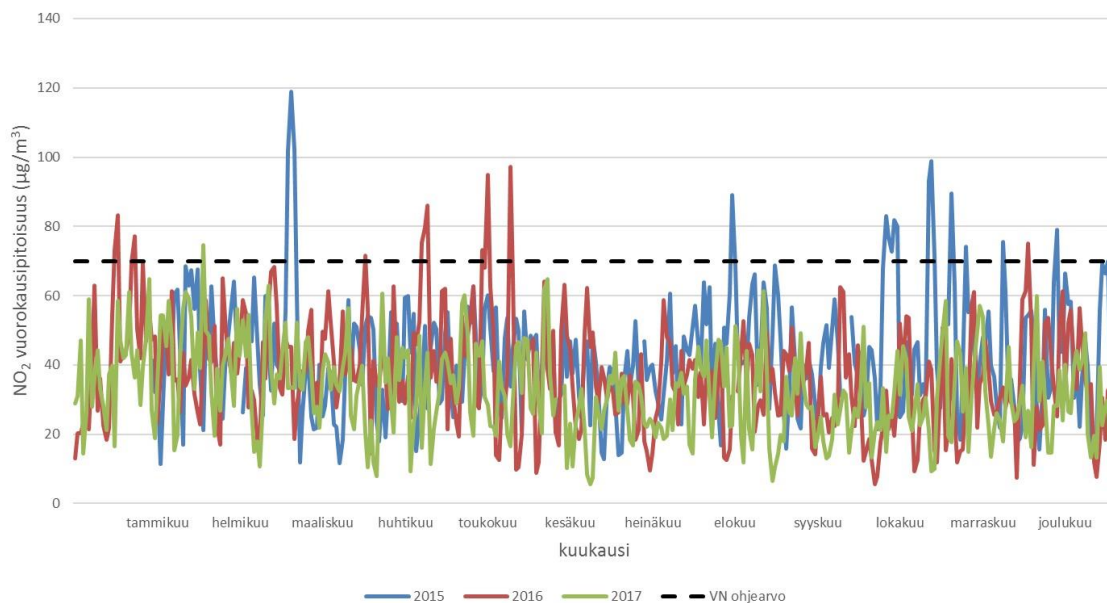
Vaikka sensoreilla ei saatu laadukasta mittausdataa koko vuodelta, voidaan mittausaseman tuloksista päätellä, että typpidioksidin sekä hengitettävien hiukkasten vuosiraja-arvo ei ylity myöskään korkeammalla rakennusten seinällä, eikä sisäpihan puolella.

Hengitettävien hiukkasten vuorokausiraja-arvotaso (50 µg/m<sup>3</sup>) ylittyi Mäkelänkadulla 25 kertaa vuonna 2015, 16 kertaa vuonna 2016 ja 20 kertaa vuonna 2017 (Kaski & al. 2016 ja 2017; Malkki & al. 2018). Vuorokausiraja-arvo ei siten ole Mäkelänkadulla ylittynyt (vuodessa sallittuja ylityksiä 35 kpl), mutta WHO:n vuorokausiohjearvo ylittyy joka vuosi. Valtioneuvoston vuorokausiohjearvo 70 µg/m<sup>3</sup> (saa ylittyä kerran kuukaudessa) ylittyi kahtena kuukautena vuosina 2015 ja 2017, mutta vuonna 2016 se ei ylittynyt. Typpidioksidin vuorokausiohjearvo 70 µg/m<sup>3</sup> (saa ylittyä kerran kuukaudessa) ylittyi kolmena kuukautena

vuonna 2015, kahtena kuukautena vuonna 2016 mutta ei vuonna 2017. (KUVIOT 21 ja 22)



KUVIO 21. Hengitettävien hiukkasten vuorokausipitoisuudet Mäkelänkadun mittausasemalla vuosina 2015 – 2017 suhteessa hengitettävälle hiukkasille asetettuun raja-arvotsoon sekä kansalliseen ohjearvotsoon. Datalähde: HSY



KUVIO 22. Typpidioksidin vuorokausipitoisuudet Mäkelänkadun mittausasemalla vuosina 2015 – 2017 suhteessa sille asetettuun kansalliseen ohjearvotsoon. Datalähde: HSY

Sensorien mittausjakson aikana syyskuusta 2017 elokuuhun 2018 Mäkelänkadun mittausasemalla hengitettävien hiukkasten vuorokausiraja-arvotaso ( $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) ylittyi 23 kertaa. Valtioneuvoston vuorokausiohjearvo  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (saa ylittyä kerran kuukaudessa) ylittyi hengitettävien hiukkasten osalta marraskuussa 2017 ja tammi- sekä huhtikuussa 2018. Typpidioksidin osalta sensorien mittausjaksolla vuorokausiohjearvo  $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ylittyi Mäkelänkadun mittausasemalla toukokuussa 2018.

Sensorien suhteen raja- ja ohjearvotarkastelua voidaan tehdä vain suuntaa antavasti, koska mittausjaksot olivat katkonaisia ja ennen kaikkea siksi, että sensorit yliarvioivat pitoisuuksia referenssimittauksiin verrattuna (LIITE 2 ja luvun 6.2.2 KUVIO 16). Pitoisuuksien yliarvioinnin takia, tuntiraja-arvoihin ja -ohjearvoihin sensorien tuloksia ei kannata verrata.

Kun tarkastellaan sensorien  $\text{PM}_{10}$ -pitoisuuksia yhdessä ilmanlaadun mittausaseman referenssimittausten kanssa, voidaan arvioida, että hengitettävien hiukkasten raja-arvotaso sekä kansallinen ohjearvo ylittyy yleensä katutasolla neljässä metrissä ja myös korkeammalla (9 ja 14 metrin korkeudella) kadunpuoleisella seinustalla voi esiintyä raja-arvotason ja ohjearvon ylityksiä. Sisäpihalla vuorokausipitoisuudet ovat pääsääntöisesti huomattavasti matalampia kuin kadun puolella, joten kansallisen ohjearvon ylitykset ovat siellä luultavasti epätodennäköisiä, mutta raja-arvotaso voinee ylittyä satunnaisesti myös sisäpihalla voimakkaimman katupölykauden aikaan. Ylitysarviointi koskee vain Mäkelänkadun tyyppistä ympäristöä. On myös syytä huomioida, että Mäkelänkadulla katupölyä torjutaan tehokkaasti keväisin imulakaisuilla ja pölynsidontakasteluilla. Tulevaisuudessa autokannan uudistuminen vähentää pakokaasuperäisiä päästöjä, mutta katupölyn muodostumiselle ei ole näkyvissä vähenemistä.

Typpidioksidille annettu kansallinen ohjearvo voi ylittyä kadunpuoleisella seinustalla katutason lisäksi myös yhdeksässä ja neljässätoista metrissä. Mittausten mukaan typpidioksidipitoisuudet ovat pääsääntöisesti katutasolla lähellä liikennettä suurimmat, mutta ilmakemialliset reaktiot otsonin kanssa vaikuttavat siten, että myös ylempänä muodostuu typpimonoksidista typpidioksidia. Sisäpihalla pitoisuudet ovat selvästi matalampia kuin kadun puolella, joten siellä ohjearvon ylittyminen on epätodennäköistä. Ylitysarviointi koskee vain Mäkelänkadun tyyppistä ympäristöä ja lähivuosien tilannetta. Liikenteen typenoksidipäästöt vähenevät autokannan uudistuessa, joten typpidioksidin pitoisuudet jatkavat laskuaan pitkällä aikavälillä.

## 7 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Tämän tutkimushankkeen tavoitteena oli saada uutta tietoa, jota voidaan hyödyntää kaupunkibulevardien ja muiden vilkasliikenteisten katu ympäristöjen kaavoituskohteiden tarkentamisessa. Tarkoitus oli tarjota suunnittelijoille taustatietoa siitä, miten suunnitella ilmanlaadun kannalta mahdollisimman terveellistä asuinympäristöä.

Pääkysymys tässä tutkimuksessa oli, kuinka voimakkaasti ilmanlaatu paranee etäännyttäessä kerrostalojen reunustamasta kadusta, eli päästölähteestä, pystysuunnassa talojen seinustalla ja minkälainen ilmanlaatu on rakennuksen takana sisäpihalla. Lisäksi tutkimuksessa käsiteltiin, miten ilmanlaatu paranee etäännyttäessä kadusta, eli päästölähteestä vaakasuuntaisesti aina 125 metrin etäisyydelle saakka. Tätä tarkasteltiin passiivikeräimien typpidioksidimittauksilla. Tutkimuksen pääkysymystä tarkasteltiin eri saastekomponenttien sensorimittauksilla (typpidioksidi  $\text{NO}_2$  ja hengitettävät hiukkaset  $\text{PM}_{10}$ ).

Katukuilussa ilmansaasteet laimenivat ylöspäin mentäessä ja olivat kadunpuoleisella räystätasolla typpidioksidin osalta keskimäärin 82 prosenttia ja hengitettävien hiukkasten osalta 67 prosenttia katutason hengityskorkeuden pitoisuuksista. Kerrostalojen takana sisäpihan oleskelualueella typpidioksidipitoisuudet olivat hengityskorkeudella 60 prosenttia ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet 47 prosenttia kadun puolen pitoisuuksista.

Tutkimustulokset osoittivat, että katukuilumainen rakennusmassa vähentää ilmansaasteiden leviämistä sisäpihalle tai kauemmas rakennusten taakse, mutta se aiheuttaa suuremmat pitoisuudet katukuiluun, rakennusten kadunpuoleisille seinustoille. Katukuilussa pitoisuudet olivat suurimmat rakennusten seinustoilla. Aukkopaikoissa pitoisuudet olivat selkeästi pienemmät. Hengityskorkeudella, etäännyttäessä kadusta pitoisuudet laimenivat melko nopeasti. 125 metrin etäisyydellä pitoisuudet olivat jo kaupunkitaustan tasolla.

Tässä opinnäytetyössä tehtiin myös kirjallisuuskatsaus, jossa tarkasteltiin muita samantyyppisiä tutkimuksia. Eri mittaukset eivät kuitenkaan ole suoraan verrattavissa keskenään erilaisten olosuhteiden takia. Yleisiä ja suuntaa antavia johtopäätöksiä niistä kaikista mittauksista kuitenkin sai, kuten muun muassa, että leveimmissä katukuilussa pitoisuudet laimenivat parhaiten.

Parhaiten tämän tutkimuksen tulokset ovat verrattavissa Runeberginkadun vuodenpituisiin typpidioksidimittauksiin. Muut mittaukset kestivät paljon vähemmän aikaa, jolloin sääolosuhteiden merkitys kasvoi verrattuna pitkän ajan keskiarvoon. Myös se tehtiinkö kattotason mittaukset katolla vai katukuilussa rakennuksen räystäään reunalla, vaikutti tuloksiin.

Muissa kuin Runeberginkadun ja tämän tutkimuksen mittauksissa pitoisuuserot katutasen ja kattotason välillä olivat paljon suuremmat. Tämän tutkimushankkeen mittauksissa ja Runeberginkadulla typpidioksidipitoisuudet vähenivät noin 16 - 18 prosenttia katutasolta kattotasolle mentäessä. Sisäpihalla typpidioksidipitoisuudet olivat Runeberginkadulla noin 30 prosenttia pienemmät ja Mäkelänkadulla noin 40 prosenttia pienemmät. Gradienttien prosenttilukuihin vaikuttaa muun muassa se, että Runeberginkadun mittauksien aikaan vuonna 2004 typpidioksidin kaupunkitaustapitoisuus Kallion mittausasemalla oli  $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja tämän tutkimushankkeen mittauksien aikaan vuonna 2017 vain  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Myös katugeometrian eroavaisuudet ja Runeberginkadun sisäpihalla olleet työkoneet vaikuttivat pitoisuuksiin.

Hämeentien mittaukset kestivät myös vuoden, mutta siellä kattotason mittaus tehtiin katolla, eikä rakennusten reunalta kadunpuoleiselta räystääskorkeudelta niin kuin Mäkelänkadulla ja Runeberginkadulla. Tällöin tulokset eivät ole niin hyvin keskenään verrattavissa, koska katolla pitoisuudet ovat pienemmät kuin rakennuksen reunalla kadunpuoleisella räystääskorkeudella.

Mittauspaikan kohdalla Mäkelänkatu on kaupunkibulevardimainen kohde ja näistä mitaustuloksista on hyötyä vilkasliikenteisten katukuilumaisten ympäristöjen ja kaupunkibulevardimaisten kohteiden suunnittelussa. Mittaustulosten perusteella tiedetään, kuinka paljon ilmanlaatu on parempi korkeammalla rakennusten seinustoilla ja sisäpihalla rakennusten takana. Myös se onko katukuilussa rakennusten välissä aukkoja vai onko se yhtenäistä rakennusmassaa vaikuttaa ilmanlaatuun katukuilussa ja rakennusten takana. Mitaustulokset ovat tärkeitä katutilan, parvekkeiden, ilmanottoaikkojen ja piha- ja leikkipaikkojen suunnittelussa. Tulokset edustavat Mäkelänkadun tyyppistä katukuiluympäristöä. Tulokset ovat yleistettävissä vain katugeometrialtaan ja liikennemäärältään samantyyppisiin kohteisiin.

Tutkimustulosten ja kirjallisuuskatsauksen mukaan ilmanlaatuun katukuilussa ja sen lähiympäristössä vaikuttaa liikenteen määrä, katukuilun leveys ja korkeus, korttelirakenne sekä etäisyys päästölähteestä. Mitä leveämpi katu, sen parempi ilmanlaatu. Yhtenäinen rakennusmassa suojaa sisäpihoja, mutta nostaa pitoisuuksia katukuilussa. Tutkimustulokset tukevat myös muita yleisiä johtopäätöksiä ilmansaasteille altistumisen vähentämisessä kaupunkisuunnittelussa. Hyviä käytäntöjä vilkasliikenteisillä katualueilla on muun muassa sijoittaa rakennusten parvekkeet ja tuuletusikkunat sisäpihan puolelle (eli ei saisi olla vain kadun puolelle aukeavia huoneistoja) ja järjestää ilmanotto kattotasolta puhtaammalta puolelta tehokkaalla suodatuksella. Kadun puolelle alimpaan kerrokseen sopisi asuntojen

sijaan esimerkiksi liikehuoneistoja. Pyöräilylle ja jalankulkijoille olisi hyvä suunnitella mahdollisuuksien mukaan vaihtoehtoinen kulkureitti korttelin verran kauempaa vilkasliikenteisestä katukuilusta.

Haastetta ja epävarmuustekijöitä tähän opinnäytetyöhön teki se, että sensorit olivat uusi mittaamenetelmä ja niillä mittaamisesta ei vielä oikein ollut kokemusta. Sensoreita myös vikaantui harmillisen paljon ja niitä jouduttiin vaihtamaan. Siksi mittauksiin tuli mittauskatkoja, eikä yhtenäistä vuodenpituisia mittausjaksoja saatu mitattua. Eri aikoina tehdyt vertailumittaukset aiheuttivat myös haastetta tulosten vertailtavuuden kannalta. Sensoreilla mitattiin montaa eri ilmansaastetta, mutta tässä opinnäytetyössä on keskitytty hengitettäviin hiukkasiin ja typpidioksidiin, koska näiden sensoriaineistojen laatu oli paras ja ne ovat tärkeimpiä kaupunki-ilman saasteita ja tulee huomioida kaupunkisuunnittelussa.

Tutkimushankkeessa sensorit yliarvioivat typpidioksidin pitoisuuksia passiivikeräintuloksiin verrattuna huomattavasti. Vertailussa sensoreilla mitattiin 23 - 28 prosenttia suurempia pitoisuuksia kuin passiivikeräimillä. Sensorituloksista voidaan vertailla pitoisuuksien laimenemista, mutta raja- ja ohjearvoylitysten tarkasteluja pelkästään niiden tuloksien perusteella ei voida tehdä luotettavasti. Referenssimittausten tuloksiin verraten voidaan kuitenkin päätellä, että kun typpidioksidin sekä hengitettävien hiukkasten vuosiraja-arvo ei ylitä katutasolla, ei se ylitä myöskään korkeammalla rakennusten seinällä, eikä sisäpihan puolella.

Kun tarkastellaan sensorien PM<sub>10</sub>-pitoisuuksia yhdessä ilmanlaadun mittausaseman referenssimittausten kanssa, voidaan arvioida, että hengitettävien hiukkasten raja-arvotaso sekä kansallinen ohjearvo ylittyy yleensä katutasolla neljässä metrissä ja myös korkeammalla (9 ja 14 metrin korkeudella) kadunpuoleisella seinustalla voi esiintyä raja-arvotason ja ohjearvon ylityksiä. Sisäpihalla vuorokausipitoisuudet ovat pääsääntöisesti huomattavasti matalampia kuin kadun puolella, joten kansallisen ohjearvon ylitykset ovat siellä luultavasti epätodennäköisiä, mutta raja-arvotaso voinee ylittyä satunnaisesti myös sisäpihalla voimakkaimman katupölykauden aikaan. Ylitysarviointi koskee vain Mäkelänkadun tyyppistä ympäristöä. On myös syytä huomioida, että Mäkelänkadulla katupölyä torjutaan tehokkaasti keväisin imulakaisuilla ja pölynsidontakasteluilla. Tulevaisuudessa autokannan uudistuminen vähentää pakokaasuperäisiä päästöjä, mutta katupölyn muodostumiselle ei ole näkyvissä vähenemistä.

Typpidioksidille annettu kansallinen ohjearvo voi ylittyä kadunpuoleisella seinustalla katusason lisäksi myös yhdeksässä ja neljässätoista metrissä. Mittausten mukaan typpidioksidipitoisuudet ovat pääsääntöisesti katutasolla lähellä liikennettä suurimmat, mutta ilmake-

mialliset reaktiot otsonin kanssa vaikuttavat siten, että myös ylempänä muodostuu typpi-monoksidista typpidioksidia. Sisäpihalla pitoisuudet ovat selvästi matalampia kuin kadun puolella, joten siellä ohjearvon ylittyminen on epätodennäköistä. Ylitysarviointi koskee vain Mäkelänkadun tyyppistä ympäristöä ja lähivuosien tilannetta. Liikenteen typenoksidipäästöt vähenevät autokannan uudistuessa, joten typpidioksidin pitoisuudet jatkavat laskuaan pitkällä aikavälillä.

Tämä tutkimushanke oli vielä hieman liian haastava nykyisille sensoreille. Sensorien kehittyessä tämä tutkimushanke voisi olla hyvä toistaa. Pitkäaikaisia korkeussuuntaisia ilmanlaadun mittauksia olisi hyvä saada myös katugeometrialtaan ja liikennemääriltään erilaisista kohteista.

## LÄHTEET

- Aarnio, P., Kousa, A., Malkki, M. 2016. Ilmanlaatu ja siihen vaikuttavat tekijät pääkaupunkiseudulla vuosina 2006 – 2015. Ilmansuojelusuunnitelman taustaraportti. HSY:n julkaisuja 9/2016.
- Aarnio, P., Matilainen, L., Loukkola, K. 2013. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2012. HSY:n julkaisuja 5/2013.
- Airola, H. & Myllynen, M. 2015. Ilmanlaatu maankäytön suunnittelussa. Uudenmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus. Opas 2/2015.
- Blomqvist, P. 2018. Mäkelänkadun liikennelaskenta. Kaupunkiympäristö, Liikenne- ja katusuunnittelu, Helsingin kaupunki. Saatu 9.10.2018
- Helsingin ilmansuojelusuunnitelman esite. Helsingin kaupunki. 2016. Hyvän ilman Helsinki -Näin parannamme yhdessä ilmanlaatua. [Viitattu 3.11.2017]. Saatavissa: <https://www.hel.fi/static/ymk/esitteet/ilmansuojeluesite.pdf>
- Helsingin kaupunki 2018. Liikennemääräkartat Helsingin alueelta vuodelta 2017.
- Helsingin yleiskaava. Helsingin kaupunki. 2016. Tarkistettu ehdotus. [Viitattu 3.11.2017]. Saatavissa: <http://www.yleiskaava.fi/yleiskaava/tarkistettu-ehdotus/>
- HSY. 2018. Mäkelänkadun ilmanlaadun mittausdata vuosilta 2015-2018. Helsingin seudun ympäristöpalvelut, Seutu- ja ympäristötieto, ilmansuojeluyksikkö. Saatu 16.10.2018
- Hänninen, O., Korhonen, A., Lehtomäki, H., Asikainen, A., Rumrich, I. Ilmansaasteiden terveysvaikutukset. Ympäristöministeriön raportteja 16/2016.
- Jyväskylän yliopisto. 2014a. Aineistonhankintamenetelmät. [viitattu 7.9.2018]. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/aineistonhankintamenetelmat>
- Jyväskylän yliopisto. 2014b. Tutkimusstrategiat. [viitattu 7.9.2018]. Saatavissa: <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat>
- Kaski, N., Aarnio, P., Loukkola, K., Portin, H. 2016. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2015. HSY:n julkaisuja 6/2016.
- Kaski, N., Loukkola, K., Portin, H. 2017. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2016. HSY:n julkaisuja 3/2017.

Kuokkanen & Malmberg 5.2.2018. Helsingin kaupunkibulevardit saivat tyrmäyksen oikeudessa. HS. [viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://www.hs.fi/kaupunki/art-2000005553374.html>

Kuuluvainen, H., Poikkimäki, M., Järvinen, A., Kuula, J., Irjala, M., Dal Maso, M., Keskinen, J., Timonen, H., Niemi, J. V., Rönkkö, T. 2018. Vertical profiles of lung deposited surface area concentrations of particulate matter measured with a drone in a street canyon. *Environmental Pollution* 241, 96-105.

Loukkola, K., Koskentalo, T., & Humaloja, T. Passiivikeräinmenetelmän uudistaminen syksyllä 2003, Muistio 2/2004, YTV Ympäristötoimisto

Malkki, M. & Kousa, A. 2005. Ilmanlaadun typpidioksidimääritykset 2004. Eri etäisyyksillä, eri korkeuksilla. Muistio 1/2005. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta (YTV). 26 p.

Malkki, M. & Loukkola, K. 2015. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2014. HSY:n julkaisu 6/2015. Ilmanlaatudata 2014 -liiteosa, s. 27 – 28 ja 58, passiivikeräimet nro 9-14.

Malkki, M., Loukkola, K. & Portin, H. 2018. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2017. HSY:n julkaisu 2/2018.

Moilanen, K. 8.11.2018. Täystyrmäys Helsingin kaupungille: Korkein hallinto-oikeus hylkäsi kaupunkibulevardit ja Keskuspuistoon rakentamisen – Malmin lentokentälle ei armoa. HS. [viitattu 9.11.2018]. Saatavissa: <https://www.hs.fi/kaupunki/art-2000005892274.html>

Pakkanen, T., Kerminen, V.-M., Loukkola, K., Hillamo, R., Aarnio, P., Koskentalo, T. & Maenhaut, W. 2003. Size distributions of mass and chemical components in street-level and rooftop PM 1 particles in Helsinki. *Atmospheric Environment* 37: 1673-1690.

Qin, Y., Kot, S.C., 1993. Dispersion of vehicular emission in street canyons, Guangzhou city, South China (P.R.C.). *Atmospheric Environment* 27B, 283-291.

Siironen. 5.2.2018. Hallinto-oikeus: Helsingin uusi yleiskaava on osin lainvastainen – kaupunkibulevardit ja Keskuspuiston rakentaminen vastatuulella. YLE. [viitattu 10.2.2018]. Saatavissa: <https://yle.fi/uutiset/3-10059076>

SLB analys. 2013. Vertikal variation av luftföroreningshalter i ett dubbelsidigt gaturum. Uppmätta halter av kväveoxider vid Sveavägen, Stockholm. SLB 11:2013.

Valtioneuvoston asetus ilmanlaadusta. Suomen säädöskokoelma 79/2017.

Valtioneuvoston päätös ilmanlaadun ohjearvoista. Suomen säädöskokoelma 480/1996.

Väkevä, M., Hämeri, K., Kulmala, M., Lahdes, R., Ruuskanen, J. & Latinen, T. 1999. Street level versus rooftop concentrations of submicron aerosol particles and gaseous pollutants in an urban street canyon. *Atmospheric Environment* 33: 1385–1397.

WHO 2006. *Air Quality Guidelines: Global update 2005*. ISBN 92-890-2192-6.

Zoumakis, N.M., 1995. A note on average vertical profiles of vehicular pollutant concentrations in urban street canyons. *Atmospheric Environment* 29, 3719-3725

Kaikki kuviot ja taulukot joissa ei ole lähdemerkintää, ovat työn tekijän tekemiä.

## LIITTEET

**LIITE 1** LISÄTIETOA KOHTEESTA

**LIITE 2** LAADUNVARMENNUS JA KORJAUSYHTÄLÖT

**LIITE 3** SENSORIEN VIKAANTUMISET JA VAIHDOT

**LIITE 4** MITTAUSTULOKSET

## LIITE 1 LISÄTIETOA KOHTEESTA

### a) Liikennelaskennat

Liikennelaskennat on tehty Mäkelänkadun uimahallille menevän kävelysillan lähellä (kts. karttakuva alla). Kyseisessä paikassa on hieman suurempi liikennemäärä kuin Ilmanlaadun mittausaseman kohdalla. Tässä raportissa käytettiin liikennelaskennan tietoja ajalta 4.9.2017 - 1.10.2017. Tämän ajanjakson arvellaan edustavan hyvin koko vuotta. Liikennemäärissä on mukana molempiin suuntiin ajavat autot. Liikennemäärätiedot saatiin Helsingin kaupungin Kaupunkiympäristön Liikenne- ja katusuunnittelusta Petri Blomqvistilta.

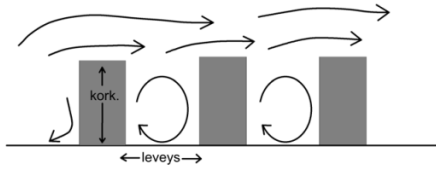


Liikennelaskentapisteen sekä Mäkelänkadun ilmanlaadun mittausaseman sijainnit. Pääkaupunkiseudun opaskartta: © Espoon, Helsingin, Kauniaisten ja Vantaan kaupungit 2017

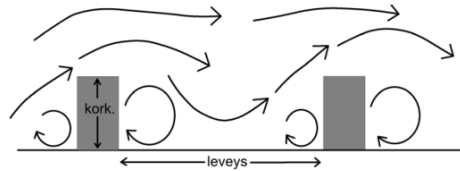
### b) Katukuilupyörre

Katukuilun katsotaan olevan kapea, kun kadunvarren rakennusten korkeuden ja kadun leveyden suhde on suurempi kuin 0,7. Tällöin vähäisemmälläkin liikennemäärällä ja siten vähäisellä päästömäärällä ilman epäpuhtauksien pitoisuudet voivat kohota katukuilussa korkeiksi. Leveässä katukuilussa (korkeus/leveys -suhde < 0,7) ilman epäpuhtauksien pi-

toisuudet laimenevat paremmin, koska sekoittuminen katukuilun ja yläpuolisen ilman välillä on huomattavasti tehokkaampaa. Mäkelänkatu on leveä katukuilu. Vallitseva tuulensuunta on lounaasta.



Kapeassa katukuilussa syntyy selvä tuulipyörre, ja pyörteen ja yläpuolisen tuulen välillä tapahtuva sekoittuminen jää niukaksi (ns. skimming flow -virtaustilanne).



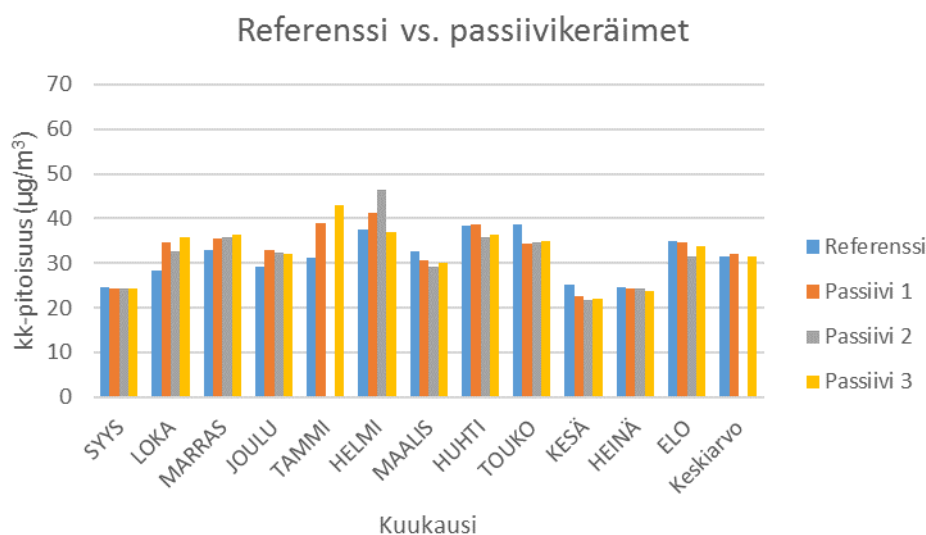
Leveässä katukuilussa sekoittumista tapahtuu katukuilun ja yläpuolisen ilman välillä enemmän kuin kapeassa katukuilussa.

Lähde: Kaupunkibulevardien ilmanlaatuselvitys, Helsingin kaupunkisuunnitteluviraston yleissuunnitteluosaston selvityksiä 2014:29, sivut 8-9

## LIITE 2 LAADUNVARMENNUS JA KORJAUSYHTÄLÖT

### A) Laadunvarmennus

Passiivikeräimien vuosikeskiarvotulokset ovat luotettavia ja mittausasemien jatkuvien mittalaitteiden luokkaa. Kuukausikeskiarvoissa on hieman yli- tai aliarviota riippuen vuodenaikasta. Alla olevassa kuvassa Referenssi tarkoittaa Mäkelänkadun mittausasemalla olevaa jatkuvatoimista mittalaitetta ja passiivit 1-3 ovat Mäkelänkadun mittausasemalla olevia passiivikeräimiä. Alla olevasta kuvasta näkee, että syksyllä ja talvella passiivikeräimet usein hieman yliarvioivat, kun taas keväällä ja kesällä ne aliarvioivat. Vuosikeskiarvot kuitenkin osuvat yleensä hyvin kohdilleen.

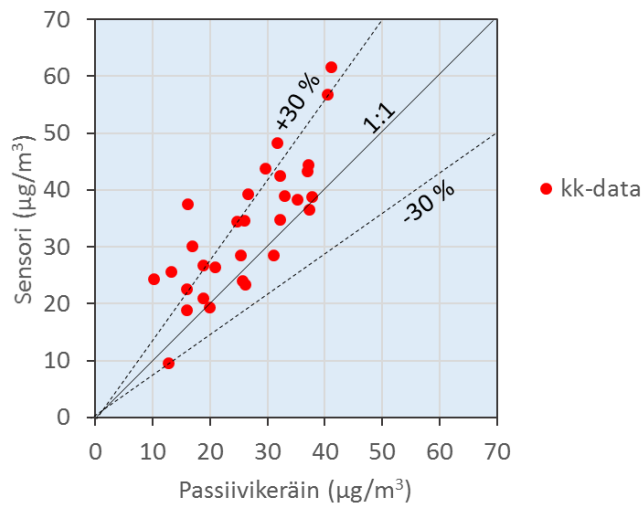


Sensorit eivät ole yhtä tarkkoja mittalaitteita kuin passiivikeräimet tai jatkuvatoimiset mittalaitteet ilmanlaadun mittausasemilla. Sensorien mittaustulosten laadun arvioimiseksi, niiden typpidioksidimittaustuloksia on verrattu passiivikeräinten typpidioksidimittaustuloksiin.

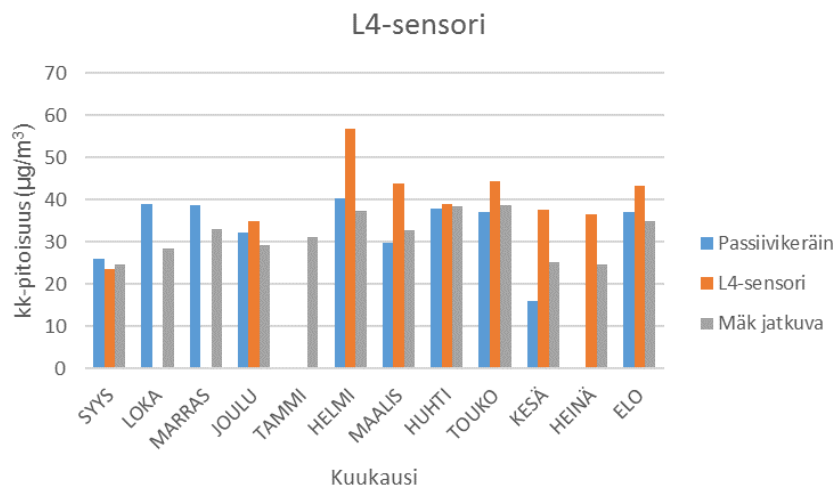
Alimmissa kolmessa sensoripisteessä (L4, I4 ja SP4) oli koko vuoden mittausten ajan rinnalla NO<sub>2</sub> passiivikeräimet. L4 sensori oli myös melko lähellä Mäkelänkadun mittausaseman jatkuvatoimisia mittalaitteita. L4 sensoriin verrattu passiivikeräin on passiivikeräin numero 2, I4 sensoriin verrattu passiivikeräin on passiivikeräin numero 3 ja SP4 sensoriin verrattu passiivikeräin on passiivikeräin numero 6 (kts. passiivikeräimien sijainnit: Luku 5.2, KUVIO 6).

Passiivikeräinten ja sensoritulosten välillä on melko suuria eroja. Alla olevassa kuvassa on sekä sensorien että passiivikeräinten kuukausikeskiarvot niiltä kuukausilta kuin sensoridataa on yli 90 prosenttia (mukana myös SP4 tammikuu, jossa 89,5 prosenttia dataa).

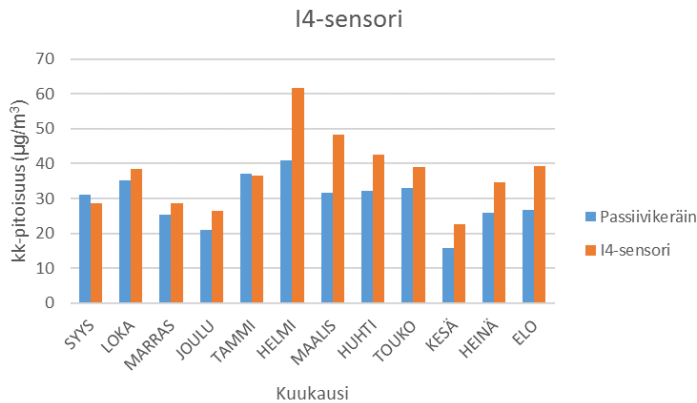
Sensorien kuukausikeskiarvoissa on täsmälleen samat mittausjaksot kuin siihen verrattavassa passiivikeräimessä. Alla olevasta kuvasta näkee, että sensoritulokset ovat selkeästi passiivikeräintuloksia suurempia.



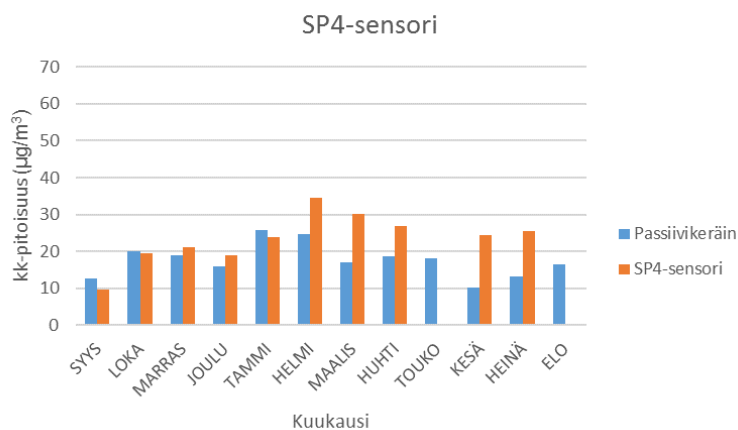
L4-sensoria verrattiin viereiseen passiivikeräimeen nro 2 sekä Mäkelänkadun mittausasemaan. L4-sensori vaihdettiin 8.11., 12.1. ja 20.3. Passiivikeräimen nro 2 tuloksia ei saatu tammi- eikä heinäkuussa. Loka-, marras- ja tammikuussa ei L4-sensorilta saatu riittävästi typpidioksididataa passiivikeräinvertailuun. L4 sensoria yliarvioi selvästi helmi-maaliskuussa sekä kesä-heinäkuussa. Kesäkuussa L4 sensoria yliarvioi reilusti passiivikeräimeen verrattuna, mutta toisaalta passiivikeräin taas aliarvioi mittausasemaan verrattuna.



I4 sensoria mittasi viisi ensimmäistä kuukautta suurin piirtein samoja pitoisuuksia kuin passiivikeräin, mutta alkoi yliarvioimaan helmikuusta 2018 eteenpäin. I4 sensoria vaihdettiin 27.11. ja 17.5.



SP4 sensorikin mittasi viisi ensimmäistä kuukautta suurin piirtein samoja pitoisuuksia kuin passiivikeräin, mutta alkoi yliarvioimaan helmikuusta 2018 eteenpäin. SP4 sensorilta ei saatu riittävästi dataa passiivikeräinvertailuun toukokuulta eikä elokuulta. SP4 sensorivaihdettiin 17.5. Koska uusia sensoreita ei ollut saatavilla, tilalle laitettiin vanha sensori.



Koko yhtenäisen datajakson typpidioksidipitoisuuden keskiarvo L4-sensorilla oli  $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja saman paikan passiivikeräimellä  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Vieressä olevan mittausaseman jatkuvatoimisen mittalaitteen keskiarvo samoilta mittausjaksoilta oli  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . L4-sensori siis yliarvioi passiivikeräimeen verrattuna 25 prosenttia ja mittausasemaan verrattuna 21 prosenttia. I4-sensorilla koko yhtenäisen datajakson typpidioksidipitoisuuden keskiarvo oli  $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja saman paikan passiivikeräimellä  $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Täten I4-sensori yliarvioi passiivikeräimeen verrattuna 23 prosenttia. SP4-sensorilla koko yhtenäisen datajakson typpidioksidipitoisuuden keskiarvo oli  $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja saman paikan passiivikeräimellä  $18 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Täten SP4-sensori yliarvioi passiivikeräimeen verrattuna 28 prosenttia. Keskenään sensorit ovat kuitenkin hyvin verrattavissa.

## B) Sensorien korjausyhtälöt

	Alkuvertailu			Loppuvertailu		
	NO2			NO2		
Sensori	Kulmakerroin	Vakio	R2	Kulmakerroin	Vakio	R2
L14_1	0,81	-2,82	0,83	0,74	-4,94	0,89
L14_2	1,01	-5,45	0,85	0,76	-31,13	0,24
L14_3	1,00	-6,65	0,85	0,86	-4,82	0,87
L9_1	0,82	-4,59	0,79	-	-	-
L9_2	0,79	-3,76	0,87	0,80	-4,70	0,84
L4_1	0,87	-2,22	0,85	-	-	-
L4_2	0,92	-4,04	0,71	0,74	-0,81	0,90
L4_3	1,06	-3,33	0,92	0,76	-3,56	0,79
L4_4	0,99	-5,14	0,83	0,89	-5,90	0,80
I4_1	0,89	-1,52	0,88	0,67	-4,16	0,92
I4_2	1,00	-3,25	0,93	0,72	-1,30	0,90
I4_3	1,02	-8,38	0,83	0,82	-1,91	0,90
SP4_1	0,84	-2,32	0,88	1,02	-68,74	0,79
SP14_1	0,89	-2,36	0,89	0,70	-7,09	0,81
SP14_2	1,00	-7,90	0,83	0,84	-6,65	0,78

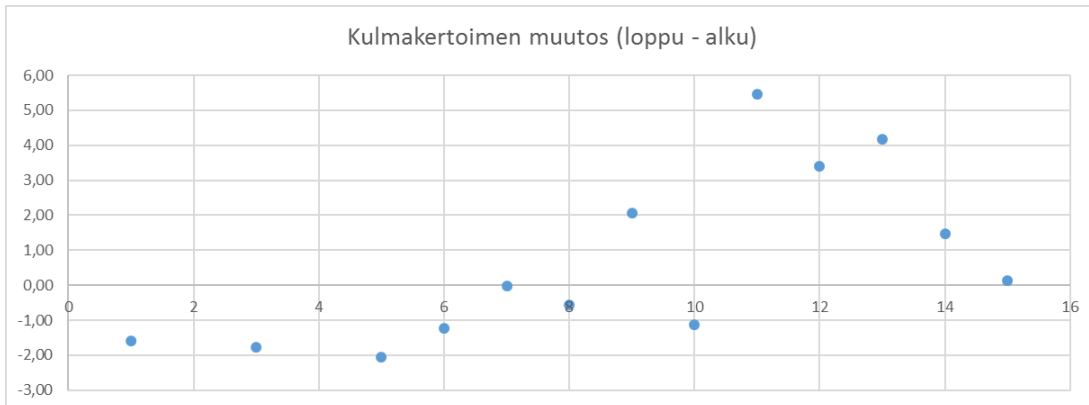
- laite vikaantunut, loppuvertailua ei ole pystytty tekemään

Kulmakerroin on pienempi suurimmalla osalla sensoreista loppuvertailun korjauskertoimissa, eli sensorien typpidioksidipitoisuudet näyttävät enemmän lopussa kuin alussa.  $R^2$  ei ole kovin suuresti muuttunut, eli hajonta referenssiin verrattuna on pysynyt suurin piirtein samana. Mitä lähempänä  $R^2$  arvo on lukua 1, sitä parempia tulokset ovat suhteessa referenssimittauksiin.

	Alkuvertailu			Loppuvertailu		
	PM10			PM10		
Sensori	Kulmakerroin	Vakio	R2	Kulmakerroin	Vakio	R2
L14_1	6,20	-2,59	0,53	4,61	2,94	0,92
L14_2	1,67	1,91	0,69	1,64	-2,06	0,36
L14_3	0,85	1,04	0,86	0,97	-2,53	0,67
L9_1	4,40	-2,72	0,50	-	-	-
L9_2	4,34	7,01	0,66	9,80	-5,37	0,42
L4_1	3,49	-2,22	0,53	2,27	4,68	0,84
L4_2	1,99	1,26	0,59	1,43	6,46	0,73
L4_3	3,43	1,49	0,96	2,31	1,85	0,74
L4_4	3,51	6,80	0,74	6,91	-9,68	0,04
I4_1	5,60	-3,57	0,51	3,55	3,62	0,94
I4_2	5,90	1,40	0,95	7,95	-2,98	0,67
I4_3	1,36	0,72	0,86	2,84	-5,66	0,40
SP4_1	4,24	-2,62	0,51	2,48	0,12	0,86
SP14_1	3,91	-2,37	0,51	-	-	-
SP14_2	4,99	4,45	0,75	9,16	-5,49	0,14

- laite vikaantunut, loppuvertailua ei ole pystytty tekemään

Alla olevasta kuvasta näkee, että ensimmäisissä vertailumittauksissa olleiden sensorien kulmakertoimet olivat loppuvertailuissa pienemmät kuin alkuvertailuissa ja myöhemmin tehdyillä vertailumittauksilla kulmakertoimet olivat loppuvertailuissa suuremmat kuin alkuvertailuissa. Tämä vaikutti tuloksiin siten, että kesän matalilla pitoisuuksilla tehtyjen alkuvertailujen vuoksi sensorit todennäköisesti yliarvioivat pitoisuuksia katupölykaudella suurien pitoisuuksien aikaan.



Sensorien järjestys (numerot x-akselilla) on se missä järjestyksessä vertailuja tehti, eli ei sama kuin korjauskertoimet -taulukkojen sensorien järjestys.

Mitä lähempänä  $R^2$  arvo on lukua 1, sitä parempia tulokset ovat suhteessa referenssimittauksiin. Hengitettävien hiukkasten korjausyhtälöissä  $R^2$  arvo on huonompi kesän ensimmäisissä alkuvertailuissa, jolloin pitoisuudet olivat matalia.

### Sensorien vertailujaksot eri aikoina ja vertailujakson olosuhteet

Sensori	Vertailujakson aloitus	Vertailujakson lopetus	Lopetusvertailun aloitus	Lopetusjakson lopetus	Alku	Loppu	Vertailujakson PM10*
L14_1	20.7.2017	28.8.2018	1.12.2017	4.1.2018	1.9.2017	8.11.2017	matalat pitoisuudet
L14_2	9.10.2017	30.10.2017	5.6.2018	30.6.2018	8.11.2017	4.6.2018	
L14_3	20.4.2018	14.5.2018	9.9.2018	18.10.2018	4.6.2018	31.8.2018	
L9_1	20.7.2017	28.8.2018	21.3.2018	18.4.2018	1.9.2017	25.1.2018	matalat pitoisuudet
L9_2	15.2.2018	20.3.2018	9.9.2018	18.10.2018	20.3.2018	31.8.2018	
L4_1	20.7.2017	28.8.2018	12.12.2017	5.2.2018	1.9.2017	8.11.2017	matalat pitoisuudet
L4_2	9.10.2017	30.10.2017	14.1.2018	5.2.2018	8.11.2017	12.1.2018	
L4_3	11.11.2017	27.11.2017	21.3.2018	18.4.2018	12.1.2018	20.3.2018	
L4_4	22.2.2018	20.3.2018	9.9.2018	18.10.2018	20.3.2018	31.8.2018	
I4_1	20.7.2017	28.8.2018	27.11.2017	11.12.2017	1.9.2017	27.11.2017	matalat pitoisuudet
I4_2	11.11.2017	27.11.2017	18.5.2018	6.6.2018	27.11.2017	17.5.2018	
I4_3	20.4.2018	14.5.2018	9.9.2018	18.10.2018	17.5.2018	31.8.2018	
SP4_1	20.7.2017	28.8.2018	5.5.2018	5.6.2018	1.9.2017	4.5.2018	matalat pitoisuudet
SP14_1	20.7.2017	28.8.2018	21.3.2018	15.4.2018	1.9.2017	20.3.2018	matalat pitoisuudet
SP14_2	22.2.2018	20.3.2018	9.9.2018	18.10.2018	20.3.2018	31.8.2018	

\*jos vertailujakson pitoisuudet matalia, tulee korjausyhtälöön suuri kulmakertoimen arvo; ts. tällainen sensori yliarvioi PM10-pitoisuuksia jos katupölyä paljon ilmassa

vertailujaksojen ajankohdat ja vertailujakson olosuhteet vaikuttavat korjausyhtälöihin ja siten tuloksiin.

### LIITE 3 SENSORIEN VIKAANTUMISET JA VAIHDOT

Sensori	vikaantui	vika	vaihto
L14	13.9.2017	NO rikki	uusi sensori 8.11.2017
		NO2 tulos outo	uusi sensori 4.6.2018
		NO-tulos kelvoton 4.6.-31.8.	
L9	25.1.2018	kaikki paitsi NO	uusi sensori 20.3.2018
L4	18.10.2017	NO2 rikki	uusi sensori 8.11.2017
	7.1.2018	NO rikki	uusi NO 12.1.2018
	1.-8.2.2018	hiukkasmittaus jäässä	
	13.3.2018	NO rikki	uusi sensori 20.3.2018
I4	19.10.2017	NO rikki	uusi sensori 27.11.17
	12.5.2018	NO rikki	uusi sensori 17.5.2018
		NO-tulos kelvoton 31.8.asti	
SP4	Vertailuun 4.5.2018	Vertailussa CO ja NO2 hajonnut	uusi sensori 17.5.2018 (NO valmiiksi rikki)
	Sensori pimeäksi 27.7.2018		
SP14	25.1.2018	NO virh.	
	9.3.2018	PM10 virheellinen	uusi sensori 20.3.18

L9 Ei jälkivertailua saatavilla (pois lukien NO), toiminnassa 1.9.2017 - 25.1.2018

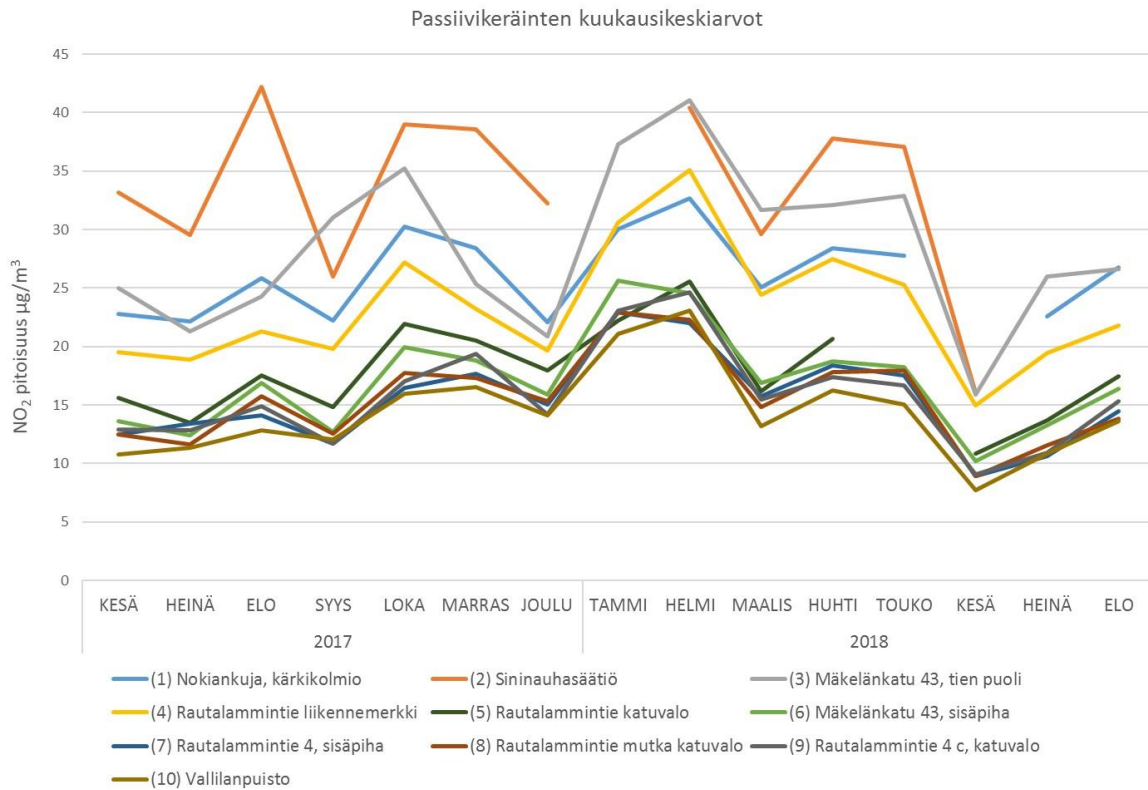
SP14 PM10 jälkivertailua ei saatavilla, PM10 toiminnassa 1.9.2017 - 9.3.2018

4.6.2018 jälkeen ei enää tehty vaihtoja siinäkään tapauksessa, että olisi ollut tarvetta.

## LIITE 4 MITTAUSTULOKSET

### Passiivikeräinten typpidioksidin NO<sub>2</sub> kuukausikeskiarvot

Passiivikeräin	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>2017</b>										
KESÄ	22,8	33,1	25,0	19,5	15,6	13,6	12,5	12,5	12,9	10,8
HEINÄ	22,2	29,6	21,3	18,9	13,5	12,4	13,4	11,6	12,8	11,3
ELO	25,9	42,2	24,3	21,3	17,5	16,9	14,1	15,7	14,9	12,9
SYYS	22,2	26,0	31,0	19,8	14,8	12,7	11,7	12,5	11,7	12,0
LOKA	30,2	39,0	35,2	27,2	21,9	19,9	16,4	17,7	17,0	16,0
MARRAS	28,4	38,5	25,4	23,2	20,5	18,8	17,6	17,3	19,4	16,5
JOULU	22,0	32,2	20,9	19,7	18,0	15,9	15,0	15,3	14,2	14,1
<b>2018</b>										
TAMMI	30,0		37,3	30,6	22,2	25,7	22,9	22,9	23,1	21,1
HELMİ	32,6	40,4	41,1	35,1	25,5	24,6	22,0	22,3	24,6	23,1
MAALIS	25,0	29,6	31,6	24,5	16,2	16,9	15,8	14,8	15,4	13,2
HUHTI	28,4	37,8	32,1	27,5	20,6	18,7	18,4	17,8	17,4	16,2
TOUKO	27,7	37,1	32,9	25,3		18,2	17,5	17,9	16,7	15,0
KESÄ		16,0	15,9	15,0	10,9	10,2	8,9	8,9	9,0	7,7
HEINÄ	22,6		26,0	19,5	13,7	13,3	10,7	11,6	10,9	10,8
ELO	26,7	37,0	26,6	21,8	17,4	16,4	14,5	13,8	15,3	13,6
ka 9/2017-8/2018	27	33	30	24	18	18	16	16	16	15



## Sensorien kuukausikeskiarvot

Huom. länsi- ja itäpuolen tulokset on yhtenäistetty keskenään, eli niissä voi olla eri määrä dataa kuukaudessa.

### Typpidioksidi, NO<sub>2</sub>

kuukausi	L14	L9	L4	I4	SP4	SP14
<b>2017</b>						
syyskuu	19	21	23	29	10	12
lokakuu	26	28	31	29	14	16
marraskuu				29	19	20
joulukuu				27	19	19
<b>2018</b>						
tammikuu				40	26	26
helmikuu				58	34	36
maaliskuu				47	34	36
huhtikuu		37	38	43	26	26
toukokuu		37	43			
kesäkuu	29	30	38			
heinäkuu	29	32	35			
elokuu	38	39	44			

### Hengitettävät hiukkaset, PM<sub>10</sub>

kuukausi	L14	L9	L4	I4	SP4	SP14
<b>2017</b>						
syyskuu	7,1	8,5	9,5	10,2	6,7	5,8
lokakuu	4,7	6,3	6,8	8,0	4,3	3,5
marraskuu	19,1	21,7	22,6	13,2	5,9	4,7
joulukuu	8,5	9,0	11,7	9,1	3,2	2,4
<b>2018</b>						
tammikuu	9,1	11,0	11,9	16,1	7,7	6,2
helmikuu	15,4		23,3	36,2	7,8	7,1
maaliskuu	18,2	25,7	26,4	64,3	15,3	
huhtikuu	30,7	38,8	46,7	30,9	26,4	
toukokuu		31,2	41,7	27,5	18,5	
kesäkuu	20,5	25,3	35,2	14,4	9,9	
heinäkuu	14,6	18,7	24,7	15,9	8,8	
elokuu	18,0	21,2	30,0	23,0		



Tässä kuvassa kaikilla sensoreilla on samanpituiset mittausjaksot, joten ne ovat keskenään vertailtavissa. Mittausajankohdaksi valittiin syyskuu, koska silloin on kaikilta sensoreilta dataa olemassa. Silloin ei kuitenkaan ollut paljon katupölyä, joten se vaikuttaa hengittävien hiukkasten tuloksiin.

Typidioksidipitoisuudet kulkeutuvat katukuilusta rakennusten yli sisäpihalle, jolloin ylhäällä on suuremmat pitoisuudet kuin katutasolla. Hengittävien hiukkasten osalta sisäpihalla katutasolla on enemmän pitoisuuksia kuin ylempänä kattokorkeudella.