



Osaamista  
ja oivallusta  
tulevaisuuden  
tekemiseen

Tommi Wallenius

# Hiilidioksidin pitoisuusvaihtelu kaupunki-ilmassa ja sensorien mittaustarkkuuden tarkastelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (YAMK)

Älykäs teollisuus

Insinöörityö

18.11.2021

|  |   |
|--|---|
| Tekijä<br>Otsikko<br><br>Sivumäärä<br>Aika   | Tommi Wallenius<br>Hiilidioksidin pitoisuusvaihtelu kaupunki-ilmassa ja sensorien mittaustarkkuuden tarkastelu<br>78 sivua + 4 liitettä<br>18.11.2021 |
| Tutkinto   | insinööri (YAMK)  |
| Tutkinto-ohjelma   | Älykäs teollisuus   |
| Ammatillinen pääaine   |   |
| Ohjaajat   | Yliopettaja Jarno Varteva<br>Ilmansuojeluasiantuntija Jarkko Niemi  |
| <p>Hiilidioksidimittausten datan laadunvarmennus ja mittaustulosten vertailu erilaisissa mittauspaikeissa sekä hiilidioksidin pitoisuudet kaupunkiympäristössä ovat tämän tutkimuksen kohteena. Tutkimuksessa selvitetään kuinka hyvin melko uutta teknologiaa omaavien hiilidioksidisensorien mittaustulokset vertautuvat kauemmin markkinoilla olevien mittausanalysointilaitteiden mittaustuloksiin. Hiilidioksidisensorit ovat Vaisalan valmistamia GMP343-sensoreita ja referenssilaitteet ovat LI-COR LI-7000 ja Picarro mittausanalysointilaitteet. Tutkimus pohjautuu Euroopan Unionin rahoittamaan HOPE (Healthy Outdoor Premises for Everyone; Urban Innovative Actions projektinumero UIA03-240) – hankkeeseen. Työ on tehty HSY:n toimeksiannosta.</p> <p>Vertailumittausjaksoja tehtiin yhteensä kolme kappaletta ja ne sijoittuvat vuosien 2019-2021 välille. Mittauspaikkoina ja vertailukohteina olivat erilaiset mittaussympäristöt: kaupungin tausta-asema, pientaloalue ja vilkas katukuilu. Vertailumittausjaksojen pohjalta selvisi, että sääolosuhteilla on vaikutus sensorien mittaustuloksiin ja niille tehtiin ilmanpaineen korjaus, jolloin mittaustulosten samankaltaisuus parani verrattaessa referenssilaitteisiin. Tutkimuksessa saatiin selville uutta tietoa hiilidioksidin pitoisuuksista Suomessa ja eri mittauspaikeissa kaupunkiympäristössä. Mittaustulokset käsiteltiin tuntiarvoina ja niille laskettiin mm. regressioanalyysi, kuukausi- ja tuntikeskiarvot. Mittaustuloksia lähdettiin vertailemaan eri vuoden- ja vuorokauden aikoina ja niistä pyrittiin etsimään yhtäläisyyksiä tai eroja vuosien 2019-2021 välillä.</p> <p>Tutkimuksen aihe on ajankohtainen, sillä ilmakehän hiilidioksidipitoisuus nousee vuosittain ja hiilidioksidi on kasvihuonekaasu, joka lämmittää ilmastoja. Suomen mittakaavassa vastaavanlaista tutkimusta ei ole aikaisemmin tehty kaupunkiympäristössä, joten tästä tutkimuksesta on hyötyä mm. erilaisille tutkijoille, jotka tutkivat hiilidioksidia tai muita vastaavia vertailumittauksia.</p> |   |
| Avainsanat   | hiilidioksidi, mittaustulokset, vertailumittaus, laadunvarmennus, data-analyysi   |

|  |  |
|--|--|
| Author<br>Title  | Tommi Wallenius<br>Variation in the concentration of carbon dioxide in urban air and evaluation of the measurement accuracy of sensors |
| Number of Pages<br>Date  | 78 pages + 4 appendices<br>18 November 2021  |
| Degree   | Master of Engineering  |
| Degree Programme   | Intelligent Technology   |
| Professional Major   |  |
| Instructors  | Principal Lecturer Jarno Varteva<br>Expert in Air Quality Jarkko Niemi (HSY)   |
| <p>The quality assurance of carbon dioxide measurement data and the comparison of measurement results at different measurement sites as well as the circulation of carbon dioxide in urban environment are the subject on this study. This study examines how well new technology carbon dioxide sensors compare to the measurement results of measurement analyzers. The carbon dioxide sensors are GMP343 sensors manufactures by Vaisala. The reference analyzers are LI-COR LI-7000 and Picarro. The research is based on the HOPE (Healthy Outdoor Premises for Everyone) project that is co-financed by the European Regional Development Fund through the Urban Innovative Actions Initiative (project no. UIA03-240). This thesis has been commissioned by the Helsinki Region Environmental Services Authority (HSY).</p> <p>A total of three reference measurement periods were performed between years 2019 and 2021. The measurement locations and reference points were in different measurement environments: the city's urban background station, suburban detached housing area and busy street canyon. On the basis of the reference measurement periods, it became clear that the weather condition have an effect on the measurement results of the sensors an air pressure correction was performed on them which improved the similarity of the measurement results compared to the reference analyzers. The study found new information on the carbon dioxide cycle in Finland and at various measurements sites in the urban city environment. The measurement results were treated as hourly values and regression analysis, hourly and monthly average calculations were made. The measurement results were compared at different times of the day and year. The aim was to find differences or similarities between them in 2019-2021.</p> <p>The topic of this study is topical as the concentration of carbon dioxide in the atmosphere increases every year and carbon dioxide is a greenhouse gas that warms the climate. No similar research has been made in Finnish scale in the urban environment before so this research is useful for various researchers studying carbon dioxide or other similar reference measurements.</p> |  |
| Keywords   | carbon dioxide, measurement results, reference measurement, quality assurance, data analysis   |

## Sisällys

### Lyhenteet

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Johdanto  | 1  |
| 1.1   | Tutkimuksen tavoite ja rajaus   | 2  |
| 2     | Hiilidioksidi ilmakehässä   | 3  |
| 3     | Kirjallisuuskatsaus   | 5  |
| 3.1   | Ilmakehän hiilidioksidihavainnot Suomessa kaupunki- ja maaseutuasemilla   | 5  |
| 3.2   | Hiilidioksidipitoisuuden pitkäaikaisseurannan tuloksia Utahin kaupungissa | 6  |
| 3.3   | Hiukkausmittauksien vertaus Jyväskylän keskustassa vuosina 2010-2011      | 6  |
| 3.4   | Ilmanlaatu vilkasliikenteisessä katukuilussa ja sen lähiympäristössä      | 7  |
| 3.5   | Hiilidioksidin vaihdon alueelliset muutokset Helsingissä                  | 7  |
| 3.6   | Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta                                       | 7  |
| 4     | Hiilidioksidin mittausmenetelmät  | 8  |
| 4.1   | Referenssilaite LI-COR LI-7000  | 8  |
| 4.1.1 | LI-COR LI-7000 mittausmenetelmä   | 9  |
| 4.2   | Referenssilaite Picarro G1301   | 11 |
| 4.3   | Mittausensorit  | 12 |
| 4.3.1 | Vaisala GMP343  | 13 |
| 4.3.2 | Vaisala GMP343 mittausmenetelmä   | 13 |
| 4.3.3 | Diffuusio   | 14 |
| 4.3.4 | Läpivirtaus   | 14 |
| 5     | Mittauspaikat   | 16 |
| 6     | Mittaustulosten tiedonkeruu ja käsittely                                  | 20 |
| 7     | Mittaustulosten laskenta ja käsittely                                     | 21 |
| 8     | Mittausten jaksot ja mittaustulokset                                      | 22 |
| 8.1   | Ensimmäinen vertailumittausjakso  | 22 |

|       |   |          |    |
|-------|---|----------|----|
| 8.1.1 | Ensimmäisen mittauspaikan referenssilaitteen mittaussensoreihin                                 | vertailu | 22 |
| 8.2   | Toinen vertailumittausjakso   |          | 34 |
| 8.2.1 | Kuukausikeskiarvot vuonna 2019 ja 2020 ensimmäisen ja toisen mittauspaikan välillä              |          | 35 |
| 8.2.2 | Tunti- ja vuodenaikaisvaihtelu hiilidioksidi- ja typenoksidipitoisuuksissa vuonna 2019          |          | 38 |
| 8.2.3 | Tunti- ja vuodenaikaisvaihtelu hiilidioksidipitoisuuksissa vuonna 2020                          |          | 44 |
| 8.3   | Kolmas vertailumittausjakso   |          | 53 |
| 8.3.1 | Ensimmäisen ja toisen mittauspaikan referenssilaitteiden vertailu kolmeen eri sensoripisteeseen |          | 53 |
| 9     | Mittaustulosten arviointi ja tulkinta   |          | 64 |
| 9.1   | Ensimmäisen vertailumittausjakson tulkinta  |          | 64 |
| 9.2   | Toisen vertailumittausjakson tulkinta   |          | 66 |
| 9.3   | Kolmannen vertailumittausjakson tulkinta  |          | 70 |
| 10    | Johtopäätökset  |          | 72 |
|       | Lähteet   |          | 79 |
|       | Liitteet  |          |    |
|       | Liite 1. Kuukausikohtainen vertailu läpivirtaussensorin ja analysaattorin välillä               |          |    |
|       | Liite 2. Läpivirtaussensorin ja analysaattorin korrelaatio painekorjauksen jälkeen              |          |    |
|       | Liite 3. Vuorokausivaihtelu kesällä ja syksyllä 2019  |          |    |
|       | Liite 4. Vaisala GMP343 hiilidioksidisensorin datalehti   |          |    |

## Lyhenteet

|                   |  |
|-------------------|--|
| CO <sub>2</sub>   | Hiilidioksidin molekyylikaava.   |
| CO <sub>2</sub> d | Hiilidioksidisensorin lyhenne (diffuusio)  |
| CO <sub>2</sub> f | Hiilidioksidisensorin lyhenne (läpivirtaus)  |
| H <sub>2</sub> O  | Veden molekyylikaava.  |
| NO <sub>x</sub>   | Typhen oksidien yhteisnimitys, missä mukana typpimonoksidi- (NO) ja typpidioksidi (NO <sub>2</sub> ) |
| ppm               | parts per million, hiilidioksidimittausten pitoisuusyksikkö.   |

## 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö on tehty Helsingin seudun ympäristöpalvelut –kuntayhtymän (HSY) toimeksiannosta. Tämä työ pohjautuu Euroopan Unionin rahoittamaan HOPE (Healthy Outdoor Premises for Everyone) –hankkeeseen. Hanke kehittää uutta ilmanlaadun täsmätietoa ja sen innovatiivista hyödyntämistä kaupunginosa- ja asukastasolla. Hankkeessa etsitään ratkaisuja ilmanlaadun parantamiseen Helsingissä. Hankkeen rahoittavat yhdessä Euroopan aluekehitysrahaston Urban Innovative Actions Initiative (HOPE-hankkeen projektinumero UIA03-240) sekä hankekonsortioon osallistuvat organisaatiot. UIA HOPE –kumppaneita HSY:n lisäksi ovat Helsingin kaupunki (hankkeen koordinaattori), Helsingin yliopisto, Vaisala, Ilmatieteen laitos, Useless ja Forum Virium Helsinki. Hankkeesta vastaa HSY:ssä ilmansuojeluasiantuntija Jarkko Niemi, joka toimii myös työnohjaajana. Tässä opinnäytetyössä tehdään laadunvarmennusta HOPE-hankkeessa käytetyille Vaisalan hiilidioksidisensorien mittaustuloksille ja analysoidaan niitä. Tässä työssä käytetyt kuvat ja kuvaajat, missä ei ole lähdemerkintää ovat tutkimuksen tekijän tekemiä. Haluan kiittää työnohjaajia, HSY:n mittaustiimiä avusta tutkimuksen kanssa sekä yhteistyökumppaneita Ilmatieteen laitosta ja Vaisalaa sekä EU:ta tutkimuksen rahoittamisesta.

Tutkimuksessa testattiin Vaisalan sensorien (Vaisala GMP343) soveltuvuutta kaupunki-ilman hiilidioksidipitoisuuksien mittauksiin erilaisissa mittausympäristöissä, joita olivat mm. vilkasliikenteinen katukuilu, pientaloalue, sataman lähistö ja kaupungin taustasema. Mittauspisteet sijaitsivat Helsingissä ja ne olivat Mäkelänkatu, Kyläkunnantie, Pirkkola ja Hernesaari. Hiilidioksidisensoreille tehtiin laadunvarmennus ja niitä verrattiin kahteen eri referenssimittausanalysointipaikkaan, jotka sijaitsivat Mäkelänkadun mittausasemalla (HSY:n omistama LI-COR LI-7000) ja Kumpulan kaupunkitausta-alueella SMEAR III -tutkimusasemalla (Ilmatieteen laitoksen omistama Picarro G1301) Ilmatieteen laitoksen pihamaalla. Analysoitavia mittausjaksoja oli yhteensä kolme ja kaikki mittausjaksot olivat vuoden mittaisia. Koko vuoden pituisilta mittausjaksoilta saatiin laskettua mm. regressioanalyysin avulla mittausten korrelaatio, kuukausi- ja tuntikohtaiset keskiarvot sekä vuoden- ja vuorokaudenaikaisvaihtelu.

Tämä tutkimus on hyödyllinen, jotta voidaan nähdä kuinka hiilidioksidisensorien mittaustulokset vertautuvat referenssimittausanalyysointoreihin erilaisia mittauspäikoissa Helsingissä. Tutkimus on ensimmäinen laatuaan Suomessa, kun tutkitaan hiilidioksidisensorien vaikutusta erilaisissa kaupunkiympäristöissä eri vuodenaikoina. Tästä tutkimuksesta on hyötyä HSY:n lisäksi mm. erilaisille tutkijoille ja tutkimuksille, missä tehdään samanlaisia vertailumittauksia kuin tässä tutkimuksessa.

## 1.1 Tutkimuksen tavoite ja rajaus

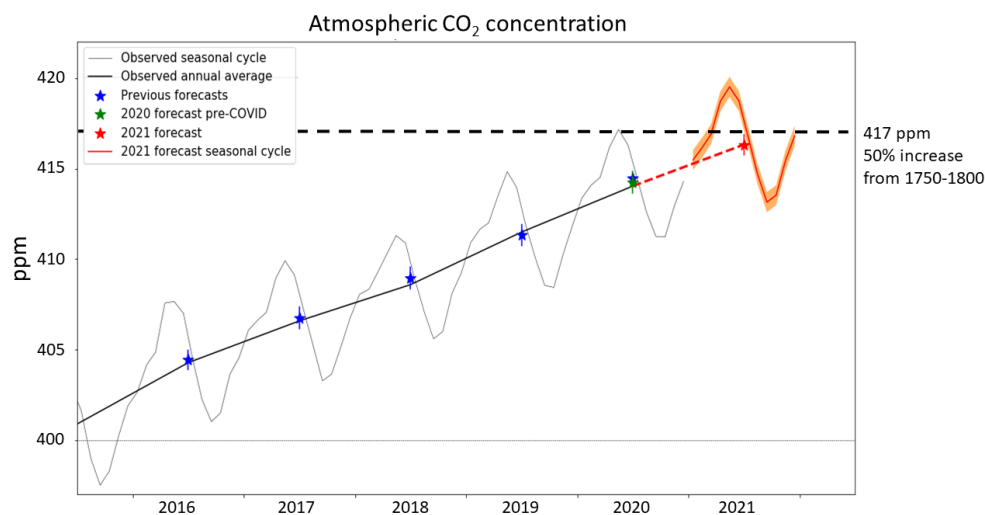
Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, kuinka tarkasti hiilidioksidisensorit mittaavat verrattuna mittausanalyysointoreihin. Hiilidioksidisensorit ovat melko uutta teknologiaa ja sen myötä hyvä tutkimuskohde. Mittausanalyysointorien ja sensoreiden mittaustuloksissa on kuitenkin eroavaisuuksia ja oli syytä selvittää, mistä ero mittaustuloksissa johtuu ja korjata mittaustulokset vastaamaan referenssimittausanalyysointoreita, jos se oli mahdollista ja kuinka sensorien mittaustulokset ovat hyödynnettävissä. Hiilidioksidisensoreille tehtiin vertailumittaukset ja mittaustulosten analysointi.

Tutkimuksessa verrattiin kolmen eri mittausjakson mittaustuloksia. Jokainen mittausjakso oli vuoden pituinen. Ensimmäisessä mittausjaksossa oli tarkoitus ymmärtää kuinka hyvin kaksi erilaisella tavalla (diffuusio ja läpivirtaus) mittaavaa hiilidioksidisensoria vertautuvat referenssimittausanalyysointoriin samassa mittauspisteessä, mikä sijaitsi HSY:n Mäkelänkadun mittausasemalla. Diffuusiosensori oli sijoitettu mittausaseman katolle ulkoilmaan ja läpivirtaussensori sekä referenssimittausanalyysointori sijaitsivat mittausaseman sisätiloissa. Toisessa mittausjaksossa verrattiin Mäkelänkadun hiilidioksidisensoreita ja referenssimittausanalyysointoria Ilmatieteen laitoksen mittausanalyysointoriin Kumpulassa. Mittaustulosten vertailun tarkoituksena oli selvittää miten kaksi eri mittauspistettä eroavat toisistaan, kun vertaillaan kuukausi- ja tuntikeskiarvoja. Mittaustulosten pohjalta päästiin näkemään vuorokauden tuntien vaihtelu yön ja päivän välillä sekä vuodenaikaisvaihtelu kevään, kesän, syksyn ja talven välillä. Lisäksi mittaustuloksissa verrattiin vielä arkipäivien ja viikonlopun tuntien vaihtelua. Kolmannessa mittausjaksossa verrattiin kolmen eri mittauspisteen Kyläkunnantien, Pirkkolan ja Hernesaaren mittaustuloksia HSY:n Mäkelänkadun referenssimittausanalyysointoriin ja Ilmatieteen laitoksen Kumpulan

referenssimittausanalysointiin. Kolmannen mittausjakson mittaustuloksille tehtiin samanlainen vertailu kuin toisessa mittausjaksossa. Kolmen eri mittausjakson perusteella saatiin selville kuinka hiilidioksidisensorit toimivat erilaisissa mittauspisteissä ja kuinka ne vertautuvat referenssimittausanalysointoreihin.

## 2 Hiilidioksidi ilmakehässä

Hiilidioksidi, molekyylikaavaltaan CO<sub>2</sub> on hiilestä ja hapesta koostuva kemiallinen yhdiste ja sitä esiintyy maan ilmakehässä pieninä pitoisuuksina. Hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä on vaihdellut luontaisesti eri aikakausina ja se on noussut teollistumista edeltävän ajan 280 ppm:stä (ppm = tilavuuden miljoonasosa) jo noin 415 ppm (0,04 %) vuonna 2021. Hiilidioksidipitoisuuden nousu ilmakehässä on lähes 50 % korkeammalla kuin esiteollisina aikoina ja pitoisuuden kasvu jatkuu edelleen koko ajan, keskimäärin noin 2 ppm:n verran vuodessa. Kuvan 1. arvion mukaan Havaijilla sijaitsevan observatorion arvioidaan dokumentoivan ilmakehän hiilidioksidipitoisuudeksi noin 417 ppm vuonna 2021. Met Officeen mukaan ilmakehän CO<sub>2</sub>-pitoisuuden nousemiseen 25 prosentilla teollisuuden vallankumouksen alkamisesta kesti 200 vuotta, mutta nyt vain 30 vuotta myöhemmin lähestytään jo 50 prosenttia eli nousu on ollut suurta viime vuosina. [1.]



Kuva 1. Hiilidioksidipitoisuuden nousu ilmakehässä. Mauna Loan observatorion mittausdata ja Met Officeen ennusteet. [1.]

Hiilidioksidia syntyy hiilipitoisten aineiden palamistuotteena. Hiilidioksidi on kasvihuonekaasu eli sen määrän lisääntyminen ilmakehässä kasvattaa maapallon lämpötilaa. Hiilidioksidin määrän lisääntyminen ilmakehässä on pääasiassa lähtöisin ihmisen toiminnasta eli fossiilisia polttoaineita käyttävissä voimaloissa ja auton moottoreissa. Fossiilisten polttoaineiden käyttö eli mm. öljyn, maakaasun, hiilen poltto lisää ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta ja lämmittää ilmastoa. Katsottaessa koko maailman mittakaavaa, suurimpia hiilidioksidilähteitä ovat energiantuotanto, metsien hävittäminen ja teollisuus. [2.] Suomessa energiantuotanto ja liikenne ovat ylivoimaisesti suurin hiilidioksidilähde, kun maankäytön muutoksia ei oteta huomioon: peräti 99 % päästöistä syntyy niistä, jäljelle jäävä prosentti syntyy sementin valmistuksesta. [3.] Fossiilisista polttoaineista päästöt syntyvät hiilivetyjen palaessa hiilidioksidiksi ja vedeksi. Sementin tuotannossa hiilidioksidipäästöt syntyvät kalsiumkarbonaatin eli kalkkikiven  $\text{CaCO}_3$  palaessa hiekan ja saven kanssa muodostaen kalsiumsilikaatteja ja vapautten päästöinä hiilidioksidia ja vettä. Vuonna 2020 Suomessa energiantuotantoon ja kulutukseen liittyvät fossiilisten polttoaineiden ja turpeen käytön hiilidioksidipäästöt olivat noin 35 miljoona tonnia. [4.] Suomen metsät sitovat noin 30 miljoona tonnia vuodessa hiilidioksidia eli ne toimivat nieluina. Toisaalta suopellot ovat hiilidioksidin lähteitä, joista syntyy noin viisi miljoonaa tonnia hiilidioksidia vuodessa. [3.]

Luonnossa hiili kiertää koko ajan. Kasvit yhteyttäessään sitovat hiilidioksidia ilmakehästä. Ravintoketjuun näin sitoutunut hiili vapautuu jälleen ilmakehään kasvisolujen ja eläinten hengityksessä tai kuolleiden eliöiden maatuessa. Meriveden ylimpiin kerroksiin liukenee vuosittain suuria määriä hiilidioksidia, mutta lähes yhtä paljon vapautuu meristä takaisin ilmakehään. Yksittäinen hiilidioksidimolekyyli viipyy ilmakehässä keskimäärin noin viisi vuotta. Ajan kuluessa valtaosa kasvipeitteen ja meren pintakerroksen sitomasta hiilidioksidista palautuu takaisin ilmakehään. Ihmisten hiilidioksidipäästöjen vaikutusaika ilmakehässä on todellisuudessa paljon pitempi, jopa satoja vuosia. [3.]

Jos hiilidioksidipitoisuus nousisi yli 450 ppm, Grönlanti ja läntinen Antarktis todennäköisesti sulaisivat. Tämä nostaisi meren pintaa noin 6 metriä, sillä nykyisin jäätiköt ovat osin maa-alueiden päällä, eivätkä siten vaikuta pinnan tasoon. [5.]

### 3 Kirjallisuuskatsaus

Kirjallisuuskatsauksessa on tarkoituksena referoida muita vastaavia tutkimuksia Suomesta ja maailmalta. Täysin vastaavaa tutkimusta ei löytynyt Suomesta, koska tämä on ensimmäinen laatuaan tutkittaessa hiilidioksidisensoreita Suomen mittakaavassa. Tutkimuksia etsittäessä hakukriteereinä käytettiin hiilidioksidimittauksia ja samankaltaista tulosten laskentamenetelmää ilmanlaadun mittauksissa kuin tässäkin tutkimuksessa. Löytyi erilaisia hiilidioksiditutkimuksia Suomesta ja maailmalta sekä erilaisia vertailumittauksia, missä on käytetty samanlaista mittaustulosten laskentamenetelmää.

#### 3.1 Ilmakehän hiilidioksidihavainnot Suomessa kaupunki- ja maaseutuasemilla

Tutkimuksen tarkoituksena oli selvittää hiilidioksidin mooliosuutta (mole fraction) näissä viidessä eri mittauspaikassa ja kuinka pitoisuudet ovat vaihdelleet mittauspaikkojen mukaan. Vuonna 2015 valmistuneessa tutkimuksessa mitattiin ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta viidessä eri mittauspaikassa: Helsingin Kumpulassa (kaupungin tausta-asema), Utössä (meren läheinen tausta-asema), Kuopion Puijossa (kaupungin tausta-asema), Sodankylässä (pohjoisboreaalinen tausta-asema) ja Pallaksella (pohjoisboreaalinen tausta-asema). Kumpulassa mittauspaikka ja mittalaite on sama, minkä mittaustuloksia olen myös itse hyödyntänyt tässä omassa tutkimuksessani. Mittausajanjaksot vaihtelivat tutkimuksessa, Pallaksella mittaukset alkoivat jo 1996, mutta muissa mittauspaikoissa mittaukset alkoivat vuosien 2010-2012 välillä ja mittaukset päättyivät vuonna 2014. Pallaksen mittaustuloksia käytettiin referenssinä ja niitä verrattiin neljään uuteen mittauspaikkaan. Samanaikainen mittausjakso kesti noin 1-3 vuoteen, jotta vuotuinen vaihtelu voitiin tehdä. Mittauspaikat sijaitsivat hyvin erilaisissa ympäristöissä ja hiilidioksiditulokset vaihtelivat vuorokauden mukaan hyvinkin paljon, niin mittaustuloksista hyväksyttiin tutkittavaksi ainoastaan klo 12:00-18:00 välinen ajanjakso. Alueelliset erot pitoisuustasojen vaihteluissa olivat hyvinkin suuria. Sodankylän ja Utön hiilidioksidipitoisuuksien vaihteluväli oli paljon väheisempää verrattuna Kumpulassa ja Puijon pitoisuuksiin, missä liikenteellä oli suurempi vaikutus. [6.]

### 3.2 Hiilidioksidipitoisuuden pitkäaikaisseurannan tuloksia Utahin kaupungissa

Vuonna 2018 valmistuneessa Yhdysvaltojen Utahin Salt Lake Cityssä toteutettu tutkimuskampanja mittasi hiilidioksidipitoisuuksia kuudessa eri mittauspaiassa vuosikymmenen ajan vuosina 2004-2014. Salt Lake Cityn hiilidioksidipitoisuuksien seurantaverkko on yksi maailman suurimpia. Tutkimuksen taustana oli hiilidioksidipitoisuuksien nousu kaupunkiympäristössä ja haluttiin nähdä kuinka paljon hiilidioksidipitoisuudet ovat nousseet kaupungeissa ihmispopulaatioiden ja liikenteen lisääntyessä. Mittaustulosten tarkoituksena oli antaa kokonaiskuvaa hiilidioksidipitoisuuksien noususta ja niiden arvioinnista kasvihuonekaasujen pienentämismahdollisuuksiin. Mittaustuloksien vaihteluväli oli hyvinkin suurta vaihdellen mittauspaiakan sijainnin mukaan kaupungissa. Mittaustuloksissa otettiin vuodenaikaisvaihtelu huomioon, mitä hyödynsin myös omassa tutkimuksessani. Mittaustuloksia hyödynnettiin mm. kaupunkisuunnittelussa. [7.]

### 3.3 Hiukkausmittauksien vertaus Jyväskylän keskustassa vuosina 2010-2011

Tässä YAMK-opinnäytetyössä tutkittiin uuden ja vanhan hiukkausmittarin keskeneräistä korrelaatiota toisiinsa. Markkinoille tuotiin saman valmistajan (TEOM) uusi malli 1405D vanhasta laitteesta 1400A ja työssä katsottiin kuinka hyvin laitteet mittaavat pienhiukkasten pitoisuuksia keskenään. Mittausjaksojen perusteella todettiin, että uusi laite soveltuu hyvin mittaamaan pienhiukkasia eli laitteiden välinen korrelaatio oli tarpeeksi hyvä. Uudelle virtausmittarille ei lähdetty tekemään korjauskertoimia vaan vanhan laitteen kertoimet hyväksyttiin. Tämä YAMK-opinnäytetyö hyödyntää samanlaista laitteiden keskenäistä vertailumenetelmää eli regressioanalyysiä, mitä myös itse hyödynsin omassa tutkimuksessani. Vaikka mitattavat komponentit ovat täysin erilaiset kuin omassa tutkimuksessani, antoi tämä YAMK-opinnäytetyö hyvän pohjan omaan tutkimukseeni. [8.]

### 3.4 Ilmanlaatu vilkasliikenteisessä katukuilussa ja sen lähiympäristössä

Vuonna 2018 valmistuneessa YAMK-opinnäytetyössä tutkittiin kuinka voimakkaasti typpidioksidin ja hengitettävien hiukkasten pitoisuudet laimenivat etäännyttäessä päästölähteestä eli Mäkelänkadusta. Pitoisuuksien etäännytykset mitattiin sekä korkeus- ja vaakasuunnassa. Korkeussuuntaiset mittaukset toteutettiin Vaisalan AQT420 – sensoreilla. Sensorien mittaustuloksia verrattiin passiivikeräimiin. Mittausjakso oli kokonaisen vuoden elo-syyskuun vaihteesta 2017 elo-syyskuun vaihteeseen 2018. Opinnäytetyön mittaustuloksista selvisi se, että kuinka paljon mittaustulokset laimenevat päästölähteistä ja tämän lisäksi myös tutkittiin eri mittausmenetelmien korrelaatiota. Opinnäytetyössä laskettiin kuukausikeskiarvot ja tehtiin korrelaatiokäyrät sensoreille ja passiivikeräimille. Käytin myös omassa tutkimuksessani kuukausikeskiarvojen laskentatapaa ja regressioanalyysiä selvittääkseni referenssilaitteiden ja sensorien välisen korrelaation. [9.]

### 3.5 Hiilidioksidin vaihdon alueelliset muutokset Helsingissä

Pro gradun tarkoituksena oli selvittää hiilidioksidin vaihtoa maanpinnan ja ilmakehän välillä kaupungeissa ja luonnollisessa ekosysteemissä. Tutkimus on valmistunut vuonna 2018. Tässä työssä luotiin hiilidioksidin vaihdon pintavuomalli (SUEWS), jotta kaupunkien vuorovaikutusta ilmakehän kanssa pystyttiin tutkimaan. Tutkimuksessa selvitetään ihmisperäisiä hiilidioksidin päästöjä, joita olivat liikenne, rakennusten lämmitys ja itse ihmisistä tuleva hiilidioksidi aineenvaihdunnasta. Biogeenisiä komponentteja olivat kasvillisuuden fotosynteesin nielu sekä lähteenä kasvillisuuden ja maaperän soluhengitys. Hiilidioksidimallin tavoitteena oli luoda apuväline kaupunkisuunnittelulle, jotta erilaisten ratkaisujen vaikutusta ilmastoon voitiin tutkia. [10.]

### 3.6 Yhteenveto kirjallisuuskatsauksesta

Kirjallisuuskatsausta tehdessä oli hankala löytää täysin samanlaista tai edes lähellä olevaa tutkimusta. Löysin lähellä olevia tutkimuksia hiilidioksidipitoisuuksien käyttäytymisestä erilaisissa mittausympäristöissä sekä YAMK-opinnäytetöitä ja tutkimuksia, joissa hyödynnetään samanalaisia laskentamenetelmiä kuin tässä

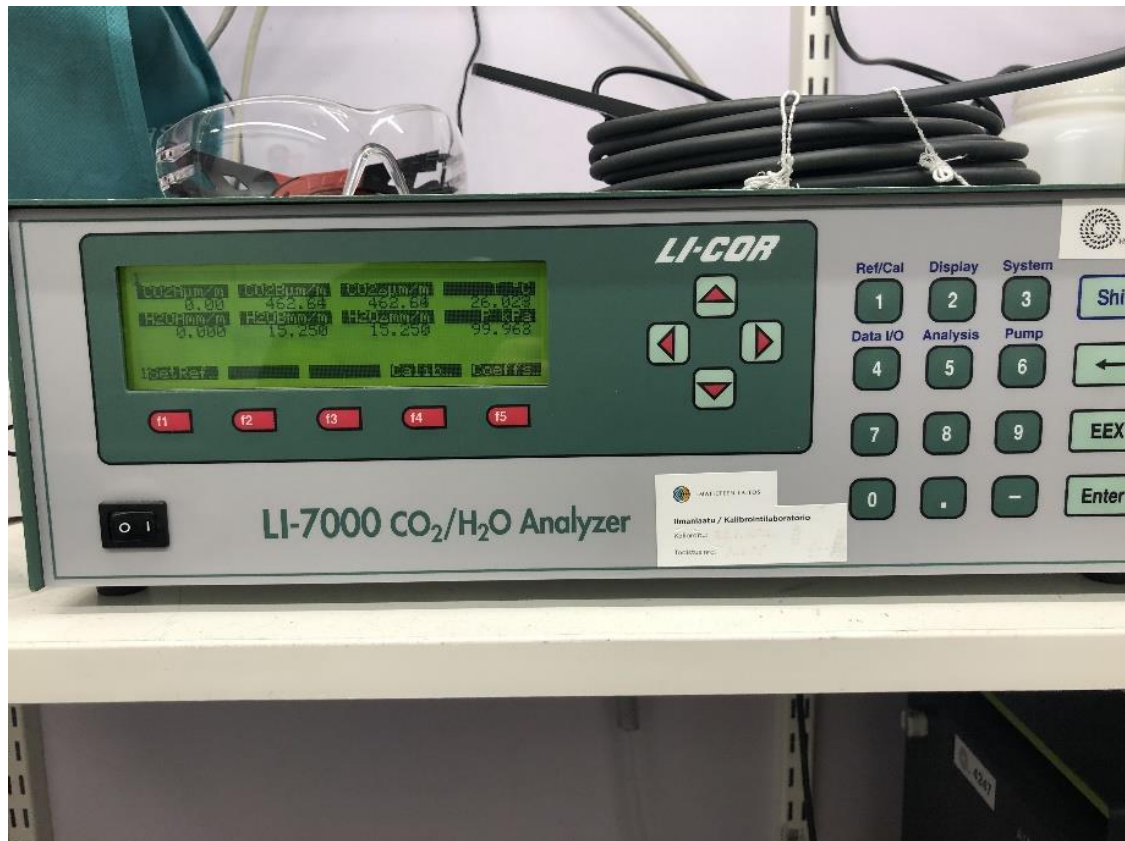
tutkimuksessa. Kirjallisuuskatsauksessa esitettyjen tutkimusten ja opinnäytetöiden mittauslaitteet, mittausolosuhteet ja mittauskomponentit vaihtelivat joten näistä ei voi tehdä suoraa vertailua tutkimukseeni. Kaikista näistä tutkimuksista löytyi kuitenkin hyvää pohjaa ja taustatyötä omaan tutkimukseeni.

## 4 Hiilidioksidin mittausmenetelmät

HSY:llä on käytössä kahta erilaista mittausmenetelmää hiilidioksidille. Ensimmäinen menetelmä perustuu LI-COR LI-7000 mittausanalysaattoriin. Kyseisellä laitteella on mitattu vuodesta 2016 lähtien. Toinen menetelmä on melko uudet hiilidioksidisensorit, millä ensimmäiset mittaukset alkoivat vuonna 2019. Hiilidioksidisensorit jakautuvat vielä kahteen eri tyyppiin: diffuusio ja läpivirtaus.

### 4.1 Referenssilaitte LI-COR LI-7000

LI-COR LI-7000 on korkealaatuinen, nopea ja tarkka CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O kaasumainen mittausanalysaattori mikä soveltuu erilaisiin käyttöolosuhteisiin mm. laboratoriossa ja kenttätyössä. Monipuolisuuden ansiosta sillä on mahdollista mitata niin korkeita kuin mataliakin pitoisuuksia tarkasti. Mittausanalysaattorissa on sisäänrakennettu painesensori 0,1 % tarkkuudella, tämän takia kaasunäytteen mittaustuloksille ei tarvitse tehdä erillistä paineenkorjausta ja siinä on myös sisäänrakennettu pumppu. Kokonaisuutena LI-7000 on helppokäyttöinen mittausanalysaattori sellaisenaan ja siihen ei tarvitse erillisiä osia. Käyttöjärjestelmä on Windows-pohjainen, mihin mittaustulokset tallentuvat. Käyttöjärjestelmä osaa myös ennakoiden ilmoittaa mahdollisista ongelmatilanteista, jotta niihin on helppo reagoida ennen kuin mitään vahinkoa on tapahtunut. [11.]



Kuva 2. LI-COR LI-7000 mittausanalysointilaitteita HSY:n Mäkelänkadun mittausasemalla.

Kuva 2. näyttää LI-COR LI-7000 mittausanalysointilaitteen HSY:n Mäkelänkadun mittausasemalla. Mittausanalysointilaitteen näytössä näkyy mittaustulokset reaaliaikaisesti. Samanaikaisesti näytölle on mahdollista saada näkyviin 8 eri mittauskomponenttia niin kuin kuvassa 2. näkyy LI-7000 mittausanalysointilaitteen näytöllä.

#### 4.1.1 LI-COR LI-7000 mittaustekniikka

LI-7000 on differentiaalinen, ei-dispergoituva kaasumainen infrapuna (IR) -mittausanalysointilaitteita. Se ei ole dispergoituva siitä, että mitään dispergoitua elementtiä ei käytetä erottamaan laajakaistamaista valoa kapeaan spektriin, joka soveltuisi kaasun tunnistamiseen. Mittaustekniikasta käytetään lyhennettä NDIR (nondispersive infrared sensor). CO<sub>2</sub>- ja H<sub>2</sub>O-mittaukset perustuvat absorptioeroihin infrapunasäteilyssä, kun infrapunasäteily läpäisee kaksi näytekammioita. Kuvassa 3. näkyvää näytekammio A:ta kutsutaan referenssikammioiksi, eli se sisältää tunnettua CO<sub>2</sub>- ja H<sub>2</sub>O-pitoisuutta ja näytekammio B sisältää ulkoilmasta tullutta näyteilmaa. Infrapunasäteily kulkee

molempien kammioiden läpi ja säteily mitatetaan CO<sub>2</sub>- ja H<sub>2</sub>O -antureilla, niin että absorptio saadaan laskettua. [11.]

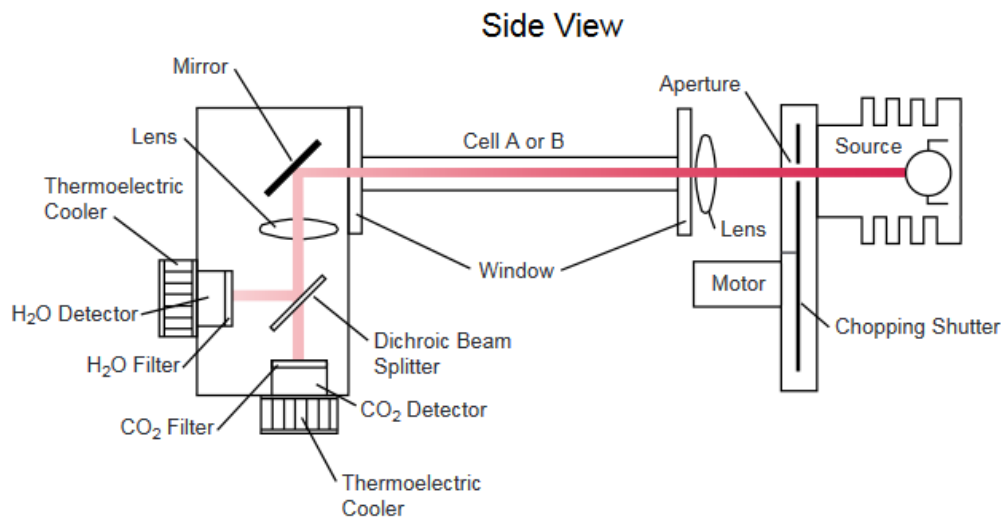


Figure 1-1. Schematic of LI-7000 optical path.

Kuva 3. LI-COR LI-7000 mittausanalysoitsattorin toiminta. [11.]

Infrapunalähde sisältää volframifilamenttia ja se on tyhjiopakattu pitkän iän (> 20000 tuntia) ja korkean stabiilisuuden takia. Optiset kammiot on nikkelöity, jotta ne kestävät pidempään kontaminaatiota. Näytekammioiden kautta CO<sub>2</sub>- ja H<sub>2</sub>O-pitoisuudet kulkeutuvat eteenpäin anturille dikroidisen säteenjakajan avulla. Optiset filtrit antureiden päällä on säädetty niin, että CO<sub>2</sub>-anturi tunnistaa 4,255 μm alueen absorption ja H<sub>2</sub>O-anturi 2,595 μm alueen absorption. Molemmat filtrit hylkivät hienosti muun alueen infrapunasäteilyä kuin haluttuja tarkkoja alueita. Näin analysoitsattori ei tunnista muiden kuin haluttujen aallonpituuksien pitoisuuksia. Kumpikin anturi on lyijyselenöity puolijohdevalmisteinen, mikä ei reagoi värinään. Anturit on viilennetty ja säädetty 5 °C lämpötilaan lämpösähköisillä jäähdyttimillä ja elektronisten piirien avulla antureita tarkkaillaan ja ylläpidetään jatkuvasti. Tämän seurauksena anturin toiminta on hyvin vakaata. Infrapunasäteily ohjautuu kaasukammioiden läpi kummallekin anturille linssin avulla. Keskittämällä maksimaalisen säteilyn määrän anturille saadaan aikaan maksimaalinen signaalin herkkyys. Tämä myös estää infrapunasäteilyä koskemasta tai

heijastumasta näytekammioiden seinistä. Sisäänrakennettu paineenmuunnin säätää mittaustulokset oikein vallitsevaan ilmanpaineeseen. [11.]

#### 4.2 Referenssilaitte Picarro G1301

Ilmatieteen laitoksen mittausanalyysointilaitteena Kumpulan mittausasemalla on Picarro G1301 ja sillä on mitattu hiilidioksidipitoisuutta vuodesta 2010 lähtien.



Kuva 4. Picarro G1301. [12.]

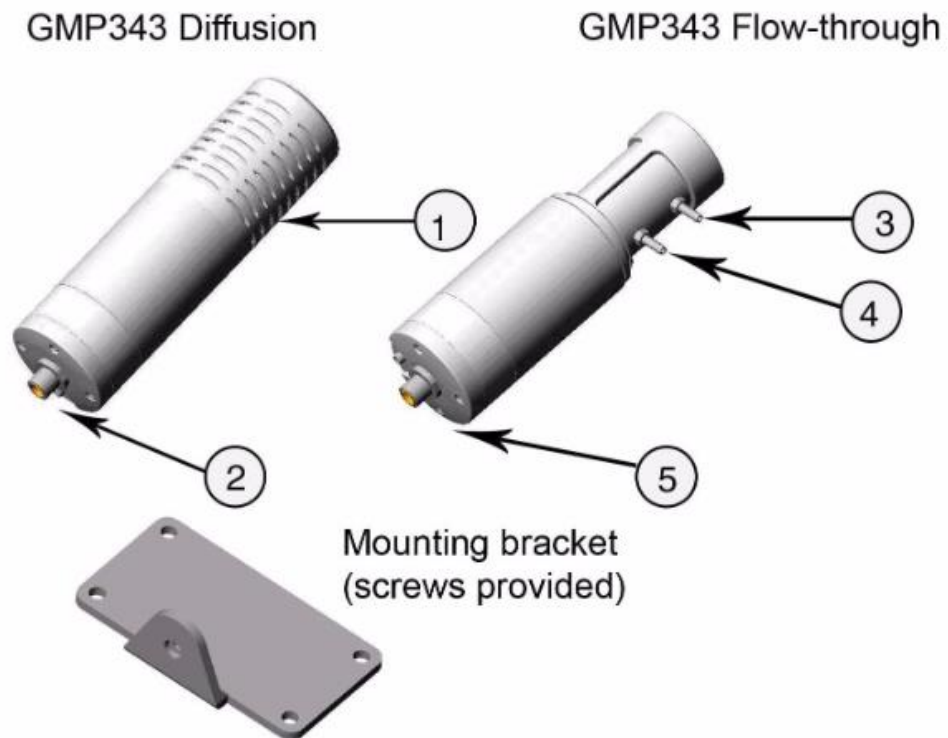
Picarro G1301 on kaasumainen mittausanalyysointilaitte, joka hyödyntää optista absorptiospektroskopiaa määrittelemään halutun kaasunäytteen pitoisuuden. Mittausmenetelmä perustuu CRDS-tekniikkaan (cavity ring down spectroscopy), jossa valo kiertää uudelleen monta kertaa näytteen läpi luomalla pitkäkestoisesta polusta valolle reagoida näytteen kanssa ja näin mahdollistaen erinomaisen tunnistusherkkyuden kompaktissa ja kestävässä instrumentissa.

Kuvassa 4. näkyy kaksi erillistä laitetta Picarro G1301:ssa. Alempaa osaa kutsutaan PVU:ksi (Power Vacuum Unit), mikä sisältää tietokoneen ja se muuttaa vaihtovirran tasavirraksi käytettävälle mittausanalysaattorille. PVU sisältää myös pumpun, minkä avulla kaasunäyte saadaan ohjattua instrumentille. Ylempää osaa kutsutaan DAS:ksi (Data Acquisition System), mikä sisältää spektrometrin ja näytekammion, mistä lähtee viesti spektrokopisessa muodossa tietokoneelle. DAS ohjaa koko systeemiä ja se muuntaa spektrokopisen datan kaasumaisen yhdisteen pitoisuudeksi. [12.]

#### 4.3 Mittaussensorit

HSY:llä on vuodesta 2019 lähtien ollut käytössä Vaisala GMP343 hiilidioksidisensoreita. Tässä tutkimuksessa tutkitaan kuinka tarkasti nämä hiilidioksidisensorit vertautuvat referenssimittausanalysaattoreihin. GMP343 hiilidioksidisensoreita on kahta erilaista tyyppiä: diffuusio- ja läpivirtaussensori. Molemmat näistä kahdesta erilaisesta hiilidioksidisensorista ovat olleet Mäkelänkadulla mittaamassa vuoden 2020 alusta lähtien ja niitä verrattiin Mäkelänkadulla LI-COR LI-7000 referenssimittausanalysaattoriin.

#### 4.3.1 Vaisala GMP343



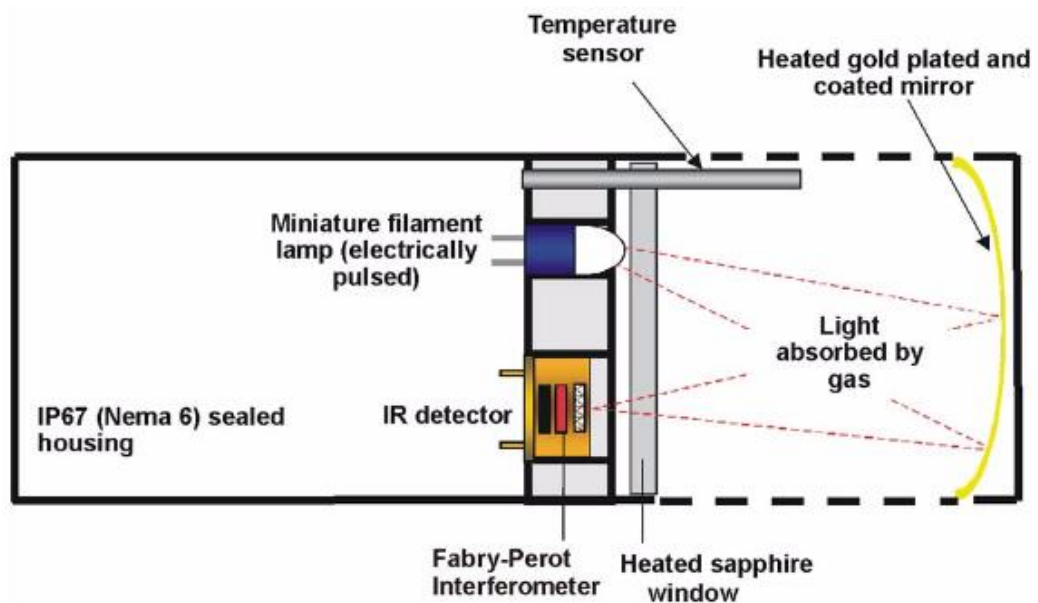
**Figure 1 Two Models of GMP343**

Kuva 5. Vaisala GMP343 kaksi eri mallia: diffuusio- ja läpivirtaussensori. [13.]

Kuva 5. esittää molemmat sensorityypit ja niiden eroavaisuudet. Diffuusiosensorissa on merkattu 1. filteri ja 2. sähköinen liitin. Läpivirtaussensorissa 3. on ulkoilmasta tulleen kaasunäytteen sisääntulo ja 4. on kaasunäytteen ulostulo. 5. on takalaippa, jota ei tule avata. Molempiin sensoreihin kuuluu mukana tullut kiinnikelevy. [13.]

#### 4.3.2 Vaisala GMP343 mittausmenetelmä

Mittausmenetelmä perustuu infrapunasensoriin ja Vaisalan omaan CARBOCAP-tunnistustekniikkaan. Miniatyyrihehkulampusta säteilevä valo heijastuu lämmitetystä kullatusta peilistä ja tarkentuu infrapunasensorille, mikä sijaitsee piipohjaisen Fabry-Perot interferometriin (FPI) takana. Tämä pieni FPI on viritetty sähköisesti niin, että sen mittausaallonpituus vaihtelee hiilidioksidikaasun absorptioalueen ja referenssialueen välillä. Kuvassa 6. esitetään Vaisala GMP343:n mittausmenetelmä. [13.]



Kuva 6. Vaisala GMP343 mittausmenetelmä. [13.]

FPI:n päästökaistan ollessa sama kuin hiilidioksidikaasun absorptioaallonpituus, infrapunasensorille saapuvan valon määrä vaimenee kaasuun tapahtuvan absorptio seurauksena. FPI:n mittauksen aallonpituus muutetaan referenssialueeksi ja näin infrapunasensori näkee vaimentumattoman valon intensiteetin. Näiden kahden signaalin suhde osoittaa valon imeytymisen kaasuun ja on verrannollinen kaasun pitoisuuteen. Sensorilla kestää noin kaksi sekuntia mitata tämä sekvenssi ja laskea mittaustulos. [13.]

#### 4.3.3 Diffuusio

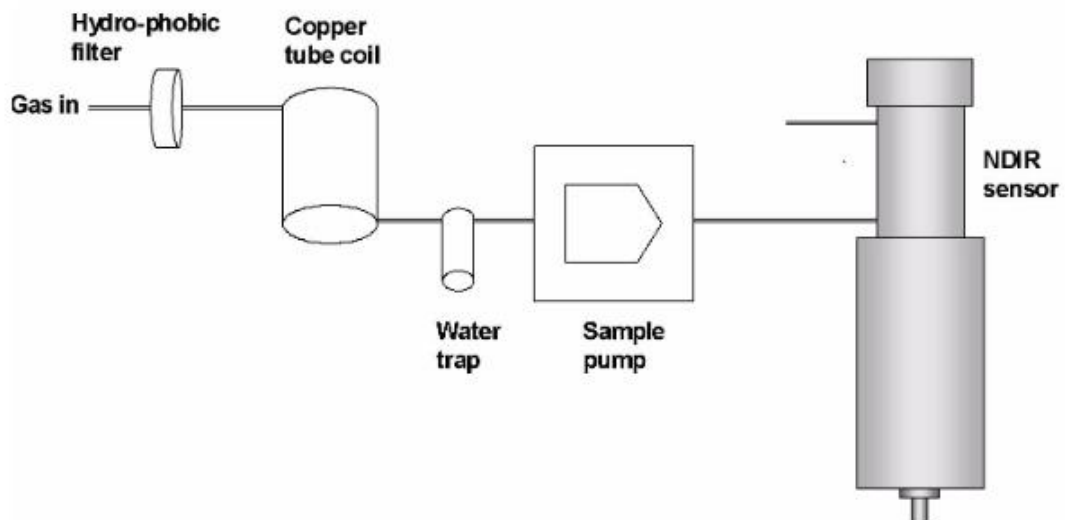
Erillistä näytteenottojärjestelmää ei tarvita diffuusiosensorille. Diffuusiosensorissa oleva diffuusiofiltri ja muovinen filtri suojaavat mittauskammiota kontaminaatiolta, liialta ja vedeltä. Kuvassa 9. esitetään diffuusiosensori HSY:n Mäkelänkadun mittausaseman katolla.

#### 4.3.4 Läpivirtaus

Läpivirtaussensorissa ei ole diffuusiofilteriä mittauskammioon ja optiikkaa ei ole mahdollista puhdistaa. Tästä syystä näytekaasu tulee aina filteröidä ja kuivattaa ennen kuin se on päässyt mittauskammioon. Hydrofobinen diffuusiofiltri tarvitaan ennen

mittauskammion sisäänpääsyä, jotta partikkelien ja veden pääsy estetään pääsemästä sensorille. Diffuusiofilteri tulisi vaihtaa usein, jotta virtaus olisi riittävä.

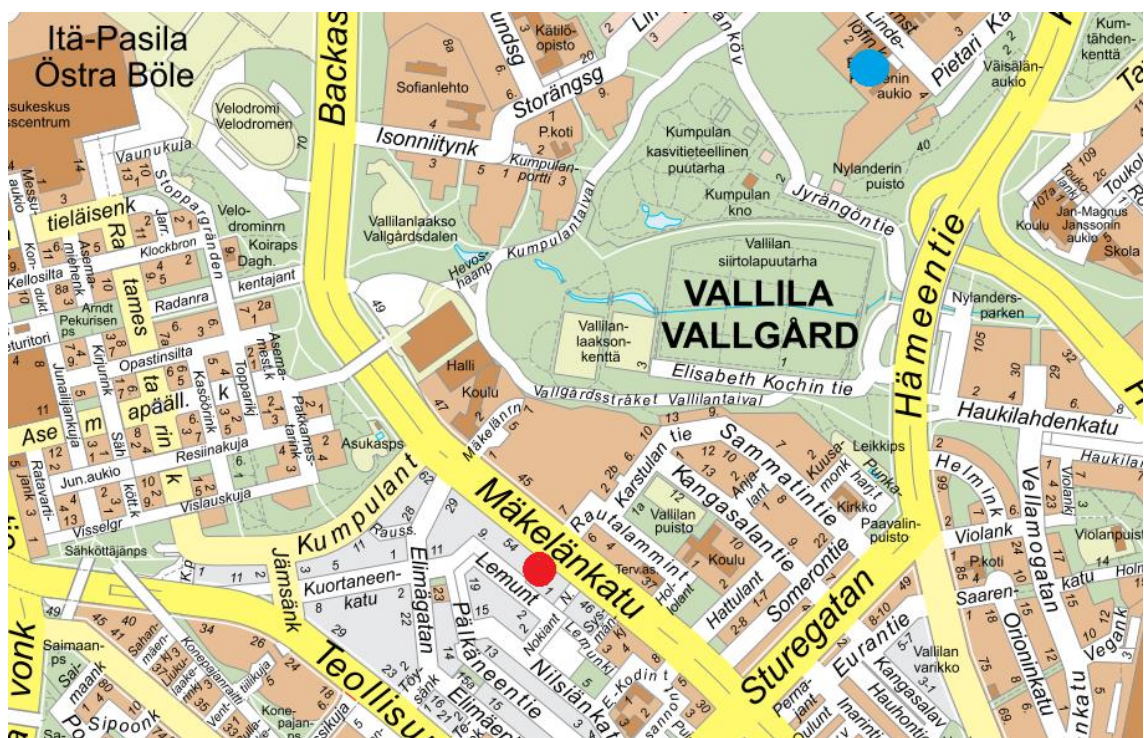
Kosteissa ympäristöissä on tärkeitä välttää veden kondensoitumista sisälle mittauskammioon. Tämä on estettävissä, kun näyteilma kuivataan. Yleisimmin käytetty menetelmä kuivaukselle on näyteilman viilentäminen ja uudelleenlämmitys. Yksinkertaisimmillaan käytetään jäähdytyspatteria ja kerätään vesi talteen, minkä jälkeen lämmitetään näyteilmaa. Tämän tekniikan ideana on, että saadaan näyteilman kosteus kerääntymään vesikammion seinämiin ja laskemalla ilmankosteutta lämmittämällä näyteilmaa. HSY:llä hyödynnettiin etolometri AE33:n näyteilman kuivausta ja läpivirtaussensorin näyteilma kulki AE33:n läpi, missä näyteilma saatiin kuivattua. Kuvassa 7. näkyy esimerkki, kuinka läpivirtaussensorin näytteenotto toteutetaan yksinkertaisimmillaan. Läpivirtaussensoriin on liitetty pumppu, mikä imee näyteilman hydrofobisen filterin läpi kuparilla päällystettyyn kammioon, minkä seinämiin näyteilman kosteus ja vesi kondensoituu. Vesi valuu vesikammion pohjalle. Lämmitetty ja kuivatettu näyteilma kulkeutuu pumpun avustuksella läpivirtaussensorille. [13.]



Kuva 7. Esimerkki Vaisala GMP343 läpivirtaussensorin näytteenotosta. [13.]

## 5 Mittauspaikat

Tutkimuksessa hiilidioksidimittauksia tehtiin erilaisissa mittauspaikoissa, jotta saataisiin parempaa kokonaiskuva millaisia hiilidioksidipitoisuuksia Helsingin alueella on. Ensimmäisen mittausjakson aikana mitattiin HSY:n Mäkelänkadun mittausasemalla osoitteessa Mäkelänkatu 50. Mittauspaikan koordinaatit (ETRS-GK25FIN) ovat: 6675956 : 25497341. Hiilidioksidimittausten näytteenottokorkeus: 4 m maanpinnasta ja 29 m merenpinnasta. Kuvassa 8. näkyy punaisella pallolla merkittynä mittausaseman sijainti karttakuvassa. Mäkelänkadun mittausaseman pitoisuudet edustavat tasoa, jolle ihmiset altistuvat Helsingin vilkasliikenteisissä katukuiluissa. [14.]



Kuva 8. HSY:n Mäkelänkadun mittausaseman ja Ilmatieteen laitoksen Kumpulan SMEAR III mittausaseman sijainti. Karttapohjan lähde: Helsingin karttapalvelu 2021.

Toisessa mittausjaksossa mitattiin HSY:n Mäkelänkadun mittausaseman lisäksi Ilmatieteen laitoksen Kumpula SMEAR III mittausasemalla osoitteessa Pietari Kalmin kadulla. Mittauspaikan koordinaatit ovat: 6012233 : 2457649. Hiilidioksidimittauksen näytteenottokorkeus: 26 m meren pinnasta. Kumpulan SMEAR III mittausaseman

pitoisuudet edustavat kaupungin taustapitoisuuden tasoa. Kuvassa 8. näkyy sinisellä pallolla merkittynä Kumpula SMEAR III -tutkimusasema. [15.]



Kuva 9. Diffuusiosensori HSY:n Mäkelänkadun mittausaseman katolla.

Kolmannessa mittausjaksossa mitattiin kolmessa eri mittauspaikassa hiilidioksidisensoreilla, joita olivat Hernesaari (osoite Hernesaarenlaituri), Kyläkunnantie (osoite Kyläkunnantie 19) ja Pirkkola (osoite Pirjontie 43). Näiden mittauspaikkojen tuloksia verrattiin referenssimittausanalysointoreihin Mäkelänkadulla ja Kumpulassa. Hernesaari kuvastaa mittauspaikkana Helsingin eteläosassa sijaitsevaa meren rantaa,

joka on sataman vaikutusalueella. Kyläkunnantie ja Pirkkolan mittauspaikat kuvastavat esikaupungin pientaloalueita, missä suurinosa päästöistä tulee puunpientalosta ja liikenteestä. Kyläkunnantien mittauspaikasta vain 60 metriä pohjoiseen sijaitsee erittäin vilkasliikenteinen Kehä I, minkä vuoksi liikenteen päästöillä on suurempi vaikutus hiilidioksidipitoisuuksiin Kyläkunnantiellä kuin Pirkkolassa. Kaikki mittauspaikat vielä eriteltynä:

#### **Mäkelänkatu (HSY)**

- Osoite: Mäkelänkatu 50
- Parametrit: CO<sub>2</sub> (LI-COR LI-7000, Vaisala GMP343 diffuusio- ja läpivirtaussensori), NO<sub>x</sub> (Horiba APNA-370)
- Mitatut pitoisuudet edustavat tasoa, jolle ihmiset altistuvat Helsingin vilkasliikenteisissä katukuiluissa. Näytteenottokorkeus 4 m maanpinnasta ja 29 m merenpinnasta. Mitattuihin pitoisuuksiin vaikuttaa pääasiassa viereisen pääkadun liikenne ja katupöly. [14.]

#### **Kumpula SMEAR III (Ilmatieteen laitos)**

- Osoite: Pietari Kalmin katu
- Parametrit: CO<sub>2</sub> (Picarro G3101)
- Mittausaseman pitoisuudet edustavat kaupungin taustapitoisuuden tasoa. Näytteenottokorkeus 26 m merenpinnasta. [15.]

#### **Kallio (HSY)**

- Osoite: Brahen kenttä
- Parametrit: NO<sub>x</sub> (Horiba APNA-370)
- Mitatut pitoisuudet edustavat tasoa, jolle ihmiset altistuvat yleisesti Helsingin keskustan asuinalueilla. Mittausasemaa kutsutaan kaupunkitausta-asemaksi. Näytteenottokorkeus 4 m maanpinnasta ja 18 m merenpinnasta. [16.]

### **Pasila (HSY)**

- Osoite: Pasilankatu 2
- Parametrit: lämpötila ja kosteus (Vaisala HMP 155 RH/T), ilmanpaine (Vaisala BARO-1QML)
- Sääasema, joka edustaa Helsingin keskustan sääolosuhteita. Näytteenottokorkeus 78 m merenpinnasta. [17.]

### **Hernesaari (HSY)**

- Osoite: Hernesaarenlaituri
- Parametrit: CO<sub>2</sub> (Vaisala GMP343 diffuusiosensori)
- Mittauspaikan pitoisuudet edustavat meren rannan ja satama-alueen pitoisuustasoa. Pitoisuuksiin vaikuttaa liikenne satamassa ja merialueen liikenteestä aiheutuvat päästöt. Näytteenottokorkeus 2,5 m merenpinnasta.

### **Kyläkunnantie (HSY)**

- Osoite: Kyläkunnantie 19
- Parametrit: CO<sub>2</sub> (Vaisala GMP343 diffuusiosensori)
- Mittauspaikan pitoisuudet kuvastavat esikaupungin pientaloalueita, missä suurinosa päästöistä tulee puunpienpoltosta ja liikenteestä. Kyläkunnantien mittauspaikasta 60 metriä pohjoiseen sijaitsee erittäin vilkasliikenteinen Kehä I, millä on vaikutusta pitoisuustasoon. Näytteenottokorkeus 31 m merenpinnasta.

### **Pirkkola (HSY)**

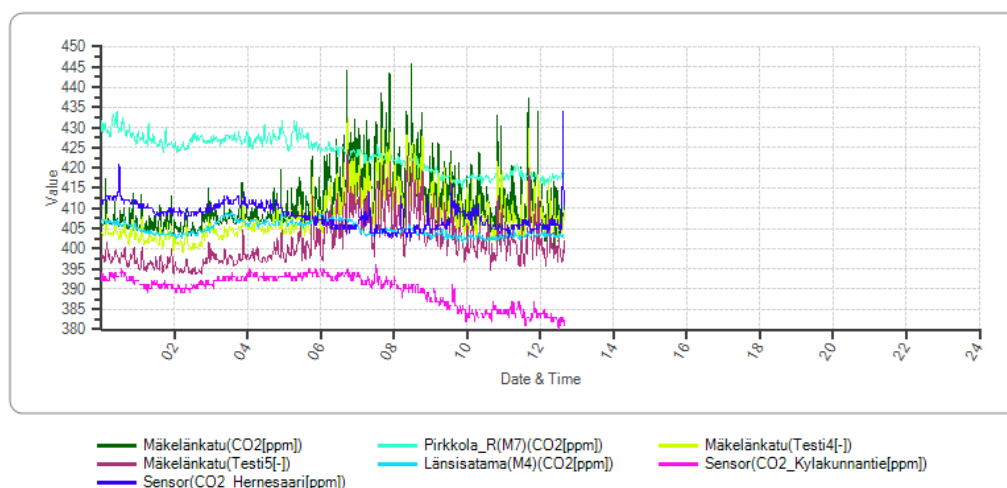
- Osoite: Pirjontie 43
- Parametrit: CO<sub>2</sub> (Vaisala GMP343 diffuusiosensori)
- Mittauspaikan pitoisuudet kuvaavat tasoa, jolle ihmiset altistuvat asuessaan Helsingissä vanhalla pientaloalueella. Pientaloalueiden ilmanlaatuun vaikuttavat yleensä tulisijojen käyttö ja katupöly. Näytteenottokorkeus 21 m merenpinnasta.

## 6 Mittaustulosten tiedonkeruu ja käsittely

Tiedonkeruu HSY:n eri mittauspaikoista tapahtui asematietokoneelle Mäkelänkadulla ja kolmella eri sensoripisteellä (Hernesaari, Kyläkunnantie, Pirkkola) erilliselle sensoritietokoneelle. Näiltä erillisiltä asematietokoneilta mittaustulokset siirtyivät vielä eteenpäin HSY:n tiedonkeruujärjestelmään. Mittaustuloksia käsittelevä ohjelma on Envitech –nimisen yrityksen Envidas –ohjelmisto. Mittaustulokset siirtyivät tietokoneille 5 sekunnin välein, muodostaen minuuttiarvoja. Minuuttiarvoista tietokanta laski tunti- ja kuukausikeskiarvoja, joita tässä tutkimuksessa on hyödynnetty. Envidas näyttää mittaustulokset aikaleiman kanssa numeerisessa ja graafisessa muodossa.

Mittaustulokset oli kätevästi siirrettävissä excel-muotoon tarkempaa tulosten korjaamista ja taulukkolaskentaa varten, mitä tutkimuksessa pääsääntöisesti tehtiin. Mittaustuloksista poistettiin ensimmäisenä erilaiset käyttöhäiriöt, mitkä liittyivät mm. mittalaitteiden vikaantumisiin, huoltotöihin, sähkökatkoihin ja virheellisiin mittaustuloksiin. Exceliä hyödynnettiin paljon, jotta virheelliset mittaustulokset saatiin pois mittausdatasta.

Selected Date 10/09/2020 00:01 11/09/2020 00:00 Group CO2 Time Base 1 Report Type Group



Kuva 10. Hiilidioksididatan mittaustulokset Envista ARM -ohjelmistossa.

Kuvassa 10. havainnoidaan yhden vuorokauden aikana esiintyviä minuuttipitoisuuksia hiilidioksidatassa eri mittauspaikoista. Kuvassa x-akselilla esiintyy aika eli vuorokauden tunnit ja y-akselilla mitattu hiilidioksiidipitoisuus ppm:nä. Kuvasta nähdään selvästi, että eri mittauspaikkojen välillä on suuriakin eroja mittaustuloksissa. Suurin vaihteluväli mittaustuloksissa on Pirkkolan ja Kyläkunnantien sensorien välillä, mikä on noin 40 ppm.

Envidas-ohjelmisto pystyy kätevästi tuottamaan mittaustulokset graafisessa muodossa, mutta mittaustuloksia ei pääse varsinaisesti ohjelmalla muokkaamaan. Tämän takia mittaustulokset piti siirtää ohjelmistosta excel-muotoon jatkokäsittelyä varten. Varsinainen mittaustulosten seuraaminen kuitenkin tapahtuu Envitas ARM (Air Resources Manager) -ohjelmistossa ja siitä on saatavilla työpöytä-ohjelman lisäksi myös sovellus älypuhelimelle ja verkkoseläin-versio. Mittaustuloksia seurattiin pääpiirteittäin päivittäin, jotta pystyttiin näkemään tapahtuiko mittalaitteissa vikatilanteita. Varsinainen mittausdatan analysointi ja tulkinta tehtiin kuitenkin vasta tässä tutkimuksessa.

## 7 Mittaustulosten laskenta ja käsittely

Tehdyssä tutkimuksessa saatiin mittaustuloksista tunti- ja vuorokausiarvoja yhteensä kahdelta referenssimittausanalysaattorilta ja viideltä eri hiilidioksidisensorilta. Mittausjaksot olivat ajalta 1.1.2019-1.2.2021, riippuen mittausjaksosta. Kaikki kolme eri mittausjaksoa kestivät vähintään vuoden verran, jotta mittaustuloksista oli mahdollista toteuttaa kuukausikeskiarvot ja näin saada verrattua eri vuodenaikojä ja nähdä kuinka hiilidioksidipitoisuudet vaihtelevat vuodenaajan mukaan. Tuntikeskiarvojen tutkimisessa tehtiin erilliset kuvaajat vuodenaikojen mukaan. Tämän lisäksi tehtiin vielä erilliset kuvaajat arki- ja viikonlopputunneille, jotta nähtiin onko niissä suurta eroa mittaustuloksissa. Hyväksytyissä mittaustuloksissa oli vähintään 75 %, mikä on oltava jatkuvatoimisissa mittauksissa. Sääolot huomioitiin tietyssä määrin mukaan mittaustuloksiin ja pieniä korjauksia jouduttiin tämän takia tekemään mittaustuloksille sääoloista johtuvien tekijöiden perusteella.

## 8 Mittausten jaksot ja mittaustulokset

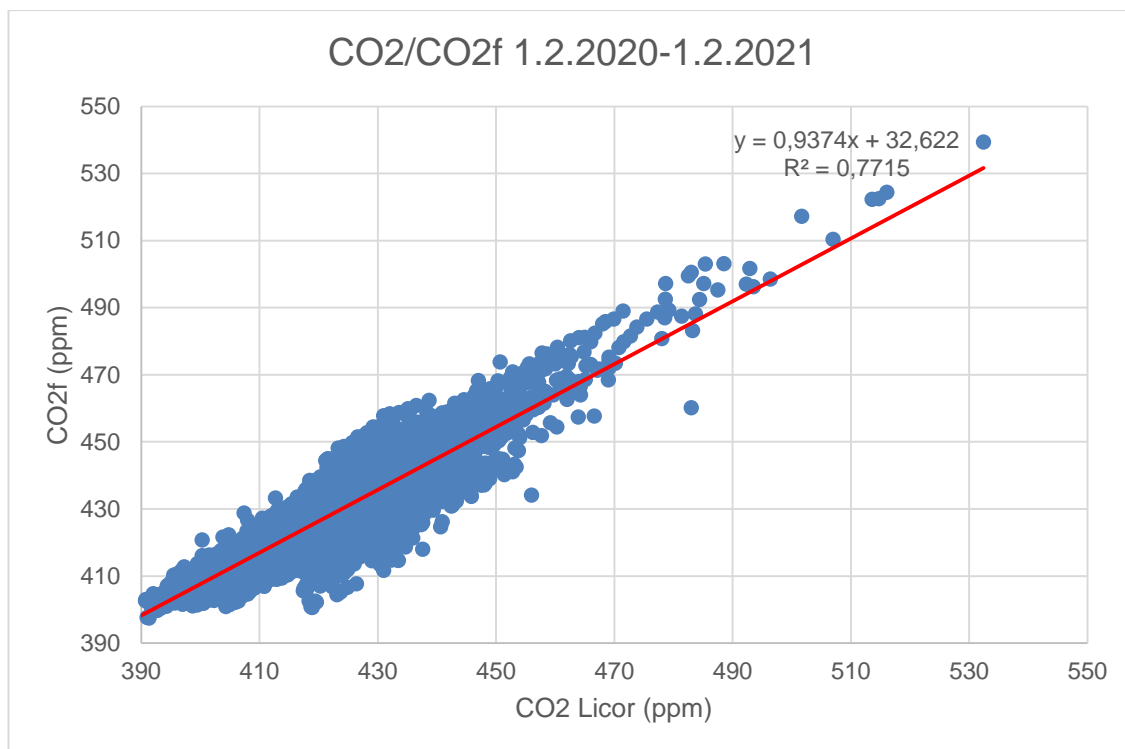
Tutkimuksessa vertailtiin yhteensä kolmea eri mittausjaksoa. Kaikki kolme mittausjaksoa olivat vähintään vuoden mittaisia, jotta saatiin täydellinen kokonaiskuva vuodenaikaisvaihtelusta. Mittausjaksojen ajankohdat vaihtelivat sen mukaan, miten mittaussensoreita oltiin saatu paikalleen eri mittauspaikkoihin. Tämän takia eri mittausjaksojen aikasarjat eivät mene täysin päällekkäin toistensa kanssa. Jokaisesta kolmesta eri mittausjaksosta tehtiin erilliset mittaustulosten analyysit ja vertailut.

### 8.1 Ensimmäinen vertailumittausjakso

Ensimmäisessä mittausjaksossa vertailtiin Mäkelänkadulla kahta erilaista hiilidioksidisensoria (diffuusio- ja läpivirtaussensori) referenssimittausanalyysaattoriin LICOR LI-7000:n. Mittausajanjaksoksi valittiin 1.2.2020-31.1.2021, koska toinen hiilidioksidisensoreista saatiin mittaamaan Mäkelänkadulle vasta tammikuussa 2020. Tämän vuoksi yksittäisen kalenterivuoden (2020) mittausjakson vertailu ei onnistunut.

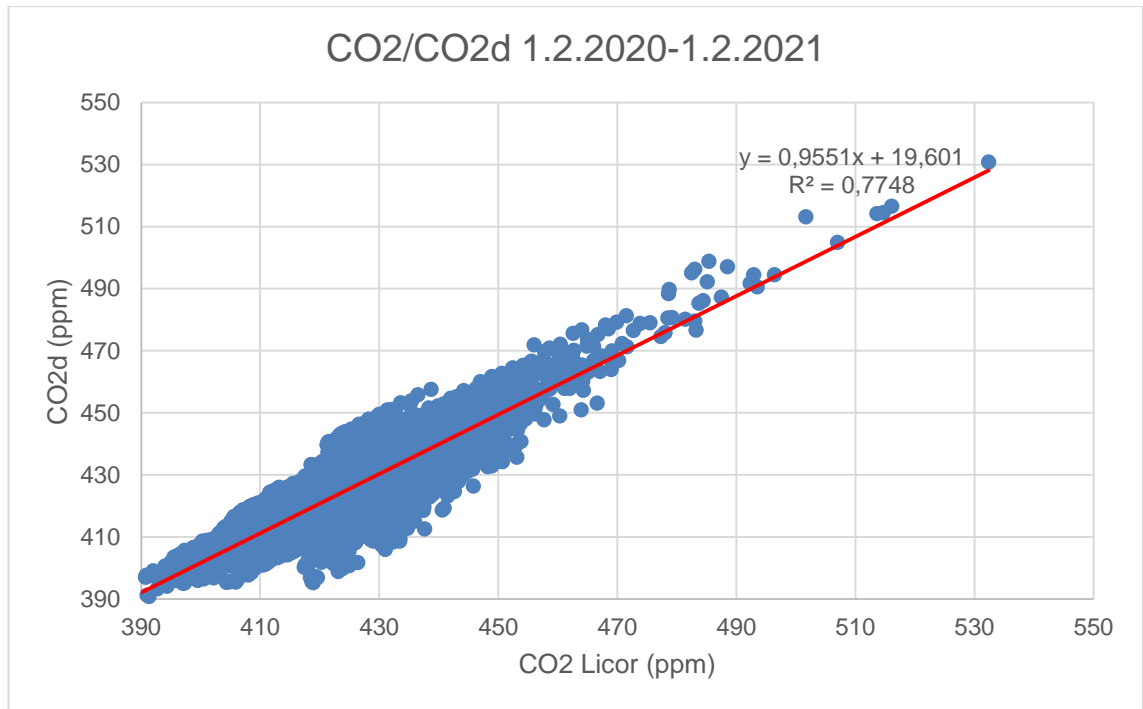
#### 8.1.1 Ensimmäisen mittauspaikan referenssilaitteen vertailu mittaussensoreihin

Mittausdatalle tehtiin regressioanalyysi ja katsottiin, kuinka kaksi erilaista hiilidioksidisensoria vertautuvat keskenään toisiinsa ja kuinka ne vertautuvat referenssimittausanalyysaattoriin.

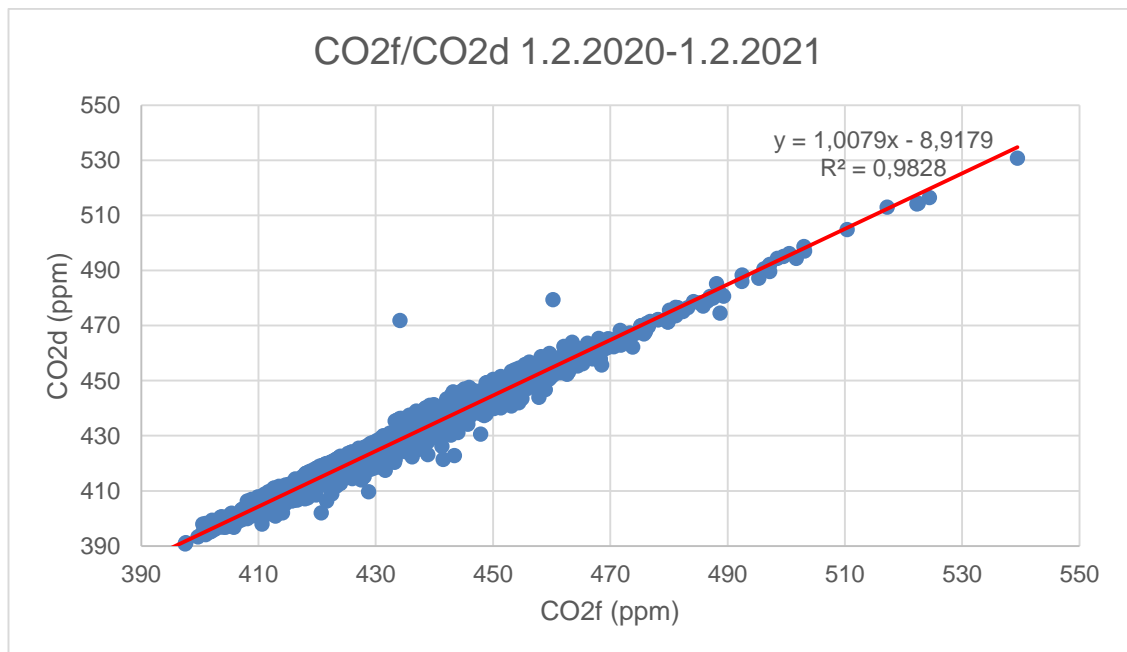


Kuva 11. Läpivirtausensorin CO<sub>2</sub>-tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssimittausanalyysointiin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora.

Kuvassa 11. näkyy läpivirtausensorin vertautuminen referenssimittausanalyysointiin. Kuvan keskellä menevä punainen suora viiva kertoo kuinka kaksi eri laitetta vertautuvat toisiinsa. Kuvassa x-akselilla on mittausanalyysointi LI-COR LI-7000 ja y-akselilla läpivirtausensori. Mitä lähempänä pisteparvet ovat punaista suoraa viivaa, sitä paremmin laitteet korreloivat keskenään. Selitysasteeksi eli R<sup>2</sup> analyysin perusteella on saatu 0,7715, mikä kertoo siitä että mittalaitteet eivät korreloi kovinkaan hyvin keskenään. Tästä lähdettiin eteenpäin selvittämään, että mistä pistearvet ja mittaustulosten erilaisuus johtuivat. Kuvan 12. mukaan on nähtävissä lähes samanlainen korrelaatio diffuusisensorilla kuin aikaisemmin verratulla läpivirtausensorilla, kun katsotaan kuinka ne vertautuvat referenssimittausanalyysointiin.



Kuva 12. Diffuusiosensorin CO<sub>2</sub>-tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssimittausanalysaattoriin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora.

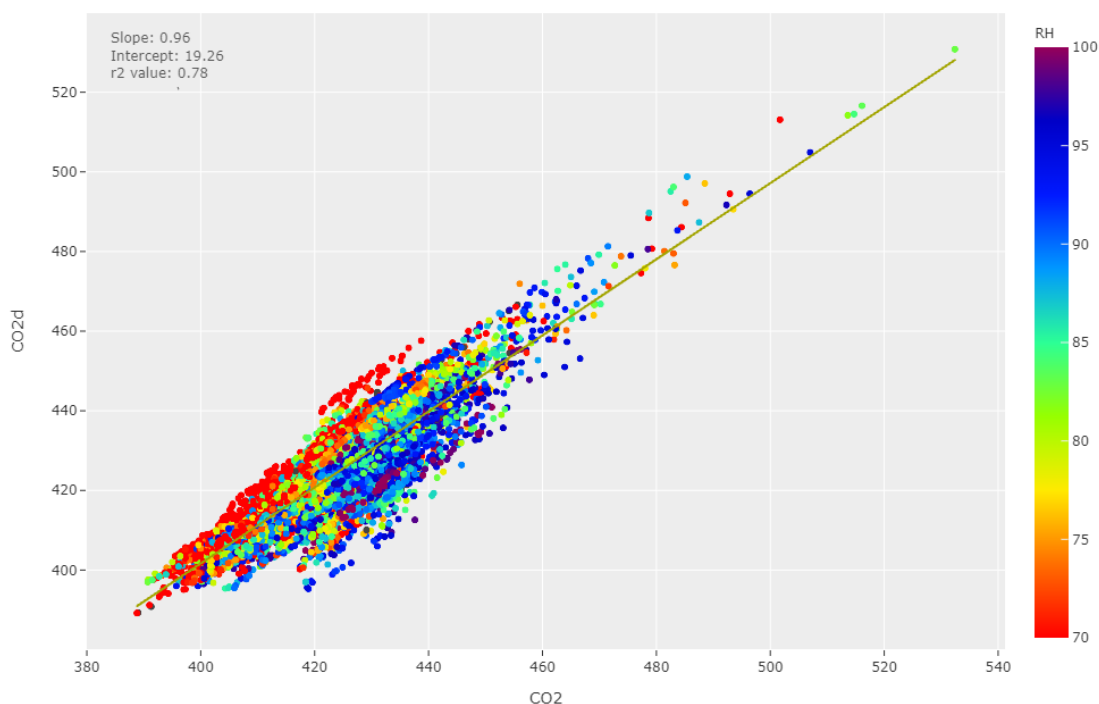


Kuva 13. Diffuusio- ja läpivirtaussensorin CO<sub>2</sub>-tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna toisiinsa regressiosuoralla.

Vaikka sensorit eivät ensimmäisten vertailujen perusteella vertautuneet hyvin referenssimittausanalyysointiin, oli positiivista huomata, että keskenään hiilidioksisensorit vertautuvat hyvin toisiinsa. Kuvassa 13. nähdään, että selitysasteeksi  $R^2$  on saatu 0,98, mikä kertoo siitä että selitysaste on erittäin korkea ja tutkitut mittaustulokset vertautuvat hyvin toisiinsa.

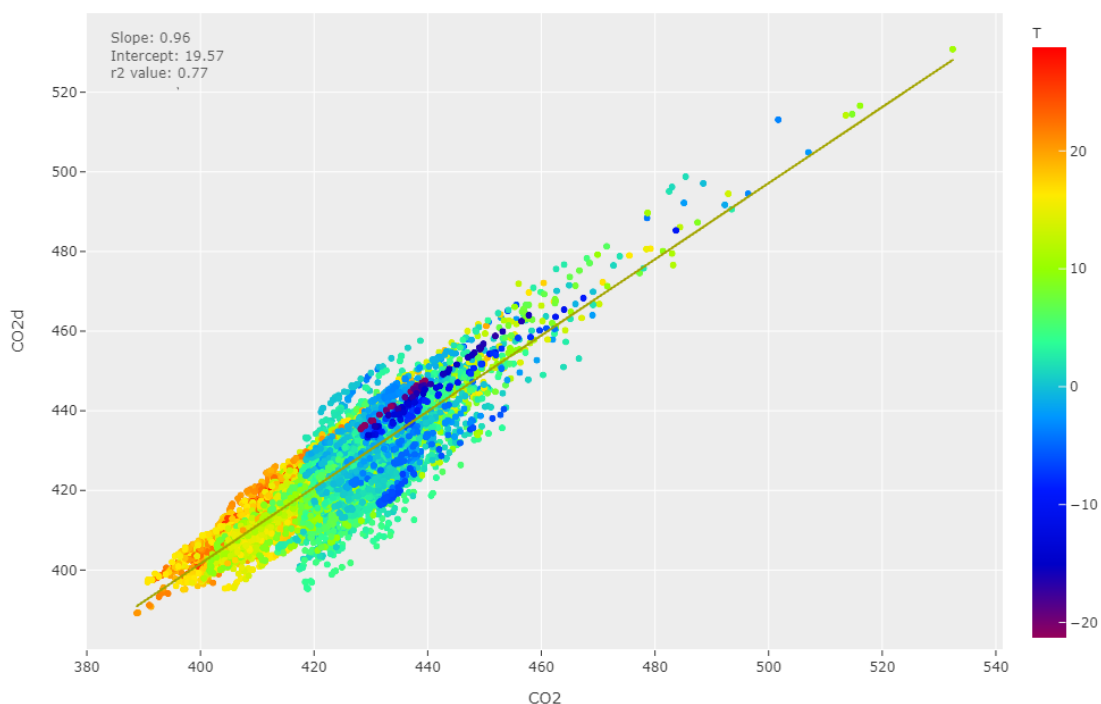
Kuvien 11. ja 12. pohjalta tehtiin vielä erikseen kuukausikohtaiset regressiosuorat, jotta päästiin paremmin selville millä ajanjaksolla mittausanalysointiin ja sensorien mittaustulokset vaihtelevat eniten. Diffuusiosensorin kuukausikohtaiset kuvat löytyvät erikseen vielä liitteestä 1. Kuukausikuvista saatiin selville, että suuret mittauserot hiilidioksidipitoisuuksissa sijoittuvat keväälle ja talvelle vuonna 2020. Kesäaikaan ja syksyllä laitteet mittasivat keskenään paljon paremmin kuin mitä kevät- ja talvisaikaan. Liitteessä 1. on esimerkkinä kuukaudet huhtikuu ja elokuu vertailussa, mistä näkee että huhtikuun selitysaste  $R^2$  on ollut 0,37 ja elokuussa 0,93 vertaillessa läpivirtausensoria referenssimittausanalyysointiin.

Kuukausivertailuiden pohjalta haluttiin selvittää mistä näin suuri ero johtui. Vuodenaikaisvaihtelun pohjalta päädyttiin lähteä tutkimaan voisiko sääoloilla olla vaikutusta mittaustulosten eroon. Sääparametreiksi valittiin ilman suhteellinen kosteus (%), lämpötila (°C), ilmanpaine (hPa) sekä LI-COR LI-7000 mittaama vesimäärä (mmol/mol). Tarkoituksena oli tehdä kuukausikohtaisia regressiosuoria niin, että kolmanneksi muuttujaksi kuvaan saataisiin jokin sääparametri. Tämä ei onnistunut suoraan Excelin regressio työkalulla, vaan tarvittiin uutta tietojenkäsittelyohjelmaa, mikä mahdollistaisi tämän. Python osoittautui tähän helpoimmaksi vaihtoehdoksi ja pienellä avustuksella Python-ohjelmointikieleen ja sen käyttämiseen sain piirrettyä uudet kuvaajat, missä kolmantena muuttujana oli sääparametri. Tehtiin siis neljän kuvan sarja, missä jokaisessa oli kolmantena muuttujana jokin neljästä eri sääparametrista. Seuraavat kuvasarjat on toteutettu diffuusiosensorille, koska siinä oli hieman parempi korrelaatio mittausanalysointiin kanssa kuin jos olisi verrattu läpivirtausensoria.



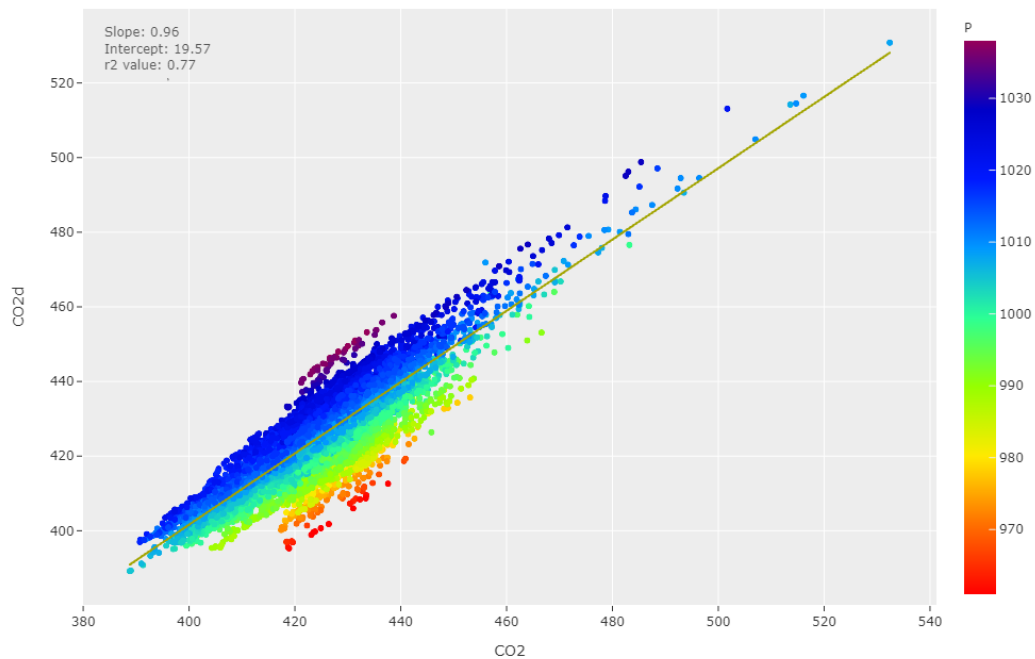
Kuva 14. Diffuusiosensorin tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssianalysaattoriin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora. Kolmantena värikoodattuna muuttujana on suhteellinen kosteus (%).

Kuvassa 14. x-akselilla on LI-COR LI-7000 pitoisuus, y-akselilla diffuusiosensorin pitoisuus ja kolmantena muuttujana suhteellinen ilmankosteus. Ilmankosteuden mittausasteikko on säädetty alkamaan 70 % ja päättymään 100 %. Kuvasta on nähtävissä, että läpivirtaussensori yliarvioi mittaustuloksia matalammilla kosteuspitoisuuksilla. Punaiset pitoisuuspistejoukot näkyvät alhaisena ilmankosteutena. Kuvasta on toisaalta tulkittavissa myös se, että korkeilla ilmankosteuden arvoilla pitoisuusjoukot eroavat toisistaan, mikä näkyy sinisellä ja violetillä värillä. Vihreä väri eli ilman suhteellisen kosteuden ollessa noin 80-90 % pitoisuudet sijoittuvat hyvin regressiosuoralle.



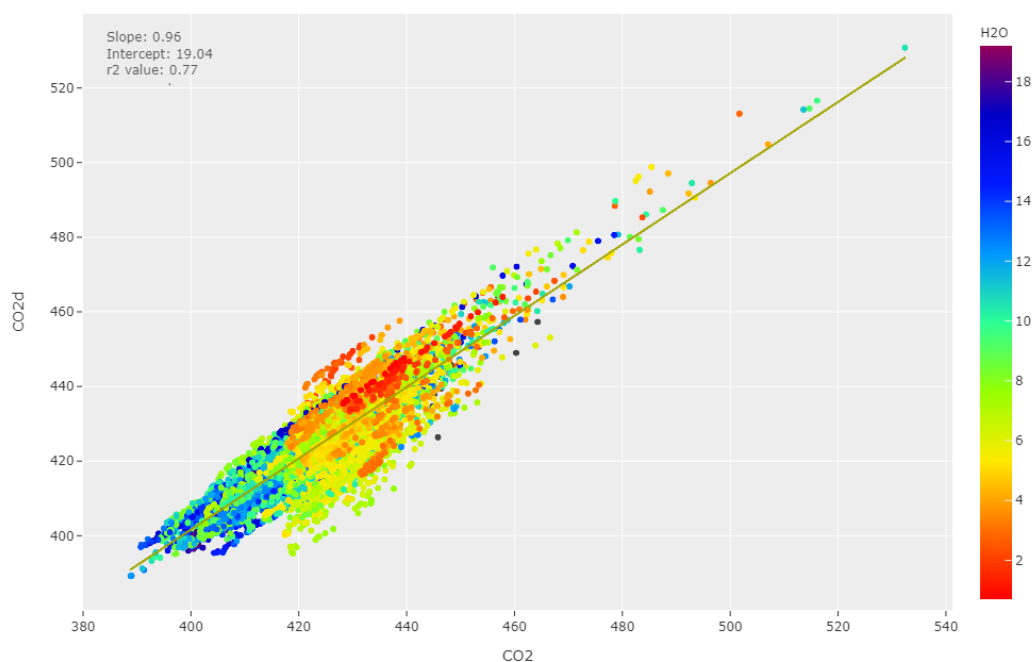
Kuva 15. Diffuusiosensorin tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssianalysaattoriin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora. Kolmantena värikoodattuna muuttujana on lämpötila (°C).

Kuvassa 14. kolmantena muuttujana on lämpötila ja asteikko on säädetty noin Suomessa vallitseviin sääolosuhteisiin eli -20 - +30 °C. Punainen väri osoittaa korkeimman lämpötilan ja sininen sekä liila kaikista viileimmän lämpötilan. Katsottaessa lämpötilaa kolmantena muuttujana, kuvassa 15. näkyy oranssi pisteparvi regressiosuoran yläpuolella lämpötilan ollessa noin +20 °C tietämillä. Näyttää siltä, että alhaisilla pitoisuuksilla ja sään ollessa lämmin pitoisuudet eivät täysin kohtaa. Kuvasta ei kuitenkaan voi tehdä täysin selvää johtopäätöstä, onko siinä jokin selkeä pitoisuuspistejoukko mikä erottuisi regressiosuoran lähetyvillä olevista pitoisuuksista.



Kuva 16. Diffuusiosensorin tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssianalysaattoriin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora. Kolmantena värikoodattuna muuttujana on ilmanpaine (hPa).

Kolmantena muuttujana oleva ilmanpaineen asteikko on säädetty alkamaan 960 hPa ja korkeimmillaan se on 1040 hPa. Tarkasteltaessa kuvaa 16. voidaan nähdä selkeästi, että matalalla ja korkealla vallitsevalla ilmanpaineella löytyy pitoisuusjoukot mitkä eroavat muista mittaustuloksista. Tämä oli tärkeä huomio, sillä tämän pohjalta ruvettiin miettimään ilmanpaineen mittausta sensorissa ja mittausanalysaattorissa. Mittausanalysaattorissa on oma ilmanpaineen mittausta, mikä korjaa mittaustulokset vallitseviin olosuhteisiin. Sensorissa on käytössä oletusarvona ilmanpaineelle 1013 hPa. Mittaustuloksia tulisi siis korjata, niin että saataisiin myös ilmanpaine huomioitua mukaan sensorien mittaustuloksiin.



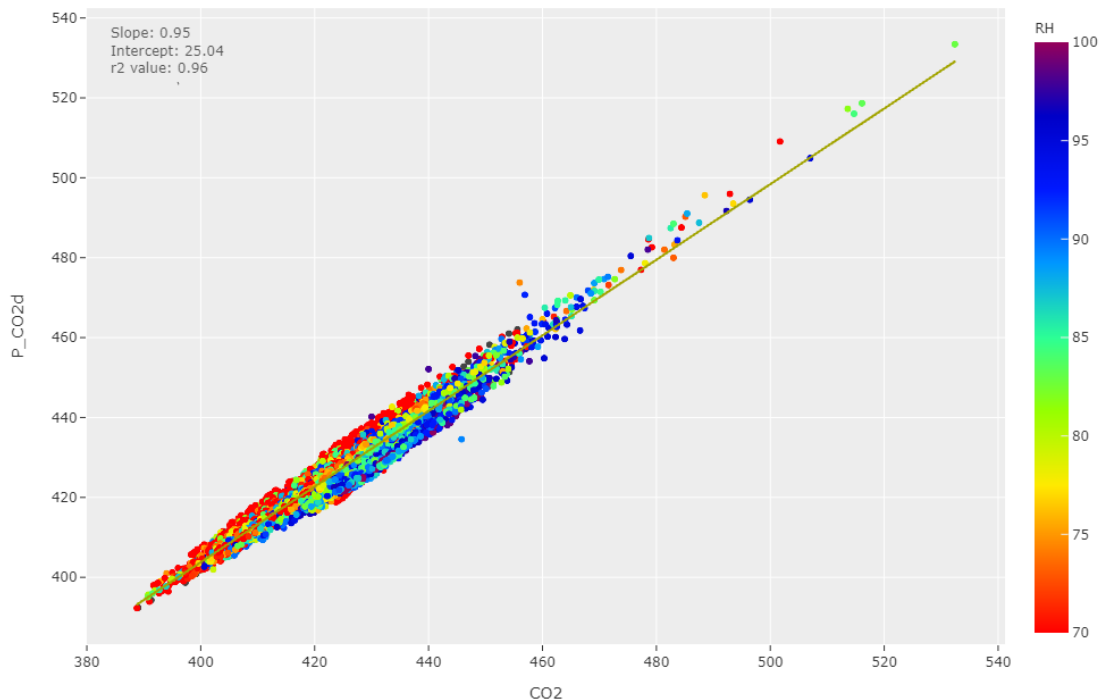
Kuva 17. Diffuusiosensorin tuntipitoisuudet (ppm) verrattuna referenssianalysaattoriin sekä aineistoon sovitettu regressiosuora. Kolmantena värikoodattuna muuttujana on vesimäärä (mmol/mol).

Vesimäärä on LI-COR LI-7000 mittausanalysaattorin laskema veden kokonaismäärä. Kuvasta 17. ei voi tehdä mitään suuria poikkeavuuksia pitoisuuspistejoukossa, missä mittaustulokset eroaisivat toisistaan.

Näiden neljän kuvasarjan pohjalta päädyttiin tutkia ilmanpaineen muutosta tarkemmin, koska kuvassa 16. näkyy selvästi pitoisuuspistejoukot jotka eroavat tietyissä pitoisuuksissa. Sensorien ilmanpaineelle tehtiin korjaukset niin, että laskettiin HSY:n Pasilan sääaseman ilmanpaineelle korjauskerroin. Jouduimme käyttämään Pasilan sääaseman tuloksia, kun huomasimme, että Mäkelänkadun sääaseman tulokset olivat epäilyttäviä. Korjauskertoimessa laskettiin ensin Pasilan sääaseman ja Mäkelänkadun mittausaseman korkeusero ja se jaettiin ilmanpaineen muutoksella. Korkeus vaikuttaa ilmanpaineeseen niin, että ilmanpaine laskee ylöspäin mentäessä. Maanpinnan lähellä oltaessa 8 metrin nousu korkeussuunnassa merkitsee noin 1 hPa vähennystä ilmanpaineessa. Jotta sensoreille saatiin tarkka ilmanpaineen korjaus, oli huomioitava

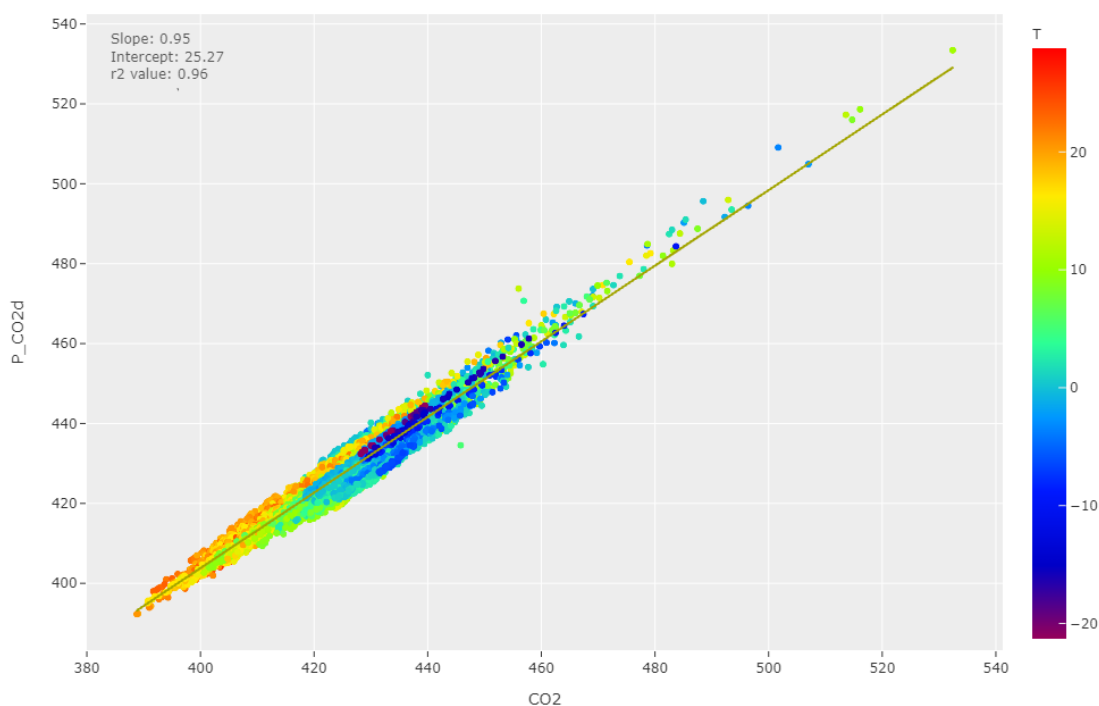
korkeuseron muutos ilmanpaineessa. Korjauskertoimen määrittämisen jälkeen tehtiin uudet kuvaajat.

Esimerkki korkeus- ja painekorjauksesta: Jos Mäkelänkadulla mitattu pitoisuus on ollut 415,7 ppm, niin ensimmäisenä on huomioitava Pasilan sääaseman ja Mäkelänkadun mittausaseman korkeuserot. Pasilan sääaseman korkeus on 78 metriä meren pinnasta ja Mäkelänkadun mittausaseman 29 metriä. Näiden erotus eli 49 m jaetaan luvulla 8, jolloin saadaan arvoksi 6,1 hPa. Tämä kyseinen paine-ero vähennetään Pasilan sääaseman paineesta, joka on ollut samalla minuutilla 987,5 pHa eli arvoksi tulee 981,4 hPa. Sensoriin on asetettu oletusilmanpaineeksi 1013 hPa, mikä tulee jakaa äsken saadulla ilmanpaineen arvolla Mäkelänkadulla eli 981,4 hPa, jolloin ilmanpaineeksi saadaan 1,032 mikä kerrotaan alkuperäisellä mittaustuloksen arvolla 415,7 ppm ja näin painekorjatuksi pitoisuudeksi saadaan 429,3 ppm. Tämä vastaava esimerkkilasku on tehty kaikille painekorjatuille mittaustuloksille. Seuraavana esitetään painekorjauksen jälkeiset kuvat.



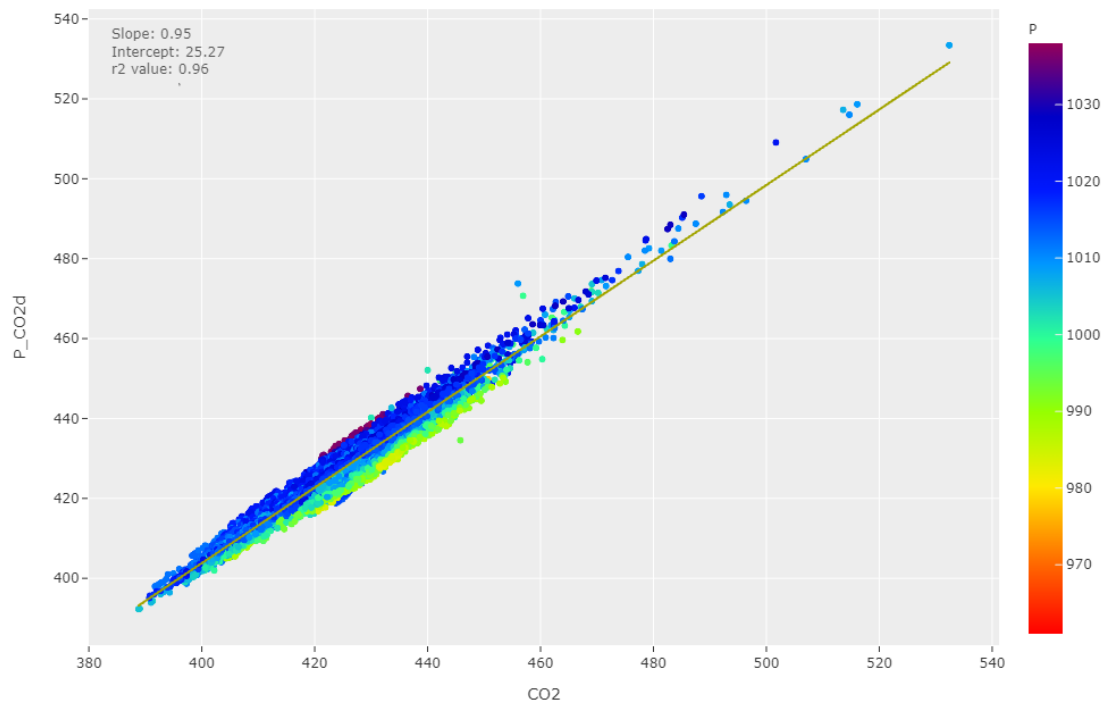
Kuva 18. Painekorjattu regressiosuora, missä kolmantena muuttujana ilmankosteus.

Kuvaa 18. katsoessa ja verrattaessa sitä kuvaan 14. nähdään selvästi, että pitoisuuspistejoukot sijoittuvat lähemmäs regressiosuoraa painekorjauksen jälkeen. Pitoisuudet eivät enää esiinny regressiosuoran ympärillä niin paksussa muodossa kuin ennen painekorjausta. Selitysaste  $R^2$  parani 0,78 arvosta arvoon 0,96. Tämän arvoista selitystetta voidaan kutsua erittäin korkeaksi eli diffuusionsensori saatiin hyvin vastaamaan mittausanalyysoijan tuloksia. Läpivirtausensorilla saatiin vastaanselvät kuvat aikaan. Kuvat löytyvät liitteestä 2. Alkuperäiset tulokset poikkesivat huomattavasti enemmän ennen painekorjausta. Kuvassa 18. näkyy, että alhaisilla ilmankosteuden arvoilla näkyi joukko, joka erosi suoralta, mutta olimme tyytyväisiä uuteen selitystteen arvoon.



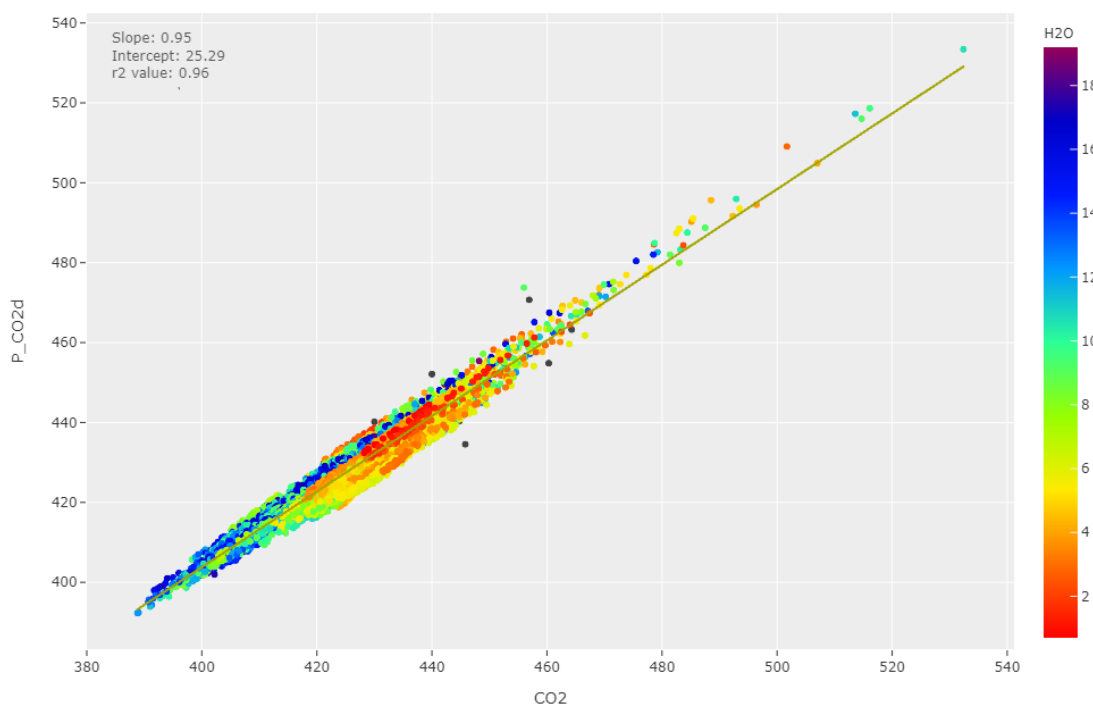
Kuva 19. Painekorjattu regressiosuora, missä kolmantena muuttujana lämpötila.

Lämpötilaa katsottaessa painekorjatussa kuvassa 19. nähdään, että siinä näkyy sama pitoisuuspistejoukko noin +20 asteen lämpötilassa kuin kuvassa 15. Olimme kuitenkin tyytyväisiä siihen, että selitysaste parantui huomattavasti ja emme lähteneet enää etsimään tarkkoja muutoksia lämpötilan suhteen.



Kuva 20. Painekorjattu regressiosuora, missä kolmantena muuttujana ilmanpaine.

Ilmanpainetta tarkasteltaessa kuvassa 20. nähdään, että painekorjauksen jälkeen alhaisemmat ilmanpaineen pitoisuudet hävisivät kokonaan ja koko pitoisuuspistejoukon väriskaala sijoittuu korkeammalle ilmanpaineelle. Olimme myös tämän osalta tyytyväisiä, emmekä lähteneet enää etsimään muutoksia ilmanpaineessa, kun selkeää poikkeusta kuvassa ei ollut enää nähtävissä.



Kuva 21. Painekorjattu regressiosuora, missä kolmantena muuttujana vesimäärä.

Kuvaa 21. katsottaessa ei ole näkyvissä tiettyä pitoisuuspistejoukkoa, mikä näkyisi poikkeavasti erillisenä muista pitoisuuksista.

Kokonaisuutena olimme tyytyväisiä siihen, että painekorjauksen jälkeen sensorimittaustuloksissa oleva epätarkkuus ja hajonta väheni, hiilidioksidipitoisuuksien ollessa lähempänä toisiaan sensoreilla ja mittausanalysointilaitteilla. Painekorjatuista kuvista ei enää löytynyt tarkasti erotettavia pitoisuuspistejoukkoja, jotka eroaisivat muista pitoisuuksista. Selitysaste  $R^2$  parani huomattavasti alkuperäisestä 0,77 arvoon 0,96. Painekorjauksen huomioitava muutos oli tärkeä oppi tässä tutkimuksessa, minkä avulla hiilidioksidisensorien mittaustuloksissa olevaa hajontaa saadaan vähennettyä merkittävästi.

Hajonnan vähentäminen painekorjauksella ei kuitenkaan poista sensorituloksissa olevia muita systemaattisia virheitä, jotka näkyvät edelleen lineaarisen sovitteen kulmakertoimesta ja vakiotermistä kuvassa 21., missä kulmakerroin on 0,95 ja vakiotermi 25,29. Toisin sanoen lineaarisen sovitteen kulmakerroin poikkeaa edelleen

painekorjauksen jälkeen selvästi arvosta yksi ja vakiotermi poikkeaa arvosta nolla. Lisäksi sensoriyksilöiden välillä on eroja siinä, kuinka paljon ne poikkeavat kulmakertoimen ja vakiotermin suhteen referenssituloksista kuvissa 11-13. Valitettavasti tässä tutkimuksessa ei ollut riittävästi resursseja tehdä vertailuja kaikille sensoriyksilöille mittausasemalla, minkä vuoksi painekorjauksen lisäksi ei tehty muita sensorikohtaisia korjausyhtälöitä. Tästä syystä sensorien absoluuttiset pitoisuustasot poikkeavat edelleen referenssilaitteista, mikä näkyy selvästi tutkimuksen seuraavien osioiden tuloksissa, esim. kuvassa 23.

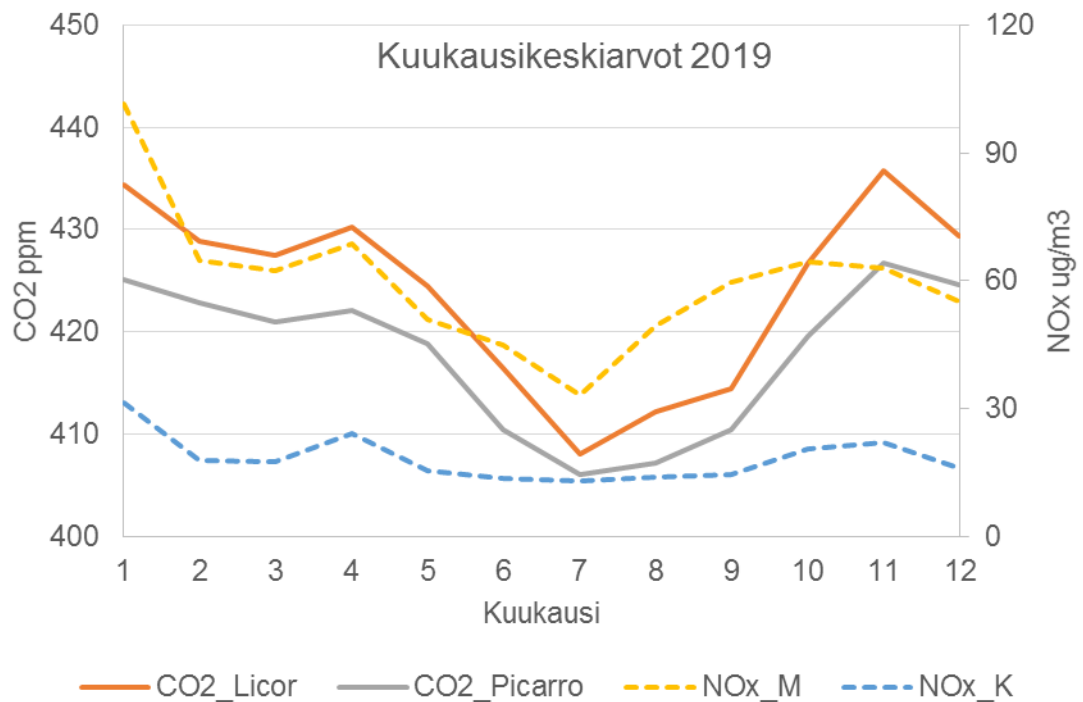
Ensimmäisen vertailumittausjakson jälkeen siirryttiin toiseen vertailumittausjaksoon, missä mittaustuloksia lähdettiin vertailemaan eri näkokulmasta.

## 8.2 Toinen vertailumittausjakso

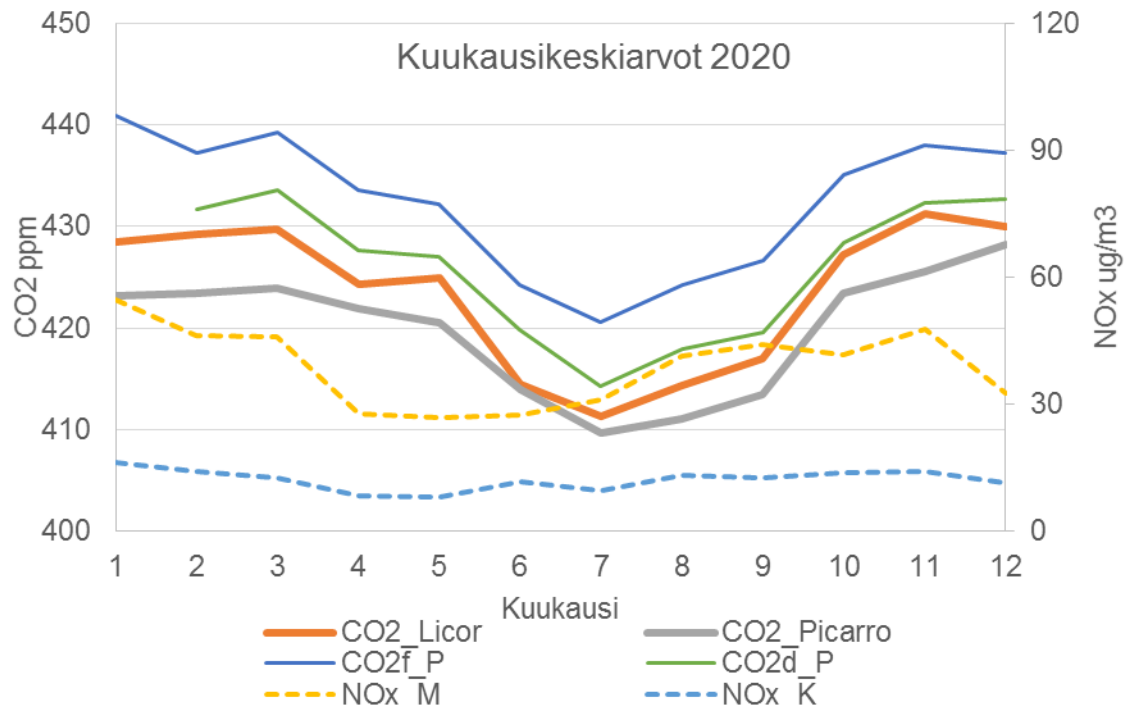
Toisessa vertailumittausjaksossa alettiin ensimmäisenä vertaamaan vuoden 2019 ja 2020 osalta HSY:n Mäkelänkadun referenssimittausanalysointilaitoksen Kumpulan referenssimittausanalysointilaitokseen. Mukaan tähän vertailuun otettiin myös Mäkelänkadun ja Kallion mittausasemien typenoksidimittausanalysointilaitokset (NO<sub>x</sub>), jotka mittaavat liikenteestä aiheutuvia pakokaasupäästöjä. Pakokaasupäästöt otettiin mukaan vertailuihin, jotta nähtäisiin kulkevatko hiilidioksidimittausasemien ja typen oksidien pitoisuudet samankaltaista vuorokausisykliä eli esiintyykö molempia pitoisuuksia samanaikaisesti. Halusimme ensiksi verrata vuotta 2019 ja 2020, jotta näkisimme kuinka kahden eri hiilidioksidimittausanalysointilaitoksen tulokset vertautuvat toisiinsa erilaisissa ympäristöissä kahtena erilaisena vuotena. Vuosi 2019 on myös hyvä vertailuvuosi, koska vuonna 2020 COVID-19 pandemia teki mittaustuloksiin nk. ”poikkeusvuoden”. Tämän vuosien 2019-2020 vertailumittausjakson jälkeen verrattiin ensimmäisen vertailumittausjakson hiilidioksidimittausasemien ja referenssimittausanalysointilaitoksen Mäkelänkadulta Ilmatieteen laitoksen Kumpulan referenssimittausanalysointilaitokseen. Mittausjaksoksi valittiin aikajakso 1.3.2020-28.2.2021, kokonaista vuotta emme pystyneet ottamaan vertailumittausjaksoksi, koska toinen hiilidioksidimittausasema saatiin asennettua vasta tammikuussa 2020 Mäkelänkadulle.

### 8.2.1 Kuukausikeskiarvot vuonna 2019 ja 2020 ensimmäisen ja toisen mittauspaikan välillä

Ensimmäiseksi toisessa vertailumittausjaksossa verrattiin vuosien 2019 ja 2020 referenssimittausanalysointoreiden hiilidioksidipitoisuuksia yhdessä kahden eri mittausaseman, Mäkelänkadun ja Kallion typen oksidien pitoisuuksien kanssa. HSY:n keräämiä mittaustuloksia ovat Kallion typen oksidien pitoisuudet, Mäkelänkadun hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet. Ilmatieteen laitokselta saatiin Kumpulan mittausaseman hiilidioksidipitoisuudet.



Kuva 22. Kuukausikeskiarvot vuonna 2019 vertailumittauksissa.



Kuva 23. Kuukausikeskiarvot vuonna 2020 vertailumittauksissa.

Kuvassa 22. esitetään kuukausikeskiarvot vuonna 2019. Kuvan x-akselilla on koko vuoden kuukaudet alkaen tammikuusta ja loppuen joulukuuhun, vasemman puoleisella y-akselilla on hiilidioksidipitoisuus (ppm) ja oikean puoleisella y-akselilla typen oksidien pitoisuus ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Referenssimittausanalysointorit on merkattu suorilla viivoilla ja typen oksidien pitoisuudet katkonaisilla viivoilla. Mäkelänkadun typen oksidien pitoisuus on lyhennetty muotoon NOx\_M ja Kallion vastaavasti NOx\_K. Kuvaa tulkittaessa voidaan nähdä, että Mäkelänkadun ja Kumpulan hiilidioksidipitoisuudet seuraavat hyvin samanlaisen muotoista pitoisuuskäyrää koko vuoden ajan. Mäkelänkadun hiilidioksidipitoisuudet ovat noin 5-10 ppm korkeammat kuin mitä Kumpulassa, pois lukien kesäajan, jolloin pitoisuuskäyrät lähenevät enemmän toisiaan. Tämä voisi kertoa siitä, että talvisaikaan Mäkelänkadulla korkeammat hiilidioksidipitoisuudet johtuvat liikenteen vaikutuksesta ja kesäaikaan hiilidioksidipitoisuudet lähenevät toisiaan johtuen luonnosta ja kasvillisuuden heräämisestä. Kasvillisuus on kesäisin nettonielu eli hiilidioksidia sitoutuu enemmän kuin vapautuu. Yöaikaan kasvillisuus on kuitenkin hiilidioksidin lähde ja sitä vapautuu ilmakehään, toisin kuin päiväsaikaan fotosynteesissä, missä auringon yhteyttämisreaktiossa hiilidioksidia sitoutuu pois ilmakehästä. [10.] Molemmilla mittausasemilla hiilidioksidipitoisuudet ovat myös paljon

korkeammat talvisaikaan kuin kesäaikaan, mikä kertoisi myös kasvillisuuden vaikutuksesta kesäisin päiväsaikaan. Mäkelänskadulla typen oksidien pitoisuudet seuraavat myös hiilidioksidipitoisuuksia varsinkin talvisaikaan, kun sään sekottumisolosuhteet ovat minimissä. Kesäaikaan tässä nähdään kuitenkin poikkeus ja typen oksidien pitoisuudet jäävät korkeammaksi verrattuna hiilidioksidipitoisuuksiin. Kallion mittausaseman typen oksidien pitoisuudet jäävät hyvin matalaksi verrattuna Mäkelänskadun mittausasemaan. Kallion mittausaseman pitoisuudet kertovatkin enemmän pitoisuustasosta kaupungin tausta-asemalla, missä autojen liikenne ei ole kovin lähellä asemaa toisin kuin Mäkelänskadulla, mikä sijaitsee vilkasliikenteisessä katukuilussa. Kallion typen oksidien pitoisuudet kertovatkin enemmän taustapitoisuudesta, mikä esiintyy ilmakehän kerroksissa maanpinnan tasolla.

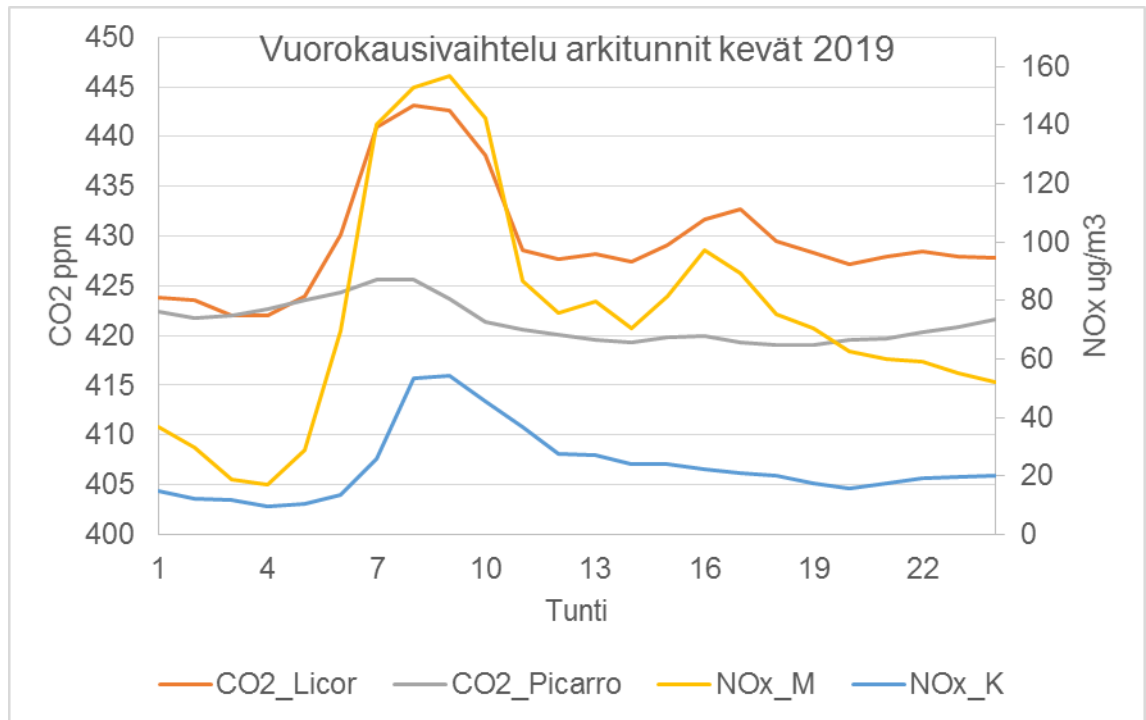
Kuvassa 23. esitetään kuukausikeskiarvot vuonna 2020. Kuvasta 22. poiketen, siihen on lisätty vielä hiilidioksidisensorit. Hiilidioksidisensorit saatiin käyttöön vasta 2019 loppupuolella ja diffuusiosensori asennettua vuoden 2020 tammikuussa. Kuvan 23. viivat ja värit on toteutettu samalla tavalla kuin kuvassa 22. helpottaakseen tulkintaa. Mäkelänskadun ja Kumpulan hiilidioksidipitoisuudet seuraavat samanlaista käyrää kuin vuonna 2019 eli pitoisuuserot ovat noin 5-10 ppm, mutta kesäaikaan pitoisuudet tulevat vielä lähemmäksi toisiaan kuin vuonna 2019. Mäkelänskadun osalta talvisaikaan pitoisuudet jäävät vuonna 2020 hieman matalammalle, kun kuvia verrataan tarkasti toisiinsa. Toisaalta Mäkelänskadulla ja Kumpulassa kesäaikaan hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammat vuonna 2020 kuin 2019 eli tämä kertoisi siitä että hiilidioksidipitoisuudet oikeasti nousevat vuosi vuodelta. Vuonna 2020 Mäkelänskadun typen oksidien pitoisuuksissa tapahtui huomattava lasku johtuen COVID-19 pandemiasta, kun liikennemäärät vähenivät maaliskuun puolivälistä alkaen. Lisäksi alkutalvi 2020 oli poikkeuksellisen lämmin ja lumeton. Mäkelänskadulla typen oksidien pitoisuudet tippuivat noin 34 % prosenttia vuonna 2020, kun niitä verrattiin vuosien 2017-2019 pitoisuuksiin [18.] Vastaavasti myös Kallion mittausaseman typen oksidien pitoisuudet laskivat, mutta lasku ei ollut yhtä paljon kuin Mäkelänskadulla, missä liikenteen vaikutus pitoisuuksiin on paljon suurempi.

Kuvan 23. kahta erilaista hiilidioksidisensoria katsottaessa nähdään, että diffuusiosensorin pitoisuudet seuraavat lähemmin referenssimittausanalysointia. Molemmat diffuusio- ja läpivirtausensori mittaavat kuitenkin selvästi korkeampia

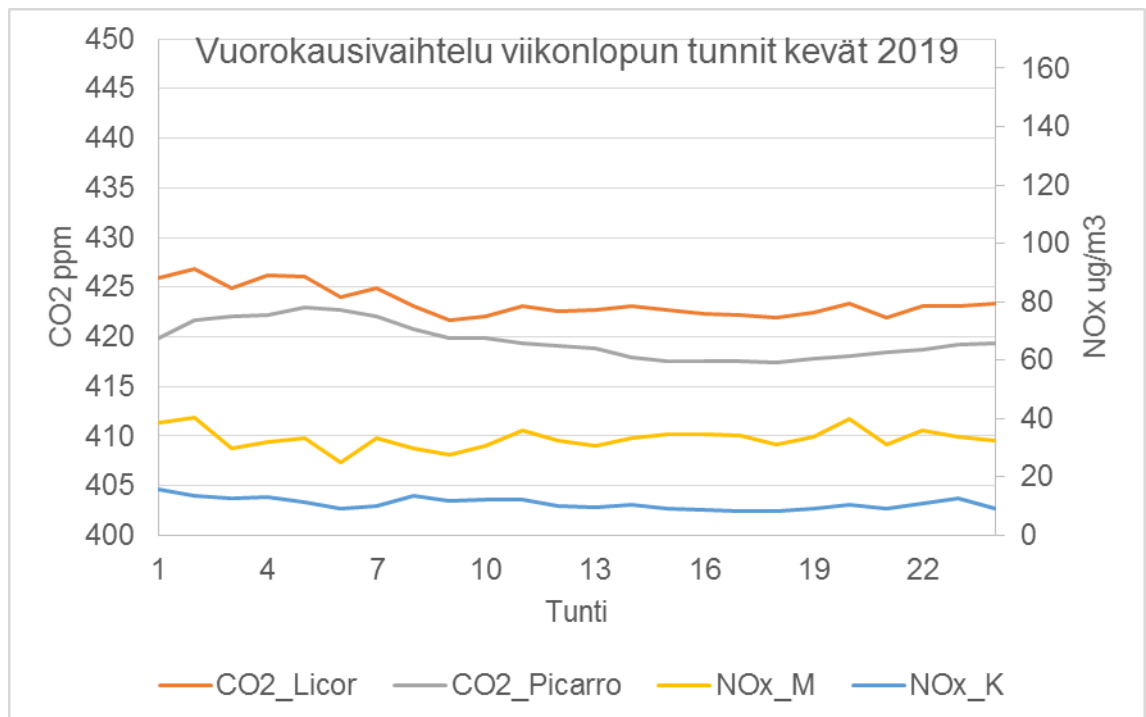
pitoisuuksia kuin referenssimittausanalysointori. Kuvassa 23. esitetyille sensorien mittaustuloksille on tehty painekorjaus, mikä toi mittaustuloksia lähemmäksi referenssimittausanalysointoria. Tärkeää huomioitavaa on se, että molemmat hiilidioksidisensorit seuraavat samanlaista käyrää kuin referenssimittausanalysointorin pitoisuudet. Hiilidioksidisensorit mittaavat oikeasuuntaisesti vuodenaikavaihtelun muodossa, mutta absoluuttisissa pitoisuustasoissa on edelleen selvästi eroa verrattaessa referenssimittausanalysointoriin. Vuodenaikaisvaihtelu menee myös samalla tavalla vuonna 2019 ja 2020. Talvisaikaan hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammalla kuin kesäaikaan. Keväisin hiilidioksidipitoisuudet lähtevät laskemaan, kun kasvillisuus rupeaa heräämään ja hiilinielut rupeavat imeämään hiilidioksidia ilmakehästä.

### 8.2.2 Tunti- ja vuodenaikaisvaihtelu hiilidioksidi- ja typenoksidipitoisuuksissa vuonna 2019

Toisena vertailuna tehtiin tunti- ja vuodenaikaisvaihtelu hiilidioksidipitoisuuksille vuonna 2019. Tässä tutkimuksessa tehtiin erilliset kuvasarjat jokaiselle vuodenaikalle eli keväälle, kesälle, syksylle ja talvelle. Kevätkausi sijoittui maaliskuu-toukokuulle, kesäkausi kesä-elokuulle, syyskausi syys-marraskuulle ja talvikausi joulukuu-helmikuulle. Vuodenaikaisvaihtelu tehtiin tuntipitoisuuksille, jotta nähtiin kuinka hiilidioksidipitoisuudet vaihtelevat vuodenaikojen lisäksi myös vuorokaudessa päivä- ja yöaikaan. Näiden lisäksi tehtiin vielä vertailut arki- ja viikonloppujen tuntien välillä.



Kuva 24. Vuorokausivaihtelu arkitunnit kevät 2019.



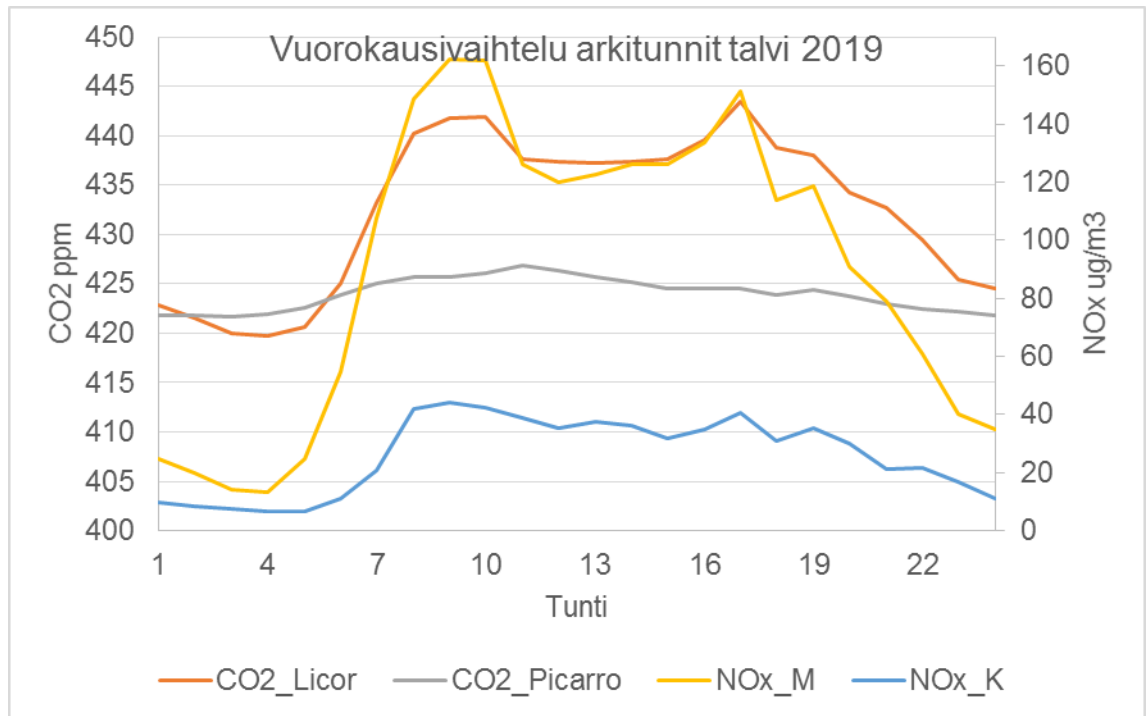
Kuva 25. Vuorokausivaihtelu viikonlopun tunnit kevät 2019.

Kuvassa 24. on esitetty hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet vuonna 2019 maaliskoukokuulta. Kuvassa x-akselilla on vuorokauden tunnit, vasemman puoleisella y-akselilla hiilidioksidipitoisuudet (ppm) ja oikean puoleisella y-akselilla typen oksidien pitoisuudet ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ). Mäkelänkadun hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet kulkevat hyvin samansuuntaista pitoisuusviivaa. Aamuyön tunteina liikenteen ollessa vähäistä varsinkin typen oksidien pitoisuudet laskevat alhaisiksi, mutta lähtevät nousemaan klo 5:00-6:00 aikoihin aamuisen työmatkaliikenteen vuoksi saavuttaen huippupitoisuudet klo 8:00-9:00 aikoihin ja laskien siitä iltapäivää kohden. Iltapäivällä klo 15:00 aikoihin työmatkaliikenne taas lisääntyy ja pitoisuudet nousevat klo 17:00-18:00 asti, minkä jälkeen typen oksidien pitoisuudet lähtevät laskemaan tasaisesti. Hiilidioksidipitoisuus noudattaa melkein lähes samanlaista käyrää, mutta pitoisuudet eivät laske yhtä jyrkästi kuin typen oksidien osalta, vaan jäävät leijaillemaan ilmakehään taustapitoisuutena. Kumpulän hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvinkin tasaisia koko vuorokauden ajan, pois lukien aamuyön nousua johtuen työmatkaliikenteestä klo 8:00 tietämille, minkä jälkeen pitoisuudet laskevat tasaisesti klo 15:00 asti, minkä jälkeen tapahtuu pieni notkahdus ja sitten taas pitoisuudet kasvavat hitaasti, mutta tasaisesti iltaa kohden. Pitoisuustason vaihtelu Mäkelänkadun ja Kumpulän hiilidioksidipitoisuudella on kuitenkin hyvin erilainen. Mäkelänkadulla tapahtuu noin 20 ppm pitoisuusvaihtelu, kun taas Kumpulassa ainoastaan 5 ppm. Kallion typen oksidien pitoisuuksissa tapahtuu nousu aamun työmatkaliikenteen aikana, mutta muuten pitoisuudet ovat hyvin tasaisia taustapitoisuuksia.

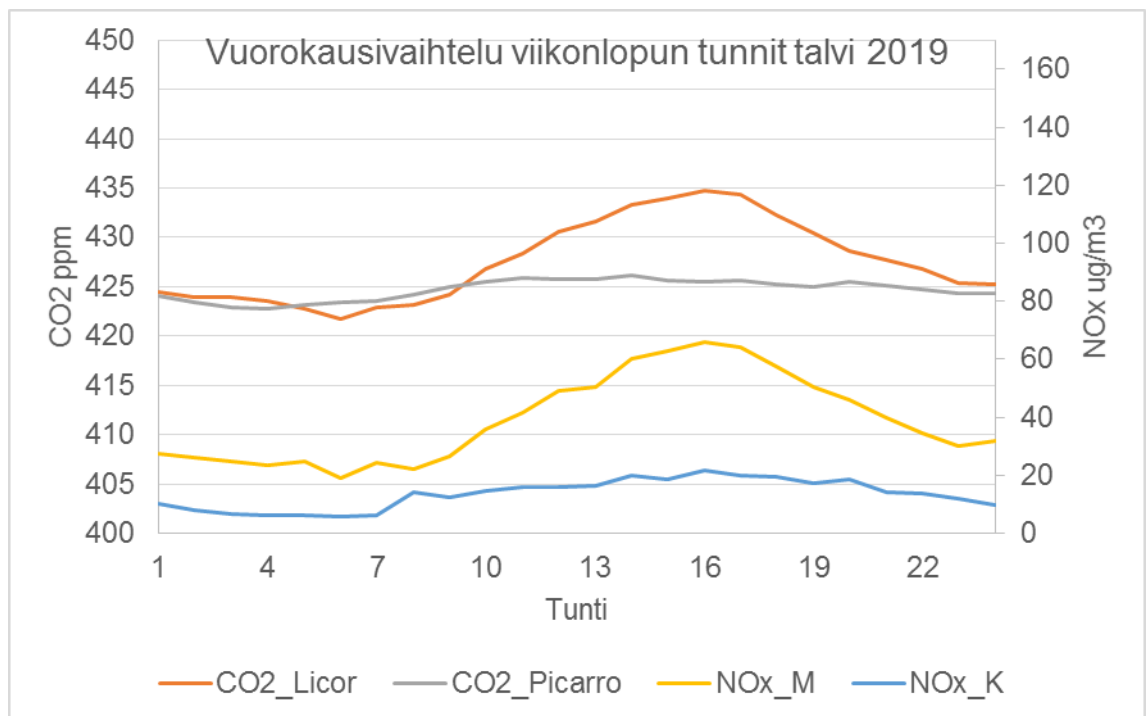
Kuvasta 25. päällimmäisenä tulkintana näkyy, että pitoisuudet pysyvät hyvin tasaisina viikonloppuina vuonna 2019 maaliskoukokuun aikana. Mäkelänkadun hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammat kuin Kumpulassa ja Mäkelänkadun typen oksidien pitoisuudet ovat korkeammat kuin Kalliossa, mikä on selvä huomio, koska Kumpula ja Kallio ovat kaupungin tausta-asemia.

Seuraavat kuvasarjat on lisätty liitteeksi 3., vaikkakin niiden tulkinta tapahtuu tässä tekstissä. Kuvasarjoja tulisi niin suuri määrä, joten osa vuodenaikaisvaihtelusta on lisätty ainoastaan liitteeksi. Valitsin liitteeksi kuvasarjat kesän 2019 ja syksyn 2019 osalta, koska pitoisuuskäyrä kulkee samalla tavalla kuin mitä keväällä 2019. Kevättä ja kesää 2019 vertaillen voidaan kuitenkin huomata, että kesällä Kumpulassa Picarron hiilidioksidipitoisuudet lähtevät laskemaan aikaisemmin kuin mitä Mäkelänkadulla.

Arkipäivisin aamuyön pitoisuudet kohtaavat huippunsa noin klo 4:00 aikoihin ja lähtevät laskemaan sen jälkeen. Tämä voisi selittyä osittain kasvillisuuden ja vähäisen liikenteen vaikutuksella. Mikrometeorologisilla sääolosuhteilla ja mittauspaikan korkeuseroilla HSY:n Mäkelänkadun mittausaseman ja Ilmatieteen laitoksen Kumpulan mittausaseman välillä on varmasti yksi syy tälle. Muuten pitoisuuskäyrät noudattavat samanlaista vuorokausikohtaista kulkua kevään, kesän ja jopa syksyn 2019 osalta. Kesällä 2019 hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet ovat hieman matalempia kuin mitä keväällä ja syksyllä 2019. Aamuyön työmatkaliikenteen tunneissa pitoisuuksien osalta tapahtuu lasku, mikä johtuu varmasti myös ihmisten kesälomista eli autoja on vähemmän liikenteessä. Viikonlopun tunteja katsoessa nähdään liitteessä 3. se, että kesällä 2019 kasvillisuuden vaikutus näkyy aamuyön tunteina, jolloin hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan saavuttaen huippunsa klo 4:00-7:00 välillä, minkä jälkeen pitoisuudet laskevat päivää ja yötä kohden saavuttaen taas nousun yöllä. Viikonloppuisin on päiväsaikaan kyse vain hiilidioksidin taustapitoisuudesta. Viikonlopun tunnit syksyllä 2019 näyttävät hyvin tasaista hiilidioksidipitoisuutta eli tämä viittaisi myös taustapitoisuuteen, eikä kasvillisuudella ole enää samanlaista vaikutusta kuin mitä kesällä 2019. Arkipäivisin typen oksidien pitoisuuksien osalta kevään, kesän ja syksyn 2019 käyrät näyttävät hyvin samanlaisilta eli Mäkelänkadulla typen oksidien pitoisuudet seuraavat hiilidioksidipitoisuuksien mukana ja Kalliossa tapahtuu aamuruuhkien aikana pitoisuuksien nousu, mutta muuten typen oksidien pitoisuuskäyrä pysyy hyvinkin tasaisena. Viikonlopun tunteina typen oksidien pitoisuudet ovat myös hyvin tasaisia kevään, kesän ja syksyn 2019 osalta.



Kuva 26. Vuorokausivaihtelu arkitunnit talvi 2019.



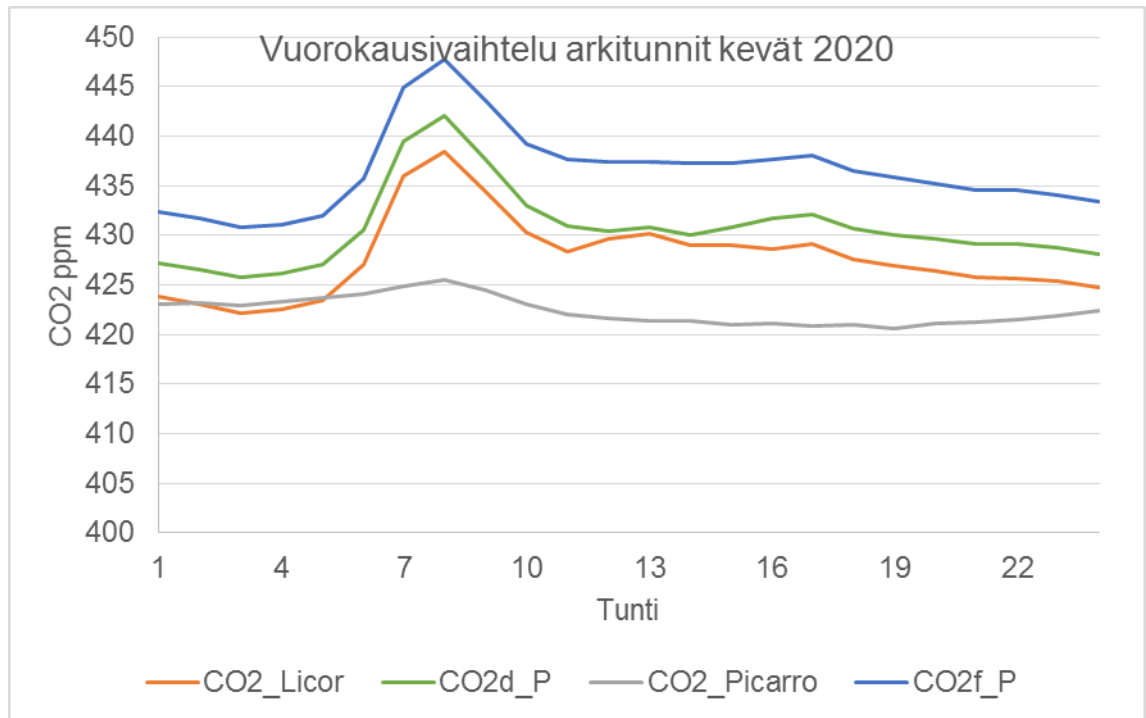
Kuva 27. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit talvi 2019.

Kuvassa 26. esitetään vuorokausivaihtelu arkituntien osalta talvella 2019. Talvikauden kuukaudet ovat tammikuu, helmikuu ja joulukuu 2019. Ensimmäisenä huomiona on hyvä nähdä se, että hiilidioksidipitoisuudet ovat talvisaikaan kaikista korkeimmat kun verrataan muihin vuodenaikoihin vuonna 2019. Mäkelänkadulla hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet seuraavat samanlaista pitoisuuskäyrää. Molemmat pitoisuudet laskevat alimmilleen aamuyönä klo 3:00-4:00 aikoihin, minkä jälkeen pitoisuudet nousevat jyrkästi klo 9:00-10:00 välille. Iltapäivän aikoihin pitoisuudet pysyvät tasaisina, mutta lähtevät uudelleen nousuun klo 15:00 aikoihin, kun työmatkaliikenne lähtee liikkeelle, pitoisuuksien saavuttaessa huippunsa klo 17:00-18:00 aikoihin, minkä jälkeen pitoisuudet laskevat tasaisesti kohti aamuyötä. Kumpulassa hiilidioksidipitoisuuskäyrä pysyy tasaisena, mutta silti korkeammalla tasolla kuin muina vuodenaikoina. Kasvillisuuden vaikutusta hiilidioksidipitoisuuksiin ei talven aikana näy. Typen oksidien pitoisuudet saavuttavat myös huippupitoisuudet Kalliossa ja Mäkelänkadulla talvella 2019, kun verrataan muihin vuodenaikoihin. Talvisaikaan ilmakehän sekoittumisolosuhteet ovat heikommat, kun on pakkasta ja ilma ei pääse kunnolla sekoittumaan yhtä hyvin kuin mitä lämpiminä vuodenaikoina.

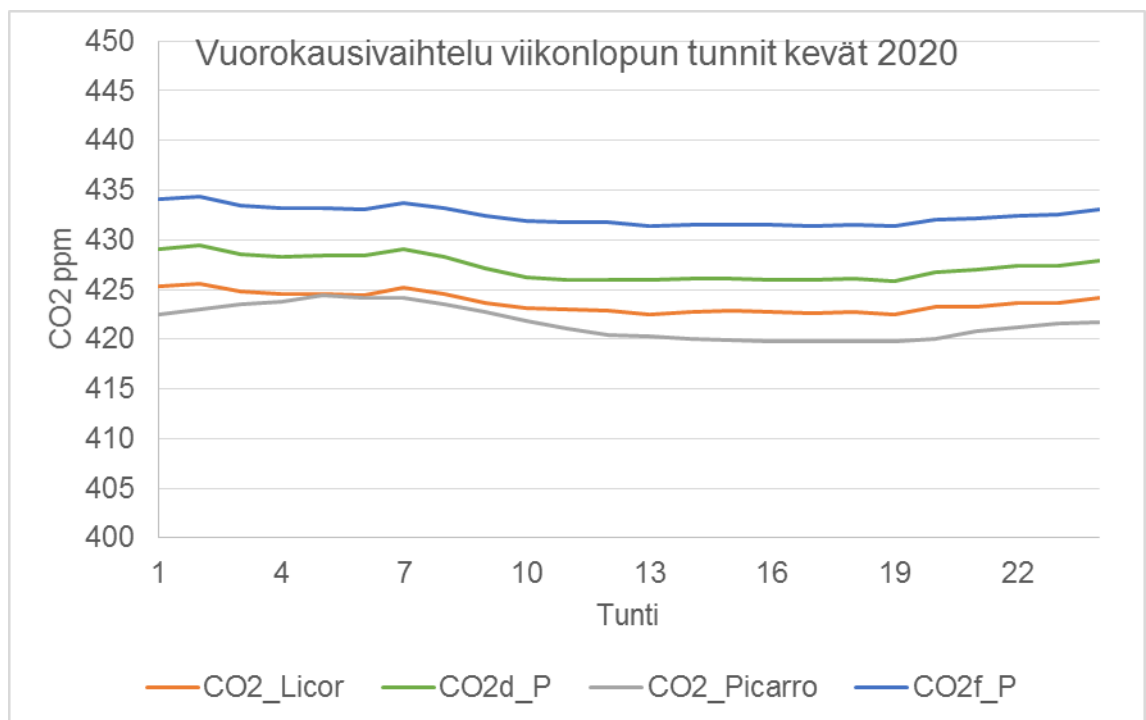
Kuva 27. näyttää viikonlopun tuntien vaihtelun talvella 2019. Katsottaessa kuvaa 27. nähdään erilainen ilmiö Mäkelänkadun pitoisuuksissa talven 2019 osalta verrattaessa muihin vuodenaikoihin. Talvella 2019 viikonloppuisin Mäkelänkadun hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet nousevat tasaisesti klo 8:00 lähtien saavuttaen korkeimmat pitoisuustasot klo 16:00 aikoihin, minkä jälkeen pitoisuudet lähtevät laskemaan aamuyön tunteja kohti. Vastaavaa ilmiötä ei muina vuodenaikoina tapahdu, missä pitoisuustasot nousisivat molemmilla komponenteilla samanaikaisesti koko päivän ajan. Kumpulassa hiilidioksidipitoisuustaso nousee hieman myös päivän aikana, mutta nousu on todella tasainen. Vastaavasti myös Kallion typen oksidien pitoisuustaso nousee hieman päivän aikana. Tämä ilmiö voisi osittain selittyä sillä, että viikonloppuisin ihmiset liikkuvat tasaisemmin eri vuorokauden aikoina, eikä ole nähtävissä aamuisin tai iltaisin työmatkaliikenteestä johtuvia ruuhkatilanteita, mitkä lisäävät pitoisuustasoja. Viikonlopun tunteina kaikkien komponenttien pitoisuudet eri mittauspaikoissa pysyvät korkeimmillaan verrattuna muihin vuodenaikoihin. Tämä johtuu mitä ilmeisimmin ilmakehän sekoittumisolosuhteista. Talvisaikaan pitoisuudet ovat korkeammalla kuin mitä muina vuodenaikoina.

### 8.2.3 Tunti- ja vuodenaikaisvaihtelu hiilidioksidipitoisuuksissa vuonna 2020

Kolmanneksi verrattiin vuonna 2020 Mäkelänkadun referenssianalysaattoria ja sensoreita Kumpulan referenssianalysaattoriin. Kuvasarjat tehtiin vastaavalla tavalla kuin vuoden 2019 vertailussa. Typen oksidien pitoisuudet jätettiin tällä kertaa pois, koska hiilidioksidisensorit lisättiin ja kuvaajista olisi tullut muuten liian epäselviä, kun tulkittavia käyriä olisi ollut liian monta. Vuoden 2020 vertailumittausjaksosta on tarkoitus näyttää kaikkien neljän eri vuodenajan kuvaajat, koska ne poikkeavat kaikki toisistaan ja niitä en sen takia laittanut liitteeksi. Kuvaajia on myös helpompi tulkita ja vertailla toisiinsa kuin jos ne olisivat pelkästään liitteenä.



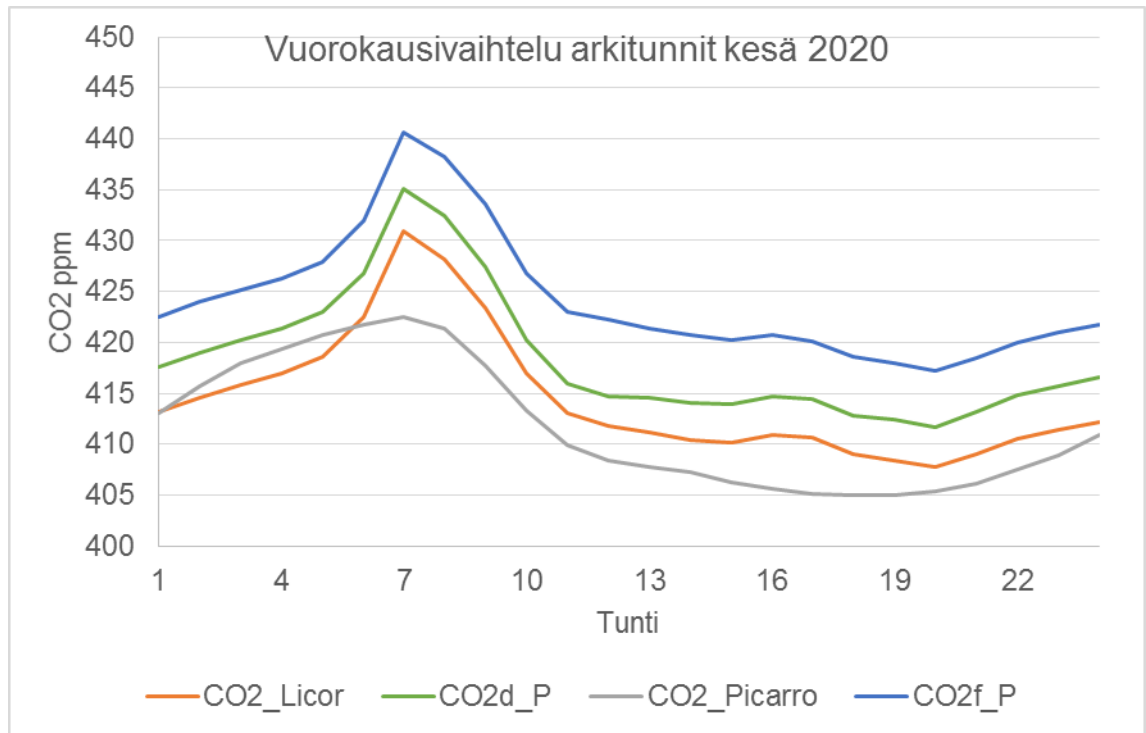
Kuva 28. Vuorokausivaihtelu arkitunnit kevät 2020.



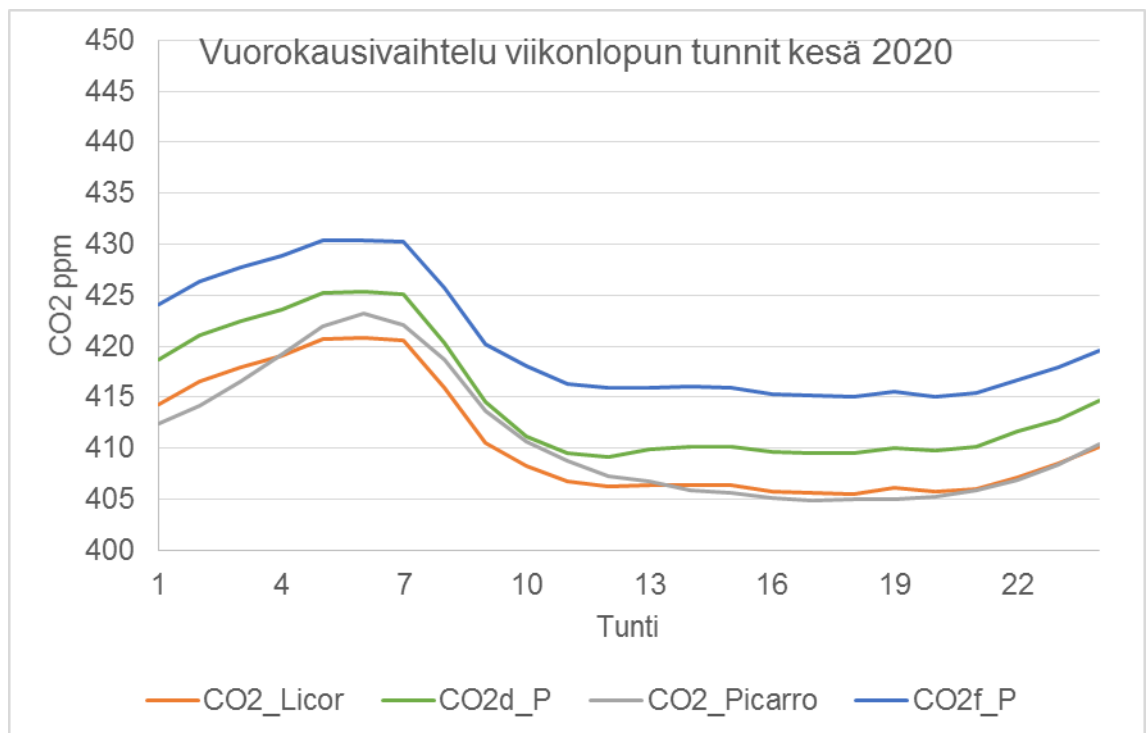
Kuva 29. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit kevät 2020.

Kuvassa 28. näkyy vuorokauden arkituntien jakauma vuonna keväällä 2020. Hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan klo 3:00-4:00 aikoihin ja kohoavat tasaisesti klo 8:00 tietämille aamuisen työmatkaliikenteen takia. Pitoisuudet laskevat Mäkelänkadulla klo 12:00 asti ja sitten tapahtuu pieni nousu pitoisuuksissa, minkä jälkeen taas pieni lasku ja sen jälkeen taas pieni nousu klo 15:00-17:00 välillä. Pitoisuudet laskevat iltapäivän tuntien jälkeen aamuyötä kohden. HSY:n Mäkelänkadulla sensoreista diffuusiosensori seuraa lähempänä referenssimittaustasua. Läpivirtausensori arvioi mittaustulokset hieman korkeammiksi. Ilmatieteen laitoksella Kumpulassa referenssianalysointipitoisuudet näyttävät aikalailla tasaista viivaa eli taustapitoisuutta, pois lukien klo 4:00-8:00 välillä tapahtuva pitoisuustason nousu. Kyseessä voi olla kevään merkki siitä, että kasvillisuus vapauttaa yöaikaan hiilidioksidia ilmakehään tai sitten työmatkaliikenteestä aiheutuvat pitoisuudet. Toisaalta Kumpulan mittaustaseman läheisyydessä ei ole liikennettä, niin kyseessä on mitä luultavammin kasvillisuuden vaikutus, kun luonto alkaa heräämään keväällä ja yöaikaan kesällä kasvillisuus on hiilidioksidilähde.

Kuvassa 29. hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvin tasaisia viikonlopun tunteina koko vuorokauden ajan keväällä 2020. Aamuyön tunteina klo 3:00-6:00 välillä Kumpulassa on pieni nousu, mikä todellakin viittaisi kasvillisuuden heräämiseen keväällä. Mäkelänkadulla vastaavasti pitoisuudet laskevat samalla aikavälillä. Kumpulassa ja Mäkelänkadulla referenssianalysointipitoisuudet kulkevat myös lähempänä toisiaan kuin mitä sensorit. Aamuyöstä hiilidioksidipitoisuudet saavuttavat Kumpulassa ja Mäkelänkadulla saman pitoisuustason klo 4:00-6:00 välillä.



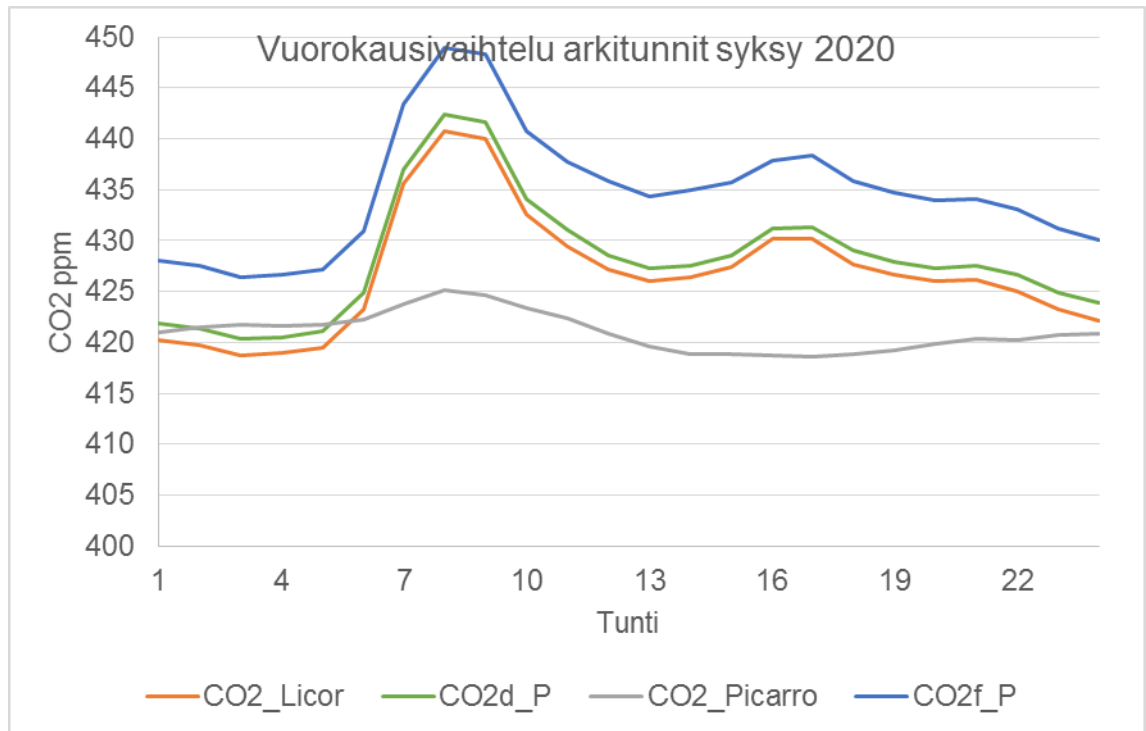
Kuva 30. Vuorokausivaihtelu arkitunnit kesä 2020.



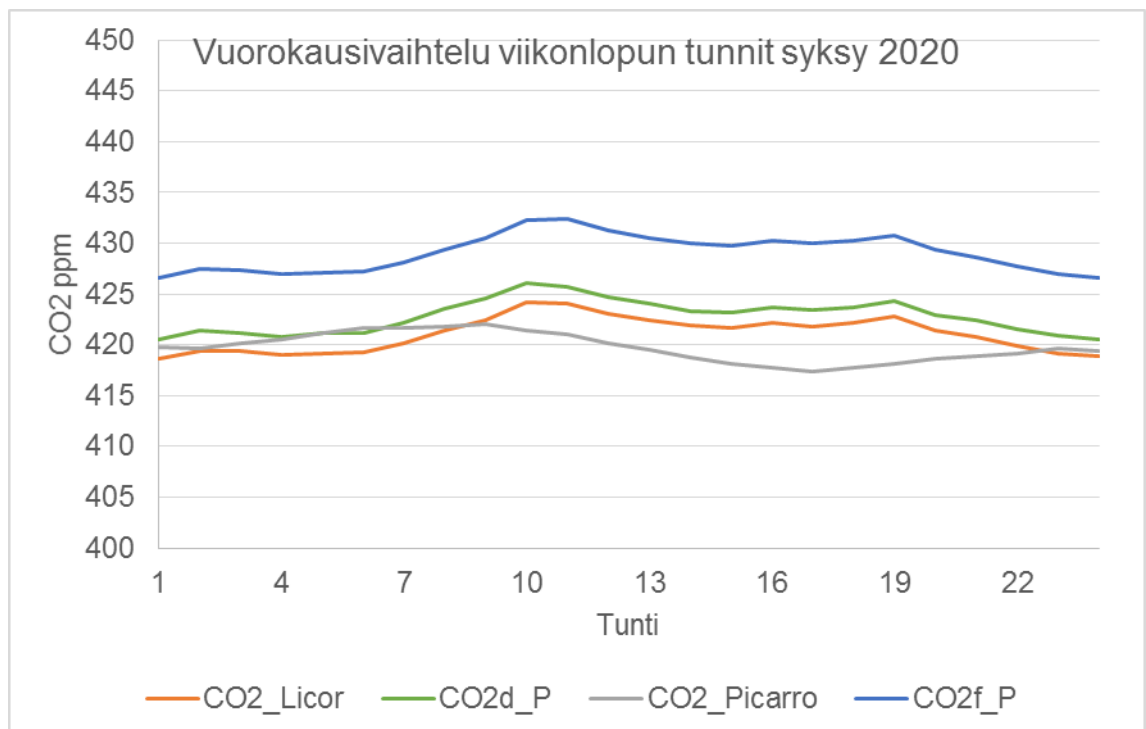
Kuva 31. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit kesä 2020.

Kuvan 30. kesän arkituntien ensimmäisenä huomiona on nähtävissä, että hiilidioksidin pitoisuustaso on hieman alempana kesällä kuin keväällä. Muutos on noin 6-7 ppm. Kesällä on nähtävissä kasvillisuuden ja kasvien fotosynteesin vaikutus selvemmin kuin mitä keväällä. Hiilidioksidipitoisuus lähtee nousemaan jo iltatunteina klo 20:00 aikoihin ja jatkaa nousuaan koko yön läpi aamun työmatkaliikenteen tunteihin klo 7:00 saakka, minkä jälkeen tapahtuu tasainen lasku klo 15:00 tietämille, missä tulee pieni nousu pitoisuuksissa, mutta pitoisuuskäyrän lasku jatkuu edelleen klo 20:00 saakka. Vaikka hiilidioksidipitoisuudet ovat alhaisemmat kesällä 2020 kuin keväällä 2020, niin hiilidioksin pitoisuuskäyrän kasvuvaihe on ajallisesti pidempi jakso mitä keväällä 2020. Tästä on selvästi nähtävissä kasvillisuuden vaikutus hiilidioksidipitoisuuksien vuorokausivaihteluun. Mäkelänkadun referenssianalysaattori ja sensorit kulkevat samanlaista käyrää koko vuorokauden tunnit. Kumpulassa referenssianalysaattorin hiilidioksidipitoisuudet saavuttavat jopa korkeamman tason kuin mitä Mäkelänkadulla aamuyön tunteina klo 2:00-6:00 välillä. Mitä ilmeisimmin tässä on myös kyse kasvillisuuden vaikutuksesta kesällä eli yöaikaan hiilidioksidia vapautuu ilmakehään. Kuvaa 28. ja 30. vertaillen molemmissa nähdään, että Kumpulassa hiilidioksidin pitoisuustaso on hieman korkeammalla yöaikaan kuin mitä Mäkelänkadulla. Diffuusiosensori seuraa Mäkelänkadun referenssianalysaattoria paremmin kuin mitä läpivirtaussensori, joka yliarvioi hiilidioksidin pitoisuustasoa.

Kuvassa 31. viikonlopun tuntien hiilidioksidin pitoisuustason vaihtelu näkyy päivän ja yön välillä vielä selvemmin kuin arkitunteina. Hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeimmillaan aamuyön tuntien aikaan klo 1:00-7:00 välillä. Viikonlopun tunteina Kumpulassa hiilidioksidipitoisuus on korkeimmillaan klo 6:00 aikoihin, kun vastaavasti taas Mäkelänkadulla klo 6:00-7:00 välillä. Kumpulassa on myös kesän 2020 viikonlopun tunteina korkeammat hiilidioksidipitoisuudet aamuyöstä iltapäivän klo 5:00-13:00 välillä kuin mitä Mäkelänkadulla. Kasvillisuudella näyttäisi kesällä olevan suurikin vaikutus hiilidioksidipitoisuustasoon. Korkeimman pitoisuustason saavuttamisen jälkeen molemmilla mittausasemilla pitoisuudet laskevat tasaisesti iltapäivään asti, jolloin pitoisuuksissa näkyy lähinnä hiilidioksidin taustapitoisuutta. Viikonloppuisin molemmilla mittausasemilla hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan klo 20:00 aikoihin eli samalla tavalla kuin arkipäivinä.



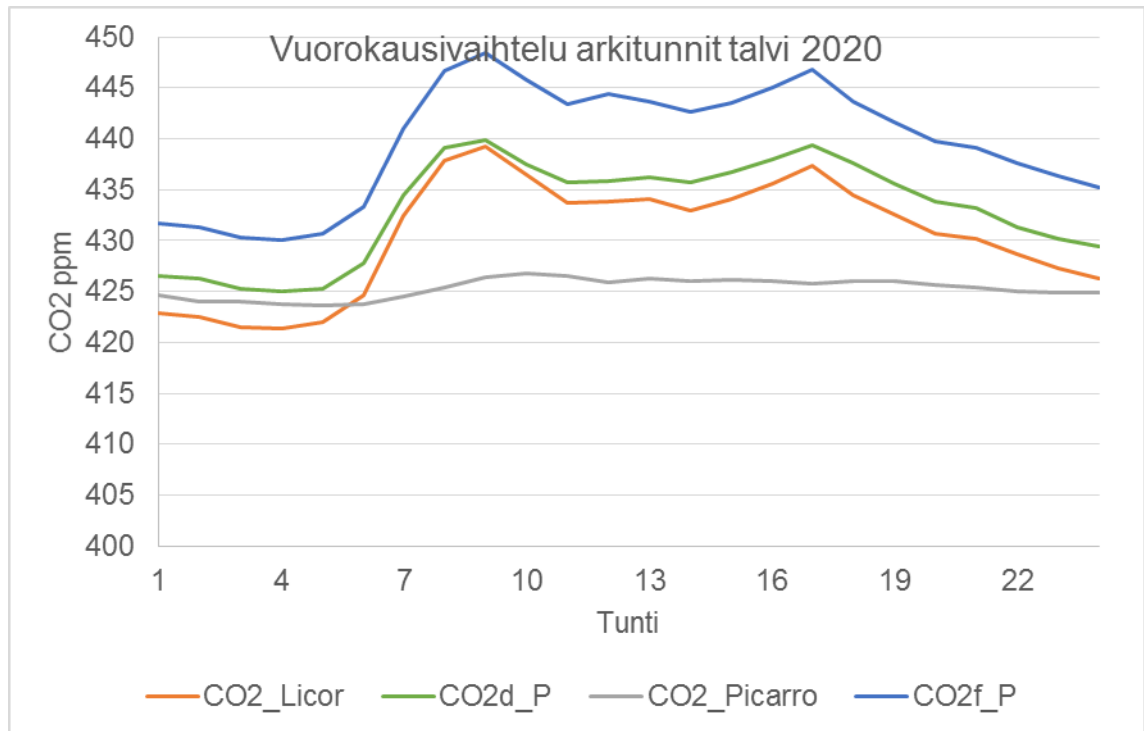
Kuva 32. Vuorokausivaihtelu arkitunnit syksy 2020.



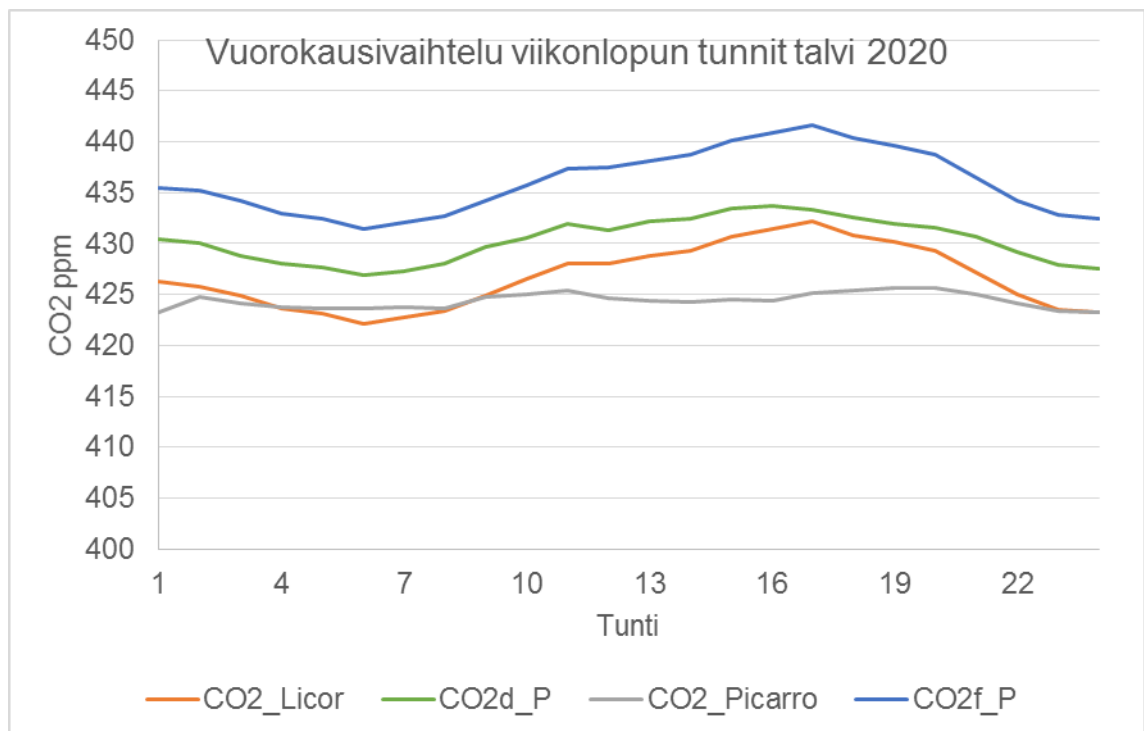
Kuva 33. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit syksy 2020.

Kuvassa 32. syksyn 2020 arkitunteina Mäkelänkadun referenssianalysaattori saavuttaa koko vuoden korkeimman hiilidioksidipitoisuuden klo 8:00 aikoihin eli noin 441 ppm. Pitoisuuskäyrät noudattavat hyvin samanlaista suuntaa kuin kuvassa 28. eli kevään 2020 arkituntien pitoisuuksissa. Aamulla klo 5:00 aikoihin pitoisuudet lähtevät nousemaan klo 8:00-9:00 asti, jolloin pitoisuudet saavuttavat korkeimman tasonsa ja lähtevät siitä eteenpäin laskemaan iltapäivää klo 13:00 asti. Iltapäivän tunneissa tapahtuu kuitenkin suurempi pitoisuuksien nousu klo 15:00-17:00 välillä syksyllä 2020 kuin mitä keväällä 2020. Kasvillisuuden vaikutus yöaikaan ei näy enää yhtä korkeina hiilidioksidipitoisuuksina syksyllä kuin mitä kesällä. Mäkelänkadulla diffuusiosensori ja referenssianalysaattori seuraavat hyvin lähellä toisiaan, läpivirtausensorin yliarvioidessa pitoisuustasoa. Kumpulan hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvin tasaisia koko vuorokauden ajan arkitunteina, lukuunottamatta aamuisen työmatkaliikenteen tunteja klo 6:00-10:00 välillä. Syksyllä 2020 on korkeammat hiilidioksidipitoisuudet arkitunteina aamu- ja iltapäiväruuhkan aikaan verrattaessa kevään 2020 hiilidioksidipitoisuuksiin ja tämä ero voisi selittyä COVID-19 pandemialla. Keväällä 2020 liikennemäärät vähenivät verrattuna syksyyn 2020.

Kuvassa 33. nähdään viikonlopun tuntien vuorokausivaihtelu syksyllä 2020. Jos kuvaa verrataan kesän 2020 viikonlopun tunteihin kuvassa 31., on selkeästi nähtävissä kasvillisuuden vähentyminen syksyllä 2020. Hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvin tasaisia, saavuttaen huipputasonsa aamulla klo 10:00 ja illalla klo 19:00 aikoihin. Päiväsaikaan hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeimmillaan laskien yötä kohden ja aamulla klo 7:00 alkaen pitoisuudet lähtevät taas nousemaan liikenteen seurauksena. Kumpulassa on sama ilmiö syksyllä 2020 kuin kesällä 2020 eli syksyllä hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammalla kuin Mäkelänkadulla referenssianalysaattorilla yön ja aamun tunteina klo 2:00-8:00 välillä.



Kuva 34. Vuorokausivaihtelu arkitunnit talvi 2020.



Kuva 35. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit talvi 2020.

Kuvassa 34. nähdään arkipäivien vuorokausivaihtelu talvella 2020. Mäkelänkadulla hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan klo 5:00 aikoihin aamulla ja saavuttavat huipputasonsa klo 8:00-9:00 välillä, minkä jälkeen tapahtuu pieni lasku, mutta hiilidioksidipitoisuudet pysyvät tasaisina koko iltapäivän ajan kohoen klo 17:00-18:00 tietämille, minkä jälkeen alkaa tasainen lasku kohti yön ja aamun tunteja. Muihin vuodenaikoihin verrattuna hiilidioksidipitoisuudet pysyttelevät korkeammalla lähes koko iltapäivän ajan ja varsinaista pitoisuuksien laskua ei tapahdu samalla tavalla verrattuna muihin vuodenaikoihin, kun kasvillisuuden hiilinielut imenevät hiilidioksidia ilmasta. Talvella myös sekoittumisolosuhteet ilmakehässä ovat vähäisemmät verrattuna muihin vuodenaikoihin, mikä pitää hiilidioksidipitoisuudet korkeampina useamman tunnin ajan. Mäkelänkadulla diffuusiosensori seuraa referenssianalysaattoria tarkemmin kuin läpivirtaussensori. Kumpulassa arkitunteina on lähes koko ajan kyseessä taustapitoisuus, koska pitoisuus on hyvin tasaista kaikkina vuorokauden tunteina, poikkeuksena pieni nousu hiilidioksidipitoisuudessa aamun ruuhkatunteina.

Kuvassa 35. esitetään viikonlopun tuntien vuorokausivaihtelu talvella 2020. Varsinaisia pitoisuuspiikkejä ei viikonlopun tunteina nähdä, kun aamupäivän ja iltapäivän työmatkaliikenne on vähäistä. Mäkelänkadulla hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan klo 6:00 aikoihin aamusta kohden iltapäivää klo 16:00, minkä jälkeen ne lähtevät laskemaan yötä ja aamua kohden. Talvisin hiilidioksidipitoisuudet jäävät selvästi leijaillemaan ilmakehään pidemmäksi ajaksi kuin mitä muina vuodenaikoina sekottumisolosuhteiden takia. Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet ovat aamuyön tunteina klo 5:00-9:00 välillä korkeammalla kuin Mäkelänkadulla referenssianalysaattorilla.

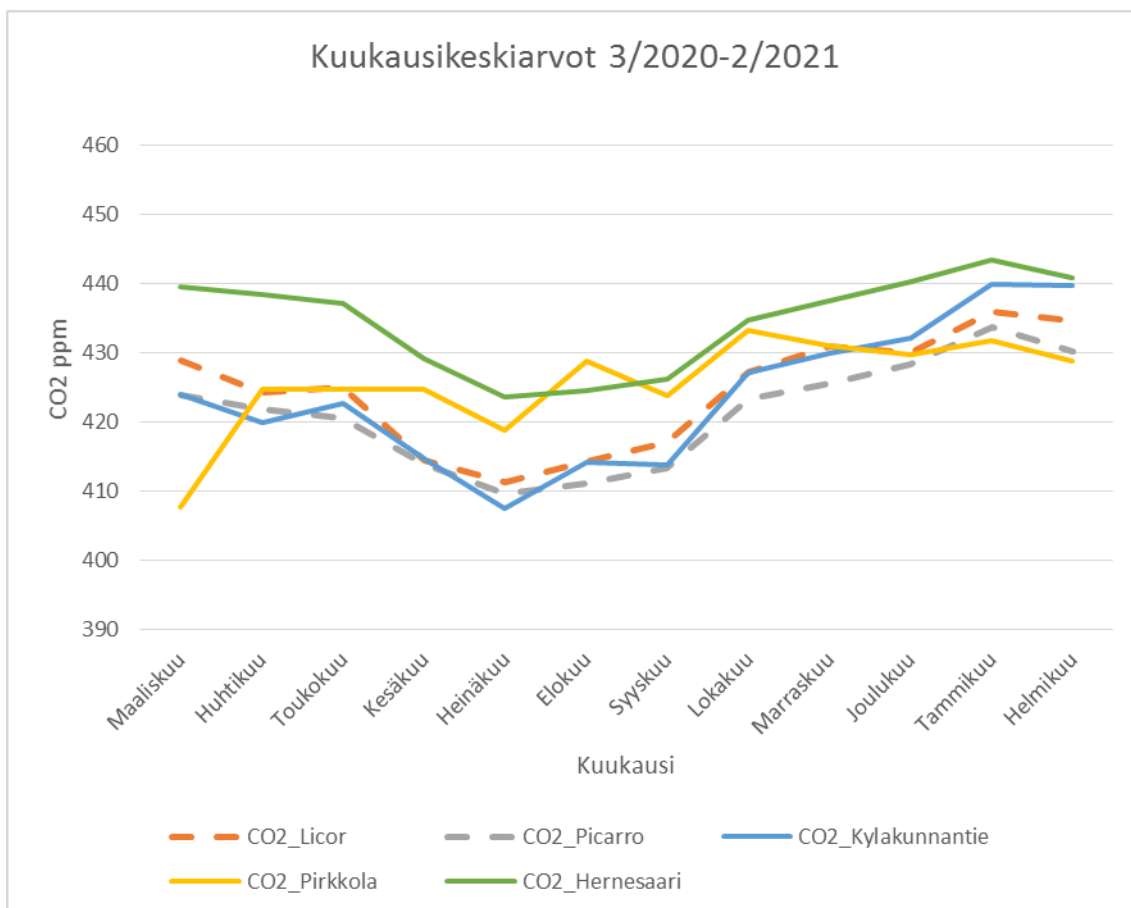
Toisen vertailumittausjakson jälkeen siirryttiin kolmanteen ja viimeiseen vertailumittausjaksoon, missä lähdettiin vertailemaan kahta referenssianalysaattoria kolmeen sensoriin eri mittauspaikoissa.

### 8.3 Kolmas vertailumittausjakso

Kolmannessa ja viimeisessä vertailumittausjaksossa lähdettiin vertailemaan kahta referenssimittausanalysointia kolmeen eri hiilidioksidisensoriin. Mittausjakso kesti vuoden ja se oli 1.3.2020-28.2.2021. Mittausjaksoksi emme saaneet kokonaista vuotta, koska hiilidioksidisensorit saatiin asennettua paikoilleen vasta alkuvuodesta 2020. Kolmannessa mittausjaksossa vertailtiin samoja asioita, mitä tehtiin jo toisessa vertailumittausjaksossa eli kuukausi- ja tuntikeskiarvoja eri vuoden- ja vuorokaudenaikoina. Hiilidioksidisensoreille tehtiin ensimmäisenä korkeuden ja paineen korjauskertoimet ennen kuin mittaustuloksia lähdettiin käsittelemään.

#### 8.3.1 Ensimmäisen ja toisen mittauspaikan referenssilaitteiden vertailu kolmeen eri sensoripisteeseen

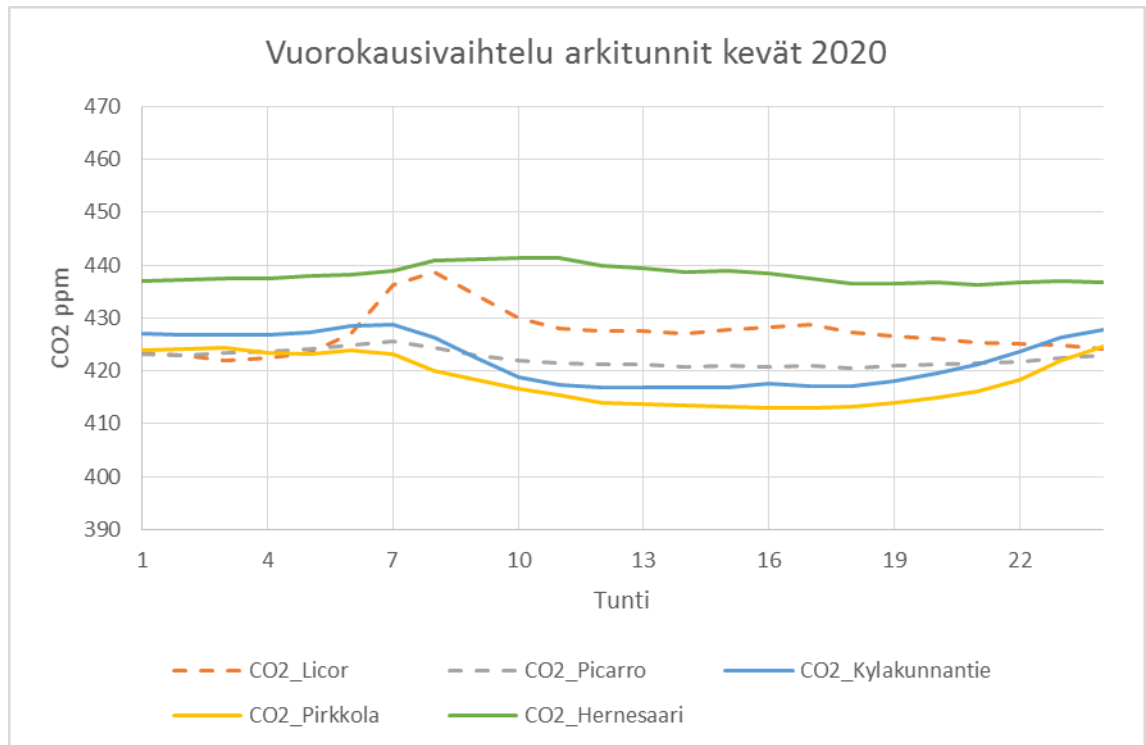
Referenssilaitteiden mittauspaikat olivat samat kuin aikaisemmissa vertailuissa eli HSY:n Mäkelänkadun mittausasema ja Ilmatieteen laitoksen Kumpulan mittausasema. Kolme eri hiilidioksidisensoripistettä olivat Helsingissä sijaitsevat Hernesaaren, Kyläkunnantien ja Pirkkolan mittauspisteet. Hernesaari kuvastaa mittauspaikkana tausta-asemaa meren läheisyydessä, missä on jonkin verran auto- ja laivaliikennettä. Kyläkunnan ja Pirkkolan mittauspisteet sijaitsivat pientaloalueella, missä on jonkin verran liikenteestä ja pientalojen puunpoltosta aiheutuvia päästöjä. Kyläkunnantien ja Pirkkolan mittauspisteiden pohjoispuolella sijaitsi Kehä I, mikä myös vaikutti jonkin verran mittaustuloksiin. Kyläkunnantien mittauspisteestä oli 60 metriä Kehä I:lle, joten siellä liikenteen vaikutus pitoisuuksiin olisi suurempi kuin mitä Pirkkolassa. Mäkelänkadun ja Kumpulan referenssianalysointien pitoisuuskäyrät on esitetty katkoviivalla ja hiilidioksidisensorit kokonaisella viivalla seuraavissa kuvaajissa tulkitsemisen helpottamiseksi.



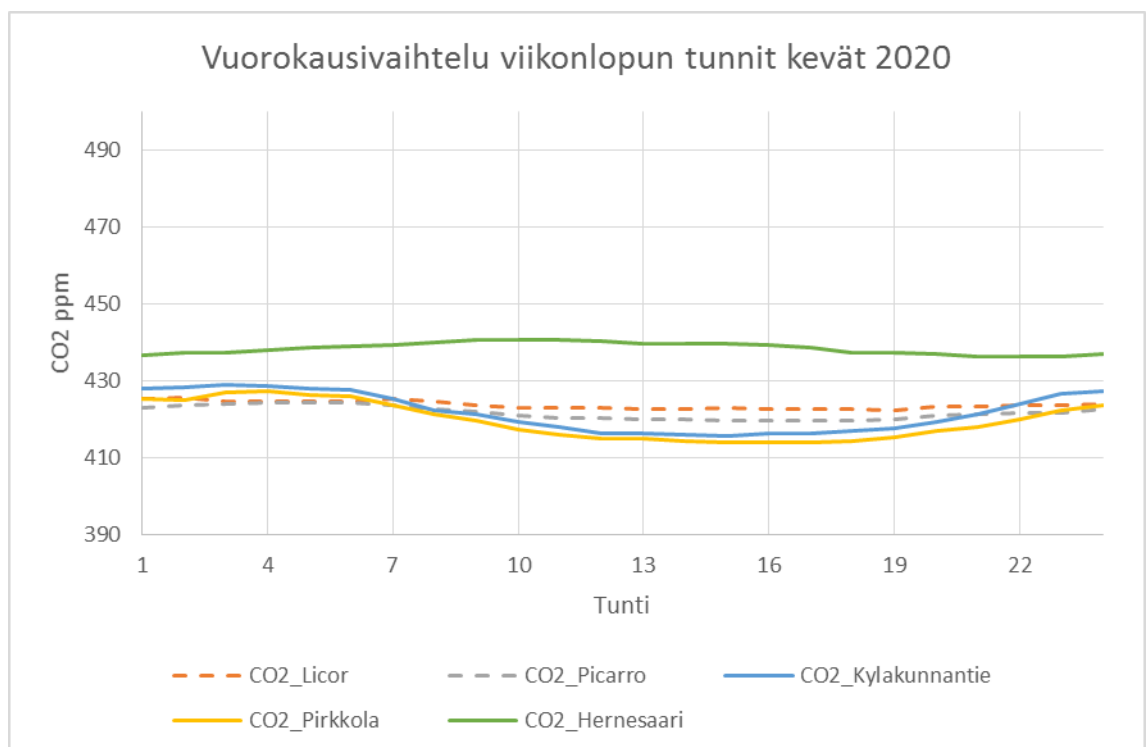
Kuva 36. Kuukausikeskiarvot 1.3.2020-28.2.2021.

Kuvaa 36. katsoessa nähdään, että referenssianalysaattorien, Hernesaaren ja Kyläkunnan hiilidioksidipitoisuudet seuraavat lähes samanlaista pitoisuuskäyrää. Sensorien absoluuttisissa pitoisuustasoissa on kuitenkin selviä eroja. Tämä selittynee pääosin sillä, että sensoriyksilöiden välillä on eroja mittausvasteessa. Esimerkiksi Pirkkolan hiilidioksidisensorilla maalishuhtikuun vaihteessa 2020 tapahtuu erittäin selvä pitoisuustason nousu, koska jouduimme vaihtamaan vaurioituneen hiilidioksidisensorin toiseen. Pirkkolassa uusi hiilidioksidisensori seuraa myös muuten lähes samanlaista pitoisuuskäyrää kuin muilla mittauspisteillä, pois lukien elokuussa 2020 tapahtuva pitoisuustason nousu. Myös Kyläkunnantiellä tapahtuu hiilidioksidipitoisuustason nousu elokuussa 2020. Tämä voisi viitata siihen, että Kehä I:n liikennemäärät ovat lisääntyneet COVID-19 pandemian jälkeen verrattuna alkuvuoden liikennemääriin, mutta myös sääolot ja tuulen suunta voivat vaikuttaa hiilidioksidin pitoisuuksiin ja lähdealueisiin. Keväällä ja kesällä 2020 liikennemäärissä tapahtui notkahdus mitä ilmeisimmin COVID-

19 pandemian ja kesälomien takia, mutta elokuussa 2020 tilanne hetkellisesti lähes normalisoitui. Kolmesta eri hiilidioksidisensorista Kyläkunnantien sensori seuraa kaikista parhaiten Mäkelänkadun ja Kumpulän referenssianalysointoreita. Pirkkolassa pitoisuustaso on korkeammalla mitä Mäkelänkadulla, mikä aiheuttaa epäilyksiä mittaustulosten oikeellisuuteen. Huomiona on kuitenkin sanottava, että Pirkkolan mittauspisteen vieressä sijaitsee iso puu, mikä on varmasti osasyynä korkeaan hiilidioksidin pitoisuustasoon yöaikaan, kun puusta vapautuu hiilidioksidia. Hernesaassa hiilidioksidin pitoisuustaso on noin 10 ppm korkeammalla kuin Mäkelänkadulla, mikä aiheuttaa myös epäilyksiä mittaustulosten luotettavuuteen. Hernesaaren ympäristö on toisaalta hyvin poikkeuksellinen, sillä meren lähetyillä ilmankäytön pitoisuustasoissa on hyvin erilaiset sekoittumisolosuhteet kuin mitä sisämaassa. Ensimmäinen tärkeä huomio kuukausikeskiarvoista on kuitenkin se, että pitoisuuskäyrät noudattavat lähes samanlaista suuntaa kaikilla mittauspisteillä. Talvisaikaan hiilidioksidipitoisuudet ovat myös korkeammat kuin kesäaikaan, mikä kävi myös ilmi vertaillessa vuotta 2019 kuvassa 22. Hiilidioksidisensorit myös hieman yliarvioivat mittaustuloksia, mikä näkyi samanlaisena huomiona, kun vertailtiin Mäkelänkadulla kahta eri hiilidioksidisensoria referenssimittaustulosten kanssa vuonna 2020. Kaikissa kolmessa eri hiilidioksidisensorissa on pitoisuustason kanssa eroja, mikä johtuu siitä, että hiilidioksidisensoreille ei tehty mittausasemilla vertailumittauksia ja tuloksia tarkentavia sensorikohtaisia korjausyhtälöitä. Hiilidioksidisensorit toimitettiin sellaisenaan mittaamaan mittauspisteisiin suoraan laitevalmistajalta. Hiilidioksidisensoreissa on myös keskenään siis varmasti eroa.



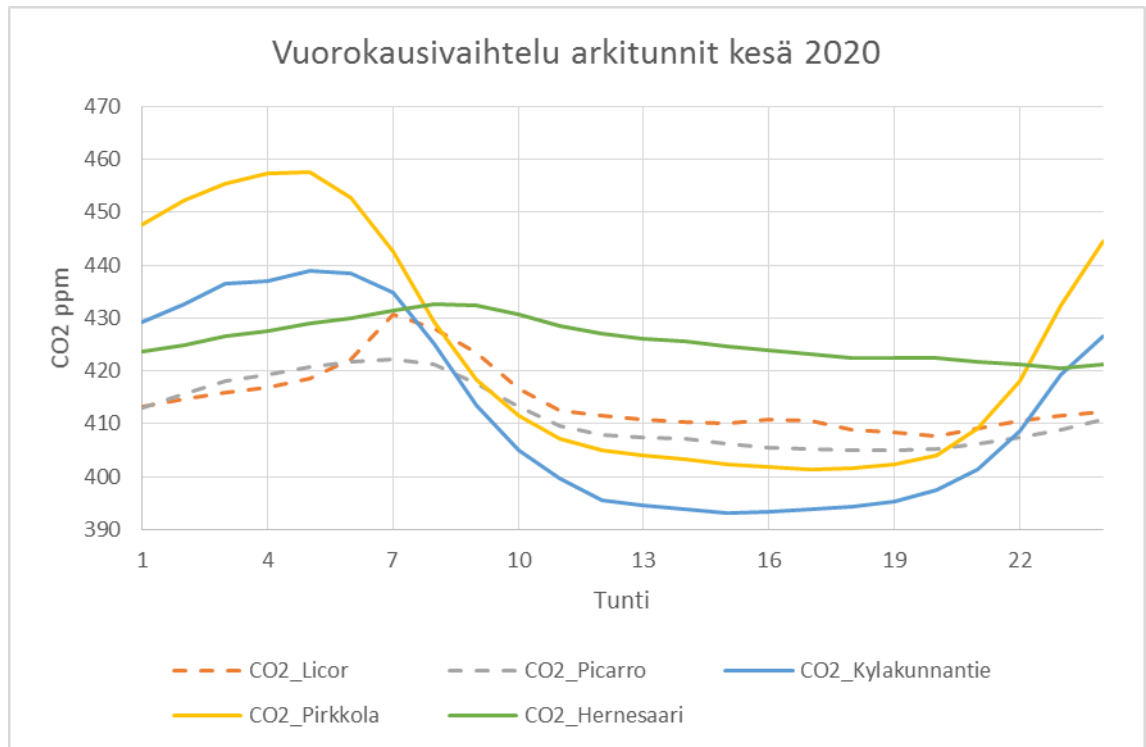
Kuva 37. Vuorokausivaihtelu arkitunnit kevät 2020.



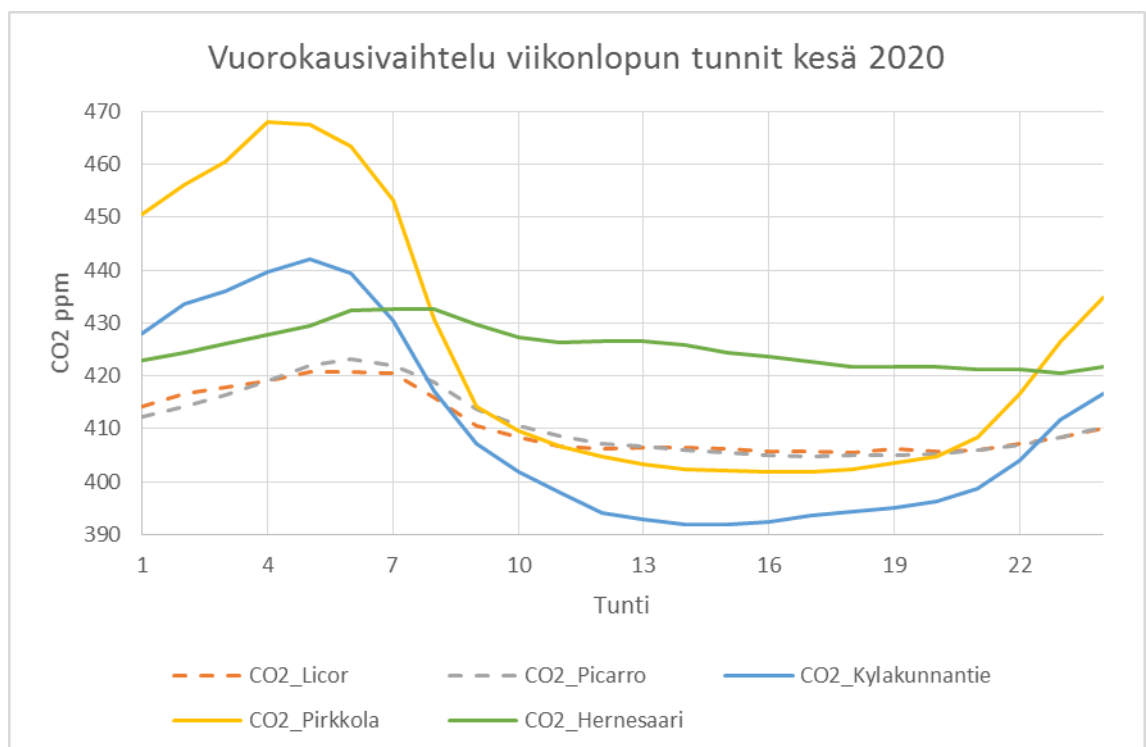
Kuva 38. Vuorokausivaihtelu viikonlopun tunnit kevät 2020.

Kuvassa 37. esitetään arkituntien vuorokausivaihtelu keväällä 2020. Kuvasta voidaan sanoa, että jokaisessa mittauspaikassa tapahtuu aamun työmatkaliikenteen aikana hiilidioksidipitoisuustason nousu klo 5:00-6:00 alkaen sen noustessa klo 9:00 tietämille. Mäkelänkadulla tämä ilmiö näkyy kaikista selkeimmin, missä näkyy myös pitoisuustason nousu iltapäivän aikaan klo 15:00-17:00 tietämällä. Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidipitoisuudet jäävät alhaisemmaksi, mitä Mäkelänkadulla. Pirkkolan mittauspaikassa tapahtui sensorin vaihtuminen maaliskuun vaihteessa, mikä vaikuttaa suuresti alhaisiin pitoisuuksiin, koska maaliskuussa mitannut sensori näytti lähes 20 ppm pienempiä pitoisuuksia. Hernesaaren hiilidioksidisensorin pitoisuustaso leijailee omalla tasollaan, yli 10 ppm korkeammalla kuin Mäkelänkatu. COVID-19 pandemiolla on myös oma vaikutuksensa pitoisuustasojen muutoksiin. Mäkelänkadulla ja Kumpulassa hiilidioksidin pitoisuustasot jäävät alemmaksi vuoden 2020 keväällä kuin vuonna 2019, mikä näkyy kuvassa 24.

Kuvassa 38. esitetään viikonloppujen tunnit keväällä 2020. Hiilidioksidipitoisuudet ovat läpi viikonlopun tuntien hyvin tasaisia. Korkeimmat pitoisuudet esiintyvät aamuyön aikaan kaikissa muissa mittauspaikoissa paitsi Hernesaassa, missä pitoisuustaso nousee pikku hiljaa yön ja aamun tunteina klo 10:00 tietämille. Viikonlopun tunteina liikenne on ollut hyvin vähäistä, mikä on ollut varmasti seurausta COVID-19 pandemian alkamisella keväällä 2020.



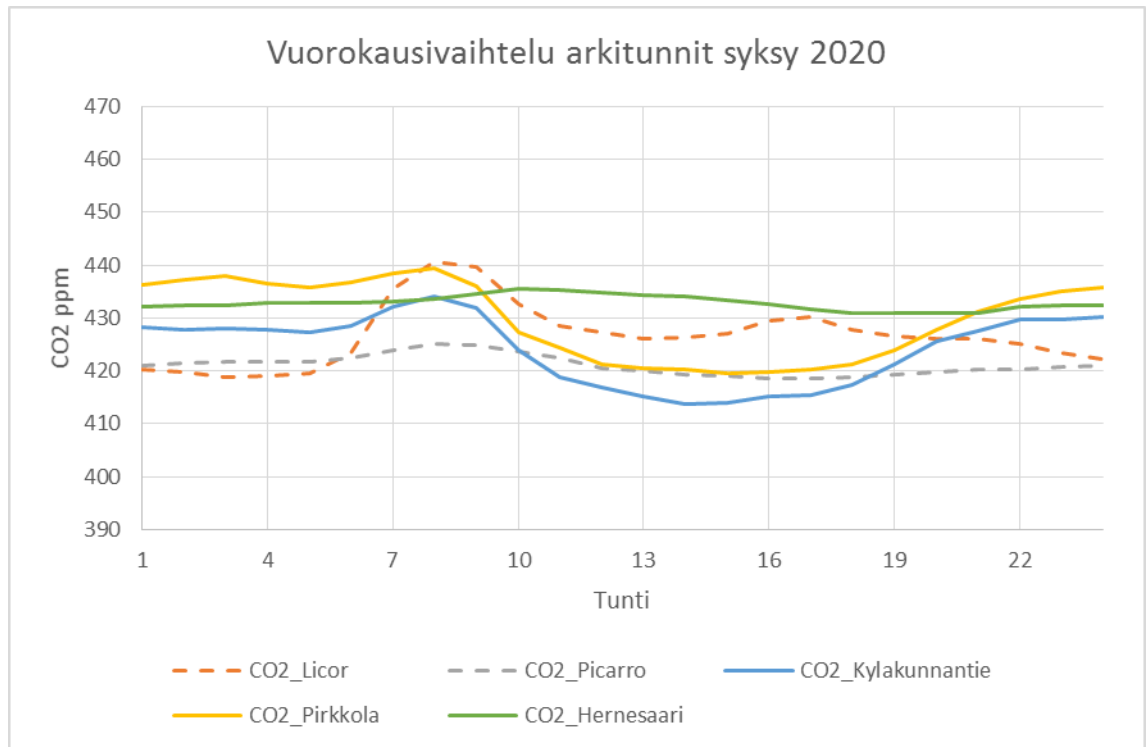
Kuva 39. Vuorokausivaihtelu arkitunnit kesä 2020.



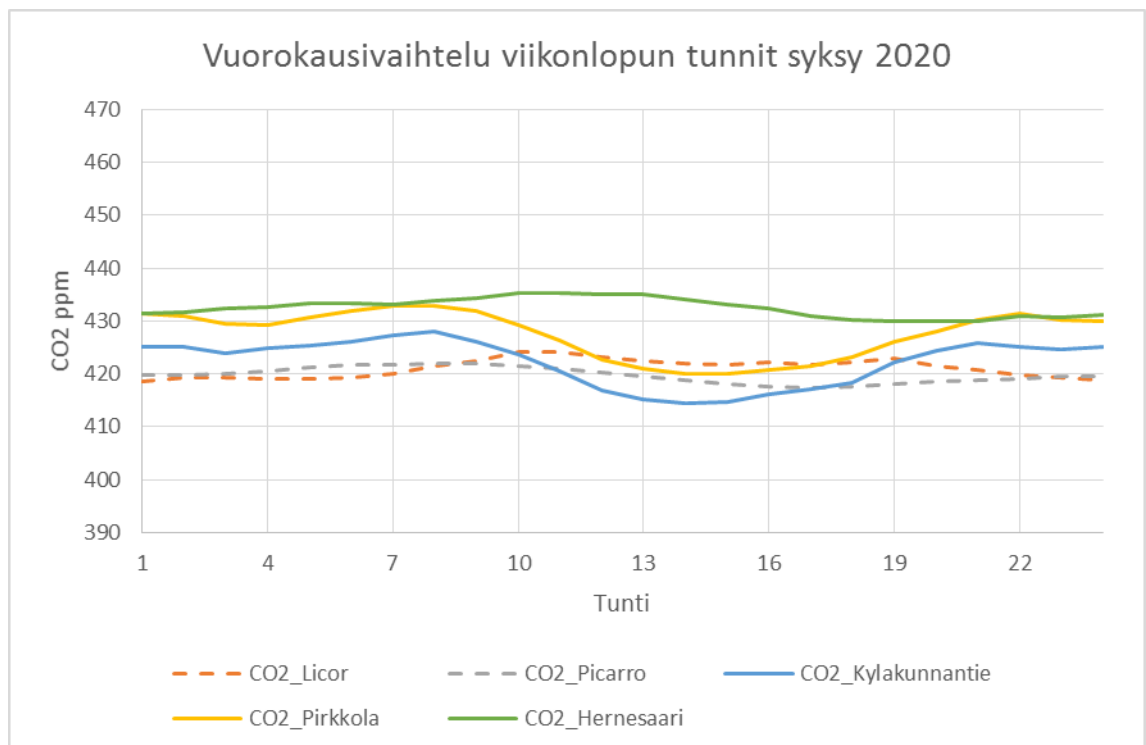
Kuva 40. Vuorokausivaihtelu viikonlopun tunnit kesä 2020.

Kuvassa 39. nähdään arkituntien vuorokausivaihtelu kesällä 2020. Kuten aikaisemmissa vertailumittausjaksoissa, myös tässä hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeimmillaan aamuyön arkitunteina kesällä 2020. Tähän suurin vaikuttava tekijä on kasvillisuus, mikä on kesäisin voimakkaimmillaan aamuyön tunteina, kun on pimeää ja kasvien soluhengitys jatkuu, milloin ilmakehään vapautuu hiilidioksidia eli öisin kasvillisuus on hiilidioksidin lähde ja taas päivävastoin hiilidioksidia sitoutuu päiväsaikaan fotosynteesissä eli yhteyttämisreaktiossa pois ilmakehästä. Kasvukaudella kasvillisuus on nettonielu, koska osa hiilidioksidista sitoutuu kasvillisuuteen. [10.] Aamuyön tunteina hiilidioksidipitoisuudet nousevat korkeimmilleen työmatkaliikenteen vaikutuksessa. Mäkelänkadulla ja Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet nousevat läpi yön saavuttaen huipputasonsa noin klo 7:00 aikoihin. Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa hiilidioksidisensorit noudattavat myös samanlaista pitoisuuskäyrää, mutta huipputaso saavutetaan jo klo 6:00 aikoihin. Hernesaaren pitoisuustaso käyttäytyy myös hyvin samalla tavalla, mutta hiilidioksidipitoisuuden nousu on paljon tasaisempaa verrattuna muihin mittauspaikkoihin, saavuttaen huipputasonsa Hernesaassa klo 8:00 aikoihin. Kaikissa mittauspaikoissa hiilidioksidipitoisuus laskee aamutuntien jälkeen fotosynteesin vaikutuksena, kun hiilidioksidia sitoutuu pois ilmakehästä. Hiilidioksidipitoisuudet lähtevät iltapäivän tuntien jälkeen nousemaan illasta klo 19:00 tietämiltä kohti aamuyön tunteja. Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa hiilidioksidisensorien pitoisuustason vaihtelu on paljon suurempaa kuin mitä muissa mittauspaikoissa.

Kuvassa 40. näkyy kesän 2020 viikonlopun tuntien vuorokausivaihtelu. Kuva näyttää hyvin samankaltaiselta kuin kuva 39. missä näkyy arkitunnit. Suurimpina huomiona voidaan tehdä se, että Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa on viikonloppuisin aamuyöstä vielä korkeammat hiilidioksidipitoisuudet mitä arkipäivinä aamuöisin. Kesällä 2020 viikonloppuisin sensorien hiilidioksidipitoisuudet saavuttavat myös huipputasonsa kolmannen vertailujakson mittaustuloksissa. Mäkelänkadun ja Kumpulassa referenssilaitteita katsottaessa, jälkimmäisen mittauspaikan hiilidioksidipitoisuudet saavuttavat aamuyön tunteina korkeamman pitoisuustason mitä Mäkelänkadulla, johtuen mitä luultavimmin kasvillisuuden vaikutuksesta. Hernesaaren pitoisuuskäyrä näyttää hyvin samanlaiselta viikonloppuna kuin arkena eli kyseessä on mitä todennäköisemmin kyse taustapitoisuudesta.



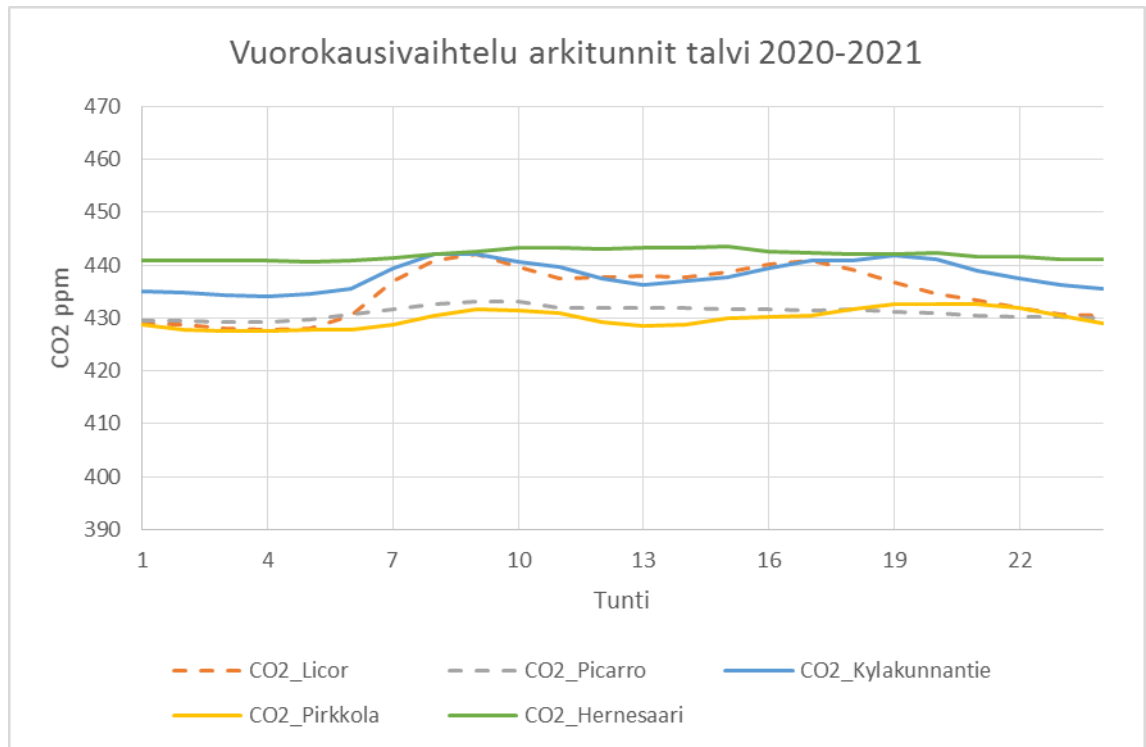
Kuva 41. Vuorokausivaihtelu arkitunnit syksy 2020.



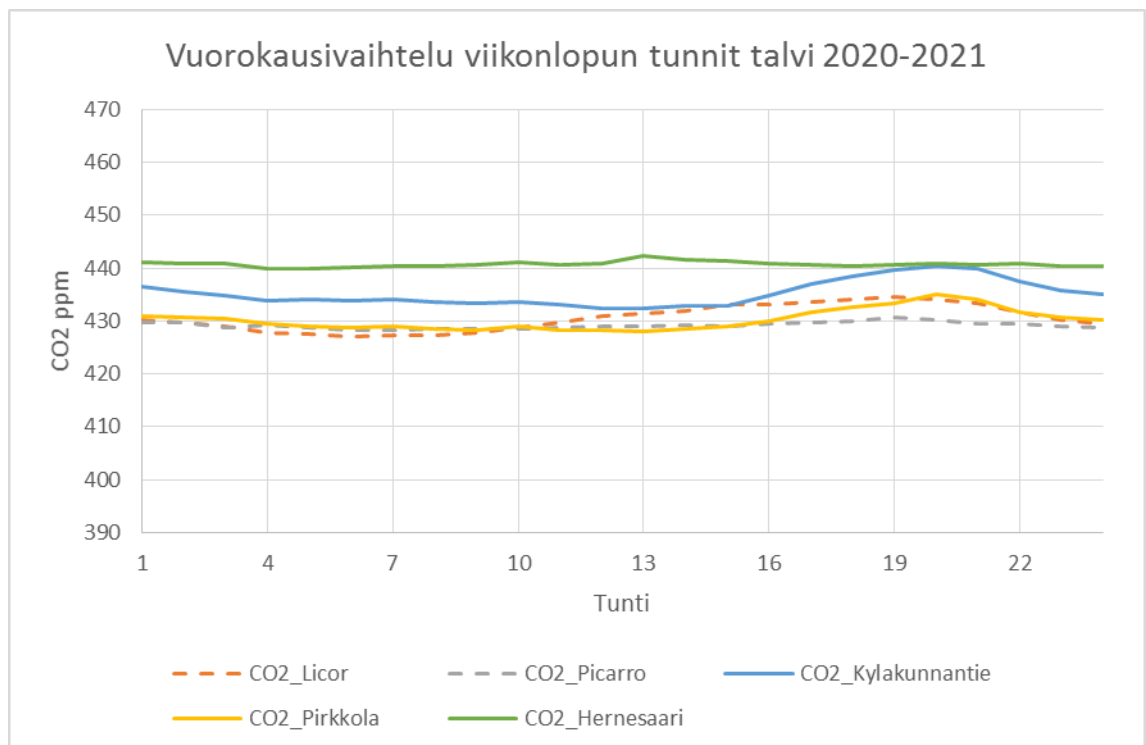
Kuva 42. Vuorokausivaihtelu viikonlopun tunnit syksy 2020.

Kuvassa 41. esitetään arkituntien vuorokausivaihtelu syksyllä 2020. Aamun työmatkaliikenteen vaikutus näkyy selviten hiilidioksidin pitoisuuskäyrissä kaikissa mittauspaikoissa. Hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan klo 5:00 aikoihin saavuttaen huipputasonsa klo 8:00-9:00 aikoihin riippuen mittauspaikasta. Tämän jälkeen hiilidioksidipitoisuudet laskevat iltapäivää ja iltaa kohden. Mäkelänkadulla tapahtuu iltapäiväruuhkan aikaan klo 15:00-18:00 välillä seuraava nousu pitoisuuksissa. Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan vasta klo 18:00-19:00 välillä. Näissä molemmissa mittauspaikoissa hiilidioksidipitoisuudet jäävät leijaillemaan yön ajaksi, mikä kertoisi siitä että kasvillisuudella on vielä vaikutusta myös syksyllä 2020. Hiilidioksidipitoisuudet jäävät kuitenkin noin 20 ppm matalammaksi, mitä ne olivat kesällä 2020 yöaikaan Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa. Mäkelänkadulla hiilidioksidipitoisuudet ovat kaikista matalimmat yöaikaan. Kumpulassa yölliset pitoisuudet jäävät hieman korkeammaksi kuin mitä päiväsaikaan eli tämä myös viittaisi kasvillisuuden vaikutukseen vielä syksyllä. Hernesaaren pitoisuuskäyrä näyttää hyvin tasaiselta eli se kertoo lähinnä hiilidioksidin taustapitoisuudesta meren lähetyillä. Aamu- ja iltapäivän aikaan pitoisuustaso nousee hieman Hernesaassa.

Kuvassa 42. on viikolopun tuntien vuorokausivaihtelu syksyllä 2020. Viikonloppuisin Mäkelänkadun ja Kumpulan referenssianalysaattorien hiilidioksidipitoisuudet ovat matalimmat verrattuna hiilidioksidisensoreihin. Mäkelänkadulla pitoisuudet ovat korkeimmat päiväsaikaan, kun ihmiset ovat liikenteessä ja Kumpulassa yöaikaan, mikä kertoisi kasvillisuuden vaikutuksesta vielä syksyllä 2020. Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidisensorit kulkevat hyvin samankaltaista pitoisuuskäyrää, Pirkkolan ollessa noin 5 ppm korkeammalla kuin Kyläkunnantie. Hernesaaren hiilidioksidipitoisuuskäyrä on hyvin tasainen ja samankaltainen kuin myös syksyn arkitunteina kuvassa 41. eli kyse on lähinnä taustapitoisuudesta.



Kuva 43. Vuorokausivaihtelu arkitunnit talvi 2020-2021.



Kuva 44. Vuorokausivaihtelu viikonloppun tunnit talvi 2020-2021.

Kuvassa 43. nähdään arkituntien vuorokaudenvaihtelu talvella 2020-2021. Mittausajanjakso on joulukuusta 2020 helmikuuhun 2021. Ensimmäisenä huomiona on sanottava, että Pirkkolassa on vaihdettu hiilidioksidisensori toiseen sensoriin joulutammikuun vaihteessa, minkä takia Pirkkolan sensorin hiilidioksidipitoisuudet laskivat. Kevään ja talven 2020 Pirkkolan tulokset ovat hyvin samankaltaiset. Hiilidioksidin pitoisuustaso nousi keväällä maaliskuussa tapahtuneen sensorivaihdon seurauksena ja laski taas joulutammikuussa. Talvella 2020-2021 hiilidioksidipitoisuuksissa tapahtuu perinteinen työmatkaliikenteestä johtuva pitoisuuspiikki aamuisin klo 6:00-9:00 ja iltapäivisin klo 15:00-18:00 välillä. Mäkelänkadulla ja Kyläkunnantiellä hiilidioksidipitoisuudet jäävät leijaillemaan ilmakehään. Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvin matalia kuin myös Pirkkolassa, johtuen hiilidioksidisensorin vaihdoksesta. Hernesaassa pitoisuustaso kertoo jälleen meren lähetyvillä olevasta taustapitoisuudesta. Talvella ei enää näy kasvillisuuden vaikutusta hiilidioksidipitoisuuksissa yöaikaan.

Kuvassa 44. esitetään viikonlopun tuntien vuorokausivaihtelu talvella 2020-2021. Viikonloppuisin hiilidioksidipitoisuudet ovat hyvin tasaisia lähes koko vuorokauden ajan. Aamuisin klo 10:00 aikoihin hiilidioksidipitoisuudet lähtevät hitaasti nousemaan Kyläkunnantiellä, Kumpulassa, Pirkkolassa ja Mäkelänkadulla kohti iltaa klo 19:00-21:00 asti. Talvella ilmakehän sekoittumisolosuhteet ovat erilaiset mitä lämpiminä vuodenaikoina ja hiilidioksidipitoisuudet jäävät leijaillemaan ilmakehään pidemmäksi aikaa. Viikonloppuisin aamun ja iltapäivän liikenteen vaikutusta ei näy, vaan pitoisuudet ovat korkeimmillaan illan aikaan. Hernesaaren pitoisuuskäyrä on tasainen ja kertoo meren lähellä olevasta taustapitoisuudesta.

## 9 Mittaustulosten arviointi ja tulkinta

Mittaustulosten arviointia tehtiin jo hieman aikaisemmin kappaleessa 7., missä mittaustuloksia käsiteltiin. Tähän kappaleeseen on kerätty pääpiirteittäin tulkinat jokaisesta kolmesta vertailumittausjaksosta.

### 9.1 Ensimmäisen vertailumittausjakson tulkinta

Ensimmäinen vertailumittausjakso toteutettiin pelkästään Mäkelänkadulla ja siinä verrattiin referenssianalysaattori LI-COR LI-7000:ta kahteen erilaiseen hiilidioksidisensoriin: diffuusio- ja läpivirtaussensoriin. Mittausajanjakso oli tasan vuoden pituinen aikavälillä 1.2.2020-31.1.2021. Näiden kolmen eri laitteen antaman hiilidioksidipitoisuuden (ppm) lisäksi otettiin mukaan vielä vallitsevat sääolosuhteet mitkä olivat vallitseva lämpötila, ilmankosteus, ilmanpaine ja LI-COR LI-7000 laskema vesimäärä.

Mittaustulosten dataa lähdettiin ensimmäisenä käsittelemään Excelillä. Käsiteltävä data oli tuntidatana eli käsiteltäviä rivejä tuli noin 8760, mistä lähdettiin alunperin liikkeelle. Mittausdatasta poistettiin kaikki kokonaiset rivit jokaiselta kolmelta eri komponentilta, jos jostakin puuttui mittaustuloksia esim. nettiongelmien, sähkökatkon, vikaantumisen yms. takia. Mittausdatan alkukäsittely oli työläs vaihe, kun mittaustuloksia oli vuoden ajanjaksolta niin paljon. Mittausdataa saatiin kerättyä yli 75 %, jotta mittaustulosten määrä oli validi. Virheellisten rivien poiston jälkeen tehtiin regressioanalyysi, minkä avulla nähtiin kuinka hyvin referenssianalysaattori ja sensorit korreloivat keskenään. Kuvat 11., 12. ja 13. esittävät laitteiden väliset regressiosuorat. Selitysasteeksi  $R^2$  saatiin alussa 0,77 molemmille hiilidioksidisensoreille, kun niitä verrattiin referenssianalysaattoriin. Tämä arvo oli hyvin kaukana numerosta 1, mikä tarkoittaa sitä, että mitä lähempänä selitysasteessa ollaan numeroa 1, niin sen parempaa korrelaatio on. Hiilidioksidisensorien väliseksi selitysasteeksi saatiin 0,98, mikä osoittaa erittäin hyvää korrelaatiota. Tärkeää oli alussa huomata, että sensorit mittaavat hyvin keskenään. Piti lähteä selvittämään mikä aiheutti referenssianalysaattorin ja sensorien välisen eron mittaustuloksissa. Lähdettiin pilkkomaan mittaustuloksia pienempiin kokonaisuuksiin eli jaoteltiin regressioanalyysit vielä kuukausikohtaisiksi. Liitteeseen 1. on lisätty kuvat huhti- ja elokuulta vuonna 2020, missä huhtikuussa oli vuoden matalin korrelaatio

mittaustuloksissa ja elokuulla vuoden korkein korrelaatio. Kuukausissa oli siis hyvin paljon eroa. Pohdittiin, että mistä tällöinen ilmiö voisi johtua. Päällimmäisenä huomiona tuli mieleen, että vallitsevat sääolosuhteet ovat varmasti yksi selittävä tekijä. Kerättiin mittausajanjaksolta vallitsevat lämpötilan, ilmankosteuden, ilmanpaineen ja LI-COR LI-7000 mittaaman vesimäärän arvot. Excelissä ei ollut mahdollista saada kolmatta muuttujaa mukaan kuvaajaan, kun haluttiin tarkkailla millä tavalla mikäkin näistä neljästä eri parametrilla vaikuttaa mittaustuloksiin. Tähän tarvittiin avuksi Python-ohjelmointikieltä. Pythonin avulla pystyttiin luomaan täysin uudet kuvaajat, missä nähtiin neljän eri parametrin vaikutus kolmantena muuttujana kuvaajassa. Pythonilla piirretyt kuvaajat ovat kuvat 14-17. Ensimmäisenä huomiona uusista kuvaajista pisti silmään se, että ilmanpainetta tarkasteltaessa näkyi selvät pistejoukot regressiosuoran ympärillä, mitkä poikkesivat täysin suoralta. Ilmanpaineen käytöstä ruvettiin ajattelemaan tarkemmin ja ymmärrettiin, että hiilidioksidisensoreihin on asetettu vakioarvo 1013 hPa ilmanpaineelle. Tämän oivaltamisen seurauksena hiilidioksidisensoreille tehtiin ilmanpaineen korjauskerroin. Laskennassa otettiin huomioon ilmanpaineen muutoksen lisäksi myös sensorien korkeus merenpinnasta. Ilmanpaineenkorjauskertoimen laskemisen jälkeen piirrettiin uudet kuvaajat, mitkä löytyvät kuvista 18-21. Ilmanpaineen korjauskertoimen jälkeen referenssianalysointia ja sensorien selitysasteeksi  $R^2$  saatiin 0,96 eli se parani huomattavasti alkuperäisestä 0,77 arvosta. Uusista kuvaajista yritettiin vielä löytää jotakin muuta selittävää tekijää mittaustulosten väliselle erolle, mutta selvää sellaista ei löytynyt. Uutta selitysasteen arvoa pidettiin tarpeeksi hyvänä ja päädyimme hyväksymään nykyisen korrelaation.

Ensimmäisen vertailumittausjakson tärkein huomio oli se, että saatiin selville ilmanpaineesta johtuva ero mittaustuloksissa. Mäkelänkadulla oleville hiilidioksidisensoreille tehdyn ilmanpaineenkorjauksen jälkeen mittaustulokset olivat riittävän hyviä vertautumaan referenssianalysointiin LI-COR LI-7000.

## 9.2 Toisen vertailumittausjakson tulkinta

Toisessa vertailumittausjaksossa tehtiin kaksi erillistä vertailua vuosien 2019 ja 2020 osalta. Vuonna 2019 verrattiin HSY:n Mäkelänkadun ja Ilmatieteen laitoksen Kumpulan referenssianalysaattorin hiilidioksidipitoisuuksia toisiinsa ja tämän lisäksi seurattiin myös kahden eri mittauspaikan, Mäkelänkadun ja Kallion typen oksidien pitoisuuksia, jotta nähtiin kuinka liikenteestä syntyvät pakokaasut seuraavat hiilidioksidipitoisuuksia. Vuonna 2020 verrattiin Mäkelänkadun referenssianalysaattorin sekä diffuusio- ja läpivirtaussensorin hiilidioksidipitoisuuksia Kumpulan referenssianalysaattoriin. Vuodelta 2020 tiputettiin typen oksidien pitoisuudet pois tuntikeskiarvoista, koska tulkittavat kuvaajat olisivat menneet sekaviksi liiallisen informaation takia. Haluttiin vertailla kahta erillistä vuotta, jotta saatiin kattavampi näkökulma hiilidioksidipitoisuuksista, koska vuosi 2020 oli poikkeusvuosi COVID-19 pandemian takia. Molemmille vuosille laskettiin kuukausi- ja tuntikeskiarvot pitoisuuksissa.

Kuukausikeskiarvoja katsottaessa kuvassa 22. vuonna 2019 huomattiin, että hiilidioksidia ja typen oksidien -pitoisuudet seuraavat samanlaista pitoisuuskäyrää ympäri vuoden. Korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet mitattiin talvella ja keväällä Mäkelänkadulla ja Kumpulassa ja matalimmat kesällä ja syksyllä. Talvisaikaan hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammat johtuen ilmakerroksen huonommista sekoittumisolosuhteista eli pitoisuudet jäävät pidemmäksi ajaksi leijaillemaan maan tasolle. Keväällä ei kasvillisuuden vaikutus näy niin suuresti hiilidioksidipitoisuuksissa, mutta kesällä ja syksyllä pitoisuudet laskevat. Kasvien fotosynteesissä eli auringon valoenergialla tapahtuvassa yhteyttämisessä, missä hiilidioksidia ja vettä kuluu ilmasta synnyttäen glukoosia ja happea esiintyy enemmän kesä- ja syysaikaan. Tästä johtuen hiilidioksidipitoisuustason vaihtelu on vuodenaikaan ja vuorokauden kellonaikaan riippuvaista yön ja päivän välillä. Kesäöisin hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammat kuin päiväsaikaan, johtuen siitä syystä, että päiväsaikaan hiilidioksidia imetään pois ilmakehästä kasvien yhteyttämisessä ja yöaikaan hiilidioksidipitoisuudet nousevat kesällä, koska yöaikaan yhteyttämistä ei tapahdu auringonvalon puutteen takia. Korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet olivat marraskuussa 2019 Mäkelänkadulla 436 ppm ja Kumpulassa 427 ppm. Korkeimmat typen oksidien pitoisuudet olivat tammikuussa 2019 Mäkelänkadulla  $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja Kalliossa  $32 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Typen oksidien pitoisuus Mäkelänkadulla seuraa selvästi samanlaista pitoisuuskäyrää kuin hiilidioksidipitoisuus. Kallion mittausasemalla oleva

typen oksidien pitoisuus jää matalammalle tasolle kuin Mäkelänskadulla, koska Kalliossa liikenteen päästöt ovat väheisemmät. Mäkelänskadun mittausasema kuvastaa vilkasliikenteistä katukuilua, kun Kallion ja Kumpulans mittausasemat ovat kaupungin tausta-asemia ja näissä pitoisuudet jäävät alhaisemmiksi. Alhaisimmat hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet olivat heinäkuussa 2019, kun kasvillisuuden vaikutus on ollut suurimmillaan ja työmatkaliikenne vähäisintä johtuen ihmisten kesäloman ajankohdasta. Alhaisimmat kuukausikeskiarvojen hiilidioksidipitoisuudet olivat Mäkelänskadulla 408 ppm ja Kumpulassa 406 ppm. Alhaisimmat kuukausikeskiarvojen typen oksidien pitoisuudet olivat Mäkelänskadulla 33 µg/m<sup>3</sup> ja Kalliossa 13 µg/m<sup>3</sup>.

Vuonna 2020 kuukausikeskiarvot esitetään kuvassa 23. Vuoteen 2019 verrattaessa huomataan, että hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuudet ovat matalimmat vuonna 2020. Hiilidioksidipitoisuudet Mäkelänskadulla ja Kumpulassa seuraavat samanlaista pitoisuuskäyrää ja pitoisuudet käyttäytyvät samalla tavalla kuin vuonna 2019 eli korkeimmat pitoisuudet ovat talvella ja keväällä 2020, kun taas matalimmat pitoisuudet ovat kesällä ja syksyllä 2020. Korkeimmat kuukausikeskiarvot hiilidioksidissa olivat vuonna 2020 marraskuussa Mäkelänskadulla referenssianalysaattorilla 431 ppm, maaliskuussa diffuusiosensorilla 433 ppm, maaliskuussa läpivirtausensorilla 439 ppm ja marraskuussa Kumpulassa referenssianalysaattorilla 425 ppm. Korkeimmat typen oksidien pitoisuudet olivat tammikuussa 2020 Mäkelänskadulla 55 µg/m<sup>3</sup> ja Kalliossa 16 µg/m<sup>3</sup>. Alhaisimmat hiilidioksidipitoisuudet olivat heinäkuussa 2020 Mäkelänskadulla referenssianalysaattorilla 411 ppm, diffuusiosensorilla 414 ppm, läpivirtausensorilla 421 ppm ja Kumpulassa referenssianalysaattorilla 410 ppm. Jos verrataan vuoden 2019 ja 2020 hiilidioksidipitoisuuksia huhtikuussa eli minkälainen vaikutus COVID-19 pandemialla on ollut hiilidioksidipitoisuuksiin, niin pitoisuudet olivat vuonna 2019 Mäkelänskadulla 430 ppm ja vuonna 2020 424 ppm, kun pitoisuudet Kumpulassa olivat vuonna 2019 422 ppm ja vuonna 2020 myös 422 ppm. Mäkelänskadulla hiilidioksidipitoisuudet laskivat ainoastaan noin 1,5 % työmatkaliikenteen vähentyessä, kun taas Kumpulassa pitoisuudet eivät laskeneet ollenkaan. Työmatkaliikenteen vähenemisellä ei ollut suurta vaikutusta Mäkelänskadun hiilidioksidipitoisuuksien laskuun. Alhaisimmat typen oksidien pitoisuudet olivat COVID-19 pandemian aikaan huhtikuussa Mäkelänskadulla 28 µg/m<sup>3</sup> ja Kalliossa 8 µg/m<sup>3</sup>. Työmatkaliikenteen vähentyessä keväällä 2020 typen oksidien pitoisuudet laskivat huomattavasti verrattuna vuoden 2019 pitoisuuksiin. Vuonna 2019 typen oksidien pitoisuudet olivat huhtikuussa Mäkelänskadulla

69  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja Kalliossa 24  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  eli pitoisuudet laskivat lähes 40 % Mäkelänkadulla ja 33 % Kalliossa COVID-19 pandemian seurauksena.

Vuoden 2019 vuodenaikaisvaihtelua ja arkituntien jakautumisesta päällimmäisenä jäi mieleen se, että hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuudet kulkevat hyvin samankaltaista pitoisuuskäyrää vuodenaajasta ja kellonajasta riippumatta kolmessa eri mittauspisteessä. Korkeimmat tuntipitoisuudet nähdään aamun työmatkaliikenteen ruuhkien aikana klo 5:00-10:00 ja toiseksi korkeimmat pitoisuuspiikit iltapäivän työmatkaliikenteen klo 14:00-21:00 aikana riippuen vuodenaajasta. Varsinkin Mäkelänkadulla hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuudet seuraavat hyvin toisiaan. Mäkelänkadun vilkasliikenteissä katukuilussa hiilidioksidipitoisuudet ovat lähes aina korkeammalla kuin mitä Kumpulassa tausta-aseamalla, pois lukien aamuöiset tunnit klo 00:00-05:00 välillä riippuen vuodenaajasta. Kesällä ja syksyllä Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet säilyvät korkeammalla kasvillisuuden vaikutuksesta aamuyön tunteina pidemmän aikaa kuin mitä talvella tai keväällä. Kallion tausta-aseamalla typen oksidien pitoisuudet jäävät matalemmalle tasolle, mitä Mäkelänkadun vilkasliikenteissä katukuilussa koko vuoden ajalta. Kalliossa nähdään arkaamun tunteina klo 6:00-10:00 välillä nousu, minkä jälkeen typen oksidien pitoisuudet laskevat maltillisesti kohti iltapäivää ja yötä kaikkina vuodenaikoina, pois lukien talven, jolloin iltapäivän aikaan tapahtuu muutama tuntipiikkittely pitoisuuksissa.

Vuoden 2019 vuodenaikaistavaihtelu ja viikonlopun tuntien jakautuminen näkyy kevään ja syksyn osalta lähes tasaisena taustapitoisuutena. Vuorokauden tunteina näkyy keväällä ja syksyllä pieniä piikkejä pitoisuuksissa, mutta kesällä hiilidioksidipitoisuuden nousu yöaikaan näkyy todella selvästi liitteessä 3. olevassa kuvassa. Mäkelänkadulla ja Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet lähtevät nousemaan kesällä noin klo 00:00 jatkaen nousua klo 7:00 asti. Yöaikaan kasvit lepäävät ja auringonvalon vähentyessä ne lopettavat fotosynteesin eli auringonvalon avulla tapahtuvan yhteyttämisen ja hiilidioksidia ei enää sitoudu kasveihin samalla tavalla kuin päiväsaikaan ja näin ollen hiilidioksidipitoisuus kasvaa yöaikaan kesällä eli kasvillisuus on yöaikaan hiilidioksidin lähde. Talvella 2019 viikonlopun tunteina Mäkelänkadun hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet kulkevat samanlaista pitoisuuskäyrää klo 7:00 pitoisuuksien lähtiessä nousemaan kohti huippupistettä klo 16:00, minkä jälkeen molemmat pitoisuuksista lähtevät laskemaan aamua kohti. Talvisaikaan sekoittumisolosuhteet ovat heikkomat

kylmän ilman takia ja pitoisuudet jäävät leijaillemaan pidemmäksi aikaa ilmakehään. Aamun ja iltapäivän aikana talvella viikonloppuisin ei näy aamu- tai iltapäiväruuhkien vaikutusta vaan liikenne on hyvin tasaista viikonloppuisin kellonajasta riippumatta. Selvää on kuitenkin se, että hiilidioksidipitoisuudet nousevat huomattavasti liikenteen vaikutuksesta. Kuva 27. näyttää tämän ilmiön. Kalliossa typen oksidien pitoisuudet ja Kumpulassa hiilidioksidipitoisuudet näyttävät tasaista taustapitoisuutta, mutta Mäkelänkadulla liikenteen ilmiö näkyy selvästi hiilidioksidi- ja typen oksidien - pitoisuuksissa.

Vuoden 2020 vuodenaikaisvaihtelun ja arkituntien hiilidioksidipitoisuudet Mäkelänkadun ja Kumpulan referenssianalysointoreilla näyttävät kulkevan samanlaista pitoisuuskäyrää kuin vuonna 2019. Pitoisuudet ovat kuitenkin hieman korkeammat vuonna 2020 kuin vuonna 2019. Kevään 2020 osalta arkituntien hiilidioksidipitoisuudet jäivät matalammiksi kuin kevään 2019 osalta. Tähän selittävänä tekijänä on varmasti COVID-19 pandemian alkaminen keväällä 2020, jolloin työmatkaliikenne väheni. Aamuyön ja iltapäivän tunteina vuonna 2020 arkitunteina ei esiinny niin korkeita hiilidioksidipitoisuuksia kuin vuoden 2019 keväällä. Myös syksyllä ja talvella 2020 hiilidioksidipitoisuudet jäivät hieman matalimmiksi kuin vuonna 2019. Kesällä hiilidioksidipitoisuudet ovat kuitenkin korkeammat vuonna 2020 kuin vuonna 2019. Hiilidioksidisensorit antavat hieman korkeamman pitoisuuden kuin mitä referenssianalysointorit. Mäkelänkadulla referenssianalysointori ja sensorit kulkevat kuitenkin samansuuntaista käyrää vuodenaikasta riippumatta. Kumpulassa korkeimmat arkituntien pitoisuudet esiintyvät aamun tunteina eli pitoisuuskäyrä kulkee vastaavalla tavalla kuin vuonna 2019.

Vuoden 2020 vuodenaikaisvaihtelun ja viikonlopun tuntien jakautuminen näyttää samanlaiselta kuin vuonna 2019. Viikonlopun tuntien hiilidioksidipitoisuudet ovat korkeammat keväällä, kesällä ja syksyllä 2020 kuin vuonna 2019. Talvella 2020 hiilidioksidipitoisuudet ovat Mäkelänkadulla hieman matalimmat kuin vuonna 2019, mutta Kumpulassa hiilidioksidipitoisuus on lähes samaa luokkaa molempina vuosina. Talvella 2020 hiilidioksidipitoisuus käyrä noudattaa samanlaista kaavaa kuin vuonna 2019 eli pitoisuudet nousevat tasaisesti klo 7:00 alkaen saavuttaen huippupisteen klo 16:00, minkä jälkeen pitoisuudet laskevat yöttä kohti. Viikonlopun tunteina kesällä 2020 kasvillisuuden vaikutus yöaikaan näkyy taas selvästi kuvassa 31 samalla tavalla kuin vuonna 2019 liitteessä 3.

### 9.3 Kolmannen vertailumittausjakson tulkinta

Kolmannessa vertailumittausjaksossa verrattiin kahta referenssianalysaattoria kolmeen eri hiilidioksidisensorin mittauspisteeseen. Mittaustuloksista tehtiin kuukausi- ja tuntikeskiarvot samalla tavalla kuin toisessa vertailumittausjaksossa.

Kuvassa 36. esitetään kuukausikeskiarvot ajalla 1.3.2020-28.2.2021. Hiilidioksidipitoisuudet seuraavat koko vuoden mittaisella ajanjaksolla lähes samanlaista pitoisuuskäyrää. Kaikista selviten toisiensa kanssa korreloivat Mäkelänkadun ja Kumpulan referenssianalysaattorit yhdessä Kyläkunnantien hiilidioksidisensorin kanssa. Pirkkolan hiilidioksidisensorin pitoisuudet ovat korkeammalla tasolla lähes koko vuoden verrattuna muihin mittauspisteisiin ja Hernesaaren hiilidioksidisensorin pitoisuustaso on vielä korkeammalla tasolla kuin Pirkkolassa. Maaliskuusta 2020 lähtien hiilidioksidipitoisuudet laskevat syyskuuta kohden, milloin hiilidioksidipitoisuudet lähtevät taas nousemaan talvea kohti. Poikkeuksen kesäaikaan hiilidioksidipitoisuuden laskussa tekevät Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidisensorit elokuussa 2020, milloin molemmissa mittauspisteissä tapahtuu hiilidioksidipitoisuuksissa piikki ylöspäin. Pirkkolan hiilidioksidisensorissa tapahtui myös sensorin vaihto maaliskuussa 2020, minkä takia pitoisuustasossa näkyy korkea nousu. Vastaavasti joulutammikuun vaihteessa vaihdettiin myös Pirkkolassa hiilidioksidisensori. Päällimmäisenä huomiona kuukausikeskiarvoista voidaan sanoa, että hiilidioksidipitoisuudet ovat kaikki lähes samansuuntaisia koko vuoden mittaisella ajanjaksolla. Pirkkolan sensorissa tapahtuu pientä piikittelyä ja pitoisuustaso on myös korkeammalla. Hernesaaren myös pitoisuustaso on epäilyttävän korkealla. Tämä pitoisuustason ero johtuu todennäköisesti siitä, että Hernesaaren sijoitetun sensorin pitoisuustaso oli pielessä ja sille olisi pitänyt tehdä alkuun vertailumittaus Mäkelänkadulla yhdessä referenssianalysaattorin kanssa.

Vuoden 2020 arkituntien vuorokausivaihtelun hiilidioksidipitoisuuksien jakautumisesta referenssianalysaattorien ja sensorien välillä jää ensimmäisenä huomiona mieleen se, että pitoisuuskäyrät kulkevat lähes samansuuntaista jakaumaa vuorokauden tuntien välillä. Ainoan poikkeuksen tästä tekee Hernesaaren hiilidioksidisensori, millä pitoisuustaso on hyvin tasaista vuodenajasta riippumatta. Keväällä 2020 Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidisensorit kulkevat hyvin samankaltaista käyrää. Kesällä 2020 kasvillisuuden vaikutus aamuyön tunteina hiilidioksidipitoisuudessa näkyy myös

Hernesaaren hiilidioksidisensorilla, mikä on positiivinen havainto. Kasvillisuuden vaikutus kesällä 2020 näkyy kuitenkin selvemmin Kyläkunnantien ja Pirkkolan sensoreilla, missä pitoisuustason vaihtelu yön ja päivän välillä on jopa 50-60 ppm. Kesällä 2020 korkeimmat tuntikohtaiset hiilidioksidipitoisuudet mitattiin Pirkkolassa klo 4:00 (460 ppm) ja alhaisimmat klo 16:00 (402 ppm). Vastaavasti Kyläkunnantiellä korkeimmat hiilidioksidipitoisuudet olivat klo 5:00 (440 ppm) ja alhaisimmat klo 15:00 (393 ppm). Kasvillisuuden vaikutus näkyy suuresti kesällä 2020 näissä kahdessa mittauspisteessä ja ne edustavatkin molemmat samanlaista pientaloaluetta, missä päästölähteinä ovat lähiliikenne, pientalojen puunpoltto ja mahdollisesti myös Kehä I:n liikenteen vaikutus. Tämä ilmiö näkyy kuvasta 39. Vastaavaa pitoisuustason vaihtelua ei referenssianalysaattoreilla näy. Tässä täytyy kuitenkin ottaa huomioon se, että referenssianalysaattorien mittauspaikka Mäkeläkadulla edustaa vilkasliikenteistä katukuilua ja Kumpulassa mittauspaikka edustaa kaupungin tausta-asemaa. Syksyllä 2020 kasvillisuuden vaikutus näkyy hiilidioksidisensoreilla pitoisuustasojen ollessa korkeammalla yöaikaan kuin mitä päiväsaikaan, mutta pitoisuustason muutos ei ole niin suuri kuin mitä kesällä 2020. Talvella 2020-2021 arkitunteja katsottaessa aamun ja illan aikana nähdään pitoisuustasojen nousu työmatkaliikenteen takia. Hiilidioksidipitoisuudet jäävät myös leijaillemaan talvisaikaan pidemmäksi aikaa, mikä näkyi myös toisessa vertailujaksossa vuonna 2019 ja 2020. Referenssianalysaattorit Mäkeläkadulla ja Kumpulassa kulkevat hyvin samankaltaista pitoisuuskäyrää koko vuoden mittaisella ajanjaksolla. Puolestaan taas Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidisensorit kulkevat keskenään hyvin samankaltaista pitoisuuskäyrää. Voidaan kuitenkin todeta, että referenssianalysaattorit ja sensorit kulkevat hyvin samanlaista pitoisuuskäyrää, pois lukien kesällä 2020, milloin pitoisuustason vaihtelu oli suurta Kyläkunnantien ja Pirkkolan sensoreilla verrattuna referenssianalysaattoreihin. Pirkkolan hiilidioksidisensori näyttää kesällä ja syksyllä 2020 korkeammat hiilidioksidipitoisuudet kuin keväällä ja talvella 2020. Tämä ilmiö johtuu siitä, että sensori jouduttiin vaihtamaan maaliskuun ja joulutammikuun vaihteissa. Pirkkolaan vaihdettujen sensorien välinen pitoisuustason ero oli noin 8 % eli 30 ppm. Tämän takia talvella ja keväällä sensorilla on matalimmat pitoisuudet kuin mitä kesällä ja syksyllä.

Vuorokausivaihtelusta viikonlopun tuntien välillä vuonna 2020 voidaan todeta, että keväällä 2020 pitoisuuskäyrät olivat kaikissa mittauspaikoissa todella tasaisia. Tämän ilmiön takana on varmasti COVID-2019 pandemia. Kesällä 2020 viikonlopun tuntien

pitoisuuskäyrät seuraavat lähes samanlaista käyrää kuin arkitunteina. Mäkelänkadulla aamun työmatkaliikenteen pitoisuustason nousu jää pois. Kyläkunnantien ja Pirkkolan sensorien välinen pitoisuustason vaihtelu yön ja päivän välillä näkyy selvästi kuin myös arkitunteina. Syksyllä 2020 viikonloppuina Kyläkunnantien ja Pirkkolan hiilidioksidisensorien pitoisuudet ovat korkeimmillaan ilta- ja yöaikaan ja matalimmat päiväsaikaan eli kasvillisuuden vaikutus näkyy vielä sensoreissa myös syksyllä. Pitoisuustason ero ei ole kuitenkaan niin voimakas kuin mitä kesällä 2020. Talvella 2020-2021 viikonlopun tunteina pitoisuuskäyrät ovat hyvin tasaisia. Korkeimmat pitoisuudet nähdään iltapäivän ja illan aikaan. Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa pitoisuudet lähtevät nousemaan klo 16:00 aikoihin saavuttaen huippupisteen klo 19-20 tietämillä. Tämä voisi kertoa talvisaikaan tapahtuneesta pientaloalueen puunpoltosta ja mittauspaikkojen lähetyvillä olevan Kehä I:n liikenteestä.

## 10 Johtopäätökset

Helsingin seudun ympäristöpalvelut -kuntayhtymän ilmanlaadun yksikössä oli tarve selvittää kahden erilaisen hiilidioksimittauksen toiminnallisuutta keskenään. Hiilidioksidipitoisuutta on mitattu HSY:llä LI-COR LI-7000 referenssianalysaattorilla vuodesta 2016 lähtien ja uuden teknologian omaavilla hiilidioksidisensorilla (Vaisala GMP343) vuodesta 2019 lähtien. Tutkimuksen lähtökohtana oli sensorien suuri vaihteluväli hiilidioksidipitoisuuksissa. Päällimmäisenä selvityskohteena oli tietää kuinka hyvin ja tarkasti sensorien hiilidioksidipitoisuus vertautuu referenssianalysaattoriin. Tutkimus sai rahoituksen Euroopan Unionin HOPE (Healthy Outdoor Premises for Everyone) –hankkeesta.

Tutkimuksen ensimmäisenä ja päällimmäisenä tavoitteena oli selvittää kuinka melko uutta teknologiaa omaavien hiilidioksidisensorien (Vaisala GMP343) mittaustulokset vertautuvat referenssianalysaattoriin (LI-COR LI-7000) eli hiilidioksidisensorien laadunvarmennus. Tämän lisäksi tavoitteena oli saada selville uutta tietoa hiilidioksidin pitoisuustasosta eri vuoden- ja vuorokauden tuntien aikana erilaisissa mittauspaikoissa Suomen kaupunkiympäristössä. Hiilidioksidisensoreille ja referenssianalysaattoreille tehtiin kolme eri vertailumittausjaksoa, minkä avulla hiilidioksidipitoisuuksien mittaustuloksien datalle tehtiin analysointi ja tulosten laadun tarkastelua. Käsiteltävät

mittaustulokset olivat tuntidatana ja jokainen vertailumittausjakso kesti tasan vuoden. Vertailumittausjaksojen pituudet vaihtelivat sen mukaan milloin hiilidioksidisensoreita oli saatu asennettua kentälle.

Ensimmäisessä vertailumittausjaksossa tutkittiin HSY:n Mäkelänkadun mittausasemalla sijaitsevia mittalaitteita. Kahden erilaisen hiilidioksidisensorin (Vaisala GMP343 diffuusio- ja läpivirtausversiot) mittaustuloksia verrattiin referenssianalysointiin. Mittausajanjakso ajoittui aikavälille 1.2.2020-31.1.2021. Mittaustuloksista poistettiin virheelliset mittausravot eli laitehuollosta, laitteen vikaantumisesta, sähkökatkosta tai muista virheellisistä seikoista johtuvat mittausravot. Käsiteltävän mittausdatan määrä oli yli 75 % käsiteltävästä mittausdatasta. Sen jälkeen, kun mittausdatasta oli saatu poistettua kaikki virheelliset arvot, mittausdatalle tehtiin regressioanalyysi, minkä avulla nähtiin kuinka hyvin hiilidioksidisensorit korreloivat keskenään ja referenssianalysointin kanssa. Hiilidioksidisensorien ja referenssianalysointin keskinäiseksi selityssasteeksi ( $R^2$ ) saatiin 0,77 eli korrelaatio ei ollut kovinkaan hyvä. Hiilidioksidisensorien keskinäiseksi selityssasteeksi saatiin 0,98 eli ne korreloivat keskenään todella hyvin. Mittausajaksoa ruvettiin purkamaan pienempiin osiin eli jokaiselle kuukaudelle piirrettiin omat regressiosuorat, minkä perusteella päästiin käsiksi milloin korrelaatio oli parempi ja milloin huonompi. Uusien kuvaajien pohjalta saatiin selville, että keväällä korrelaatio oli huonompi ja loppukesästä korrelaatio parempi.

Tämän pohjalta päädyttiin selvittämään voisiko sääolosuhteilla olla vaikutusta erilaisiin mittaustuloksiin laitteiden välillä. Haluttiin lisätä kolmanneksi muuttujaksi ulkoilman lämpötila, vallitseva ilmanpaine, suhteellinen ilmankosteus ja LI-COR LI-7000 mittaama vesimäärä. Vaisalla oli tarjota myös oma sovellus sensoreille, missä oli mahdollista muuttaa vallitsevia sääolosuhteita, mutta kokeiltuamme sitä, se ei soveltunut käyttöömmme ulkoilman olosuhteissa. Sisäilmakohteisiin ja tuotetestaukseen Vaisalan korjaustiedosto varmasti toimii hyvin, mutta me emme huomanneet eroa, kun yritimme muuttaa lämpötilaa ja kosteutta mittaustuloksiin. Excelin ollessa rajallinen tuottaakseen kolmannen muuttujan sisältäviä kuvaajia oli otettava käyttöön uusi ohjelma mittaustulosten käsittelyyn eli Python. Pythonin avulla saatiin piirrettyä uudet kuvaajat, missä kolmanneksi muuttujaksi saatiin vallitsevat sääolosuhteet. Uudet kuvaajat oli värikoodattu niin, että niitä oli helppo tulkita ja niistä pystyi silmämääräisesti katsomaan löytyisikö jokin pitoisuusjoukko, mikä erottuisi muista mittaustuloksista regressiosuoralta.

Kuvaajien tarkastelun jälkeen ilmanpaineesta löydettiin selvä pitoisuusjoukko, mikä erosi regressiosuoralta muista mittaustuloksista selvästi. Pohdinnan jälkeen selvisi, että hiilidioksidisensorit sisältävät vakioistetun ilmanpaineen 1013 hPa, toisin kuin LI-COR LI-7000, mikä laski koko ajan vallitsevan ilmanpaineen mittaustuloksiin. Tämän pohjalta kahdelle eri hiilidioksidisensorille tehtiin ilmanpaineen korjaus vallitseviin olosuhteisiin. Uuden korjauskertoimen perusteella regressioanalyysin selitysaste muuttui 0,77 arvosta arvoon 0,96 eli mittaustulokset korreloivat hyvin keskenään ilmanpaineen korjauksen jälkeen. Uudet kuvaajat piirrettiin ja yritettiin vielä etsiä jotakin selittävää pitoisuusjoukkoa regressiosuoralta, mikä voisi selvästi poiketa mittaustuloksista. Uusista kuvaajista ei kuitenkaan löytynyt enää selvästi poikkeavaa pitoisuusjoukkoa. Kahdesta erilaisesta hiilidioksidisensorista diffuusiosensori oli lähempänä referenssianalysaattorin mittaustuloksia. Hiilidioksidisensorien ja referenssianalysaattorin väliseen uuteen korrelaatioon eli 0,96 selitysasteeseen oltiin tyytyväisiä, koska 0,96 selitysasteen voidaan sanota olevan jo erittäin korkea. Ensimmäisen vertailumittausjakson pohjalta oli positiivista löytää ongelma mittaustulosten eroavaisuudessa ja nyt tiedettiin syyn johtuvan ilmanpaineesta. Ilmapinekorjauksen jälkeen eri sensorien välille jäi kuitenkin edelleen systemaattisia eroja verrattuna referenssianalysaattorien tuloksiin. Näitä sensorikohtaisia eroja voitaisiin edelleen vähentää tekemällä kaikille sensoreille vertailumittaukset referenssilaitteen rinnalla mittausasemalla, mikä mahdollistaisi sensorikohtaisten tulosten korjausyhtälöiden tekemisen. Tässä tutkimuksessa ei kuitenkaan riittänyt siihen aikaa ja resursseja.

Toisessa vertailumittausjaksossa lähdettiin vertaamaan HSY:n Mäkelänkadun kahta hiilidioksidisensoria ja referenssianalysaattoria Ilmatieteen laitoksen Kumpulan referenssianalysaattoriin. Mittausajanjakso ajoittui aikavälille 2019-2020 eli vertailumittausjaksoja oli kaksi, ensin vuosi 2019 ja sitten 2020. Vuonna 2019 verrattiin kahta hiilidioksidireferenssianalysaattoria keskenään ja sen lisäksi kahta typen oksidien analysaattoria. Vuonna 2020 verrattiin kahta hiilidioksidisensoria kahteen referenssianalysaattoriin. Hiilidioksidisensoreita ei voitu vertailla vielä 2019, koska saimme sensorit vasta vuoden 2019 loppupuolella ja vuoden 2020 osalta typen oksidien analysaattorit tiputettiin pois vertailusta. Kahta erillistä vuotta haluttiin verrata siitä syystä, että saataisiin parempi kokonaiskuva hiilidioksidin pitoisuustasoista kaupunkiympäristössä kahden eri vuoden osalta. Molemmille vuosille laskettiin kuukausikeskiarvot sekä pitoisuuksien kellonaikavaihtelu arkisin ja viikonloppuisin.

Vuonna 2019 hiilidioksidi- ja typen oksidien käyrät kulkivat hyvin samankaltaista pitoisuuskäyrää. Molemmat pitoisuudet seurasivat toisiaan liikenteestä aiheutuvien päästöjen mukaan. Kuukausikeskiarvojen pohjalta nähtiin, että korkeimmat pitoisuudet molemmilla komponenteilla olivat talvella ja matalimmat pitoisuudet kesällä. Aikaisempien tutkimusten perusteella tiedetään, että kasvillisuus toimii hiilidioksidinieluna kasvukaudella, mikä selittää kesän matalat hiilidioksidipitoisuudet. Kasvien fotosynteesi eli auringonvalon yhteyttämisessä hiilidioksidia sitoutuu pois ilmakehästä. Kesällä kasvien fotosynteesi on voimakkaimmillaan päiväsaikaan ja vähäisintä yöaikaan eli hiilidioksidipitoisuudet laskevat päivisin ja nousevat öisin kesällä.

Kuukausikeskiarvojen jälkeen tarkasteltiin vielä vuorokauden tuntien jakautumista arkituntien ja viikonlopun tuntien välille eri vuodenaikoina. Arkitunteina aamulla ja iltapäivästä nähtiin kaikista korkeimmat pitoisuudet hiili- ja typen oksideilla riippumatta vuodenaajasta. Vuodenaikojen tuntien jakautumisessa vuorokauden sisällä oli eroavaisuuksia hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuuksissa. Viikonlopun tunteina hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuudet olivat hyvin tasaista viivaa, lukuunottamatta kesää 2019 jolloin Mäkelänkadun ja Kumpulan referenssianalysaattorien hiilidioksidipitoisuuksien nousu näkyi vielä selvemmin aamuyön viikonlopun tunteina kuin arkipäivän tunteina. Tämän pohjalta kasvillisuuden ja maaperän soluhengityksen vaikutus hiilidioksidin pitoisuuksiin vahvistui entisestään. Kasvillisuus on hiilidioksidin lähde kesäöisin, koska solujen aineenvaihdunta ja hiilidioksidia vapauttava soluhengitys on aktiivista läpi vuorokauden. Ilman hiilidioksidia sitovaa fotosynteesiä tapahtuu vain auringonvalossa. Tästä johtuen kasvillisuus toimii kesäöisin hiilidioksidin lähteenä ja päivällä nieluna.

Talvella 2019 viikonlopun aamutunteina hiilidioksidi- ja typen oksidien pitoisuudet kohosivat kohti iltapäivää Mäkelänkadun mittausasemalla, mikä kertoi siitä että liikenteellä on myös suuri vaikutus hiilidioksidipitoisuuteen. Talvisin ilmakehän sekoittumisolosuhteet ovat heikommat verrattuna muihin vuodenaikoihin, minkä takia pitoisuudet jäivät leijailemaan ilmakehään pidemmäksi aikaa. Talvella 2019 Kumpulan mittausasemalla hiilidioksidikäyrä näytti lähes tasaista viivaa, mikä kertoo lähinnä hiilidioksidin taustapitoisuudesta. Vuonna 2020 kuukausi- ja tuntikeskiarvot näyttivät lähes samanlaista pitoisuuskäyrää kuin vuonna 2019. Vuonna 2020 hiilidioksidi- ja typen oksidien -pitoisuudet laskivat Mäkelänkadulla verrattuna vuoteen 2019.

Typpidioksidipitoisuudet laskivat jopa 34 %. Hiilidioksidipitoisuuden lasku ei ollut suurta, mutta laskua kuitenkin tapahtui Mäkelänkadulla. Mäkelänkadulla sensorit seurasivat referenssianalysaattorin pitoisuuskäyrän muotoa ensimmäisen vertailumittausjakson perusteella tehtyjen painekorjausten jälkeen. Kuukausikeskiarvoja verrattaessa Kumpulassa hiilidioksidipitoisuus kuitenkin nousi vuonna 2020. COVID-19 pandemian vaikutus työmatkaliikenteeseen laski hiilidioksi- ja typen oksidien pitoisuuksia Mäkelänkadun vilkasliikenteissä katukuilussa, mutta Kumpulan tausta-asemalla hiilidioksidipitoisuudet nousivat eli työmatkaliikenteen vähentymisellä ei ollut laskevaa vaikutusta hiilidioksidin taustapitoisuuteen, mikä kertoisi siitä että hiilidioksidipitoisuus kasvaa vuosi vuodelta. Hiilidioksidisensorit hieman yliarvioivat tuloksia Mäkelänkadulla, diffuusiosensorin ollessa lähempänä referenssianalysaattoria.

Toisen vertailumittausjakson mittaustulosten pohjalta päällimmäisenä jäi mieleen hiilidioksidin pitoisuuksista eri vuodenaikoina se, että työmatkaliikenne aiheuttaa korkeimmat pitoisuudet aamu- ja iltapäivän työmatkaliikenteen aikana. Kasvillisuuden suuri vaikutus loppukeväästä, kesästä ja alkusyksystä hiilidioksidipitoisuuteen on myös selvästi havaittavissa. Vuotta 2019 ja 2020 vertaillessa COVID-19 pandemialla oli suuri vaikutus typpidioksidipitoisuuksien laskemiseen jopa 34 %. Tämä johtui pääosin autoliikenteen vähenemisestä sekä osin myös poikkeuksellisen lämpimästä talvesta 2020 sekä vähäpäästöisten autojen yleistymisestä autokannassa. Samaa ei voida sanoa hiilidioksidipitoisuuksista, sillä niissä muutokset olivat paljon pienempiä ja taustapitoisuus jatkoi nousuaan.

Kolmannessa vertailumittausjaksossa verrattiin kahta referenssianalysaattoria (Mäkelänkatu ja Kumpula) kolmeen eri hiilidioksidisensoriin eri mittauspaikeissa (Hernesaari, Kyläkunnantie ja Pirkkola). Hiilidioksidisensoreille tehtyjen painekorjausten jälkeen eri sensoriyksilöiden mittaustulokset erosivat edelleen paljon toisistaan. Mittausympäristöt olivat myös hyvin erilaisia. Kyläkunnantie ja Pirkkola edustivat pientaloaluiden hiilidioksidipitoisuutta, missä päästölähteinä olivat lähiliikenne, pientalojen puunpolto ja mittauspaikeiden pohjoispuolella oleva Kehä I:n liikenne. Hernesaari edusti merenrantakohdetta sataman vaikutusalueella. Kyläkunnantien sensori (diffuusio) seurasi kaikista lähiten Mäkelänkadun vilkasliikenteisen katukuilun ja Kumpulan tausta-aseman välisiä hiilidioksidipitoisuuksia, jääden molempien mittauspaikeiden väliin pitoisuustasossa. Pirkkolan sensori vaihdettiin maaliskuuhun

ja joulutammikuun (diffuusioista läpivirtaukseen) vaihteissa, mikä aiheutti pitoisuustasoihin vaihtelua sensorien välisissä vaihdoksissa. Pirkkolan vaihdetut sensorit kävivät Mäkelänkadulla vertailumittauksissa, jolloin niihin oli olemassa kalibroitijälki ja mittaustuloksia pystyttiin korjaamaan jälkikäteen. Hernesaaren sensorin (diffuusio) mittaustulokset olivat siinä määrin epäilyttäviä koska pitoisuustaso oli korkeammalla kuin muissa mittauspaikoissa. Pitoisuustasoon voi vaikuttaa meren lähetyvillä olevat sääolosuhteet ja sataman päästöt, mutta mitä todennäköisemmin pitoisuustason ero muihin mittauspaikkoihin johtui siitä, että Hernesaaren sensori olisi myös vaatinut vertailumittauksen Mäkelänkadulla samalla tavalla kuin Pirkkolan vaihdetut sensorit, ennen kuin se vietiin kentälle. Kyläkunnantiellä ja Pirkkolassa kesällä 2020 korostui kasvillisuuden vaikutus ja pitoisuustaso vaihteli todella reilusti yön korkean pitoisuustason ja päivän malan pitoisuustason välillä, mikä kertoo siitä että kasvillisuudella on suuri vaikutus hiilidioksidin pitoisuuksiin. Yöllä kasvit lepäävät ja fotosynteesiä eli auringonvalon yhteyttämistä ei tapahdu ja hiilidioksidia vapautuu ilmakehään, toisin kuin päiväsaikaan yhteyttämisreaktiossa hiilidioksidia imeytyy pois ilmakehästä.

Tutkimus oli opettavainen ja saatiin selville paljon uutta tietoa hiilidioksidisensorien ja referenssianalysaattorien välisestä toiminnasta. Jatkoa ajatellen hiilidioksidisensorit olisi hyvä käyttää vertailumittauksissa ennen kentälle asentamista ja kentältä noutamisen jälkeen. HSY:llä jatkossa hiilidioksidisensorit olisi hyvä käyttää myös säännöllisesti vertailumittauksissa Mäkelänkadulla referenssianalysaattoria vasten. Hiilidioksidisensoreille on valmistajan toimesta luvattu vuoden toimintajakso, minkä jälkeen ne vaatisivat ainakin kalibroinnin. Hiilidioksidisensoreille on annettu  $\pm 0...2\%$  mittausepävarmuus [20.] ja tästä johtuen ne eivät ehkä sovellu tarkkoihin tutkimusmittauksiin. Hiilidioksidisensorien tarkempi datalehti löytyy liitteestä 4. Hiilidioksidisensorit saatiin Mäkelänkadulla toimimaan lähes yhtä hyvin kuin referenssianalysaattori, varsinkin diffuusiosensorin osalta, mitä on jatkossa tarkoitus hyödyntää erilaisissa mittauksissa. Hiilidioksidisensorit sopivat antamaan täydentävää yleiskuvaa hiilidioksidin pitoisuusvaihtelusta eri mittauspaikoissa yhdessä muiden eri ilmanlaadun mittauskomponenttien kanssa ja ne tuovat lisäarvoa mittauspaikkojen yhteydessä. Hiilidioksidisensorien mittaustuloksia voidaan käyttää mm. muiden hiukkasmaisten ja kaasumaisten komponenttien päästökertoimien laskennassa. [19.] Hiilidioksidisensorit ovat helposti asennettavissa kentälle pienen kokonsa vuoksi ja ne

ovat sijoitettavissa myös haastaviin ulkoisiin olosuhteisiin, toisin kuin raskaammat referenssianalysaattorit. Hiilidioksidisensorit ovat myös halvemmassa hintaluokassa kuin referenssianalysaattorit. Toisaalta sensorien vertailumittauksiin, laadunvarmennukseen sekä tulosten jatkokäsittelyyn kuluu paljon aikaa ja mittausten epätarkkuus rajaa tulosten käyttömahdollisuuksia.

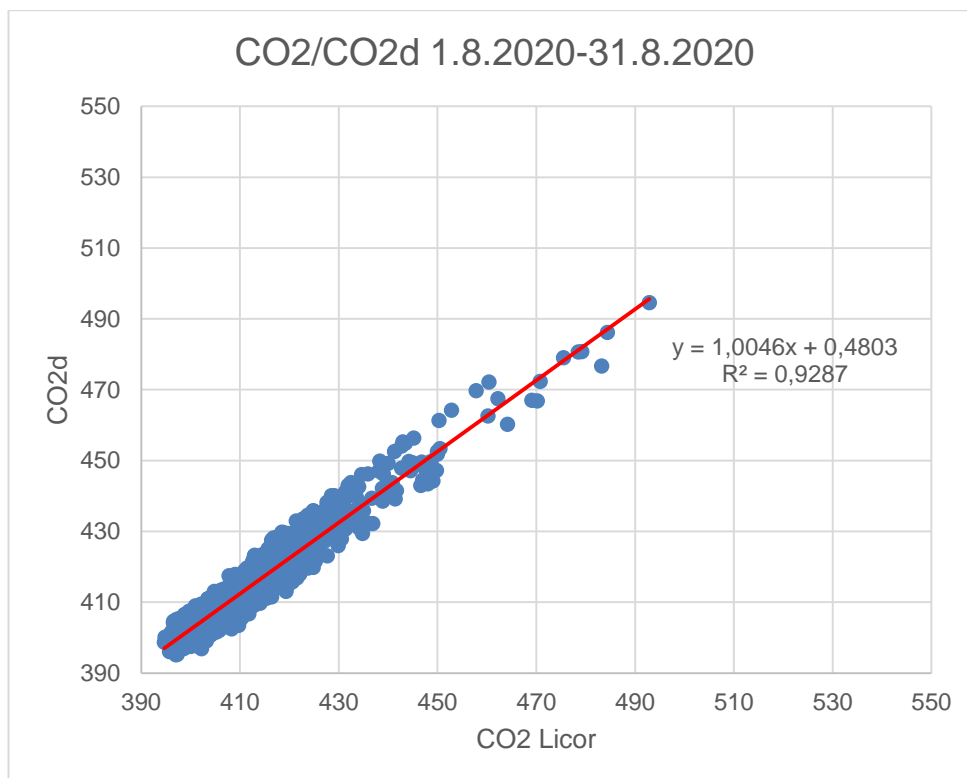
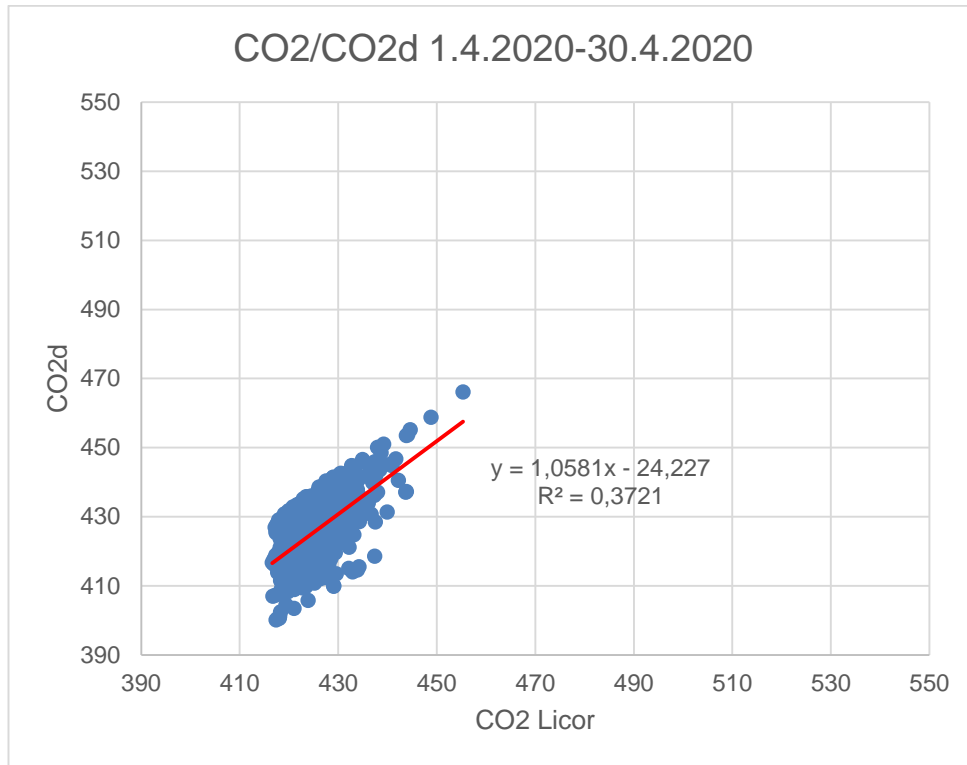
Sääolosuhteilla ja eri vuodenaajoilla on merkitystä hiilidioksidin kiertokulusta ilmakehässä. Hiilidioksidin kiertokulusta kaupunkiympäristössä saatiin näkyville kasvillisuuden vaikutus eri vuoden- ja kellonaikoina. Tutkimuksen ollessa ensimmäinen laatuaan Suomessa ja pääkaupunkiseudulla, siitä opittiin paljon uutta tietoa hiilidioksidin pitoisuusvaihtelussa erilaisissa kaupunkiympäristöissä. Tutkimustulokset ovat hyödyllisiä erilaisille tutkijoille, jotka selvittävät hiilidioksidin ja muiden ilmansaasteiden pitoisuusvaihtelua sekä päästölähteitä kaupunki-ilmassa. Vuodenaajan ja mittaustaikojen ympäristössä olevan kasvillisuuden vaikutus on tärkeä huomioida, kun hiilidioksidimittausten tuloksia hyödynnetään esimerkiksi muiden päästökomponenttien laskennassa.

## Lähteet

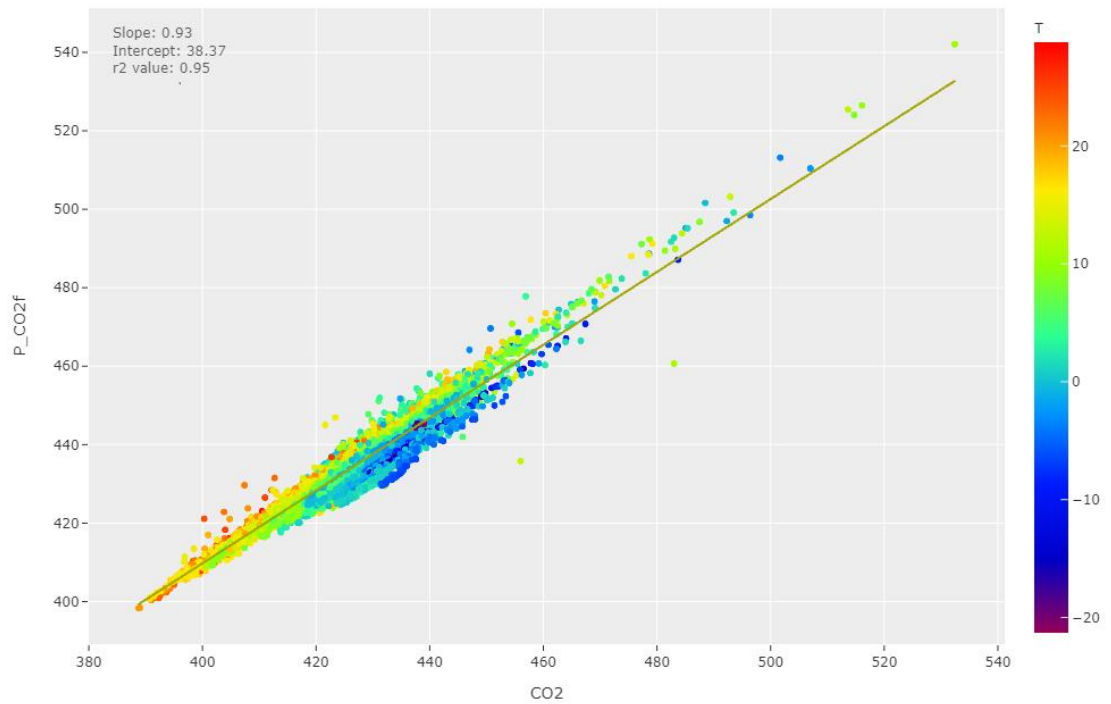
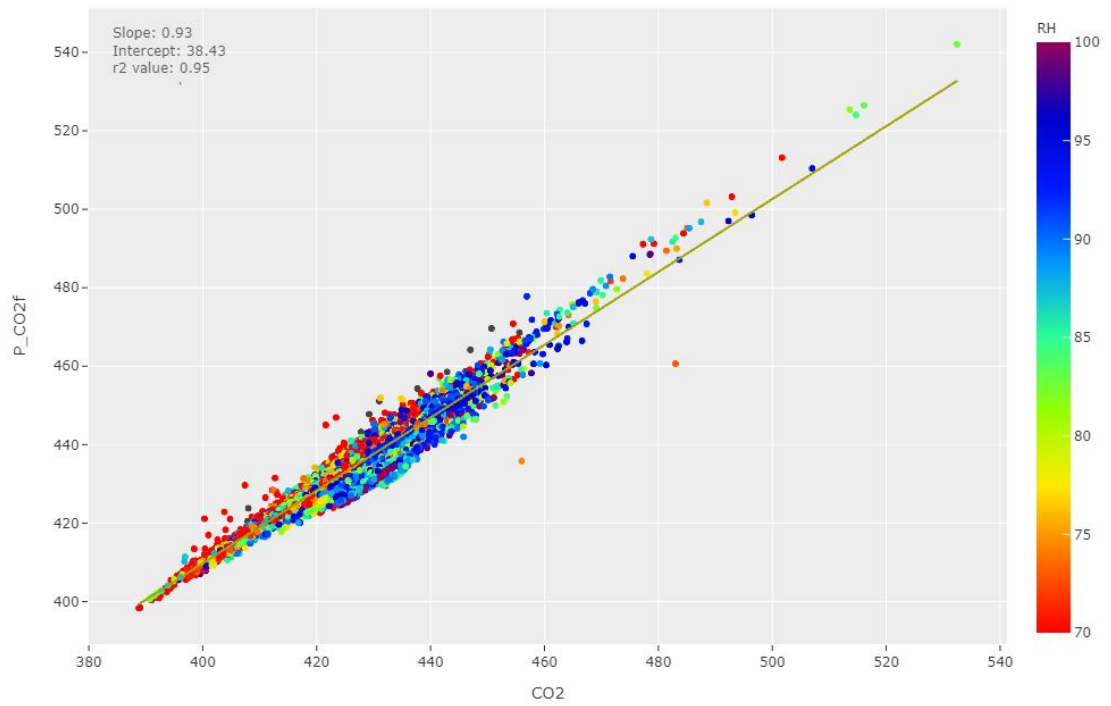
- 1 Met Office. 2021. Mauna Loa carbon dioxide forecast for 2021. Verkkoaineisto. <<https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/long-range/forecasts/co2-forecast-for-2021>>. Luettu 6.10.2021.
- 2 Campbell, N., Reece J., Urry, L., Cain, M., Wasserman, S., Minorsky, P., Jackson, R. (2008). Biology 8<sup>th</sup> Edition. s. 1239-1240.
- 3 Ilmasto-opas. 2010. Hiilidioksidi ja hiilen kiertokulku. Verkkoaineisto <<https://ilmasto-opas.fi/fi/ilmastonmuutos/ilmio/-/artikkeli/1e92115d-8938-48f2-8687-dc4e3068bdbd/hiilidioksidi-ja-hiilen-kiertokulku.html>>. Luettu 6.10.2021.
- 4 Tilastokeskus. 2021. Kasvihuonekaasupäästöt vähenivät 9 prosenttia. Verkkoaineisto <[https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki\\_2020\\_2021-05-21\\_tie\\_001\\_fi.html](https://www.stat.fi/til/khki/2020/khki_2020_2021-05-21_tie_001_fi.html)>. Luettu 6.10.2021.
- 5 National Geographic. 2007. Carbon's New Math. s. 33. Luettu 7.10.2021.
- 6 Kilkki, Juho; Aalto, Tuula; Hatakka, Juha; Portin, Harri; Laurila, Tuomas. 2015. Atmospheric CO2 observations at Finnish urban and rural sites. Verkkoaineisto. <<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/228120>>. Luettu 8.9.2021.
- 7 Logan E. Mitchell, John C. Lin, David R. Bowling, Diane E. Pataki, Courtenay Strong, Andrew J. Schauer, Ryan Bares, Susan E. Bush, Britton B. Stephens, Daniel Mendoza, Derek Mallia, Lacey Holland, Kevin R. Gurney, James R. Ehleringer. 2018. Long-term urban carbon dioxide observations reveal spatial and temporal dynamics related to urban characteristics and growth. Verkkoaineisto. <<https://www.pnas.org/content/115/12/2912>>. Luettu 1.11.2021.
- 8 Pulkkinen, Juha. 2012. Hiukkausmittauksien vertaus (PM10 ja PM2,5) Jyväskylän keskustassa vuosina 2010-2011. YAMK opinnäytetyö. <<https://www.theseus.fi/handle/10024/47146>>. Luettu 4.11.2020.
- 9 Kaski, Nelli. 2018. Ilmanlaatu vilkasliikenteisessä katukuilussa ja sen lähiympäristössä. YAMK opinnäytetyö. <<https://www.theseus.fi/handle/10024/157064>>. Luettu 11.11.2020.
- 10 Havu, Minttu. 2018. Hiilidioksidin vaihdon alueelliset muutokset Helsingissä. Pro gradu. <<https://helda.helsinki.fi/handle/10138/299767>>. Luettu 10.11.2021.
- 11 LI-COR LI-7000 CO2-analysointilaitteen ohjekirja. Verkkoaineisto. <<https://www.licor.com/documents/bhbn1exblejxi2n2d3>>. Luettu 11.10.2021.

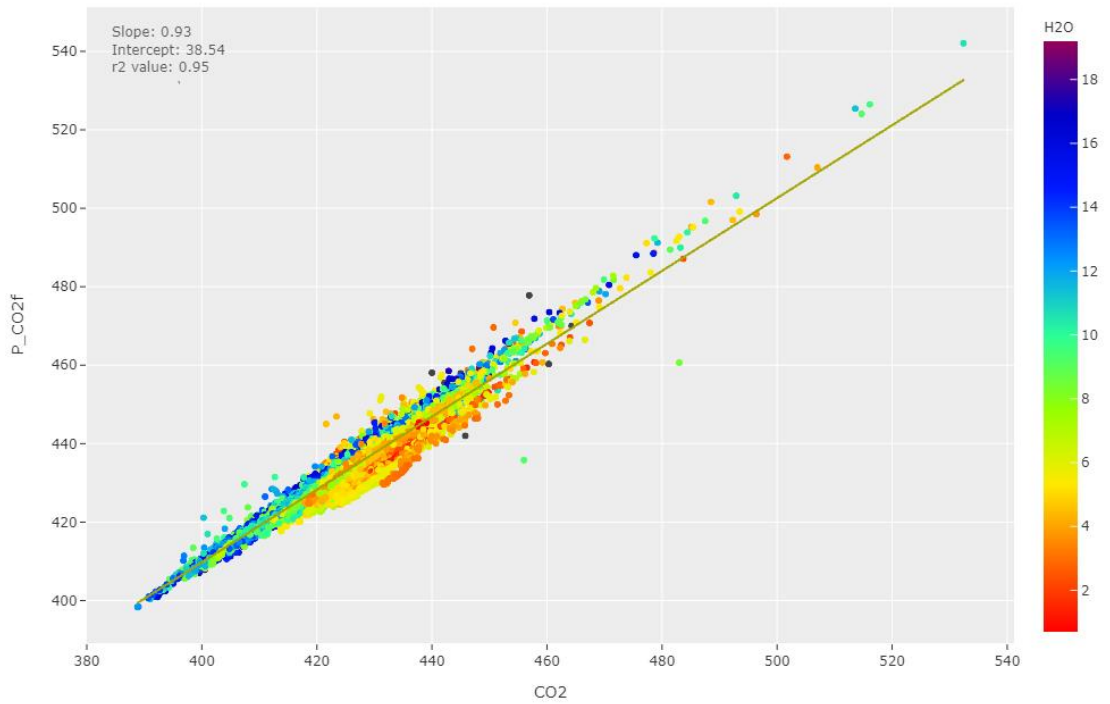
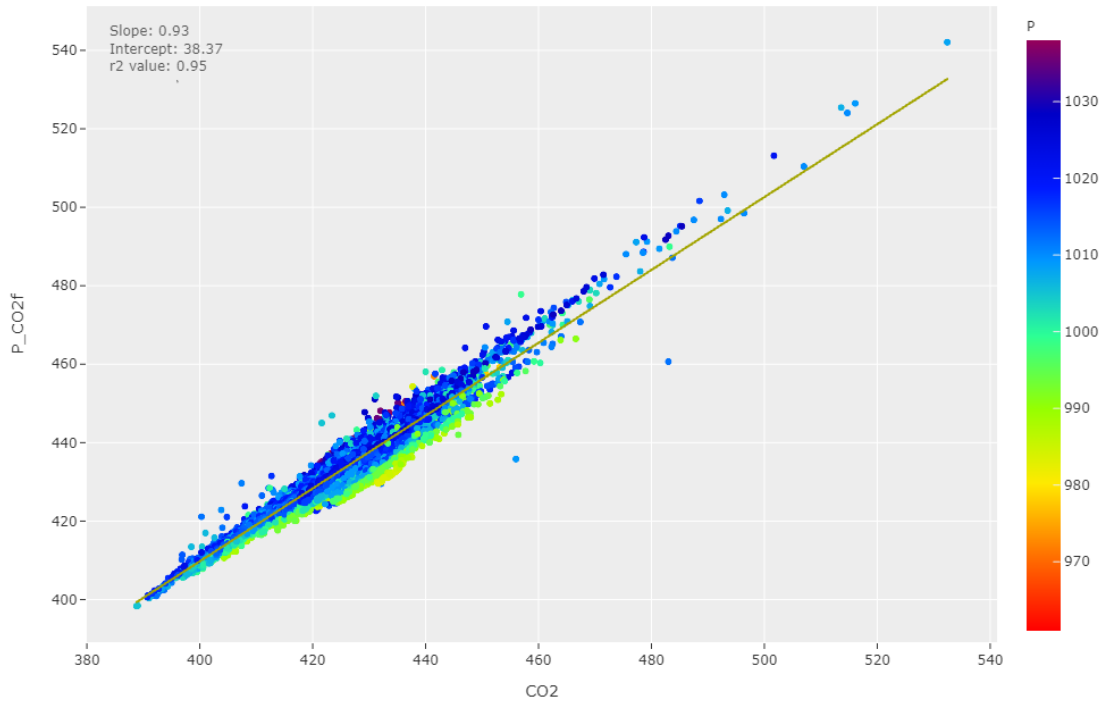
- 12 Picarro CO2-analysaattorin ohjekirja. Verkkoaineisto.  
<[https://www2.atmos.umd.edu/~russ/G1301\\_Manual.pdf](https://www2.atmos.umd.edu/~russ/G1301_Manual.pdf)>. Luettu 12.10.2021.
- 13 Vaisala GMP343 CO2-sensorin ohjekirja. Verkkoaineisto.  
<<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP343%20User%27s%20Guide%20in%20English%20M210514EN.pdf>>. Luettu 13.10.2021.
- 14 HSY:n julkaisusarja. 2021. Mäkelänkadun mittausasema. Verkkoaineisto.  
<https://julkaisu.hsy.fi/ilmanlaadun-mittausasemat-vuonna-2021.html#cLQTCX3SrU>>. Luettu 14.10.2021.
- 15 Ilmatieteen laitos. 2021. Measurement sites. Verkkoaineisto.  
<https://en.ilmatieteenlaitos.fi/ghg-measurement-sites>>. Luettu 14.10.2021.
- 16 Korhonen, Saija. 2021. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2020. Verkkoaineisto. <<https://julkaisu.hsy.fi/ilmanlaatu-paakaupunkiseudulla-vuonna-2020-1.pdf>>. ISSN 1798-6095. Luettu 9.11.2021.
- 17 Korhonen, Saija. 2020. Ilmanlaatu pääkaupunkiseudulla vuonna 2019. Verkkoaineisto. <https://www.hsy.fi/globalassets/ilmanlaatu-ja-ilmasto/tiedostot/ilmanlaatu-paakaupunkiseudulla-2019-yhdistetty.pdf>>. ISSN 1798-6095. Luettu 9.11.2021.
- 18 HSY:n tiedote. 2021. Pääkaupunkiseudun ilmanlaatu mittaushistorian puhtain vuonna 2020 – syynä korona ja lämmin talvi. Verkkoaineisto.  
<<https://www.hsy.fi/ymparistotieto/tiedotteet/paakaupunkiseudun-ilmanlaatu-mittaushistorian-puhtain-vuonna-2020/>>. Luettu 21.10.2021.
- 19 Saarikoski, Sanna; Niemi, Jarkko; Aurela, Minna; Pirjola, Liisa; Kousa, Anu; Rönkkö, Topi; Timonen, Hilikka. 2021. Sources of black carbon at residential and traffic environments obtained by two source apportionment methods. Verkkoaineisto. <<https://acp.copernicus.org/articles/21/14851/2021/>>. Luettu 10.11.2021.
- 20 GMP343 CO2-sensorin datalehti. Verkkoaineisto.  
<<https://www.vaisala.com/sites/default/files/documents/GMP343-Datasheet-B210688EN.pdf>>. Luettu 15.11.2021.

Kuukausikohtainen vertailu läpivirtaussensorin ja analysaattorin välillä

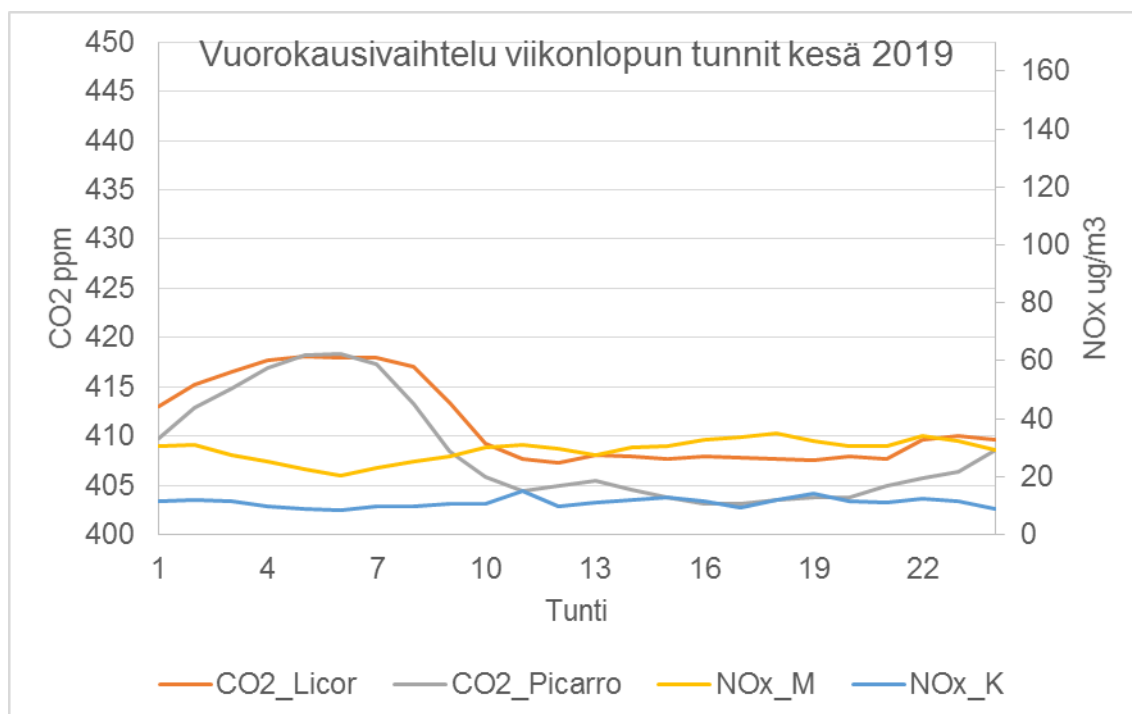
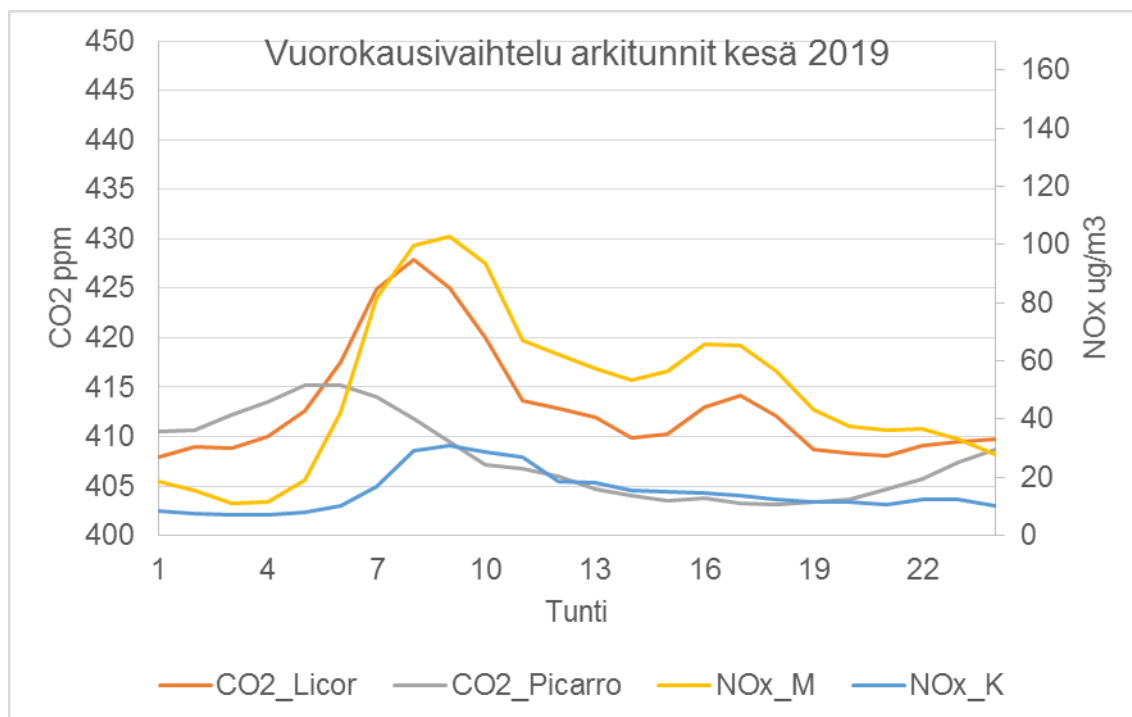


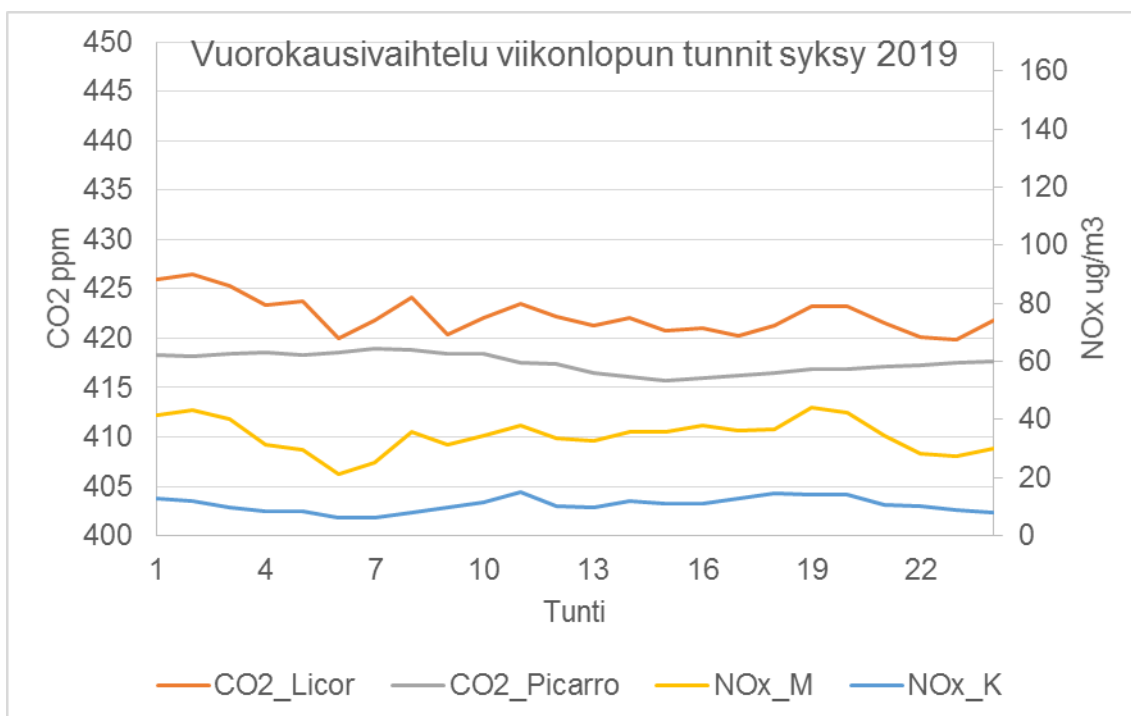
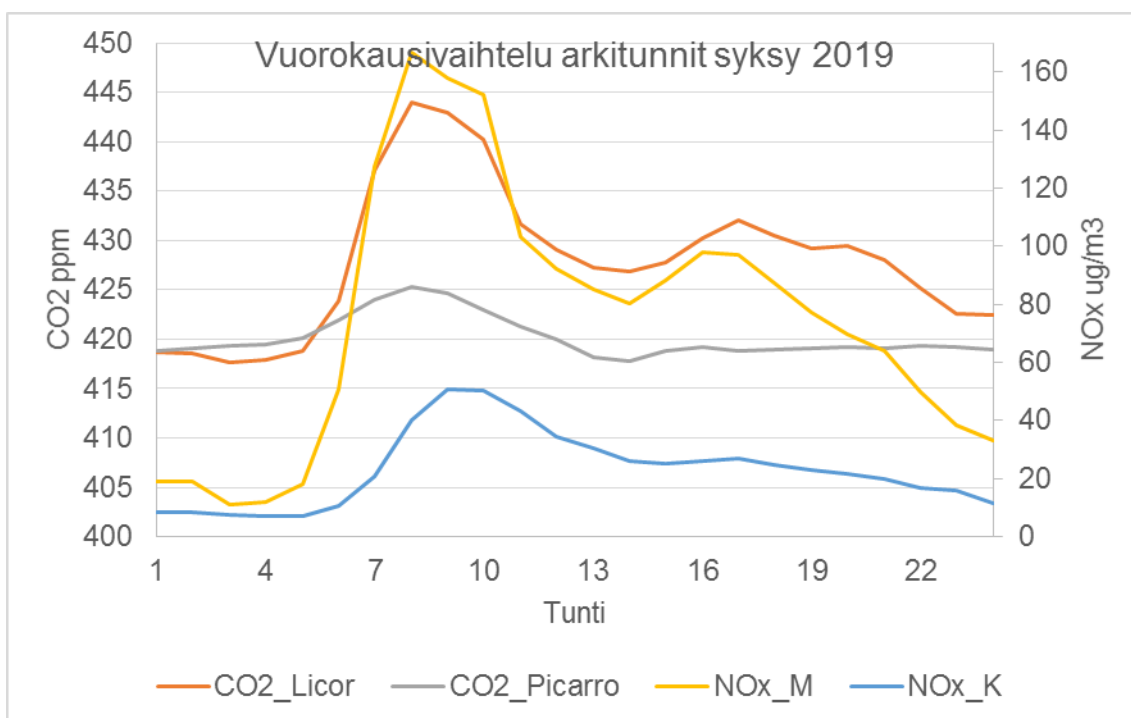
Lämpivirtaussensorin ja analysaattorin korrelaatio painekorjauksen jälkeen





## Vuorokausivaihtelu kesällä ja syksyllä 2019





## Vaisala GMP343 hiilidioksidisensorin datalehti

## Technical data

## Measurement performance

|                           |   |
|---------------------------|---|
| Measurement range options | 0 ... 1000 ppm, 0 ... 2000 ppm,<br>0 ... 3000 ppm, 0 ... 4000 ppm,<br>0 ... 5000 ppm, 0 ... 2 % |
|---------------------------|---|

**Accuracy (excluding noise) at 25 °C (77 °F) and 1013 hPa after factory calibration with 0.5 % accurate gases with different range options**

|  |                           |
|--|---------------------------|
| 0 ... 1000 ppm                           | ±(3 ppm + 1 % of reading) |
| 0 ... 2000 ppm - 0 ... 2 % <sup>1)</sup> | ±(5 ppm + 2 % of reading) |

**Noise (repeatability) at 370 ppmCO<sub>2</sub>**

|                            |                       |
|----------------------------|-----------------------|
| With no output averaging   | ±3 ppmCO <sub>2</sub> |
| With 30 s output averaging | ±1 ppmCO <sub>2</sub> |

**Long-term stability (see graph 'GMP343 operating conditions')**

|          |  |
|----------|--|
| Easy     | ±2 % of reading <sup>2)</sup> / year     |
| Moderate | ±2 % of reading <sup>2)</sup> / 6 months |
| Harsh    | ±2 % of reading <sup>2)</sup> / 3 months |

**Warm-up time**

|                         |        |
|-------------------------|--------|
| To full accuracy ±0.5 % | 10 min |
| To full accuracy        | 30 min |

<sup>1)</sup> Accuracy below 200 ppmCO<sub>2</sub> not specified for 2 % range option.  
<sup>2)</sup> Always at least ±10 ppmCO<sub>2</sub>.

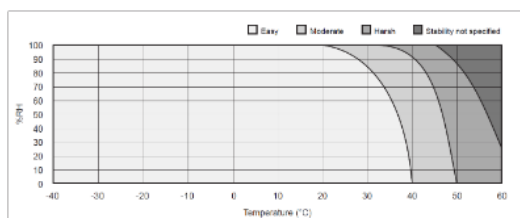
**Effect on accuracy with temperature compensation**

|                               |                |                        |           |
|-------------------------------|----------------|------------------------|-----------|
| CO <sub>2</sub> range options | 0 ... 1000 ppm | 0 ... 2 000 - 5000 ppm | 0 ... 2 % |
|-------------------------------|----------------|------------------------|-----------|

**Temperature °C (°F) Accuracy (% of reading)<sup>1)</sup>**

|                                |    |    |    |
|--------------------------------|----|----|----|
| +10 ... +40<br>(+50 ... +104)  | ±1 | ±1 | ±2 |
| +40 ... +60<br>(+104 ... +140) | ±2 | ±3 | ±4 |
| -40 ... +10<br>(-40 ... +50)   | ±3 | ±3 | ±5 |

<sup>1)</sup> Always at least ±10 ppmCO<sub>2</sub>.  
Temperature compensation is performed by an integrated PT1000 element.



## GMP343 operating conditions

**Effect on accuracy with pressure compensation**

|                               |                |                  |
|-------------------------------|----------------|------------------|
| CO <sub>2</sub> range options | 0 ... 1000 ppm | 0 ... 2000 - 2 % |
|-------------------------------|----------------|------------------|

**Pressure (hPa) Accuracy (% of reading)**

|              |      |    |
|--------------|------|----|
| 900 ... 1050 | ±0.5 | ±1 |
| 700 ... 1300 | ±1   | ±2 |

Integrated pressure sensor not included in GMP343.

## Response time (90 %)

**Diffusion model**

| Filter attached | Averaging (s) | Response (s) |
|-----------------|---------------|--------------|
| Yes             | 0             | 75           |
| Yes             | 30            | 82           |
| No              | 0             | 4            |
| No              | 30            | 30           |

**Flow-through model**

| Gas flow (l/min) | Averaging (s) | Response (s) |
|------------------|---------------|--------------|
| 0.3              | 0             | 26           |
| 0.3              | 30            | 44           |
| 1.2              | 0             | 8            |
| 1.2              | 30            | 23           |

## Operating environment

|                                 |   |
|---------------------------------|---|
| Operating temperature           | -40 ... +60 °C (-40 ... +140 °F)                |
| Storage temperature             | -40 ... +70 °C (-40 ... 158 °F)                 |
| Operating humidity              | See graph 'GMP343 operating conditions'         |
| Compensated pressure range      | 700 ... 1300 hPa                                |
| Operating pressure              | < 5 bar   |
| Gas flow for flow-through model | 0 ... 10 liters/min                             |
| EMC compliance                  | IEC/EN 61326-1, Basic environment <sup>1)</sup> |

<sup>1)</sup> Compliance with IEC/EN 61000-4-3: At 3 V/m RF field test within frequency range 300 ... 400 MHz may cause additional deviation of 150 ppmCO<sub>2</sub>.

## Inputs and outputs

|                   |   |
|-------------------|---|
| Operating voltage | 11 ... 36 VDC   |
| Power consumption | Without optics heating : < 1 W<br>With optics heating : < 3.5 W |
| Digital outputs   | RS-485, RS-232  |

**Analog outputs**

|                             |                                    |
|-----------------------------|------------------------------------|
| Current output range        | 4 ... 20 mA                        |
| Current output resolution   | 14 bits                            |
| Current output maximum load | 800 Ω at 24 VDC, 150 Ω at 10 VDC   |
| Voltage output range        | 0 ... 2.5 V, 0 ... 5 V             |
| Voltage output resolution   | 14 bits (13 bits with 0 ... 2.5 V) |
| Voltage output minimum load | 5 kΩ                               |

## Mechanical specifications

|                                       |                    |
|---------------------------------------|--------------------|
| Housing                               | Anodized aluminium |
| Filter cover                          | PC                 |
| Cable connector type                  | 8-pin M12          |
| Weight (probe only)                   | 360 g (12.7 oz)    |
| <b>IP rating</b>                      |                    |
| Housing (cable attached)              | IP67               |
| Diffusion filter (weather protection) | IP65               |
| Diffusion filter (sintered PTFE)      | IP66               |