

LAB-ammattikorkeakoulu  
Tekniikka Lappeenranta  
Rakennus- ja yhdyskuntatekniikka  
Rakennetekniikka

Johanna Tamminen

## **Jatkuvatoimisen mittalaitteen ja keräinmenetelmän vertailu TVOC-mittauksessa**

Opinnäytetyö 2020

## Tiivistelmä

Johanna Tamminen

Jatkuvatoimisen mittalaitteen ja keräinmenetelmän vertailu TVOC -mittauksessa, 42 sivua, 3 liitettä

LAB-ammattikorkeakoulu

Tekniikka Lappeenranta

Rakennus- ja yhdyskuntatekniikan koulutus

Rakennetekniikka

Opinnäytetyö 2020

Ohjaajat: lehtori Timo Lehtoviita, LAB-ammattikorkeakoulu, tutkimuspäällikkö

Tapani Moilanen, Ramboll Finland Oy

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin jatkuvatoimisen PID-mittalaitteen käytettävyyttä sisäilman TVOC-pitoisuuden mittaamisessa. Tavoitteena oli saada selville, kuinka paljon ja miten jatkuvatoimisen mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus eroaa keräinmenetelmällä saadusta tuloksesta, mitkä ovat tulosten eroavaisuuksien syyt, miten jatkuvatoimista mittalaitetta voidaan hyödyntää sisäilman laadun arvioinnissa ja voidaanko mittalaitetta hyödyntää VOC-mittauspisteiden haaruksissa. Opinnäytetyö tehtiin yhteistyössä LAB-ammattikorkeakoulun ja Ramboll Finland Oy:n kanssa.

Sisäilman VOC-mittaukset tehtiin jatkuvatoimisella PID-mittalaitteella ja Tenax TA-GarboGraph 5TD-keräinmenetelmällä. Sisäilman TVOC-pitoisuutta mitattiin kertamittauksina yhteensä kolmessa tutkimuskohteessa. Yhdessä kohteessa tehtiin PID-mittalaitteella myös useita päiviä kestävä pitkäaikaismittaus sekä muita sisäilman olosuhdetekijöiden tallentavia mittauksia. Saatuja tuloksia vertailtiin toisiinsa ja lainsäädännön raja-arvoihin.

Tutkimusaineistoa vertailemalla havaitaan, että eri menetelmillä mitatut TVOC-pitoisuudet eroavat toisistaan eikä PID-mittalaitteen ilmoittaman TVOC-pitoisuuden perusteella voida etukäteen päätellä keräinmenetelmän TVOC-pitoisuutta. Tuloksiin aiheuttaa eroavaisuutta mittausmenetelmien toimintaperiaatteiden, mittausalueen ja -herkkyyden erot. Lisäksi PID-mittalaitteelle ennen mittauksia suoritettava kenttäkalibrointi lisää mittausepävarmuutta. PID-mittalaitteella voidaan seurata sisäilman TVOC-pitoisuuden vaihtelua, arvioida käyttäjien vaikutusta TVOC-pitoisuuteen, arvioida mitattavien parametrien yhteyttä toisiinsa, ajoittaa näytteenotto hetkeen, jolloin pitoisuus on oletettavasti suurin sekä tehdä sisäilmakorjausten jälkiseuranta.

Opinnäytetyön suppean otannan vuoksi mittalaitteen hyödynnettävyys tutkittavien tilojen haarukointiin jäi avoimeksi kysymykseksi. Jatkotutkimusaiheena suositellaan jatkamaan PID-mittauksien ja keräinmenetelmien ottoja rinnan. Toinen jatkotutkimusehdotus on PID-mittalaitteen ilmoittaman ammoniakkipitoisuuden vertailua ammoniakkeräinmenetelmien pitoisuuksiin.

Asiasanat: VOC, TVOC, sisäilma, sisäilmanäyte, mittaustekniikka

## **Abstract**

Johanna Tamminen

Comparison of a continuous measuring device and a collector method in TVOC measurement, 42 pages, 3 appendices

LAB University of Applied Sciences

Technology Lappeenranta

Construction and Civil Engineering

Construction Technology

Bachelor's Thesis 2020

Instructors: Mr Timo Lehtoviita, Senior Lecturer MSc, Mr Tapani Moilanen, Research Manager, Ramboll Finland Oy

The purpose of the study was to examine the usability of the PID-measuring device in the TVOC measurements. The study questions were: how the results of the PID-measurement differ from the results of the collector method, what are the reasons for the differences and for what purpose the PID-measuring device can be used for. The study was commissioned by LAB University of Applied Sciences and Ramboll Finland Oy.

The indoor air measurements were made with a PID-measuring device and a Tenax TA-Garbograph 5TD-collector method. Measurements were made as single and continuous measurements. The measurements were made in three different buildings. The measurement results were compared with each other and with the limit values of the legislation.

The final result of this thesis was that TVOC concentrations measured by different methods differ. The reasons for the differences are in methods, in the measuring range and sensitivity. The field calibration adds uncertainty to the success of the measurement.

The PID-measuring device can be used to monitor variations in indoor air concentration and to evaluate the connection of the parameters. It can also be used for the follow-up of indoor air repairs.

As further studies, it is recommended to continue parallel measurements with different methods. Another topic of further study is to find out the measurement of ammonia content in indoor air with a PID-measuring device.

Keywords: VOC, TVOC, indoor air, measurement technology

# Sisällys

1	Johdanto.....	6
1.1	Tausta.....	6
1.2	Tavoitteet ja rajaukset.....	6
1.3	Tutkimusmenetelmät.....	7
2	Sisäilman haihtuvat orgaaniset yhdisteet.....	8
2.1	VOC-yhdisteiden päästölähteet .....	8
2.2	Olosuhteiden vaikutus VOC-päästöihin .....	9
2.3	Ilmanvaihdon ja paine-eron vaikutus sisäilman VOC-pitoisuuteen .....	9
2.4	Sisäilman VOC -pitoisuuksien tutkiminen .....	10
2.5	Sisäilman VOC -yhdisteiden näytteenotto- ja mittausmenetelmät .....	11
2.6	VOC -päästölähteiden paikantaminen .....	14
2.7	VOC-mittausten tulosten epävarmuustekijät ja virhelähteet.....	15
2.8	Sisäilman VOC -yhdisteiden haittavaikutukset.....	16
2.9	Lainsäädäntö, ohje- ja raja-arvot .....	17
3	Sisäilmatutkimukset .....	20
3.1	Tutkimuskohteet .....	20
3.2	Mittaus- ja tutkimusmenetelmät .....	22
3.3	Mittaustilanteiden järjestelyt.....	24
4	Tutkimustulokset.....	26
4.1	VOC-keräinnäytteet ja kertamittaustulokset.....	26
4.2	Jatkuvatoiminen mittaus, PID-mittalaite .....	27
4.3	Jatkuvatoiminen mittaus, dataloggerit.....	29
5	Tulosten tulkinta ja vertailu .....	30
5.1	Vertailu lainsäädännön raja-arvoihin.....	30
5.2	TVOC-keräinnäytteiden ja kertamittaustulosten vertailu .....	31
5.3	TVOC-pitoisuuden yhteys muihin mittausparametreihin .....	32
5.4	Jatkuvatoimisen mittalaitteen- ja dataloggereiden tulosten vertailu .....	34
5.5	Muut tulokset .....	35
5.6	Virhetarkastelu.....	36
6	Yhteenveto ja pohdintaa .....	38
	Lähteet.....	41

## Liitteet

- Liite 1 Jatkuvatoiminen mittalaite, kuvaaja
- Liite 2 Dataloggeri,, T + RH% -kuvaaja
- Liite 3 Dataloggeri, paine-erokuvaaja

## Käsitteet

Adsorbenttikeräin	näytteenottoon tarkoitettu keräinputki, jonka sisällä olevaan aineeseen yhdisteet tarttuvat
Adsorptio	fysikaalinen prosessi, jossa kaasumainen aine muodostaa ohuen kalvon kiinteän aineen pinnalle
Dataloggeri	ohjelmoitava mittaustiedon tallentava laite
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	mikrogrammaa kuutiometrissä
PID	Photoionization Detector fotoionisaatioon perustuva anturi
ppm/ppb	parts per million/parts per billion miljoonasosa/miljardisosa
%RH	suhteellinen kosteus, vesipitoisuus ilmassa suhteessa siihen kuinka paljon se voi sisältää vettä vallitsevassa lämpötilassa
Sisäilma	rakennuksen tai tilan sisällä oleva ilma, joka koostuu kaasumaisista ja hiukkasmaisista yhdisteistä
Sisäilmasto	sisäilmasta ja siihen vaikuttavista tekijöistä muodostuva kokonaisuus (sisäilman epäpuhtaudet, lämpötila, kosteus, ilman liike, säteily, valaistus ja melu)
Toimenpideraja	taso, jonka ylittävällä pitoisuudella on ryhdyttävä toimenpiteisiin alistumisen vähentämiseksi
TTL	Työterveyslaitos
TVOC	Total Volatile Organic Compounds, haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuus
Viiteraja-arvo	tutkimukseen perustuva pitoisuus, joka ei yleensä ylity
VOC	Volatile Organic Compounds, haihtuvat orgaaniset yhdisteet

# 1 Johdanto

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää jatkuvatoimisen PID-tekniikkaan perustuvan mittalaitteen käytettävyyttä sisäilman TVOC-pitoisuuden arvioinnissa. Opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Lappeenrannan LAB-ammattikorkeakoulun ja Ramboll Finland Oy:n Lappeenrannan toimipisteen kanssa.

## 1.1 Tausta

LAB (ent. Saimaan ammattikorkeakoulu) on hankkinut käyttöönsä jatkuvatoimisen mittalaitteen, jolla voidaan mitata sisäilman TVOC- ja ammoniakkipitoisuutta. Laitteella voidaan mitata lisäksi sisäilman lämpötilaa, suhteellista kosteutta (RH%) ja hiilidioksidipitoisuutta (CO<sub>2</sub>). Opinnäytetyön idea sai alkunsa siitä, että oppilaitos oli kiinnostunut samaan käytännön käyttökokemuksia hankkimansa jatkuvatoimisen mittalaitteen käytettävyydestä sekä tulosten hyödynnettävyydestä sisäilman laadun arvioinnissa ja tarjosi laitetta koekäyttöön. Mittalaitteen mahdolliset hyödyt kiinnostivat myös opinnäytetyön yhteistyökumppania, Ramboll Finland Oy:tä, jota kiinnosti, olisiko laitteen avulla mahdollista saada merkittäviä aikataulu- ja kustannushyötyjä sisäilman VOC-mittauksissa.

Jatkuvatoiminen mittalaite näyttää sisäilman TVOC:in heti kohdekäynnin aikana. Jos mittaustulokset ovat luotettavia, niiden avulla voidaan paikallistaa heti ne tilat, joiden sisäilman TVOC -pitoisuus on poikkeuksellisen suuri ja joissa voi olla poikkeuksellisia VOC-päästölähteitä. Asumisterveysasetuksen hyväksymällä näytteenottomenetelmällä otettavien keräinnäytteiden ottokohdat voitaisiin siten kohdistaa mahdollisimman edustaviin tiloihin ja näytteenottomääriä voitaisiin pienentää.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

Tässä opinnäytetyössä pyritään selvittämään kuinka paljon ja miten jatkuvatoimisen mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus eroaa keräinmenetelmällä saadusta tuloksesta, mitkä ovat mahdollisten tulosten eroavaisuuksien syyt, miten jatkuvatoimista mittalaitetta voidaan hyödyntää sisäilman laadun arvioinnissa ja voidaanko mittalaitetta hyödyntää VOC-mittauspisteiden haarukoinnissa.

Opinnäytetyössä tarkastellaan vain Tenax TA-Garbograph 5TD -keräinmenetelmää ja vain yhtä jatkuvatoista PID-mittalaitetta ja -anturia. Tutkimuksen otantamäärä on pieni. Tutkimusaineisto on kerätty kolmesta tutkimuskohteesta. Mittalaitteella tehtyjä suuntaa-antavia kertamittaustuloksia ja keräinmenetelmällä kerättyjä näytteitä on yhteensä kuusi kappaletta. Tutkimuksen yhteydessä mittalaitteella tehtiin lisäksi yksi pitkäkestoinen tallentava mittaus. Tutkimuskohteita ja jatkuvatoimista mittalaitetta käsitellään työssä anonyymisti.

### **1.3 Tutkimusmenetelmät**

Opinnäytetyössä käytetään tutkimusmenetelmänä kvantitatiivista eli määrällistä menetelmää. Kvantitatiivisessa tutkimuksessa numeerista aineistoa vertaillaan ja pyritään etsimään numeerisiin tuloksiin perustuvia syy- ja seuraussuhteita (Koppa 2015). Lisäksi opinnäytetyön aineistona käytetään kirjallisuutta, julkaisuja ja muita tutkimuksia.

Kirjallisuuskatsausosiossa selostetaan kirjallisuudesta, julkaisuista ja tutkimuksista löytyvää perustietoa sisäilman kemiallisista epäpuhtauksista. Katsauksessa perehdytään myös sisäilman VOC-yhdisteisiin liittyviin tutkimus- ja mittausmenetelmiin, tutkimusprosessiin sekä lainsäädäntöön.

Tutkimusaineisto kerätään ottamalla tutkimuskohteiden sisäilmasta VOC-keräinnäytteitä ja mittalaitteen hetkellisiä VOC-tuloksia sekä mittaamalla yhdessä kohteessa myös muita sisäilmaston tekijöitä. Kohteissa tehdään aistinvaraisia havaintoja olosuhteista ja tuloksiin mahdollisesti vaikuttavista tekijöistä.

Tutkimuksilla kerättyjä mittaus- ja tutkimustuloksia vertaillaan lainsäädännön asettamiin raja-arvoihin ja TTL:n (Työterveyslaitos) ohjearvoihin. Tuloksia vertaillaan myös keskenään. Tulosten vertailulla pyritään selvittämään keräinmenetelmällä ja mittalaitteella saatujen VOC-tulosten sekä mittalaitteella tehdyn pitkäaikaismittauksen ja muiden sisäilmaston tekijöiden välisiä riippuvuuksia.

## 2 Sisäilman haihtuvat orgaaniset yhdisteet

Sisäilma voi sisältää erilaisia kemiallisia ja hiukkasmaisia epäpuhtauksia. Hiukkasmaisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi huonepöly, mineraalivillakuidut ja mikrobit. Kemiallisia epäpuhtauksia ovat esimerkiksi hiilidioksidi (CO<sub>2</sub>), otsoni, radon, tupakansavu ja haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC). Tässä opinnäytetyössä perehdytään tarkemmin haihtuviin orgaanisiin yhdisteisiin.

Haihtuvat orgaaniset yhdisteet ovat ne orgaaniset yhdisteet, joiden kiehumispiste on 50-260 °C ja höyrynpaine 20 °C lämpötilassa  $\geq 0,01$  kPa. Lisäksi on olemassa erittäin haihtuvia ja puolihaihtuvia orgaanisia yhdisteitä. (Pitkäranta 2016, 67.)

### 2.1 VOC-yhdisteiden päästölähteet

Tavallisessa huoneilmassa esiintyy aina jonkin verran VOC-yhdisteitä. VOC-yhdisteiden päästölähteitä ovat mm. rakennus- ja sisustusmateriaalit, haitta-ainepitoiset materiaalit, huonekalut, tekstiilit, pesu- ja puhdistusaineet, kosmetiikkatuotteet, käyttäjien aineenvaihdunta ja ulkoilman saasteet. Tyypillisesti noin puolet VOC-päästöistä on lähtöisin rakennusmateriaaleista. (Valvira 2016, 5.) Erilaisten VOC-yhdisteryhmien mahdollisia päästölähteitä on esitetty taulukossa 1 (Salonen ym. 2011, liite 2).

Yhdisteryhmä	Esimerkkejä mahdollisista päästölähteistä
Aromaattiset hiilivedyt	Maalit, lakat, liimat, bensiini, pakokaasut, tulostimet, polyuretaanit, puhdistusaineet, tupakointi
Alkoholit	Muovimatot, liimat, puhdistusaineet, laastit, kosmetiikka
Alifaattiset hiilivedyt	Maalit, liimat, bensiini, pakokaasut, polyuretaani, tulostimet, kosmetiikkatuotteet
Aldehydit	Puutuotteet, lastulevy, linoleum, kostea mineraalivilla
Terpeenit	Puupohjaiset materiaalit, maalit, hajusteet, siivousaineet, liuottimet, kosmetiikka
Piiyhdisteet	Kosmetiikkatuotteet, saumausaineet, siivousaineet, laastit, kosteuseristeet
Orgaaniset hapot	Linoleum, hartsit, lastulevy, mäntylauta, alkydimaalit
Esterit	Muovit, maalit, lakat, liimat, kosmetiikkatuotteet, kittausaineet
Ketonit	Liuottimet, puun uuteaineet, hartsit, liimat, kuitulevyt

Taulukko 1. Esimerkkejä VOC-yhdisteiden mahdollisista päästölähteistä yhdisteryhmittäin (Salonen ym. 2011, liite 2.)

Virheettömistä ja vaurioitumattomista rakennusmateriaaleista ja muista uusista materiaaleista peräisin olevat VOC-päästöt pienenevät ajan kuluessa (ns. primääriemissio), mutta vaurioituneiden materiaalien päästöt sen sijaan kasvavat ja niiden koostumus voi muuttua kemiallisten reaktioiden seurauksena (ns. sekundääriemissio). Koska rakennusmateriaalien päästöt ovat uusissa materiaaleissa korkeimmillaan, suositellaan sisäilman VOC-mittauksia tehtäväksi aikaisintaan 6 kuukauden kuluttua rakentamisen tai remontoinnin päättymisestä. (Pitkäranta 2016, 68; Valvira 2016, 3-5.)

Kosteus voi käynnistää materiaaleissa kemiallisia hajoamisreaktioita, joissa vapautuu sisäilmaan VOC-yhdisteitä ja reaktiotuotteita. Lienee tunnetuimpia VOC-päästölähteitä ovat kosteusvaurioituneet PVC- muovimatot ja niiden asennuksessa käytetyt liimat. Niistä sisäilmaan vapautuvien päästöjen yhdisteet vaihtelevat PVC-matoissa käytettyjen pehmentimien (flataatti) tyyppin mukaan. Vaurioituneista materiaaleista mahdollisesti sisäilmaan vapautuvia yhdisteitä ovat esimerkiksi TXIP, 2-etyyli-1-heksanoli ja C9 – C10-alkoholit. (Valvira 2016, 4-5.)

## **2.2 Olosuhteiden vaikutus VOC-päästöihin**

Rakennuksessa vallitsevat olosuhteet vaikuttavat VOC-päästöihin sekä VOC-pitoisuuksiin sisäilmassa. Tavanomaista korkeampi sisäilman lämpötila, lämpösäteily tai suhteellinen kosteus lisäävät VOC-päästöjä. On huomioitava, että esimerkiksi talviaikaan sisäilman VOC-pitoisuus on matalampi kuin syyskesällä. Jos mittausolosuhteet poikkeavat normaaleista olosuhteista huomattavasti, tulisi mittaukset pyrkiä suorittamaan myös tavanomaisissa olosuhteissa. Mittausolosuhteet huomioidaan tulosten tarkastelussa arvioimalla niiden vaikutusta toimenpiderajojen alittumisen tai ylittymisen kannalta. (Valvira 2016, 3; Pitkäranta 2016, 36, 69.)

## **2.3 Ilmanvaihdon ja paine-eron vaikutus sisäilman VOC-pitoisuuteen**

Ilmanvaihdon tehokkuus vaikuttaa sisäilman epäpuhtauspitoisuuksiin. Mitä suurempi ilmanvaihto, sitä pienempiä ovat sisäilmassa myös VOC-yhdisteiden ja muiden epäpuhtauksien pitoisuudet. Ilmanvaihdon teho voi eri vuorokauden aikoina olla erilainen, joten näytteenotto tulisi tehdä tavanomaisissa käyttöolosuhteissa. (Pitkäranta 2016, 36; Valvira 2016, 3.)

Painesuhteet muodostuvat tuulen, savupiippuvaikutuksen ja ilmanvaihdon yhteisvaikutuksesta. Tyypillisesti rakennuksen painesuhteet eivät ole jatkuvasti samoja ja voimakas vaihtelu on hyvin yleistä. Paine-erojen vaikutuksesta aiheutuu ilmavirtauksia tilojen, kerrosten ja ulkovaipparakenteiden välillä. Ilmavirtojen mukana tilasta toiseen tai rakenteiden sisältä epätiiveyskohtien kautta voi kulkeutua sisäilmaan epäpuhtauksia. VOC-yhdisteitä voi kulkeutua tilasta toiseen esimerkiksi lattiapäällystevaurioista. (Pitkäranta 2016, 118.)

## **2.4 Sisäilman VOC -pitoisuuksien tutkiminen**

Sisäilman VOC-pitoisuuksien tutkitaan yleensä osana kosteus- ja sisäilmateknistä kuntotutkimusta silloin, kun rakennuksessa epäillään olevan tavallisuudesta poikkeavia sisäilman VOC -pitoisuuksiin vaikuttavia päästölähteitä tai epäillään VOC -yhdisteiden kulkeutumista sisäilmaan muualta. VOC-tutkimuksella ei saada selville kaikkia kaasumaisia epäpuhtauksia, eikä ainoastaan sisäilman VOC -pitoisuuksien perusteella ei voida päätellä sitä, etteikö ilmassa olisi terveyshaittaa aiheuttavia pitoisuuksia VOC-yhdisteitä tai etteikö tiloissa olisi VOC-yhdisteiden päästölähteitä. (Pitkäranta 2016, 33; Valvira 2016, 5.) Syitä VOC-pitoisuuksien selvittämisen voivat olla:

- tiedossa oleva kosteusvaurio tai poikkeukselliset kosteusmittaustulokset
- tiedossa oleva kemikaalivahinko
- käyttäjien kokema oireilu
- poikkeava haju
- sisäilmaselvityksen tulokset
- yleinen epäily (Pitkäranta 2016, 25, 68).

VOC-yhdisteitä voidaan mitata sisäilmasta myös silloin, kun halutaan selvittää ilmalaatua sisäilmakorjausten jälkeen tai uuden rakennuksen käyttöönottovaiheessa. Mittauksella voidaan lisäksi selvittää teollisuusprosesseissa työilmaan vapautuvia päästöjä ja arvioida siten työntekijöiden altistumista (TTL 2015).

## 2.5 Sisäilman VOC -yhdisteiden näytteenotto- ja mittausmenetelmät

Sisäilmasta voidaan ottaa VOC-näytteitä ja -mittaustuloksia muutamilla eri menetelmillä. Näytteenotossa on aina menetelmästä riippumatta noudatettava menetelmäkohtaisia ohjeita, jotta tuloksia voidaan vertailla raja-arvoihin (Pitkäranta 2016, 69). Tavallisin ja lainsäädännön tunnustama näytteenottotapa on aktiivinäytteenotto pumpulla adsorbenttikeräinputkeen. Keräinputkeen voidaan ottaa sisäilmanäyte myös ilman pumppua, jolloin menetelmää kutsutaan passiivinäytteenotoksi. Antureilla tehtäviin lyhytkestoisii kertamittauksiin ja pitkäkestoisii tallentaviin jatkuvatoimiseen mittaamiseen perustuvia menetelmiä ovat mm. PID-, MOD- ja FID -tekniikkaan perustuvat menetelmät.

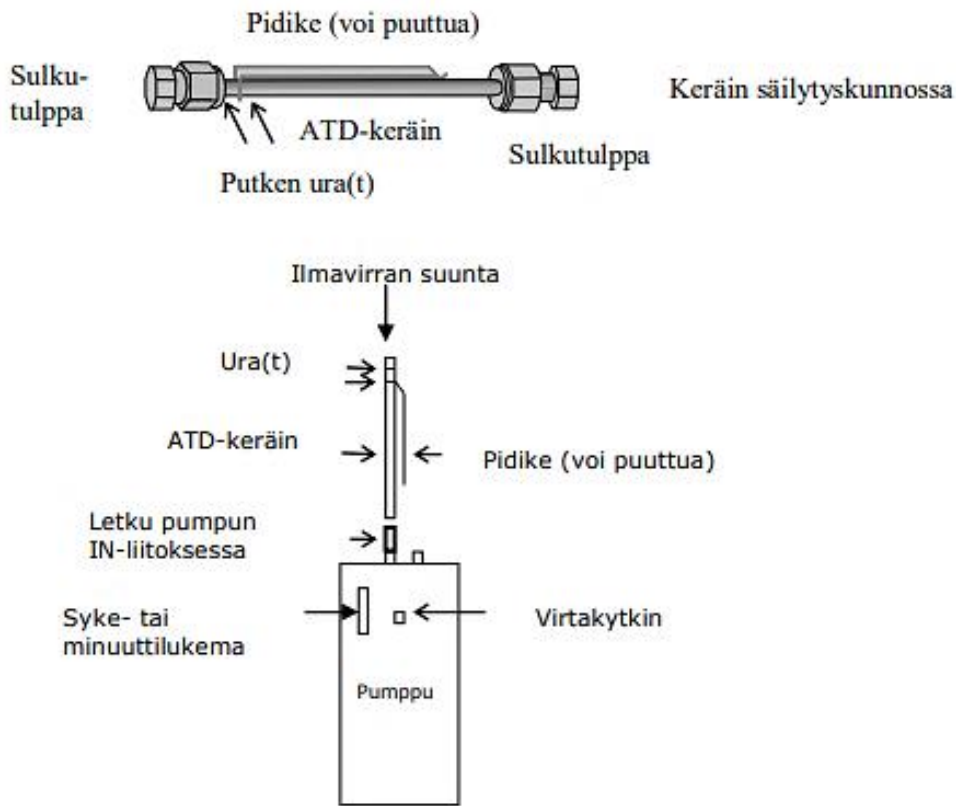
Ennen näytteenottoja tai mittausta on oltava selvillä, miksi tutkimus tehdään ja mitä tutkimuksella halutaan saada selville. Mittausmenetelmän valintaan vaikuttavat näytteenoton tai mittauksen tarkoitus, kohde ja haluttu mittausaika. Jos mitaustuloksen tulee olla vertailukelpoinen lainsäädännön raja-arvoihin, tulee mitaustavaksi valita ISO 16 000-6 standardin mukainen Tenax TA-aktiivikeräinmenetelmä.

### **Keräinnäytteenotto**

Sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden (VOC) pitoisuutta selvitetään yleensä laboratorioanalyysin vaativalla Tenax TA- tai Tenax TA-Garbograph 5TD -keräinmenetelmällä (ATD-keräin, Automatic Thermal Desorption). Suositeltavin adsorbentti on TA-Garbograph 5TD, sillä se pidättää paremmin yhdisteitä kuin Tenax TA-adsorbentti. (TTL 2015.)

Aktiivinäytteenotossa VOC-näytteet kerätään sisäilmasta Tenax TA -adsorbenttiputkiin ISO 16 000-6 standardin mukaisesti (Valvira 2016, 5). Näytteenotto adsorbenttiputkeen tapahtuu pumpun avulla (Kuva 1). Metallisen keräinputken sisällä on adsorboivaa materiaalia, johon ilmassa olevat VOC-yhdisteet kiinnittyvät. Näytteen analyysi tapahtuu laboratoriossa kaasukromatografisesti termodesorptiota ja massaselektiivistä ilmaisinta käyttäen. Yhdisteiden pitoisuudet voidaan ilmoittaa niiden omalla tai tolueenivasteella. TVOC-pitoisuus on ilmoitettu tolueenivasteella. Menetelmällä voidaan määrittellä näytteessä esiintyvät C6 – C16

(heksaani – heksadekaani) välisen alueen haihtuvat organiset yhdisteet. (TTL 2015; TTL 2016, 7.)



Kuva 1. Aktiivinäytteenotossa käytettävä keräinputki ja pumppu (TTL 2016)

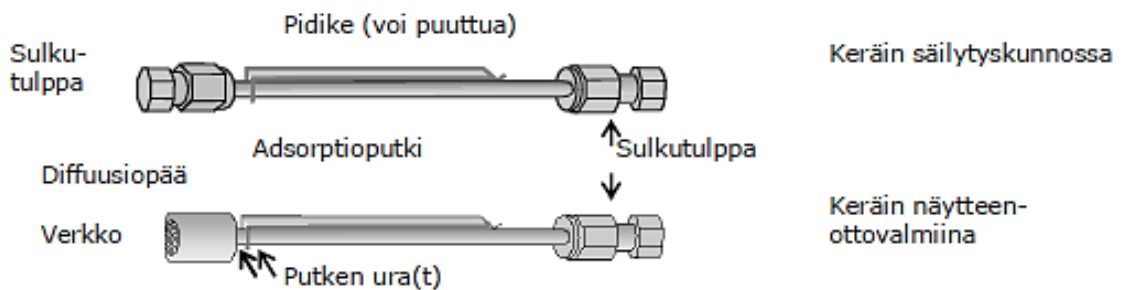
Aktiivinäytteenotossa näytemääräksi suositellaan toimisto- ja asuntotyypisissä tiloissa 7-10 litraa. Näytteenottoaika on riippuvainen näytteenotossa käytettävän pumpun keräysnopeudesta. Tällöin 9 litran näytemäärän keräämiseen kuluu aikaa 100 ml/minuutissa keräävältä pumpulta 90 minuuttia. (TTL 2016.)

Keräinmenetelmällä sisäilman VOC -pitoisuuden selvittäminen kestää 3-4 viikkoa ja yhden näytteen hinta kaikkine kustannuksineen on muutamia satoja euroja. Näytteenottokohdan ja -tilan valinta perustuu aistinvaraiseen ja kokemusperäiseen arvioon sekä rakennuksessa tehtyihin kosteus- ja rakenneteknisiin tutkimuksiin. Keräinmenetelmällä saatuja tuloksia voidaan verrata asumisterveysasetuksen 545/2015 toimenpiderajoihin. Näytteen tulos kertoo yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet sisäilmassa ja niiden muodostaman kokonaispitoisuuden

(TVOC). Tulos kertoo yhdistepitoisuudet yhdessä kuutiometrissä sisäilmaa ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) mittausajanjakson keskiarvona.

Passiivinäytteenotto ATD-keräimeen (Automatic Thermal Desorption) ilman pumppua perustuu diffuusioon. Mittausmenetelmää voidaan käyttää silloin, kun halutaan saada selville VOC-pitoisuudet pitkällä aikavälillä, esimerkiksi silloin kun sisäilman VOC-pitoisuuksien oletetaan olevan hyvin pieniä sekä työhygieenisissä mittauksissa. Keräinputki voidaan asettaa kiinteään pisteeseen tai henkilön vaatteisiin ja näytteenotto voidaan suorittaa sekä sisä- että ulkotiloissa. (TTL 2012.)

Passiivinäytteenotossa näyte kerätään samanlaiseen adsorbtioputkeen kuin aktiivinäytteenotossa ISO 16 017-2 standardissa kuvatulla menetelmällä. Keräinputken päähän asetetaan ennen näytteenoton aloitusta diffuusiopää (Kuva 2). Mittaus alkaa, kun diffuusiopää asetetaan paikoilleen ja päättyy kun pää irrotetaan paikoiltaan. Keräin tulee sijoittaa mahdollisimman edustavaan kohtaan tilassa hengitysvyöhykkeelle, jossa ilman liike on hidas ja jossa tiloissa olevat ihmiset eivät vahingossa pääse koskemaan keräinputkeen. Henkilön vaatteisiin kiinnitetynä keräin tulee sijoittaa mahdollisimman lähelle hengitysvyöhykettä. (TTL 2012)



Kuva 2. Passiivinäytteenottokeräin diffuusiopäällä varustettuna (TTL 2012)

Tiloissa ja ulkoilmassa, jossa ilman VOC-pitoisuudet ovat oletettavasti pieniä, passiivinäytteen keräysaika on yleensä 2 viikkoa. Teollisuustiloissa, joissa voidaan olettaa olevan poikkeuksellisia sisäilman VOC-pitoisuuksia, näytteenkeräysaika on 2-8 vuorokautta. Työhygieenisissä mittauksissa, jolloin sisäilmassa epäillään olevan suuria VOC-pitoisuuksia, keräysaika on 15 minuuttia – 8 tuntia.

Passiivinäytteenottoon ja analyysiin kuluva aika on yhteensä sama kuin aktiivinäytteenotossakin (noin 3-5 viikkoa). Näytteenoton kustannus koostuu keräinputkesta, lähetyskuluista ja analyysistä. Näytteen tulos kertoo sisäilmassa olevien VOC-yhdisteiden yksittäiset ja kokonaispitoisuuden keskiarvon mittausajanjaksoilla. (TTL 2012.) Saatuja tuloksia voidaan verrata Asetuksessa 538/2018 annettuihin HTP-arvoihin.

### **Jatkuvatoiminen mittaus, PID**

PID -mittalaitteen (photoionization detector) toiminta perustuu fotoionisaation havaitsemiseen. Anturiin kulkeutuneisiin VOC-yhdisteisiin osuu fotoneja ja anturin ultraviolettilon kohdatessaan ne ionisoituvat. Mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus on johdettu ionien tuottamasta sähkövirrasta. PID-anturi havaitsee ne VOC-yhdisteet, joiden ionisoitumisenergia on  $\leq$  anturin UV-lampun teho. Laitteella voidaan siis havaita yhdisteitä, joiden ionisaatiopotentiaali on riittävä. Tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi isobutyylä ja aromaattiset hiilivedyt. (Alhonnoro 2019, 25-26, 34.)

Jatkuvatoiminen mittalaite näyttää sisäilman haihtuvien orgaanisten yhdisteiden kokonaispitoisuuden (TVOC) sekä hetkellisesti että tallennettuna pidemmältä aikaväliltä mittalaitteen ominaisuuksien mukaan. Mittalaitteessa voi olla TVOC-pitoisuuden lisäksi muitakin mittausparametrejä. Mittauksen kokonaisaika voi vaihdella 0,5 tunnista muutamaan viikkoon. Mittalaitteen ilmoittama TVOC on luettavissa heti laitteen näytöltä ja tallennettuna data voidaan siirtää myös tietokoneelle tarkasteltavaksi. Mittauksen hinta kostuu laitteen hankintahinnasta, joka voi olla jopa muutamia tuhansia euroja, ja säännöllisin väliajoin suoritettavasta laboratoriolaboroinnista sekä käyttäjän suorittamaan kenttäkalibrointiin tarvittavista kalibrointikaasuista. Mittausmenetelmät eivät ole standardisoituja eikä laitteen antamia lukemia ei voida verrata lainsäädännössä annettuihin raja-arvoihin.

## **2.6 VOC -päästölähteiden paikantaminen**

Jos sisäilmasta otetusta näytteestä määritetään poikkeuksellisia pitoisuuksia tai yhdisteitä, tulee VOC-päästöjen aiheuttaja pyrkiä selvittämään. Päästölähdettä voidaan selvittää tarkemmin esimerkiksi FLEC-näytteenotolla, kupu- ja viiltomit-

tauksilla sekä bulkVOC-näytteillä. (Valvira 2016, 5.) VOC-päästölähteiden paikantamisessa käytetään myös tilojen ja materiaalien aistinvarasta arviointia, rakenneavauksia sekä kosteusteknisiä tutkimuksia. (Pitkäranta 2016, 68).

FLEC-näytteenotto on standardisoitu menetelmä, jossa tutkittavan rakenteen pintaan asennetaan kammio. Kammioon syötetään puhdasta synteettistä ilmaa ja VOC-pitoisuus määritetään kammioista poistuvasta ilmasta. Ilmavirtaus saadaan aikaan pumpuilla ja ilmanäytteet kerätään keräinputkiin. Kupumittaus eroaa FLEC-näytteenotosta siten, että kammioon syötetään sisäilmaa. Viiltomittauksessa ilmanäyte kerätään Tenax TA -adsorbenttikeräinputkeen esimerkiksi muovimattoon tehdyn viillon kautta muovimaton alta. (Valvira2016, 5-6.)

BulkVOC-näyte ovat materiaalista otettu näytepala, jonka VOC-päästöt määritetään mikrokammiolaitetta hyödyntävällä kokonaisemissiomenetelmällä. Näytteen tulos kertoo minkälaisia päästöjä materiaalista voi tulla sisäilmaan, mutta sen perusteella ei voida päätellä sisäilman VOC-pitoisuuksia. (TTL.)

## **2.7 VOC-mittausten tulosten epävarmuustekijät ja virhelähteet**

Mittaustuloksiin liittyy lähes aina epävarmuutta. Tämä tarkoittaa sitä, että mittamalla saatu tulos saattaa poiketa mitatun suureen todellisesta pitoisuudesta tai tasosta. VOC-näytteiden ja jatkuvatoimisen mittauksen tuloksiin vaikuttavia virhelähteet voivat olla laiteperäisiä, menetelmäperäisiä, olosuhdeperäisiä, näytteenottotapahtumaan, näytteenottajan toimintaan ja näyteanalyysiin liittyviä. Näytteenotot ja mittaukset siksi tulee aina suorittaa ohjeiden mukaisesti. (Pitkäranta 2016, 37.)

Mittalaitteet pitää kalibroida säännöllisesti. Jos laitteita ei kalibroida, siitä voi aiheutua tuloksiin systemaattista virhettä. Kalibroinnista vastaa aina laitteen omistaja, eli jos pumpu tai mittalaite on vuokrattu näytteenottoa varten, tulee aina varmistaa, että pumpun kalibrointi on voimassa. Jotkin laitteet voivat vaatia lisäksi käyttäjän ennen mittaustapahtumaa suorittamaa kenttäkalibrointia. Kenttäkalibrointi tulee pyrkiä suosittamaan jokaisella kerralla samalla tavoin, jotta laitteen mittausepävarmuus on mahdollisimman pieni.

Mittaustilanteessa saattaa esiintyä laitteiden teknisiä käyntihäiriötä. Aina ennen mittauksia tulee tarkistaa, että mittalaitteiden ja pumppujen akut on ladattu ja että laitteet toimivat kuten niiden pitää. Vaikka mittausten aikana ei suositella oleskelua mittalaitteiden välittömässä läheisyydessä, tulee niiden toimintaa kuitenkin tarkkailla säännöllisin väliajoin.

Näytteiden ottojen yhteydessä tulee aina tarkastella näytteenottotilannetta, tilaa ja käyttäjien toimintaa, jotta näytteiden tuloksiin mahdollisesti virhettä aiheuttavat lähteet ovat tiedossa. Näytteenottojen ja mittausten tulisi aina tapahtua mahdollisimman normaaleissa sisäilmaston olosuhteissa. Ennen näytteenottoa tai samaan aikaan pyritään välttämään tilojen tuulettamista ja erilaisten kemikaalien käyttöä, sillä ne voivat vääristää tuloksia. Tuloksiin vaikuttavia virhelähteitä voivat olla esimerkiksi hajusteet, siivoukkemikaalit, liuottimet ja jopa alkoholin nautiskelu tilassa. Näytteenottajan tulee välttää hajusteiden käyttöä, purkan pureskelua ja tupakointia. Mahdollisen virhelähteen havaitsemisen jälkeen virhelähde tulee mahdollisuuksien mukaan poistaa tilasta ja tarvittaessa mittausta tai näytteenottoa siirretään parempaan ajankohtaan. Mahdollisesti virhettä aiheuttavat tekijät tulee aina kirjata huolella ylös ja analyysin sekä mittausten tuloksia tulkitaan nämä virhelähteet huomioiden. VOC-näytteenotto ja näyteanalyysi yksistään muodostavat tuloksiin noin  $\pm 30\%$  virheen. Lisäksi tulee aina muistaa, että keräinnäytteen VOC-pitoisuudet edustavat vain näytteen keräyshetkellä kyseisessä tilassa ollutta sisäilman VOC-yhdisteiden pitoisuutta. (Pitkäranta 2016, 68-69.)

Mittaustapahtumasta ja mittausvälineistä johtuvaa satunnaista mittausvirhettä voidaan pienentää suorittamalla rinnakkaisia mittauksia. Mitattavan suureen ajasta ja paikasta riippuvaa vaihtelua voidaan pienentää toistamalla mittaus tai näytteenotto eri kohdissa ja eri aikoina. Yleensä on perusteltua ottaa vertailunäyte tai mittaus vertailutilasta. (Pitkäranta 2016, 37-38, 69.)

## **2.8 Sisäilman VOC -yhdisteiden haittavaikutukset**

Sisäilman VOC-yhdisteet voivat aiheuttaa sekä viihtyvyys- että terveyshaittaa. Tavallisin viihtyvyyshaitta on hajuhaitta. Tyypillisesti yhdisteiden hajukynnys on

alhaisempi kuin ärsytystä aiheuttava pitoisuus. Hajukynnys voi olla jopa niin alhainen, että yhdisteen pitoisuutta sisäilmassa ei pystytä määrittämään. Ihmiset aistivat hajut yksilöllisesti ja hajuhaitan toteaminen onkin melko haastavaa. Hajuhaitan selvittämiseen voidaan käyttää sisäilmanäytteen ottoa, aistinvaraista arviointia ja erilaisia kyselyitä. (Backlund ym. 2005, 156-164.)

Sisäilman VOC-yhdisteiden aiheuttamia terveyshaittoja ei ole vielä tunnettu tarkkaan. Jotkin yksittäiset yhdisteet voivat suurina pitoisuuksina aiheuttaa terveysoireilua tai -haittaa. On myös viitteitä siitä, että useamman yhdisteen yhteisvaikutus on terveydelle haitallista. VOC-päästöjen aiheuttamia terveyshaittoja voivat olla mm. päänsärky, silmien ja limakalvojen ärsytysoireet. (Backlund ym. 2005, 156-164; Sisäilmayhdistys 2008a.)

Terveysoireilun kokemiseen vaikuttavat monet tekijät ja oireilu on yleensä hyvin yksilöllistä. Pelkän koetun oireilun perusteella ei voida päätellä, mistä oireilu johtuu ja onko sisäilmassa terveyshaittaa aiheuttavia epäpuhtauksia. Koettuun oireiluun vaikuttavat monet tekijät, joita ovat esimerkiksi yksilölliset tekijät (terveydentila, perintötekijät, ikä), altisteen pitoisuus, altistus aika ja -määrä. (Hometalkoot; Sisäilmayhdistys 2008b.)

## **2.9 Lainsäädäntö, ohje- ja raja-arvot**

Terveydensuojelulaki 763/1994 ja -asetus 1280/1994 määrittelee, että sisäilman tulee olla laadultaan sellaista, ettei siitä aiheudu terveyshaittaa.

Asumisterveysasetuksessa 545/2015 on määritelty asunnon tai muun oleskelutilan terveydelliset olosuhteet sekä ulkopuolisten asiantuntijoiden pätevyysvaatimukset. Asetuksessa on annettu toimenpideraja-arvot neljälle sisäilman VOC-yhdisteelle, sisäilman TVOC-pitoisuudelle sekä yksittäisen yhdisteen tolueenivasteella lasketulle pitoisuudelle (Taulukko 2). Valvira on julkaissut asumisterveysasetuksen soveltamisohjeet, joissa annetaan yksityiskohtaisia tulkintoja esimerkkejä asetuksen soveltamisesta. Toimenpiderajan ylittyminen tarkoittaa sitä, että on ryhdyttävä toimenpiteisiin mahdollisen terveyshaitan selvittämiseksi ja tarvittaessa poistamiseksi. TVOC-pitoisuuden toimenpiderajan alittuminen ei kuitenkaan tarkoita sitä, etteikö VOC-yhdisteistä voisi aiheutua terveyshaittaa. VOC-

yhdisteiden terveyshaittaa aiheuttavia pitoisuuksia tarkastellaan sekä yksittäisen VOC-yhdisteen osalta sekä kokonaispitoisuutena. (Valvira 2016, 4.)

Yhdiste	Toimenpideraja
TVOC	400 µg/m <sup>3</sup>
Yksittäinen VOC	50 µg/m <sup>3</sup>
TXIP	10 µg/m <sup>3</sup>
2-etyyli-1-heksanoli	10 µg/m <sup>3</sup>
Naftaleeni	10 µg/m <sup>3</sup> , ei saa esiintyä hajua
Styreeni	40 µg/m <sup>3</sup>

Taulukko 2. Asumisterveysasetuksen 545/2015 asettamat toimenpiderajat haihtuville orgaanisille yhdisteille

Yksittäisen VOC-yhdisteen pitoisuuden toimenpideraja-arvon (50 µg/m<sup>3</sup>) ylittyessä tulee aina selvittää kyseessä olevan yhdisteen haitallisuus ja merkitys sisäilman laadun kannalta. Jos yhdisteen toimenpiderajan ylittävistä pitoisuuksista todetaan, ettei se ole terveydelle haitallinen, toimenpiderajan ylittymisen vuoksi ei ole tarvetta toimenpiteisiin. Näytteen perusteella saatu sisäilman TVOC-pitoisuus on aina arvio todellisuudessa vallitsevasta tasosta. Kahden eri tilan sisäilmasta otettujen VOC-näytteiden samansuuruinen TVOC-pitoisuus voi koostua eri yhdisteistä ja siten olla terveysvaikutuksiltaan eri. Siksi on erittäin tärkeää tunnistaa VOC-yhdisteet, joista kokonaispitoisuus muodostuu. (Valvira 2016, 4: Sisäilmayhdistys 2008a.)

Työterveyslaitos on julkaissut omia sisäympäristön viitearvoja, jotka perustuvat toimistotyypisissä tiloissa tehtyihin sisäilmamittauksiin. Viitearvot kuvaavat pitoisuuksia, joiden alle 90 % mittaustuloksista sijoittui. Viitearvojen perusteella voidaan tunnistaa poikkeavia mittaustuloksia. TTL:n viitearvot eivät ole viranomaisen asettamia toimenpidearvoja. Taulukossa 3 on esitetty muutamia yhdisteitä ja TTL:n niille julkaisemia viitearvoja. Taulukkoon poimitujen yhdisteiden viitearvot ovat alhaisempia kuin asumisterveysasetuksen toimenpidearvot. (TTL 2017, 54; TTL 2019.)

Yhdiste	Toimenpideraja
TVOC	>100 µg/m <sup>3</sup>
TXIP	6 µg/m <sup>3</sup>
2-etyyli-1-heksanoli	4 µg/m <sup>3</sup>
Naftaleeni	< 2 µg/m <sup>3</sup> , ei saa esiintyä hajua

Taulukko 3. Työterveyslaitoksen julkaisemia viitearvoja muutamille haihtuville orgaanisille yhdisteille sekä niiden kokonaispitoisuudelle sisäilmassa (TTL 2019.)

Asetuksessa 538/2018 on säädetty työpaikan ilman epäpuhtauksien haitallisiksi tunnetuista pitoisuuksista (HTP-pitoisuus, HTP-arvo). Työnantajan on otettava huomioon HTP-arvot työn vaarojen selvittämisessä ja työntekijöiden altistumista arvioidessaan. HTP-arvoja voidaan antaa eri pituisille ajanjaksoille ja joillekin nimikkeille on säädetty hetkellinen pitoisuus. (STM 2018, 11.) HTP-arvot eivät sovellu asuin- tai muiden oleskelutilojen terveyshaitan arviointiin (Pitkäranta 2016, 71).

### 3 Sisäilmatutkimukset

Kenttätutkimukset suoritettiin vuoden 2019 lopussa sekä keväällä 2020 kolmessa eri tutkimuskohteessa. Tutkimuskohteita käsitellään tässä opinnäytetyössä kohteilla A, B ja C.

#### 3.1 Tutkimuskohteet

Tämän opinnäytteen tutkimuskohteet rakennukset ovat hyvin eri tyyppisiä ja ne poikkeavat perusominaisuuksiltaan lähes kaikin mahdollisin tavoin. Kohteet poikkesivat toisistaan mm. pinta-alan, tilavuuden, ilmanvaihtotavan, rakennetyyppien, rakennusajankohdan ja käyttötarkoituksen mukaan. Kohteiden perustiedot on esitetty taulukossa 4.

Tutkimuskohteiden perustiedot			
	A	B	C
<b>Rakennusvuosi</b>	1900 alkupuoli	1930 -luku	2010 -luku
<b>Peruskorjausvuosi</b>	1980 -luku	ei tiedossa	-
<b>Rakennustyyppi</b>	ruokala	pientalo	kerrostalo
<b>Käyttötarkoitus</b>	kokoontumisrakennus	kokoontumisrakennus	asuinrakennus
<b>Kokonaispinta-ala*</b>	1 300 m <sup>2</sup>	850 m <sup>2</sup>	70 m <sup>2</sup> (asunnon p-a)
<b>Kerroksia</b>	1	2, ullakko + kellari	8 (kerrostalossa)
<b>Rakennuksen runko</b>	massiivitiili	massiivitiili, betoni/puu välipohja	betoni
<b>Ilmanvaihtotapa</b>	koneellinen poisto	painovoimainen	huoneistokohtainen koneellinen tulo- ja poisto

Taulukko 4. Tutkimuskohteiden perustiedot (\* kokonaispinta-ala käsittää rakennuksen/asunnon koko pinta-alan)

Tutkimuskohteissa kahdessa (B ja C) oli koettu sisäilmaongelmiin viittaavaa terveysoireilua. Muissa kohteissa (A ja B) ei ollut aiemmin tehty sisäilma- tai kunto- tutkimuksia. Kohteissa A ja B oli havaittavissa poikkeuksellisia hajuja ja näkyviä kosteusvaurioita. Kohteista ennakkoon tiedossa olleet käyttäjien kokemat sisäilmaongelmiin viittaavat terveysoireilut ja havainnot on koottu taulukkoon 5.

<b>Käyttäjien kokema terveysoireilu ja havainnot</b>			
	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>C</b>
<b>Käyttäjien kokemaa sisäilmaongelmiin viittavia terveysoireiluja</b>	ei	kyllä	kyllä
<b>Tiloissa havaittu poikkeuksellisia hajuja</b>	kyllä	kyllä	ei
<b>Tiloissa näkyviä kosteusvaurioita</b>	kyllä	kyllä	ei

Taulukko 5. Tutkimuskohteissa koettu terveysoireilu ja havainnot

Kohde A on kokoontumistiloina toimiva kohde, jonka pinta-ala ja tilavuus ovat tutkimuskohteista suurimmat. Kohteessa on koneellinen poistoilmanvaihto. Kohteessa koetusta sisäilmaan laatuun liittyvästä oireilusta ei ole tietoa. Kohteessa on sisätiloissa näkyviä kosteusvaurioita ja tutkimuskäyntien aikana havaittiin poikkeuksellisia hajuja.

Kohde B on kokoontumistila, joka kuitenkin on tyypiltään pientalomainen. Kohteessa on kaksi kerrosta sekä kellarikerros. Ilmanvaihtotapa on painovoimainen. Kohteessa on koettu sisäilman laatuun viittaavaa oireilua sekä aistittu poikkeuksellisia hajuja. Kohteessa on sisäpuolisissa tiloissa näkyviä kosteusvaurioita.

Kohde C on yksityinen asunto, joka on pinta-alaltaan tutkimuskohteista pienin ja rakentamisvuodeltaan uusin. Kohteen ilmanvaihtotapa on koneellinen tulo- ja

poistoilmanvaihto. Kohteessa on aiemmin tehty sisäilman laatuun liittyviä mittauksia ja koettu sisäilmanlaatuun viittaavaa oireilua. Aiemmissä tutkimuksissa kohteen sisäilmasta on mitattu keräinmenetelmällä poikkeuksellisen korkea pitoisuus 2-etyyli-1-heksanolia. Näkyviä kosteusvaurioita tai kosteusvaurioituneita rakennusmateriaaleja ei ole havaittavissa.

### 3.2 Mittaus- ja tutkimusmenetelmät

Kahdessa kohteessa suoritettiin tähän opinnäytetyöhön liittyen vain TVOC-mittauksia ja -näytteenottoja. Yhdessä kohteessa suoritettiin TVOC-mittausten lisäksi muita sisäilmastoon liittyviä mittauksia sekä paineromittaus ulkovaipan yli. Tutkimuskohteissa suoritettavat mittaukset ja tutkimukset on esitetty Taulukossa 6.

Suoritettavat mittaukset ja tutkimukset, kpl					
Tutkimuskohde	Keräinnäyte	Mittalaite, hetkellinen kertamittaus	Mittalaite, 8 vrk tallentava mittaus	Dataloggerit, lämpötila, RH, CO <sub>2</sub> , paine-ero	Aistinvarainen havainnointi
<b>A</b>	2	2	-	-	kyllä
<b>B</b>	3	3	-	-	kyllä
<b>C</b>	1	1	1	1	kyllä

Taulukko 6. Tutkimuskohteissa suoritettavat mittaukset ja tutkimukset

#### Keräinnäytteenotto

Sisäilman VOC-keräinnäytteet otettiin sisäilmasta Gilian-pumpulla metallisiin Tenax TA-Garbograph 5TD -adsorbenttiputkiin ISO 16 000-6 standardin mukaisesti. Näytteen keräysaika oli 90 minuuttia ja pumpun ilmavirta noin 100 ml/minuutissa. Näytemääräksi tuli siten noin 9 litraa. Näytteet lähetettiin välittömästi näytteenotopäivänä Työterveyslaitoksen Helsingin yksikköön kaasukromatografisesti analysoitaviksi.

Keräinnäytteiden mukana kulki koko prosessin ajan mukana 0-keräinputki. Sen avulla laboratorio pystyi analyysin yhteydessä huomiomaan näytteeseen vaikuttavat ns. taustapitoisuudet.

## **Kertamittaus ja jatkuvatoiminen mittaus, PID-mittalaite**

Kerta- ja jatkuvatoiminen ja TVOC-pitoisuuksien mittaus suoritettiin PID-mittalaitteella ja -anturilla. Laitteen valmistajan ilmoittama mittausalue on 5 ... 20 000 ppb. Tulosten vertailtavuuden vuoksi TVOC-pitoisuuden ilmoittavaksi yksiköksi vaihdettiin  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

Laite oli laboratorikalibroitu ennen opinnäytetyöhön liittyviä tutkimuksia. Anturi kenttäkalibroitiin aina ennen uutta tutkimuskohdetta kalibroitikaasuilla. Kenttäkalibroinnissa laitteen alaraja kalibroitiin 0-kaasulla ja yläraja isobutyleenikaasulla laitevalmistajan ohjeiden mukaisesti.

Mittalaite käynnistettiin hyvissä ajoin (noin 0,5-1 h) ennen kertamittauksen pitoisuuslukemien kirjaamista. Jos mittalaitteen paikkaa vaihdettiin tutkimuskohteessa toiseen tilaan, lukeman annettiin tasaantua jälleen vähintään 0,5 tuntia. Tallentavassa 8 vuorokautta kestäneessä mittauksessa, tutkimuskohteessa C, laite jätettiin jatkamaan mittausta samaan kohtaan, jossa oli aiemmin suoritettu kertamittaus.

Kertamittauksitulokset kirjattiin heti ylös ja lukemat dokumentoitiin myös valokuvaamalla mittalaitteen näytön lukemat. Pitkäkestoisen mittauksen tulokset siirrettiin tietokoneelle taulukko-ohjelmaan lähempää tarkastelua varten.

## **Jatkuvatoiminen mittaus, dataloggerit**

Tutkimuskohteessa C tehtyjä muita mittauksia olivat jatkuvatoimisena pitkäaikaismittauksena erillisillä dataloggereilla tehdyt sisäilman lämpötila-, suhteellinen kosteus (RH) ja paine-eromittaus ulkovaipan yli. Paine-eromittauksessa loggeri oli yhdistetty erilliseen paine-eromittalaitteeseen. Kohteessa loggerilla tehty sisäilman hiilidioksidi ( $\text{CO}_2$ ) -mittaus epäonnistui laitevian vuoksi.

Dataloggerit asennettiin PID-mittalaitteen läheisyyteen ja mittausajanjakso oli yhtä pitkä kuin PID-mittalaitteella. Loggereihin tallennettu mittausdata siirrettiin Tinytag Explorer -ohjelmaan lähempää tarkastelua varten.

## **Aistinvarainen havainnointi**

Näytteenottojen ja mittausten lisäksi tutkimuskohteissa tehtiin aistinvaraisia havaintoja mahdollisista VOC-päästölähteistä tai tuloksiin mahdollisesti virhettä aiheuttavista tekijöistä. Tällaisia tekijöitä olivat esimerkiksi näkyvät kosteusvauriot, poikkeukselliset hajut, poikkeuksellisen voimakas ilmavaihto tai tiloissa säilytettävät kemikaalit.

### **3.3 Mittaustilanteiden järjestelyt**

TVOC-näytteiden otossa ja mittauksissa toimittiin Valviran laatiman asumisterveysasetuksen soveltamisohjeen osan III ja ISO 16 000-6 standardin mukaisesti. Sisäilmanäytteiden otot ja mittaukset suoritettiin oleskeluvyöhykkeeltä noin 1,1 metrin korkeudelta. Näytteet ja mittaukset suoritettiin sellaisesta kohdasta tilaa, jonka oletettiin parhaiten edustavan TVOC-yhdisteiden esiintymistä sisäilmassa. Näytteenottopisteet pyrittiin sijoittamaan siten, etteivät tulo- ja poistoilmanvaihtoista aiheutuvat ilmavirrat osuneet mittauskohtiin.

Tutkimuskohteiden käyttäjiä oli ohjeistettu välttämään tilojen tuuletusta vähintään 12 tuntia ennen näytteenottoja ja myös näytteiden keräyksen ja mittausten aikana ikkunat ja ovet pidettiin kiinni. Tutkimuskohteiden tilojen käyttäjiä oli ohjeistettu välttämään ennen näytteenottoa myös tilojen kemikaaleilla ja kostealla siivoamisella ja muiden kemikaalien käyttöä. Mittausten aikana tiloissa ei suoritettu samanaikaisesti rakenneavauksia.

Keräinnäytteitä ja mittalaitteita käsiteltäessä toimittiin joka kerta samalla tavoin. Mittauspäivänä tutkija vältti hajustettujen kemikaalien käsittelyä ja mittausvälineitä käsiteltiin kumihansikkaat kädessä. Keräinnäytteet lähetettiin huolellisesti pakattuina välittömästi näytteenottojen jälkeen Postin välityksellä analyysilaboratorioon.

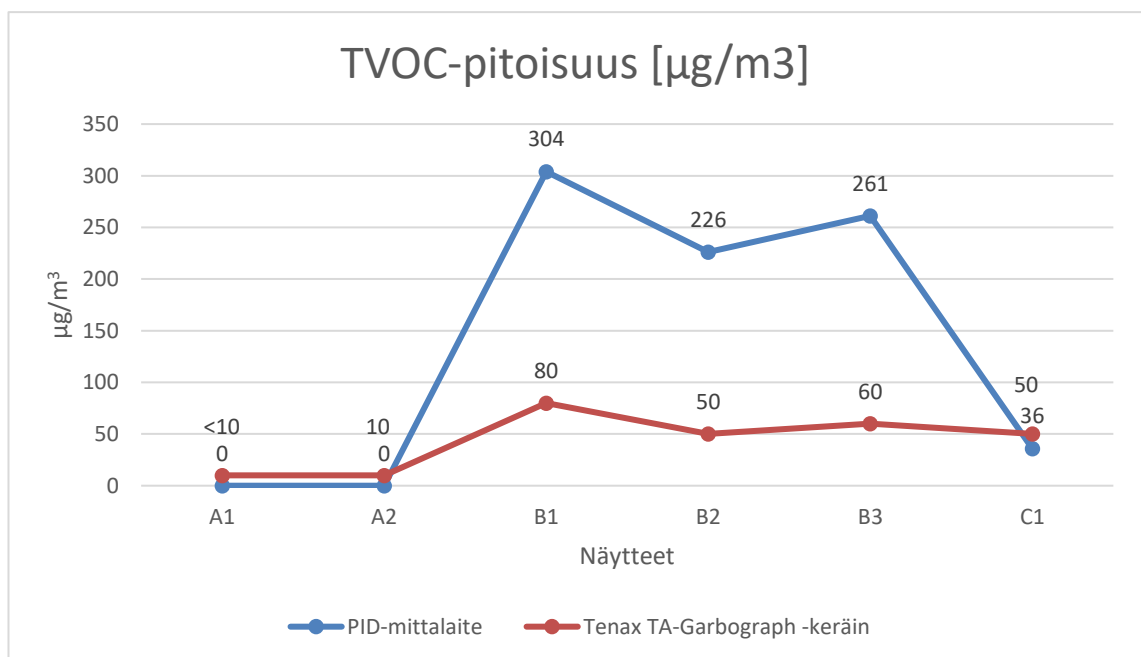
Tutkimusten aikana kohteissa B ja C oli läsnä tilojen käyttäjiä, mutta he eivät oleskelleen mittauspisteiden välittömässä läheisyydessä näytteenottojen ja keräilymittauksen aikana. Tilojen olosuhteet ja ilmanvaihto pyrittiin pitämään mitta-

teen aikaan normaaleina ja käyttöolosuhteita vastaavina. Mittalaitteella ja data-loggereilla tapahtuvien pitkäaikaismittausten aikana tutkimuskohteen C käyttäjiä oli ohjeistettu käyttämään tiloja ja ilmavaihdon säätöjä normaaliin tapaan.

## 4 Tutkimustulokset

### 4.1 VOC-keräinnäytteet ja kertamittaustulokset

Jatkuvatoimisen PID-mittalaitteen ilmoittamat TVOC-pitoisuuden kertamittaustulokset otettiin ylös noin 0,5 – 1 tunnin tasaantumisaajan jälkeen ja samaan aikaan kun tilassa oli käynnissä keräinnäytteenotto. PID-mittalaitteiden lukemat ja keräinnäytteiden TVOC-pitoisuudet on esitetty Kuvassa 3. Keräinnäytteiden TVOC-pitoisuudet vaihtelivat välillä < 10 ... 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mittalaitteen ilmoittamat kertalukemat vaihtelivat välillä 0 ... 304  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



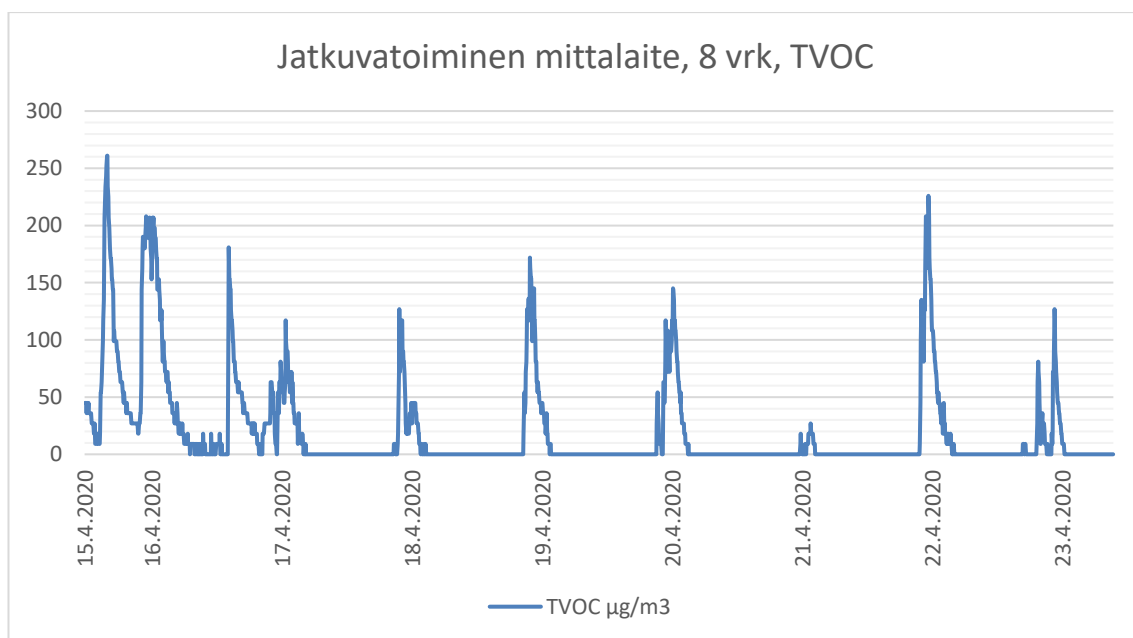
Kuva 3. PID-mittalaitteen ilmoittamat kertamittaustulokset ja keräinnäytteiden TVOC-pitoisuudet ( A/B/C = tutkimuskohteen koodi, 1/2/3 = näyttenumero)

Tutkimuskohteessa A kummallakin menetelmällä saatiin käytännössä 0-tulokset. Jos keräinmenetelmällä ilmoitetun pitoisuuden edessä on < -merkki, se tarkoittaa pienintä määritettävissä olevaa pitoisuutta. Tutkimuskohteessa B keräinnäytteiden pitoisuudet vaihtelivat välillä 50 ... 80  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja mittalaitteella 226 ... 304  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tutkimuskohteen C keräinnäytteen TVOC-pitoisuus oli 36  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja mittalaitteen ilmoittama pitoisuus oli 50  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .

## 4.2 Jatkuvatoiminen mittaus, PID-mittalaite

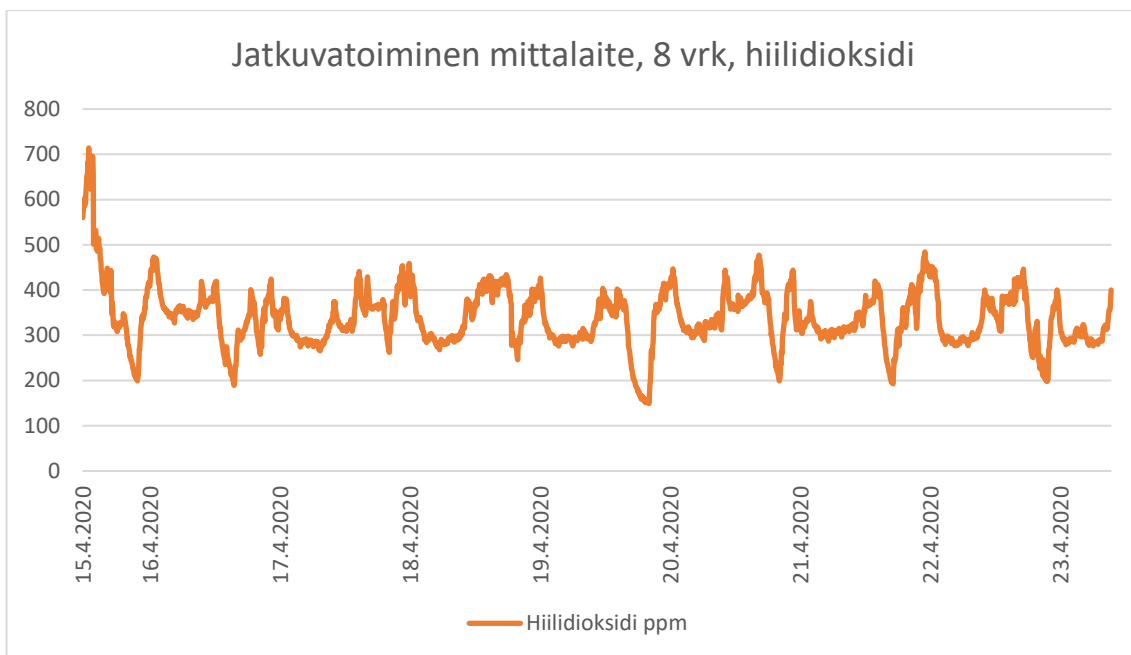
Tutkimuskohteessa C suoritettiin mittalaitteella noin 8 vuorokautta kestänyt jatkuvatoiminen mittaus. Mittaus taltioi sisäilman TVOC-, ammoniakki-, hiilidioksidi- ja suhteellisen kosteuspitoisuuden sekä lämpötilan 5 minuutin välein. Mittalaitteen lukemat 8 vuorokauden pituiselta ajanjaksolta on esitetty liitteessä 1.

Mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus vaihteli välillä 0 ... 261  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kuva 4). Tulosten keskiarvopitoisuus oli 20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja mediaanipitoisuus 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . TVOC-pitoisuus oli siis mittalaitteen tallentaman datan mukaan suurimman osan aikaa 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ .



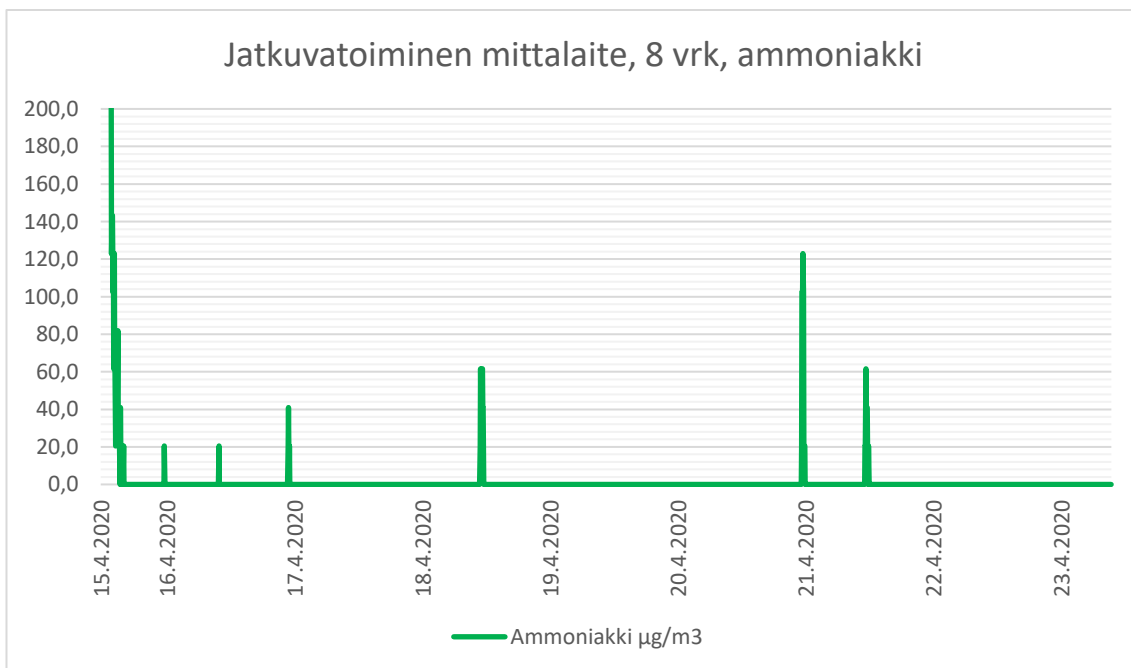
Kuva 4. Jatkuvatoimisen mittalaitteen pitkäkestoisesta mittauksesta sisäilman TVOC-pitoisuudet 8 vuorokauden ajalta

Mittalaitteen ilmoittama sisäilman hiilidioksidipitoisuus vaihteli välillä 149 ... 714 ppm (kuva 4). Keskiarvopitoisuus oli 339 ppm ja mediaanipitoisuus 344 ppm. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden vaihtelu on esitetty kuvassa 5.



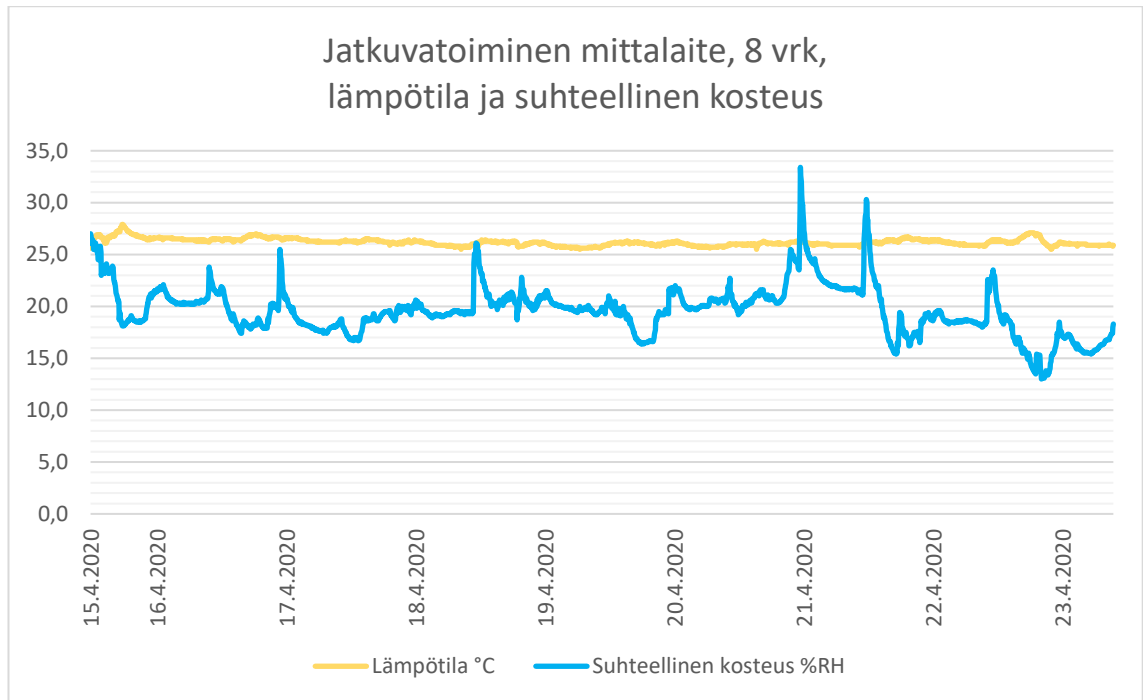
Kuva 5. Jatkuvatoimisen mittalaitteen pitkäkestoisen mittauksen sisäilman hiilidioksidipitoisuudet 8 vuorokauden ajalta

Mittalaitteen ilmoittama sisäilman ammoniakkipitoisuus vaihteli välillä 0 ... 1685  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Pitoisuuden keskiarvo oli 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  ja mediaani 0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ammoniakkia oli siis sisäilmassa mittalaitteen havaitsemia määriä yksittäisinä hetkinä. Ammoniakkipitoisuuden vaihtelu sisäilmassa on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Jatkuvatoimisen mittalaitteen pitkäkestoisen mittauksen sisäilman ammoniakkipitoisuudet 8 vuorokauden ajalta (mittauksen alussa mitattu korkea ammoniakkipitoisuus on rajattu pois kuvaajasta)

Mittalaitteella mitattu sisäilman lämpötila vaihteli välillä 26 ... 28 °C. Lämpötilan keskiarvo ja mediaani olivat molemmat 26 °C. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli välillä 13 ... 33 %. Suhteellisen kosteuden keskiarvo ja mediaani olivat molemmat 20 %. Jatkuvatoimisella mittalaitteella mitattujen lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lukemat on esitetty kuvassa 7.



Kuva 7. Jatkuvatoimisen mittalaitteen pitkäkestoisen mittauksen sisäilman lämpötilan ja suhteellisen kosteudentulokset 8 vuorokauden ajalta

### 4.3 Jatkuvatoiminen mittaus, dataloggerit

Tutkimuskohteessa C suoritettiin pitkäkestoisia tallentavia mittauksia mittalaitteen lisäksi myös dataloggereilla. Mittausten kesto vaihteli kuudesta seitsemään vuorokauteen. Mittausjaksojen pituuksien vaihtelut johtuivat loggereiden mittauksen aloitusaikojen eriaikaisuudesta. Lämpötilan, suhteellisen kosteuden ja paineromittausten lukemat tallentuivat 5 minuutin välein. Hiilidioksidin mittaus dataloggerilla ei onnistunut, sillä loggeri havaittiin mittauksen jälkeen vialliseksi.

Dataloggerilla mitattu lämpötila vaihteli välillä 21 ... 24 °C. Lämpötilan keskiarvo mittausajanjaksolla oli 23 °C. Sisäilman suhteellinen kosteus vaihteli mittausajanjaksolla 13 ... 40 % välillä. Suhteellisen kosteuden keskiarvo oli 25

%. Dataloggerilla mitattujen sisäilman lämpötilan jasuhteellisen kosteuden vaihtelu on esitetty liitteen 2 kuvaajassa.

Dataloggerilla mitattu paine-ero ulkovaipan yli vaihteli välillä 9 ... -16 Pa. keskimäärin paine-ero oli -0,1 Pa. Paine-erokuvaaja on liitteenä 3.

## **5 Tulosten tulkinta ja vertailu**

Jokaisella mittalaitteella ja menetelmällä saatuihin mittaustuloksiin liittyy aina jonkin verran epävarmuutta. Mittaustuloksiin liittyvää epävarmuutta on tarkasteltu sekä tulosten tulkinnan yhteydessä että erillisessä virhetarkastelu -kappaleessa 5.6. Jatkuvatoimisella mittalaitteella mitattuja kerta- ja pitkäaikaismittaustuloksia vertailemalla on pyritty selvittämään mittalaitteen käytettävyyttä ja luotettavuutta.

### **5.1 Vertailu lainsäädännön raja-arvoihin**

Keräinnäytteiden TVOC-pitoisuudet eivät olleet poikkeuksellisen korkeita, eivätkä ylittäneet lainsäädännössä esitettyjä raja-arvoja. Asumisterveysasetuksen TVOC-pitoisuuden toimenpideraja-arvo  $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$  alittui selvästi jokaisen tutkimuskohteen keräinnäytteen kohdalla. Myöskään yksittäisten yhdisteiden kohdalla ei mitattu lainsäädännön raja-arvot ylittäviä pitoisuuksia.

Tutkimuskohteiden A ja B tapauksissa tuloksia voidaan arvioida myös TTL:n julkaisemiin viitearvoihin vertaamalla. TTL:n viitearvona TVOC-pitoisuutta  $> 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  voidaan pitää poikkeuksellisenä. Tutkimuskohteiden TVOC-pitoisuudet alittivat selvästi viitearvot. Muutamien yksittäisten yhdisteiden pitoisuudet ylittivät viitearvopitoisuudet.

Jatkuvatoimisella mittalaitteella mitattuja kertamittaustuloksia ei voida verrata lainsäädännön raja-arvoihin monestakaan syystä. Lyhytkestoiset kertamittaukset ovat suuntaa-antavia ja mittauslukemat eivät tasoittuneet mittausten aikana selvästi millekään tasolle, vaan laitteen ilmoittama pitoisuus vaihteli hieman koko mittauksen ajan. Lisäksi PID-mittalaitteen mittaussuunnitelmaa ei voida soveltaa lainsäädännön raja-arvoihin, sillä menetelmä poikkeaa keräinmenetelmästä.

Valmistaja on ilmoittanut PID-anturin mittausalueeksi 5 ... 20 000 ppb. Jokaisella yhdisteellä on oma molekyylipainonsa, jonka avulla ppb/ppm pitoisuus voidaan muuttaa  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (Kansas State University 2006). Koska ei ole täysin tiedossa, kuinka laite muuntaa yksiköt, ei voida varmuudella sanoa, että pitoisuus on täsmälleen laitteen ilmoittama  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Lisäksi ei ole tiedossa täsmälleen, mitkä yhdisteet laite tunnistaa. Mittalaittevalmistajan mukaan laitteen PID-anturin UV-lampun teho on 10,6 eV. Laite ei siis tunnista yhdisteitä, joiden ionisoitumisenergia on suurempi kuin laitteen UV-lampun teho. Laittevalmistajan mukaan tällaisia yhdisteitä ovat esimerkiksi metaani, etaani ja formaldehydi.

## 5.2 TVOC-keräinnäytteiden ja kertamittaustulosten vertailu

Kuten edellä esitetystä kuvassa 3 on nähtävissä, mittalaitteella ja keräinmenetelmällä mitatuissa TVOC-pitoisuuksissa on havaittavissa eroja. Mittalaitteen ilmoittamat kertalukemat keräinnäytteenottohetkellä poikkesivat kohteissa B ja C keräinnäytteistä analysoiduista TVOC-pitoisuuksista ja kohteessa A molemmilla menetelmillä mitatut pitoisuudet olivat alhaisia. Eri kohteissa mitatut mittalaitteen lukemat eivät vaihdelleet samansuuruisina keräinnäytteen pitoisuuksiin verrattuna.

- kohteessa A kummallakin menetelmällä mitattu TVOC-pitoisuus oli pieni
- kohteessa B mittalaitteella mitatut pitoisuudet olivat noin  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  suurempia kuin keräinmenetelmällä mitatut TVOC-pitoisuudet
- kohteessa C mittalaitteella mitattu TVOC-pitoisuus oli pienempi kuin keräinmenetelmällä mitattu pitoisuus.

Tutkimuskohteessa A kummallakin mittausmenetelmällä mitatut TVOC-pitoisuudet ovat käytännössä samat eli  $0 \dots 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Kohteessa A mittalaitteen tuloksen perusteella siis mittalaitteen ilmoittama lukema ennakoii keräinnäytteen pientä TVOC-pitoisuutta.

Tutkimuskohteessa B mittalaitteella mitatut pitoisuudet olivat noin  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  suurempia kuin keräinmenetelmällä mitatut TVOC-pitoisuudet. Menetelmillä mitattu ero vaihteli välillä  $176 \dots 224 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Mittaustulosten eron keskiarvo on 200

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Tutkimuskohteen B tulosten perusteella siis keräinnäytteen tuloksien voitaisiin olettaa olevan noin  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pienempiä kuin mittalaitteen ilmoittamat lukemat.

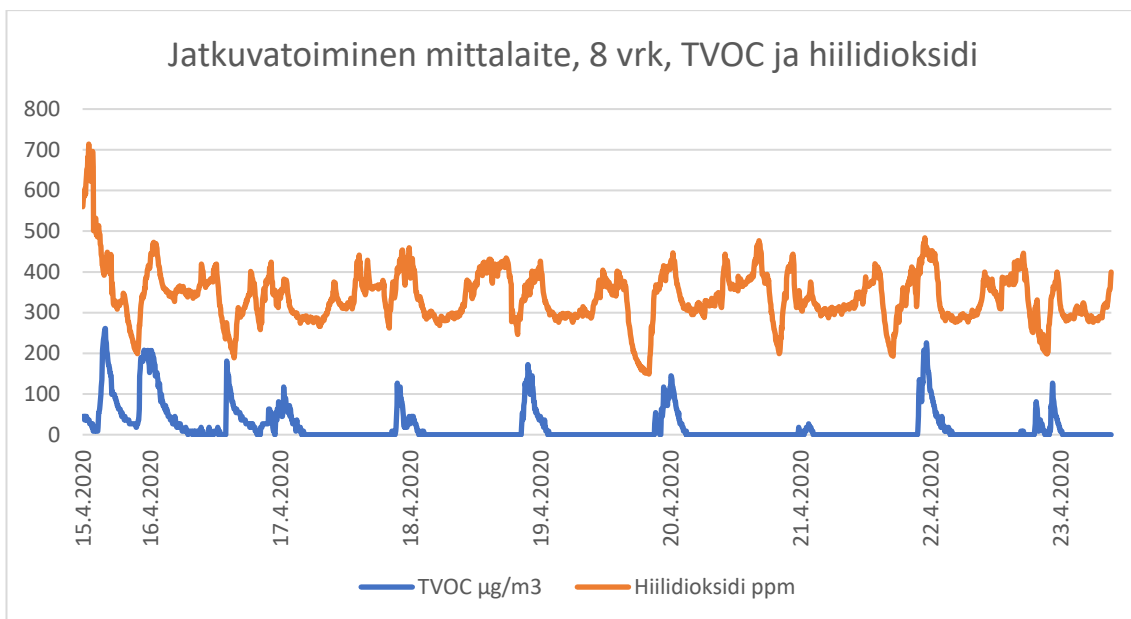
Tutkimuskohteessa C mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus oli  $14 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pienempi kuin keräinnäytteen pitoisuus. Kohteen C mittaustulosten perusteella voitaisiin päätellä, että mittalaite näyttää  $10 \dots 20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  pienempää TVOC-pitoisuutta kuin keräinnäyte.

Kuussakin tutkimuskohteessa mittausmenetelmillä saatujen tulosten väliset erot poikkesivat toisistaan. Kohteen A tuloksen perusteella voidaan olettaa, että jos sisäilman VOC-pitoisuus on lähellä pienintä määriteltävissä olevaa pitoisuutta, niin myös mittalaite näyte 0-pitoisuutta. Kohteen B tulosten perusteella päätelmää voitaisiin jatkaa siten, että kun sisäilmassa on määritettävissä olevia pitoisuuksia VOC-yhdisteitä, mittalaitteen ilmoittama lukema on noin  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$  suurempi kuin sisäilman TVOC-pitoisuus on keräinmenetelmällä arvioituna. Kohteen C mittaustulosten ero ei ole samanlainen kuin edellä esitettyjen tulosten perusteella voisi olettaa.

Koska tutkimuskohteiden ja näytteiden määrä on hyvin pieni, ei tämän otannan perusteella voida tehdä kovin luotettavia päätelmiä menetelmien tulosten yhteneväisyydestä. Jos tutkimuskohteen C tulosten erot suuremmassa otannassa osoittautuisivat poikkeaviksi, voitaisiin kohteen C mittaustulosten olevan poikkeuksellisia. Tuloksia vertailtaessa tulee myös huomioida, että lyhytkestoiset keräimittaukset ovat suuntaa-antavia.

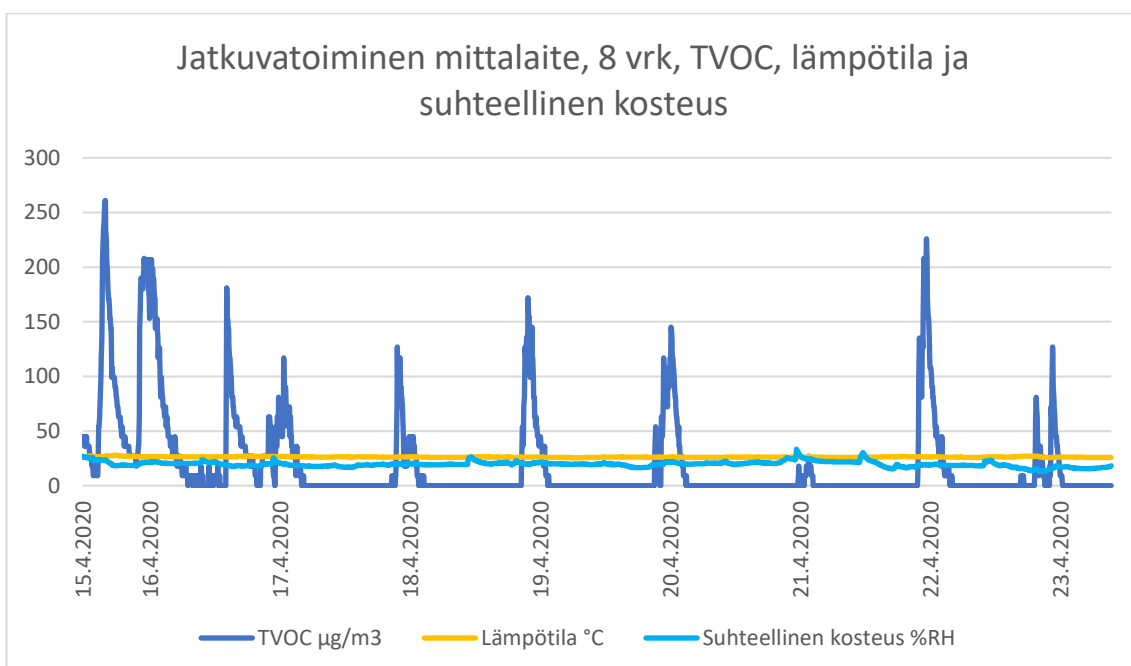
### **5.3 TVOC-pitoisuuden yhteys muihin mittausparametreihin**

PID-mittalaitteen tallentamaa dataa tarkastelemalla voidaan havaita yhteys sisäilman TVOC- ja hiilidioksidipitoisuuden välillä. TVOC-pitoisuuteen näyttäisi vaikuttavan pitoisuutta lisäävästi käyttäjien läsnäolo ja toiminta. Hiilidioksidi on sisäilmassa peräisin pääosin ihmisistä, joten hiilidioksidipitoisuuden nousu tiettyä aikana viittaa siihen, että tilassa oleskelee ihmisiä. Kuvassa 8 on mittalaitteen mitaamat TVOC- ja hiilidioksidipitoisuudet 8 vuorokauden ajalta. Kuvaajasta on havaittavissa, että TVOC-pitoisuuden suurimpien pitoisuuksien aikaan myös hiilidioksidipitoisuudessa näkyy pitoisuuden kasvua.



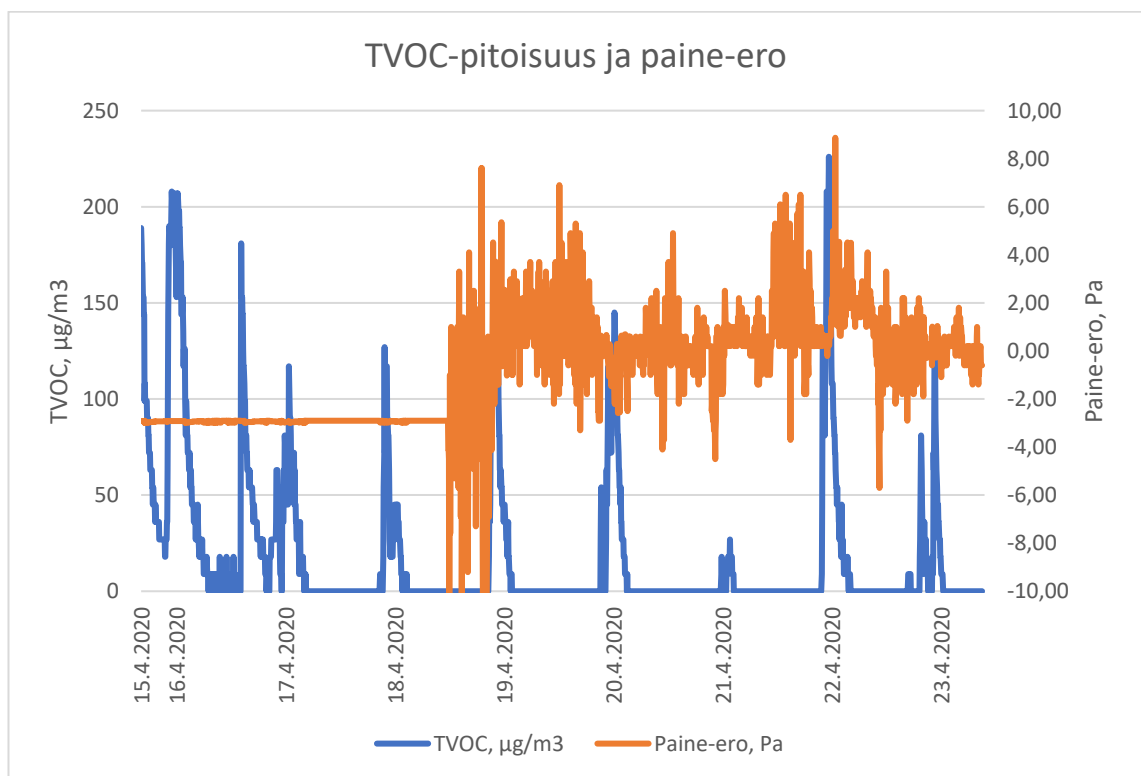
Kuva 8. Mittalaitteen mittaamat TVOC- ja hiilidioksidipitoisuudet yhden vuorokauden ajalta

Tutkimuskohteen C sisäilman TVOC-pitoisuus, lämpötila ja suhteellinen kosteus on esitetty samassa kuvassa 9. Kohteessa TVOC-pitoisuuden vaihtelulla ei ole havaittavaa yhteyttä sisäilman lämpötilaan tai suhteelliseen kosteuteen. Tämä vahvistaa käsitystä, että kohteen C sisäilman TVOC-pitoisuus ei ole peräisin rakenteiden materiaalipäästöistä.



Kuva 9. Jatkuvatoimisen mittalaitteen mittaamien TVOC-pitoisuuden ja lämpötilan sekä suhteellisen kosteuden välillä ei ole havaittavissa yhteyttä

TVOC- ja ammoniakkipitoisuuden välillä ei havaittu yhtenevää yhteyttä. Pitoisuus huiput esiintyivät mittausdatassa eri aikoihin. TVOC-pitoisuudella ja paine-erolla ei myöskään havaittu olevan tutkimuskohteessa yhteyttä (Kuva 10). Paine-ero vaihteli runsaasti mittausajanjakson aikana, joten jos TVOC-yhdisteet olisivat kulkeutuneet tilaan paine-eron vaikutuksesta muista tiloista tai rakenteiden sisältä, TVOC-pitoisuuden olisi pitänyt vaihdella paine-eron vaihtelun mukaisesti.



Kuva 10, Paine-eron vaihtelulla ja TVOC-pitoisuudella ei ole havaittavissa yhtenevää yhteyttä

#### 5.4 Jatkuvatoimisen mittalaitteen- ja dataloggereiden tulosten vertailu

Lämpötilan ja suhteellisen kosteuden lukemat vaihtelivat kummallakin menetelmällä yhteneväisesti. Mittalaitteella mitatun lämpötilan keskiarvo oli lähes  $3\text{ }^\circ\text{C}$  korkeampi kuin loggerilla mitattu ja laitteen mittaamine suhteellisen kosteuden lukemien keskiarvo oli noin  $5\text{ \%RH}$  alhaisempi kuin loggerilla mitattu. Erot voivat johtua kummankin laitteen mittatarkkuudesta. Mittalaittevalmista on ilmoittanut laitteen lämpötilan tarkkuudeksi  $\pm 0,3\text{ }^\circ\text{C}$  ja suhteellisen kosteuden tarkkuudeksi

$\pm 2$  %RH alle RH 80 % olosuhteissa. Mittalaitteiden kalibroinnin onnistuminen vaikuttaa myös mittaustuloksiin.

## 5.5 Muut tulokset

### Paine-ero

Paine-eroa mittaamalla saatiin selville, että tutkittu tila oli mittaussajanjaksolla keskimäärin -0,1 Pa alipaineinen ulkoilmaan nähden. Tiiviin asuinkerrostalon paineeron tavoitetaso normaalissa käyttötilanteessa on 0 ... -10 Pa , joten tutkimuskohteen C paine-ero ulkovaipan yli on tavoitetasolla (Björkroth & Eskola 2019, liite 1).

Paine-erokuvaajassa on havaittavissa vaihtelua. Korkean rakennuksen paineeroon vaikuttavat ilmanvaihdon lisäksi sisä- ja ulkotilojen välinen lämpötilaero ja tuuli. Lyhytkestoisia paine-ero muutoksia voivat aiheuttaa lisäksi rakennuksen käyttö, kuten hissien liikkeet, ulko-ovien ja ikkunoiden avaamiset. (Björkroth & Eskola 2019, 11.)

### Ammoniakki

Ammoniakille ei ole asetettu lainsäädännössä raja-arvoa. TTL:n viitearvo toimistotyyppisille tiloille on  $> 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (TTL 2019). Laitteen ilmoittama ammoniakkipitoisuuden keskiarvo oli  $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ja mediaani  $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , joten ne eivät ylittäneet TTL:n viitearvoa. Tutkimuskohde C on asunto, joten viitearvoa ei voida käyttää ammoniakkipitoisuuden vertailuun. Koska mittalaitteen mittausherkyys ammoniakille ei lisäksi ole tiedossa, laitteen ilmoittaman ammoniakkipitoisuuden perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä kohteen sisäilman todellisesta ammoniakkipitoisuudesta.

Ammoniakkipitoisuuden kuvaajasta voidaan sen sijaan nähdä, että pitoisuus vaihteli mittaussajanjakson aikana. Suurimmat pitoisuuspiikit olivat lyhytaikaisia ja melko harvassa. Tämä viittaa siihen, että mitatut ammoniakkipitoisuudet eivät liity rakenteista peräisiin oleviin päästöihin, vaan ovat todennäköisesti käyttäjien toimintaan liittyviä pitoisuuksia.

## Hiilidioksidi

Mittalaitteen ilmoittama sisäilman hiilidioksidipitoisuus oli melko alhainen. Sisäilman hiilidioksidipitoisuuden toimenpideraja ylittyy, jos sisäilman pitoisuus on 1150 ppm suurempi kuin ulkoilman hiilidioksidipitoisuus (545/2015). Ulkoilman hiilidioksidipitoisuuden oletusarvona voidaan käyttää 400 ppm, joten mitatut hiilidioksidipitoisuudet jäivät selvästi toimenpiderajan alapuolelle (YM 2018, 10). Mittalaitteen valmistajan ilmoittama hiilidioksidin mitta-alue on 0 ... 50 000 ppm ja mittaustarkkuus  $\pm 150$  ppm ( $\pm 3$  %).

### 5.6 Virhetarkastelu

Tutkimuskohteissa B ja C oli mittausten aikana läsnä käyttäjiä. Jatkuvatoimisen mittalaitteen tallentaman mittaustiedon mukaan käyttäjien läsnäolo vaikuttaa tilan TVOC-pitoisuuteen. Koska mittauksella ei saada selville yksittäisten yhdisteiden pitoisuuksia, ei voida varmuudella päätellä sitä, kuinka suuri vaikutus käyttäjien läsnäololla on VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuuteen.

TTL:lta keräinnäytteenottoihin vuokrattujen pumppujen kalibroinnit olivat voimassa, eikä näytteenottojen aikana havaittu pumppuissa käyntihäiriöitä. PID-mittalaitteelle oli myös suoritettu laitetoimittajan toimesta kalibrointi viimeisen kuluneen vuoden aikana. Mittalaitteen kenttäkalibrointi suoritettiin kalibrointikaasuilla aina ennen uutta tutkimuskohdetta. Kalibrointiohjeiden mukaan ala- ja ylärajat tasoittuvat tietyn ajan kuluessa. Ennen mittauksia suoritettuna alarajan kalibroinnissa lukema tasoittui ohjeen esittämässä ajassa, mutta ylärajan tasoittuminen kesti 2 -3 kertaa kauemmin kuin sen ohjeen mukaan olisi pitänyt kestää. Joinain kertoina kalibrointi piti keskeyttää ennen ylärajan tasoittumista kaasun säästämissä. Tämä aiheutti epävarmuutta kalibroinnin onnistumisesta ja voi aiheuttaa mittavirhettä tuloksiin. Tämä voi osaltaan selittää eri tutkimuskohteissa havaittavat PID-mittalaitteella mitattujen tulosten väliset eroavaisuudet.

Tuloksia tarkastella tulee huomioida, että PID-mittalaitteen ilmoittavat tulokset ja pitoisuudet ovat suuntaa-antavia, eikä niitä voida verrata lainsäädännön asettamiin raja-arvoihin. Laitteen ilmoittamien pitoisuuksien perusteella ei voida tehdä johtopäätöksiä huoneiston sisäilman tai olosuhteiden laadusta, eikä niiden perusteella voida antaa toimenpidesuosituksia.

TenaxTA Garbograph -analyysimenetelmään liittyvä mittausepävarmuus on TTL:n mukaan ilman näytteenottoa 15-40 % (ka. 30 %) yhdisteestä riippuen (luottamusväli 95 %). Lisäksi tuloksiin aiheuttaa mittausepävarmuutta yhdistepitoisuuksien määrittäminen tolueenivasteella tai TVOC-alueen ulkopuoliset yhdisteet. (TTL 2020.)

## 6 Yhteenveto ja pohdintaa

Tässä opinnäytetyössä selvitettiin jatkuvatoimisen PID-mittalaitteen käytettävyyttä sisäilman TVOC-pitoisuuden mittaamisessa. Tavoitteena oli saada selville, kuinka paljon ja miten jatkuvatoimisen mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus eroaa keräinmenetelmällä saadusta tuloksesta, mitkä ovat mahdollisten tulosten eroavaisuuksien syyt, miten jatkuvatoimista mittalaitetta voidaan hyödyntää sisäilman laadun arvioinnissa ja voidaanko mittalaitetta hyödyntää VOC-mittauspisteiden haarukoinnissa.

Kertamittaustuloksia ja keräinnäytteiden pitoisuuksia vertaamalla havaittiin, että PID-mittalaitteen ilmoittaman pitoisuuden perusteella ei voida päätellä etukäteen keräinnäytteen TVOC-pitoisuutta. Tutkimuksella saatiin selville, että laitetta ei voida käyttää suoraan sisäilman TVOC-pitoisuuden arviointiin. Mittausmenetelmä ei ole standardisoitu ja menetelmä eroaa huomattavasti toimintaperiaatteeltaan sekä mittavien yhdisteiden (mittausalue ja herkkyys) osalta keräinmenetelmästä. PID-mittalaitteella mitattuja TVOC-pitoisuuksia ei voida verrata lainsäädännön raja-arvoihin näiden erojen vuoksi. Lisäksi ennen mittausten aloittamista suoritettava kenttäkalibrointi aiheuttaa TVOC-pitoisuuden mittaustuloksiin huomattavaa epävarmuutta.

Keräinnäytteen tulos ilmoittaa TVOC-pitoisuuden keskiarvona näytteenottoajalta, kun taas mittalaitteen ilmoittama TVOC-pitoisuus voi vaihdella huomattavastikin keräinnäytteenoton keston aikana. Mittalaitteen ilmoittamista pitoisuuksista voidaan laskea keskiarvo, mutta laitteen tulee saada tasaantua riittävän pitkään ennen mittaussajanjakson alkua.

PID-mittalaitteen tallentamaa dataa keskenään vertaamalla havaittiin, että tutkimuskohteessa sisäilman TVOC- ja hiilidioksidipitoisuuden vaihtelulla oli yhteys. Tämä viittaa tutkimuskohteessa siihen, että suurentuneet sisäilman TVOC-pitoisuudet olivat yhteydessä tilojen käyttäjien läsnäoloon. Muiden mittausparametrien ja TVOC-pitoisuuden vaihtelun välillä ei havaittu yhteyttä. Myöskään paineeron vaihteluilla ei ollut havaittavaa yhteyttä TVOC-pitoisuuden muutoksiin.

Se, voidaanko mittalaitetta hyödyntää keräinnäytteenotossa tutkittavien tilojen haarukointiin, jäi vielä mittausten suppean otoksen vuoksi avoimeksi kysymykseksi. Opinnäytetyössä tarkasteltu otos ei ole riittävän suuri, jotta tutkimustulosten perusteella voitaisiin tehdä luotettavia päätelmiä mittalaitteen ilmoittamista TVOC-pitoisuuksista. Luotettavan vertailun perustaksi tarvittaisiin jatkotutkimus, jossa jatkettaisiin rinnan keräinnäytteiden ottoja ja kertamittausta.

Tutkimustulosten perusteella laitetta voidaan hyödyntää sisäilman TVOC-mittauksessa silloin, kun halutaan selvittää TVOC-pitoisuuden vaihtelua pidemmällä aikavälillä, tilojen käyttäjien vaikutusta TVOC-pitoisuuden vaihteluun sekä mittausten parametrien yhteyttä toisiinsa. Kuten tämän opinnäytetyön kirjallisuuskatsausosiossa todettiin, sisäilman VOC-pitoisuutta lisääviin materiaalipäästöihin voivat vaikuttaa mm. sisäilman lämpötila ja kosteus. Mittalaitteen avulla voisi olla mahdollista myös ajoittaa keräinnäytteenotto ajankohtaan, jolloin VOC-pitoisuuden voidaan olettaa olevan korkeimmillaan tai vaikkapa seurata sisäilmakorjauskohteen sisäilman TVOC-pitoisuuden muutosta.

Mittalaitteen hankinta- ja käyttökustannukset ovat korkeat ja tuloksiin liittyvien epävarmuustekijöiden vuoksi se ei ole hinta-laatusuhteeltaan ensisijaisesti suositeltavin vaihtoehto sisäilman VOC-pitoisuuksien selvittämiseen. Jatkuvatoimisen mittalaitteen käyttäminen pelkästään olosuhdemittauksiin (lämpötila, suhteellinen kosteus ja hiilidioksidipitoisuus) ei ole kustannustehokasta. Kyseisiä parametrejä voidaan mitata luotettavasti huomattavasti hankinta- ja käyttökustannuksiltaan halvemmilla sekä käytettävyydeltään helpommilla laitteilla. Mittalaitteen huonona puolena voidaan pitää myös sitä, että sen avulla ei saada selville, mistä eri yhdisteistä VOC-yhdisteiden kokonaispitoisuus koostuu. Sekä VOC-päästölähteen että terveysvaikutusten arvioinnin kannalta on oleellista saada selville, mistä yksittäisistä yhdisteistä kokonaispitoisuus koostuu. Eri tyyppisten kosteusvaurioituneiden materiaalien päästöjen VOC-yhdisteet eroavat toisistaan ja osa VOC-yhdisteistä on terveydelle haitallisempia kuin toiset yhdisteet.

Jatkuvatoimisia TVOC-mittalaitteita on käsitelty myös muutamissa muissa viime aikoina julkaistuissa opinnäyte- ja diplomitöissä. Muissa jatkuvatoimisia mittalaitteita käsittelevissä tutkimuksissa on päädytty saman tyyppisiin johtopäätöksiin, kuin tämän tutkimuksen yhteydessä päädyttiin. Emil Alhonoron diplomityössä

”Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden monitorointi sisäilmassa jatkuvatoimisilla mittalaitteilla” on tutkittu eri anturitekniikkaan perustuvia TVOC-mittausmenetelmiä sekä verrattu niitä myös keräinmenetelmään. Diplomityössä PID-tekniikkaan perustuvien mittalaitteiden kohdalla mittaustuloksiin aiheuttivat epävarmuutta kenttäkalibroinnin onnistuminen, epävarmuus mitattavista yhdisteistä sekä mittausherkkyydessä. (Alhonnoro 2019, 64-65.) Jatkuvatoimisen PID-mittalaitteen toimintaa ja käytettävyyttä on arvioitu Samuli Spakströmin opinnäytetyössä ”Sisäilmanlaadun mittauslaitteen arviointi”. Työssä käsitelty mittalaite arvioitiin käytettävyydeltään ja toiminnaltaan hankalaksi. Työssä ei otettu kantaa mittalaitteen ilmoittamien lukemien tarkkuuteen (Spakström 2020, 20-21.)

Jatkotutkimusehdotuksena voidaan suositella mittalaitteen käyttämisen jatkamista rinnan keräinnäytteenottojen yhteydessä sekä pitkäaikaismittauksissa. Tällöin saataisiin kerättyä lisää aineistoa menetelmien vertailuun ja tulosten perusteella voitaisiin tehdä paremmin paikkansa pitäviä tilastollisia päätelmiä. Mittauksia jatkamalla olisi myös mahdollista kerätä lisää kokemuksia mittalaitteen sovellettavuudesta sisäilmamittauksiin.

Toinen mielenkiintoinen jatkotutkimusaihe on jatkuvatoimisen mittalaitteen ammoniakkimittausten tulosten vertailu sisäilmasta otettujen ammoniakkikeräinnäytteen tuloksiin. Ammoniakkia pidetään yhtenä kosteusvaurioiden indikaattoriyhdisteenä ja sen päästölähteitä voivat olla myös mm. tupakointi, lemmikkieläimet ja puhdistusaineet. Ammoniakkia tutkitaan sisäilmasta keräämällä näyte pumpulla joko laimeaan rikkihappoliuokseen tai adsorbentti-keräinputkeen. (Pitkätanta 2016, 74.). Näytteenoton tuloksia joudutaan odottamaan laboratorioanalyysin valmistumiseen. Jos jatkuvatoiminen mittalaite näyttäisi luotettavasti sisäilman ammoniakkipitoisuudet, olisi mahdollista ryhtyä tarvittaviin toimenpiteisiin päästölähteen poistamiseksi välittömästi mittauksen jälkeen ja käyttää mittalaitetta myös ammoniakkipitoisuuden seurantaan toimenpiteiden jälkeen.

## Lähteet

Alhonnoro 2019. Haihtuvien orgaanisten yhdisteiden monitorointi sisäilmassa jatkuvatoimisilla mittalaitteilla. Aalto-yliopisto. Diplomityö. [https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/39897/master\\_Alhonnoro\\_Emil\\_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://aalto-doc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/39897/master_Alhonnoro_Emil_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y) . Luettu 7.6.2020.

Asumisterveysasetus 545/2015. <https://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2015/20150545?search%5Btype%5D=pika&search%5Bpika%5D=545%2F2015> . Luettu 13.4.2020.

Backlund, Peter, Paakkola, Katja, Rund, Anne-Rita 2005. Työterveyslääkäri. [https://www.ebm-guidelines.com/dtk/shk/avaa?p\\_artikkeli=ttl00208](https://www.ebm-guidelines.com/dtk/shk/avaa?p_artikkeli=ttl00208) . Luettu 13.4.2020.

Björkroth, Marko, Eskola Lari 2019. A-Insinöörit Oy. Rakennusten paine-erojen mittaushjeprojektin loppuraportti. [https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/rakennusten\\_paine-erojen\\_mittaushje\\_2019-10-11.pdf](https://www.talotekniikkainfo.fi/sites/default/files/rakennusten_paine-erojen_mittaushje_2019-10-11.pdf) . Luettu 15.6.2020.

Hometalkoot. Opetusmateriaalia sisäilma-asioita opiskelevien ammattilaisten käyttöön. Altistumisen arviointi. <https://www.hometalkoot.fi/guides> . Luettu 13.4.2020.

Kansas State university 2006. Environmental Science and Technology Briefs for Citizens. Understanding Units of Measurement. <https://cfpub.epa.gov/ncer/abstracts/index.cfm/fuseaction/display.files/fileid/14285> . Luettu 15.6.2020.

Koppa 2015. Jyväskylän yliopisto. Määrällinen tutkimus. <https://koppa.jyu.fi/avoimet/hum/menetelmapolkuja/menetelmapolku/tutkimusstrategiat/maarallinen-tutkimus> . Luettu 3.4.2020.

Pitkäranta, M. 2016. Ympäristöministeriö. Rakennuksen kosteus- ja sisäilmatekninen kuntotutkimus. [http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO\\_2016\\_Kuntotutkimusopas.pdf](http://julkaisut.valtioneuvosto.fi/bitstream/handle/10024/75517/YO_2016_Kuntotutkimusopas.pdf). Luettu 4.4.2020.

Salonen, Heidi, Lappalainen, Sanna, Lahtinen, Marjaana, Holopainen, Rauno, Palomäki, Eero, Koskela, Hannu, Backlund, Peter, Niemelä, Raimo, Pasanen, Anna-Liisa, Reijula, Kari 2011. Työterveyslaitos. Toimiston sisäilmaston tutkiminen.

Sisäilmayhdistys 2008a. Kemialliset epäpuhtaudet. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Sisailmasto/Kemialliset-epapuhtaudet> . Luettu 12.4.2020.

Sisäilmayhdistys 2008b. Eri tekijöiden vaikutus oireisiin. <https://www.sisailmayhdistys.fi/Terveelliset-tilat/Terveysvaikutukset/Eri-tekijoiden-vaikutus-oireisiin> . Luettu 13.4.2020.

Spakström Samuli 2020. Sisäilmalaadun mittauslaitteen arviointi. Turku AMK. Opinnäytetyö. [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/333667/Spakstr%C3%B6m\\_Samuli.pdf?sequence=2&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/333667/Spakstr%C3%B6m_Samuli.pdf?sequence=2&isAllowed=y) . Luettu 7.6.2020.

STM 2018. Sosiaali- ja terveysministeriön julkaisuja. HTP-arvot 2018. <https://stm.fi/julkaisu?pubid=URN:ISBN:978-952-00-3937-0> . Luettu 13.4.2020.

Terveysturvallisuusasetus 1280/1994. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19941280> . Luettu 13.4.2020.

Terveysturvallisuuslaki 763/1994. <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1994/19940763> . Luettu 13.4.2020.

TTL. Työterveyslaitos. Näytteenotto-ohje materiaalien bulk- eli kokonaisemissiota varten. <https://www.ttl.fi/service-document/naytteenotto-ohje-materiaalien-bulk-eli-kokonaisemissiotutkimusta-varten/> . Luettu 13.4.2020.

TTL 2012. Työterveyslaitos. VOC -näytteenotto ATD-diffuusiokeräimellä. [https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/voc\\_passiivinen.pdf](https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/12/voc_passiivinen.pdf) . Luettu 4.4.2020.

TTL 2015. Työterveyslaitos. Haihtuvat orgaaniset yhdisteet (VOC) ilmasta ja materiaaleista. <https://www.ttl.fi/service-document/haihtuvat-orgaaniset-yhdisteet-voc-ilmasta-ja-materiaaleista/> . Luettu 6.5.2020.

TTL 2016. Työterveyslaitos. Aktiivinen VOC-näytteenotto ATD-keräimeen. <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/11/Haihtuvat-orgaaniset-yhdisteet-aktiivinen-n%C3%A4ytteenotto-ohje.pdf> . Luettu 6.6.2020.

TTL 2017. Työterveyslaitos. Ohje työpaikkojen sisäilmasto-ongelmien selvittämiseen. <https://www.julkari.fi/bitstream/handle/10024/131872/Ohje%20ty%C3%B6paikoille%20sis%C3%A4ilmasto-ongelmien%20selvitt%C3%A4miseen.pdf?sequence=1&isAllowed=y> . Luettu 13.4.2020.

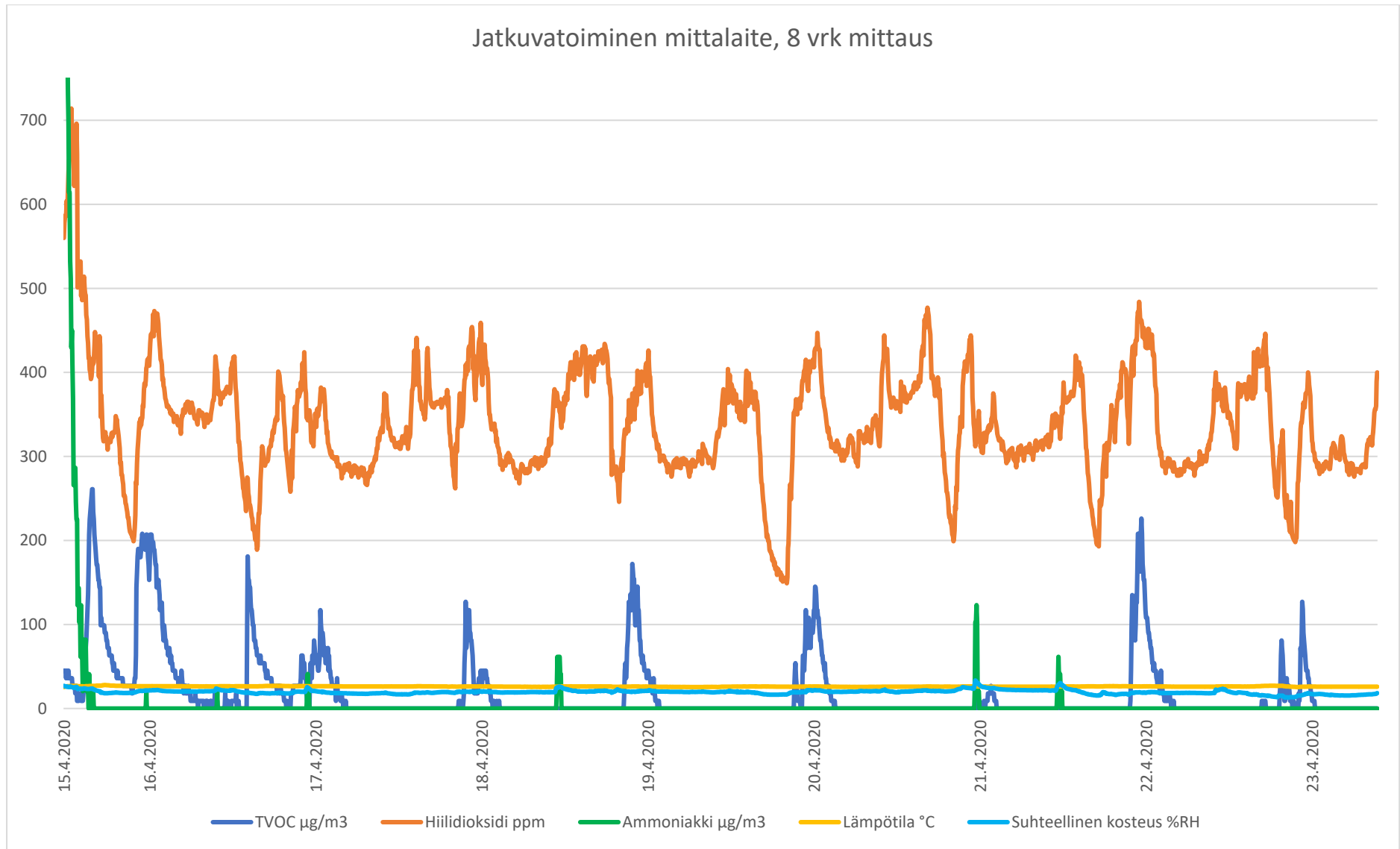
TTL 2019. Työterveyslaitos. Kooste epäpuhtaustasoista, joiden ylittyminen voi viitata sisäilmasto-ongelmiin toimistotyyppisillä työpaikoilla. <https://www.ttl.fi/wp-content/uploads/2016/09/sisaympariston-viitearvoja.pdf> . Luettu 10.4.2020.

TTL 2020. Työterveyslaitos. VOC-analyysi ilmanäytteestä.

Valvira 2016. Sosiaali- ja terveysalan lupa- ja valvontavirasto. Asumisterveysasetuksen soveltamisohje Osa III, § 14-19. <https://www.valvira.fi/documents/14444/261239/Asumisterveysasetuksen+soveltamisohje+osa+III.pdf/997eeca1-53f7-4d4e-bb7a-df6ef7ee0e9c> . Luettu 13.4.2020.

YM 2018. Ympäristöministeriö. Laskentaopas. Tilan ulkoilmavirran mitoitus hiilidioksidikuormituksen perusteella. <https://www.ym.fi/download/name/%7BE961AA41-6DF6-4708-B8D2-0553271D8354%7D/144135> . Luettu 15.6.2020.

Liite 1.





Liite 3.

Dataloggeri 7 vrk, paine-ero ulkovaipan yli

