

TARTU ÜLIKOOL
Arvutiteaduse instituut
Informaatika õppekava

Karl Hendrik Bachmann

**Õhukvaliteedi sensorite praktiline võrdlus
CO₂ taseme hindamiseks siseruumides**

Bakalaureusetöö (9 EAP)

Juhendajad: Alo Peets,
Jakob Mass

Tartu 2022

Õhukvaliteedi sensorite praktiline võrdlus CO2 taseme hindamiseks siseruumides

Lühikokkuvõte:

COVID-19 kriisi tõttu on viimaste aastatega kasvanud vajadus CO2 sensorite ning teiste siseruumide õhukvaliteeti mõõtvate süsteemide järele. Bakalaureusetöö eesmärk on võrrelda taskukohaseid laialt levinud hobisensoreid CCS811, BME680 ja SCD41 ning selgitada välja neist täpsem, andes seejuures hinnangu töös käsitletud lenduvate orgaaniliste ühendite sensorite täpsusele nn eCO2 mõõtmisel. Selleks loodi sensorist ja ESP32-st WiFi-ga ühendatav mõõteseade, mis saatis andmed IoT platvormi Cumulocity. Kokku koguti kümne seadmega nelja nädala jagu mõõtmistulemusi neljas erinevas paigas: magamistoas, kontoris, klassiruumis ja seminariruumis. Töö tulemusena leiti, et SCD41 on võrreldud sensoritest parima mõõtmistäpsusega konkurentsivõimelise hinna juures.

Võtmesõnad: Siseruumide õhukvaliteet, CCS811, BME680, SCD41, ProDual HDH, LOÜ, CO2, eCO2, ESP32.

CERCS: P175 Informaatika, süsteemiteooria

Practical comparison of air quality sensors for indoor CO2 evaluation

Abstract:

Due to the COVID-19 crisis, the need for CO2 sensors and other indoor air quality systems has increased in recent years. The aim of the bachelor's thesis is to find the most accurate sensor among budget friendly, widespread hobby sensors CCS811, BME680 and SCD41, thereat evaluating the accuracy of volatile organic compound sensors in the measurement of so-called eCO2. To this end, a Wi-Fi connected measuring device made of a sensor and an ESP32 microcontroller was created, which sent data to the Cumulocity IoT platform. A total of ten devices were used to gather four weeks' worth of data from four different locations – bedroom, office, classroom, and seminar room. Based on the work, SCD41 is the best performing sensor in terms of measurement accuracy at a competitive price.

Keywords: Indoor Air Quality, IAQ, CCS811, BME680, SCD41, ProDual HDH, VOC, CO2, eCO2, ESP32.

CERCS: P175 Informatics, systems theory

Sisukord

Sissejuhatus	5
1. Õhukvaliteedi taust.....	7
1.1 Õhukvaliteedi näitajad.....	7
1.2 Nõuded ruumide õhukvaliteedile	8
1.3 Läbiviidud uuringute tulemused.....	9
2. Töös kasutatud sensorid ja mõõtmispaigad.....	12
2.1 Õhukvaliteedi sensorite valim	12
CCS811	13
BME680	13
SEK-SCD41	14
Produal HDH.....	14
2.2 Mõõtmispaikade valim	15
3. Mõõtmisüsteemi väljatöötamine.....	16
3.1 Kasutatud värvõrgu tehnoloogiad.....	16
Cumulocity.....	16
ESP32.....	16
3.2 Süsteemi väljatöötamine.....	17
3.3 Sensorite ettevalmistamine mõõtmiseks.....	22
4. Mõõtmine ja tulemuste analüüs	25
4.1 Andmete kogumine	25
4.2 Sensorite võrdlus ning andmekvaliteedi analüüs	25
CO2	25
BME680 hüpe ja LOÜ	29
Temperatuur ja niiskus.....	31
4.3 Andmete analüüsimine skaleerimise teel	32

4.4	Hinnang ruumide õhukvaliteedile	35
4.5	Järeldused	36
	Kokkuvõte	38
	Kasutatud kirjanduse loetelu	39
	Lisad	42
I.	Litsents	42
II.	Delta 3033 CO2 mõõtmistulemused	43
III.	Delta 3034 CO2 mõõtmistulemused	44
IV.	Delta 1019 CO2 mõõtmistulemused	45
V.	Delta 3033 temperatuuri tulemused.....	46
VI.	Delta 3033 temperatuuri ja CO2 keskmistatud tulemused	47
VII.	Delta 3033 relatiivse õhuniiskuse tulemused	48
VIII.	Delta 3033 relatiivse õhuniiskuse ja CO2 keskmistatud tulemused	49
IX.	Õpperuumide CO2 tulemuste tabel	50

Sissejuhatus

COVID-19 kriis on juhtinud inimeste tähelepanu õhukvaliteedi olulisusele ning viiruste õhu kaudu levimise vähendamisele. Haridus- ja teadusministeerium korraldas seminare¹, et juhtida tähelepanu õhukvaliteedi ning COVID-iga seotud probleemidele. Neist probleemidest tulenevalt on riik jaganud kohalikele omavalitsustele toetusi, mille eesmärgiks on soetada üldhariduskoolidesse CO₂ andurid ning vajadusel paremad ventilatsioonisüsteemid või õhupuhastid (Oja & Klementi, 2021). COVID-19 ei ole ainsaks põhjuseks, miks õhukvaliteet oluline on. 2021. aastal avaldatud uurimuses (Saini jt, 2021) tuuakse välja, et siseruumides võib õhukvaliteet olla 2 kuni 5, üksikutel juhtudel ka kuni 100 korda halvem välisest õhust. Seetõttu esineb inimestel, kes veedavad enam kui 90% oma ajast toas, tihedamini kroonilisi respiratoorseid haiguseid ja ka südameprobleeme (Saini jt, 2021:1 – 2). Samuti on leitud seos õpperuumide õhukvaliteedi ning õpitulemuste vahel (Kurnitski, 2015:37). Sellega seoses on kasvanud nõudlus õhukvaliteedi (eelkõige CO₂) sensorite järele ning seega on muutunud ka olulisemaks mõista nende erinevusi.

Sensoreid müüakse nii valmislahendustena kui ka eraldiseisvalt. Valmislahendused on tavaliselt varustatud ekraani või võrguliidese põhjal töötava keskkonnaga, kust saab andmeid lugeda. Eraldiseisvatele sensoritele tuleb andmete lugemine ning kuvamine ise juurde implementeerida. Seetõttu on eraldiseisvad sensorid aga soodsamad (BME680 – 20€; SCD41 – 60€)² kui valmislahendused (Netatmo – 120€)³. Nii valmislahenduste kui ka eraldiseisvate sensorite seas eksisteerib erinevas hinnaklassis variante, mille juures tarbija teadmatust ära kasutades müüakse talle CO₂ sensori asemel hoopis lenduvate orgaaniliste ühendite (edaspidi LOÜ) sensor. Viimane on CO₂ sensorist soodsam, ent tüüpiliselt ebatäpsem, kuna CO₂ mõõtmise asemel antakse sellele üksnes hinnanguline väärtus (eCO₂). Kahe äärmuse vahel võiks eksisteerida ka optimaalne lahendus, kus sensorid on soodsad ning eksimismäär madal.

Lõputöö eesmärk on hinnata CO₂ ja LOÜ sensorite täpsust ning leida nendest täpsem. Töö keskendub taskukohaste eraldiseisvate sensorite võrdlemisele, seejuures kasutatakse valmislahendusena müüdavat sensorit referentsväärtusena. Uurimusse kaasati nii soodsamaid

¹ Haridus- ja Teadusministeerium. <https://www.hm.ee/et/ventilatsioon> (05.05.2022)

² Andmed pärit peatükist 2.1.

³ Netatmo. <https://shop.netatmo.com/en-eu/aircare/home-coach/homecoach> (05.05.2022)

LOÜ sensoreid (CCS811, BME680) kui ka kallimaid CO2 sensoreid (SCD41, ProDual HDH). Selleks, et hinnata ka sama marki sensorite omavahelist täpsust, on töös kasutatud iga marki sensorit mitu tükki.

Sensorite võrdlemiseks sooritati mõõtmised neljas erinevas paigas – magamistoas, kontoris, klassi- ja seminariruumis –, mille käigus saadi ülevaade sensorite käitumisest erikeskkondades. Töö raames loodi terviksüsteem sensoritelt andmete lugemiseks ning koondamiseks, millega salvestati kõik sensorite andmed IoT jaoks loodud pilveteenusesse Cumulocity. Pilveteenuse kasuks otsustati, kuna vastasel juhul tuleks andmed hoiustada sensorites ning nende kätte saamiseks nad näiteks kaabliga üksikhaaval käsitsi arvutisse laadida. Pilvelahendusega on kõik andmed ühes kohas ning lihtsamini ligipääsetavad. Sealt laeti andmed pärast mõõtmist alla ning saadi ülevaade erinevate sensorite näitudest ja nende erisustest. Mõõtmistulemuste põhjal anti hinnang sensorite täpsusele, hinnates sealhulgas ka sama marki sensorite omavahelist varieeruvust. Nende tulemuste abil on võimalik valida tulevastesse töödessa usaldusväärsem sensor. Samuti saab käesolevas töös loodud mõõtmisüsteemi arhitektuuri võtta eeskujuks tulevaste süsteemide loomisel.

Käesolev töö koosneb sissejuhatausest, kokkuvõttest ning neljast sisupeatükist. Peatükis 1 antakse esmalt ülevaade erinevatest õhukvaliteedi näitajatest ning nõuetest. Seejärel tuuakse välja erinevates läbiviidud uuringutes loodud prototüübid ning nendes kasutatud sensorid. Peatükis 2 luuakse mainitud sensorite põhjal valim ning määratletakse ka tulevased mõõtmispaigad. Kolmandas peatükis antakse ülevaade loodud tehnilisest süsteemist ning mõõtmiseks ettevalmistumisest. Neljandas peatükis analüüsitakse valitud paikades tehtud mõõtmisi ning võrreldakse omavahel kasutatud sensoreid. Lisaks analüüsitakse andmeid skaleerimise teel, antakse hinnang mõõtmispaikade õhukvaliteedile ning viimaks tehakse järeldused mõõtmistulemuste põhjal. Lisades on välja toodud osade mõõtmispaikade CO2, LOÜ, temperatuuri ning relatiivse õhuniiskuse mõõtmistulemused, mis annab huvilistele võimaluse teha täiendavaid järeldusi sensorite käitumisest erinevates olukordades.

1. Õhukvaliteedi taust

Peatükis antakse esmalt ülevaade õhukvaliteediga seotud näitajatest, mis on olulised edaspidises töös mõõtmistulemuste mõistmiseks, ning õhukvaliteedile rakenduvatest nõuetest, mille abil hinnatakse uuritavate ruumide õhukvaliteeti. Seejärel tuuakse välja mõned uurin-
gud, mis on varasemalt õhukvaliteedi teemal varem tehtud, ning nende tulemused, mille alusel pannakse töö praktilises osas paika võrreldavate sensorite valim.

1.1 Õhukvaliteedi näitajad

Hoone sisekliima all mõistetakse siseruumis olevate keskkonnategurite koostõju. Olulise-
mateks teguriteks on siinkohal õhutemperatuur, valgus, suhteline õhuniiskus, müra ja õhus
sisalduv süsihappegaas (Pommer, 2021: 17). Õhukvaliteedi moodustab eelnevatest suhte-
line õhuniiskus, õhutemperatuur, süsihappegaasi ning muude süsinikühendite kontsentrats-
ioon.

Lenduvad orgaanilised ühendid (ingl *Volatile Organic Compounds*) ehk **LOÜ** või **VOC**
on mõõdetav parameeter, mis näitab õhus lenduvate erinevate orgaaniliste ühendite sagedust
ühikuga „osakest miljardi kohta“ (ingl *particles per billion* ehk ppb) (Meyer, 2021:2). Or-
gaanilised ühendid (tuntud ka kui süsinikühendid) on ühendid, milles esineb süsinikuaato-
mite ahelaid (Britannica, 2019). Näiteks alkaanid, alkeenid, areenid, alkoholid, ketoonid,
eetrid jms. Neid nimetatakse organiilisteks ühenditeks, sest kunagi arvati, et taolisi ühendeid
leidub vaid eluslooduses (Fisher Scientific). Õhukvaliteedi kontekstis on orgaanilised
ühendid olulised, kuna need võivad sissehingamisel ärritada kõri või kokkupuutel silmi.
Selliseid osakesi eraldub inimtegevuse käigus pidevalt – nt küpsetamise, parfüümide kasu-
tamisest (benseen, ksüleen), vaipadest (formaaldehüüd, heksanaal), riietest (metüleenklo-
riid, trikloroeteaan), ning pestitsiididest (etüleen, isobuteen) ja töötavatest autodest (ben-
seen, ksüleen) (Meyer, 2021:3 – 4). Sõltuvalt süsinikuaatomide arvust on nimetatud ühen-
deid võimalik jaotada täpsematesse alagruppidesse (Meyer, 2021:2):

- **VVOC** (ingl *Very Volatile Organic Compounds*) – lenduvad orgaanilised ühendid,
milles süsiniku molekulide arv on alla 6.
- **VOC** – süsiniku molekulide arv jääb vahemikku 7 – 15.
- **SVOC** (ingl *Semi Volatile Organic Compounds*) – süsiniku molekulide arv on üle
16.

Kasutatud sensorite võimekusest lähtuvalt ei ole käesolevas töös selline eristamine vajalik ning lühendit **LOÜ** või **VOC** kasutatakse üldisena väljendamaks totaalset orgaaniliste ühendite kogust miljardi osakese kohta õhus. Väga hea õhukvaliteedi korral on LOÜ näit õhus maksimaalselt 49 ppb ($200 \mu\text{g}/\text{m}^3$), samas on ka aktsepteeritav 147 ppb ($600 \mu\text{g}/\text{m}^3$)⁴ (Meyer, 2021:7).

eCO2 ehk ekvivalent CO2 (ingl *equivalent CO2*) on näitaja, mis tuletab LOÜ osakeste kontsentratsiooni põhjal CO2 hinnangulise mõõdu. eCO2 kasutatakse LOÜ sensorites, kuna need ei mõõda tegelikku CO2 taset, vaid tuletavad selle olemasoleva info põhjal. LOÜ sensorite peamine eelis päris CO2 sensorite ees on nende oluliselt odavam hind (Bosch BME680 on ~20€ vs SEK-SCD41 on ~60€)⁵. eCO2 mõõtmisel kasutatakse sama ühikut nagu CO2-gi puhul, milleks on osakesi miljoni kohta (ingl *particles per million* ehk ppm).

Relatiivne õhuniiskus (ingl *Relative Humidity*). Olenevalt õhutemperatuurist ning õhurõhust, mahutab õhk kindla maksimaalse koguse veeauru ning suhteline õhuniiskus näitab veeauru kogust maksimumi suhtes protsentuaalselt. Kui relatiivne õhuniiskus jõuab 100%-ni, hakkab niiskus kondenseeruma (Nave, s.a.).

1.2 Nõuded ruumide õhukvaliteedile

Ruumide õhukvaliteedi kohta pole veel kasutusel kohalikku seadusandlust (Terviseamet, s.a.), kuid kehtib Euroopa standard EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 hoonete energiatõhusust mõjutavatele sisekliima parameetritele.

CO2 taseme arvutuslikud piirmäärad jäävad sõltuvalt ruumi iseloomust ja asukate ootusest vahemikku 380–1350 ppm (vt tabel 1) (EVS, 2019:85). Vastavatele määradele tuleb liita välisõhu CO2 tase, mis hetkel on NOAA andmetel 420 ppm (NOAA, 2021). Sisekeskkonna kvaliteedi I kategooria on ootuseks erivajadusega asukate puhul (lapsed, vanurid, puudega inimesed jne), II tase on nõ normaalne, III kategooria ei tähenda riske tervisele, kuid võib vähendada mugavust (EVS, 2019: 16). Eraldi nõuded on kehtestatud õppeasutustele, kus on

⁴ Teisenduste eelduseks on võetud toatemperatuur 25 kraadi Celsiuse järgi ning rõhk 1 atmosfäär. $\frac{\mu\text{g}/\text{m}^3}{4.09} = \text{ppb}$. <https://help.atmotube.com/technical/13-atmotube-ppm-ug/> (12.11.2021).

⁵ Hinnad on võetud peatükist 2.1.

CO₂ lubatud maksimaalne tase 1000 ppm (Tervisekaitsenõuded koolidele, 2013: §12). Euroopa komisjoni poolt läbi viidud uurimuses leiti, et inimeste kognitiivsed funktsioonid hakkavad halvenema alles siis, kui CO₂ tase on 2500 ppm juures (Dodd jt. 2020:33).

Tabel 1. Euroopa standardnõuded hõivatud ruumide ja magamistubade arvutuslikule Δ CO₂-le üle välisõhu kontsentratsiooni⁶ (EVS, 2019:85).

Sisekeskkonna kvaliteedi kategooria	Arvutuslik CO ₂ ppm üle välise kontsentratsiooni hõivatud ruumide jaoks	Arvutuslik CO ₂ ppm üle välise kontsentratsiooni magamistubade jaoks
I	550 (+420 ppm)	380 (+420 ppm)
II	800 (+420 ppm)	550 (+420 ppm)
III	1350 (+420 ppm)	950 (+420 ppm)

Hoonetes, milles ei ole teisi niiskuse nõudeid peale inimestega hõivatuse (nt kontorid, koolid ja eluhooned), ei ole niisutamine ega õhu kuivatamine üldjuhul vajalik. Tavaliselt esineb vajadus ainult erihoonetes, nagu muuseumid, teatud tervishoiuruumid jmt ning soovituslik siis, kui õhuniiskus langeb 20% (EVS, 2019:87). Määruses „Tervisekaitsenõuded koolidele“ sätestatud, et kooliruumide relatiivne õhuniiskus peab jääma 40%-60% vahele (talvel võib õhuniiskus langeda 25%-ni ja suvel tõusta 70%-ni) (Tervisekaitsenõuded koolidele, 2013: §12).

Eluruumide soovituslik minimaalne õhutemperatuur jääb kütmisperioodil vahemikku 18°C (III kategooria) kuni 21°C (I kategooria) ning kontorites 19°C (III kategooria) kuni 21°C (I kategooria) (EVS-EN 16798-1:2019+NA:2019 : 78). Õhutemperatuur õpperuumis peab olema vähemalt 19°C (Tervisekaitsenõuded koolidele, 2013: §12).

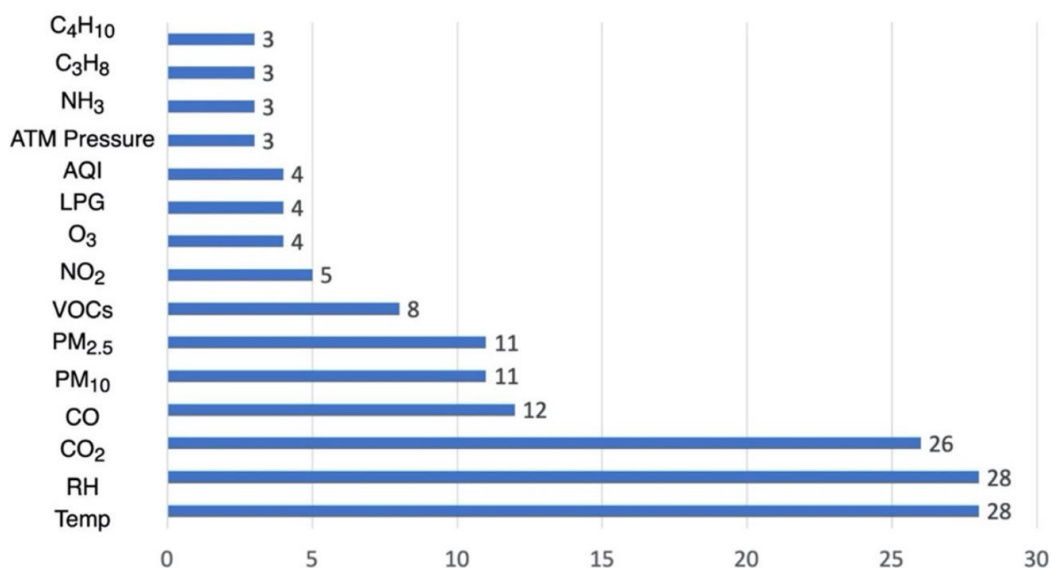
1.3 Läbiviidud uuringute tulemused

Selles peatükis antakse ülevaade varem õhukvaliteedi teemal tehtud teadustöödest, tööde tulemusena valminud õhukvaliteeti mõõtvatest prototüüpidest ja neis kasutatud sensoritest.

⁶ Arvutuslik Δ CO₂ üle välisõhu kontsentratsiooni – Tabelis olevale väärtusele tuleb liita välisõhu CO₂ kontsentratsioon (hetkel 420 ppm (NOAA, 2021)), mille tulemusena saadakse tegelik kvaliteedi kategooria CO₂ piirmäär.

Samuti võetakse kokku Eestis kehtivad õhukvaliteedi nõuded. Peatüki tulemusena saadi ülevaade teadustöodes enim kasutatud sensoritest, mille alusel pandi järgmises peatükis kokku praktilise osa valim.

2021. aastal uurisid Saini jt, milliseid sensoreid kõige tihedamini värgvõrgu süsteemides õhukvaliteedi mõõtmiseks kasutatakse. Selleks valisid nad 141-st teadustööst analüüsimeks 40 pärast 2015. aastat valminud tööd (Saini jt, 2021:14). Õhukvaliteedi näitajatena vaadeldi käsitletud töodes erinevaid tegureid, nt temperatuuri, niiskust, CO₂ ja LOÜ taset (vt joonis 1). Üldjuhul olid kasutatud sensorid loodud spetsiifiliselt ühe või kahe ülesande jaoks ja seetõttu vaadeldi neid kasutusotstarbe järgi eraldi gruppides. Leiti, et näiteks temperatuuri mõõtvatest sensoritest kasutatakse kõige tihedamini DHT11 ning DHT22 sensorit (Saini jt, 2021:9). Analüüsitud töodest mõõdeti LOÜ-sid vaid 8-s töös 40-st, kuid CO₂-te mõõdeti 26-s töös 40-st (vt joonis 1). Kolmel juhul kasutati BME680 sensorit, mille funktsionaalsus on laiem, lubades mõõta nii temperatuuri, niiskust kui ka LOÜ-sid (Saini jt, 2021:10) Lisaks on kolmes töös mainitud BME280 sensorit, mis on BME680 eelkäija (Saini jt, 2021:9).



Joonis 1. Enim mõõdetud parameetrid Saini jt uurimuses (2021:9).

BME680 sensoreid ning CCS811 sensoreid on kasutatud varasemalt Sathyabama Ülikoolis, et luua prototüüp, mis oskaks mõõta õhukvaliteedi erinevaid parameetreid (Jose, 2019). Nii- mola pandi ühe mikrokontrolleri külge neli erinevat sensorit: SGP30, BME680, CCS811 ja SI1145. CCS811, BME680 ja SGP30 mõõdavad LOÜ-sid, BME680 ja CCS811 mõõdavad

lisaks ka temperatuuri ja õhuniiskust, SI1145 mõõdab infrapuna ning silmaga nähtavat valgust ning ennustab selle põhjal UV näidu. Uurimuse lõpuks koostati graafik mõõtmise andmetest ja anti ülevaade õhukvaliteedist. Kuna eesmärgiks oli terviklik prototüüp, mitte sensorite iseloomustamine, siis paraku pole raportis välja toodud, missugused tulemused millisel sensorilt pärit on. Lisaks on Jose töö mõõtmisperioodiks pooleteisetunnine periood (Jose, 2019:637), mis läheb vastuollu CCS811 sensori dokumentatsiooniga, kus on välja toodud, et usaldusväärsete tulemuste saamiseks on mõistlik lasta sensoril esimesel korral 48 tundi käia enne reaalselt andmete lugemise alustamist (Ams, 2016:8).

Sarnane uuring viidi läbi 2021. aastal Malaisias Universiti Tenaga Nasional eraülikoolis (Kadir et al., 2021), kus õhukvaliteedi mõõtmiseks ühendati ESP32 mikrokontrolleri külge BME680 ning CCS811 sensorid. Parendusena kasutati akutoidet, mis võimaldas loodud süsteemi paigutada erinevatesse kohtadesse (Kadir et al., 2021:122). Süsteem kasutas InfluxDB 2.0 süsteemi. Kadir et al. töös kajastuvad vaid CCS811 eCO₂ andmed ning mõõtmisvahemikuks oli vaid 3 tundi, mille käigus eCO₂ näit ei muutunud.

Samal aastal uuriti õhukvaliteeti ka Rumeenia Cluj-Napoca Ülikooli teadustöö raames, kus ESP32 mikrokontrolleri külge ühendati BME680 sensor (Muntean et al., 2021:6). Sensorid koos mikrokontrolleeritega paigaldati Cluj-Napoca erinevatesse linnaosadesse ning mõõdeti linna õhukvaliteeti (Muntean et al., 2021:8). Töö tulemuses ei toodud välja mõõtmistulemusi, vaid keskenduti loodud süsteemile.

Sarnaselt on Tartu Ülikoolis loodud kaks õhukvaliteeti mõõtvat prototüüpi. Neist ühes kasutati prototüübi loomiseks SCD30 ning BMP280 sensorit (Valancauskaite, 2020). Teise töö raames loodi backend teenus koos kogu rakendusliideseaga, et andmeid sensorilt vastu võtta ning salvestada (Davõdovski, 2020). Davõdovski uuringus kasutati CJMCU-8128 sensorit, mis on identne CCS811 sensoriga. Mõlema Tartu Ülikoolis tehtud töö eesmärgiks oli luua prototüüp ning võrrelda saadud tulemusi Netatmo õhukvaliteedi sensoriga. Prototüüpi-dega teostati mõõtmiste, et katsetada kummagi sensori täpsust, ent mõlemas töös oli mõõtmisperioodiks vaid 24 tundi, mis pole LOÜ sensorite kalibreerumisaega arvestades) piisav. Kokkuvõttena võib öelda, et on mitmeid teadustöid, kus luuakse prototüüp erinevate õhukvaliteedi sensorite kasutamiseks. Paraku pole eelmainitud uurimustes võrreldud sensorite tulemusi ega hinnatud nende täpsust. See kinnitab vajadust õhukvaliteeti mõõtvate sensorite võrdleva uuringu järele.

2. Töös kasutatud sensorid ja mõõtmispaigad

Antud peatükis antakse ülevaade valimi koostamise kriteeriumitest, loodud valimist ning sellesse kuuluvate sensorite spetsifikatsioonidest ja funktsioonidest. Lisaks seletatakse lahti ka mõõtmispaikade valim, valiku põhjus ning valitud kohtade omadused.

2.1 Õhukvaliteedi sensorite valim

Valimi koostamise aluseks võeti eelmises peatükis välja toodud töödes kõige enam kasutatud sensorid. Nendest valiti välja BME680, mis jäi silma oma laia funktsionaalsuse ning väikese eksimismäära poolest, ning CCS811, mis esines läbivalt enamikes töödes. Mõlemad on LOÜ sensorid, mis mõõdavad eCO₂-te. Teiseks tingimuseks oli, et sensori maksumus ei ületaks 100 euro piiri, et edasises töös koostatud lahendus oleks taskukohane. Lisaks nimetatutele tutvuti ka teiste turul⁷ saadavalolevate valikutega, mille seast kaasati töösse SCD41 sensor, mis mõõdab tegelikku CO₂-te. Loodud valimile lisati Tartu Ülikooli Delta hoone ruumidesse paigaldatud statsionaarne CO₂ sensor Pro dual HDH. Valimist jäeti välja Saini jt töös mainitud DHT11 ja DHT22 (Saini jt, 2021:9), kuna need oskavad mõõta vaid temperatuuri ja õhuniiskust, kuid käesolev töö keskendub peamiselt LOÜ ja CO₂ sensoritele. Lisaks jäeti välja ka mainitud BME280, sest töös juba käsitletakse tema eelkäijat BME680-t (Saini jt, 2021:9-10). Järgnevalt antakse ülevaade kõikidest valimi sensoritest, nende funktsionaalsustest (vt tabel 2), eksimismääradest, hindadest ning käesoleva töö teostamiseks tellitud kogustest.

Tabel 2. Sensorite funktsionaalsuseid võrdlev tabel.

Sensor\funktsioon	Temperatuur	LOÜ	eCO ₂	CO ₂	Õhurõhk	Õhuniiskus	IAQ
CCS811		X	X				
BME680	X	X	X		X	X	X
SEK-SCD41	X			X		X	
Pro dual HDH	X			X			

⁷ Peamised veebipoed, millega tutvuti, olid: Farnell (<https://ee.farnell.com/>), Banggood (<https://www.banggood.com/>) ning Aliexpress (<https://www.aliexpress.com/>). Vaadatud 06.05.2022.

CCS811

CCS811 on metallioksiid sensor (MOX sensor), millega mõõdetakse LOÜ-sid (Ams, 2016:1). Sensoril on viis töörežiimi, kus andmete lugemise vahemikuks on kas üks minut, 10 sekundit, üks sekund, 250 millisekundit või ei loeta andmeid üldse. Tänu erinevatele režiimidele on võimalik sensorit kasutada ka ülimaldala energiatarbimise režiimis (ingl *Ultra-low power consumption mode*) (Ams, 2016:1,8). CCS811 sensori dokumentatsioon pole mainitud selle täpsust, kuid on välja toodud LOÜ-de mõõtmisvahemik 0 – 1187 ppb ning eCO₂ vahemik 400 – 8192 ppm (Ams, 2016:9). Antud sensori hind on 15€⁸ ning töö teostamiseks telliti neid kaks tükki.

BME680

BME680 on Boschi poolt toodetud sensor, mis on tuntud oma multifunktsionaalsuse poolest. Selle abil on võimalik mõõta õhuniiskust, temperatuuri, õhurõhku, LOÜ-sid, viimasest tuletatud eCO₂-te ning ka IAQ indeksit (DFRobot, 2020:1). IAQ ehk siseruumi õhukvaliteedi indeks (ingl *Indoor Air Quality Index*) on Boschi loodud õhukvaliteeti iseloomustav parameeter, mille tulemus on tuletatud ülejäänud parameetrite näitudest. IAQ indeks hindab õhukvaliteeti skaalal 0 – 500 (vt joonis 2), kus 0 iseloomustab kõige paremat ning 500 kõige kehvemat tulemust (DFRobot, 2020:2).

IAQ Index	Air Quality	Impact (long-term exposure)	Suggested action
0 – 50	Excellent	Pure air; best for well-being	No measures needed
51 – 100	Good	No irritation or impact on well-being	No measures needed
101 – 150	Lightly polluted	Reduction of well-being possible	Ventilation suggested
151 – 200	Moderately polluted	More significant irritation possible	Increase ventilation with clean air
201 – 250 ⁹	Heavily polluted	Exposition might lead to effects like headache depending on type of VOCs	optimize ventilation
251 – 350	Severely polluted	More severe health issue possible if harmful VOC present	Contamination should be identified if level is reached even w/o presence of people; maximize ventilation & reduce attendance
> 351	Extremely polluted	Headaches, additional neurotoxic effects possible	Contamination needs to be identified; avoid presence in room and maximize ventilation

Joonis 2. IAQ indeksi skaala (Bosch, 2021:10).

⁸ Aliexpress. <https://www.aliexpress.com/item/1005001707202420.html> (06.05.2022)

BME680 dokumentatsiooni alusel mõõdab ta temperatuuri vahemikus $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ eksimismääraga $\pm 1.0\text{ }^{\circ}\text{C}$, rõhku vahemikus 300 kuni 1100 hPa eksimismääraga $\pm 0.6\text{ hPa}$ ja õhuniiskust vahemikus 0 kuni 100% r.H eksimismääraga $\pm 3\%$ r.H (DFRobot, 2020:2).

Sensori hind on $\sim 20\text{€}$ ⁹. Käesoleva töö raames telliti BME680 sensoreid 6 tükki. Tulemuste võrdlemiseks valiti neist kolm Pimoroni poolt toodetud kiipidel ning kolm DFRobot poolt toodetud kiipidel.

SEK-SCD41

SCD41 on peamiselt CO₂-e mõõtmiseks loodud sensor (Sensirion, 2021:1), kuid selle on vajalikud funktsionaalsused ka õhuniiskuse ning temperatuuri mõõtmiseks. Mõõtmisvahemik on CO₂ puhul 0 – 40000 ppm, eksimismääraga $\pm 40\text{ ppm} + 5\%$ mõõdetud tulemusest, õhuniiskuse mõõtmisvahemik on 0 – 100% r.H eksimismääraga $\pm 6 - 9\%$ r.H ja temperatuuri mõõtmisvahemik $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $60\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Sensirion, 2021:3).

CO₂ sensorite hinnad on üldiselt LOÜ sensorite hindadest kõrgemad. SCD41 maksis $\sim 60\text{€}$ ¹⁰ ning see on soodsaim CO₂ sensor, mis töö läbiviimiseks soetada õnnestus. Töö raames telliti neid kaks tükki.

Produal HDH

Tartu Ülikooli Delta hoone õpperuumidesse on paigaldatud statsionaarsed CO₂ sensorid Produal HDH ($\sim 65\text{€}$ ¹¹). Sensorid asuvad umbes 1.7 meetri kõrgusel. HDH infolehel (Produal, 2020) on kirjas, et sensori CO₂ mõõtmisvahemikuks on 0 – 2000 ppm ja täpsus on $\pm 40\text{ ppm} + 3\%$ mõõdetud tulemusest. Produal on Soome ettevõtte, mis tegeleb õhukvaliteedi probleemidega ning on tänaseks laienenud üle Euroopa. Nende tooted vastavad Euroopa Liidu nõuetele ning on seega usaldusväärsed.

⁹ Farnell e-pood. <https://ee.farnell.com/dfrobot/sen0248/i2c-environmental-sensor-arduino/dp/3517939?st=bme680> (09.11.2021)

¹⁰ Mouser e-pood. <https://www.mouser.ee/ProductDetail/403-SEK-SCD41-SENSOR> (09.11.2021)

¹¹ Lafipa e-pood. <https://lafipa.lv/en/produkti/siltumapgade-en/automation-control-systems/sensors/humidity-sensors/hdh-2/> (08.05.2022)

2.2 Mõõtmispaikade valim

Eesmärgiks seati kolme mõõtmise teostamine kokku neljas eri ruumis, valides iga ruumi lähtudes selle ventilatsioonist ning kasutuseesmärgist: 4 töökohaga kontoriruum, 20 istekohaga seminariruum, 100 kohaga klassiruum ning kahe inimese magamistuba. Neist esimesel kolmel on kaasaegne ventilatsioon, magamistoal sundventilatsioon puudub. Kahel mõõtmisel asetatakse kõik sensorid ühte ruumi, et oleks võimalik analüüsida sensorite omavahelisi erinevusi, ning ühel mõõtmisel jaotatakse sensorid võrdselt kahe ruumi vahel, mille kasutusotstarve on sarnane, kuid inimeste hulk erinev. Mõlemasse nimetatud ruumi on statsionaarselt paigaldatud Pro dual HDH sensor, mida kasutatakse käesolevas töös teiste sensorite võrdlemisel aluseks võetava referentsväärtuse leidmiseks.

Esimeseks mõõtmispaigaks valiti Tartu Ülikooli Delta hoone kontor 3033, kus mõõtmise läbiviimise hetkel töötab 3 inimest ning ruum on hästi ventileeritud. Viimasest tingitult peaksid saadud mõõtmistulemused iseloomustama sensorite käitumist madala CO₂ tasemega ruumides. Selles kontoris töötavad ka käesoleva bakalaureusetöö juhendajad, nii et kui esimesel mõõtmisel peaks selguma sensorite töös vigu, on võimalik juhendajatel kiirelt reageerida ning töö autorile veast teada anda.

Teiseks mõõtmiskohaks valiti korteri magamistuba. Kuna selles eluruumis puudub sundventilatsioon, on eeldatavad CO₂ näidud kontori omadest kõrgemad. Mõõtmiseks valiti magamistuba sellepärast, et erinevalt näiteks elutoast, kus inimesed viibivad varieeruvalt, olakse magamistoas tüüpiliselt pikka aega järjest, mistõttu jõuab CO₂ näit kõrgemale minna. Lisaks saab selles ruumis vaadata, kui suurt mõju avaldab CO₂ tasemele irdakil või lahtise uksega magamine ja akende avamine.

Kolmas mõõtmine keskendus õpperuumidele ning teostati Tartu Ülikooli Delta hoone auditoriumis 1019 (100 istekohta) ja seminariruumis 3034 (u 20 istekohta). Mõlemas ruumis oli võrdne arv sama marki sensoreid ning mõõtmine toimus samaaegselt. Mõlemad ruumid on varustatud ka Pro dual HDH statsionaarse sensoriga, mida antud töös kasutatakse CO₂ taseme referentsväärtuse saamiseks. 100 istekohaga klassiruumi eripäraks võrreldes teiste mõõtmispaikadega on see, et seal viibib loengute ajal suur arv inimesi korraga.

3. Mõõtmisüsteemi väljatöötamine

Selles peatükis antakse kõigepealt ülevaade peamistest kasutatud süsteemi elementidest ning seejärel kirjeldatakse mikrokontrollerite ja sensorite programmeerimise protsessi ja sellega kaasnevat probleeme. Lisaks seletatakse koodi tööpõhimõtet ning sensorite konfigureerimist.

3.1 Kasutatud värgvõrgu tehnoloogiad

Värgvõrk, tuntud ka kui asjade internet (ing k *Internet of Things* ehk IoT), on üldine nime- tus sensoritega varustatud füüsiliste objektide võrgustikule, mis oskab vajadusel erinevaid tegevusi automatiseerida inimeste elu lihtsustamiseks (Oracle, s.a.). Sinna hulka kuuluvad näiteks nii targa kodu lahendused kui ka linna liiklusvoolu jälgivad süsteemid (Oracle, s.a.).

Cumulocity

Cumulocity¹² on graafilise liidesega platvorm, millel on olemas nii MQTT kui ka REST rakendusliides. Cumulocity on sihtotstarbeliselt loodud erinevatelt sensoritelt (ja muudelt värgvõrgu seadmetelt) andmete kogumiseks, töötlemiseks, jagamiseks, sensorite haldamiseks ja seadmetele käskude saatmiseks. Platvorm lihtsustab andmete saatmist, rakendades andmevoogudele vajalikke turvaprotokolle ning andes administraatorile pideva ligipääsu kogutud andmetele reaalajas. Lisaks on Cumulocity keskkonnas lahendatud andmete eksportimine, andes administraatorile võimaluse vastavalt vajadusele erinevas formaadis andmeid alla laadida. Cumulocity on juba Tartu Ülikooli serveritesse paigaldatud, mistõttu ei ole käeoleva töö raames vajalik keskkonna ülesse seadmise tegeleda. Cumulocityt kasutatakse ka Tartu Ülikooli Delta hoones olevate Produal HDH sensoritelt andmete lugemiseks.

ESP32

ESP32 on 18mm × 25.5mm × 3.10mm (peopessa mahtuv) mikrokontroller, mida kasutatakse sensoritelt andmete lugemiseks ning serverisse saatmiseks (Espressif, 2022). Mikrokontrolleril on Xtensa LX6 32-bitine RISC tüüpi protsessor (Espressif, 2022). Kiip on varustatud sisseehitatud Wi-Fi mooduliga, mis lihtsustab andmete saatmist serverisse, ning see on toidetav üle USB, mis võimaldab seda vajadusel töös hoida akupanga toitel (Espressif,

¹² Cumulocity. <https://www.softwareag.cloud/site/product/cumulocity-iot.html#/> (21.04.2022)

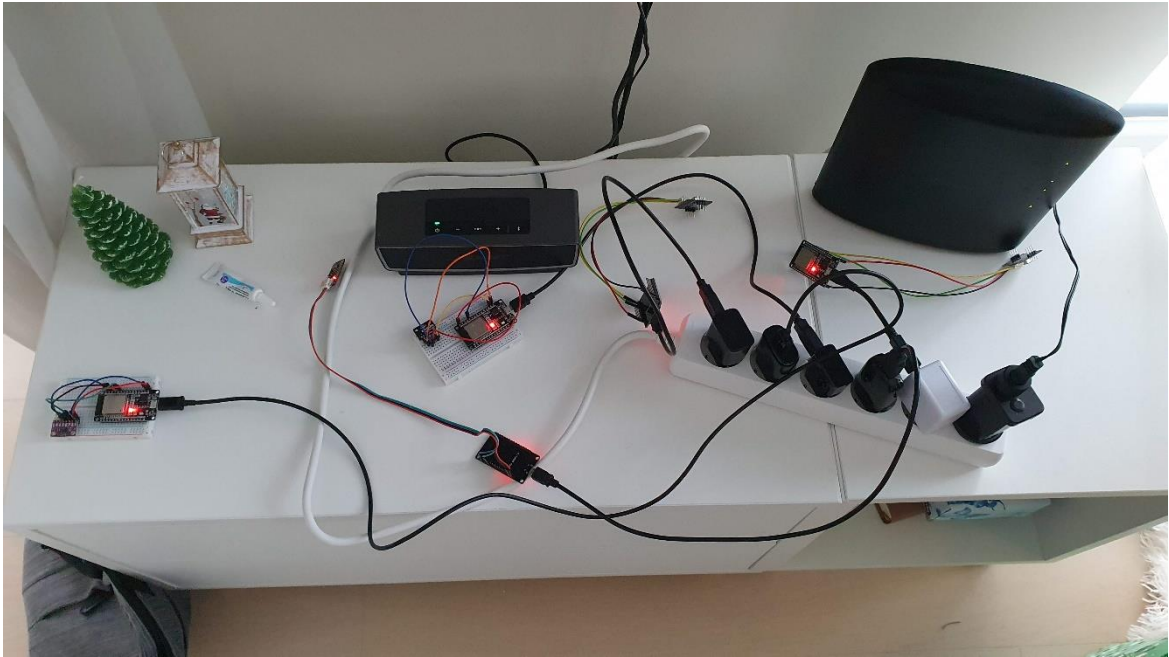
2022). See annab võimaluse paigutada sensoreid mõõteperioodiks kohtadesse, kus muudu seinakontakti lähedal ei ole (Teja, 2021). ESP32 mikrokontrollerid on soodsad (7.42€¹³) ning seega sobilikud taskukohase terviklahenduse väljatöötamiseks.

3.2 Süsteemi väljatöötamine

Valiku lõpptulemusena seati töövalmis 10 sensorit (osad neist nähtaval joonisel 3) (2x SCD41, 2x CCS811, 3x Pimoroni poolt toodetud BME680, 3x DFRoboti poolt toodetud BME680), mis ühendati juhtmetega ESP32 mikrokontrollerite külge, kasutades I2C ühendust. Mikrokontroller loeb sensoritelt andmed ning edastab need üle Wi-Fi Cumulocitysse, mis võimaldab süsteemi tulemusi lihtsasti kuvada. Iga sensor on ühendatud eraldi mikrokontrolleri külge. Seda seetõttu, et töö eesmärk on käsitleda sensoreid kui eraldiseisvaid terviklikke lahendusi, mitte luua mitmest sensorist koosnev liitsüsteem, mis oleks tekkinud mitme sensori ühendamisel ühe mikrokontrolleri külge. Selles töös katsetatakse Cumulocityt ainult 10 sensori peal, ent loodud lahendus on skaleeritav ning süsteem töötaks eeldatavasti ka ilma probleemideta näiteks 100 või enama sensoriga.

Sensorid on loodud lihtsasti paigaldatavateks – pärast sensori esmast seadistamist piisab vaid selle vooluvõrku ühendamisest. Sensorid töötavad 5V pingel pealt, mis tähendab, et toiteks piisab USB-adapterist. See võimaldab sensoreid kasutada ka kohtades, kus vooluvõrku ühendamine on raskendatud, kuna lisaks seinadapterile saab kasutada ka 5V USB akupanka. Näiteks Kadir jt töös tehtud prototüüp suutis aku toitel töötada 11 päeva ning 9 tundi (Kadir et al., 2021:126). Sensori konfigureerimisel on tarvis anda sellele unikaalne nimetus, Wi-Fi nimi ja parool ning Cumulocity jaoks tarvilikud autentimisandmed. Sensorite andmeid edastatakse Cumulocitysse iga 5 sekundi tagant. Kui intervall oleks pikem, tuleks implementeerida sensorisse ka andmete agregeerimise funktsionaalsus, ent sellisel juhul kaoks hilisem juurdepääs algandmetele. See omakorda välistaks võimaluse toorandmeid uurida võimalike anomaaliatega korral. Edaspidi kutsutakse sensori ja mikrokontrolleri kooslust lihtsalt sensoriks.

¹³ Banggood e-pood. <https://banggood.onelink.me/zMT7/mrzquwyf> (23.04.2022)



Joonis 3. Foto sensorite töökindluse katsetamisest pärast MQTT ühenduse implementeerimist.

Sensoritelt mikrokontrolleritesse andmete lugemisel kasutatakse I2C¹⁴ protokoll. Seejärel saadetakse andmed mikrokontrollerist Cumulocitysse, kasutades kohalikku Wi-Fi-t, nii et ühendus serveriga luuakse üle MQTT¹⁵ protokoll. MQTT on laialdaselt levinud just nimelt värkvõrgu süsteemide arendamisel ning haldamisel. MQTT suureks eeliseks on tema üldiselt lihtne tööpõhimõte ja minimaalne andmemahut. MQTT puhul on tegemist aga püsühendusega, mistõttu tuleb peale Wi-Fi ühenduse katkemist või sensorite puhkerežiimi lülitamist kogu MQTT ühendus uuesti luua.

Mikrokontrollerite programmeerimiseks kasutati programmeerimiskeskonda Visual Studio Code, millele oli paigaldatud laiendus PlatformIO¹⁶. Viimane on levinud laiendus, mida on võimalik kasutada erinevates programmeerimiskeskondades ning mis lihtsustab manusüsteemide arendamises olemasolevate teekide rakendamist. Programmeerimise algetapis osutus väga ajakulukaks uurimine, kuidas mikrokontrolleriga sensorilt andmete lugemine käib. PlatformIO liides oli siinkohal oluliseks lahenduseks, sest lihtsustas erinevate sensorite teekide allalaadimist ning programmi integreerimist.

¹⁴ I2C, GeeksForGeeks. <https://www.geeksforgeeks.org/i2c-communication-protocol/> (26.03.2022)

¹⁵ MQTT, Cumulocity dokumentatsioon. <https://cumulocity.com/guides/device-sdk/mqtt/> (04.04.2022)

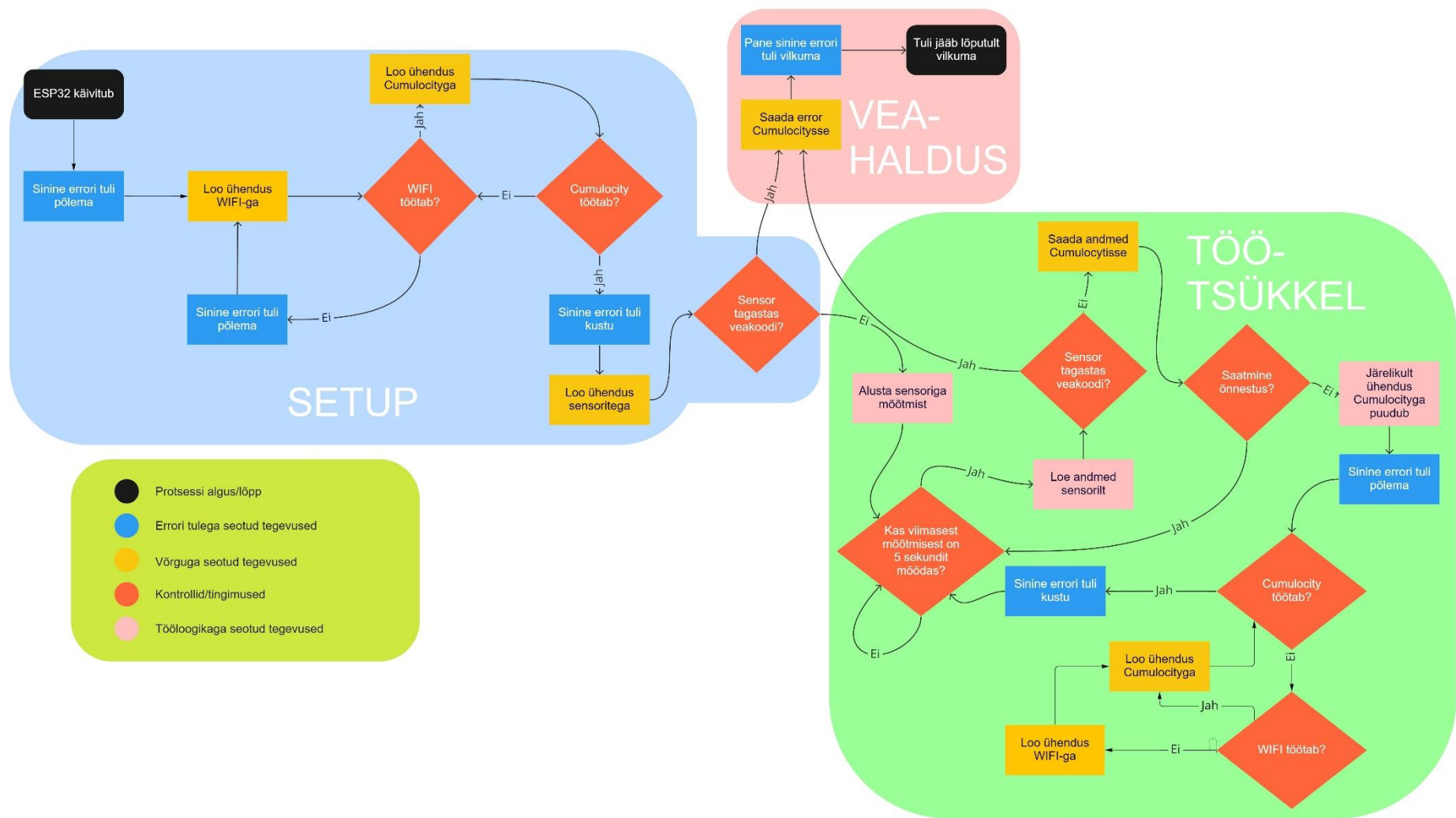
¹⁶ PlatformIO. <https://platformio.org/> (06.05.2022)

Igalt sensorilt loetakse andmed, kasutades selleks konkreetsele sensorile mõeldud teeki. Pärast sensoritest info lugemist luuakse serveriga ühendus. Algne plaan oli implementeerida ühendus üle MQTT, kasutades selleks *PubSubClient* MQTT teeki. See osutus paraku võimatuks töös kasutatud mikrokontrolleri ESP32 baastarkvaras esineva vea tõttu¹⁷, mille tagajärjel jooksid mikrokontrollerid iga viie tunni kuni kahe päeva tagant kokku. Süsteemi uuesti tööle saamiseks ei piisanud üksnes selle taaskäivitamisest, vaid vajalik oli mikrokontrolleri voluvõrgust hetkeks eemaldada. Mikrokontrollerite taaskäivitamine ei ole jätkusuutlik lahendus, kuna LOÜ sensorid vajavad igal käivitusel aega kalibreerimiseks ning seega ei oleks saadud mõõtmistulemused enam usaldusväärsed. Tegemist on niivõrd mahuka veaga, et selle parandamine käesoleva töö raames ei oleks mõistlik, mistõttu võeti kasutusele teine MQTT teek *ASyncMQTTClient*. Selle implementeerimine oli küll *PubSubClient* teegist raskem, kuid võimaldas luua reservmehhanismi, mille eesmärgiks on ühenduse kadumisel kõik ühendused uuesti üles seada ning seejuures tagada ühenduse võimalikult veatu töötamine. Lisaks oli ka *ASyncMQTTClient* teegiga kaasas lihtne ning selge demokood¹⁸, mis võeti aluseks ka käesolevas töös koodi kirjutamisel. Loodud kood on leitav GitHubist¹⁹. Koodi tööd seletab kõige paremini selle tööskeem (vt joonis 4).

¹⁷ Github. <https://github.com/espressif/esp-idf/issues/6878> (26.03.2022)

¹⁸ Github. <https://github.com/marvinroger/async-mqtt-client/blob/develop/examples/FullyFeatured-ESP32/FullyFeatured-ESP32.ino> (30.04.2022)

¹⁹ GitHub. <https://github.com/stars/KarlHendrikBachmann/lists/1%C3%B5put%C3%B6%C3%B6-repositorium> (26.03.2022)



Joonis 4. ESP32 koodi tööskeem.

Jooniselt on näha, kuidas kood on jaotatud kolmeks suureks ploki. Esimeses jaotuses luuakse ühendus Wi-Fi-ga, sensoriga ning Cumulocityga. Lisaks kontrollitakse, et sensor töötab ilma veakoodideta ning seejärel alustatakse töösükliga. Teiseks osaks on töösükkel, kus küsitakse sensorilt mõõtmistulemusi ning saadetakse need Cumulocitysse. Kui saatmine ebaõnnestub, siis kontrollitakse üle ühendus nii Cumulocityga kui ka Wi-Fi-ga. Joonisel 5 on näha, kuidas sensorist andmed loetakse ning seejärel Cumulocitysse saadetakse. Esmalt saadetakse sensorile teade, et alustatakse andmete lugemisega, seejärel loetakse andmed, tehakse vajalikud andmete teisendused ning lõpuks vormistatakse päringud vastavalt Cumulocity dokumentatsioonile ning saadetakse päringud ära. Kolmandaks ploki on veaolek, mis on lõputu tsükkel, kuhu jõutakse siis, kui sensorilt saadakse veakood. Sensori veakood tähendab seda, et sensoriga kas ei saadud ühendust või on see katki ning probleemi lahendamiseks peab sekkuma inimene. Sellisel juhul saadetakse Cumulocitysse veateade, mille kaudu saab süsteemi administraator info, et sensori töös on tekkinud viga.

```
float co2, temperature, humidity;
uint8_t data[12], counter;

// send read data command
Wire.beginTransmission(SCD_ADDRESS);
Wire.write(0xec);
Wire.write(0x05);
Wire.endTransmission();

// read measurement data: 2 bytes co2, 1 byte CRC,
// 2 bytes T, 1 byte CRC, 2 bytes RH, 1 byte CRC,
// 2 bytes sensor status, 1 byte CRC
// stop reading after 12 bytes (not used)
// other data like ASC not included
Wire.requestFrom(SCD_ADDRESS, 12);
counter = 0;
while (Wire.available()) {
    data[counter++] = Wire.read();
}

// floating point conversion according to datasheet
co2 = (float)((uint16_t)data[0] << 8 | data[1]);
// convert T in degC
temperature = -45 + 175 * (float)((uint16_t)data[3] << 8 | data[4]) /
65536;
// convert RH in %
```

```

humidity = 100 * (float)((uint16_t)data[6] << 8 | data[7]) / 65536;

// Send message to Cumulocity
command = "200,co2Measurement,particles per million,"+String(co2)+"ppm";
mqttClient.publish(TOPIC.c_str(), 0, false, command.c_str());
command = "211,"+String(temperature);
mqttClient.publish(TOPIC.c_str(), 0, false, command.c_str());
command = "200,humidityMeasurement,percent,"+String(humidity)+"%";
mqttClient.publish(TOPIC.c_str(), 0, false, command.c_str());

```

Joonis 5. Väljavõte SCD41 koodist, kus loetakse info sensorilt ning saadetakse Cumulocitysse.

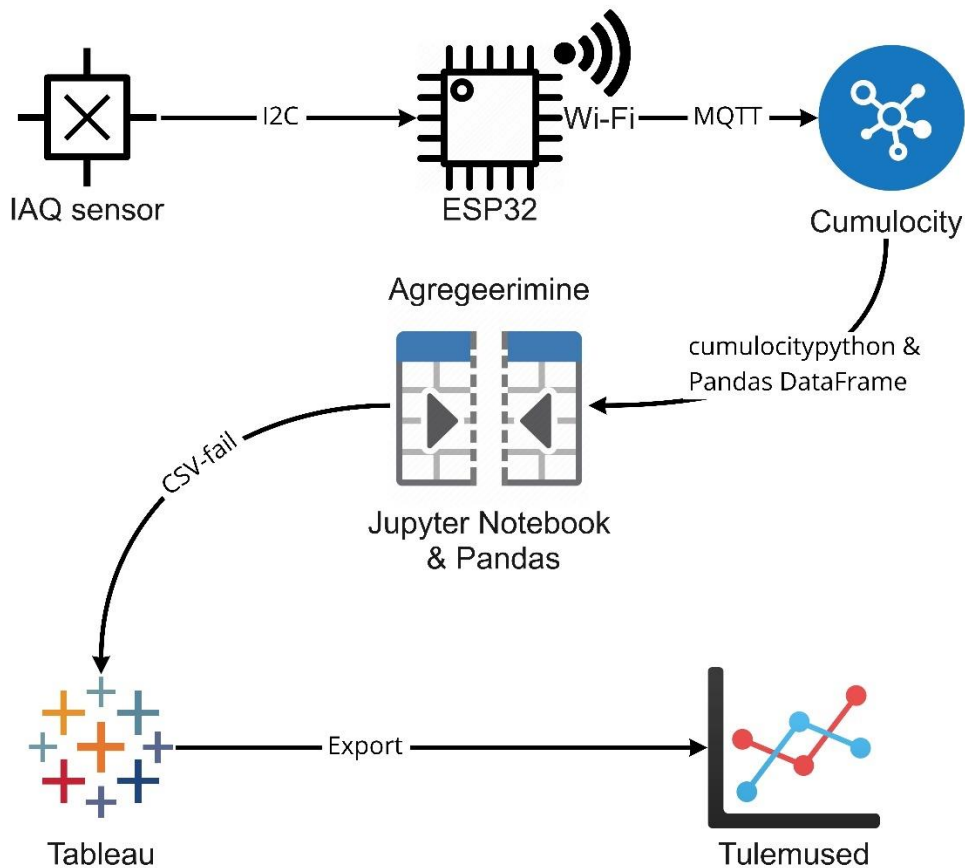
Samal ajal, kui lõplik lahendus valmis sai, oli maailmas levima hakanud „Log4Shell“ turvaauk, mis eksisteeris Java koodides. Selle turvaauku tõsidushinnanguks sai 10/10-st (RIA, 2022). Pärast seda oli soov Tartu Ülikooli Cumulocity administraatoril panna Cumulocity Tartu Ülikooli lokaalsesse võrku kinni, mis muudaks selle ligipääsetavaks ainult kas kohtvõrgus või läbi VPN-i. Kuna aga VPN lahenduse implementeerimine mikrokontrolleritesse oleks raske, siis leiti kompromiss töö autori ning administraatori vahel, et MQTT ühendusega seotud port jäetakse välismaailma jaoks siiski avatuks ning planeeritud mõõtmistega sai pärast väikest tõrget jätkata.

3.3 Sensorite ettevalmistamine mõõtmiseks

Selleks, et sensorid oleksid mõõtmistes eristatavad, nummerdati sensorid ära. Sellepärast on mõõtmistulemustes alati sensori mudelile lisaks kirjas ka number. Need numbrid säilisid sensoritel läbi mõõtmiste samana. Nummerdamise tulemusena oli võimalik mõõtmistulemuste edastamisel probleemide tekkimisel lihtsasti tuvastada, millisel sensoril viga tekkis.

Enne mõõtmist konfigureeriti sensorid Wi-Fi-sse. Delta hoones toimunud mõõtmistel kasutati andmete edastamiseks ut-public võrku, mis on paroolita ligipääsetav. Eluruumis mõõtmisel kasutati selleks korteris olevat kohalikku Wi-Fi-t. Selleks oli iga sensori koodis eraldi konfiguratsiooni fail, kus tuli vaid muuta Wi-Fi nime ning Wi-Fi parooli parameetrid ning kood uuesti kontrollerisse ülesse laadida. Pärast seda koodi üles laadimist oli mikrokontrolleril asuva sinise tule alusel hästi näha, kas ühendumine õnnestus või mitte (täpsemalt seatatud joonisel 4). Kui Wi-Fi ühendus oli saavutatud paigutati sensorid ruumi, kus mõõtmine toimus ning pandi kirja mõõtmisperioodi alguskellaeg. Kõigepealt lasti sensoritel 48 tundi

kalibreeruda, pärast mida algas tegelik mõõtmisperiood. Selleks, et näha, missugune kalibreerumine välja näeb, jäeti esimesele mõõtmisele kalibreerimisaeg samuti väljavõttesse sisse. Viimases kahes mõõtmises kalibreerimisandmeid ei ole.



Joonis 6. Andmevoo skeem.

Andmevoo skeem (vt joonis 6) kujutab andmete liikumist sensori mõõtmistulemustest valmis graafikuteni. Skeemilt on näha, et peale mõõtmist laaditi andmed Cumulocityst (Githubist saadavaloleva teegi²⁰) abil Jupyteri töölehte (ingl *Jupyter Notebook*), kus pärast andmete alla laadimist kasutati Pandase andmetöõtlusteeiki sensorite andmete ühte tabelisse kokku agregeerimiseks. Selle tulemusena loodi CO2 tabel, kuhu agregeeriti kokku nii kõik CO2 kui ka eCO2 tulemused. Sama tehti ka teiste mõõtmistulemustega. Tabelid eksporditi CSV-failidesse, kust nad omakorda Tableau tarkvarasse imporditi. Tableau on andmeanalüüsiks mõeldud tarkvara, mis lihtsustab graafikute loomist ning andmete töötlemist. Seal loodi graafikud, mis hiljem piltidena töösse lisati. Graafikute loomiseks kasutati Tableaud

²⁰ Github. <https://github.com/SilverLaius/cumulocitypython>. (30.04.2022)

just sellepärast, et seal on interaktiivsete graafikute loomine lihtsam kui Pythonis. Tableaus on võimalik interaktiivselt andmeid graafikult detailsemalt uurida, graafikuid kombineerida ja vajadusel neid ka suurendada ja minimeerida.

Andmete agregeerimine on mitmesammuline protsess, kus esmalt loetakse sisse sensori mõõtmistulemused, milles on kirjas mõõtmise kellaeg ning mõõdetud tulemus. Seejärel võetakse iga 10 minuti keskmine (võib ka kasutada muud intervalli, kuid siin töös on 10 minutit sobilik) ning konverteeritakse tabel ümber kujule, kus nüüd on keskmistatud mõõtmistulemused tabelis täpselt iga 10 minuti tagant (10:00:00, 10:10:00, 10:20:00 jne). Kui teiste sensorite tulemused samamoodi agregeerida, on võimalik sensorite tulemuste tabelid omavahel kokku liita, sest kõikide agregeeritud kellaajad on nüüd ümarad ning ühtivad omavahel. Lisaks sellele, et saadud tulemustega oli lihtsam sensoritele ühtset tabelit koostada, on saadud tulemused ka vähem mürased. Kui algne mõõtmisintervall oli 5 sekundit, siis 10 minuti peale agregeerides võetakse 120 mõõtmistulemuse keskmine, nii et kui ka mõni tulemustest juhtus vahepeal vigane olema, hajub viga keskmistatud tulemuste sisse ära.

4. Mõõtmine ja tulemuste analüüs

Järgnevalt seletatakse, kuidas edenesid mõõtmised Tartu Ülikooli Delta hoone klassiruumis, seminariruumis, kontoris ning magamistoas. Pärast mõõtmisi analüüsiti saadud tulemusi, võrreldi sensoreid omavahel ning leiti sensorite omavaheline mõõtmistulemuste erinevus. Selle juures põhjendatakse mõõtmistulemustes tekkinud anomaaliaid ning katsetatakse erinevaid viise sensorite mõõtmistulemuste parendamiseks.

4.1 Andmete kogumine

Kokku sooritati kolm mõõtmist neljas erinevas asukohas, mille valimisprotsessi kirjeldati täpsemalt peatükis 2.2. Asukohtadeks olid kontor, magamistuba, seminariruum ning klassiruum. Mõõtmisperioodideks olid 1 – 2 nädalased ajavahemikud ning kõikidel mõõtmistel kasutati 5-sekundilist mõõtmisintervalli. Tulemusena loeti kõikidelt sensoritelt kokku 22,3 miljonit andmepunkti, millest umbes 4,8 miljonit moodustavad CO₂ andmed.

Kontori mõõtmisperioodiks valiti 2 nädalat, kuhu sisse jäeti ka 48-tunnine sensorite kalibreerumisaeg (Ams, 2016:8), mis kajastati ka mõõtmistulemustes. Sellisel juhul on võimalik hinnata sensorite täpsust ka nende kalibreerumise ajal. Sensorid asetati kontori vabale lauale 15-sentimeetriste vahedega.

Magamistoas mõõtes võeti mõõtmisperioodiks 1 nädal (+2 ööpäeva kalibreerumiseks), mille hulgas kalibreerumiseks kulunud aega andmetes ei kajastata. Sensorid asetati magamistoa kummutile. Toas ööbis 2 inimest. Toa uks oli öösiti avatud või یرvakil, seega toimus õhuvahetus teiste ruumidega. Aken oli öösiti suletud, mõnel õhtul avati see õhutamiseks.

Seminariruumis ja klassiruumis mõõtes valiti mõõtmisperioodiks samuti 1 nädal (+2 ööpäeva kalibreerumiseks), mille hulgas kalibreerumiseks kulunud aega andmetes ei kajastata. Klassiruumis pandi sensorid õppejõu lauanurgale ning seminariruumis koosolekulaua keskele. Nendes ruumides mõõtmist sooritati kolm korda, sest esimesel kahel korral oli mõni sensor läinud veaolekusse. Töö analüüsis kasutatakse ainult viimast õnnestunud mõõtmist.

4.2 Sensorite võrdlus ning andmekvaliteedi analüüs

CO₂

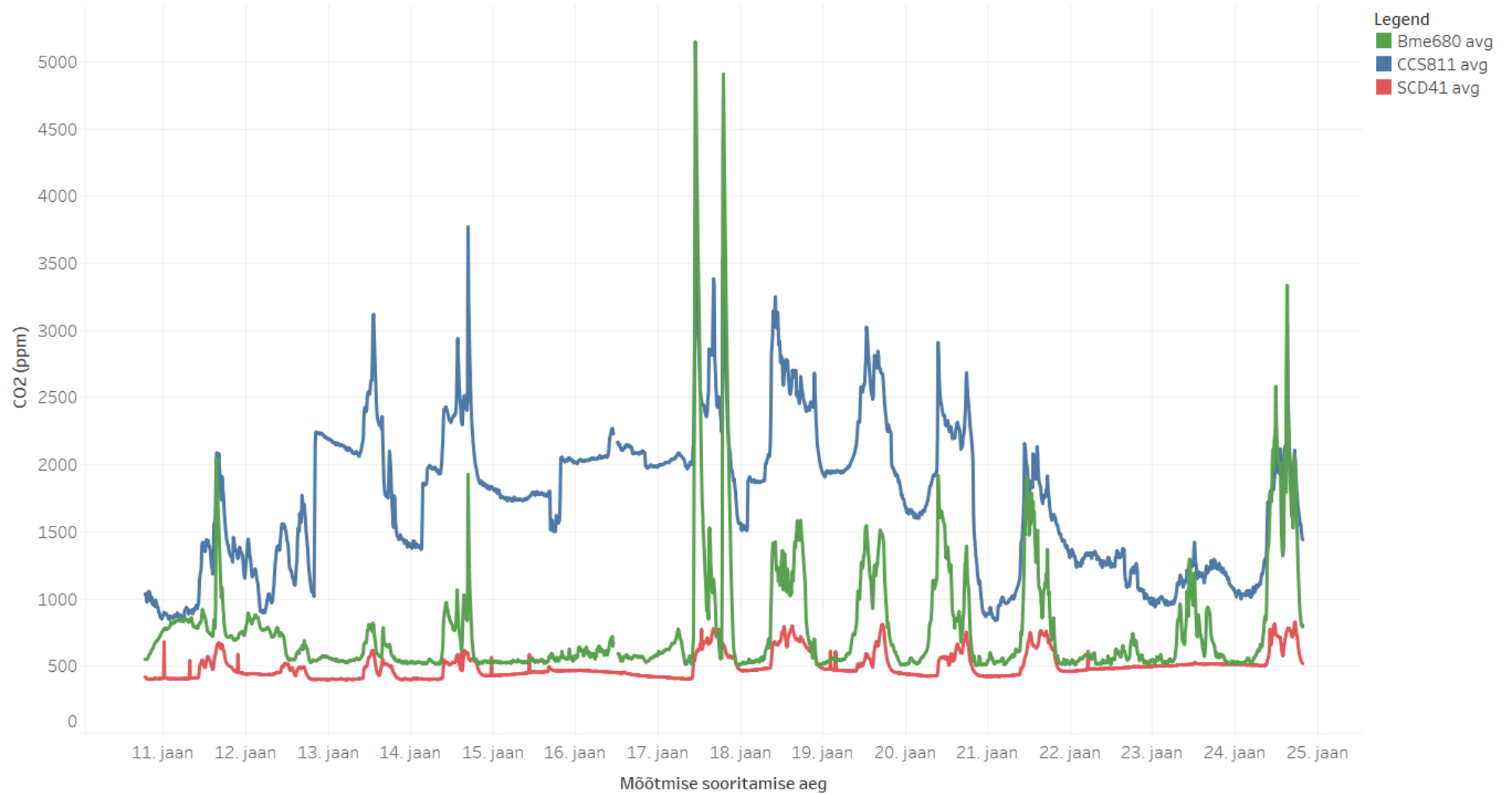
Kontoriruumi CO₂ taseme näitude graafikud on näha joonisel 7, kus sama marki sensorite mõõtmistulemused on keskmistatud (eraldiseisvad tulemused on näha lisas 2). Jooniselt on

näha, et kõik sensorid reageerivad CO₂ tasemes toimunud muutustele, ent nende tundlikkused varieeruvad. SCD reageerib kõige väiksemate tõusudega, CCS811 ja BME680 suuremate hüpetega. BME-1 ja SCD-1 on baastase stabiilne, aga CCS-i baastase kõigub suurtes vahemikes ega anna aimdust, mis tegelik baastase olla võiks. SCD mõõdetud tulemused jäävad 400–800 ppm vahele, BME tulemused 500–2100 ppm vahele (välja arvatud 17. ning 24. jaanuari hüpetel, mis tõusid kuni 5100 ppm-ni) ning CCS tulemused jäävad 800–4000 ppm vahele. Graafikult on selgesti tuvastatav, millal inimesed kontorisse jõudsid ning millal seal lahkusid. Keskmistamata graafikult (lisa 2) on näha, et nii kõikide BME-de kui ka kõikide SCD-de tulemused jäävad sarnasesse suurusvahemikku, aga CCS-de tulemused erinevad üksteisest märkimisväärselt. Võttes arvesse kontori ventileeritust ning seal töötavate inimeste arvu, on töö autori spekulatiivsel hinnangul SCD tulemused kõige täpsemad.

Magamistoa mõõtmistulemuste (joonisel 8) üldprofiil on kontoriga sarnane. Erinevuseks on tõusude aeg sõltuvalt ruumikasutuse iseloomust ning üldine kõrgem CO₂ taseme vahemik, mis on selgitatav sundventilatsiooni puudumisega. Graafikult on näha, millistel öödel on olnud üks irvakil (17. ja 18. jaanuar) ning millistel täiesti lahti (12.–16. jaanuar). SCD mõõtmistulemused jäävad vahemikku 700–1800 ppm, BME tulemused 800–2400 ppm (välja arvatud hüpe 15.-nda veebruari õhtul 3000 ppm-ini) ning CCS 500–2700 ppm. Võrreldes vahemikke kontori omadega, jääb silma, et nii BME kui ka CCS vahemikud on sarnased kontori omadega, aga SCD vahemik on tõusnud. Sellest võib järeldada, et LOÜ sensorid on programmeeritud töötama kindlas vahemikus, mistõttu jäävad nende mõõdetud tulemused fikseeritud vahemikku, sõltumata tegelikust CO₂ tasemest.

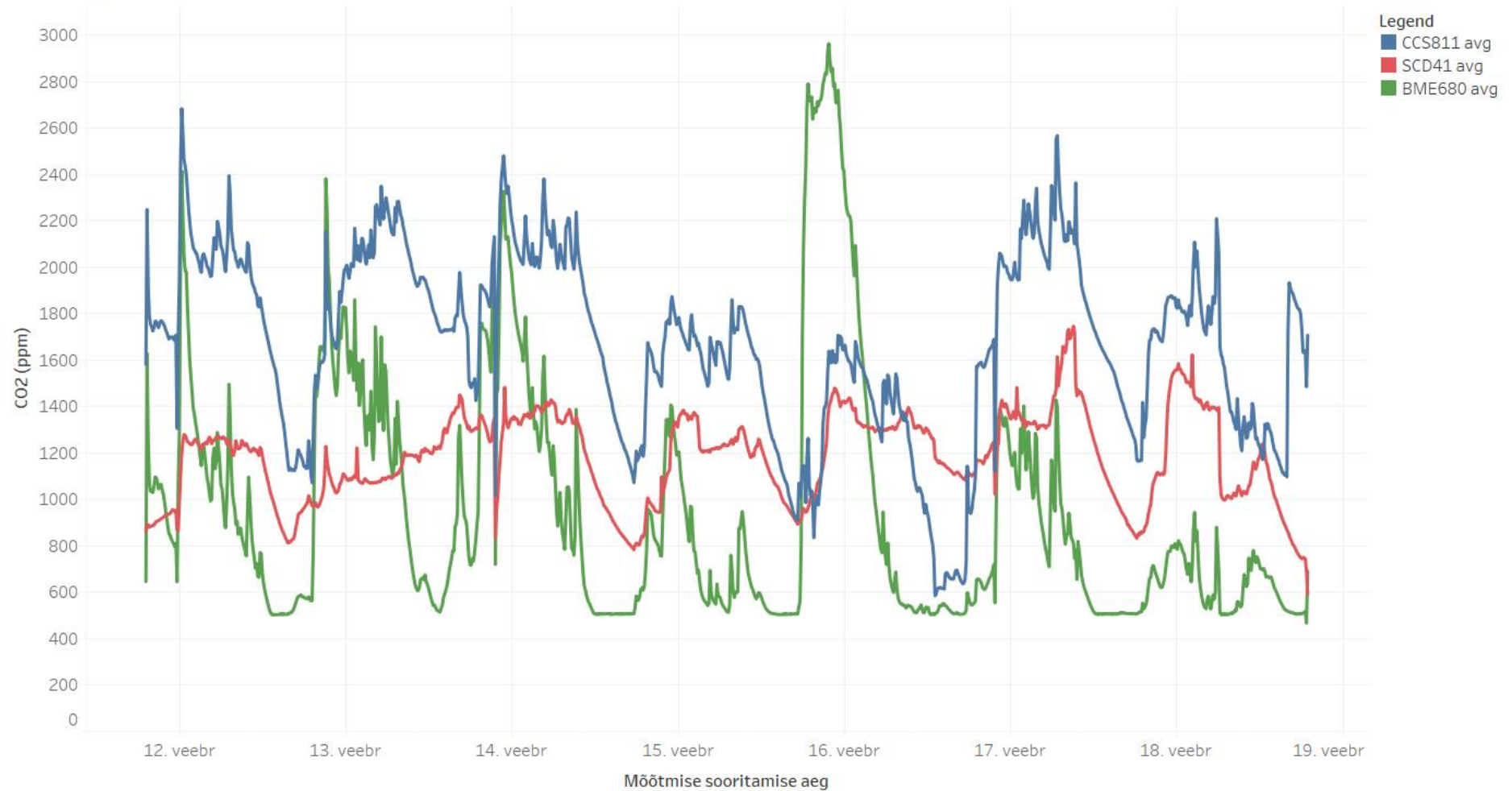
Seminariruumi CO₂ mõõtmistulemustes (lisa 3) on näha, kuidas kõik tõusud LOÜ sensorite näitades toimuvad kas pärast tööpäeva või täpselt tööpäeva lõpus. Kõik hüpped algavad ajavahemikus 15:00 – 17:00. Hüpped on toimunud kõikides LOÜ sensorites, milledest – nagu ka varem – BME680 sensorid reageerivad kõige tugevamini ning CCS811 nõrgemalt. Analoogselt kontori mõõtmistulemustega on LOÜ sensorite näidud täiesti erinevad SCD41 näitudest.

CO2 keskmine sensorite alusel



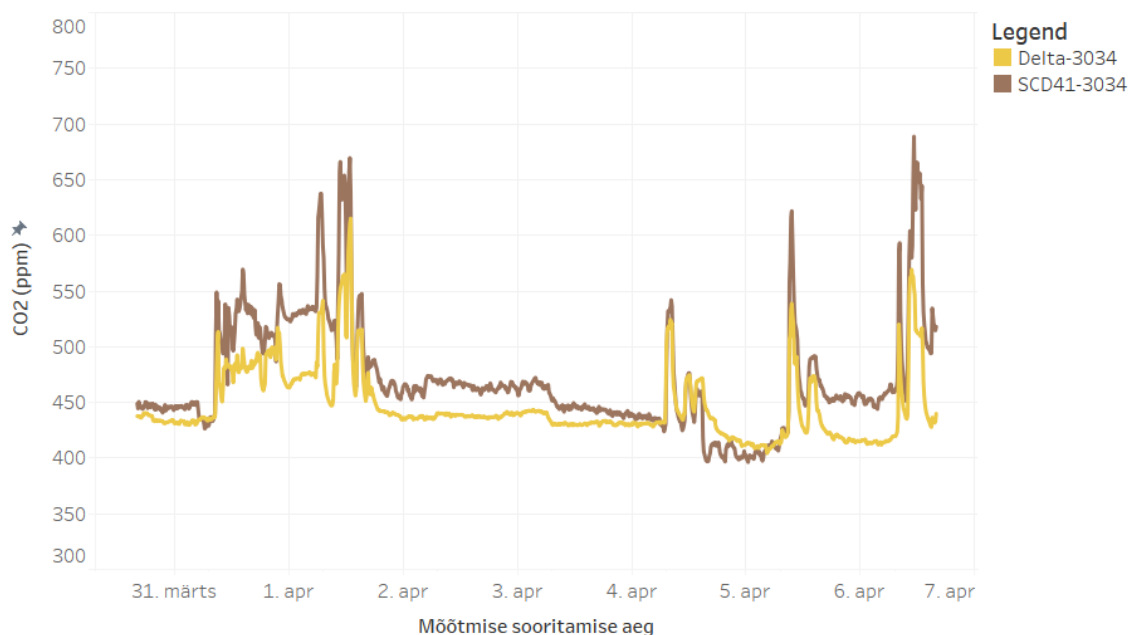
Joonis 7. Delta kontori 3033 CO2 keskmistatud mõõtmistulemused. (Püstkriips on 00:00.)

CO2 avg



Joonis 8. Sundventilatsioonita 20m² kahe inimese magamistoa CO2 keskmistatud mõõtmistulemused. (Püstkriips on 00:00.)

Klassiruumis (lisa 4) on näha tõuse nii päeval kui ka öösel. Mõni tõus algas kell 17:30, kõrgeim 13:30 ning mõni koguni 4:00, seega ei paista sealt nii selget rütmi välja nagu seminariruumis ja kontoris. Samas on see osaliselt ka põhjendatav, sest erinevalt kontorist, ei toimu klassiruumis tegevus alati 9-st 5-ni, vaid aktiivsus sõltub tunniplaanist. Samal ajal vaid üksikutel kordadel tõusudest kajastuvad CO2 muutused ka SCD41 tulemustes ehk teisisõnu LOÜ sensorite tõusud ei ole alati kooskõlas CO2 sensorite näitudega.



Joonis 9. Delta seminariruumis 3034 SCD41 ja Produal HDH CO2 mõõtmistulemused. (Püstkriips on 00:00.)

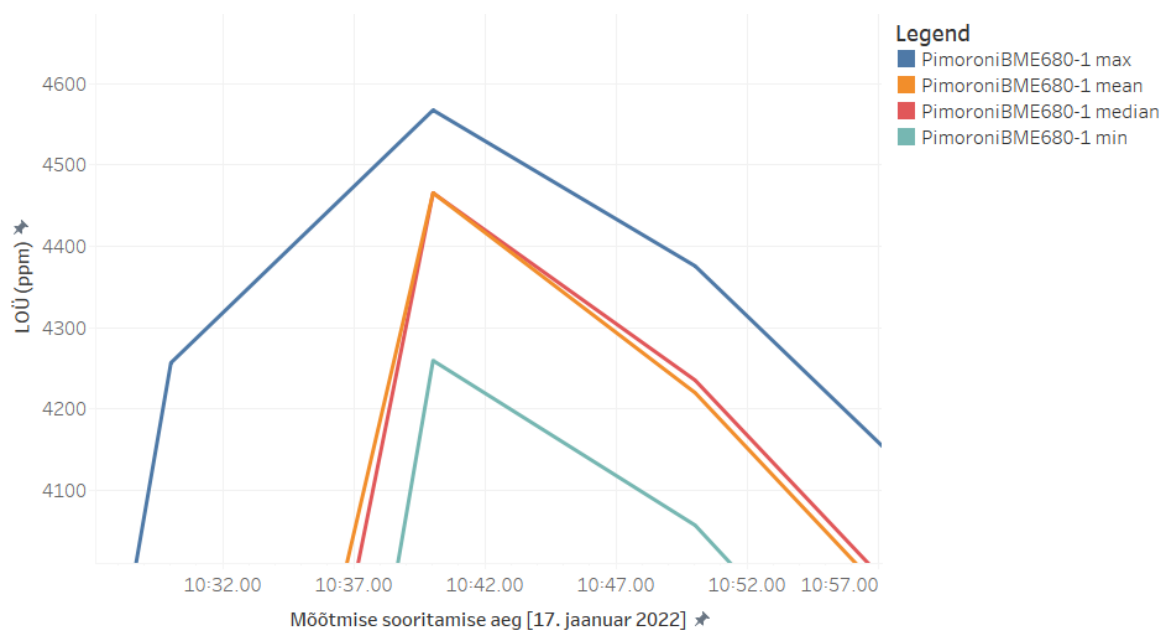
Lisaks, nagu ka mõõtmise taustas mainiti, olid seminariruumi ja klassiruumi paigaldatud ka statsionaarsed CO2 sensorid, mille erinevus SCD41 sensoritega (vt joonis 9) on kummaski klassiruumis vaid 10 – 30 ppm, jäädes SCD41 infolehel välja toodud mõõtmisvea piirsesse. Viimane tõestab SCD41 usaldusväärsust nii selles kui ka eelmistes mõõtmistes.

BME680 hüpe ja LOÜ

Kõikidel mõõtmistel toimus BME680 näitudes mingil hetkel seletamatult kõrge hüpe. Kontoris 17. jaanuaril (joonis 7), magamistoas 15. veebruaril (joonis 8) ning klassiruumis ja seminariruumis 31. märtsil (lisa 3 ja lisa 4). Kontoris ja eluruumis teostatud mõõtmise põhjal oli alust arvata, et tegemist võis olla kas koristajaga, sensorite lähedal kasutatud lõhnaõliga või näiteks käte desinfitseerimisega, aga need ideed seadis kahtluse alla seminari- ja klassiruumi mõõtmisel toimunud tõusud, sest siis toimusid hüpped erinevates ruumides (mis asuvad erinevatel korrustel) korraga. Tõenäosus, et mõlemas ruumis täpselt samal ajal koristati

või sensoreid muul viisil ühtemoodi mõjutati, on väike. Korteris elanikelt uuriti, mis hüppe ajal täpsemalt toimuda võis, millele vastati, et üks elanikest oli küll kodus, ent midagi peale koristamise märkimisväärsel sellel hetkel ei toimunud. Seega jääb hüppe täpne põhjus teadmata.

Kuna LOÜ sensorite eCO₂ näidud põhinevad peamiselt LOÜ tulemustel, võeti vaatluse alla ka kõikide mõõtmiste LOÜ tulemused, kust selgus, et kahe hüppe ajal kõikide BME680 sensorite LOÜ näitajad 1000-kordistused ja ühe hüppe ajal 60-kordistused. Oluline on rõhutada, et hüpe läbis kõiki BME680 sensoreid.



Joonis 10. Pimoroni BME680-1 sensori lenduvate orgaaniliste ühendite kontoris toimunud hüppe tipu miinimum (roheline), mediaan (punane), keskmine (oranž) ja maksimum (sinine). Ühikuks on osakest miljoni kohta (ppm).

Selleks, et välistada juht, et tegemist on vaid ühe ebatäpse mõõtmistulemusega, mis agregeerimise teel keskmise ülesse viis, uuriti lähemalt Pimoroni BME680-1 kontori mõõtmistulemuste LOÜ andmeid. Selleks agregeeriti sensori algandmed uuesti, ent seekord ei võetud ainult agregeerimisvahemikku jäävatest andmetest keskmist väärtust, vaid ka miinimum, maksimum ja mediaanväärtus (vt joonis 10). Eelneva tulemusena on näha, et tegemist ei olnud ainult ühe väära mõõtmistulemusega, mis keskmise ülesse viis, vaid kõik mõõtmistulemused jäid sellel hetkel samasse suurusvahemikku.

Temperatuur ja niiskus

Uurides ka kontori sensorite vahelisi temperatuuri erinevusi (lisa 5), on näha, et SCD41-de mõõdetud temperatuurid olid omavahel sarnasemad kui BME680-te poolt mõõdetud temperatuurid. SCD41-de erinevus oli umbes veerand kraadi (kui SCD41-2 hüpped välja arvestada), kuid samas mõnede BME680-te erinevus oli koguni 1 kraad. Kuna BME680 sensorid muutuvad oma töötamise ajal soojaks, olid nende tulemused SCD41 tulemustest märgatavalt kõrgemad. Selle eest oli SCD41-2 sensori tulemused kordades hüppelisemad ning sellest tingitult ka ebatäpsemad kui BME680-te omad. Jooniselt (vt lisa 5) puuduvad CCS811 andmed, sest need sensorid temperatuuri ei mõõda.

Võrreldes kontori CO₂ ning temperatuuri näite (lisa 6), on näha, kuidas inimtegevus mõjutab ruumi temperatuuri. Sellel graafikul on olemas SCD41-de poolt mõõdetud keskmistatud CO₂ tulemused ning BME680-de ja SCD41-de keskmistatud temperatuuri tulemused. SCD41 ja BME680 keskmiste temperatuuride vahe on 1.97 kraadi. Lisaks on näha, et temperatuuri alusel on võimalik järeldada, kas kontoris asus töötajaid või mitte, sest päevadel, kui kontoris inimesi ei olnud, ei olnud temperatuuri tõus niivõrd kõrge. Samas selle põhjal ennustada, mis võiks olla vastav CO₂ tase, ei ole võimalik, sest on näha, et igal CO₂ tõusul tõusis temperatuur alati ühele ja samale tasemele, kuigi CO₂ tase oli päeviti varieeruv. Ka sellelt graafikult kajastub SCD41-2 tulemuste hüppelisus.

Kontori õhuniiskuse graafikult (lisa 7) on näha, et kõikide sensorite trendid olid relatiivselt samasugused, kuid graafikute baastasemed on üksteisest 0.5 – 3 protsendipunkti võrra nihkes. Sarnaselt temperatuuri graafikuga on ka õhuniiskuse tulemustes näha SCD41-2 sensoril teatud hüplikkust ning sellest tulenevat ebatäpsust. SCD41-1 sensor nendes kohtades ei hüppa, seega paistab tegemist olevat just SCD41-2 sensori veaga. Keskmistatud graafikult (lisa 8) on näha, kuidas keskmine BME680 tulemus erineb SCD41 keskmisest tulemusest pidevalt umbes 2 protsendipunkti võrra. Kerget seost on õhuniiskuse ja CO₂ vahel näha, ent seos tundub silma järgi olevat liiga väike, et selle alusel seoseid või järeldusi teha.

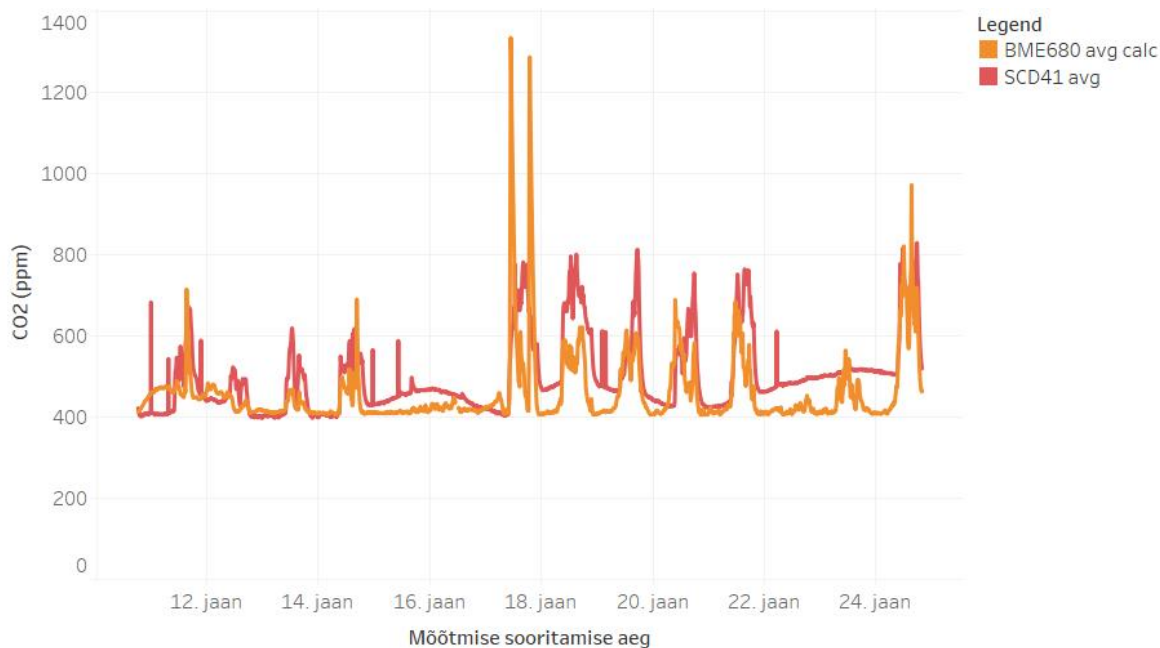
Kui vaadelda magamistoa õhuniiskuse ning temperatuuri näitusid, siis erinevalt Delta kontori mõõtmistulemustest, ei ole siin näha otsest korrelatsiooni CO₂, temperatuuri ja õhuniiskuse vahel. Sõltumata CO₂ muutusest püsis nii temperatuur kui ka õhuniiskus pidevalt stabiilsena. Mõõtmistulemustes on näha vaid üksikuid kordi, kui koos CO₂-ga kukkusid ka temperatuur ja õhuniiskus. Elanike põhjendusel olid järsumad CO₂ ja temperatuuri langused

tingitud magamistoa akna avamisest, et tuba õhutada. Taolisi järske kukkumisi on näha kolmel õhtul. 11. veebruaril, kus CO₂ kukkus 950-lt 850-le ning temperatuur 20,0-lt 18,9-le. Teisel õhtul, 13. veebruaril, kukkus CO₂ 1300-lt 834-le, ent tõusis juba tunniga 1300 ppm-le tagasi ning temperatuur kukkus 21,3-lt 17,5-le. Kolmas õhtu on sarnane teisele, kus temperatuur kukkus vaid paar kraadi ning CO₂-s toimus küll järsk langus, ent tõusis tunniga tagasi 1300 ppm-le. Kuna mõõtmised on sooritatud talvisel ajal, kus välistemperatuur oli alla nulli, on näha ka järsemaid languseid õhuniiskuses, mis taastusid samuti juba 30 – 40 minutiga. Pärast akna sulgemist kiire CO₂ taseme taastumine illustreerib, kui oluline on eluruumides aktiivne ventilatsioon ning et aknaga õhutamine ei anna püsivat õhukvaliteedi muutust talvisel ajal.

Klassiruumi ja seminariruumi temperatuuri ning õhuniiskuse näitudes on näha, et mõlemas ruumis oli pidevalt sama õhuniiskus, mis viitab, et see on tugevalt ventilatsiooni poolt reguleeritud. Temperatuur selle eest kergelt erines. Kokkuvõttes jäi mõlemas ruumis temperatuur 20 – 25 kraadi vahele, ent kuna klassiruumis puuduvad aknad, siis seal temperatuuri kõikumist näha ei olnud. Seminariruumi kaks seina moodustavad aknad, mistõttu avaldab päike olulist mõju ruumi temperatuurile. Sellest on ka tingitud seminariruumi temperatuuri kõikumine, mis ei ole seotud CO₂ tulemustega.

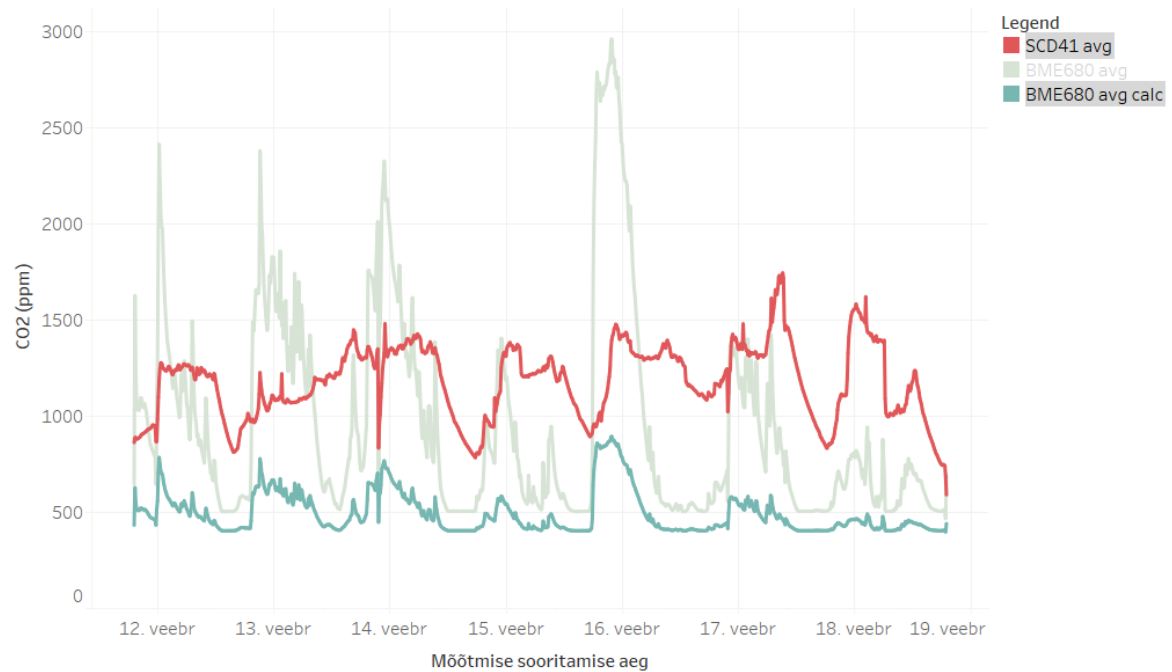
4.3 Andmete analüüsimine skaleerimise teel

Kontoris teostatud mõõtmiste tulemuste keskmistatud CO₂ graafikuid (joonis 7) võrreldes jääb silma, et kuigi LOÜ sensoritel on märgatav baastaseme nihe CO₂ sensoritest, on näha muustrite sarnasust LOÜ ja CO₂ sensorite vahel. Kui toimus tõus SCD41 tulemustes, on toimunud tõus ka BME680 ja CCS811 tulemustes. Sellest tulenevalt eeldati, et BME680 saadud väärtused on ümber arvutatavad SCD41 tulemusele sarnasemaks.



Joonis 11. BME680 kontori tulemustele on rakendatud funktsiooni f , mis muudab BME680 mõõtmistulemusi sarnasemaks SCD41 tulemustele. (Püstkriips on 00:00.)

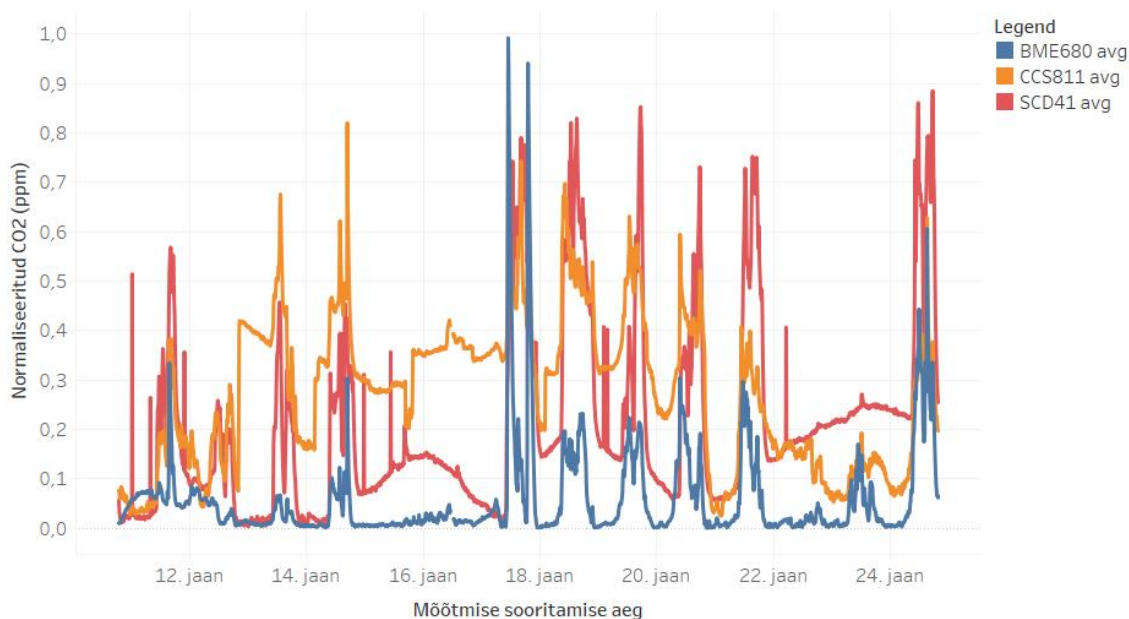
SCD41 ja BME680 tulemuste ühtlustamiseks rakendati BME680-e keskmistatud mõõtmistulemustele funktsiooni $f(x) = \left(\frac{x-530}{5} + 530\right) - 120$. Selle tagajärjel (vt joonis 11) muutuvad SCD41 ja BME680 tulemused palju sarnasemaks, erinedes teineteisest vaid 0 – 100 ppm võrra (välja arvatud siis, kui toimub BME680 hüpe, mil on vahe 600 ppm). Valemi loomiseks leiti esmalt BME680 hinnanguliseks baastasemeks 530 ppm, mille lahutamisel sensori mõõdetud tulemustest saadakse graafik, kus mõõtmistulemuste baastasemeks on 0. Seejärel leiti, et BME680 mõõdetud hüpped on umbes 5 korda kõrgemad SCD41 omadest, mistõttu tuleb eelnevalt saadud vahe jagada viiega. Selleks, et BME680 ja SCD41 tulemusi võrrelda saaks, tuleb need viia samale baastasele. Loodud valemis on selleks esmalt liidetud jagatisele 530, mis viib graafiku BME680 algsele baastasele tagasi, ning seejärel lahutatud 120, mis on BME680 ja SCD41 baastasete vahe. Valemi rakendamise tulemusel asetsevad mõlema sensori graafikud SCD41 baastasel ning nende tulemused on usutavalt sarnased. Leitud valem tõestab, et isegi kui BME680 sensorid relatiivselt eksivad, on nende üldine muster sarnane SCD41 graafikule ning teades BME680 tundlikkust ning ruumi reaalselt CO2 baastaset, on neid võimalik täpsemaks kalibreerida.



Joonis 12. BME680 eluruumide tulemustele on rakendatud funktsiooni f. Roheline on algne BME680 väärtus, sinine uus BME680 väärtus ning punane SCD41 väärtus. (Püstkriips on 00:00.)

Kui rakendada kontori mõõtmistulemustega leitud BME680 skaleerimisfunktsiooni magamistoa mõõtmistulemustele (vt joonis 12), on näha, kuidas saadud tulemus ei reageeri enam CO2 muutustele tugevalt üle, vaid jääb SCD41-ga sarnasesse suurusjärku. Kuna BME680 ja SCD41 baastasemete vahe on eelnevast mõõtmisest erinev, muutis antud valemi rakendamine BME680 baastaseme veelgi ebatäpsemaks. Järelikult pole BME680 kalibreerimine nii lihtne, et seda oleks võimalik ainult ühe funktsiooni rakendamise abil teha.

Lisaks uuriti ka, mis juhtub siis, kui kontori andmeid normaliseerida nõnda, et iga sensori väärtused arvutatakse ümber vahemikku $[0,1]$ nõnda, et sensori mõõdetud maksimumväärtus on 1 ja miinimumväärtus on 0. Seejärel võeti normaliseeritud andmetes igat marki sensorite keskmine ning tulemusena saadi järgnev graafik (vt joonis 13).



Joonis 13. Normaliseeritud keskmistatud CO2 andmed. (Püstkriips on 00:00.)

Tulemusest on näha, et BME680 tulemus on kõige rohkem paigast ära just oma järsu hüppe pärast. Kui poleks hüpet toimunud, oleksid need andmed tõenäoliselt teistele sarnasemad. SCD41 ja CCS811 tulemus on omavahel palju sarnasemad, ent siiski on näha, et võrreldes SCD41 baastaseme stabiilsusega, on CCS811 baastase väga palju ringi liikunud. Kõige selgemalt nädalavahetustel (14. – 16. jaanuar ja 21. – 23. jaanuar). Üldiselt on graafikult näha selgeid sarnasusi sensorite mustrites, mis taaskord vihjab, et sensoritest tulnud andmed on oma suhtelt sarnased.

4.4 Hinnang ruumide õhukvaliteedile

Bürooruumis teostatud mõõtmise tulemuste põhjal võib väita, et Delta 3033 kontori CO2 tase on SCD41 mõõtmistulemuste alusel normaalpiirides (nõuetest täpsemalt peatükis 1.2) – alla 1000 ppm. Kuna kontoriruumides ei ole õhuniiskusele määratud piirnorme, saavad selle mugavustaset hinnata ruumi asukad. Asjaolu, et õhuniiskus langes korduvalt alla 20% viitab siiski ohule, et õhku tajutakse liiga kuivana. Sellele vaatamata on tegemist piisavalt hea õhukvaliteediga väitmaks, et selles ruumis ei pärsi õhukvaliteet mõttetööd ega tekita riske tervisele.

Magamistoas püsis õhuniiskus õppeasutustele rakendatud ehk rangemate normide piires ning temperatuur vastas I kategooria (täpsemalt peatükis 1.2) ruumide soovituslikule tasemele. Ainsa probleemina ilmnes CO2 kõrge kontsentratsioon (korduvalt üle 1370 ppm), mis normidest lähtuvalt võib ebamugavust ja halvenedes terviseriske tekitada.

Seminariruumis ja klassiruumis püsis CO₂ tase alla 700 ppm, mis vastab õppeastustele seatud normidele (täpsemalt peatükis 1.2). Normide piiresse jäid ka ruumide temperatuurid. Probleeme esineb relatiivse õhuniiskusega, mis peaks jääma vahemikku 40-60% (talvel minimaalselt 25%), kuid langes mõnel päeval 15%-le. Seega võiks kaaluda õhu niisutamist.

4.5 Järeldused

Mõõtmistulemuste kokkuvõtteks võib öelda, et sõltumata ruumi siseõhu tegelikust CO₂ kontsentratsioonist (SCD41 või ProDual HDH põhjal), jäävad LOÜ sensorite tulemused (CCS811 ja BME680) igal mõõtmisel samasse vahemikku. Selle põhjal on alust arvata, et LOÜ sensoritel on eCO₂ näidud piiratud fikseeritud vahemikuga, olenemata CO₂ tegelikust väärtusest. LOÜ sensorite näidud järgisid CO₂ taseme muutuseid, kuid seda võimendatult või moondunud baastasemega.

Vaadeldes sensoreid markide kaupa, on näha, et suurim lahknevus esines CCS811 tulemustes, kus keskmise eCO₂ vahe oli 400 ppm. SCD41 ja BME680 näitude diferents oli vaid 50 ppm, seejuures ei ole märgata erinevusi DFRoboti ja Pimoroni BME680 sensorite vahel. Samas aga jäi temperatuuri graafikul (lisa 5) silma, et kui kõikide teiste sensorite graafikud olid ühtlased, siis SCD41-2 graafik oli hüplik. On ebaselge, millest see täpsemalt tingitud oli – kas sensor on kahjustada saanud või on põhjuseks midagi muud.

Võrreldes SCD41 CO₂ mõõtmiste tulemusi ProDual HDH sensorite näitudega on näha, et nende erinevus on vaid 10 – 30 ppm, mis jääb SCD41 spetsifikatsioonide alusel veamarginaali (täpsemalt peatükis 2.1 – SEK-SCD41) ulatusse ning seega võib SCD41 sensorit pidada usaldusväärseks.

Igal mõõtmisel toimus seletamatu hüpe BME680 andmetes. Esmapilgul jäi mulje, et põhjuseks võib olla koristaja töötamine vastavas ruumis ning sensori mõjutamine kasutatavate kemikaalide või muu taolisega. Selle teooria seadis kahtluse alla viimane mõõtmine, kui sensorid olid jaotatud kahel erineval korrusel asuvate ruumide vahel ja mõlemas ruumis toimus hüpe samaaegselt. Seega võis tegemist olla mõne muu välise faktoriga, mis mööda ventilatsiooni ruumidesse levis ning sensoreid ärgitas. Paraku pole mõõtmiste ajal ruumis toimunu kohta piisavalt infot, mistõttu on võimatu öelda, mis päriselt sellel ajal juhtus ja näitude hüpped jäävad põhjendamata anomaaliateks. Täpsema põhjuse välja selgitamiseks, oleks tarvis teha täiendavaid mõõtmisi, mis ei kuulu selle töö skoopi.

Huvitava asjana selgus sundventilatsiooni olulisus eluruumides. Magamistoas teostatud mõõtmiste perioodil avati ruumi tuulutamiseks sageli akent, ent CO₂ graafikult on näha, et niipea, kui aken uuesti suleti, tõusis ühe tunniga CO₂ tase sama kõrgele tagasi, kui ta enne õhutamist oli. See viitab asjaolule, et ajutine akende avamine ruumis ei ole piisav ruumi pikemaajaliseks õhukvaliteedi tõstmiseks ega võrreldav pidevalt töötava sundventilatsiooniga. Selle eest aga on eristatavad ööd, mil magamistoa uks oli kinni ning millal lahti, mis viitab, et õhu liikumine tubade vahel on oluline õhu värskena hoidmiseks.

Töö eesmärgist lähtuvalt on olulisimaks tulemuseks tõdemus, et kasutatud sensoritest kõige täpsem oli SCD41. Seega võiks see olla eelistatud valik, kui sensori soetamise eesmärk on luua süsteem tegeliku CO₂ taseme mõõtmiseks. Kui tarbija vajaduseks on aga nt automatiseeritud süsteem ventilatsiooni reguleerimiseks õhukvaliteedi relatiivse kõikumise alusel, sobivad hästi ka BME680 ja CCS811. Seda sellepärast, et mõlemad sensorid reageerivad CO₂ muutustele ning ruumis toimuvale. Samuti on LOÜ sensorid põhjendatud valikuks, kui tarbija eesmärk ongi mõõta ruumis lenduvate orgaaniliste ühendite, mitte ainult CO₂ taset. Kui aga tarbijal on tarvis mõõta täpset CO₂ taset, on mõistlik võtta kasutusele CO₂ sensorid, mitte usaldada LOÜ sensoreid. Seega aitab sensorite tundmine valikuid teha, kuid määravaks on ikkagi tarbija vajadused ning eelarve.

Kokkuvõte

Töö käigus loodi 10 sensoriga terviksüsteem, kus iga sensor on ühendatud iseseisva ESP32 mikrokontrolleriga, mis oskab sensorist andmeid lugeda ning saata üle Wi-Fi Cumulocity serverisse. Loodud süsteemiga sooritati mõõtmised neljas paigas: ventileeritud kontoriruumis, seminariruumis (20 istekohta) ja klassiruumis (100 istekohta) ning ventileerimata magamistoas. Mõõtmisi teostati kokku nelja nädala jooksul, tulemustest koostati erineval viisil graafikuid, kokkuvõtteid ning võrdlusi.

Mõõtmistulemuste alusel saab väita, et nii BME680 kui ka CCS811 näidud on relatiivsed ning ebausaldusväärsed. Nii CCS811 kui ka BME680 reageerivad küll CO₂ muutustele, ent reaktsioonid on mõlema sensori puhul oluliselt võimendatud. Lisaks on mõlema sensori baastasemed nihkes reaalsusest, mis tähendab, et sensorid näitavad pidevalt tegelikust tasemest kõrgemat või madalamat tulemust. Lisaks on erinevatest mõõtmistulemustest näha, et sõltumata CO₂ minimaalse ja maksimaalse taseme erinevustest, on nii BME680 kui ka CCS811 mõõtmistulemused pidevalt samas vahemikus. Selle põhjal on alust arvata, et LOÜ sensoritel on eCO₂ näidud piiratud fikseeritud vahemikuga, olenemata CO₂ tegelikust väärtusest. Lisaks ilmnesid BME680 näitudes erinevad põhjendamatud anomaaliad, milleks olid järsud tõusud mõõtmistulemustes. Vastavaid stiimuleid tagantjärele tuvastada ei õnnestunud ning selliseid hüppeid teiste sensorite näitudes samal ajal ei kajastunud. Samas on nende sensorite valik põhjendatud, kui eesmärgiks on mõõta ruumis lenduvate orgaaniliste ühendite, mitte ainult CO₂ taset.

SCD41 on võrreldud sensoritest kõige täpsema baastasemega ja ei reageerinud muutustele üle. Viimases mõõtmises (klassiruumis ning seminariruumis) võrreldi SCD41 tulemusi Tartu Ülikooli Delta hoonesse paigaldatud statsionaarsete ProDual HDH sensorite tulemustega. Selgus, et SCD41 erineb ProDual HDH tulemustest vaid 10 – 30 ppm, mis jääb SCD41 infolehel kirjas oleva eksimismäära piiridesse. Seega saab SCD41 sensori lugeda usaldusväärseks.

Vaatamata tõdemusele, et SCD41 on BME680 ja CCS811 sensorist täpsem, sõltub õige valik siiski tarbija vajadustest. Näiteks ventilatsiooni automatiseeritud reguleerimisel piisab ka relatiivsest õhukvaliteedi muutuse tuvastamisest, nii et selle jaoks võib soovi korral kasutada ka LOÜ sensoreid. Samas, kui tarbijal on soov saada täpseid CO₂ tulemusi, on vaja kasutusele võtta SCD41 või sellega analoogne sensor. Otsustamisel tasub arvesse võtta ka asjaolu, et SCD41 (60€) on kasutatud LOÜ sensoritest (15-20€) kolm korda kallim.

Kasutatud kirjanduse loetelu

1. Ams. CCS811 datasheet, 2016. https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf (11.11.2021).
2. Bosch. BME680 – Datasheet, 2021. <https://www.bosch-sensortec.com/media/boschsensortec/downloads/datasheets/bst-bme680-ds001.pdf> (06.05.2022).
3. Britannica. Organic compound, 2019. <https://www.britannica.com/science/organic-compound> (23.04.2022).
4. Davõdovski, M. Tarkvaraline ja riistvaraline lahendus õhukvaliteedi jälgimiseks siseruumides. Tartu Ülikool, 2020. https://comserv.cs.ut.ee/ati_thesis/datasheet.php?id=69926&year=2020 (07.05.2022).
5. DFRobot (2020). BME680 datasheet. <https://www.farnell.com/datasheets/3161981.pdf> (12.11.2021).
6. Dodd, N., Donatello, S. & Cordella M. Level(s) indicator 4.1: Indoor air quality. Euroopa Komisjon, 2020. [https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level\(s\)%20documentation%20Indicator%204.1%20Publication%20v1.0.pdf](https://susproc.jrc.ec.europa.eu/product-bureau/sites/default/files/2020-10/20201013%20New%20Level(s)%20documentation%20Indicator%204.1%20Publication%20v1.0.pdf) (27.04.2022).
7. EVS. Hoonete energiatõhusus. Hoonete ventilatsioon. Osa 1: Sisekeskkonna lähteandmed hoonete energiatõhususe projekteerimiseks ja hindamiseks, lähtudes siseõhu kvaliteedist, soojuslikust keskkonnast, valgustusest ja akustikast. Moodul M1-6. Eesti standardi rahvuslik lisa. Eesti Standardimis- ja Akredeerimiskeskus, 2019. <https://www.evs.ee/et/evs-en-16798-1-2019-na-2019> (06.05.2022).
8. Espressif. ESP32 datasheet. Espressif Systems, 2022. https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32_datasheet_en.pdf (20.03.2022).
9. Fisher Scientific. Organic Compounds. <https://www.fishersci.com/us/en/products/80003050/organic-compounds.html> (23.04.2022).
10. Jose, J. & Sasipraba, T. (2019). Indoor air quality monitors using IOT sensors and LPWAN. – 2019 3rd International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI), 2019, pp. 633-637, doi: 10.1109/ICOEI.2019.8862647.
11. Kadir, A., Alias, M., Dzaki D., Din, N., Deros, S. & Haron, M. Cloud-Based IoT Air Quality Monitoring System. – 2021 26th IEEE Asia-Pacific Conference on Communications (APCC), 2021, pp. 121-127, doi: 10.1109/APCC49754.2021.9609897.

12. Kurnitski, J., Murdvee, M., Kõiv, T.-A., Teichmann, M. SISEKLIIMA, ÕPITULEMUS, TÖÖVILJAKUS. Tallinn: Tallinna Tehnikaülikooli Kirjastus, 2015.
13. Meyer, C. Overview of TVOC and Indoor Air Quality. Renesas Electronics Corporation, 2021. <https://www.renesas.com/us/en/document/whp/overview-tvoc-and-indoor-air-quality> (09.11.2021).
14. Muntean, I., Mois, G., & Folea, S. Development and Analysis of Low-Cost IoT Sensors for Urban Environmental Monitoring. INTERNATIONAL JOURNAL OF COMPUTERS COMMUNICATIONS & CONTROL, 16(5), 2021. <http://univagora.ro/jour/index.php/ijccc/article/view/4260> (15.11.2021).
15. Nave, R. Relative Humidity. Georgia State Univeristy, s.a. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Kinetic/relhum.html> (12.11.2021).
16. NOAA. Carbon dioxide peaks near 420 parts per million at Mauna Loa observatory. National Oceanic & Atmospheric Administration, 2021. <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/Coronavirus-response-barely-slows-rising-carbon-dioxide> (08.05.2022).
17. Oja, B. & Klementi, J. Ventilatsioonitöödeks mõeldud 30 miljonist jõuab koolidesse 13 miljonit. Eesti Rahvusringhääling, 2021. <https://www.err.ee/1608419294/ventilatsioonitodeks-moeldud-30-miljonist-jouab-koolidesse-13-miljonit> (05.05.2022).
18. Oracle. What is IoT?, s.a. <https://www.oracle.com/in/internet-of-things/what-is-iot/> (09.05.2022).
19. Pommer, S. Haridushoone sisekliima ja energiatarbe analüüs tartu ülikooli õppe- ja teadushoone Delta keskuse näitel. Taltech, 2021. <https://digikogu.taltech.ee/en/Item/9efc9cf7-2062-4727-bdf0-f901ab977e02> (07.05.2022).
20. Pro dual. Pro dual HDH datasheet, 2020. https://www.produal.com/shop/by_carbondioxideco/sku-1135040#userGuide (14.04.2022).
21. RIA. Küberturvalisuse aastaraamat 2022. Riigi Infosüsteemi Amet, 2022. https://www.ria.ee/sites/default/files/content-editors/kuberturve/ria_kyberturvalisuse_aastaraamat_2022_est_veeb.pdf (07.03.2022).
22. Saini, J., Dutta, M. & Marques, G. *Sensors for indoor air quality monitoring and assessment through Internet of Things: a systematic review*. Environ Monit Assess 193, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08781-6> (12.02.2022).

23. Sensirion. SCD4x datasheet, 2021. https://www.sensirion.com/fileadmin/user_upload/customers/sensirion/Dokumente/9.5_CO2/Sensirion_CO2_Sensors_SCD4x_Datasheet.pdf (12.11.2021).
24. Teja, R. Getting Started with ESP32 | Introduction to ESP32. Electronic Hub, 2021. <https://www.electronicshub.org/getting-started-with-esp32/> (16.12.2021).
25. Terviseamet. Siseõhk, s.a. <https://www.terviseamet.ee/et/keskkonnatervis/inimesele/siseohk> (06.05.2022).
26. Tervisekaitseõuded koolidele. – RT I, 28.08.2013, 10.
27. Valancauskaite, R. Siseruumide õhukvaliteedi mõõtja prototüüp. Tartu Ülikool, 2020. https://comserv.cs.ut.ee/ati_thesis/datasheet.php?id=69766&year=2020 (07.05.2022).

Lisad

I. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Karl Hendrik Bachmann**,

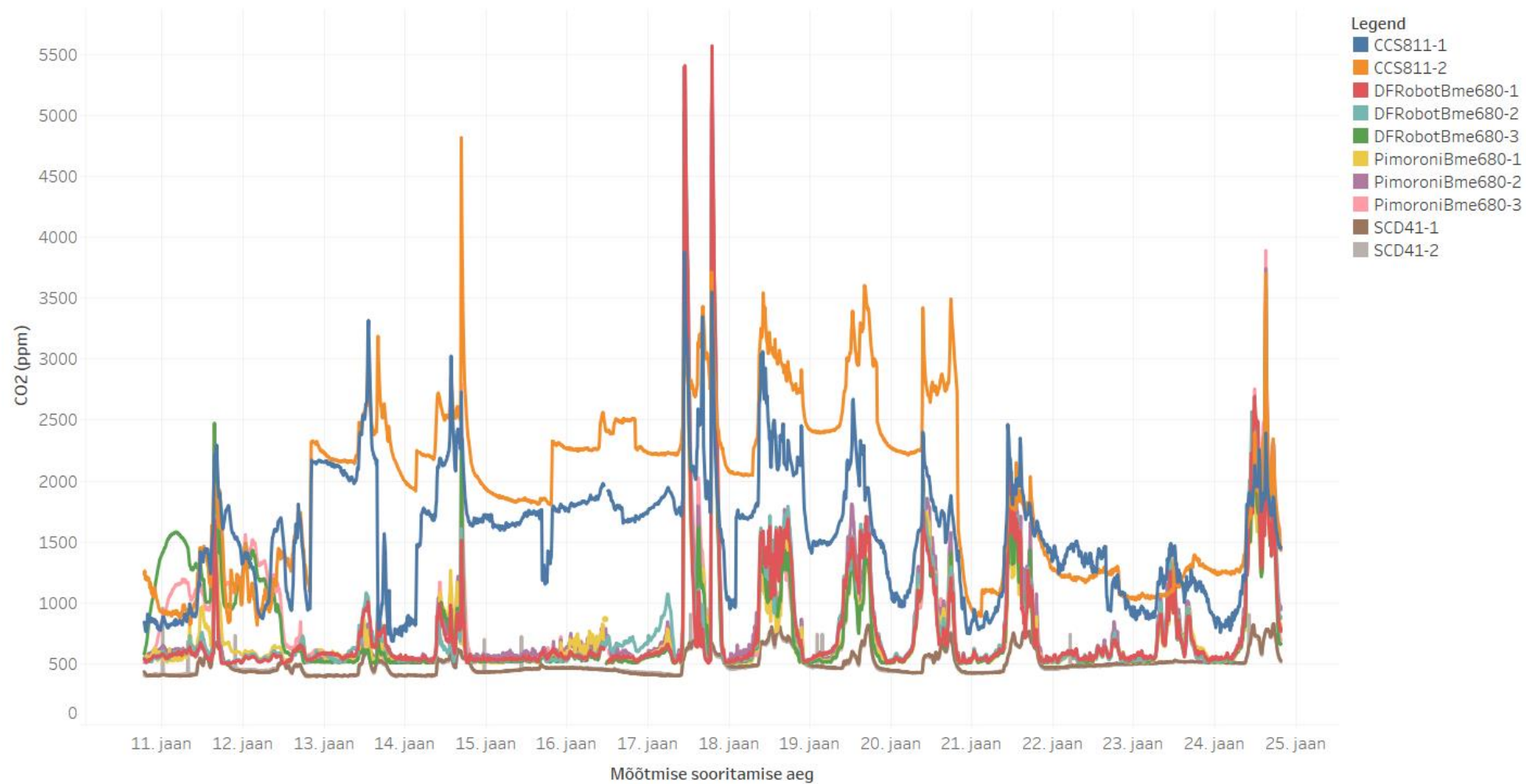
1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose **Õhukvaliteedi sensorite praktiline võrdlus CO2 taseme hindamiseks siseruumides**, mille juhendajad on Alo Peets ja Jakob Mass, reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commons'i litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.
3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.
4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Karl Hendrik Bachmann

07.05.2022

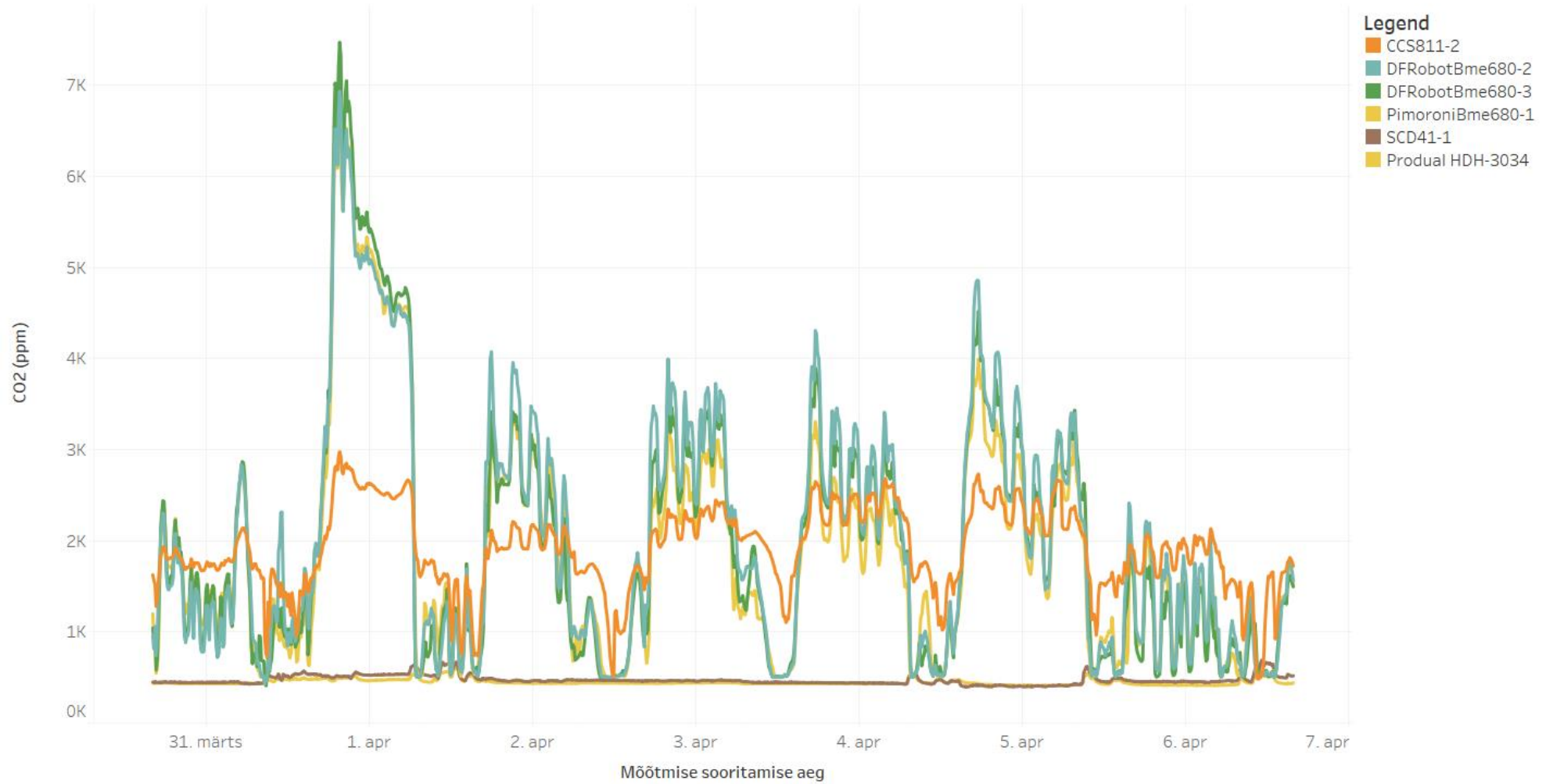
II. Delta 3033 CO2 mõõtmistulemused

CO2



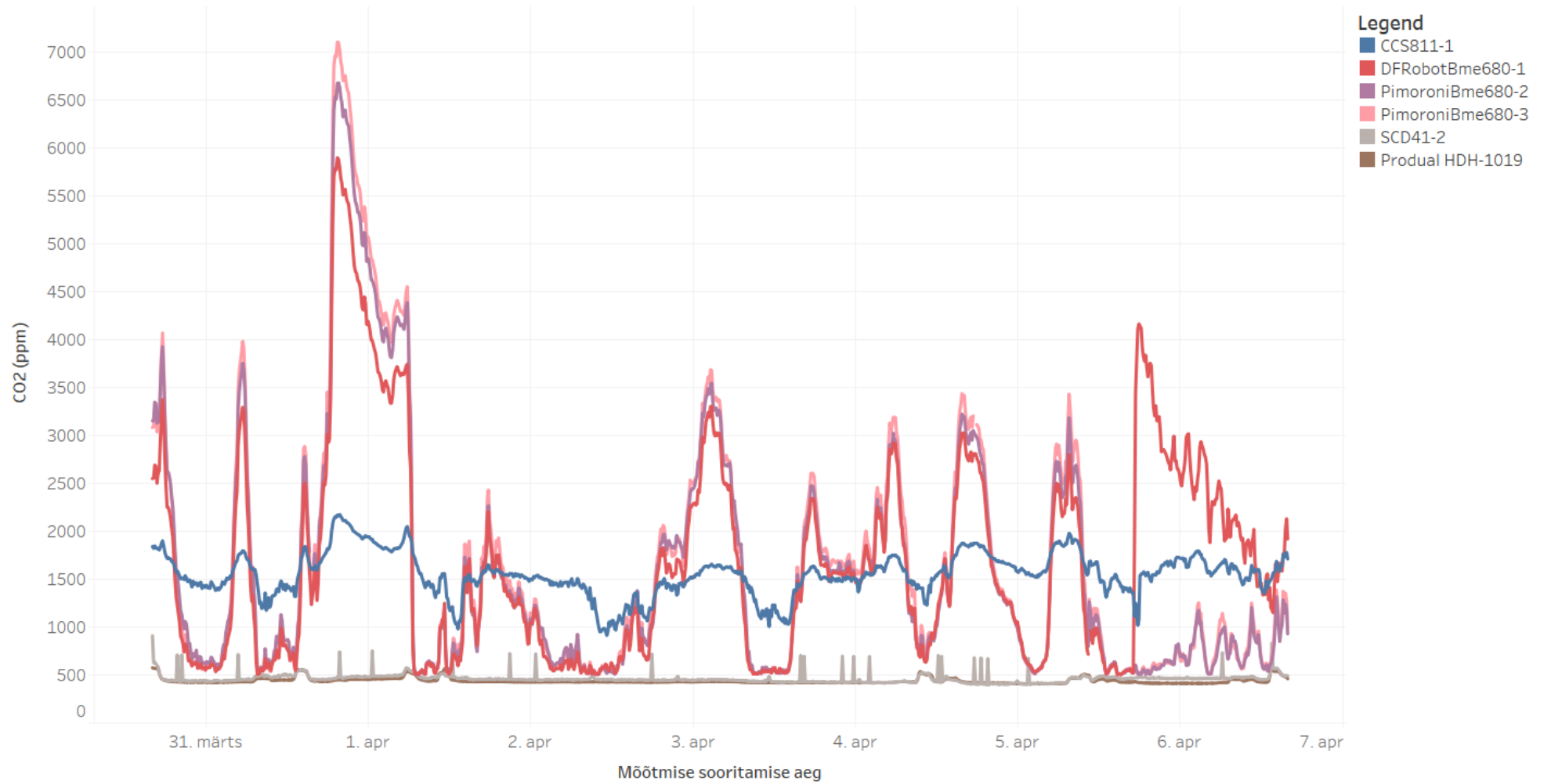
III. Delta 3034 CO2 mõõtmistulemused

Delta 3034 CO2

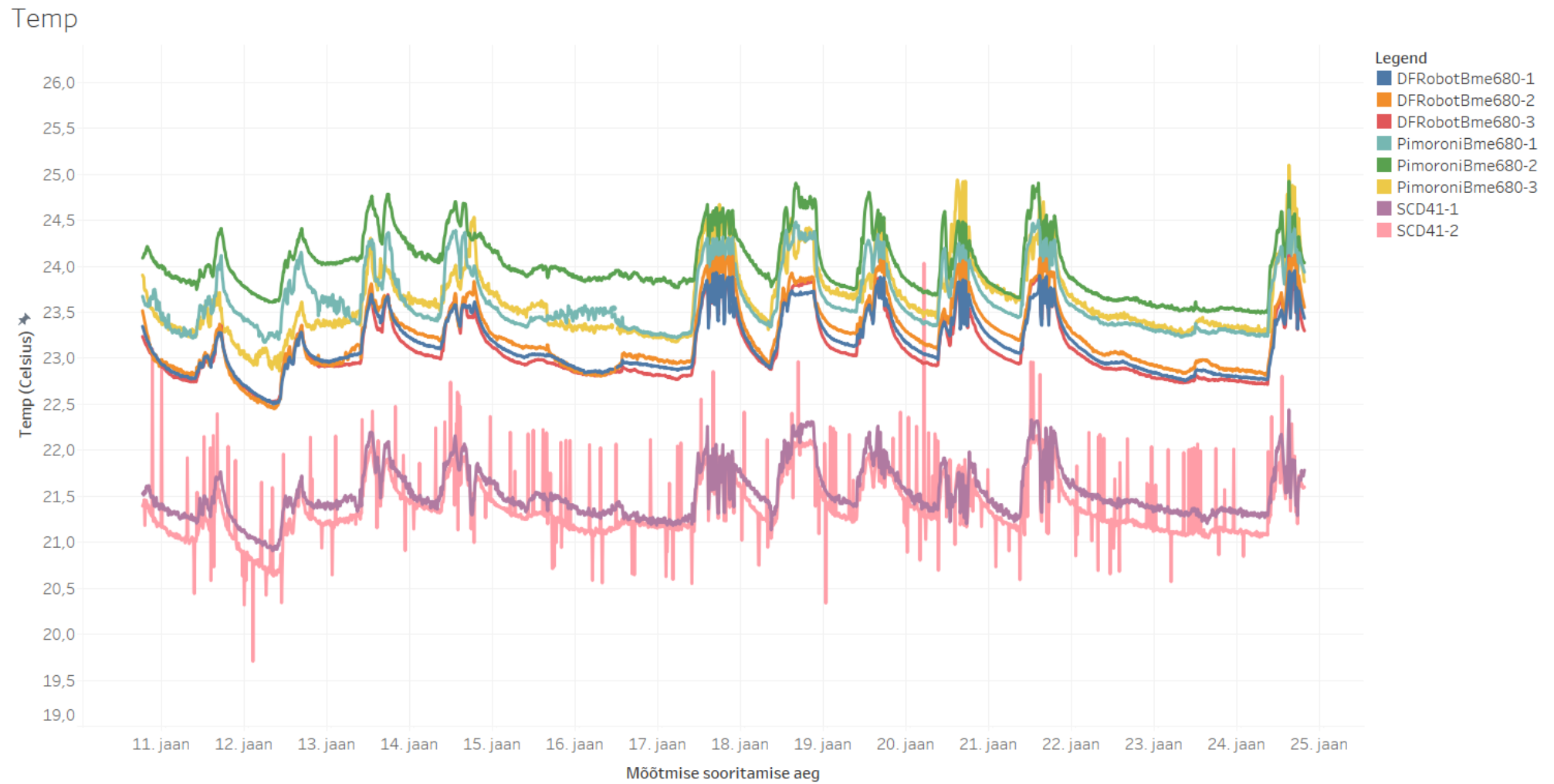


IV. Delta 1019 CO2 mõõtmistulemused

Delta 1019 CO2

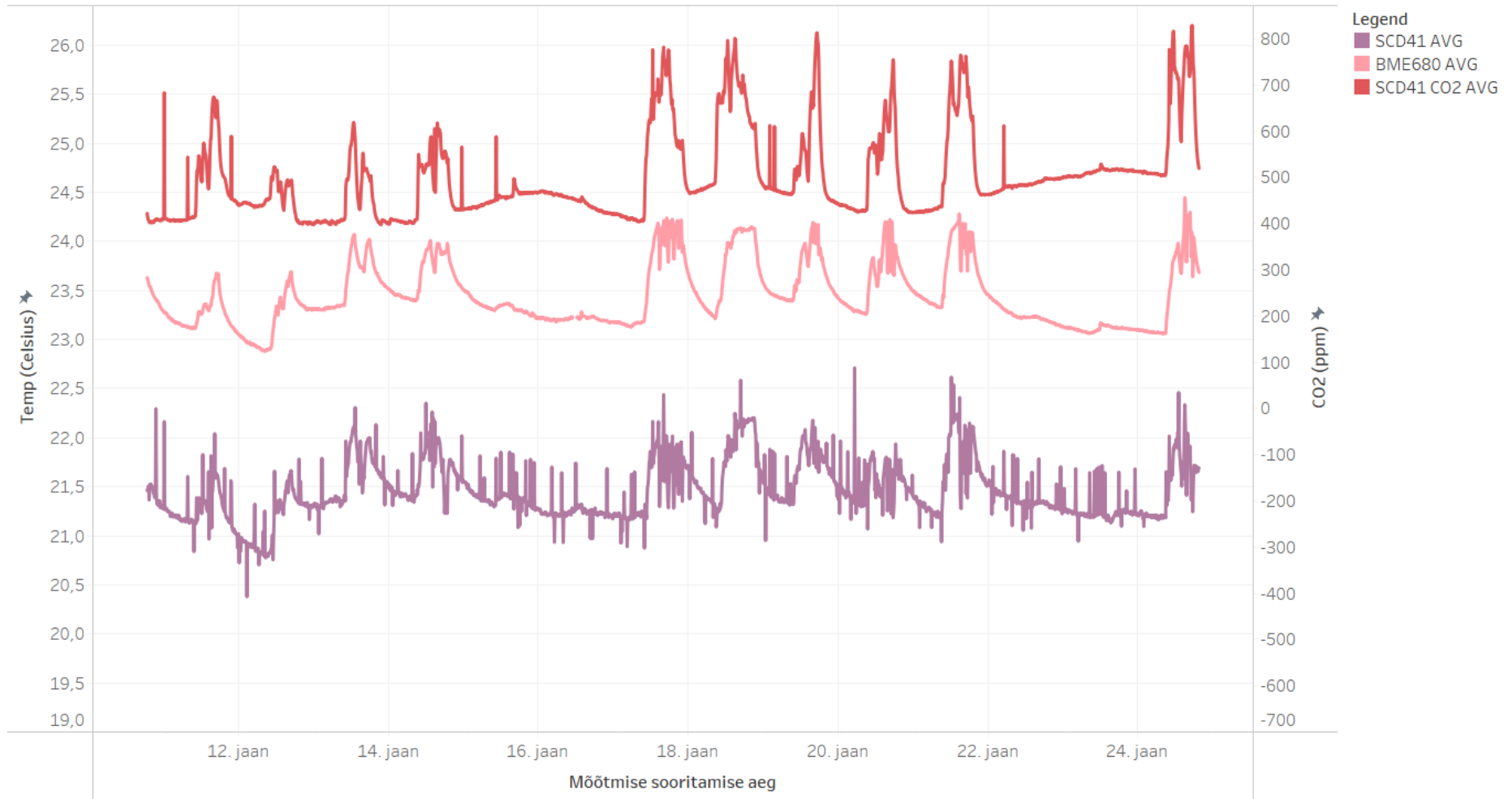


V. Delta 3033 temperatuuri tulemused



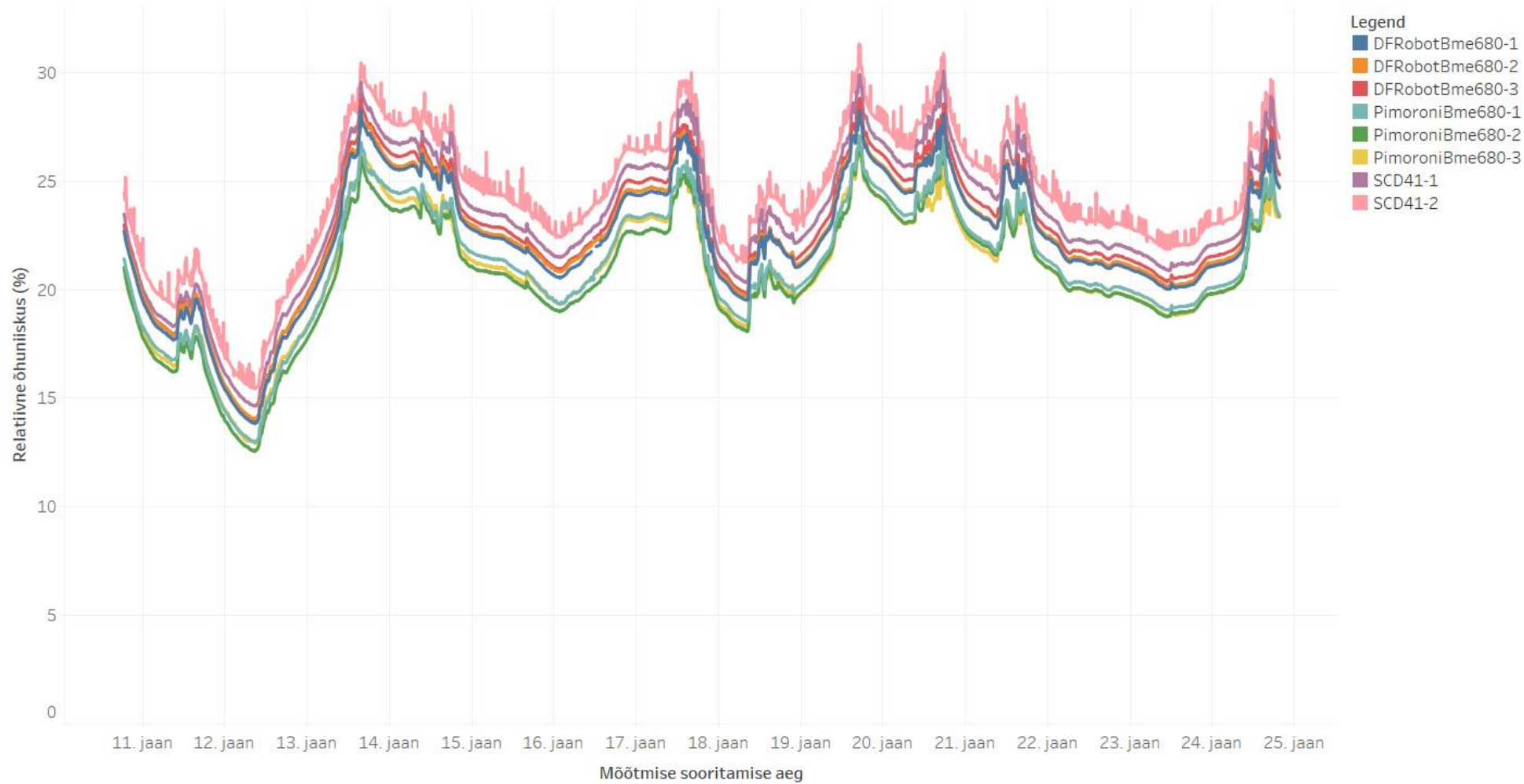
VI. Delta 3033 temperatuuri ja CO2 keskmistatud tulemused

Temp avg + CO2



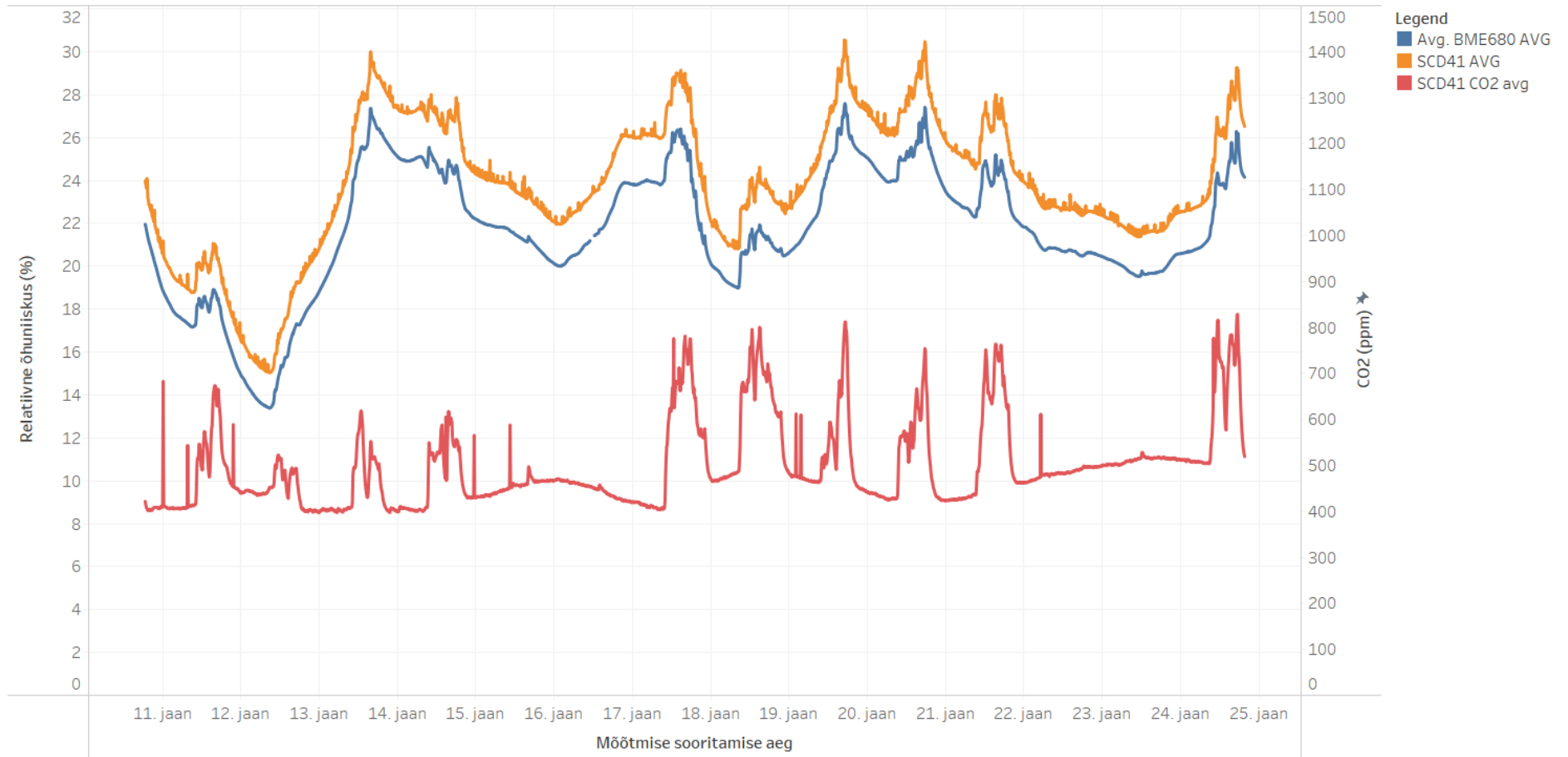
VII. Delta 3033 relatiivse õhuniiskuse tulemused

Õhuniiskus



VIII. Delta 3033 relatiivse õhuniiskuse ja CO2 keskmistatud tulemused

Õhuniiskus avg + CO2



IX. Õpperuumide CO2 tulemuste tabel

	Miinumum (ppm)	Maksimum (ppm)	Keskmine (ppm)
Delta 3034 (seminariruum)			
Produal HDH - 3034	404.25	615.21	446.72
CCS811-2	481.12	2977.23	1907.33
Pimoroni BME680-1	433.33	6946.38	1878.37
DFRobot BME680-2	428.90	6933.54	2043.77
DFRobot BME680-3	408.62	7473.20	1969.07
SCD41-1	396.28	688.82	471.00
Delta 1019 (klassiruum)			
Produal HDH - 1019	407.57	576.48	437.88
CCS811-1	912.87	2173.51	1548.15
Pimoroni BME680-2	503.08	6673.51	1590.86
Pimoroni BME680-3	503.62	7099.45	1646.62
DFRobot BME680-1	503.32	5893.92	1693.79
SCD41-2	397.66	909.27	461.91