

HELSINKI METROPOLITAN AIR QUALITY TESTBED -HANKKEEN SENSORIAINEISTON LOPULLISTEN TULOSTEN KOOSTAMINEN

Tiivistelmä

Tekijä(t) Tojkander, Sakari	Julkaisun laji Opinnäytetyö, AMK Sivumäärä 22	Valmistumisaika Syksy 2019
Työn nimi Helsinki metropolitan Air Quality Testbed -hankkeen sensoriaineiston lopullisten tulosten koostaminen		
Tutkinto Insinööri (AMK), Energia- ja ympäristötekniikka		
Tiivistelmä <p>Opinnäytetyön tarkoituksena oli Helsinki metropolitan Air Quality Testbed (HAQT) -hankkeen sensoriaineiston analysoiminen ja lopullisten tulosten koostaminen. Työn tilaajana toimi Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä (HSY).</p> <p>Tulokset koostettiin Vaisalan AQT420-sensoreiden vuosimallin 2017 tuloksista. Vertailutulokset saatiin HSY:n mittausasemien tunnettujen laitteiden tuloksista. Aineiston käsittelyssä poistettiin hankkeen aikana raportoidut sääolosuhteiden aiheuttamat mittausvirheet.</p> <p>Lopputuloksena aineiston käytettävyys suuntaa antavien mittausten vertailuun parane. Tehtävänannon mukaisesti tulosten tarkastelussa käytiin läpi aineiston kattavuus ilmanlaadun tavoitteisiin vertailua varten. Työssä tuotiin esille aineiston muokkaamisen perusteena olevat mittausvirheet. Työssä ei tehty mittaustulosten tarkempaa analysointia.</p>		
Asiasanat ilmanlaatu, keskihintainen sensori, täydentävä mittaus		

Abstract

Author(s) Tojkander, Sakari	Type of publication Bachelor's thesis	Published Autumn 2019
	Number of pages 22	
Title of publication Analyzing of the sensor material of the Helsinki metropolitan Air Quality Testbed project and combining of the final results		
Name of Degree Bachelor of Energy and Environmental Technology		
Abstract <p>The purpose of this thesis was to analyze the sensor material of the Helsinki metropolitan Air Quality Testbed (HAQT) project and to compile the final results. The project was commissioned by the Helsinki Region Environmental Services Authority.</p> <p>The measurement results to be processed were obtained from the Vaisala AQT420 (model 2017) sensor. The comparison results were obtained from the known devices of the air quality measuring stations.</p> <p>The measuring errors that were reported and which are typical of the medium-price sensors caused by the condition dependence were removed. Reasons behind false data were indicated and the main principles of data removals were explained. The work does not include any exact analysis of measurement results.</p>		
Keywords air quality, medium-price sensor, supporting measurement		

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	HELSINKI METROPOLITAN AIR QUALITY TESTBED	2
3	ILMAN PÄÄSTÖLÄHTEET JA MITTAUKSET	5
3.1	Epäpuhtaudet ja päästölähteet	5
3.2	Jatkuvatoimiset mittalaitteet.....	6
3.3	AQT420-sensori	9
4	MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY	11
4.1	Hankkeen aikainen mittaustulosten käsittely.....	11
4.2	Ryhmittely.....	11
4.3	Virheellisten mittaustulosten poistaminen	12
5	TULOKSET.....	15
5.1	Komponenttikohtainen tulosten kattavuus.....	15
5.2	NO ₂ -komponentti ja passiivikeräimet	17
6	YHTEENVETO	19
	LÄHTEET	20

1 JOHDANTO

Tässä työssä koostettiin Vaisalan AQT420-sensoreiden vuosimallin 2017 tuloksia. Työn tilaajana toimi Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä. Työssä esitellään HAQT-hanke (Helsinki metropolitan Air Quality Testbed) ja sen tavoitteet. Hankkeessa käytetystä laitteistosta käydään läpi toimintaperiaatteet. Mittaustulosten käsittelyssä esitellään aineiston muokkaukseen käytetyt perusteet. Tuloksissa esitellään toimeksiannon mukaisesti mittaustulosten kattavuus sekä sensoritulosten vertailu passiivikeräinten tuloksiin.

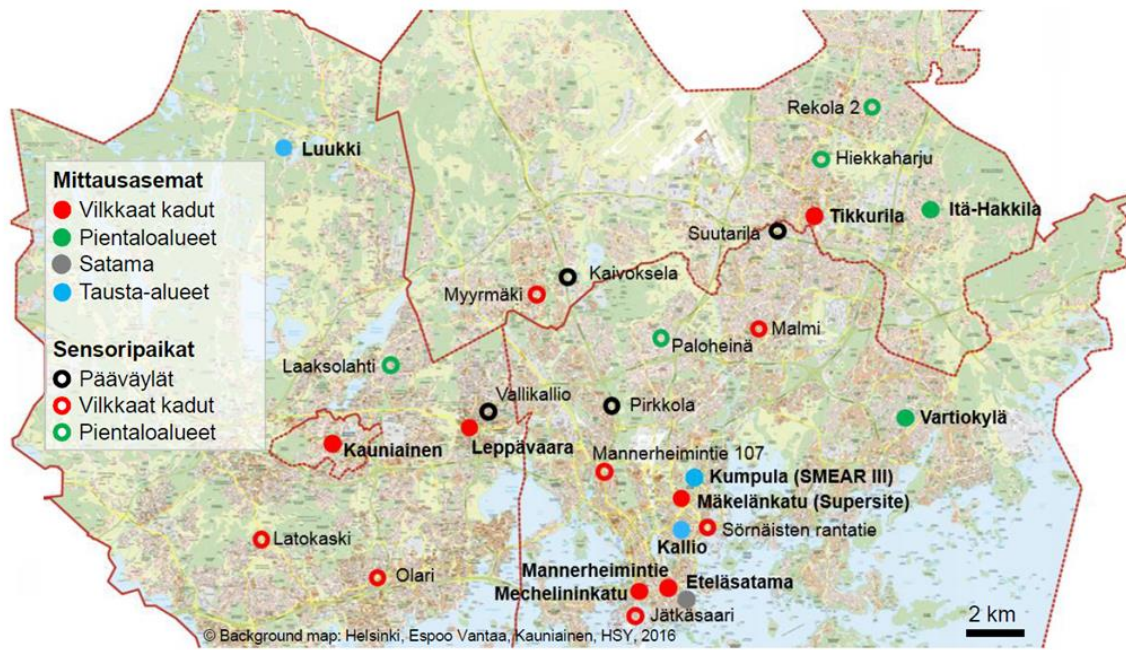
Ilmansaasteet ovat ihmisen aiheuttaman toiminnan seurauksena kasvaneet merkittäväksi terveyttä uhkaavaksi tekijäksi. Ilman epäpuhtaudet vaikuttavat elinympäristöön haitallisesti. Viimeisimmän WHO:n (2016) arvion mukaan sisä- ja ulkoilman saasteet yhdessä aiheuttivat enneaikaisia kuolemia seitsemän miljoonaa maailmanlaajuisesti. Euroopassa vuonna 2000 arvioitiin ilmansaasteiden vaikutuksesta tapahtuneen enneaikaisia kuolemantapauksia 350000. Suomessa ilmansaasteiden arvioitu kuolemantapausten määrä oli noin 1600 vuonna 2013. (Savolahti ym.2018, 10.) Viimeisin EU:n päästökattodirektiivi (EU2016/2284) tähtää päästöjen ja ilmanlaadun aiheuttamien haittojen vähentämiseen 2030 mennessä (Ympäristöministeriö 2019, 9).

Ympäristöministeriön asettaman työryhmän laatima kansallinen ilmasuojeluohjelma julkaistiin 2019. Ilmanlaadun seuranta tekevät kunnat ja Ilmatieteenlaitos (Ympäristöministeriö 2019, 14 - 15). Ilmanlaadun tavoitteet tulevat suurelta osin EU-lainsäädännöstä. Ilmanlaadulle asetetut EU-vaatimukset on pantu täytäntöön Suomessa ympäristösuojelulla ja -asetuksilla. Asetukset sisältävät ilmanlaadulle tavoite- ja raja-arvot. Näiden lisäksi on WHO:n määrittelemät suositusarvot, jotka ovat laissa säädettyjä arvoja matalampia pitoisuuksia. WHO:n ohjearvot perustuvat lääketieteelliseen näyttöön terveyteen vaikuttavista ilman epäpuhtauksista. (Ympäristöministeriö 2019, 20 - 22.)

2 HELSINKI METROPOLITAN AIR QUALITY TESTBED

HAQT-hankkeen sensoriverkko perustettiin syksyllä 2017. Hankkeen päätösseminaari pidettiin elokuussa 2019. Hankkeen toteuttajina toimivat Ilmatieteen laitos, Helsingin yliopisto, Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä HSY, Vaisala Oyj, Pegasor Oy. Hanke sai valtion AIKO-rahoitusta Uudenmaanliiton myöntämänä. Lisäksi hankkeen toteuttajat rahoittivat hanketta omalta osaltaan hankkeen kuluessa. Hanketta koordinoi pääkaupunkiseudun Smart & Clean -säätiö. Tavoitteena oli hankkia tietoa keskihintaisten sensoreiden soveltuvuudesta ilmanlaadun seurantaan. Lisäksi tavoitteena oli selvittää sensoreiden tuottama lisäarvo ilmanlaadun seurannassa sekä selvittää sensoreiden tuottaman mittausaineiston käytettävyys ilmanlaadun mallinnusohjelmassa. (Nousiainen ym. 2019, 3 - 4.) Hankkeessa valittiin sensoreiden sijoituspaikkoja 15. Hankkeessa sijoitettiin AQT420-sensoreiden lisäksi Pegasor AQtm Urban -sensoreita. Pegasor-sensoreiden tulokset eivät ole mukana tässä opinnäytetyössä. Hankkeen tavoitteena oli, että sensoreilla havaittaisiin erilaisia paikallisia päästölähteitä. Yleisimpiä ilmanlaadua heikentäviä tekijöitä ovat liikenteen aiheuttamat päästöt, puunpolton pienhiukkaspäästöt sekä katupöly katupölykaudella. (Johansson ym. 2019, 1.)

Sensoreiden tuottamat tulokset täydensivät pääkaupunkiseudun ilmanlaadun mittausasemien tuloksia. Mittausverkostoon kuuluu Helsingin lisäksi Espoo, Vantaa ja Kauniainen. Sensoreiden sijoittelussa otettiin huomioon niin paikalliset päästölähteet kuin alueellinen kattavuuskin. Sensoripaikkojen valinnassa otettiin huomioon kiinteiden ilmanlaatumittausasemien sijainti. Matalien pitoisuuksien tausta-alueille ei sijoitettu sensoreita. Sijoittelussa pyrittiin täydentämään nykyistä ilmalaatuasemien verkostoa. Sensorin etuna perinteiseen mittausasemaan nähden on pienen koon mahdollistama vapaampi sijoittelu. Sijoittelussa hyödynnettiin HSY:n pitkäaikaista kokemusta alueellisista olosuhteista. (Johansson ym. 2019, 1 - 2.) Kuvassa 1 on esitetty HAQT-hankkeen aikaiset sensoreiden sijoituspaikat sekä ilmanlaadun mittausasemat. Sensorit ja mittausasemat on ryhmitelty aluetyypin mukaisesti. Taulukossa 1 näkyy sensoreiden sijainti, lyhenne, aluetyyppi, liikennemäärä, raskaanliikenteen osuus ja etäisyys tiestä.



Kuva 1. Ilmanlaadunmittausasemat sekä sensoreiden sijoituspaikat vuonna 2018 (Niemi 2018)

Taulukko 1. Sensoreiden sijainti, lyhenne, aluetyyppi, liikennemäärä, raskaan liikenteen osuus ja etäisyys tiestä (Niemi 2019)

Nimi	Lyhenne	Kaupunki	Alue tyyppi/luokitus	Etäisyys tienreunaan (m)	Liikenne määrä (ajoneuvoa/arkivuorokausi)	Raskasliikenne (%)	AQT420
Sensori:							
Sörnäisten rantatie	sSÖR	Hki	Vilkasliikenteinen katu	7	44 500	4	x
Mannerheimintie 107	sM107	Hki	Vilkasliikenteinen katu	10	30 700	10	x
Jätkäsaari	sJÄT	Hki	Vilkasliikenteinen katu	6	7 600	11	x
Malmi	sMAL	Hki	Vilkasliikenteinen katu	11	7 700	13	x
Olari	sOLA	Esp	Vilkasliikenteinen katu	11	19 800	5	x
Latokaski	sLAT	Esp	Vilkasliikenteinen katu	12	18 000	11	x
Myyrämäki	sMYY	Van	Vilkasliikenteinen katu	2	15 000	11	x
Firkkola (VT 3)	sPIR	Hki	Pääväylä	5	50 200	8	x
Suutarila (Kehä III)	sSUU	Hki	Pääväylä	6	63 900	7	x
Vallikallio (Kehä I)	sVAL	Esp	Pääväylä	2	81 800	5	x
Kaivoksela (VT 3)	sKAI	Van	Pääväylä	4	61 100	7	x
Paloheinä	sPAL	Hki	Pientaloalue	40	1 300	17	x
Laaksoлахти	sLAA	Esp	Pientaloalue	5	<200		x
Hiekkaharju	sHIE	Van	Pientaloalue	20	<200		x
Rekola 2	sREK2	Van	Pientaloalue	5	<200		x
Ilmalaadun mittausasema:							
Mäkelänkatu supersite	MÄK	Hki	Katukuilu	1	28 100	11	(x)
Kumpula SMEAR III	KUM	Hki	Kaupunki tausta	150	43 000	13	
Kallio	KAL	Hki	Kaupunki tausta	65	6 300	4	
Luukki	LUU	Esp	Alueellinen tausta	800	6 500	4	
Itä-Hakkila	I-HAK	Van	Pientaloalue	6	2 700	6	x
Vartiokylä	VAR	Hki	Pientaloalue	60	2 400	9	
Mannerheimintie	MAN	Hki	Vilkasliikenteinen katu	3	15 900	5	
Mechelininkatu	MEC	Hki	Vilkasliikenteinen katu	5	35 500	4	
Leppävaara	LEP	Esp	Vilkasliikenteinen katu	14	29 300	4	
Kauniainen	KAU	Kau	Vilkasliikenteinen katu	8	14 400	4	
Tikkurila	TIK	Van	Vilkasliikenteinen katu	10	9 500	5	
Eteläsatama	E-SAT	Hki	Satama	38	10 200	7	

3 ILMAN PÄÄSTÖLÄHTEET JA MITTAUKSET

3.1 Epäpuhtaudet ja päästölähteet

Merkittävimmät päästölähteet Suomessa ilmansuojelun kannalta ovat pienpuunpoltto, liikenteen aiheuttamat pakokaasupäästöt sekä katupöly (Ympäristöministeriö 2019, 11). Ympäristölaki (YSL527/2014) velvoittaa toiminnan harjoittajan olemaan selvillä aiheuttamistaan ympäristövaikutuksista. Lisäksi kuntien on huolehdittava alueellaan tarpeellisesta seurannasta ja näin turvata lain edellyttämä hyvä ilmanlaatu alueellaan. Ympäristönsuojelulaissa 527/2014 sekä asetuksissa 79/2017 ja 113/2017 on säädetty toimista ilmanlaadun turvaamiseksi. Vuonna 2017 ilmanlaatua koskevia asetuksia muokattiin vastaamaan Euroopan komission direktiiviä 2015/1480/EU7. (Ympäristöministeriö 2013.)

Raja-arvolla tarkoitetaan korkeinta sallittua ilman epäpuhtauden pitoisuutta. Raja-arvot on terveyden suojelemiseksi määritetty rikkidioksidille SO₂, typpidioksidille NO₂, hengitettävillä hiukkasilla (PM₁₀), pienhiukkasilla (PM_{2,5}), lyijylle (Pb), hiilimonoksidille (CO) ja bentseenille (C₆H₆). Terveyshaittojen ehkäisyyn sovelletaan myös tavoitearvoa. Tavoitearvo alueilla missä tavoitearvo on vaarassa ylittyä tai ylittyy, on ryhdyttävä toimenpiteisiin. Tavoitearvot on määritelty arseenille (As), kadmiumille (Cd), Nikkelille (Ni) ja bentso(a)pyreenille (C₁₂H₂₀) ja otsonille (O₃). Ohjearvot on tarkoitettu ilmaa pilaavien toimintojen sijoittelun suunnittelun tueksi ehkäisemään terveyshaittoja. Tavoitteena on ehkäistä ilmanlaatua heikentävän toiminnan ohjearvojen ylitys. Ohjearvot on annettu hiilimonoksidille, typpidioksidille, rikkidioksidille, kokonaisleijumalle TSP, hengitettävillä hiukkasilla ja haiseville rikkijyhdisteille (TRS). (Ympäristöministeriö 2013.)

Ilman epäpuhtaudet määräytyvät päästölähteen mukaan (Komppula ym. 2017). PM₁₀ tarkoittaa hengitettäviä hiukkasia, jotka ovat läpimitaltaan alle 10 µm. Pienhiukkaset (PM_{2,5}) ovat alle 2,5 µm halkaisijaltaan olevia hiukkasia. Näitä syntyy polttoprosesseissa sekä mekaanisen kulumisen seurauksena. (Ympäristöministeriö 2019, 41.) Karkeat hengitettävät hiukkaset ovat kooltaan <10 µm ja >2,5 µm. Kaupunkialueella merkittävimmät pienhiukkasten lähteet ovat liikenteen pakokaasut, katupöly ja puunpoltto. Katupölyn osuus Suomen hengitettävien hiukkasten päästöistä on noin kolmannes. Katupölystä alle PM₁₀ ko-koisia hiukkasia on noin 10 %. Tästä karkeiden hiukkasten osuus on noin 90 %. (Ympäristöministeriö 2019, 49.) Kaasumaisista aineista ilman epäpuhtaudet muodostuvat NO₂:n osalta pääosin liikenteen ja erityisesti raskaan liikenteen sekä energiantuotannon päästöistä. SO₂-päästöt liittyvät rikkipitoisten öljytuotteiden käsittelyyn ja käyttöön. Merkittävimmät päästölähteet ovat laivat, energiantuotanto ja öljynjalostus. O₃ muodostuu ilmassa valokemiallisten reaktioiden seurauksena otsonia muodostavien yhdisteiden vaikutuksesta.

PAH-yhdisteitä syntyy palamisprosessin seurauksena. Merkittävimmät päästölähteet ovat puunpoltto, liikenne sekä rauta- ja terästeollisuus. Raskasmetallien arseeni, kadmium, nikkeli ja lyijy merkittävimmät päästölähteet ovat metalliteollisuus, kaivokset ja jätteenpoltto. Haihtuvia orgaanisia yhdisteitä (VOC) on mm. liikenteen, puun pienpolton ja energiantuotannon päästöissä. Hiilimonoksidin pääasialliset lähteet ovat liikenne ja puunpoltto. (Komppula ym. 2017, 21 - 22.) Sekundäärisiä pienhiukkasia muodostuu myös ilmakehässä epäorgaanisten ja orgaanisten kaasumaisten aineiden muodostaessa yhdisteitä tiivistymällä. Suomessa PM_{2,5} pitoisuudesta noin 80 % tulee kaukokulkeutuma. (Ympäristöministeriö 2019, 42.)

3.2 Jatkuvat toimiset mittalaitteet

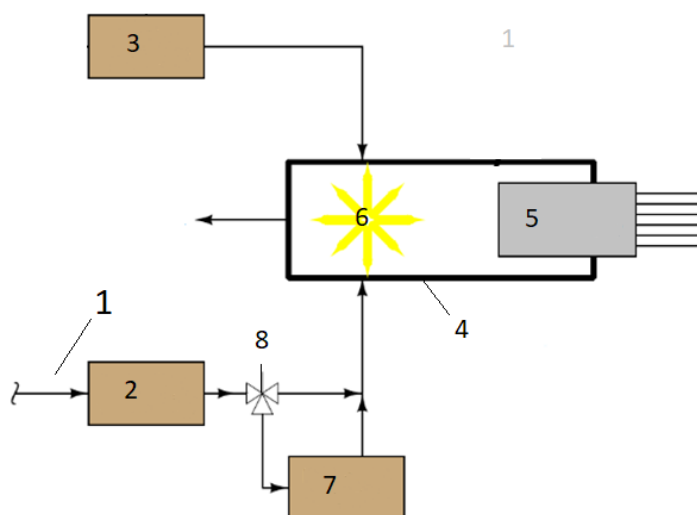
HSY:n mittausasemilla käytettiin vuonna 2018 kaasumaisten aineiden mittaukseen seuraavia laitteita. Rikkidioksidin (SO₂) mittaukseen Horiba APSA-370 -laitteita (UV-fluoresenssi). Typen oksidien (NO ja NO_x) mittaukseen käytettiin Horiba APNA 370 -laitteita (kemiluminesenssi). Otsonin (O₃) mittaukseen käytettiin Thermofisher Electron Model 49i tai Horiba APOA-370 -laitteita. Laitteiden toimintaperiaatteena on UV-absorptio. Hengitettävien (PM₁₀) ja pienhiukkasten (PM_{2,5}) mittaamiseen käytettiin FH 62 I-R (β-säteilyn absorptio) -laitteita, TEOM 1405 (värähtelevä mikrovaaka) -laitteita ja Grimm 180 (optinen menetelmä) -laitteita. (HSY 2018, 66.) Sensoritulosten vertailuun mittaustulokset NO₂:n saatiin Horiba APNA -laitteilla. CO:n vertailutulokset saatiin Horiba APMA-370 -laitteella. PM₁₀-tulokset saatiin TEOM 1405 -laitteilla. (Ohtonen, Loukkola & Aarnio 2019, 66.) Jatkuvat toiminen ilmanlaadun mittauslaitteisto tarvitsee luotettavasti toimiakseen ympärivuotisesti tasalämpöisen tilan. Tämän vaatimuksen täyttämiseen tarvitaan eristetty ilmastoitu tila, jonka kokovaatimukset määräytyvät laitteiston koon ja huollettavuuden tarvitseman tilan mukaan. Myös laitteiston tarvitseman sähkön saatavuus vaikuttaa usein ilmanlaatuaseman sijoitukseen. Seuraavassa käydään HAQT-hankkeen aikana NO₂, PM₁₀ ja CO vertailutuloksia tuottaneiden laitteiden toimintaperiaatteet.

Kuvassa 2 on Horiba APNA 370 -laitteen toimintaperiaate, joka perustuu kemiluminesenssiin. Kemiluminesenssi perustuu typpimonoksidin ja otsonin reaktioon (kaava 1). Reaktiossa virittynyt NO₂-molekyylillä vapauttaa havaittavaa säteilyä 600 - 3000nm aallonpituudella palautuessaan vakaaseen tilaan (kaava 2). Mitattavasta ilmasta mitataan ensin NO-pitoisuus. Laitteessa jatkuvana virtana kulkeva mitattava näyteilmalla (1) kulkee kuivaimen (2) läpi edelleen mittausosaan (4). Samalla otsonaattori (3) tuottaa jatkuvana virtana otsonia mittausosaan. Mittausosassa mitataan valoherkällä anturilla (5) kemiluminesenssi-reaktiossa (6) vapautuva valo. Mittauksen toisessa vaiheessa näyteilmalla käännetään kuivaimen jälkeen pelkistimelle (7) venttiilillä (8). Pelkistimessä NO₂-molekyylit muunnetaan

noin 400 °C:ssa NO-molekyyleiksi. Tässä vaiheessa pelkistetty näyteilma, joka sisältää pelkästään NO-molekyylejä mitataan. Tuloksena saadaan NOx pitoisuus. Tämä sisältää NO- ja NO₂-molekyyleistä saadun tuloksen. Tästä vähennetään pelkistämättömästä näyteilmasta saatu tulos. Näin saadaan näyteilman NO₂-pitoisuus. (Air Pollution Monitor AP-370 Series. 2019, 4.)

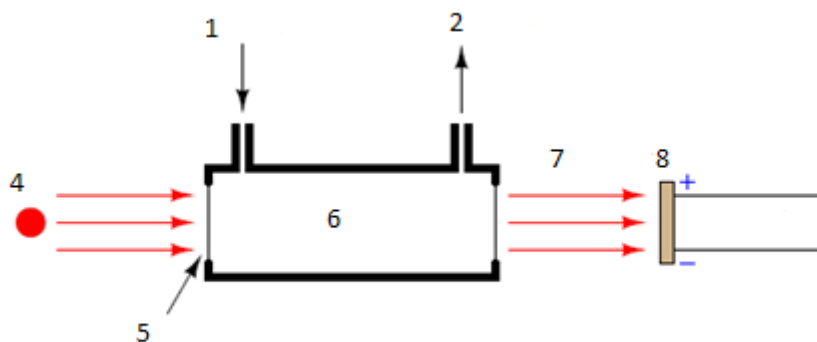
Kaava 1. $\text{NO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NO}_2^* + \text{O}_2$

Kaava 2. $\text{NO}_2^* \rightarrow \text{NO}_2 + \text{hv}$



Kuva 2. Kemiluminesenssiin perustuvan laitteen toimintaperiaate (Chemiluminescence. 2019)

Horiba APMA370 -laitteen mittausperiaate Non-dispersive infrared light (NDIR) perustuu CO₂-molekyylin ominaisuuteen absorboida IR-valoa. Kuvassa 3 on kuvattu NDIR-laitteen toimintaperiaate. Valonlähteenä toimii IR-lamppu (4). Mitattava kaasu tuodaan näyteti- laan kohdasta (1). IR-valosta osa absorboituu kaasuun (6). Mitattava kaasu poistuu koh- dasta (2). Tämän jälkeen vaimentunut IR-valo (7) jatkaa matkaansa havaitisijalle (8). Lait- teessa ensin mitataan käsittelemättömän näyteilman CO₂ pitoisuus. Tämän jälkeen mitat- tavan ilman sisältämä CO-molekyylit hapetetaan katalyytin vaikutuksesta CO₂-molekyy- leiksi. Käsitelty näyteilma mitataan. Käsittelemättömän ja käsitellyn näyteilman mittaustu- losten erona saadaan selville hiilimonoksidin pitoisuus näyteilmassa. (Air Pollution Monitor AP-370 Series. 2019, 2.)

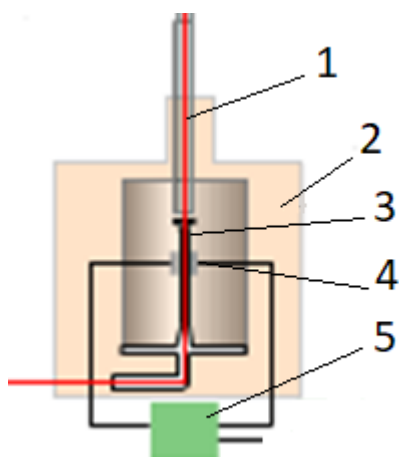


Kuva 3. NDIR-laitteen toimintaperiaate (Gas analyzer spectroscopy - Working Principle and Types 2019)

Kuvassa 5 on TEOM 1405 -laitteen värähtelevän mikrovaaran mittausperiaate, joka perustuu värähtelytaajuuden muutokseen siihen kertyneen hiukkasten massan seurauksena. Haluttu kokojakauma PM_{10} erotetaan hiukkasten aerodynaamisten ominaisuuksien mukaan näytteenottimella, joka on kuvassa 4. Näytteenottimen hiukkasten erottelukyky perustuu pyörteisen ilman keskipakovoimaan. PM_{10} näytteenottimen jälkeen vaaralle kertyneiden hiukkasten massan ja ilman lämpötilan sekä virranneen ilman määrä tunnetaan. Näin ollen voidaan laskea hiukkasten massa tilavuuden suhteen. Kuvassa 5 on havainnollistettu TEOM 1405 -laitteen toimintaperiaate. Näyteilmavirta (1) ohjataan värähtelevän suodatinelementin lävitse. Tämä sijaitsee lämmitetyn elementin (2) sisällä. Mittausanturit (4) mittaavat elementin värähtelytaajuuden. Signaalinvahvistin (5) välittää vahvistetun värähtelysignaalin laitteistossa eteenpäin. (TEOM® 1405 Dichotomous Ambient Particulate Monitor 2007. 1-6.)



Kuva 4. TEOM 1405 -laitteen näytteenotin (Komppula ym 2017, 31)



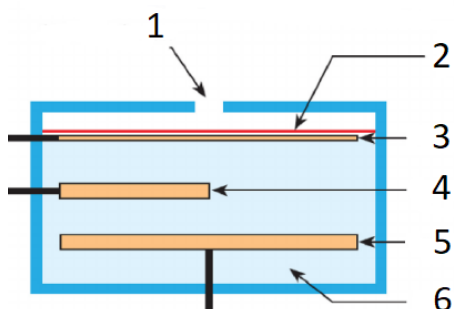
Kuva 5. Havainnekuva TEOM 1405 -laitteen toimintaperiaatteesta. (Tapered element oscillating microbalance 2019)

3.3 AQT420-sensori

Sensorin merkittävin etu perinteisiin ilmanlaadun mittausasemiin verrattuna on sen pienempi koko ja sen mahdollistama parempi sijoitettavuus. Sensorit ovat käyttökelpoisia suuntaa antavissa mittauksissa, kuten päästölähteiden kartoituksessa ja altistuskartoituksessa. (Komppula ym. 2017, 38 - 39.) Helsingin seudun ilmanlaadun tilaa voi seurata ilmanlaatuindeksistä. Tähän indeksiin on valittu merkittävimmät ilmanlaatuun vaikuttavat saasteet: NO_2 , CO , O_3 , SO_2 , PM_{10} ja $\text{PM}_{2.5}$. (Ilmanlaatuindeksi 2016.) Vaisalan AQT420 (vm 2017) -sensori mittasi hankkeen aikana kaikkia ilmanlaatuindeksiin sisältyvien kaasumaisten aineiden ja hiukkasten pitoisuuksia. Vaisala AQT420 vuosimalli 2017 yhdistää sähkökemiallisen kaasujen mittauksen ja optisen hiukkaslaskennan. Sähkökemiallisilla kenoilla havaitaan kaasumaiset komponentit NO_2 , SO_2 , CO ja O_3 . Optinen laskenta hyödyntää laser-kappalemäärälaskentaa, joka perustuu hiukkasten aiheuttamaan laservalon sirontaan. (Petäjä ym. 2019.)

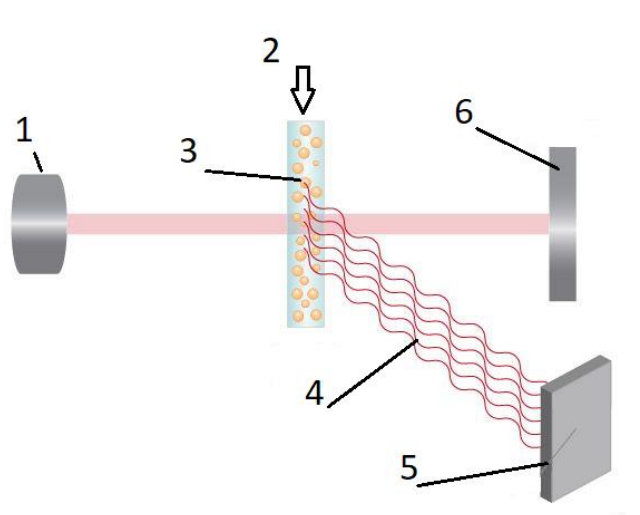
Sähkökemiallisen kennon kaaviokuva on nähtävillä kuvassa 6. Tunnistettava kaasu läpäisee pölyltä suojaavan kalvon (1). Tämän jälkeen ilma ja tunnistettava kaasu läpäisevät vettähyllivän kalvon (2), minkä tehtävänä on pitää elektrolyytti komponentin sisällä. Kohdassa (3) mittaava elektrodi havaitsee heikon sähkövirran kalvon (2) ja mittaavan elektrodin välissä tapahtuvassa ohuessa elektrolyyttikerroksessa (6). Tämä sähkövirta on seurausta hapetus-pelkistysreaktiosta mitattavan kaasun ja elektrolyytin välillä. Reaktion seurauksena negatiivisesti varautunut elektroni kulkee mittaavalle elektrodille tuottaen mitattavan sähkövirran. Komponentin nollatason määrittämiseen käytetään kaasun kanssa reagoimatonta elektrodia (4) ja (5). Elektrodin (4) ja (5) välissä kulkee jatkuva heikko sähkövirta. Elektrolyytti (6) valitaan halutun mitattavan kaasun mukaan. Myös ennen

elektrolyyttiä olevien suodattimien ja kalvojen ominaisuuksia säädetään haluttujen yhdisteiden rajaamiseksi elektrolyytin kanssa tapahtuvasta reaktiosta. (Thompson 2016.)



Kuva 6. Sähkökemiallisen kennon kaaviokuva (Thompson 2016)

Laserkappalemäärän laskenta perustuu valon sirontaan. Säteen osuessa hiukkaseen syntyy valon sirontaa, joka mitataan valoa havaitsevalla anturilla. Hiukkasten kappalemäärän ja massan välinen suhde todennetaan tunnetun hiukkasten massaa mittaavan mittalaitteen avulla. Kuvassa 7 on havainnollistettu laservalon sirontaan perustuvan hiukkaslaskurin perustoimintaperiaate. Laser-valonlähde (1). Tunnettu ilmavirtauksen tilavuus ajan suhteen (2). Mitattavat hiukkaset (3). Hiukkasen pinnasta heijastunut suuntaa muuttanut valo (4). Heijastuneen valon havaitseva anturi (5). Hiukkaseen osumaton valo jatkaa matkaa valoloukkuun (6), joka mittaa jäljelle jääneen valon voimakkuuden. (Dynamic Light Scattering 2019.)



Kuva 7. Hiukkasen aiheuttamaan laservalon sirontaan perustuvan optisen kappalemäärälaskimen toimintaperiaatteen havainnekuva (Dynamic Light Scattering 2019)

4 MITTAUSTULOSTEN KÄSITTELY

4.1 Hankkeen aikainen mittaustulosten käsittely

Hankkeessa suoritettiin laboratoriomittaukset sensorimallien suorituskyvyn osoittamiseksi. Testeissä tehtiin kaasumaisten aineiden NO₂, CO₂, SO₂ ja O₃ havaitsemiseen tarkoitettujen komponenttien testaukset lämpötilan ja kosteuden osalta. Hiukkasten komponentin osalta tehtiin havaitsemis- ja ylärajan määrittäminen. (Petäjä ym. 2019, 3 - 4.) Kaikki hankkeen Vaisala AQT420 (vm 2017) sensoreille tehtiin vertailumittaukset Mäkelänkadun supermittausasemalla. Sensoreilla suoritettiin noin kuukauden kestävä mittausjakso. Tämän jakson perusteella jokaiselle sensorille ja sen mittauskomponenteille määriteltiin korjauskerroin pois lukien SO₂-komponentti. Kaasuille ja hiukkasille määriteltiin jokaiselle sensoriryhmälle omat korjausyhtälöt. (Petäjä ym. 2019, 37.)

Hankkeen aikana HSY toimi sensoriverkon asentavana sekä ylläpitävänä organisaationa. Sensoriverkko asennettiin syksyn 2017 aikana. Tähän tutkimukseen valittiin kalenterivuodenmittainen aineisto alkaen 1.1.2018 ja päättyen 31.12.2018. Mittausjakson aikana tehtiin mittaustulosten käsittelyä. AQT420-sensorin tuottaman kaasumaisten aineiden pitoisuudet (ppm) muunnettiin yksikköön (µg/m³), jotta tuloksia voitaisiin verrata ilmanlaadun tavoitteisiin. Saadut mittaustulokset korjattiin Mäkelänkadun vertailujakson aikana tehdyillä korjausyhtälöillä. Minuuttikeskiarvoista laskettiin tuntikeskiarvot. Mikäli mittaustulokset ylittivät 75% rajan vuorokaudelle, laskettiin pitoisuuksien vuorokausikeskiarvo. Sähkökatkoista ja selkeistä laitteiden vikaantumisista johtuvat mittaustulokset poistettiin.

4.2 Ryhmittely

Tämän työn tarkoituksena oli jatkaa mittaussinöörin hankkeen aikana tekemää mittaustulosten validointia. Työssä hyödynnettiin mittaustiimin asiantuntijoita sekä hankkeen aikaisempia mittaus- ja tutkimustuloksia. Mittaustuloksista tehtiin aineiston tarkastelu PM₁₀, NO₂ ja CO mittaustuloksien osalta. Mittaustuloksia PM_{2,5:n}, O_{3:n} ja SO_{2:n} osalta ei käsitelty.

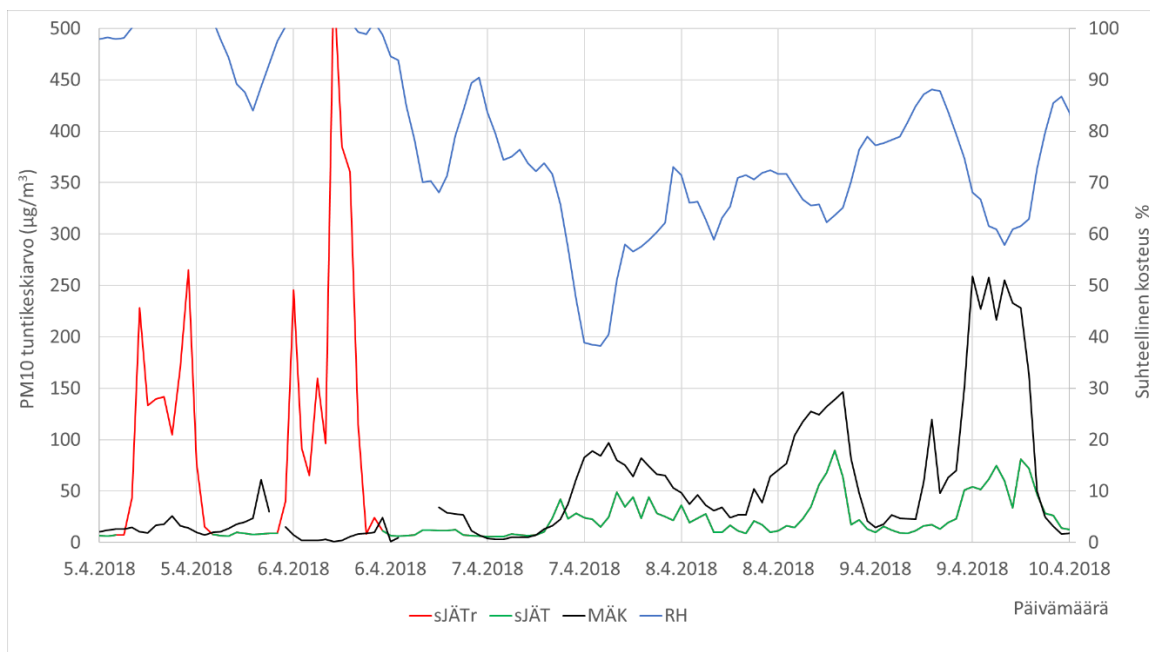
Sensoreiden tuottamia mittaustuloksia vertailtiin noudattamalla aluetyyppien mukaista ryhmittelyä. Mittaustulosten vertailuun valittiin kullekin alueelle sopiva mittausasema. Näistä seurattiin mittaustulosten mahdollisia poikkeavuuksia. Vertailuasemaksi korkean NO₂, PM₁₀ ja CO-pitoisuuden osalta valittiin Mäkelänkatu. Alueellisen taustan NO₂ vertailuasemaksi valittiin Luukki. Tapauskohtaisesti valittiin aluetyyppiä parhaiten vastaava mittausasema. Mittausasemien tulosten lisäksi tuloksia verrattiin saman aluetyypin muihin sensorituloksiin. Näin pystyttiin määrittelemään alueelle tyypillinen sensorin mittaustulos.

Taulukossa 1 kuvattujen vilkasliikenteisten- ja pääväylien sensoreiden tulosten vertailuun valitut ilmanlaadun mittausasemat olivat MÄK, KAL, LEP, TIK, LUU. Pientaloalueiden vertailuun valittiin MÄK, KAL, I-HAK, VAR, LUU. Vilkasliikenteisten katujen osalta tulosten vertailuun soveltui parhaiten Mäkelänkadun mittausaseman tulokset. Pääväylien tulosten vertailuun ei vuonna 2018 ollut saatavilla mittausaseman tuottamia tuloksia, jotka olisivat edustaneet ryhmittelyn mukaista saastepitoisuutta. Pientaloalueen osalta verrattava mittausasema NO₂ mittaustuloksille saatiin Itä-Hakkilan mittausasemalta. PM₁₀ tulosten osalta Itä-Hakkilassa ei ollut mittausta vuonna 2018, joten pientaloalueelle tyypillinen vuorokausivaihtelu saatiin Vartiokylän (VAR) mittausasemalta. Kaikkien CO pitoisuuksien vertailuun käytettiin Mäkelänkadun (MÄK) mittausaseman tuloksia.

4.3 Virheellisten mittaustulosten poistaminen

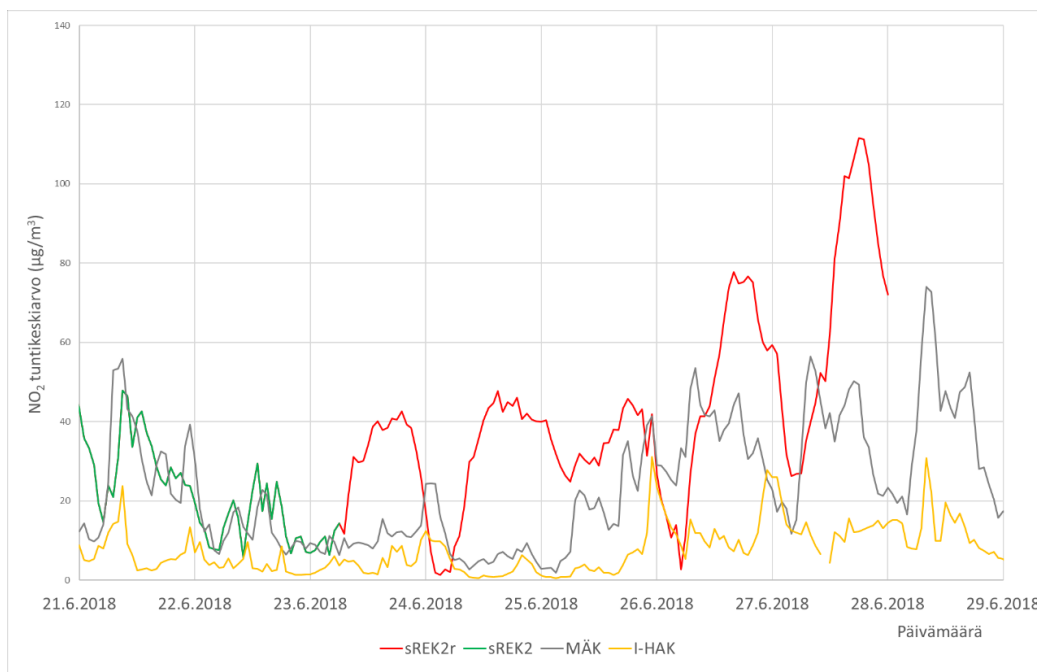
Poistot mittausaineistosta tehtiin mittausantureihin vaikuttavien sääilmiöiden perusteella. Vertailujakson aikana tehtiin huomioita kosteuden ja lämpötilan vaikutuksesta NO₂- ja CO-komponenttien toimintaan. Sensorin mittaustulokset aliarvioivat PM₁₀ pitoisuutta kosteuden noustessa. Lähempänä kastepistettä optinen sensori yliarvioi pitoisuutta. (Petäjä ym. 2019, 15.) Lisäpoistoja tehtiin laitteenvikaantumiseen liittyvän poistetun jakson tarkentamiseksi. Myös korkeiden pitoisuuksien jälkeisen palautumisen aikaiset tulokset poistettiin. Kaikkien sensoreiden osalta suhteelliseen ilmankosteuteen perustuvat poistot on tehty Pasilan sääaseman mittausten perusteella. Näin toimittiin myös lämpötilan osalta. Tuloksia käsiteltäessä tarkastelussa oli myös NO₂- ja CO-anturien lämpötilariippuvuus. Poistoperusteita NO₂- ja CO-anturien kosteus- tai lämpötilariippuvuudelle ei tullut esiin mittaus-tietojen käsittelyssä. Kaikkien poistojen ajankohta ja perusteet on luetteloitu toimeksiantajalle.

Kuviossa 1 on havainnollistettu tyypillinen poistotilanne sensorien PM₁₀ mittaustuloksista, minkä syynä on korkean ilmankosteuden aiheuttama mittausrvirhe. Kuviossa on ajanjakso 5.4.-10.4.2018 vilkasliikenteisiin katuihin kuuluvan sJÄT-sensorin tuloksista. Hyväksytyt sensorin mittaustulokset ovat kuviossa vihreällä. Suhteellinen ilmankosteus on kuviossa sinisellä. MÄK-mittausaseman vertailutulokset ovat kuviossa mustalla. Poistetut jaksot ovat kuvassa punaisella. Poistetut pitoisuudet poikkeavat liikenteen rytmistä ja ovat yli alueelle tyypillisen pitoisuuden. Kuvioista on nähtävillä mittauksille tyypillinen vuorokausirytmii MÄK-mittausaseman ja sJÄT-sensorin mittaustuloksista.



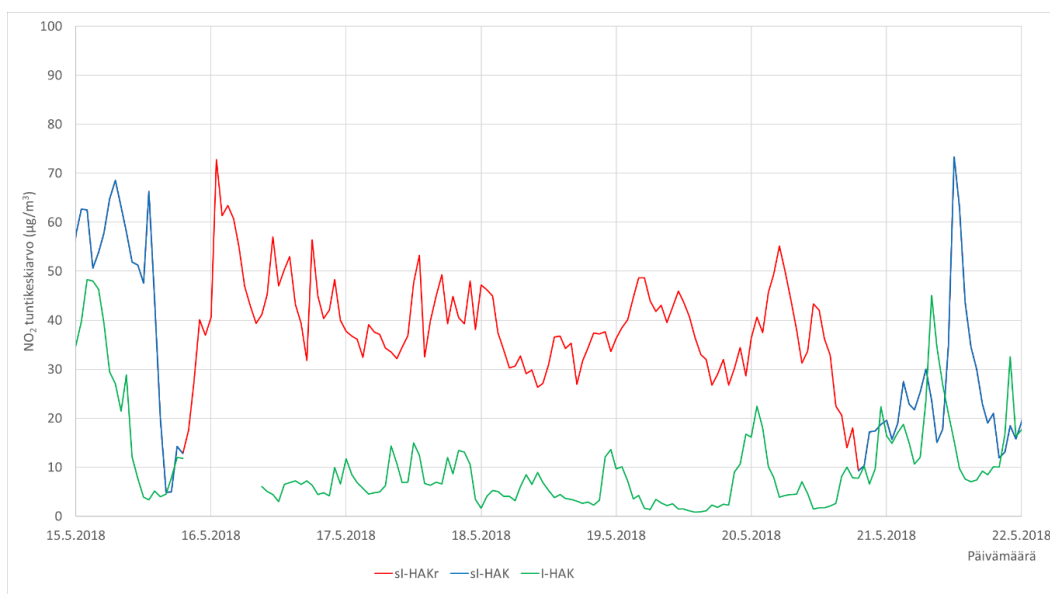
Kuvio 1. PM₁₀-komponentin poistoperusteen havainnekuva.

Vikaantumisen aiheuttama poisto hankkeen aikana näkyi mittaustulosten käsittelyssä mitauskatkona. Katkojen syynä oli sensorin vikaantuminen, mikä näkyy pitoisuuden nousuna huomattavasti normaalipitoisuuksia korkeammaksi. Poistetun mittausjakson jälkeen oli usein huomattavissa sensoreiden tuottamien tulosten poikkeavan alueelle tyypillisestä pitoisuudesta ennen selkeätä vikaantumista. Kuviossa 2 on esimerkkitalanne mittaustulosten jatkokäsittelyssä poistettavasta jaksosta. Vihreällä näkyy kuinka sREK-sensorin mittaustulokset noudattavat MÄK-mittausaseman vuorokausirytmiiä. Kuviossa on punaisella nähtävissä, kuinka sREK2-sensorin tulokset poikkeavat alueelle tyypillisestä pitoisuudesta ja rytmistä. Itä-Hakkilan mittausaseman tulokset ovat kuviossa keltaisella ja MÄK-mittausaseman tulokset harmaalla.



Kuvio 2. NO₂-kennon vikaantumisen havainnekuva

Kuviossa 3 näkyy aluetyypille epätyypillisen korkean pitoisuuden esimerkki NO₂ komponentin osalta. Itä-Hakkilan mittausaseman vertailutulos on kuviossa nähtävillä vihreänä. Sensorin sl-HAK epätyypillisen korkean pitoisuuden poistettu jakso on punaisella. Epätyypillisen korkean pitoisuuden lisäksi nähtävillä on, että mittaustulokset eivät palaudu vuorokausirytmien mukaisesti matalammiksi.



Kuvio 3. Esimerkki epätyypillisen korkeasta mittaustuloksesta

5 TULOKSET

5.1 Komponenttikohtainen tulosten kattavuus

Hankkeen aikaisten sensoreiden vuorokausikohtaiset mittaustulokset hyväksyttiin, mikäli niiden ajallinen edustavuus ylitti 75 % vuorokaudelle. Kuukausikeskiarvot laskettiin tunti-keskiarvoja käyttämällä. Kuukausikeskiarvojen käytettävyyden rajaksi asetettiin mittaustuloksia käsiteltäessä 75 % kuukausikohtaisesta ajallisesta edustavuudesta. Kuukausikeskiarvojen vaihteluista tehtiin sensorikohtaiset kuvaajat. Tulosten laatu varmistettiin tunti-keskiarvojen tarkkuudella. Tuloksista tehtiin vuorokausivaihtelukuvaajat kaikelle läpikäydylle ja hyväksytylle mittausaineistolle. Lisäksi tehtiin vuorokausivaihtelukuvaajat erikseen arkipäiville sekä viikonlopuille. Kaikki tulokset on raportoitu toimeksiantajalle. Ilmanlaadun mittausohjeessa 2017 on annettu mittaustulosten vertailtavuudelle raja- tai tavoitearvoon aineiston kattavuuden rajat.

Tuntiarvot hyväksytään kattavat ajallisesti vähintään 75 % tunnista. Tuntiarvoista laskettu vuorokausiarvo voidaan hyväksyä, jos tuntiarvoista on hyväksytyjä yli 75 % eli vähintään 18 tuntia, ja peräkkäisiä puuttuvia tuntiarvoja on korkeintaan 25 % eli kuusituntia. Vuosikeskiarvo lasketaan siitä aikasarjasta, jonka aikaresoluutio on pienin. Esimerkiksi jos sekä tuntiarvot että vuorokausiarvot ovat käytettävissä, vuosikeskiarvo lasketaan tuntiarvoista. Raja-arvojen ylittymisen valvontaan käytettävissä mittauksissa laatutavoite koko vuoden aineiston vähimmäismäärälle on pääsääntöisesti 90%. (Komppula ym. 2017, 77.)

Verrattaessa mittaustuloksista laskettuja tunnuslukuja raja-, tavoite- ja ohjearvoihin, on tarkistettava täyttyvätkö mittaustulosten määrälle asetetut vaatimukset. Jos vaatimukset tai laatutavoitteet eivät täyty, on siitä mainittava tulosten esittämisen ja raportoinnin yhteydessä. Puutteellisestakin aineistosta voi kuitenkin todeta raja-, tavoite tai ohjearvon ylittymisen, mikäli ilmanlaatutavoitteen ylittäviä pitoisuuksia on enemmän kuin sallittu määrä. (Komppula ym. 2017, 78.)

PM₁₀-tulosten käsittelyssä ilmankosteuden aiheuttamia mittausvirheitä poistettiin pääväylien mittaustuloksista vähemmän kuin vähemmän liikennöidyillä tieosuuksilla. Pitoisuudet eivät nousseet kosteudesta huolimatta epätyypillisen korkeiksi. Kaikille sensoreille tehtiin yöaikaiset 12-06 välille sijoittuvat poistot PM₁₀-tulosten osalta. Ajoittain myös päivällä tehtyihin poistoihin oli löydettävissä suhteellisen ilmankosteuden aiheuttama pitoisuuden nousu mittaustuloksissa. Vaikkakin PM₁₀-mittaustuloksista tehtiin eniten poistoja, on mittaustulosten kattavuus läpikäydyistä tuloksista parhaimpia. Taulukossa 2 on korostettu harmaalla alle 75 % mittaustuloksia sisältävät kuukaudet. Nämä eivät täytä

mittaustulosten käytettävyyden vähimmäismäärälle asetettua minimiä. Vuosiaineiston vähimmäismäärän 90 %/v täyttävät sensorit ovat sM107, sSÖR, sOLA, sMAL, sLAT, sPIR, sVAL, sLAA, sHIE.

Taulukko 2. PM₁₀-komponentin mittaustulosten kattavuustaulukko

Kuukausi	sM107	sSÖR	sOLA	sMYY	sMAL	sJÄT	sLAT	sPIR,	sKAI	sVAL	sSUU	sLAA	sPAL	sI-HAK	sHIE	sREK2
1	98	98	98	98	66	43	63	98	98	98	98	95	95	83	79	85
2	99	99	98	98	98	98	98	81	94	94	94	87	2	91	94	94
3	85	97	97	97	97	97	97	96	96	96	96	94	0	94	90	94
4	92	92	92	92	92	92	92	89	88	89	89	91	0	91	91	85
5	98	98	53	98	98	8	98	97	23	97	65	98	3	98	98	25
6	100	100	96	100	100	100	100	98	0	98	98	94	99	99	99	99
7	100	100	100	0	100	100	100	99	0	99	86	100	100	38	100	100
8	99	99	99	96	99	99	99	97	37	97	97	99	99	0	99	83
9	97	97	97	97	97	97	97	93	90	93	93	93	93	0	93	93
10	94	94	94	94	94	94	94	92	92	92	82	94	94	0	95	95
11	95	95	95	95	95	95	97	88	88	88	0	91	91	0	91	91
12	96	96	96	96	96	96	96	94	88	94	0	92	92	0	92	92

Tehdyt poistot keskittyivät lähinnä aluetyypistä poikkeavien pitoisuuksien poistoon ja sensorin vikaantumiseen liittyvään jo poistettujen jaksojen ajankohdan tarkennukseen. Taulukossa 4 on esitetty NO₂-anturin mittaustulosten kattavuustaulukko. Taulukossa on korostettu harmaalla alle 75 % mittaustuloksia sisältävät kuukaudet. Nämä eivät täytä mittaustuloksien käytettävyyden vähimmäismäärälle asetettua minimiä. Vuosiaineiston vähimmäismäärän 90 %/v täyttävät sensorit ovat sM107, sSÖR, sOL, sMYY, sMAL, sPIR,, sPAL, sHIE.

Taulukko 4. NO₂-komponentin mittaustulosten kattavuustaulukko

Kuukausi	sM107	sSÖR	sOLA	sMYY	sMAL	sJÄT	sLAT	sPIR,	sKAI	sVAL	sSUU	sLAA	sPAL	sI-HAK	sHIE	sREK2
1	100	100	100	100	68	45	65	100	100	100	100	100	100	87	84	90
2	99	99	99	99	99	99	99	84	99	99	99	99	99	93	99	99
3	88	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4	100	38	100	100	100	100	100	100	55	38	100	100	100	100	100	94
5	100	95	55	100	100	10	100	100	100	100	100	13	62	100	100	61
6	100	83	97	100	100	100	100	100	100	100	99	0	100	100	100	90
7	100	100	100	100	100	100	100	100	95	100	100	0	100	100	100	0
8	100	100	100	100	100	100	100	100	79	100	100	0	100	100	100	0
9	100	100	100	100	100	100	13	100	0	20	100	27	100	100	100	30
10	100	100	100	100	100	52	0	100	0	0	42	100	100	10	100	100
11	100	100	100	100	100	0	0	100	0	0	0	100	100	0	100	100
12	100	100	39	100	100	0	0	100	0	0	0	100	100	0	100	65

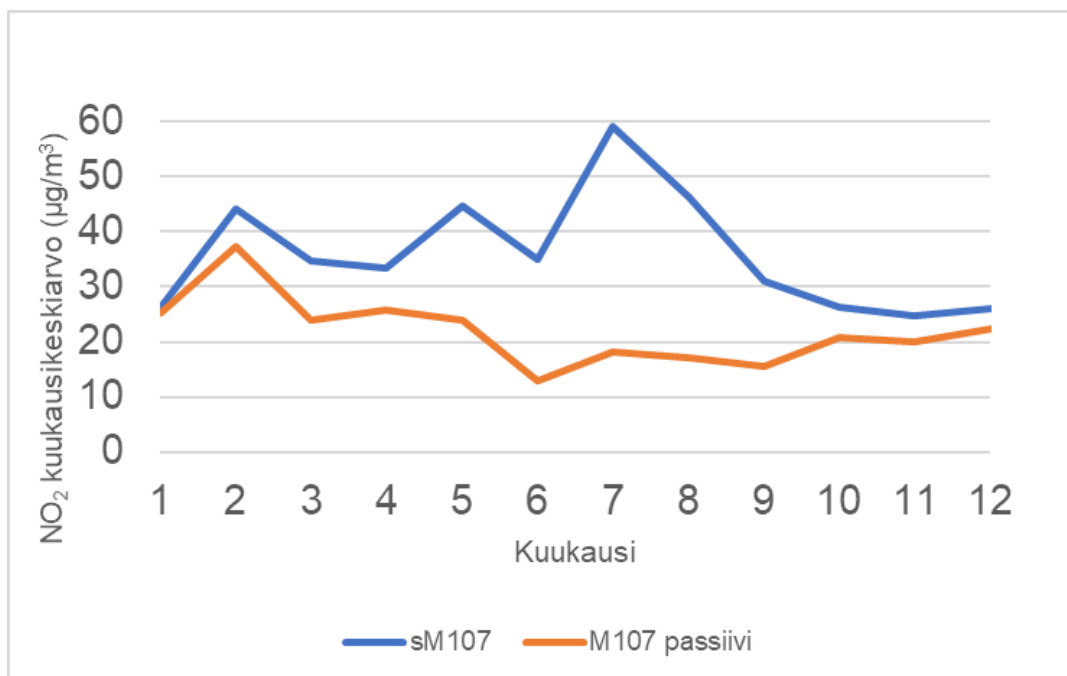
CO-anturin osalta tulokset olivat yhteneväisiä Mäkelänkadun mittausaseman vuorokausivaihtelun kanssa. Taulukossa 5 on esitetty NO₂-anturin mittaustuloksien kattavuustaulukko. Taulukossa on korostettu harmaalla alle 75 % mittaustuloksia sisältävät kuukaudet. Nämä eivät täytä mittaustulosten käytettävyyden vähimmäismäärälle asetettua minimiä. Suuntaa antavien mittausten aineiston vähimmäismäärän 90 %/v täyttävät sensorit ovat sM107, sSÖR, sMYY, sMAL, sPIR, sLAA, sPAL.

Taulukko 5. CO-komponentin mittaustulosten kattavuustaulukko

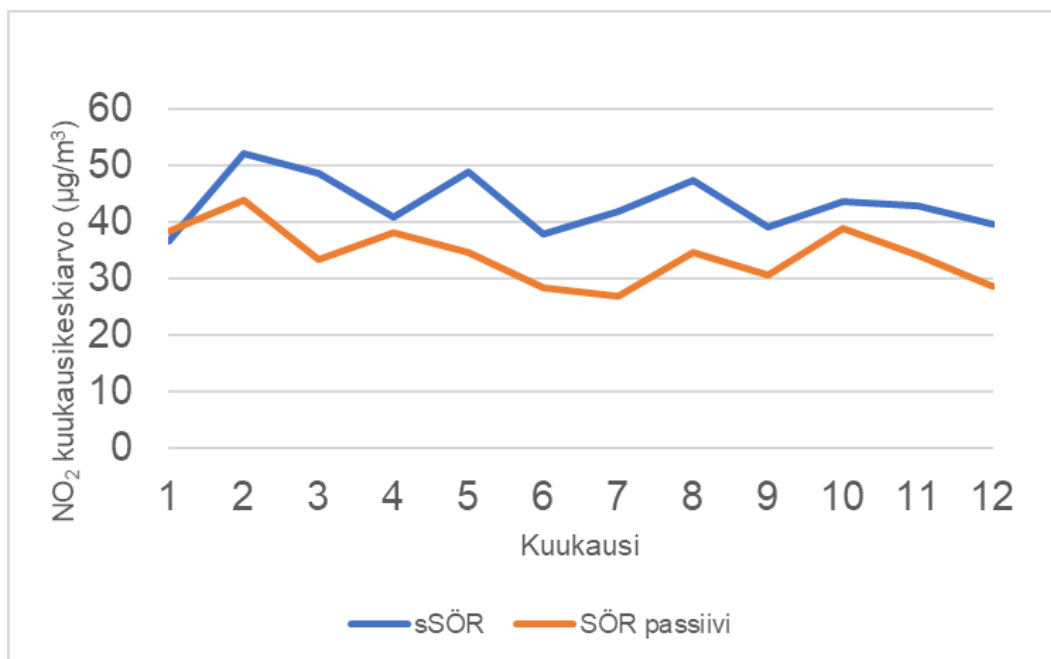
Kuukausi	sM107	sSÖR	sOLA	sMYY	sMAL	sJÄT	sLAT	sPIR	sKAI	sVAL	sSUU	sLAA	sPAL	si-HAK	sHIE	sREK2
1	100	100	0	100	68	0	65	100	100	100	100	100	100	87	84	90
2	99	99	0	99	99	0	99	84	99	99	99	99	99	93	99	99
3	88	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
4	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	100	100	100	100	94
5	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	100	100	62	100	32	61
6	100	100	0	100	100	0	100	100	100	100	99	95	100	100	0	90
7	100	100	0	100	100	0	97	100	68	100	100	100	100	38	0	0
8	100	100	0	100	100	0	0	100	0	100	100	100	100	0	0	0
9	100	100	0	100	100	0	0	100	0	100	100	100	100	0	100	0
10	100	100	0	100	100	0	0	100	0	100	92	100	100	0	100	0
11	100	100	0	100	100	0	0	100	0	43	43	100	100	0	100	0
12	100	100	0	100	100	0	0	100	0	0	0	100	100	0	100	0

5.2 NO₂-komponentti ja passiivikeräimet

PM₁₀ ja CO tulosten osalta tarkempaa vertailua ei suoritettu. NO₂ tulosten vertailuun löytyi vilkasliikenteisten katujen mittauspisteistä sensoreiden sM107 ja sSÖR rinnalla mittaavat passiivikeräimet. Kuviossa 4 on sensorin sM107 ja passiivikeräimen vertailu kuukausikeskiarvoista. Kuviossa on nähtävillä, miten sensorin kesä – syyskuun väliset NO₂ tulokset poikkeavat passiivikeräimen tuloksista. Tämän perusteella lämpötilariippuvuus voi olla yksi selittävä tekijä sensorin pitoisuuksien yliarviointiin. Tarkasteltaessa kuvion 5 tuloksia sSÖR-sensorin kuukausikeskiarvoista ei ole nähtävillä kesä – syyskuun aikaista sensorin mittaustulosten poikkeavuutta. Näiden vertailumittausten perusteella ei voida osoittaa NO₂ kennon olevan lämpötilariippuvainen.

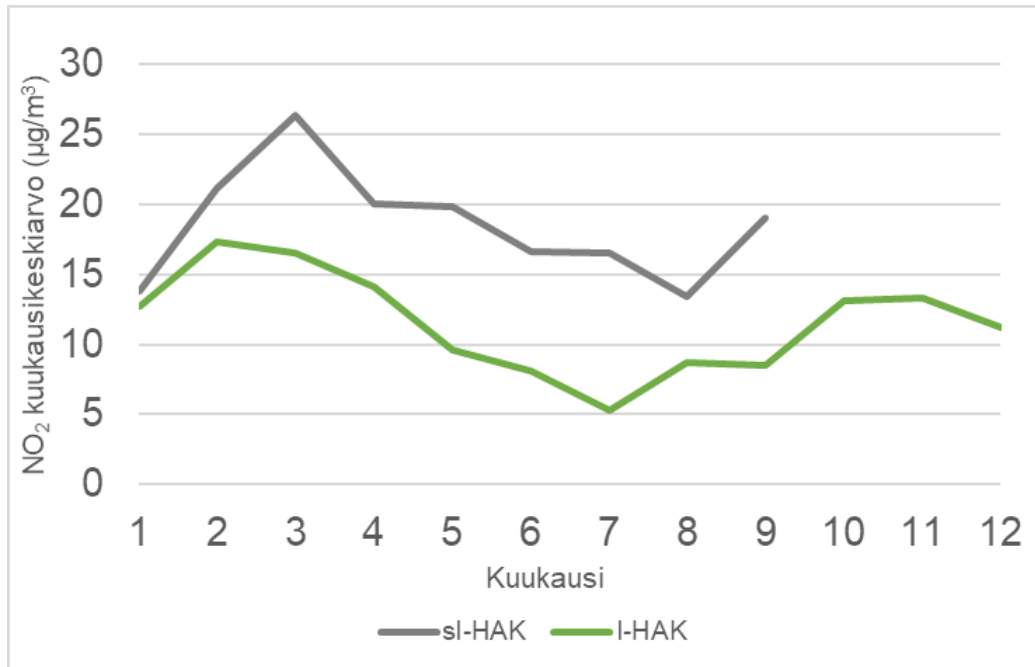


Kuvio 4. Sensorin sM107 ja vastaavan mittauspisteen passiivikeräimen kuukausikeskiarvot



Kuvio 5. Sensorin sSÖR ja vastaavan mittauspisteen passiivikeräimen kuukausikeskiarvot

Kuviossa 6 näkyy sl-HAK-sensori ja I-HAK-mittausaseman tulokset. Tulosten perusteella sensori noudattaa tämän mittauspisteen normaalia mittaustulosten eroa. Lämpötilariippuvuutta ei tulosten perusteella voida osoittaa.



Kuvio 6. Sensorin sl-HAK ja I-HAK-mittausaseman kuukausikeskiarvot

6 YHTEENVETO

Mäkelänkadun vertailujakson aikana huomattiin NO₂- ja CO -sensoreiden reagoivan lämpötilaan. Lisäksi havaittiin PM₁₀ lukumäärälaskimen reagointi suhteelliseen ilmankosteuteen. PM₁₀-tulosten kosteusperusteiset poistot tehtiin aluetyypin jaottelun mukaan. Lopullisia tuloksia koostaessa merkittävä osa poistoista oli keskenään ajallisesti yhteneviä aluetyypistä riippumatta. PM₁₀-tulosten osalta ilman suhteellisen kosteuden aiheuttamat mittausrvirheet poistettiin onnistuneesti. Mäkelänkadun mittaustulosten perusteella huomattua lämpötilariippuvuutta ei voitu osoittaa NO₂-kennojen osalta. CO-komponentin osalta tulokset noudattivat Mäkelänkadun mittausaseman tuloksia ja tämän komponentin lämpötilariippuvuutta ei havaittu. Lämpötilariippuvuuden tarkempi analysointi kenttäolosuhteissa tarvitsee lisätutkimuksia. Tässä tarvitaan rinnakkainen mittaus samassa pisteessä kalibroidulla laitteistolla tai menetelmällä. Tulosten perusteella sensorit soveltuvat tuntemattomien päästölähteiden kartoitukseen. Komponenttikohtainen kestävyysparantaminen nostaa tulosten kattavuuden suuntaa antavien mittausten vaatimalle tasolle.

LÄHTEET

Air Pollution Monitor AP-370 Series 2019. HORIBA Process & Environmental [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://static.horiba.com/fileadmin/Horiba/Products/Process_and_Environmental/Ambient/Brochures/AP-370_bro_E_HRE-2858G.pdf

Chemiluminescence 2019. InstrumentationTools [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://instrumentationtools.com/chemiluminescence/>

Dynamic Light Scattering 2019. Particle Technology Labs [viitattu 12.12.2019]. Saatavilla: <https://www.particletechlabs.com/analytical-testing/particle-size-distribution-analyses/dynamic-light-scattering>

Electrochemical Gas Sensors 2019. MEMBRAPOR AG [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://www.membrapor.ch/electrochemical-gas-sensors/>

Gas analyzer spectroscopy - Working Principle and Types 2019. Automation Forum [viitattu 12.12.2019]. Saatavilla: <https://automationforum.in/t/gas-analyzer-spectroscopy-working-principle-and-types/2900>

Ilmanlaatuindeksi 2016. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymä [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/ilmansuojelu/ilmanlaatuindex/Sivut/Ilmanlaatuindeksi.aspx>

Ilmatieteen laitos. 2019. Ilmatieteen laitoksen ilmanlaatumittausten laatuja järjestelmien kuvaus [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: http://expo.fmi.fi/ages/public/Ilmatieteen_laitoksen_ilmanlaatumittausten_laatuja_jarjestelmien_kuvaus.pdf

Komppula, B., Kyllönen, K., Latikka, J., Lusa K., Saari, H., Salmi, J., Waldén, J. & Vestenius, M. 2017. Ilmanlaadun mittaushje 2017. Ilmatieteen laitos [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/228440/Ilmanlaadun%20mittausohje_2017.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Niemi, J. 2018. Sensorien hyödyntäminen ilmanlaadun seurannassa. Seminaari esitys [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://www.hsy.fi/fi/asiantuntijalle/tapahtumat/seminaarit/tutkimusseminaarit/Documents/Ilmanlaadun%20tutkimusseminaarit%202018/ilmanlaadun_tutkimusseminaarit_08112018_jarkko_niemi_hsy.pdf

Johansson, L., Karppinen A., Kousa, A., Kuula, J., Laakso, M., Mäkelä, T., Niemi, J.V., Nousiainen, T., Paasonen, P., Petäjä, T., Saukko, E. & Timonen, H. 2019. HAQT deliverable 1-3: Final optimized sensor network in operational use in different environments.

Finnish Meteorological Institute [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: http://fmispace.fmi.fi/fileadmin/HAQT/Deliverables/HAQT%20Deliverable%201_3.pdf

Nousiainen, T., Timonen, H., Petäjä, T., Paasonen, P., Niemi, J., Saukko E., Johansson, L., Laakso, M. & Karppinen A. 2019. HAQT –Helsinki metropolitan Air Quality Testbed, Deliverable D7-2: Final Report. Finnish Meteorological Institute [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <http://fmispace.fmi.fi/fileadmin/HAQT/Deliverables/HAQT-D7-2-final-report%20v5.pdf>

Ohtonen, K., Loukkola, K. & Aarnio, P. 2019. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2018. Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän julkaisuja 4/2019 [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://www.hsy.fi/sites/Esitteet/EsitteetKatalogi/Julkaisusarja/4-2019_ilmanlaatu_paakaupunkiseudulla_vuonna_2018.pdf

Hänninen, O., Korhonen, A., Lehtomäki, H., Asikainen, A. & Rumrich, I. 2016. Ilmansaasteiden terveysvaikutukset. Ympäristöministeriö [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/74861/YMra_16_2016.pdf

Petäjä, T., Paasonen, P., Häkkinen, E., Vainio, T., Shahriyer, A., Lusa, K., Saarnio, K., aldén, J., Mäkelä, T., Julkunen, A., Kuula, J., Niemi, J.V., Saukko, E., Järvinen, A., Timonen, H., & the HAQT project team. 2019. HAQT deliverable 3-3: AQ instrument benchmarking report in the laboratory and in the field. Finnish Meteorological Institute [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: http://fmispace.fmi.fi/fileadmin/HAQT/Deliverables/HAQT%20Deliverable%203_3.pdf

Savolahti, M., Kangas, L., Karppinen, A., Karvosenoja, N., Kukkonen, J., Lanki, T., Nurmi, V., Palamarchuk, Y., Paunu, V-V., Sofiev, M. & Tiittanen, P. 2018. Ilmansaasteiden haittakustannusmalli Suomelle (IHKU). Valtioneuvoston kanslia [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/160713/26-2018-IHKU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Tapered element oscillating microbalance 2019. Wikiwand [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://www.wikiwand.com/en/Tapered_element_oscillating_microbalance

TEOM® 1405 Dichotomous Ambient Particulate Monitor 2007. Thermo Fisher Scientific [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://assets.thermofisher.com/TFS-Assets/LSG/manuals/EPM-manual-TEOM1405D.pdf>

Thompson, J, E. 2016. Crowd-sourced air quality studies: A review of the literature & portable sensors. Department of Chemistry & Biochemistry, TexasTech University [viitattu

12.12.2019]. Saatavissa: https://www.researchgate.net/publication/304714018_Crowd-sourced_air_quality_studies_A_review_of_the_literature_portable_sensors#pdf

Ympäristöministeriö. 2019. Kansallinen ilmansuojeluohjelma 2030. Ympäristöministeriön julkaisuja 2019:7 [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/161467/Kansallinen%20ilmansuojeluohjelma%202030.pdf?sequence=4&isAllowed=y>

Ympäristöministeriö. 2013. Ilmanlaatua koskeva sääntely [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Ilmasto_ja_ilma/Ilmansuojelu/Ilmansuojelun_raja_ja_ohjeavot.

Ympäristönsuojelulaki 27.6.2014/527. Suomen laki [viitattu 12.12.2019]. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/2014/20140527>