



CHALMERS



Lågkostnadssensorer för kartläggning av luftföroreningar

Utveckling och utvärdering av en sensorplattform

Kandidatarbete inom Mekanik och maritima vetenskaper

Sebastian Boström
Isak Drevander
Péter Gaal
Filip Hellander
Elsa Zabel

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2022
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2022:03

Lågstnadssensorer för kartläggning av luftföroreningar

Utveckling och utvärdering av en sensorplattform
Kandidatarbete i mekanik och maritima vetenskaper

Sebastian Boström

Isak Drevander

Péter Gaal

Filip Hellander

Elsa Zabel



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Förbränning och framdrivningssystem

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2022

Lågkostnadssensorer för kartläggning av luftföroreningar
Utveckling och utvärdering av en sensorplattform
Sebastian Boström
Isak Drevander
Péter Gaal
Filip Hellander
Elsa Zabel

©

Sebastian Boström
Isak Drevander
Péter Gaal
Filip Hellander
Elsa Zabel, 2022.

Handledare: Jonas Sjöblom och Patrik Wåhlin , Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Examinator: Mats Andersson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2022
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Förbränning och framdrivningssystem
Chalmers tekniska högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Sensorplattformen LCAQMP

Skrivet i L^AT_EX
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2022

Lågkostnadssensorer för kartläggning av luftföroreningar
Utveckling och utvärdering av en sensorplattform
Sebastian Boström
Isak Drevander
Péter Gaal
Filip Hellander
Elsa Zabel
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola

Abstract

Since the inception of industrialism, air pollution has been a growing environmental and health problem. Every year, an estimated seven million people die from diseases caused by air pollution, and according to WHO, 99% of the global population lives in areas where the proportion of hazardous particles exceeds the exposed limit value.

Historically, air quality has been measured with immobile and expensive measuring devices. The bachelor thesis is aimed towards enabling measurements with a low-cost sensor platform, also called LCAQMP (Low Cost Air Quality Measuring Platform). These platforms have the ability to measure PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 , VOC, NO_2 , O_3 , temperature, relative humidity, position and time.

The purpose of this work is to further develop the measurement platform LCAQMP by increasing user-friendliness and calibrating sensors, while maintaining the low price. The aim is also to collect relevant data that helps people understand the seriousness of air pollution.

LCAQMP was mounted in a new box and on a new center plate that contributed to a more airtight platform. The software was improved and made easier to read and more user-friendly.

The platform was used for measurements both in the lab environment and in the field. A measurement on the roof of Femman showed how the air quality changes over a two-week period. In the lab, it turned out that the platforms can measure differences in CO_2 values.

Finally, further work on LCAQMP is needed to further calibrate, improve software and hardware to obtain even more reliable data to demonstrate the potential hazards of air pollution.

Keywords: LCAQMP, air quality, air quality measurements, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 .

Sammanfattning

Sedan industrialismens start har luftföroreningar varit ett växande miljö- och hälsoproblem. Årligen uppskattas sju miljoner människor dö i sjukdomar orsakade av luftföroreningar och enligt WHO bor 99% av den globala befolkningen inom områden där andelen farliga partiklar överstiger utsatt gränsvärde.

Historiskt har luftkvalité mätts med otympliga och dyra mätare. Kandidatarbetet jobbar emot att möjliggöra mätningar med lågkostnadssensorplattform även kallad LCAQMP (Low Cost Air Quality Measuring Platform). Dessa plattformar har möjlighet att mäta PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , VOC, NO_2 , O_3 , temperatur, relativ luftfuktighet, position och tid.

Syftet med detta arbete är att vidareutveckla mätplattformen LCAQMP genom att öka användarvänligheten, kalibrera sensorer och behålla det låga priset. Syftet är även att samla in relevant data som hjälper människor att förstå allvaret med luftföroreningar.

LCAQMP monterades i en ny låda och på en ny mittenplatta som bidrog till en mer lufttät plattform. Mjukvaran förbättrades och gjordes mer lättläst och användarvänlig.

Plattformen användes för mätningar både i labbmiljö och i fält. En mätning på Femmans tak visade på hur luftkvalitén ändras över en tvåveckorsperiod. I labbet visade det sig att mätarna kan mäta skillnader i CO_2 värden.

Slutligen behövs det ett vidarearbete med LCAQMP för att ytterligare kalibrera sensorerna, förbättra mjukvara och hårdvara får att få ännu mer tillförlitlig data för att påvisa den potentiella risken med luftföroreningar.

Nyckelord: LCAQMP, luftkvalitet, luftkvalitetsmätningar, PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 .

Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete som sker på M2 institutionen, genomfört på Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet har utförts av Sebastian Boström, Isak Drevander, Péter Gaal, Filip Hellander och Elsa Zabel. Projektet genomfördes under vårterminen 2022.

Vi vill rikta ett stort tack våra handledare Jonas Sjöblom och Patrik Wåhlin, samt examinerator Mats Andersson för att ha bidragit med värdefull kunskap och resurser som har lett projektet framåt. Vi vill även tacka Ågot Watne och Erik Svensson från Miljöförvaltningen som bidrog till givande mätningar, Johan Mellqvist för mätningar med AAG och Lena Lang från Teknisksprånget.

Sist men inte minst vill vi tacka Prototyplabbet och eXPerimentverkstaden på Chalmers för erbjuden handledning, verktyg och 3D-skrivare.

Ordlista

I kommande kapitel presenteras begrepp och förkortningar som används under arbetet, i alfabetisk ordning:

AAG: AAG är en partikelgenerator som används för att kalibrera samt funktions-testa LCAQMP, AAG står för Atomizer Aerosol Generator.

Adafruit Adalogger Feather M0: Adafruit Adalogger Feather M0 är ett utvecklingskort som används för att spara ner data på ett SD-kort alternativt direkt på datorn.

Arduino: Arduino är ett mikrokontrollerkort som är öppen hårdvara.

BME680: är en sensor från Adafruit som mäter VOC, temperatur, luftfuktighet och lufttryck.

CCS811: är en sensor från APM och mäter VOC samt CO₂.

CozIR-LP: CozIR-LP är en CO₂-mätare.

Diffusionstork: En diffusionstork är en behållare luften strömmar igenom innan den åker in i LCAQMP. Den använder silica för att minska luftfuktigheten.

IDE: IDE är en mjukvara som är utvecklingsmiljö inom programmering.

I.U.: Förkortning för "ingen uppgift".

LCAQMP: Förkortning för Low Cost Air Quality Measurement Platform, ett luft-sensorpaket som mäter luftföroreningar utvecklat av studenter på Chalmers tekniska högskola. I rapporten benämns "en LCAQMP" och "en enhet" synonymt.

Membranpump: Membranpump är en pump som flyttar en fluid med ett elastiskt membran.

NO_x: Kväveoxider innefattar kvävemoxid (NO) och kvävedioxid (NO₂). NO är en färglös, giftig och luktfri gas medan NO₂ är en brunröd giftig gas med skarp stickande lukt.

MFC: MFC står för Mass Flow Controller vilket är en självreglerande typ av flödeskontroll som används för att mäta samt kontrollera massflödet genom en ventil.

NO₂-A43F: är en sensor som mäter NO₂.

OX-A431: är en sensor som mäter både O₃ och NO₂.

PM: PM står för particulate matter vilket innebär partiklar i luften som exempelvis rök och damm.

PM_{2,5} : Är partiklar som har en diameter på 2,5 mikrometer eller mindre.

PM₁₀ : Är partiklar som har en diameter på 10 mikrometer eller mindre.

RH: Förkortning för relativ fuktighet (eng. relative humidity).

SDS011: Är en sensor som mäter både PM_{2,5} och PM₁₀ via ljusspridningsteknik som mäter koncentrationen av partiklar i luften.

UFP: Står för ultrafina partiklar och dessa är partiklar med storleken mellan 50-100 nm.

VOC: VOC är lättflyktiga organiska föreningar exempelvis kolväten, det bidrar till bildandet av marknära ozon.

Innehåll

Lista över Akronymer	viii
Figurer	xv
Tabeller	xvii
1 Inledning	1
1.1 Miljökvalitetsnormer och samhälleliga kostnader till följd av hälso- problem	2
1.2 Mäta luftkvalitet med lågkostnadssensorer	2
1.2.1 Diffusionstork	4
1.2.2 SDS011	4
1.2.3 BME680	5
1.2.4 CCS811	5
1.2.5 OX-A431 och NO2-A43F	5
1.2.6 COzIR-LP	5
1.2.7 Adafruit Ultimate GPS	5
1.2.8 Sniffer bike sensor kit	6
1.3 Syfte	7
1.4 Frågeställningar	7
1.5 Problemformulering	7
1.6 Avgränsningar	8
1.6.1 Tid	8
1.6.2 Ekonomi	8
1.6.3 Mätvärden	8
1.6.4 Geografi	8
2 Teori	9
2.1 Luftföroreningar	9
2.1.1 Partiklar	9
2.1.2 Koldioxid	10
2.1.3 VOC	10
2.1.4 Kvävedioxid	10
2.1.5 Ozon	11
2.2 Kommunikationsprotokoll	11
2.2.1 SPI	11
2.2.2 UART	11

2.2.3	I2C	12
2.3	Sensorernas mätprinciper	12
2.3.1	MOX-sensorer	12
2.3.2	Optiska sensorer	12
2.3.3	Elektrokemiska sensorer	13
2.4	Termodynamik för gasblandningar	13
2.4.1	Partialtryck	13
2.4.2	Ångtryck	14
2.4.3	Relativ luftfuktighet	14
2.5	Krafter på partiklar	15
2.6	Regressionsanalys	15
2.6.1	Antaganden och avgränsningar	16
3	Metoder	17
3.1	Referensmätningar	17
3.1.1	Referensmätning med NO ₂ - och CO ₂ -sensorer	17
3.1.2	MFC-mätning med ny och gammal låda	18
3.2	Laboratoriemätningar	20
3.2.1	Batteritest i skåp	21
3.2.2	Mätning med partikelgenerator	21
3.3	Fältmätningar	22
3.3.1	Mätning på Femmans tak	22
3.3.2	Mätning Chalmers campus	23
3.3.3	Mätning i Slottsskogen och Kungsparken	23
3.3.4	Mätning i Fysikens Klätterlabb	25
3.4	Utveckling av hårdvara	25
3.4.1	Låda	25
3.4.2	Mittenplatta	26
3.5	Utveckling av mjukvara	26
3.5.1	Arduino	26
3.5.2	MATLAB	27
3.6	Kalibrering av sensorer	27
4	Resultat och analys	29
4.1	Referensmätningar	29
4.1.1	Referensmätning med NO ₂ - och CO ₂ -sensorer	29
4.1.2	MFC-mätning med ny och gammal låda	32
4.2	Laboratoriemätningar	36
4.2.1	Batteritest i skåp	36
4.2.2	Mätning med partikelgenerator	36
4.3	Fältmätningar	38
4.3.1	Mätning på Femmans tak	38
4.3.2	Mätning Chalmers campus	42
4.3.3	Mätning i Slottsskogen och Kungsparken	44
4.3.4	Mätning på Fysikens Klätterlabb	47
4.4	Utveckling av hårvara	49
4.4.1	Låda	49

4.4.2	Mittenplatta	49
4.5	Utveckling av mjukvara	50
4.5.1	Arduino	50
4.5.2	Matlab	50
5	Diskussion	51
5.1	Sensorernas funktionalitet	51
5.1.1	COzIR-LP	51
5.1.2	SDS011	52
5.1.3	OX-A431 och NO2-A43F	52
5.1.4	CCS811	52
5.1.5	BME680	53
5.2	Matlab-kodens påverkan på avläst resultat	53
5.3	Jämförelse mellan LCAQMP och Sniffer bike sensor kit	55
5.4	För- och nackdelar med att mätare förvaras i en låda	56
5.5	Utvärdering av den nya låd-designen	56
5.5.1	Lådan	56
5.5.2	Mittenplattan	57
5.6	Förbättringspotential hos LCAQMP	57
5.7	Relevans av dygnsmedelvärden kontra timmedelvärde	58
6	Slutsats	59
6.1	Mätplattformens användarvänlighet	59
6.2	Sensorplattformens tillförlitlighet	59
6.3	Uppmätta värden jämfört med miljökvalitetsnormen	60
6.4	Rekommendationer för fortsatt arbete	60
	Bibliography	61
A	Ritning på mittenplatta	I
B	Datablad för nya låda	III
C	Kopplingsschema	V
D	Förutsättningar under referensmätning	VII

Figurer

1.1	Ingående komponenter i LCAQMP, från [12] återgiven med tillstånd.	3
1.2	(a) Luftgången genom LCAQMP. (b) Diffusionstork med och utan silikagel. Båda bilderna är återgivna med tillstånd, från [13] resp. [12].	4
1.3	Sniffer bike sensor kit.	6
2.1	Fasdiagram för vatten (ej skalenligt). Avläsning av trycket längs den rödmarkerade kurvan ger ångtrycket. Figuren är omarbetad från [43, s. 167].	14
2.2	Figuren illustrerar en linjär kurvanpassning (grön) till data (blå) där avvikelserna (röd) antas vara slumpmässiga avvikelser från förhållandet mellan variablerna x och y . Grafen är omarbetad från [46].	16
3.1	Schematisk bild på mätuppställning av referensmätning med NO ₂ - och CO ₂ -sensorer.	17
3.2	Schematisk bild på mätuppställning för referensmätning av CO ₂	19
3.3	Schematisk bild på mätuppställning vid partikelmätning.	21
3.4	LCAQMP 5 och 6 placerade i en plastlåda på Femmans tak	22
3.5	Mätarplacering Chalmers Tvärgata. Karta skala 1:1900 ©Lantmäteriet.	23
3.6	Placering av mätare i Kungsparken. Karta skala 1:4900 ©Lantmäteriet.	24
3.7	Placering av mätare i Slottsskogen. Karta skala 1:6000, ©Lantmäteriet.	25
4.1	Uppmätt NO ₂ -data från LCAQMP från den första MFC-mätningen.	29
4.2	Uppmätt CO ₂ -data från LCAQMP från den första MFC-mätningen.	30
4.3	Kalibrerad CO ₂ -data från MFC-mätning.	32
4.4	Resultatet från försök 1 där enhet 5 och 8 hade pump och enhet 6 och 9 inte hade det. Enhet 2 var kortsluten under försöket.	33
4.5	Resultatet från försök 2 där enhet 2, 5 och 9 hade diffusionstork och enhet 6 och 8 inte hade det.	34
4.6	Förstorad bild på försök 2 där CO ₂ -halten ska bli noll.	35
4.7	Resultatet från försök 3 där enhet 6 och 8 inte längre var omslutna av plastfolie.	35
4.8	Uppmätt halt partiklar samt förhållande för partikelmätning med AAO.	37
4.9	Uppmätt data av kvävedioxid från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde och minutmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.	38
4.10	Uppmätt relativ luftfuktighet från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.	39

4.11	Uppmätt temperatur från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.	40
4.12	Dygnsmedelvärde $PM_{2,5}$ för LCAQMP 5 och 6 jämfört med Miljöförvaltningens mätare.	41
4.13	Dygnsmedelvärde PM_{10} för LCAQMP 5 och 6 jämfört med Miljöförvaltningens mätare.	41
4.14	Uppmätt resultat av $PM_{2,5}$ vid mätning på Chalmers campus.	42
4.15	Uppmätt resultat av PM_{10} vid mätning på Chalmers campus.	43
4.16	Uppmätt resultat av luftfuktighet vid mätning på Chalmers Campus.	44
4.17	Uppmätta värden på $PM_{2,5}$ för LCAQMP 8 och 9 samt Sniffer bike 790.	45
4.18	Uppmätta värden på $PM_{2,5}$ för LCAQMP 2, 3, 4 och 5 samt Sniffer bike 801.	45
4.19	Relativ luftfuktighet i Slottskogen och Kungsparken för LCAQMP 2, 3, 4, 5, 8 och 9 samt Sniffer bike 790 och 801.	46
4.20	Uppmätt halt PM_{10} och $PM_{2,5}$ under mätning i Klätterlabbet.	47
4.21	Förhållande mellan PM_{10} och $PM_{2,5}$ i klätterlabbet.	48
4.22	Nya lådan med diffusionstork och ställningar.	49
4.23	Mittenplattan från (a) ovansida (b) undersida.	50
5.1	Savitzky–Golay jämfört med Moving mean. Datan är från mätningen som beskrivs i avsnitt 3.1.2.	54
5.2	Samma mätdata som i figur 5.1 fast ofiltrerad.	54
5.3	Ny och gammal mittenplatta.	57
A.1	Ritning på ny mittenplattan.	I
B.1	Datablad på ny låda (sida 1).	III
B.2	Datablad på ny låda (sida 2).	IV
C.1	Kopplingsschemat för LCAQMP.	V

Tabeller

1.1	Ingående sensorer i LCAQMP och vad de mäter, hämtat från respektive sensors datablad [15], [16], [17], [18], [19].	3
1.2	Ingående sensorers mätprincip och kommuniaktionsprotokoll, hämtat från respektive sensors datablad [15][16][17][18][19].	4
3.1	Förändring av ansatt gasblandning genom MFC.	18
3.2	Mängden syntetisk luft och CO ₂ från MFC:n vid försök 1.	19
3.3	Mängden syntetisk luft och CO ₂ från MFC:n vid försök 2.	20
3.4	Mängden syntetisk luft och CO ₂ från MFC:n vid försök 3.	20
3.5	Placeringar av mätare på Chalmers Tvärgata.	23
3.6	Placeringar av mätare i Slottsskogen och Kungsparken.	24
4.1	Koefficienter för kalibrerad CO ₂ -data.	31
4.2	Respektive LCAQMP:s batteritid redovisat i timmar.	36
D.1	Förutsättningar för alla LCAQMP under experimentet som beskrivs i avsnitt 3.1.2.	VII

1

Inledning

Sedan industrialismens start har luftföroreningar varit ett växande miljö- och hälsoproblem. Årligen uppskattas sju miljoner människor dö i sjukdomar orsakade av luftföroreningar och enligt WHO bor 99% av den globala befolkningen inom områden där andelen farliga partiklar överstiger nuvarande utsatt gränsvärde [1]. Vanligt förekommande skadliga ämnen i atmosfären är kolmonoxid (CO), kvävedioxid (NO₂), svaveldioxid (SO₂), ozon(O₃) samt ultrafina partiklar (PM₁₀, PM_{2,5} där PM står för particle matter) vilka uppkommer vid förbränning. Utöver att vara i direkt anknytning till den globala uppvärmningen orsakar dessa partiklar även sjukdomar som stroke, lungcancer och kol [2].

I Europa exponeras cirka 90% av invånare i städer för halter av luftföroreningar som anses ligga på en skadlig nivå [3]. Den förväntade livslängden i EU har bedömts minska med över åtta månader som följd av utsläpp av fina partiklar i luften (PM_{2,5}). Utöver att luftföroreningar skadar människors hälsa skadar de även miljön. En betydande del i Öst-, Syd- och Centraleuropa utsätts för höga halter av ozon som är skadligt för jordbruket.

För att minska nationella utsläpp av vissa luftföroreningar, kväveoxider, små partiklar, ammoniak, svaveldioxider och flyktiga organiska ämnen utom metan, har EU infört ett takdirektiv [4]. Detta takdirektiv består av bestämmelser som medlemsländerna ska utföra till år 2020 och år 2030 och uppger den högsta nivån av luftföroreningar som får släppas ut.

I Sverige har flera omfattande epidemiologiska studier gjorts vilka visar på att luftföroreningar i stora och mellanstora städer leder till allvarliga hälsoproblem hos invånarna [5]. Det årliga antalet dödsfall orsakat av luftföroreningar uppskattades till 7600 personer i en svensk luftexponeringsrapport från 2018. Uppskattningen baserades på data från 2015.

Regeringen beslutade den 28 mars 2019 om ett svenskt luftvårdsprogram, och den 1 april 2019 rapporterades detta in till EU [6]. Detta luftvårdsvårdsprogrammet innehåller insatser som Sverige behöver implementera för att uppnå EU:s utsläppstak. Dessa innefattar bland annat att fasa ut äldre dieseldrivna fordon och att förbättra förbränningsanläggningars reningsteknik för att minska utsläppen av kväveoxider.

Förutom de nationella och internationella miljömålen har även Göteborgs Stad definierat ett eget miljömål som lyder att "luften i Göteborg ska vara så ren att den

inte skadar människors hälsa eller ger upphov till återkommande besvär” [7]. För att uppnå detta har tre delmål satts upp vad gäller minskad förekomst av kvävedioxid (NO_2), flyktiga organiska kolväten (VOC där VOC står för Volatile Organic Compounds), samt övriga partikelföroreningar ($\text{PM}_{2,5}$ och PM_{10}).

1.1 Miljökvalitetsnormer och samhällseliga kostnader till följd av hälsoproblem

Riksdagens miljödepartement har i Luftkvalitetsförordningen specificerat ett antal miljökvalitetsnormer för utomhusluft med syfte att bidra till ett ökat skydd för miljön samt befolkningens välmående [7]. Det finns miljömål på både nationell, regional och lokal nivå och innefattar dygnsmedelvärde samt årsmedelvärde. För luft utomhus finns miljökvalitetsnormer för bland annat kvävedioxid, kolmonoxid och partiklar i storlek $\text{PM}_{2,5}$ och PM_{10} . De miljökvalitetsnormer som anses relevanta för arbetet är att dygnsmedelvärdet för PM_{10} inte får övergå $50 \mu\text{g m}^{-3}$ i dygnsmedelvärde och $40 \mu\text{g m}^{-3}$ i ett årsmedelvärde. För $\text{PM}_{2,5}$ får partikelhalterna inte överskrida $25 \mu\text{g m}^{-3}$ i medelvärde per år. De lokala miljömålen som Göteborgs Stad fastställt för partiklar är att medelvärdet över ett år för $\text{PM}_{2,5}$ max får uppnå $10 \mu\text{g m}^{-3}$. För PM_{10} får medelvärdet för mängden partiklar inte överträda $30 \mu\text{g m}^{-3}$ på ett dygn.

Trafikverket har genomfört ett studie där luftkvalitén i tågstationsmiljöer har undersökts [8]. I rapporten uppskattades kostnaderna för $\text{PM}_{2,5}$ vara 7800 kr per $\mu\text{g m}^{-3}$ intagen luft per person och år till följd av utsläpp från avgaser och 1600 kr följd av partiklar i storlek PM_{10} orsakade av slitage på bland annat tågräls och bromsar.

1.2 Mäta luftkvalitet med lågkostnadssensorer

Ett av problemen som kan stötas på vid mätning av luftkvalité är att datan kan skilja mycket beroende på varifrån den hämtas. I Göteborg finns det två fasta mätpunkter och tre mobila enheter [9], men det kan fortfarande vara intressant att undersöka hur luftkvalitén ser ut mellan mätpunkterna eller på andra gator. Detta problem har man i Tyskland försökt lösa genom att använda sig av ”Medborgar-Vetenskap” (Citizen Science), där man engagerar medborgare att med hjälp av enklare och billigare mätplattformar hjälpa till att samla in data [10], [11]. Den data som samlas in är inte nödvändigtvis fullt ut tillförlitlig, på grund av kvalitén på sensorerna, men mängden data gör att kan korrelationer och skillnader kan hittas, vilket kan hjälpa till vid beslut om mer precisa mätningar.

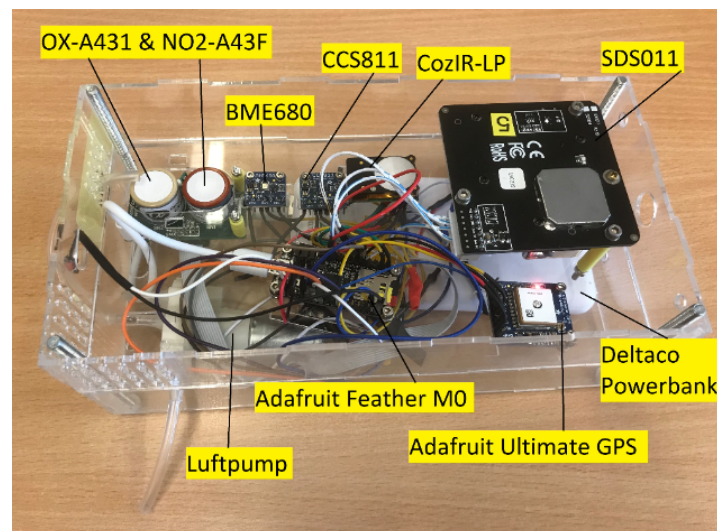
Detta kandidatarbete bygger vidare på två tidigare kandidatarbeten utförda år 2020 [12] och 2021 [13] på Chalmers tekniska högskola. Arbetet fokuserar på LCAQMP, vilket står LowCost Air Quality Measuring Platform, som är en mätplattform som kan mäta flertalet luftföroreningar, temperatur och relativ luftfuktighet [12], [13]. Luftmätningarna utförs av sex stycken sensorer vars namn, mätprincip och vad som mäts redovisas i tabell 1.1. Utöver sensorerna finns Adafruit Ultimate GPS som anger

tidsdata och position [14]. Alla ingående komponenter i LCAQMP är kopplade till utvecklingskortet Adafruit Adalogger Feather M0 som läser data från sensorerna och skriver över den till ett micro-SD-kort sammankopplat med brädan [13]. Enheten startas genom att ett batteri, Delcato Powerbank, kopplas in i Adafruit Adalogger Feather M0 med hjälp av en sladd.

Tabell 1.1: Ingående sensorer i LCAQMP och vad de mäter, hämtat från respektive sensors datablad [15], [16], [17], [18], [19].

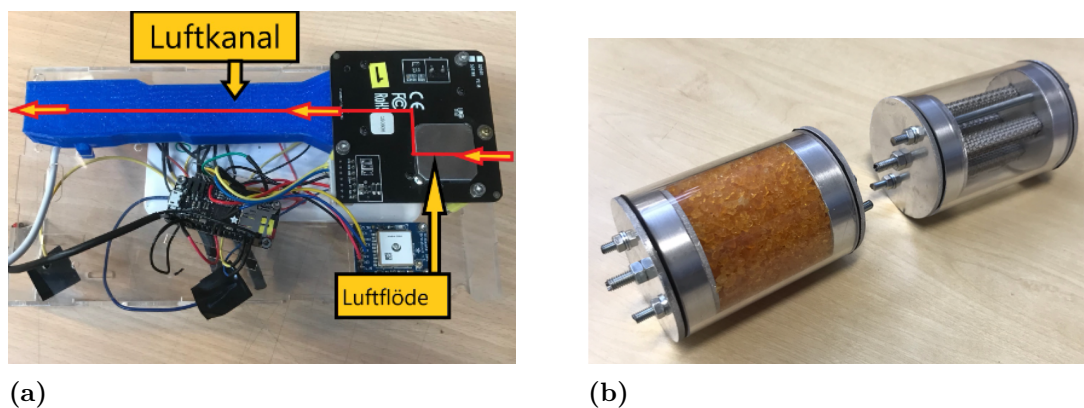
Sensor	Insamling av
SDS011	Partiklar: PM _{2,5} , PM ₁₀
BME680	Luftfuktighet, temperatur, VOC och lufttryck,
CCS811	VOC
OX-A431	Ozon, (O ₃)
NO2-A43F	Kvävedioxid, (NO ₂)
COzIR-LP	Koldioxid, (CO ₂)

LCAQMP består av en låda bestående av en ramliknande övre del och en undre del med väggar och botten gjord i akrylplast (se figur 1.1). Alla sensorer samt GPS och utvecklingskort är monterade på en mittenplatta som passas in mellan lådans övre och undre del likt ett pussel. Ett lock passas in på liknande sätt på lådans övre del och fästs med muttrar och hörnskruvar. På lådans ena kortsida finns hål för att fästa en diffusionstork där luft flödar in i en cylinder och torkas genom att vattenmolekyler sugas upp med hjälp av silica-gel [12]. Ett luftflöde in i LCAQMP produceras genom att SDS011 har en fläkt [15] tillsammans med en membranpump som suger in luft och pumpar ut den genom en slang på lådans ena långsida [13]. För att luftens väg genom LCAQMP ska optimeras finns en luftkanal monterad över BME680, CCS811, COzIR-LP, OX-A431 och NO2-A43F vilken gör att luften stängs in och gör att en större andel av den passerar sensorerna.



Figur 1.1: Ingående komponenter i LCAQMP, från [12] återgiven med tillstånd.

Luftens väg genom mätplattformen redovisas i den vänstra bilden i figur 1.2. Innan luften åker in i SDS011-sensorn passerar den genom den tidigare nämnda diffusionstorken som syns till höger i figuren.



Figur 1.2: (a) Luftgången genom LCAQMP. (b) Diffusionstork med och utan silikagel. Båda bilderna är återgivna med tillstånd, från [13] resp. [12].

Nedan och i tabell 1.2 beskrivs sensorernas och GPS:ens funktionalitet och kommunikation mer detaljerat.

Tabell 1.2: Ingående sensorers mätprincip och kommuniaktionsprotokoll, hämtat från respektive sensors datablad [15][16][17][18][19].

Sensor	Mätprincip	Kommunikationsprotokoll
SDS011	Laserspridning	UART
BME680	MOX	SPI och I2C
CC811	MOX	I2C
OX-A431	Elektrokemisk	I.U.
NO2-A43F	Elektrokemisk	I.U.
COzIR-LP	Laserspridning	UART

1.2.1 Diffusionstork

Diffusionstorken är uppbyggd av ett cylinderformat kammare i akrylplast med aluminiumbehållare i ändarna. Genom en ihålig gängstång kan luften ta sig in i aluminiumbehållaren och sedan vidare genom den silikagelfyllda kammaren via fyra luftkanaler med filterpapper. Syftet med diffusionstorken är att avfukta luften som sedan flödar vidare in i sensorplattformens luftkanal. Anledningen till detta är då tidigare års arbeten med LCAQMP har visat att en högre relativ luftfuktighet leder till mätfel med sensorerna [12].

1.2.2 SDS011

SDS011 är en sensor från Nova Fitness Co. som mäter partiklar av storleken $PM_{2,5}$ och PM_{10} [15]. Enligt databladet mäter sensorn partiklar genom de passerar genom

en detekteringsyta i mätaren och färdas ut med hjälp av en fläkt. Mätaren omvandlar den mängden till förstärkta och bearbetade elektroniska signaler som seriellt kommuniceras vidare med hjälp av en UART-krets. SDS011 har en mät-noggrannhet på $\pm 15\%$ och klarar av att mäta i luftfuktighet upp till max 70%. Mätprincipen som används i sensorn kan läsas om i avsnitt 2.3.3.

1.2.3 BME680

BME680 är en sensor från Adafruit som mäter luftfuktighet, temperatur, VOC-gas och lufttryck [16]. BME680 kommunicerar både via I2C och SPI beroende på vilka pinnar som är avsatta för informationsöverföring.

1.2.4 CCS811

CCS811 är en sensor från AMS som mäter VOC, se 2.1.3 och eCO_2 , vilket står för ekvivalent kalkylerad koldioxid, med hjälp av en MOX-sensor [17]. Den kommunicerar via I2C med hjälp av en mikrokontroller som bland annat innehåller en "Analog-till-Digital-omvandlare". Med hjälp av en algoritm räknar sensorn med hjälp av rådatan ut ett totalt värde på de flyktiga organiska kolvätena eller den ekvivalenta nivån på CO_2 .

1.2.5 OX-A431 och NO2-A43F

OX-A341 och NO2-A43F är sensorer från Alphasense som mäter ozon och kvävedioxid [18]. NO2-A43F mäter endast kvävedioxid genom att den filtrerar bort ozon. Mängden uppmätt ozon räknas ut genom att de två sensorerna används tillsammans genom subtraktion mellan det uppmätta mätvärdet NO2-A43F och det uppmätta värdet från OX-A341. För att värdet på ozon som fås fram ska vara tillförlitligt är det viktigt att sensorena har korrigerats och kalibrerats. Det gäller bland annat korrigering för temperaturberoende, elektronisk nollförskjutning och sensornollförskjutning samt kalibrering för temperaturberoende och känslighet.

1.2.6 COzIR-LP

COzIR-LP är en sensor från Gas Sensing Solutions som mäter koldioxid [19]. Den har tre olika lägen, Mode 0, 1, och 2, som avgör om den mäter och på vilket sätt. I Mode 0 är COz-IR-LP sker inga mätningar och sensorn befinner sig i viloläge. Mätningar görs i Mode 1 och sker två gånger per sekund enligt fabriks-standard. I Mode 2 sker mätningar hela tiden men datan skickas endast över på förfrågan. Kommunikationen sker seriellt via en UART-krets. Mätningarna sker i en kammare där gasen passerar och belyses med en LED med en våglängd på $4.25\text{--}2.25\mu\text{m}$. Ljuset tas emot med hjälp av en foto-diod vars signal filtreras och processeras för att reducera brus.

1.2.7 Adafruit Ultimate GPS

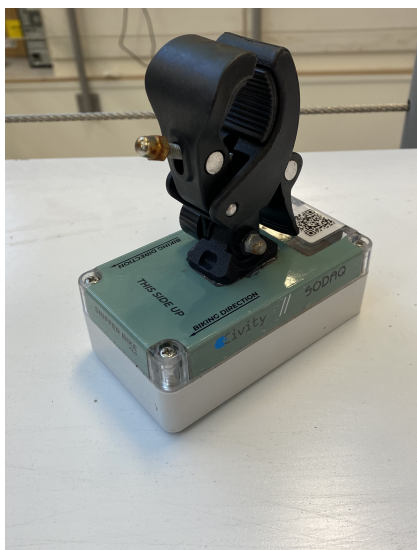
Adafruit Ultimate GPS är en GPS som på 66 stycken kanaler kan spåra 22 sateliter [14]. Platsuppdateringar kan ske 10 gånger i sekunden samtidigt som den har en

låg strömförbrukning på 20 mA. På kortet sitter en röd LED som blinkar var 15:e sekund när en satellit hittats och med 1 Hz när den söker efter en satellit. Adafruit Ultimate GPS skickar positionsdata med hjälp av en UART-krets. En realtidsklocka finns inkluderad på brädan som möjliggör att GPS:en vet vad tiden är i realtid även utan strömtillförsel. Dessutom finns en batterihållare på brädans baksida där ett batteri av CR1220 storlek kan sättas i. Detta för att GPS:en kommer återgå till fabriksinställningarna om den helt förlorar strömtillförseln.

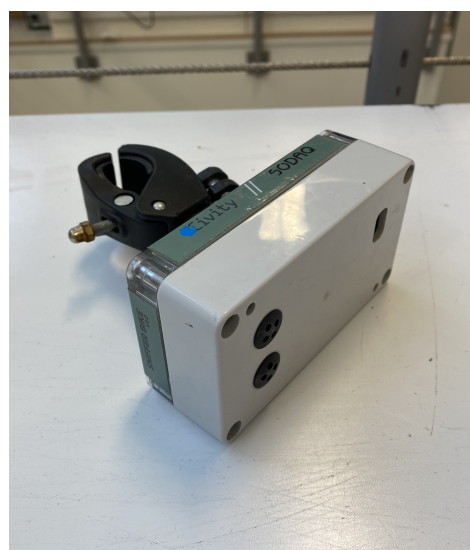
1.2.8 Sniffer bike sensor kit

Sniffer bike sensor kit är en mätare som gruppen fått låna av Ågot Watne på Svenska Miljöinstitutet i Göteborg. Den användes under vissa mätningar samtidigt som LCAQMP för att få ytterligare en källa att jämföra resultat med. En mätare som gruppen fått låna visas i figur 1.3.

Sniffer bike är ett nederländskt projekt som med detta sensor-kit monterade på cyklar, mätt partiklar i luften i staden Utrecht [20]. De sensorer som ingår i mätaren är Sensirion SPS30 som bland annat mäter partiklar i storlekarna PM_{10} och $PM_{2,5}$ samt Bosch BME680 som mäter luftfuktighet och temperatur. Det ingår även en GPS av modellen u-blox EVA-M8M samt en accelerator av modellen LSM303AGR både dessa är en del av SODAQ Sara SFF board. Mätningar sker var tionde sekund och rådatan kommuniceras trådlöst till en server på företaget Civity. Det var innan projektets påbörjan påvisat att sensorn som mäter partiklar är relativt tillförlitlig vid mätning av $PM_{2,5}$ men inte lika trovärdig när PM_{10} mäts.



(a)



(b)

Figur 1.3: Sniffer bike sensor kit.

1.3 Syfte

Syftet med projektet är att utforska utvecklingsområden hos mätplattformen LCAQMP genom undersöka dess sensorer och användarvänlighet gällande hårdvara och mjukvara. Kalibrering av nuvarande sensorer kommer utföras i syfte att få mer tillförlitlig data samtidigt som dess låga pris behålls. Arbetet ämnar bidra till massinsamling av relevant data som hjälper människor se och förstå allvaret med luftföroreningar.

1.4 Frågeställningar

- Kan de nuvarande sensorerna ge tillförlitlig data?
- Är luften på de valda mätplatserna inom de lokala miljömålen samt hälsosam?
- Kan mätplattformens användarvänlighet förbättras?

1.5 Problemformulering

LCAQMP har en del problem med både mjuk- och hårdvara. Mjukvaran skriven i Arduino, kopplad till mikrokontrolleren Adafruit Feather M0, är svåröverskådlig och rörlig. Kommentarer som är skrivna i koden är otillräckliga för att inge insikt i mjukvarans funktion. För att underlätta felsökning och utveckling av LCAQMP-plattformen bör funktioner kommenteras. Det underlättar även för nästkommande kandidatgrupp då de enklare kan bekanta sig med LCAQMP. Vad gäller koden i MATLAB krävs det stor handpåläggning och hårdkodning av för att granska sensordata grafiskt. Koden är även otydlig och dåligt kommenterad vilket gör programmets funktion svåröverskådlig och sänker användarvänligheten. Vid insamling av sensordata ska det ej vara komplicerat att få en tydlig bild av mätresultat.

En av de största svagheter med LCAQMP är att det yttre höljet, lådan som sladdar, kretskort, batteri och sensorer förvaras i. Den är svårhanterad och plasten som den är gjord i är spröd och "krispig". Skulle den tappas eller få en törn är sannolikheten stor att den spricker, vilket hade gjort den mer svårhanterad eftersom att delarna inte kommer passa ihop lika bra på grund av att diffusionstorken drar lådans ena kortsida mot sig eftersom den är fäst där. Varken lådan eller luftkanalen är helt tät vilket minskar luftkanalen och pumpens funktionalitet. Lådan är heller inte regntät vilket innebär att vid mätningar utomhus måste LCAQMP förvaras i något som skyddar den mot regn, eftersom LCAQMP i första hand är avsedd att mäta luftföroreningar utomhus hade det varit fördelaktigt om den hade kunnat stå utomhus utan extra skydd.

Det lock som lyfts av för att nå de inre delarna skruvas av med hjälp av muttrar och hörnskruvar vilka gör det svårt att hantera lådan när den ska öppnas och stängas. Det är också svårt att flytta runt lådan när den är öppen då hörnskruvar lätt ramlar ur och dislokteras vilket leder till att hela lådan blir skev och ramlar isär. LCAQMP startas genom att sladden från Adafruit M0 kopplas in i batteriet som sedan placeras under mittenplattan i lådans undre del. Processen är tidskrävande och gör att lådans

ingående delar ofta glider isär. Att kunna hantera sin mätutrustning på ett smidigt sätt är viktigt för att spara tid om man använder flera mätinstrument samtidigt och för att minska riskerna för att eventuella yttre felkällor kan påverka. Utöver det förenklar det mätprocessen vilket alltid är fördelaktigt.

1.6 Avgränsningar

I följande avsnitt presenteras de avgränsningar som är utsatta för arbetet.

1.6.1 Tid

Projektet fortgår under vårterminen 2022 från den 26:e januari till den 12:e maj. Arbetet följer en studietakt på 50% vilket motsvarar 20 timmar i veckan per gruppmedlem. Gruppen avgränsar projektet till genomföra det arbete som hinns med under det utsatta tidsintervallet. Fältmätningar begränsas av maximal drifttid vilket styrs av batterikapacitet om inte möjlighet till eltilförsel finns.

1.6.2 Ekonomi

Eftersom grundtanken med LCAQMP är att den ska vara en lågkostnadsmätplattform ska priset på nya sensorer och komponenter begränsas till en lägre prisklass, vilket innebär att dessa inte garanteras vara av högsta standard.

1.6.3 Mätvärden

När det kommer till utvärdering av mätdata är en begränsande faktor vad det finns för utrustning att genomföra referensmätningar mot för att kalibrera enheterna och utreda hur tillförlitlig gruppens insamlade data faktiskt är. Detta är en följd av att enhetens sensorer är av enklare kvalitet. Projektet avgränsas även till att enbart behandla mätdata och luftkvalitet utifrån faktorerna CO_2 , NO_2 , VOC, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, O_3 . Mätvärden för att ge uppfattning om omgivningen är temperatur, luftfuktighet, klockslag, position, luft-tryck och fuktighet.

1.6.4 Geografi

Projektet avser att mäta luftföroreningar i Göteborg då det utförs av studenter på Chalmers tekniska högskola. Därav begränsas arbetet geografiskt till Göteborg och dess närliggande områden. Dessutom är det viktigt att gruppmedlemmarna kan ta sig till de platser där fältmätningarna utförs på ett så miljövänligt sätt som möjligt. Därav bör transport längre sträckor undvikas.

2

Teori

2.1 Luftföroreningar

Luftföroreningar är ämnen i luften i gas- eller partikelform som är hälsofarliga och uppstår på grund av mänsklig verksamhet eller naturligt [21]. I varierande storlek och komposition är marknära ozon, svävande partiklar och svavel- och kvävedioxid de vanligaste luftföroreningarna [22]. En stor orsak till att luftföroreningar uppstår är vägtrafik eftersom väg- och däckslitage skapar partiklar samt att förbränningsmotorer i fordon släpper ut avgaser som innehåller organiska ämnen, kvävedioxid och partiklar [23]. Ytterligare faktorer som skapar luftföroreningar är industrianläggningar, energiproduktion och stora fartyg vid kuster och hamnar [21].

2.1.1 Partiklar

Partiklar i luften kan uppstå naturligt och genom mänsklig påverkan [24]. Det vanligaste sättet att klassificera partiklar är att dela in dem i två huvudgrupper utefter deras storlek vilka är $PM_{2.5}$ och PM_{10} . PM_{10} innefattar partiklar vars aerodynamiska diameter är maximalt $10\mu m$ ner till $0.001\mu m$ och är partiklarna mindre än $2.5\mu m$ ingår de i $PM_{2.5}$. Partiklar som är 100 nm och mindre klassas som ultrafina partiklar [25]. Partiklar består inte av ett specifikt ämne utan inkluderar flera kemiska föreningar i olika sammansättningar, till exempel polycykliska aromatiska kolväten, sulfater och nitrater samt flertalet metaller [26]. Vid förbränning uppstår även sot vilket också kan klassas som partikelutsläpp [24]. Uppkomsten av partiklar i luften orsakas i tätorter bland annat av avgaser från fordonstrafik och slitage av däck och asfaltvägar. Ytterligare källor till partiklar kan vara eldning av ved [23], energiproduktion och industrier. Havssalt och damm är källor till partiklar som uppstår naturligt utan mänsklig påverkan [24].

Det finns stor hälsoproblematik med en stor andel partiklar i luften vilket har visats i flertalet studier. I en artikel skriven av Robert Hamanaka belyses framförallt partiklars negativa påverkan på hjärt- och kärlsystemet men även på luftvägarna [26]. Både kortsiktigt och långsiktigt är det påvisat att det finns ett samband mellan att exponeras för partiklar och dödlighet och sjukhusinläggningar på grund av hjärt- och kärlsjukdomar och luftvägssjukdomar. Att drabbas av hjärtsvikt, ischemisk hjärtsjukdom och att existerande hjärtsjukdomar försvåras är några risker med att utsättas för förhöjda nivåer $PM_{2.5}$. Dessutom utgör partiklar i en storlek mindre än PM_{10} en hälsofara på grund av att dess lilla storlek tillåter dem att följa inandningsluften hela vägen ned till lungorna, vilket kan leda till luftvägssjukdomar

[24]. Partiklar i storlek mindre än $\text{PM}_{2,5}$ kan genom att de når lungornas nedre del överföras till andra organ via blodomloppet [25]. I en studie från Svenska Miljöinstitutet uppskattades livslängden hos den Svenska befolkningen förkortas med 11,2 år per för tidig död orsakat av $\text{PM}_{2,5}$ [27]. Studien estimerar också att utbredningen av kronisk bronkit påverkas av exponering av PM_{10} för människor i åldersgruppen 30+.

2.1.2 Koldioxid

Koldioxid med den kemiska beteckningen CO_2 är en växthusgas som är luktfri, osynlig och bildas vid förbränning av kolföreningar samt naturligt genom att organiska material oxiderar [28]. En ökande mängd koldioxid i atmosfären till följd av att fossila bränslen förbränns är den största orsaken till den globala uppvärmningen [29]. I genomsnitt ökar halten koldioxid i luften med cirka 0,4 % per år och har sedan industrialismens början gjort en 50 procentig ökning.

2.1.3 VOC

VOC är ett samlingsnamn för generella föroreningar i luft och står för "Volatile Organic Compounds" vilket på svenska översätts till "Flyktiga organiska ämnen" [30]. Orsaken av uppkomsten till ämnena varierar men några är exempelvis tobaksrök, förbränning och byggnadsmaterial. Det finns över hundra variationer av dessa föreningar, men måste ha en kokpunkt mellan 50 och 260 grader celsius för att ingå i VOC. Några exempel på dessa ämnen är etylbensen som är ett aromatiskt kolväte, formaldehyd som är en del av aldehyderna, fenol vilken är en alkohol samt dekan som ingår i de alifatiska kolvätena [31]. Det finns vissa hälsorisker kopplade till några flyktiga organiska ämnen, till exempel kan de försämra förmågan till fortplantning, vara cancerframkallande eller ge skador på genuppsättningen. Det finns även mildare hälsoeffekter som kan upplevas av att flyktiga organiska ämnen förekommer i luften, vilka till exempel inkluderar koncentrationssvårigheter, illamående och dåsighet samt att övre delen av luftvägarna och ögon kan upplevas irriterade [30].

2.1.4 Kvävedioxid

Kvävedioxid med kemiska beteckningen NO_2 är en giftig gas som bildas vid förbränning. Kvävedioxid bidrar till försurning av, vatten, mark och skogar men ökar även förtida dödsfall med 12-14% vid en halt på $10 \mu\text{g m}^{-3}$ [32].

Halterna av kvävedioxid i städer är som störst i anslutning till väl trafikerade gator till följd av fordon med förbränningsmotorer [24]. Studier har visat att att finns en risk att att bo i anslutning till högt trafikbelagda gator under en längre tid eftersom en korrelation mellan hälsorisker och långtidsexponering av kvävedioxid har påvisats [33]. De hälsoriskerna innefattar bland annat förhöjd risk för lungcancer, minskad lungfunktion samt hjärtinfarkt. WHO har en rekommendation att kvävedioxid-halten ej borde övergå $25 \mu\text{g m}^{-3}$ under ett dygn i genomsnitt.

2.1.5 Ozon

Luftföroreningen marknära ozon är en gas som skapas utomhus i solljus när kväveoxider, flyktiga organiska ämnen samt syre genomgår en fotokemisk reaktion [34]. I svenska förorter och i glesbygden är ozon-halterna som störst efter att de förflyttats med luftmassan nedifrån södra Europa. I Naturvårdsverkets luftguide nämns det att det framförallt är marknära ozon som är skadligt för människor och växter [24]. De belyser också att WHO rekommenderar att människor får utsättas för maximalt $100 \mu\text{g m}^{-3}$ ozon i genomsnitt under åtta timmar eftersom epidemiologiska studier visat att det finns en korrelation mellan att utsättas för ozon och daglig dödlighet.

Luftvägarna är det organ som löper störst risk att påverkas negativt av ozon vilket gäller både under långtids- och korttidsexponering [34]. Exponeringen kan till exempel leda till att lungornas funktionalitet minskar, en ökning i inflammatoriska reaktioner, astmasymptom samt risk för dödlighet orsakad av luftvägssjukdomar. Sömnmönster, nervfunktion samt hjärt- och kärl-sjukdom i vissa fall är ytterligare hälsorisker till följd av ozon-exponering. Dessutom är marknära ozon skadligt för naturen eftersom att den gör att koldioxidupptagningsförmågan i skogsområden minskas samt att växters tillväxt hindras [24].

2.2 Kommunikationsprotokoll

Kommunikation mellan elektronik sker via kommunikationsprotokoll genom att binära databitar skickas genom spänningsspulser i ledningar mellan enheter [35]. Detta kan ske antingen seriellt vilket innebär att bitar skickas en åt gången genom en gemensam ledning eller parallellt, att bitar skickas genom två olika ledningar samtidigt.

2.2.1 SPI

SPI står för Serial Peripheral Interface och är ett kommunikationsprotokoll som används för att kommunicera med en mikrokontroller, bland annat använder sig SD-kortsläsare av detta [35]. En varierande datamängd kan skickas i ett kontinuerligt flöde utan störningar. Ett så kallat "mästare-slav-förhållande" används mellan enheter som kommunicerar via SPI. Den ena enheten, mästaren, styr den andra enheten, slaven, genom att den skickar kommandon. Mästaren är vanligtvis en mikrokontroller medan slaven kan vara exempelvis ett minneskort eller en sensor. Kommunikationen mellan de två ingående parterna är synkron genom att den styrs av en klocksignal som initieras och konfigureras av mästaren. Hastigheten som en databit skickas över styrs av klockcykelns frekvens, ju högre frekvens desto högre hastighet.

2.2.2 UART

UART är en förkortning för Universal Asynchronous Receiver/Transmitter och är en fysisk krets i en fristående IC eller i en mikrokontroller vars uppgift är att ta emot eller överföra seriell data [36]. Kommunikationen sker direkt mellan två UART:er,

där en enhet är sändare och den andra är mottagare. Parallell data skickas från en ”kontrollerande enhet” till den sändande UART:en, där konverteras den till seriell data och sänds till den mottagande UART:en. Den konverterar datan tillbaka till parallell och skickar den till en mottagande enhet. UART-kommunikation styrs inte av någon klocksignal vilket innebär att den är asynkron. I ett datapaket läggs start och stopp-bitar till av den sändande UART:en, vilka talar om för den mottagande UART:en när den ska börja och sluta läsa data. Hastigheten på dataöverföringen bestäms av ”the baud rate” vilket är en bestämd frekvens uttryckt i bitar per sekund.

2.2.3 I2C

I2C är en akronym för Inter-integrated Circuit och är ett kommunikationsprotokoll som använder sig av ett ”mästare-slav-förhållande” på liknande sätt som SPI [37], se avsnitt 2.2.1. Mästaren styr slaven genom att skicka komandon. I2C-kommunikation möjliggör att koppla in en eller flera slavar till en eller flera mästare. Det kan exempelvis vara fördelaktigt när data från flera mikrokontroller loggas till ett gemensamt minneskort. I2C styrs av en klocksignal vilket innebär att den är synkron. Klocksignalen styrs av mästaren och gör att dataöverföringen är synkroniserad.

2.3 Sensorernas mätprinciper

Olika mätprinciper fungerar olika bra för att mäta luftföroreningar beroende på vilken typ av partikel som ska undersökas. I följande avsnitt presenteras tre olika klasser av sensorer som alla använder olika mätprinciper.

2.3.1 MOX-sensorer

Metalloxid-gas-sensorer även kallade MOX-sensorer är ofta små till storleken och har möjlighet att mäta flertalet gaser, till exempel kolmonoxid, ozon, metan samt VOC [38]. De ingående komponenterna i en MOX-sensor är vanligtvis ett avkännings-chip (eng: sensing chip), en värmare och en metalloxids-yta [39]. På metalloxids-ytan finns en film av metalloxid som är en halvledare [38]. Mätprincipen går ut på att elektroner fångas genom att syremolekyler reagerar med metall-oxiden, syremolekylerna kommer att avlägnas när sensorn kommer i kontakt med den gas som sensorn är avsedd att mäta [39]. Konduktiviteten i ytan kommer därför att ökas eftersom avlägsnandet av syremolekylerna möjliggör att de fångade elektronerna kommer kunna flöda fritt, vilket avkänningschippet kommer att reagera på. MOX-sensorer är korskänsliga vilket innebär att de kan reagera på andra gaser än den är avsedd att mäta vilket kan bli problematiskt om de används när koncentrationen av den avsedda gasen är för låg.

2.3.2 Optiska sensorer

De mätprinciper som används i optiska sensorer är vanligtvis ljusspridning och ljussläckning där grundprincipen är att en laserstråle lysas på gasen eller partiklarna som ska mätas [40]. Detta sker i en flödesmätcell, som är ett typ av slutet

rum, där storleken och mängden partiklar är avgörande för hur stor del av lasern som reflekteras och absorberas. En detektionscell som sitter i änden av mätområdet mäter detta. För partiklar som är större än $1\ \mu\text{m}$ används ljussläckning medan ljusspridning ger ett mer exakt resultat för partiklar mindre än det. Vid användandet av ljussläckning är det arean av skuggan som partiklarna skapar som mäts medan det är mängden spritt ljus som mäts när laserspridning används som mätmetod.

2.3.3 Elektrokemiska sensorer

Elektrokemiska sensorer som är avsedda att mäta gas är uppbyggda av flera lager som gasen måste ta sig igenom vilket sker stegvis, där varje steg fyller olika funktioner [41]. Det första som sker är att en pump eller diffusion gör att luft färdas in i sensorn, där den passerar genom ett filter för att endast den gas som sensorn är ämnad att mäta ska färdas vidare i processen. Därefter oxiderar gasen igenom ett lager av elektroder där en ström genereras som följd av reaktionen. Koncentrationen av gas är proportionerlig mot den genererade strömmen.

Det är viktigt att elektrokemiska sensorer kalibreras och nolljusteras eftersom det kommer vara avgörande för hur den genererade strömmen kommer att bearbetas och förstärkas för att göras avläsningsbar [42]. De vanligaste enheterna som strömmen omarbetas till är procentuell volym eller PPM och nollor skrivs om ingen eller för liten mängd gas är upptagen av sensorn.

2.4 Termodynamik för gasblandningar

När man talar om luft menar man egentligen den blandning av gaser som utgör jordens atmosfär. Gaser kan i sin tur betraktas ur ett termodynamiskt perspektiv och med detta följer ett antal definitioner och samband som kan användas för att studera en given gasblandning. Följande avsnitt avser redovisa de för arbetet mest relevanta sambanden och definitionerna.

2.4.1 Partialtryck

För en given blandning av gaser i ett isolerat system kommer varje gas i för sig ha ett visst partialtryck P_i som tillsammans adderar upp till det totala trycket P [43, s. 120]. Partialtrycket går att definiera som

$$P_i = x_i P, \quad (2.1)$$

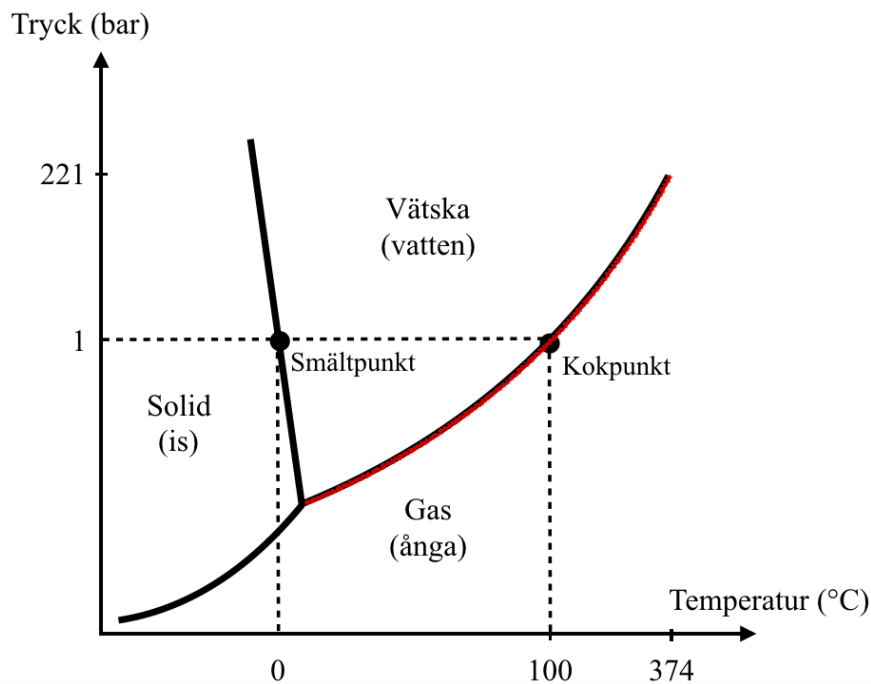
där x_i är den så kallade molfraktionen och beräknas som

$$x_i = \frac{N_i}{N_{\text{tot}}}. \quad (2.2)$$

N_i är antalet molekyler av gas i och N_{tot} är totala antalet molekyler i gasblandningen.

2.4.2 Ångtryck

Vatten kan finna sig i olika aggregationstillstånd beroende på dess tryck och temperatur. Ett vanligt sätt att visualisera detta förhållande är med hjälp av ett fasdiagram likt det i figur 2.1. Kurvorna i diagrammet, faskurvorna, representerar de förhållanden mellan temperatur och tryck som krävs för att två aggregationstillstånd ska kunna existera i jämvikt [43, s. 166].



Figur 2.1: Fasdiagram för vatten (ej skalenligt). Avläsning av trycket längs den rödmarkerade kurvan ger ångtrycket. Figuren är omarbetad från [43, s. 167].

Ångtrycket definieras som det tryck, givet en viss temperatur, vid vilket en gas kan samexistera med sin flytande eller fasta form [43, s. 167]. I figur 2.1 är detta område markerat i rött.

2.4.3 Relativ luftfuktighet

Relativ luftfuktighet är ett vanligt förekommande mått på andelen vattenånga i luften. Det anges ofta i procent och beräknas enligt

$$RH = \frac{P_i}{P_{\text{ång}}} \cdot 100, \quad (2.3)$$

där RH betecknar den relativa luftfuktigheten, P är vattenångans befintliga partielltryck och $P_{\text{ång}}$ dess ångtryck vid samma temperatur [43, s. 177]. Det är värdefullt att ha kännedom om den relativa luftfuktigheten vid mätning av luftföroreningar då vattenångan kan komma att påverka mätningen.

2.5 Krafter på partiklar

Partiklar blir påverkade av olika krafter när de flödar genom en passage. I följande kapitel kommer de för arbetet mest relevanta krafterna att redogöras för.

Gravitationskraft påverkar partiklar då de har en massa [44, s. 46-47]. Gravitationskraften kan störa partiklarnas rörelse, partiklar som rör sig långsammare störs mer av gravitationskraften än de som rör sig snabbt. Det är också större påverkan på större partiklar alltså större påverkan på PM₁₀ i förhållande till PM_{2,5}.

Diffusion är utbredningen av ett ämne, mindre partiklar har högre diffusivitet [44, s. 25-27]. Diffusion bidrar till att partiklar rör sig mot lägre koncentrationer alltså strävar efter att bli en jämn blandning. Detta sker genom att partiklarna krockar med varandra och därmed påverkar deras rörelsebana.

Tröghetskraft, partiklars tröghet kan påverka deras möjlighet att följa en ström i flödet genom en kanal (vilket är scenariot i detta arbete) [44, s. 27,43-44]. Tröga partiklar kan därmed avvika från luftflödet och fastna på väggar etc. PM₁₀ har större tröghet än kraften från luftflödet vilket kan ge felaktig mätdata.

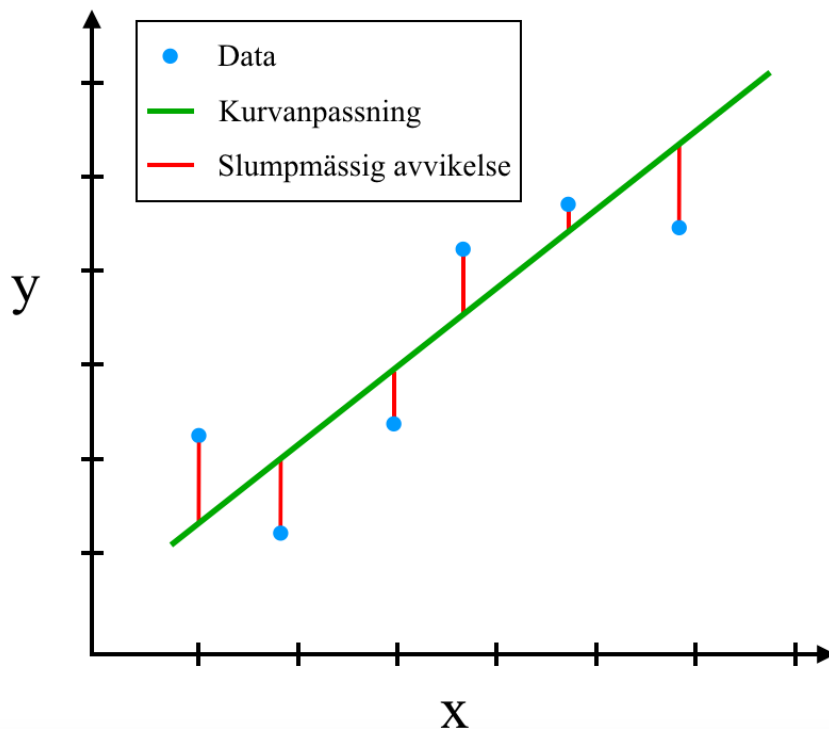
Adhesion är när partiklar fästs ihop och bildar större partiklar. Detta sker med hjälp av Van der Waals-krafter, elektrostatiska krafter, och ytspänning [44, s. 141-144]. Adhesion är sex tiopotenser starkare än gravitationskraften på partiklar av storleken 10 µm i diameter och en luftfuktighet på 50%.

2.6 Regressionsanalys

Regressionsanalys är en vanligt förekommande metod vid dataanalys och används för att anpassa en funktion till insamlad data [45, ss. 415-422]. Detta kan i sin tur utnyttjas för att kalibrera ett mätinstrument mot en mer precis referens. I många fall kan ett linjärt samband approximativt antas mellan referensens datamängd $x_i = x_1, x_2, \dots, x_n$ och mätinstrumentets datamängd $y_i = y_1, y_2, \dots, y_n$ enligt

$$y_i = a + bx_i + \epsilon_i, \quad (2.4)$$

där a och b är regressionskoefficienter och ϵ_i antas vara en slumpvariabel som leder till slumpmässigt brus i förhållandet (se figur 2.2). x_i benämns ofta som prediktionsvariabeln och y_i som responsvariabeln.



Figur 2.2: Figuren illustrerar en linjär kurvanpassning (grön) till data (blå) där avvikelserna (röd) antas vara slumpmässiga avvikelser från förhållandet mellan variablerna x och y . Grafen är omarbetad från [46].

Målet med en regressionsanalys är att hitta parametrarna $\hat{a}$ och $\hat{b}$ som i bästa möjliga mån anpassar kurvan $y = \hat{a} + \hat{b}x$ till den observerade datan. För att göra detta används ofta den så kallade ”maximum likelihood-metoden” [45]. Parametrarna kan då beräknas enligt

$$\hat{b} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (2.5)$$

$$\hat{a} = \bar{y} - \hat{b}\bar{x}, \quad (2.6)$$

där $\bar{x}$ och $\bar{y}$ är medelvärdena av datamängderna x_i respektive y_i . En alternativ metod för att skatta parametrarna $\hat{a}$ och $\hat{b}$ är den så kallade ”minsta-kvadrat-metoden”, som ofta implementeras av datorprogram vid linjära anpassningar. För mer information om denna metod, se [47].

2.6.1 Antaganden och avgränsningar

Varje gång en linjär anpassningsmetod används görs implicit ett antal antaganden om modellen eller datan som ska anpassas. Maximum likelihood-metoden antar exempelvis att felet ϵ_i är normalfördelat [45]. Ofta antas det även att prediktionsvariabeln är fri från mätfel, och att variansen i ϵ_i är konstant och oberoende av prediktionsvariabeln. Att felen i responsvariabeln är okorrelerad är också ett antagande som görs, men som inte alltid stämmer överens med verkligheten [47].

3

Metoder

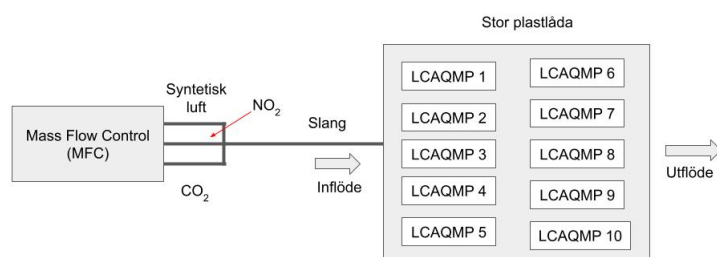
Här redovisas vilka metoder som användes för utförande av flertalet mätningar och vidareutveckling och förbättringsarbete. De olika mätningar som utfördes var referensmätningar, laboratoriemätningar samt fältmätningar. Vidareutvecklingen avser förbättringsarbete av mätplattformen vilket innefattar både mjuk- och hårdvaran.

3.1 Referensmätningar

I detta avsnitt redovisas vilka metoder som använts för referensmätningar. En referensmätning utförs i en kontrollerad miljö där LCAQMP mäter parallellt med en noggrannare sensor för att sedan jämföra deras resultat.

3.1.1 Referensmätning med NO₂- och CO₂-sensorer

Referensmätning av NO₂ och CO₂ utfördes i laserlabbet på institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper på Chalmers tekniska högskola. För att ge referensvärden för LCAQMP-plattformarna användes en Mass Flow Controller (MFC). Samtliga LCAQMP:er placerades i en kontrollmiljö, en plastlåda, som var ansluten med en slang till MFC:n. Mätuppställningen för testet visas i figur 3.1.



Figur 3.1: Schematisk bild på mätuppställning av referensmätning med NO₂- och CO₂-sensorer.

Genom att variera kända mängder av syntetisk luft, CO₂ samt NO₂ förväntades mätplattformarna ge utslag och data som vid senare tillfälle kunde granskas. Syntetisk luft användes som medium då det enbart är bestående av kvävgas och syrgas vilka inte ger utslag på någon sensor. Som referens för LCAQMP-enheterna bör utslaget för CO₂ och NO₂ bli 0, då kontrollmiljön ska vara tät. Genom MFC:n passerades 20 liter gas kontinuerligt, hur flödet systematiskt ändrades utöver testet redovisas i tabell 3.1.

Enheterna som mätte NO₂ var 5, 6 och 10 då endast dem var utrustade med NO₂-A43F-sensorer. Data insamlades från respektive enhet utom enhet 1 som hade en ickefunktionell CO₂IR-LP-sensor samt enhet 10 vilken inte överförde sensordata till enhetens SD-kort under mätningens gång. Enhet 2 samt enhet 10 var anslutna via kabel till dator för realupdatering. Ingen diffusionstork användes vid mätningen då det applicerade mediet var torrt. Använd syntetisk luft var 21% bestående av syre samt 79% kväve, CO₂-gasblandningen bestod av 14% CO₂ och den ansatta NO₂-gasen innehöll 0.05% NO₂.

Tabell 3.1: Förändring av ansatt gasblandning genom MFC.

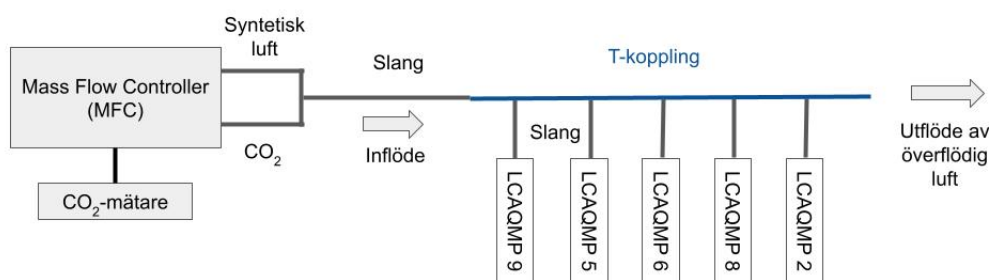
Tid [min]	Tryckluft [l/min]	Syntetisk luft [l/min]	NO ₂ [l/min]	Förväntad halt NO ₂ [PPB]	CO ₂ [l/min]	Förväntad halt CO ₂ [PPM]	Mängd gas [l/min]
0	20	0	0	0	0	0	20
7	0	20	0	0	0	0	20
12	0	19.5	0	0	0.5	3500	20
24	0	19.85	0	0	0.15	1050	20
33	0	19.79	0.06	1500	0.15	1050	20
49	0	19.848	0.002	50	0.15	1050	20
56	0	19.498	0.002	50	0.5	3500	20
62	0	19.5	0	0	0.5	3500	20
67	0	19.94	0.06	1500	0	0	20
72	0	19.94	0	0	0	0	19.94
81	0.06	19.94	0	0	0	0	20
85	0	20	0	0	0	0	20
89	0	0	0	0	0	0	0

3.1.2 MFC-mätning med ny och gammal låda

En referensmätning av CO₂ utfördes på samma plats och med samma MFC som vid tidigare referensmätning, se avsnitt 3.1.1. Tre olika skript som skulle styra hur länge och vilken mängd syntetisk luft och koldioxid-gas som MFC:n skulle skicka ut skapades i excel, se tabellerna 3.2, 3.3 och 3.4. De olika skripten användes vid tre olika försök där det undersöktes hur olika förhållanden påverkar LCAQMP:s mätdata och stigtid.

De mätenheter som användes var enhet 9, 5, 6 och 8 samt enhet 2 som kopplats om på den nya mittenplatta och lagts i den nya lådan som gruppen tagit fram under projektets gång. Dessa placerades på rad efter varandra i laserlabbet i samma ordning som de angivits ovan. Samtliga diffusionstorkars inflöde lindades med gängtejp för att minska risken för läckage mellan inloppet och den slang som monterades på respektive tork. Slangarna kopplades ihop med en T-koppling som anslöts till port 1 och 4 i MFC:n. En koldioxidmätare var också ansluten till anordningen för att kun-

na användas som referensmätare. Se figur 3.2 för mätuppställningen för samtliga mätningar som genomfördes under experimentet.



Figur 3.2: Schematisk bild på mätuppställning för referensmätning av CO_2 .

Det första experimentet som utfördes avsåg att undersöka hur stigtiden i LCAQMP:s koldioxidsensor COzIR-LP påverkas av en tätare låda samt att använda datan för att kalibrera sensorn. För att åstadkomma en tätare låda lindades plastfolie runt respektive mätare med den gamla låddesignen i akrylplast. Ett inflöde fanns genom diffusionstorken och ett utflöde möjliggjordes genom att det gjordes ett litet hål i plastfolien vid luftkanalens ände på de enheter utan pump och vid pumpslangens ände på de enheter med pump. De mätare som hade pump installerad var enhet 5 och 8. De olika förutsättningarna som respektive mätare hade vid alla mätningar redovisas i tabell D.1 i appendix. Det första skriptet startades vid 11:27 och kördes i 90 minuter, se tabell 3.2 för vilka tidpunkter mängden CO_2 varierade.

Tabell 3.2: Mängden syntetisk luft och CO_2 från MFC:n vid försök 1.

Tid [min]	Syntetisk luft [l/min]	CO_2 [ml/min]	CO_2 [ppm]
10	10	0	0
20	9.97	30	420
30	9.925	75	1050
40	9.86	140	1960
50	9.86	140	1960
60	9.97	30	420
70	9.86	140	1960
80	9.86	140	1960
90	10	0	0

Vid den andra mätningen togs diffusionstorken på enhet 6 och 8 av för att undersöka om den påverkar mätdata när endast syntetisk luft och koldioxid körs in i mätaren.

Enhet 5 och 9 lämnades oförändrade. De yttre förutsättningarna för LCAQMP 2 ändrades inte, dock drogs sladdarna till BME680 och CCS811 ut då det antogs att de kortslöt hela mätaren. I praktiken innebär det att den inte mätte VOC, relativ luftfuktighet eller temperatur vilket heller inte var relevant då mätningen fokuserade på att mäta koldioxid. Till skillnad från det första skriptet hade det andra skriptet långsammare och färre förändringar för att i större utsträckning säkerställa att mängden gas hann stabilisera sig över tid. Skriptet startades vid 14:32 och kördes i 90 minuter.

Tabell 3.3: Mängden syntetisk luft och CO₂ från MFC:n vid försök 2.

Tid [min]	Syntetisk luft [l/min]	CO ₂ [ml/min]	CO ₂ [ppm]
10	10	0	0
20	9.925	75	1050
30	9.925	75	1050
40	9.86	140	1960
50	9.86	140	1960
60	9.97	30	420
70	9.97	30	420
80	10	0	0
90	10	0	0

Experimentets tredje och sista mätning startades vid 16:25 och avslutades 70 minuter senare. Skriptet som kördes under denna mätning redovisas i tabell 3.4. Diffusionstorkarna på enhet 6 och 8 monterades återigen på, dock togs plastfolien av från dessa mätare, eftersom det skulle undersökas hur mycket läckage som sker i akrylplastlådan. Inga ändringar på LCAQMP 2, 5 och 9 gjordes.

Tabell 3.4: Mängden syntetisk luft och CO₂ från MFC:n vid försök 3.

Tid [min]	Syntetisk luft [l/min]	CO ₂ [ml/min]	CO ₂ [ppm]
10	10	0	0
20	9.97	30	420
30	9.97	30	420
40	9.86	140	1960
50	9.86	140	1960
60	10	0	0
70	10	0	0

3.2 Laborariemätningar

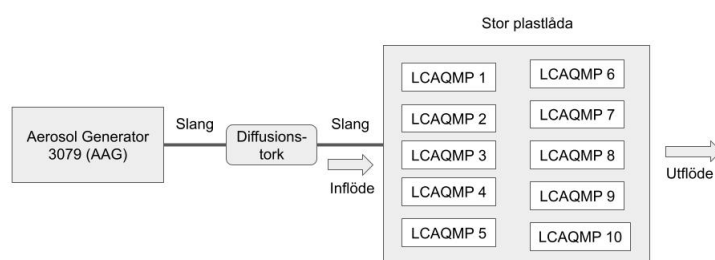
En laborariemätning avser att undersöka hur LCAQMP presterar under specifika förhållanden för att få en bättre uppfattning om dess prestanda. Tre laborariemätningar har genomförts under arbetet och metod för dessa presenteras nedan.

3.2.1 Batteritest i skåp

Mätningen genomfördes genom att alla tio batterier laddades till full kapacitet och därefter placerades alla LCAQMP-enheter på två hyllplan i ett förvaringsskåp och startades samtidigt i den mån det var möjligt. Därefter stängdes skåpet och hölls stängt i cirka två dygn. Mätningen avslutades genom att all mätdata samlades in och analyserades.

3.2.2 Mätning med partikelgenerator

Metoden som användes för mätningen var att en partikelgenerator, Aerosol Generator 3079 (AAG) vilken var inlånad från institutionen Rymd- Geovetenskap på Chalmers tekniska högskola. Partikelgeneratoren kopplades ihop med en slang som gick till en diffusionstork som sedan kopplades in med ytterligare en slang in i en stor plastlåda. I plastlådan placerades alla LCAQMP-enheter exklusive enhet 1 och 6 utan enskilda respektive diffusionstorkar. Plastlådan har ett större hål på vardera kortsida där slangen från diffusionstorken ansluts i det ena hålet som inflöde och det andra hålet agerar utflöde. Mätningen utfördes två gånger med samma uppställning, dock var två datorer inkopplade till LCAQMP 10 och 2 så att data kunde avläsas i realtid.



Figur 3.3: Schematisk bild på mätuppställning vid partikelmätning.

Den första mätningen inleddes genom att partikelgeneratoren startades och utflödet sattes på 75 l/h (volymetrisk flödes hastighet) och kördes konstant i tio minuter. Därefter höjdes utflödet till 200 l/h och kördes återigen konstant i ytterligare 10 minuter. Detta upprepades med ett utflöde på 300 l/h. Efter värdet maximeras och varit konstant i tio minuter minskades det tillbaka till 200 l/h och 10 minuter efter det minskades det till 50 l/h enligt samma princip. Mätningen varade totalt i en timme.

Den andra mätningen startades genom att partikelgeneratoren slogs på och mängden utflöde sattes på 0. Tio minuter efter mätningens start hade det avlästa värdet på datorerna stabiliserats, då höjdes värdet mängden utflöde på partikelgeneratoren av partiklar till 50 l/h. När det hade gått trettiosex minuter från mätningens start hade

det avlästa värdet stabiliserats, då höjdes utflödet av partiklar till 75 l/h. Efter en timme och trettiosex minuter från mätningens start stabiliserades de avlästa värdena och då sänktes utflödet återigen till 50 l/h. När det gått två timmar och femton minuter minskades värdet återigen ner till 0. Mätningen pågick totalt i två timmar och trettiofem minuter.

3.3 Fältmätningar

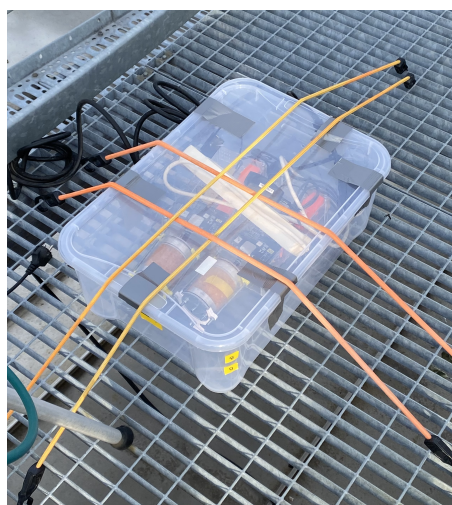
Fältmätningar är mätningar som utförts utomhus på olika platser i Göteborgs Stad som gruppen anser relevanta. Det kan vara exempelvis platser i närheten av stora vägar, industrier eller där ett stort antal människor vistas dagligen.

3.3.1 Mätning på Femmans tak

Med hjälp av Göteborgs Stads Miljöförvaltning utfördes en mätning med två LCAQMP på taket över Femmanhuset, i anslutning till deras mätstation. Mätstationen mäter kvävedioxid, NO_x , relativ luftfuktighet, $\text{PM}_{2,5}$, PM_{10} , temperatur samt vindhastighet. LCAQMP 5 och 6 valdes för mätningen eftersom de har NO_2 - och O_3 -sensorer. Mätarna placerades i en stor plastlåda som tejpades igen och fästes med spännband för att skydda dem mot eventuell nederbörd och vind (se figur 3.4). På lådans respektive kortsidor fanns borrarade hål för att tillåta in- och utflöde av luft och mätarna strömfördes genom att kopplas till ett eluttag. Mätningen pågick i cirka två veckor, den startades 25:e mars och avslutades 7:e april. Därefter hämtades mätarna, datan samlades in och jämfördes med data från Miljöförvaltningens sensorer.



(a)



(b)

Figur 3.4: LCAQMP 5 och 6 placerade i en plastlåda på Femmans tak .

3.3.2 Mätning Chalmers campus

Fem stycken LCAQMP-enheter samt tre Sniffer bike användes för att göra ett stickprov av luftkvaliteten längs med tvärgatan genom Chalmers campus. I tabell 3.5 och figur 3.5 nedan redovisas de olika mätarnas placering. Mätningen startade vid 07:45 och pågick fram till 10:30 samma dag.

Tabell 3.5: Placeringar av mätare på Chalmers Tvärgata.

Plats	Mätare
Olgas trappor (Orange)	LCAQMP 7 och Sniffer Bike 72
Propellern (Rosa)	LCAQMP 9 och Sniffer Bike 801
Häck vid Maskingården (Gul)	LCAQMP 3
Träd vid Hörsalsvägen (Blå)	LCAQMP 2
Busshållplatsen Chalmers Tvärgata (Röd)	LCAQMP 4 och Sniffer Bike 790



Figur 3.5: Mätarplacering Chalmers Tvärgata. Karta skala 1:1900 ©Lantmäteriet.

3.3.3 Mätning i Slottsskogen och Kungsparken

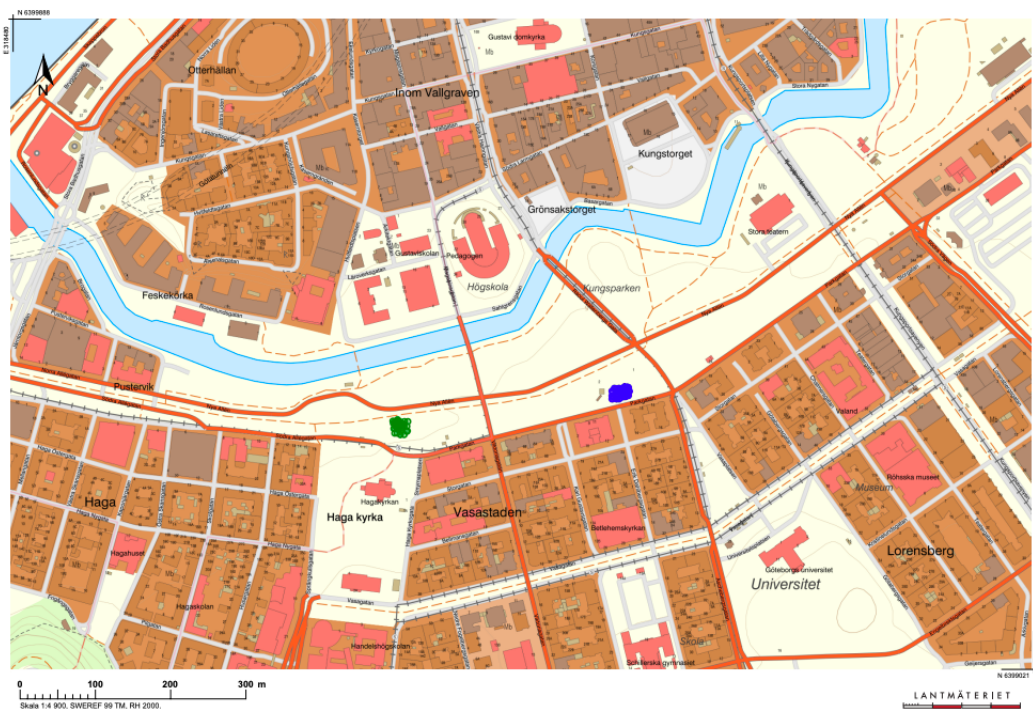
Slottsskogen och Kungsparken är två platser i Göteborg där det vistas mycket människor, framförallt under sommartid, därför är det av relevans att undersöka luftkvaliteten där. Åtta stycken LCAQMP:s samt två stycken Sniffer bike användes för mätningen. LCAQMP startades 11:00 och två timmar senare placerades de i fyra stycken par och lades i dubbla plastpåsar för regnskydd. Det gjordes hål i botten av plastpåsarerna för att göra ett inlopp till diffusionstorkarna och en slang fästes med

3. Metoder

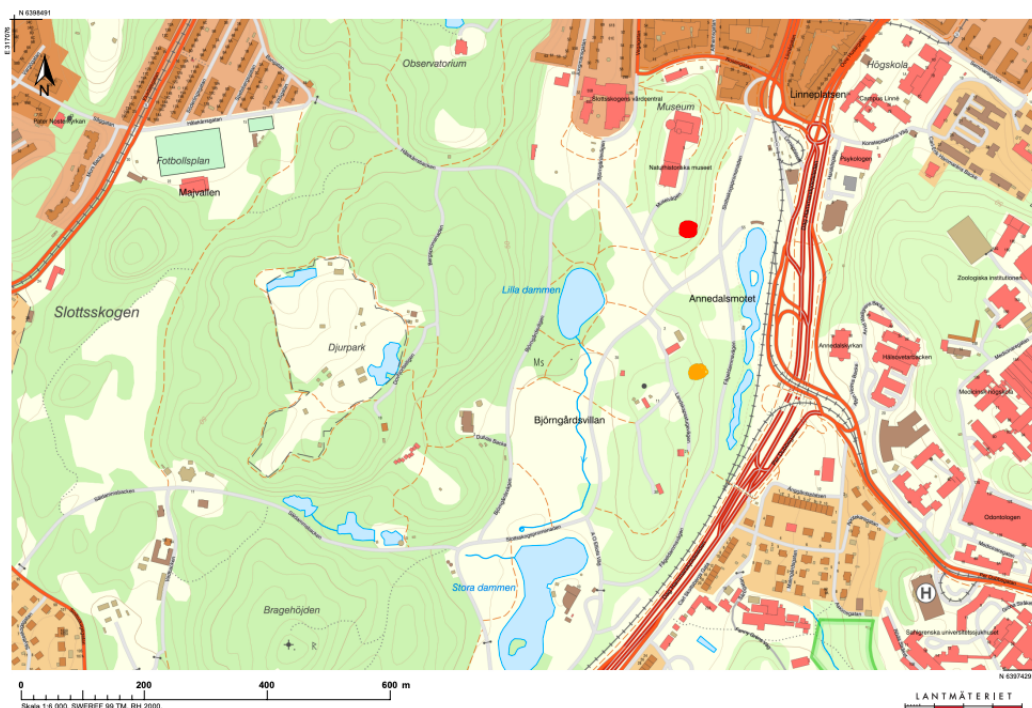
buntband runt toppen av påsarna för att användes som utlopp. Enhet 2, 3, 4 och 5 samt Sniffer bike 801 placerades i Kungsparken vid 14:00 och enhet 6, 7, 8 och 9 samt Sniffer bike 790 placerades i Slottsskogen vid 14:28 . Se tabell 3.6 och figurerna 3.6 och 3.7 för de olika mätarnas placeringar. Experimentet avslutades efter ett drygt dygn när batteriet på enhet 8 tog slut.

Tabell 3.6: Placeringar av mätare i Slottsskogen och Kungsparken.

Park	Plats	Mätare
Kungsparken	Buske vid byggarbetsplats (Grön)	LCAQMP 2 och 3
Kungsparken	Buske vid minigolfbana (Blå)	LCAQMP 4 och 5, Sniffer bike 801
Slottsskogen	Backe vid dansbana (Orange)	LCAQMP 6 och 7
Slottsskogen	Träd vid backe (Röd)	LCAQMP 8 och 9, Sniffer bike 790



Figur 3.6: Placering av mätare i Kungsparken. Karta skala 1:4900 ©Lantmäteriet.



Figur 3.7: Placering av mätare i Slottsskogen. Karta skala 1:6000, ©Lantmäteriet.

3.3.4 Mätning i Fysikens Klätterlab

Mätningen startades 14:53 i en ”renare” miljö på Chalmers campus där de stod i en timme och 47 minuter för att säkertsälla att mätarna hade ungefär likanande startvärden. Alla mätarna flyttades senare in i ett annat rum där de förvarades i fem minuter och därefter flyttades de in i Fysikens Klätterlab där de placerades bredvid varandra på en höjd ca 3 meter över marken. De mätare som användes var LCAQMP 5, 6, 8 och 9 samt Sniffer Bike 790 och 801. Experimentet avslutades runt 12-tiden cirka två dygn från start när den sista mätarens batteri tog slut.

3.4 Utveckling av hårdvara

I följande kapitel beskrivs metoden för vidareutvecklingsarbetet med LCAQMP:s hårdvara, vilket innefattar det yttre höljet samt mittenplattan där sensorerna är monterade.

3.4.1 Låda

Lådan för LCAQMP har genomgått flera olika produktionsprocesser. Till en början fortsattes arbetet från föregående kandidatgrupp. Det visade sig att det föregående grupp lämnade över hade andra dimensioner på lådan, detta ledde till att en ny låda behövde framställas. Det skapades en prototyp på lådan som 3D-printades för att testa om de olika komponenterna passar. Tillslut beställdes det en redan existerande låda då detta skapade mindre arbete och bättre resultat för gruppen. Det skrevs ut

två ställningsbitar som placerades på vardera kortsida på lådan. Det borrades även hål i lådan för att fästa den nya mittenplattan genom änden av luftkanalen se figur 4.23 samt för att fästa diffusionstork men också leda membranpumpen se figur 4.22.

3.4.2 Mittenplatta

Under projektet skapas det en ny och förbättrad mittenplatta se figur 4.23. För att förbättra plattan skapades det en ny CAD-modell från start då det gruppen fick överlämnat inte var samma som den faktiskt produkten. Skillnaden var att den nya plattan var ihålig där sensorerna placeras. Sedan skapades det en ny luftkanal som sattes ihop med plattan i CAD och skrevs senare ut med en 3D-printer. Detta ledde till att det blev tätt mellan plattan och luftkanalen. Under luftkanalen skapades det en monteringsplatta som monteras ihop med mittendelen. På denna plattan sitter CozIR, BME680 och CCS811. Distansringarna till SDS011-sensorn skrevs också ut direkt på plattan för att minska antalet lösa delar.

3.5 Utveckling av mjukvara

Mjukvaran i LCAQMP har utvecklats och förenklats under arbetets gång. I följande avsnitt beskrivs utvecklingens process för Arduino respektive MATLAB-kod.

3.5.1 Arduino

Utveckling av LCAQMP-plattformens mjukvara grundades i systematisk genomgång i av Arduino-kod mottagen från föregående års kandidatarbete [13]. Felkällor identifierades under projektets gång, främst vid mätningar och tester, vilka åtgärdades i mån av tid. Ett framträdande problem vid projektets start var att de olika LCAQMP:s kördes med individuella Arudiono-skript, vilket blir problematiskt över tid om man ämnar funktionsändra var LCAQMP:s tillhörande kod. Problemet grundar sig i att sensorerna OX-A431 och NO2-A43F är kalibrerade utifrån individuell offset och känslighets-data. Problemet åtgärdades genom att inhämta kalibreringsvariabler från vektorer, där använd indexering var enhetsnumret. Följande identifierades även förbättringsområden inom datahantering samt tidssampling. För användarvänlighetens skull implementerades logiska funktioner sådana att LCAQMP:n inhämtar jämna millisekunder från Adafruit Feather M0 samt börjar mäta vid jämna minuter så att massinsamling av data med flera LCAQMP underlättas. Under arbetsprocessen kommenterades även relevanta funktioner då det sedan tidigare saknades.

3.5.2 MATLAB

Som verktyg för att hantera datan och producera grafer med möjlighet att göra en analys av resultatet har gruppen använt sig av MATLAB. Från tidigare år har det funnits kod att tillgå, men det har gjorts förbättringar på flera områden några av dessa är:

- Koderna har delats upp i funktionsfiler.
- Automatisera allt som tidigare behövde hårdkodas.
- Öka användarvänligheten på koden.
- Ge alla LCAQMP en egen färg för kontinuitet med figurer.
- Skapa möjligheten att endast skapa vissa plottar.

Den största förbättringen från tidigare år som gjorts är att koden delats upp i olika funktionsfiler istället för att ha allt i en stor fil, vilket har möjliggjort att gruppen har kunnat arbeta parallellt med olika delar av koden utan att det påverkar någon annan i gruppen. Ytterligare har det valts att lägga tid i utvecklingen på att minska mängden justeringar som behöver göras för att köra programmet och få ut grafer. Tidigare har dessa justeringar behövt göras direkt i koden, men nu fås upprutor upp för att mata in justeringarna, alternativt att MATLAB hämtar informationen själv från datorn.

Vidare har fokuset legat på att i allmänhet göra koden mer generell, lättläst och lättanvänd för att öka användarvänligheten. Detta har gjorts genom att antalet variabler som används har minskats och raderna kod komprimerats. Ett val som gjorts var också att varje enhet har en bestämd färg när den plottas i en graf, vilket gör att till exempel LCAQMP 3 alltid är i färgen magenta istället för att den tredje inlästa datan (vilket kan vara vilken som av enheterna) får den färgen. En ny funktion som anses önskvärd är möjligheten att kunna plotta endast en typ av värde för att kunna få en snygg graf att inkludera i till exempel en rapport, detta kommer att inkluderas genom att låta användaren välja från en lista vilka värden som skall plottas. Dessa kommer sedan att visas i varsitt fönster.

3.6 Kalibrering av sensorer

Genom att ansätta en datamängd från en referens på x-axeln och tillhörande mätdata från respektive LCAQMP på y-axeln kunde ett polynom av första ordningen anpassas till datan enligt kapitel 2.6. Anpassningen gjordes med MATLAB-tillägget "Curve Fitting", och de erhållna värdena på koefficienterna $\hat{a}$ och $\hat{b}$ kunde sedan implementeras i MATLAB-koden för att korrigera framtida data.

4

Resultat och analys

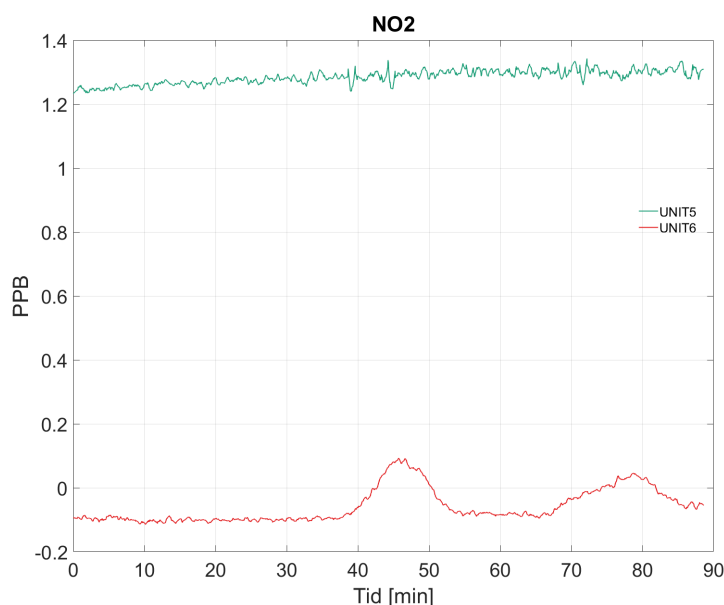
Här redovisas och analyseras resultat av fältmätningar, referensmätningar och förbättringar av hårdvara respektive mjukvara.

4.1 Referensmätningar

I detta avsnitt redovisas resultatet av de två referensmätningarna som utförts med hjälp av en Mass Flow Controller.

4.1.1 Referensmätning med NO₂- och CO₂-sensorer

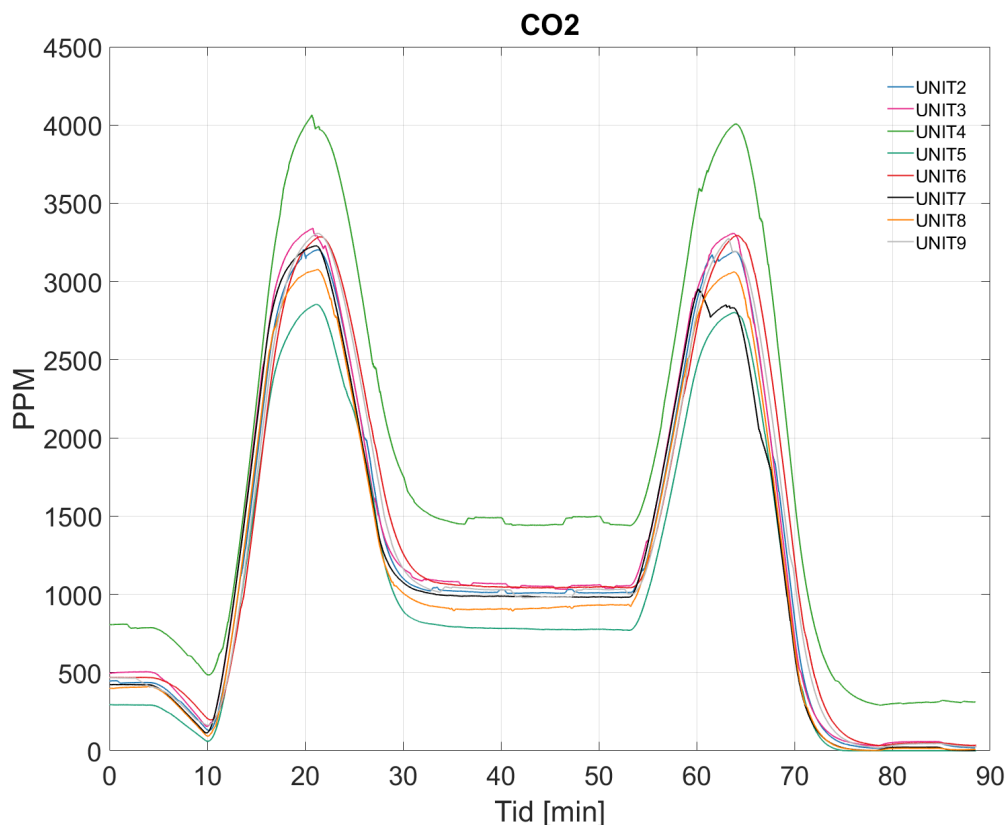
Mätdata inhämtades från respektive mätare exklusive LCAQMP 1 och 10, enhet 1 saknade fungerade CO₂IR-LP och enhet 10 skrev inte till sitt minneskort. Det visade sig även att data från MFC:n, innehållande bör- samt ärvärden för genomströmmande gaser, var korrupterad och oanvändbar som referens för LCAQMP-enheterna. Som referens för datan används istället tidpunkter för korrigering av ansatta gasmängder vilka redovisas i tabell 3.1. Då respektive mätare befann sig i en större kontrollmiljö presenteras inga resultat om stigtider i avsnittet.



Figur 4.1: Uppmätt NO₂-data från LCAQMP från den första MFC-mätningen.

Ovan i figur 4.1 visas mätresultatet för NO_2 under händelseförloppet presenterat i tabell 3.1. Enhet 5 redovisas som grön och enhet 6 som röd i figuren. Som minst ansattes 0,002 l/min av NO_2 vilket motsvar ett flöde på 50 ppb. Ingen av enheterna visade utslag som skalärt eller tidenligt kan jämföras med flödet genom MFC:n vilket innebär att LCAQMP-enheterna vid tillfället inte kunde uppmäta en pålitlig koncentration NO_2 .

Nedan i figur 4.2 visas mätresultatet för CO_2 över händelseloppet. Utifrån mätningen kan det urskiljas att respektive mätare följer samma trend gällande förändring av uppmätt gashalt. LCAQMP-enheterna uppvisar förändring av utslag vid samma tidsenhet trots storleken på det uppvisade värdet kan variera mellan mätarna. Detta kan speciellt urskiljas vid tidpunkterna 14, 25, 57 och 68 minuter i figur 4.2. Det visar sig att tidpunkterna även sammanfaller med de tidpunkter då flödet av CO_2 genom MFC:n korrigerades, med en mindre fördröjning. Det innebär att respektive mätare visade utslag på gasförändring samtidigt med MFC:n.



Figur 4.2: Uppmätt CO_2 -data från LCAQMP från den första MFC-mätningen.

Då mätvärden mellan LCAQMP-enheterna följer samma trend kan antagandet att mätskillnader mellan enheter beror på en offset och en faktor föras, d.v.s. att felet är linjärt beroende. Under tidperioden 30-55 minuter hölls CO_2 -koncentrationen konstant genom MFC:n vilket speglar sig grafiskt. Ansatt mängd CO_2 var då 0,15 l/min vilket motsvarar ett flöde på 1050 ppm koldioxid. Det framgår att sensor-värdena

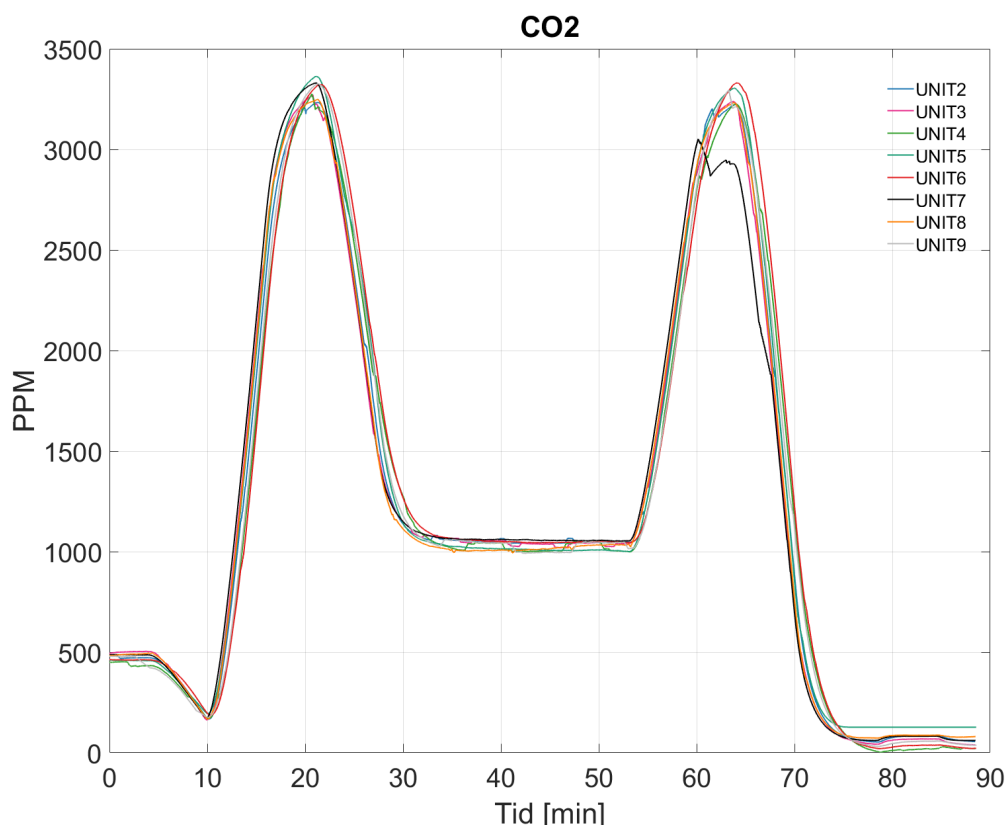
från LCAQMP-enheterna har stabiliserat sig kring olika ppm CO₂, exempelvis uppvisar enhet 4 värden kring 1500 ppm medan enhet 5 stabiliserar kring 750 ppm under tidsperioden. Samma tendens uppvisar sig genom hela mätningen, enhet 4 redovisar ppm över medel medan enhet 5 visar under.

För att vidare undersöka faktorfel mellan LCAQMP-enheterna utfördes en regressionsanalys enligt avsnitt 3.6. I tabell 4.1 redovisas de erhållna värdena på koefficienterna $\hat{b}$ och $\hat{a}$ för respektive LCAQMP-enhet. Korrektionsfaktorerna är framtagna mot ett medelvärde från respektive mätare med antagandet att det linjära felet var standardfördelat från faktiskt börvärde. Genom att applicera framtagna korrektionsfaktorer mot varje datamängd framtogs ny kalibrerad data. I figur 4.3 redovisas resultatet av analysen grafiskt. Det framgår att framtagna kalibrerad data sammanfaller med enbart små felmarginaler, vilket styrker resonemanget att felet mellan respektive LCAQMP-enhet är linjärt beroende. Resultatet innebär att med användning av unika korrektionsfaktorer för enskilda mätare kan mätfel minimeras i framtida mätningar. Det kan leda till pålitligare data, förutsatt att varje mätplattform har likvärdiga förhållanden då korrektionsfaktorerna togs fram.

Under mätningen hade LCAQMP-enheterna dessvärre varierande mätförhållanden på grund av varierande skick på mätarnas yttre hölje. Dessutom var kontrollmiljön som mätarna befann sig i inte helt lufttät. Allt detta innebar att de framtagna korrektionsfaktorerna inte kunnat implementeras i övriga delar av arbetet.

Tabell 4.1: Koefficienter för kalibrerad CO₂-data.

LCAQMP	$\hat{b}$ (lutning)	$\hat{a}$ (avvikelse)
2	1,002	37,44
3	1,025	11,84
4	1,153	287,5
5	0,882	121,1
6	0,985	13,04
7	0,987	58,27
8	0,968	68,95
9	0,997	11,75



Figur 4.3: Kalibrerad CO₂-data från MFC-mätning.

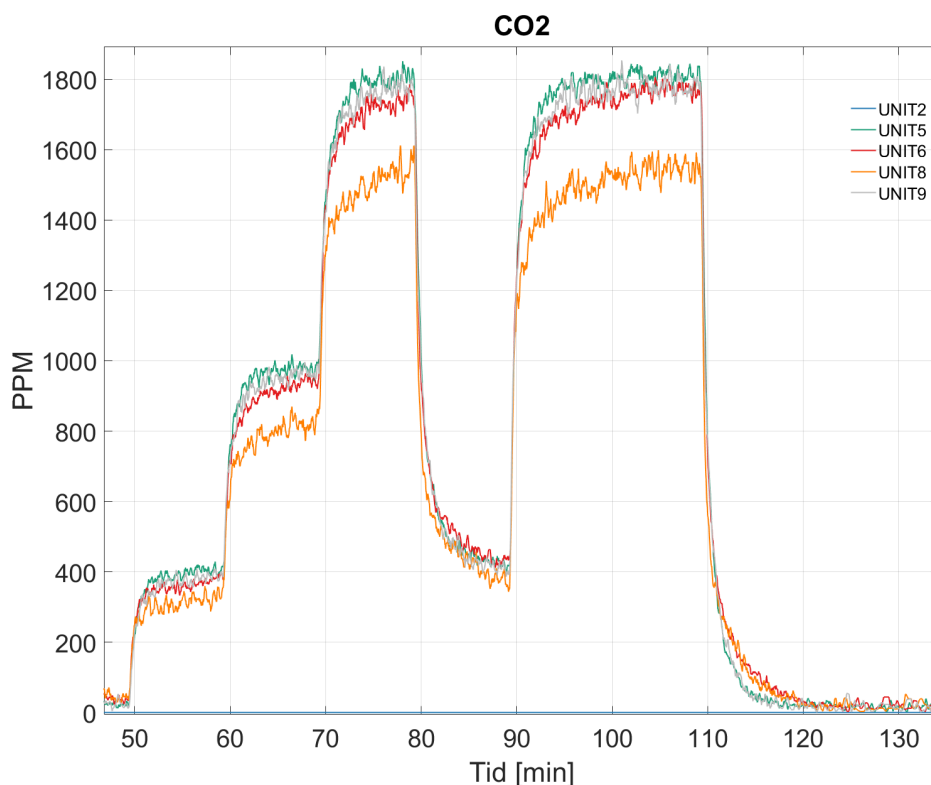
4.1.2 MFC-mätning med ny och gammal låda

Resultaten från de tre olika mätningarna presenteras i figurerna 4.4, 4.5 resp. 4.7. Under den första mätningen redovisas inte resultatet från enhet 2 då den kortslöts. Notera att resultaten som presenteras inte är kalibrerade med korrektionsfaktorerna från föregående referensmätning.

Något som går att se vid samtliga mätningar är att enheternas uppmätta CO₂-halter avviker från börvärdena som presenteras i tabellerna 3.2 till 3.4. Även inbördes avviker enheterna från varandra, och avvikelserna tycks öka vid högre halter. Enhet 2, med den nya designen, hamnar genomgående på värden närmare börvärdet än de andra enheterna. Däremot tar den längst tid på sig att få en stabil signal. Att den tar lång tid på sig att få en stabil signal kan bero på att den var placerad sist i flödesslangens utlopp (se figur 3.2). Detta leder till att endast en del av det ursprungliga flödet når till enheten, och detta flöde kommer förmodligen att ha en lägre total energi än vad det ursprungliga flödet hade (och således även en lägre flödes hastighet). Att den nya lådan mäter närmare börvärdet ger en indikation om att den nya lådans luftkanal eventuellt är mer lufttät än den tidigare designen.

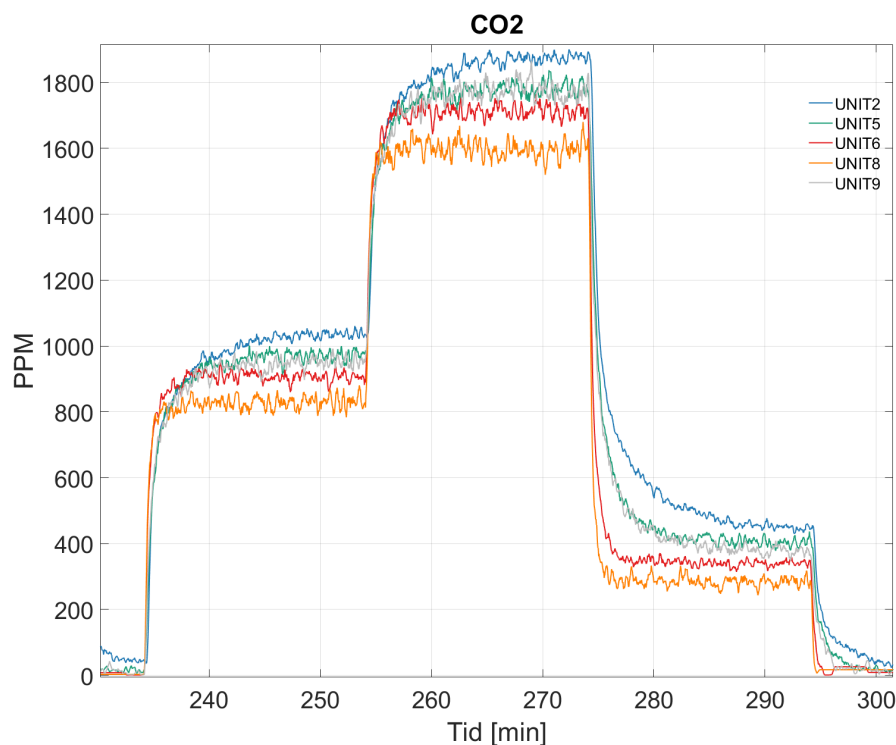
Från figur 4.4 syns att signalen inte hinner stabilisera sig för någon av enheterna när CO₂-nivån hölls konstant i tio minuter under det första mätförsöket. När samma

CO₂-halt kördes i 20 minuter hinner signalen åtminstone stabilisera sig något. Enhet 8 registrerar lägre CO₂-halter jämfört med de andra enheterna, och avvikelsen blir större ju högre halten är. Eftersom enhet 8 var placerad näst sist i utloppet kan den lägre uppmätta halten eventuellt förklaras med samma resonemang som för enhet 2, i kombination med en luftkanal som läcker mer. Även enhet 6 som var placerad tredje sist mäter näst lägst halt, även om beteendet här inte är lika tydligt. Pumpen tycks inte ha någon märkbar inverkan på resultatet, då både enheten med lägst och högst uppmätt halt (bortsett från enhet 2) CO₂ hade pump.



Figur 4.4: Resultatet från försök 1 där enhet 5 och 8 hade pump och enhet 6 och 9 inte hade det. Enhet 2 var kortsluten under försöket.

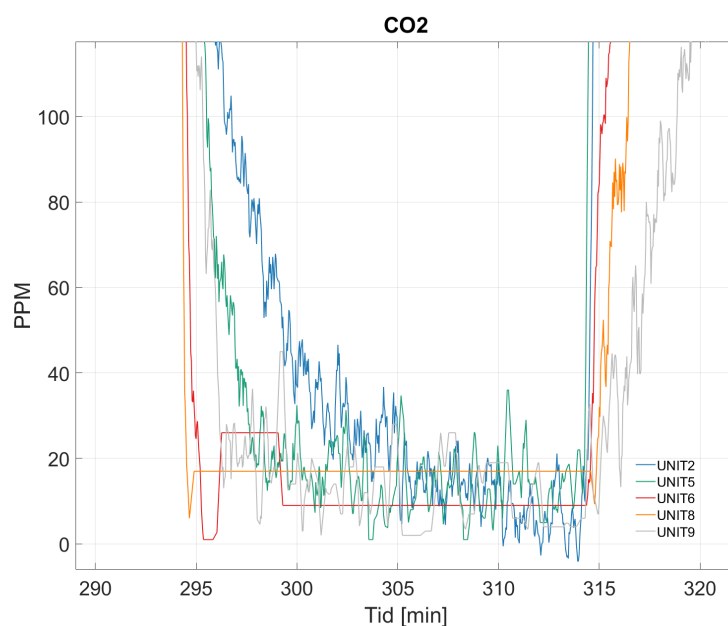
Resultatet från försök 2 (se figur 4.5) visar att enhet 2 med den nya lådan mäter högre halter av CO₂ än de andra enheterna, och att den tar längre tid på sig att få en stabil signal. För de övriga enheterna syns att de som saknar diffusionstork mäter lägre halter än enheterna med diffusionstork. Detta kan emellertid även bero på enheternas placering som tidigare nämnt.



Figur 4.5: Resultatet från försök 2 där enhet 2, 5 och 9 hade diffusionstork och enhet 6 och 8 inte hade det.

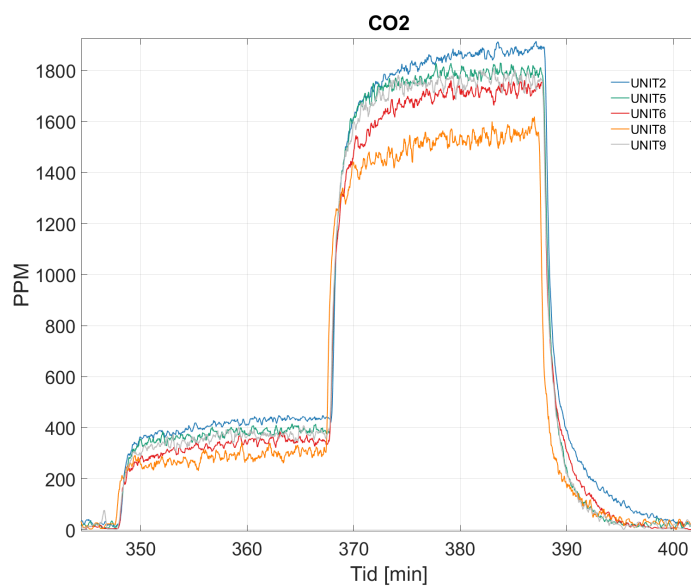
Enheterna utan diffusionstork uppvisar dessutom en kortare falltid i försök 2, d.v.s. det går fortare för dessa enheter att nå en stabil nivå när CO_2 -halten sänks än för enheterna med diffusionstork. I figur 4.5 syns detta tydligast när signalen faller från ca 1800 ppm till runt 400 ppm. I föregående försök (se figur 4.4) var det just dessa enheter som hade längst falltid istället för kortast (bortsett från enhet 2), vilket innebär att diffusionstorken troligtvis är en bidragande faktor till en ökad falltid. Detta kan bero på att luften som sugas från flödet färdas direkt in i SDS:en utan att behöva passera genom luftgångarna i torken. Det skulle eventuellt kunna vara så att luft "fastnar" eller bromsas upp i kammaren med silikagel innan den färdas vidare.

Vid närmare inspektion går det även att urskilja att CO_2 halten faktiskt når noll för enheterna utan diffusionstork. I figur 4.6 syns detta då kurvorna planar ut och blir konstanta. Detta beror på att nollor filtreras bort och ersätts med föregående mätvärde i MATLAB för att underlätta dataanalysen, (ett problem som uppstår med CO_2 -sensorerna är nämligen att de mäter noll när de inte ska det ibland). Signalen går endast ner till noll för dessa enheter vid försök 2 (inte vid någon annan mätning) vilket skulle kunna förklaras med att diffusionstorkarna läcker in luft från omgivningen.



Figur 4.6: Förstorad bild på försök 2 där CO₂-halten ska bli noll.

I försök 3 syns inte längre någon större skillnad i falltid, samtidigt som enhet 6, och framförallt enhet 8 fortsatt mäter lägre halter CO₂ än övriga enheter. Plastfolien verkar inte ha någon större inverkan på enheternas stig- och falltid. Däremot mäter enhet 8 lägre halt CO₂ än vid tidigare försök. Detta syns tydligast vid jämförelse av figur 4.5 och 4.7 där övriga enheter mäter ca 1800 ppm.



Figur 4.7: Resultatet från försök 3 där enhet 6 och 8 inte längre var omslutna av plastfolie.

4.2 Laborariemätningar

I följande avsnitt redovisas resultat för de laborariemätningar som genomförts under projektet.

4.2.1 Batteritest i skåp

Det antas att batterierna från start hade samma kapacitet från när de köptes in vilket gör att förutsättningarna för dem var samma, därför är det LCAQMP:ernas uppsättning och variation som avgör hur snabbt batterierna tar slut. Resultatet visar att de mätare med pump (LCAQMP 3, 5, 7, 8 och 10) hade en kortare batteritid än de utan. Dock finns det en variation mellan de olika batteriernas körtid vilket antas bero på ytterligare faktorer som individuell variation mellan de olika mätarna, till exempel om de har NO₂ och O₃ eller inte vilket påverkade batteritiden. De plattformar som har fler sensorer, pump och annat uppkopplat har kortare batteritid.

Tabell 4.2: Respektive LCAQMP:s batteritid redovisat i timmar.

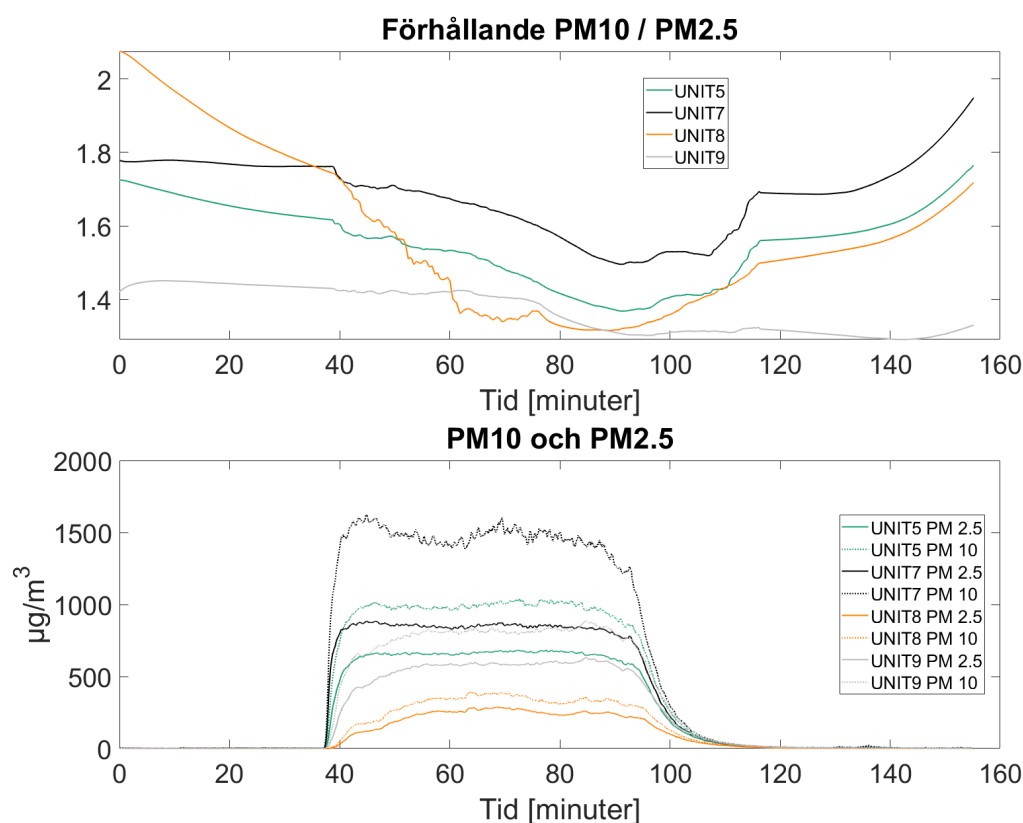
LCAQMP	Batteritid [h]
1	44,64
2	32,16
3	23,86
4	44,70
5	25,85
6	44,63
7	31,24
8	29,82
9	44,88
10	36,07

4.2.2 Mätning med partikelgenerator

Under första partikeltestet visade det sig att partikelhalten ansatt vid start av mätningen var hög nog för att respektive LCAQMP-enhet skulle ge maxutslag för både PM_{2,5} samt PM₁₀. Det går alltså inte att dra någon slutsats då resultatet visade samma för varierande volymflöde.

I figur 4.8 visas utslag för PM_{2,5} respektive PM₁₀ under partikelmätning 2 samt förhållandet mellan dem. Oturligt nog kunde enbart data från enhet 5,7,8 och 9 inhämtas då övriga enheter ej hade överfört data till deras SD-kort under mätningen. Genom att studera resultatet framgår det att mätenheterna inte gett något utslag för partiklar då volymflödet var ansatt till 25 och 50 l/h. Det kan tyda på att AAO:n inte tillfört partiklar under perioden då volymflödet var under 75 l/h, dock kan ingen säker slutsats dras.

Under tidsperioden 36-91 min ansattes volymflödet konstant till 75 l/h och utifrån grafen går det att urskilja att varje LCAQMP-enhet ger utslag vid olika partikelnivåer. Det finns många bakomliggande faktorer som skulle kunna förklara variationerna i resultatet. Partiklar fördelas inte jämnt i ett rum likt en gas utan påverkas av bl.a. tyngdkraft vilket presenteras i avsnitt 2.5. Däremot framgår det att respektive mätare uppmätt liknande förhållande mellan PM_{10} och $PM_{2.5}$ vilket även redovisas i figur 4.8. Trots att mätresultatet är väldigt olika för LCAQMP-enheterna kan det ändå valideras då de uppmätt snarlika förhållanden mellan partikelhalterna, det innebär att mätarna gett utslag på en partikelmängd med likvärdig partikelsammansättning med olik luftkoncentration. Det tyder på att uppmätt variation mellan mätenheter inte grundas i sensorfel hos SDS011 utan avvikelser i kontrollmiljön samt partikelflödet.



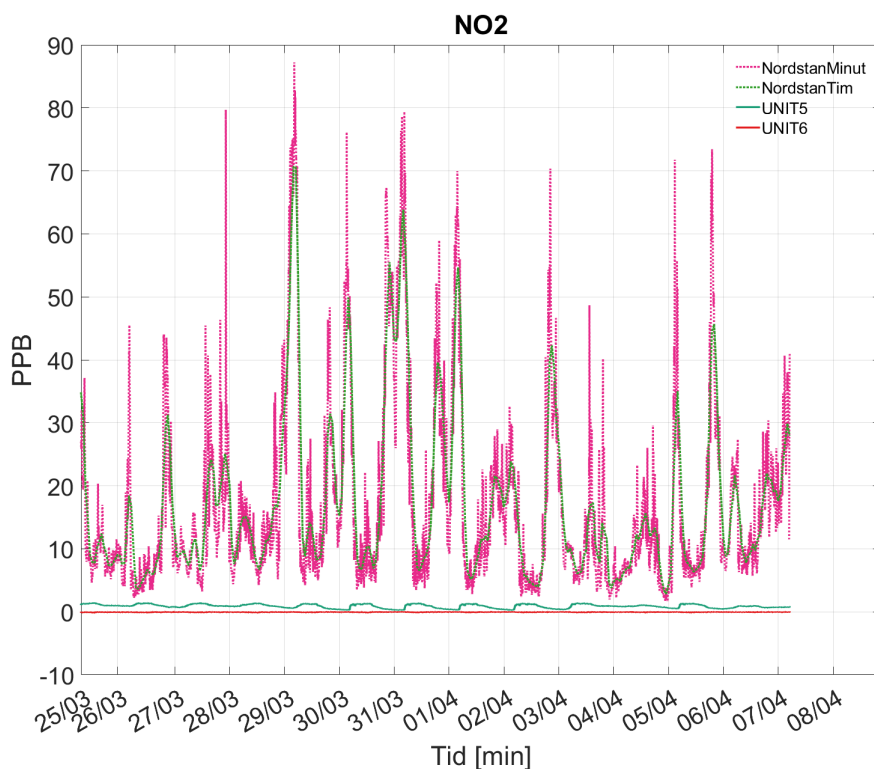
Figur 4.8: Uppmätt halt partiklar samt förhållande för partikelmätning med AAO.

4.3 Fältmätningar

I följande avsnitt redovisas resultatet för de fältmätningar som gjorts under arbetets gång.

4.3.1 Mätning på Femmans tak

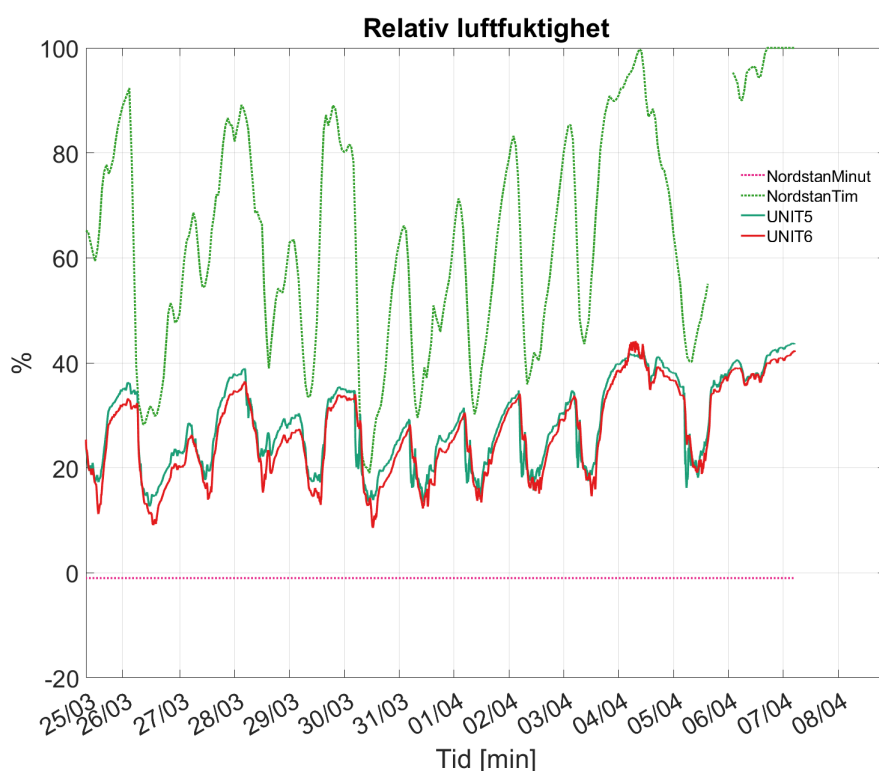
Mätningen som gjordes på taket på Nordstan/Femmanhuset var den längsta mätningen som utfördes vilket gör att det går att utläsa tydliga trender över tid. Den data som finns att jämföra med från Miljöförvaltningen som också mäts av LCAQMP är PM_{10} , $PM_{2,5}$, relativ luftfuktighet, temperatur och kvävedioxid. I figur 4.9 visas den uppmätta datan från LCAQMP och Miljöförvaltningen för NO_2 . Det är en mycket stor avvikelse mellan den påvisade datan. Även när Miljöförvaltningens data är som lägst uppmäter LCAQMP fortfarande inte en mängd som är i närheten av den. Detta stärker resonemanget som fördes i 4.1.1 att NO_2 -A43F-sensorn inte uppmäter tillförlitlig data.



Figur 4.9: Uppmätt data av kvävedioxid från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde och minutmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.

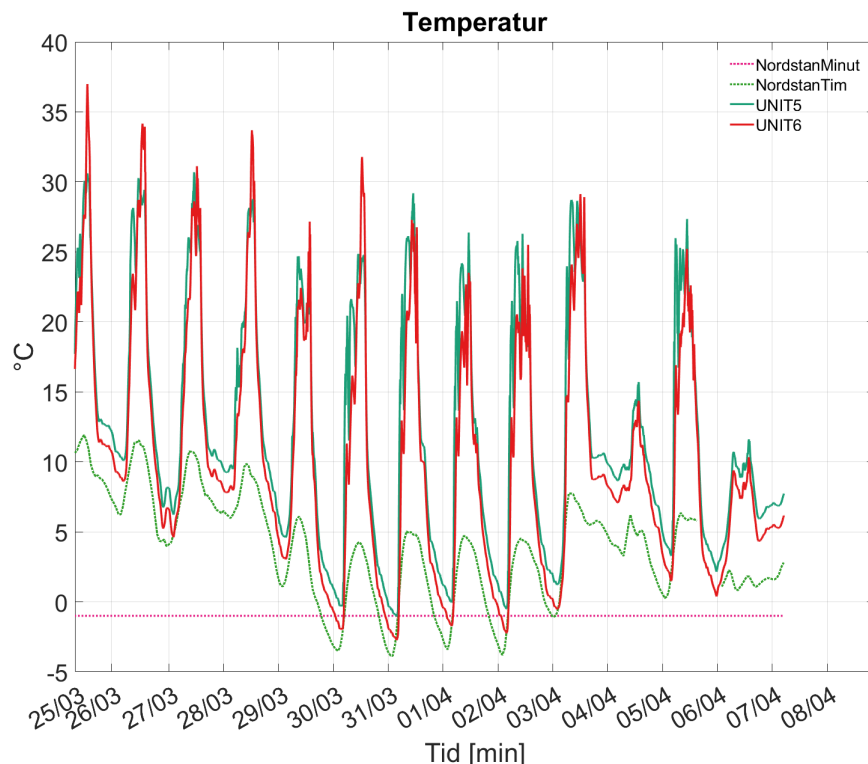
Den relativa luftfuktigheten vilket visas i figur 4.10 påvisar mycket fränskiljande mätvärden mellan Miljöförvaltningen och LCAQMP. Under mätperioden var det regnväder en stor del av tiden, vilket Miljöförvaltningens data också visar eftersom att luftfuktigheten är över 40% under i princip hela mätperioden. Den stora avvikelsen mellan de båda mätarna beror sannolikt på de förutsättningar som LCAQMP

har för att mäta luftfuktighet. Eftersom LCAQMP:erna har diffusionstorkar installerade, vars syfte är att minska fuktigheten på luften in i mätaren är det logiskt att värdet som påvisas är lägre. Sensorn som mäter luftfuktighet, BME680, sitter inuti luftkanalen på LCAQMP vilket betyder att luften som mäts har passerat diffusionstorken och därför är mindre fuktig. Ytterligare en faktor som kan ha påverkat resultatet är att mätarna var placerade i en låda vilket gör att det finns en risk att fukten inte når fram till mätaren lika enkelt som ute i den fria luften där Miljöförvaltningens mätare var.



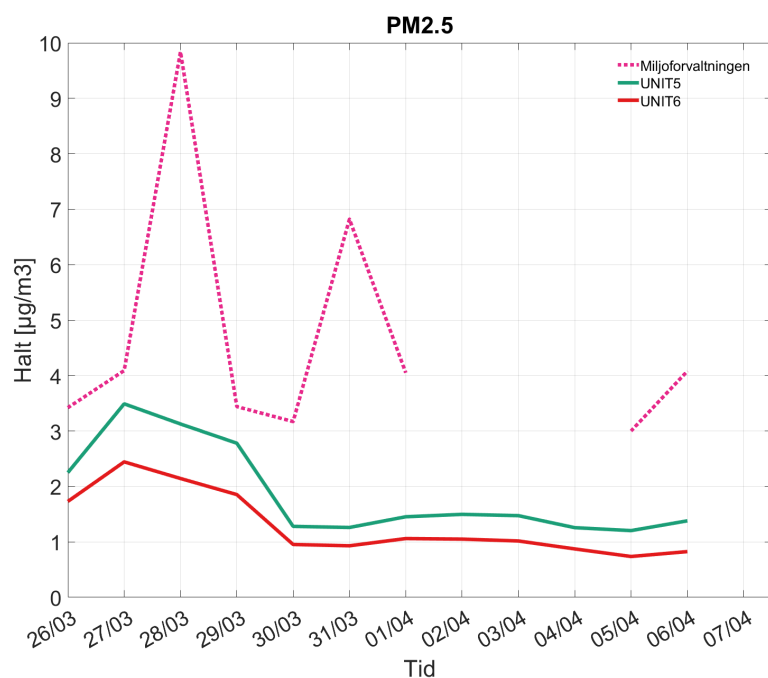
Figur 4.10: Uppmätt relativ luftfuktighet från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.

I figur 4.11 visas temperaturvariationerna hos LCAQMP. Mellan det högsta och lägsta värdet är differensen nästan 40 grader. Eftersom att mätningen utfördes i mars är det mycket osannolikt att temperaturen överskred ens 20 grader, vilket också kan ses på den visade temperaturen från Miljöförvaltningen som hade ett maximalt värde på cirka 13 grader. Orsaken till att LCAQMP uppmäter avsevärt mycket högre mätvärden antas bero på att sensorerna var förvarade i två lådor, både den stora plastlådan och i LCAQMP:s yttre hölje. Det antas att dessa skapade en "växthuseffekt" där värmen från solen fastnade i lådorna och värmden upp dem. Ytterligare en faktor med dessa lådor som påverkade temperaturen var att de inte möjliggjorde att vind kunde flöda in i stor utsträckning vilket hade kylt ner sensorerna. Att den uppmätta temperaturen från LCAQMP trots de nämnda faktorerna sammanfaller med värdena från Miljöförvaltningen i dalarna, vilket motsvarar nattetid, stärker argumentet att det är värme från solen som leder till stor värmeutveckling i lådorna.

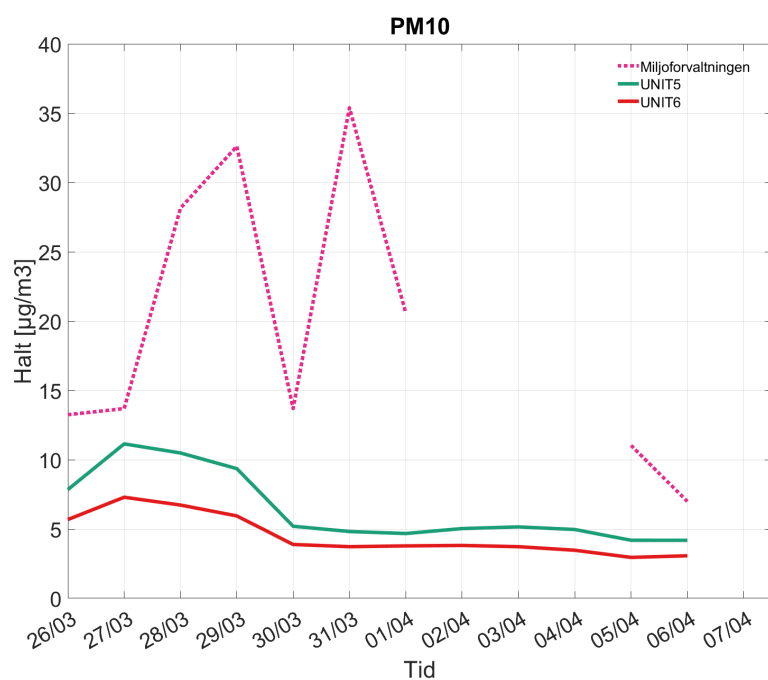


Figur 4.11: Uppmätt temperatur från LCAQMP 5 och 6 samt timmedelvärde uppmätt av Miljöförvaltningen.

Som nämnt i avsnitt 1.1 beskriver miljömålen att dygnsmedelvärdet för PM_{10} ej får överskrida $30 \mu\text{g m}^{-3}$ respektive $25 \mu\text{g m}^{-3}$ för $PM_{2,5}$. I figur 4.12 och 4.13 redovisas dygnsmedelvärdet för $PM_{2,5}$ respektive PM_{10} från LCAQMP 5 och 6 samt Miljöförvaltningen. Totalt är det endast två dygnsmedelvärden på PM_{10} från Miljöförvaltningen från 29/3 och 31/3 som överskrider de satta miljömålen. Dessa värden är avsevärt mycket högre än de LCAQMP visade. Den mest sannolika orsaken till den påvisade skillnaden är som tidigare nämnt att mätarna förvarades i en låda vilket förmodligen hindrade en viss mängd partiklar från att flöda in och nå sensorerna. Viktigt att notera är att dygnsmedelvärde inte är representabelt för max- och minvärden från en mätning, exempelvis var maxvärdet för enhet 5 över $110 \mu\text{g m}^{-3}$ på $PM_{2,5}$.



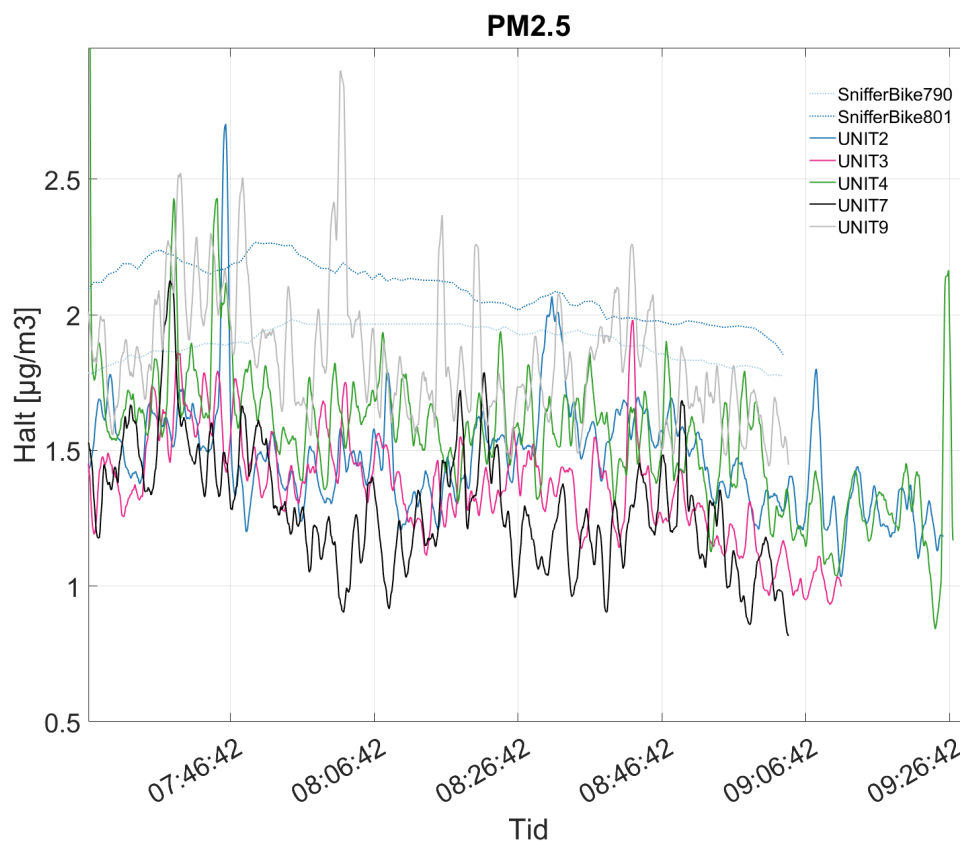
Figur 4.12: Dygnsmedelvärde $\text{PM}_{2.5}$ för LCAQMP 5 och 6 jämfört med Miljöförvaltningens mätare.



Figur 4.13: Dygnsmedelvärde PM_{10} för LCAQMP 5 och 6 jämfört med Miljöförvaltningens mätare.

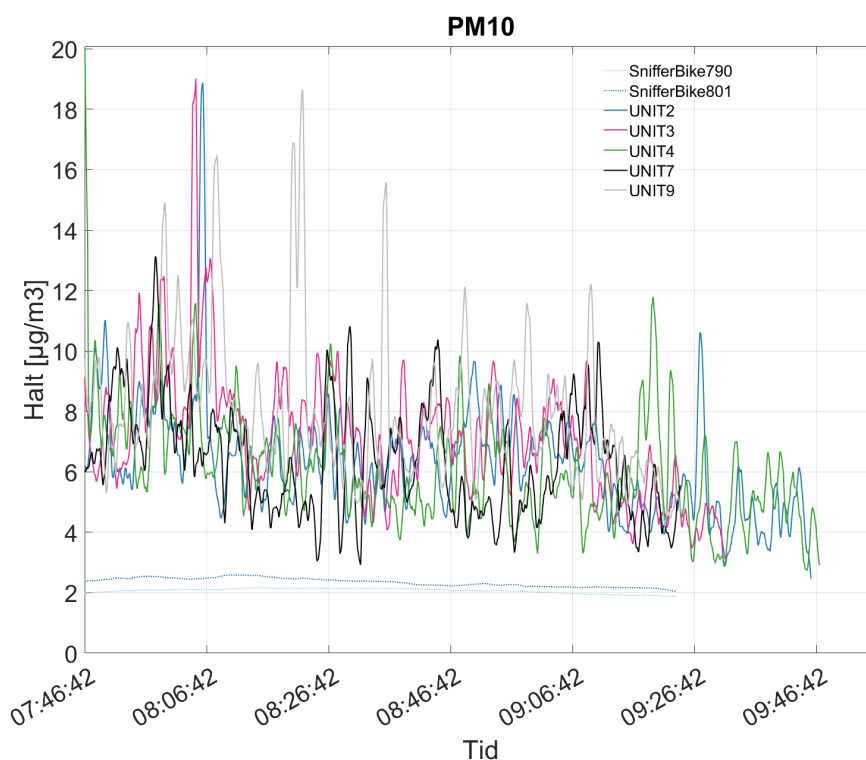
4.3.2 Mätning Chalmers campus

I figur 4.14 samt 4.15 visas uppmätta partikelvärden PM_{10} och $PM_{2,5}$ från mätningen som gjordes på Chalmers tvärgata. De uppmätta värdena av $PM_{2,5}$ på alla enheter överskred aldrig $3 \mu g m^{-3}$ för någon LCAQMP eller Sniffer bike. Signalen från alla LCAQMP:er är mycket brusiga vilket antas bero på den låga mängden partiklar. Trots den brusiga signalen går det att urskilja att båda Sniffer bike uppmäter aningen högre värden än LCAQMP. Inga tydliga trender eller skillnader mellan de olika mätplatserna kan utläsas då mätningen genomfördes under en kort tid.



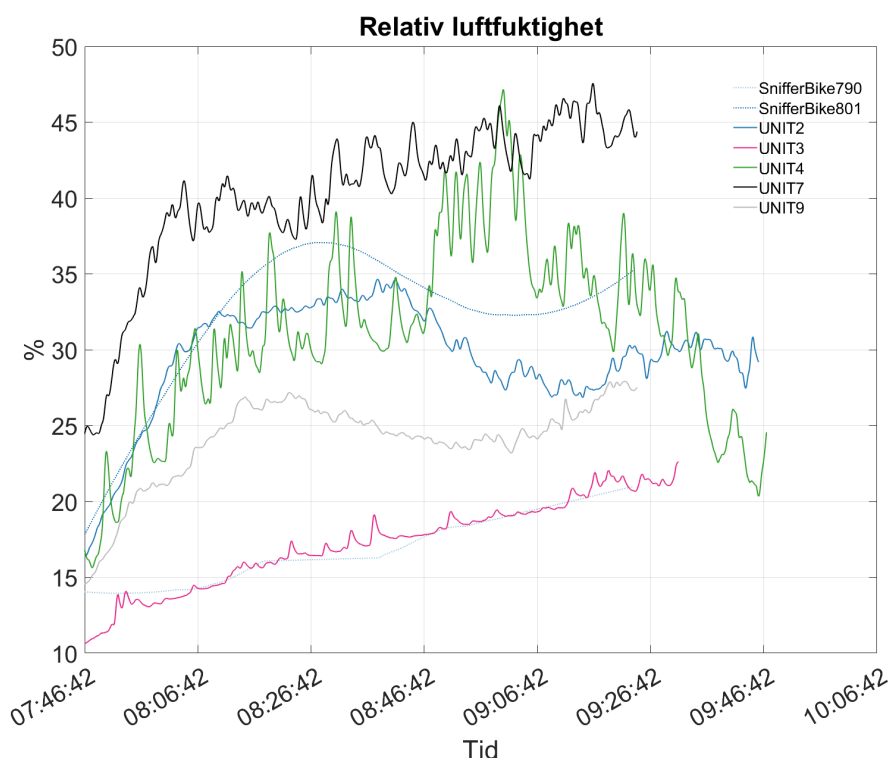
Figur 4.14: Uppmätt resultat av $PM_{2,5}$ vid mätning på Chalmers campus.

Det uppmätta resultatet av LCAQMP för PM_{10} är också mycket brusigt trots att något högre värden uppmäts. Det finns dock en tydlig skillnad mellan LCAQMP och Sniffer bike jämfört med resultatet för $PM_{2,5}$ vilket är Sniffer bike uppmäter lägre värden än LCAQMP under hela mätningen. Eftersom det nämnts att Sniffer bike inte uppvisar helt tillförlitliga resultat på PM_{10} (se avsnitt 1.2.8) antas datan som LCAQMP påvisar vara mer tillförlitlig i detta fall.



Figur 4.15: Uppmätt resultat av PM_{10} vid mätning på Chalmers campus.

Den relativa luftfuktigheten, som visas i figur 4.16, visar stor variation mellan de olika värdena. Sniffer bike 790 och LCAQMP 4 som var placerade på samma plats visar inga likheter i varken trend eller värde. LCAQMP 4 börjar en nedåtgående trend när Sniffer bike 790 uppmäter sitt högsta värde. Däremot går det att urskilja en liknande trend mellan LCAQMP 9 och Sniffer bike 790 vilka var placerade tillsammans. Dock är det tydligt att de inte mäter samma mängd.



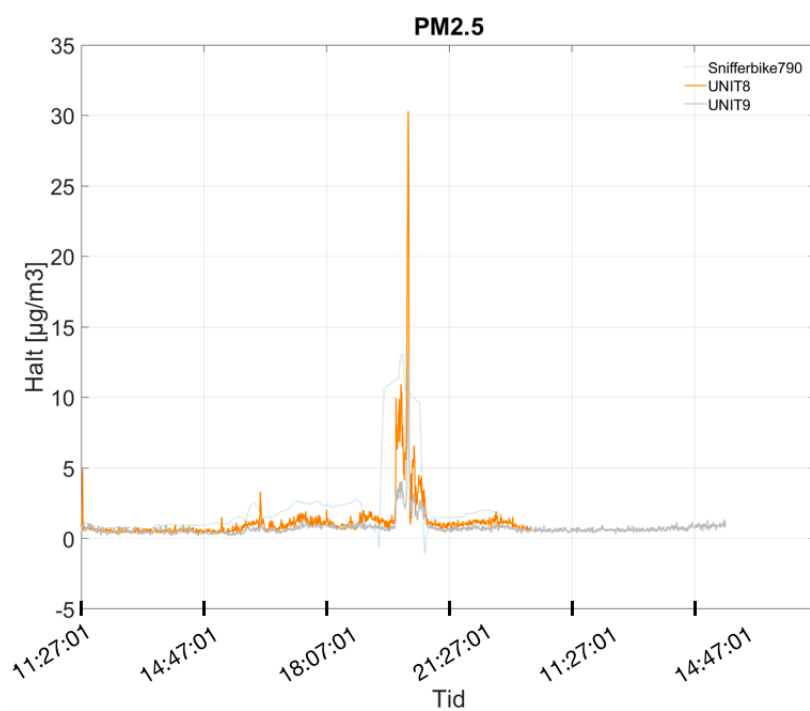
Figur 4.16: Uppmätt resultat av luftfuktighet vid mätning på Chalmers Campus.

4.3.3 Mätning i Slottsskogen och Kungsparken

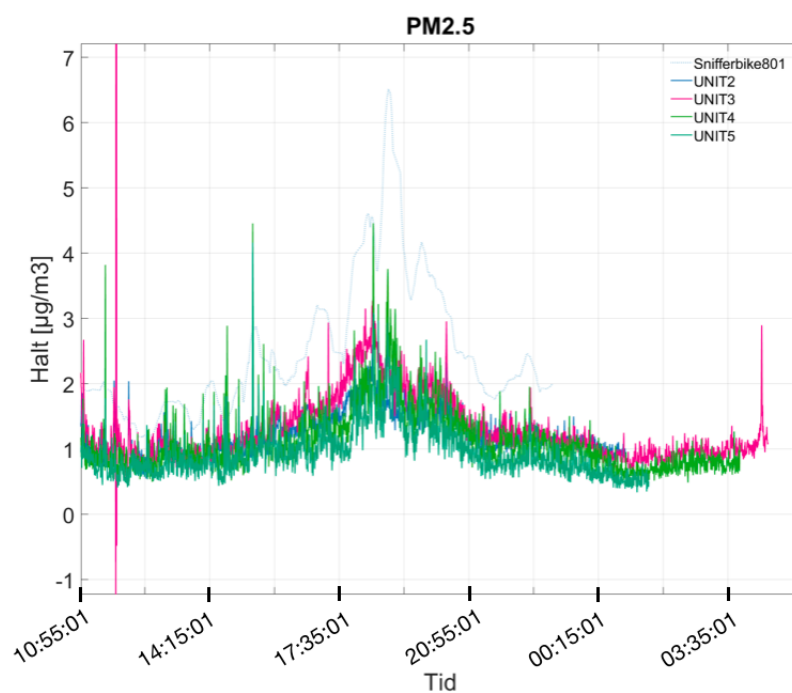
I figur 4.17 visas de uppmätta värdena av $PM_{2,5}$ från LCAQMP 8 och 9 samt Sniffer bike 790 vilka placerades i Slottsskogen. Där placerades också enhet 6 och 7 som inte är inkluderade i plotten eftersom enhet 6 fick fel på GPS-tiden och enhet 7 inte skrev någon data till SD-kortet. I Kungsparken var LCAQMP 2, 3, 4 och 5 samt Sniffer bike 801 placerade vars uppmätta värden av $PM_{2,5}$ visas figur 4.18. Anledningen till att signalen är så brusig i figur 4.18 är då signal-brusförhållandet ökar när signalen minskar (eftersom de uppmätta luftföroreningarna är låga).

Enhet 8 och 9 samt Sniffer bike 790 visar en stor topp på båda partikelstorlekarna vid cirka 20-tiden på kvällen. Detta gissas ha orsakas av att det grillades i närheten då det är osannolikt att den mängden partiklar normalt skulle uppstå vid den tiden och platsen eftersom den inte är i nära anslutning till en stor väg, industri eller andra källor.

Det uppmätta resultatet tyder på att det finns en viss skillnad mellan mängden partiklar i Slottsskogen jämfört med Kungsparken. Skalorna på graferna skiljer sig åt på grund av den tidigare nämnda toppen. Om den bortses från visar resultatet att $PM_{2,5}$ uppmätt i Slottsskogen inte överskrider eller är nära $5 \mu g m^{-3}$. I Kungsparken överskred både enhet 4 och 5 (de båda gröna som placerades vid en byggarbetsplats i Kungsparken) $4 \mu g m^{-3}$ vid två tillfällen och påvisar fler toppar oftare. Det går att



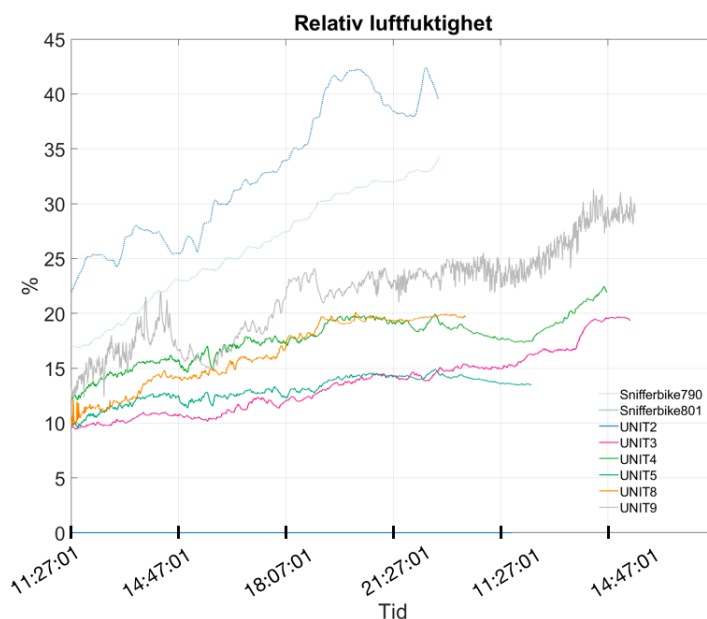
Figur 4.17: Uppmätta värden på $PM_{2,5}$ för LCAQMP 8 och 9 samt Sniffer bike 790.



Figur 4.18: Uppmätta värden på $PM_{2,5}$ för LCAQMP 2, 3, 4 och 5 samt Sniffer bike 801.

urskilja en förhöjning av värdena i Kungsparken, framförallt för Sniffer bike 801, runt 18-tiden på kvällen. De förhöjda värdena i Kungsparken antas orsakas av rusningstrafiken som pågår ungefär mellan 16 till 18 på eftermiddagen. En liknande ökning vid motsvarande tid går inte att urskilja i Slottskogen vilket antas bero på mätarnas placering, eftersom de i Kungsparken låg i nära anslutning till en trafikerad väg.

I figur 4.19 visas den relativa luftfuktigheten för båda Sniffer bike och alla LCAQMP utom enhet 6 och 7. Luftfuktigheten som mättes av Sniffer bike, framförallt 801, är avsevärt högre än någon LCAQMP. Båda mätplattformarna använder sig av BME680 för att mäta luftfuktighet men behandlat datan på olika sätt. Eftersom ingen exakt referensmätare användes går det inte att avgöra vilken av de två mätartyperna som uppmätt det mest verklighetstroga resultatet. Det finns heller ingen tydlig korrelation mellan en högre eller lägre luftfuktighet i någon av parkerna vilket heller inte var förväntat. En liknande trend mellan enhet 4 och 5 går att urskilja, dock finns det en storleksskillnad värdena emellan. Rimligheten i resultatet som helhet är svårbedömd, men det regnade lätt i slutet av mätningen vilket mätningen också påvisar genom att den relativa luftfuktigheten ökar. Därför antas resultatet vara relativt rimligt men inte helt tillförlitligt eftersom det finns avvikelser mellan de mätare som var placerade på samma geografiska position.



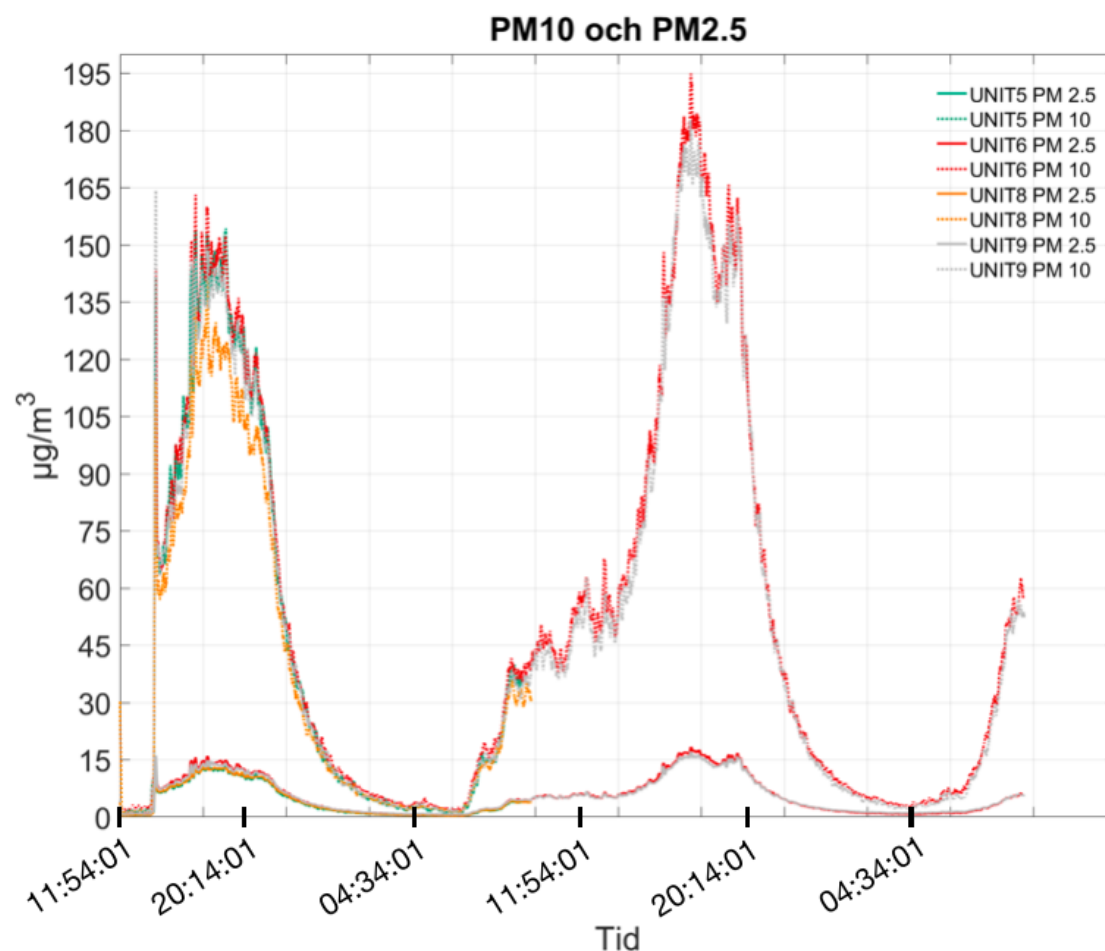
Figur 4.19: Relativ luftfuktighet i Slottskogen och Kungsparken för LCAQMP 2, 3, 4, 5, 8 och 9 samt Sniffer bike 790 och 801.

Det finns flera felkällor som identifierats under experimentet. Till exempel rördes och förflyttades mätarna mycket från att de startades tills mätningens slut. Orsaken till det var att de var tvungna att vara igång när de packades in i de regnskyddade påsarna eftersom det inte gick att komma åt dem när de väl lagts i samt att det är smidigare att genomföra den processen inomhus än ute i fält. I nuläget är LCAQMP

inte anpassade att mäta när de är i rörelse vilket bidrar till en osäkerhet i mätdata under den tiden. Det gäller framförallt mätning av partiklar då diffusionstorken verkar avge damm samt att partiklar uppsamlas som naturligt inte hade färdats in i mätaren om den varit still.

4.3.4 Mätning på Fysikens Klätterlab

I figur 4.20 redovisas partikelmängder grafiskt för PM_{10} respektive för $PM_{2.5}$ över mätningens förlopp. Mätvärden för Sniffer bike 790 samt 801 redovisas ej då mätarna fick slut på batteri kort efter mätningens start och visade ej jämförelsebara värden. Mätningen startades vid 14:54 och fortlöpte i två dygn. Enhet 5 och 8 var utrustade med membranpump vilket resulterade i kortare mättid. Resultatet från mätningen visar att LCAQMP-enheterna gett likvärdiga utslag vid samma tidpunkt vilket styrker uppmätt resultat.

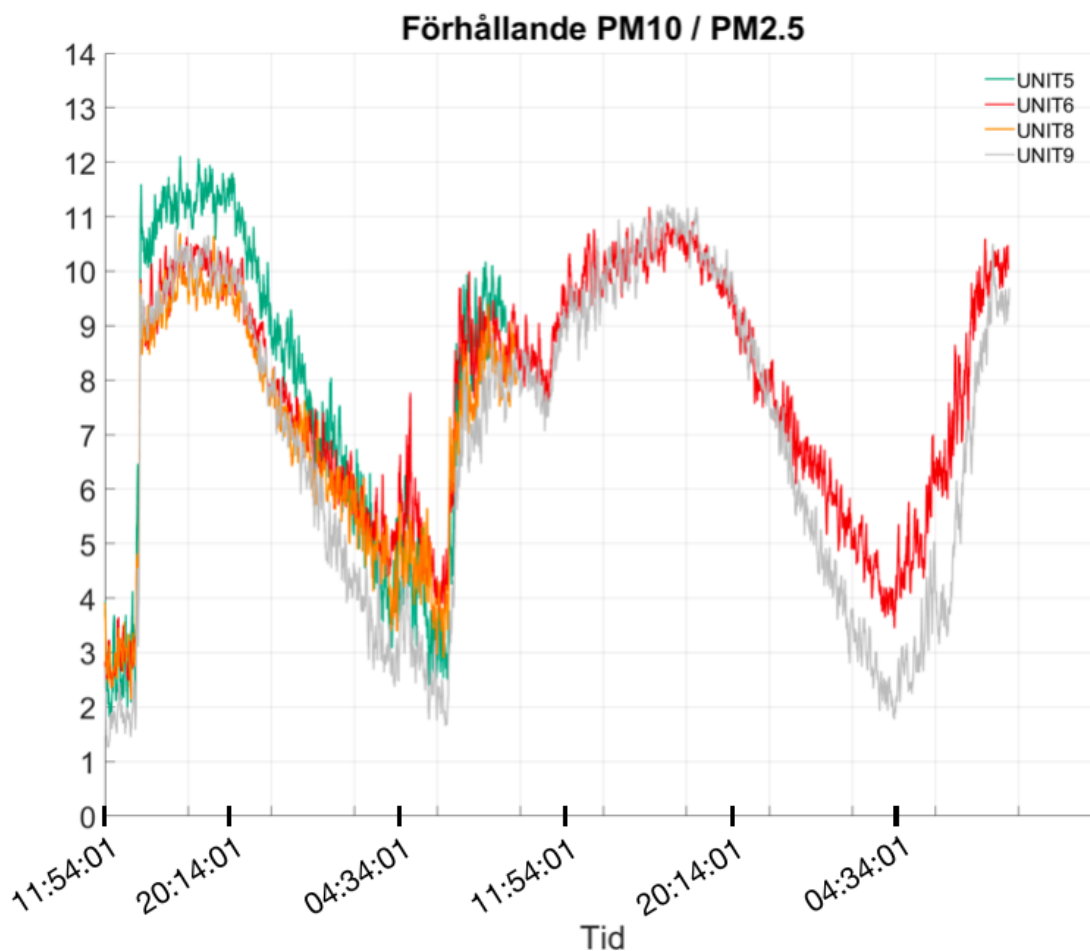


Figur 4.20: Uppmätt halt PM_{10} och $PM_{2.5}$ under mätning i Klätterlabbet.

Vad som även kan noteras är att det finns en stark korrelation mellan tidpunkter för utslag av partiklar samt Klätterlabbetts öppettid, vilket är mellan 09-22. Under

natten sjunker andelen partiklar mot noll och uppmätta toppar av partikelmängder visas grafiskt några timmar efter den traditionella arbetsdagens slut. Dessa höga halter antas uppstå till följd av kalkanvändning vid klättring. När kalk sönderdelas frigörs partiklar som sprider sig i luften vilket kan uppmätas av LCAQMP-enheterna. Exempelvis förmodas minskning av uppmätt partikelhalt under natten bero på gravitationens inverkan på partiklar, vilket presenteras i avsnitt 2.5. Partikelkoncentrationen i luften minskar då partiklarna sjunker till marken samtidigt som inga partiklar tillsätts.

Vidare är även förhållandet mellan PM_{10} och $PM_{2,5}$ intressant vilket visas i figur 4.21, i grafen redovisas PM_{10} som heldragen och $PM_{2,5}$ som streckad. Det framgår att förhållandet mellan partiklarna är som störst då LCAQMP-mätarna gett störst utslag respektive lägst förhållande där utslaget är minst. Partiklar inom PM_{10} är tyngre än de inom storleken för $PM_{2,5}$ vilket innebär att de påverkas av gravitation i större utsträckning och kan resultera i att dem i större andel faller till marken, detta nämns i avsnitt 2.5. Under de tider då ingen kalk frigörs skulle då förhållandet mellan PM_{10} och $PM_{2,5}$ minska, något som urskiljs grafiskt i figur 4.21.



Figur 4.21: Förhållande mellan PM_{10} och $PM_{2,5}$ i klätterlabbet.

Korrelationerna iakttagna under mätningen kan inte säkert fastslås, däremot vali-

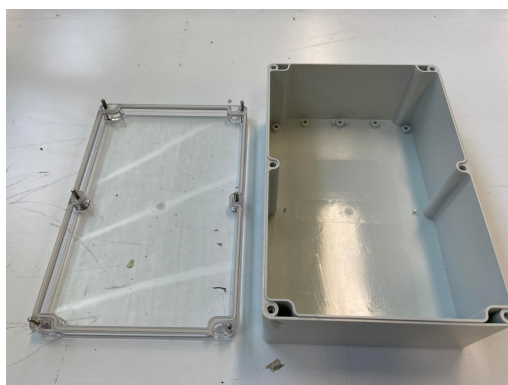
derar verkliga händelser de uppmätta partikelhalter under mätningens gång. Trots att inget referensvärde användes för att jämföra mätvärden kan ändå resultatet fastslås som pålitligt då respektive mätare visade likvärdiga mätvärden samt partikelförhållanden vid enig tidsenhet.

4.4 Utveckling av hårvara

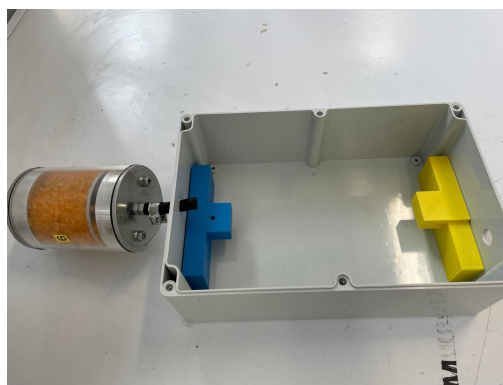
I kommande avsnitt kommer resultatet av arbetet med lådan och mittenplattan att presenteras. Den nya LCAQMP:n blev mer lufttät än den föregående modellen. Resultatet från stigtid-jämförelsen är inte tillräckligt bra för att komma fram till några definitiva slutsatser. Under testet fungerade bara CO₂ mätaren vilket gör det svårt att få en helhetsbild.

4.4.1 Låda

Den nya lådan beställdes från rspro då det blev mer effektivt att beställa en färdig låda som modifieras istället för att göra en själv se lådan i figur 4.22.



(a)



(b)

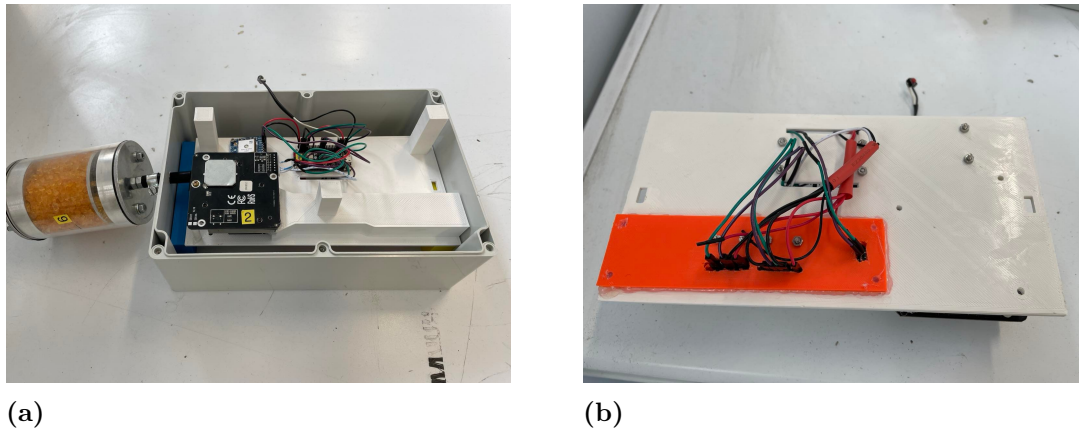
Figur 4.22: Nya lådan med diffusionstork och ställningar.

Den nya lådan blev mer lufttät än föregående då det inte borrades några extra hål utöver de som behövdes. Lådan är även skapad för att motstå både luft och fukt. Ställningsbitarna som skrevs ut passade lådan bra och underlättade monteringen. Den ena har en liten nedsänkning för att anpassa sig för monteringsplattan så att mittenplattan inte blir sned. Det borrades även hål i lådan för att fästa den nya mittenplattan genom änden av luftkanalen (se figur 4.23) samt för att fästa diffusionstork men också leda membranpumpen (se figur 4.22). Den nya lådan blev även mer lätthanterad och användarvänlig än den föregående då den istället för att ha fem rörliga komponenter bara hade två.

4.4.2 Mittenplatta

Den nya mittplattan är 3D-printad och mer användarvänlig än föregående. I den slutliga prototypen blev måtten fel på distansringarna vilket gjorde att dem gick av

vid montering. Den nya prototypen blev mer lufttät mellan mittenplattan och luftkanalen. Sensorerna som låg under luftkanalen monterades på en monteringsplatta som sedan i prototypen limmades fast under luftkanalen för att hålla tätt, se figur 4.23.



Figur 4.23: Mittenplattan från (a) ovansida (b) undersida.

4.5 Utveckling av mjukvara

I kommande delkapitel kommer utvecklingen av mjukvaran att diskuteras i både Arduino och MATLAB.

4.5.1 Arduino

Resultatet av förändringarna av Arduino-koden är positivt utifrån ett användarperspektiv. Genom vektorisering av sensorvärden kunde samma kod användas på respektive mätenhet vilket underlättar filhantering samt framtida korrigering av mjukvara. Beroende på GPS-tid börjar mätaren inhämta data vid hela minuter för att underlätta vidare datahantering i t.ex. MATLAB. Koden är även nu kommenterad vilket innebär att nästa användare enklare kan bekanta sig med mjukvaran i LCAQMP:n.

4.5.2 Matlab

Genom att göra koden mer generell och dela upp den i flera funktionsfiler har den blivit lättare att arbeta med både utvecklingsmässigt och när det gäller att hantera data från mätningar. Mycket har blivit smidigare efter förändringarna, vilket har underlättat gruppens arbete avsevärt.

5

Diskussion

I följande avsnitt diskuteras de ingående sensorernas funktionalitet, MATLAB-kodens påverkan på påvisat resultat och för och nackdelar med att förvara mätplattformarna i en låda. Dessutom diskuteras skillnaderna mellan Sniffer bike sensor kit och LCAQMP. En utvärdering av den nya låddesignen och allmänna förbättringsmöjligheter diskuteras också.

5.1 Sensorernas funktionalitet

Nedan diskuteras alla ingående sensorers funktionalitet utefter vad resultaten från de ovanstående mätningarna påvisat. Sensorernas funktionalitet är övergripande bra, de registrerar data i stor utsträckning och är funktionella. Det finns dock en tvivelaktighet i den uppmätta datans tillförlitlighet. Det finns definitivt möjlighet att öka funktionaliteten hos dem.

5.1.1 CO₂IR-LP

CO₂-sensorn är den mätare på sensorplattformen som i störst utsträckning har kunnat referenstestas under arbetet. Resultaten från mätningarna har visat att sensorerna avviker från varandra i uppmätta värden, och avvikelsen blir alltmer framträdande vid högre CO₂-halter. Måtnoggrannheten för sensorn ligger på $\pm 30\%$ enligt datablad och det är därför inte helt överraskande att avvikelserna blir större vid högre halter. Även om avvikelserna är stora sensorerna emellan är variationerna aldrig större än spannet för måtnoggrannheten.

Metodiken för de två referensmätningarna som utfördes skiljer sig åt en del, vilket även återspeglas i resultatet. Vid den första mätningen var alla LCAQMP:er i en kontrollmiljö (se avsnitt 3.1.1), medan de i den andra mätningen tillfördes luft direkt från ett flöde (se avsnitt 3.1.2). Det visade sig att kontrollmiljön inte var helt lufttät vilket ledde till att det läckte in luft som påverkade resultatet från mätningen. Detta ledde i sin tur till att regressionsanalysen som utfördes på datan blev bristfällig i flera hänseenden.

Ett problem som kvarstår med CO₂-sensorerna är att de ibland mäter nollor när de absolut inte förväntas göra det. Detta leder till att den uppmätta nivån uppfattas som lägre än vad den faktiskt är när datan medelvärdesbildas. Felet har inte kunnat lokaliseras utan vidare undersökning krävs. Under arbetets gång har nollorna

filtrerats bort för att reducera dess inverkan på resultatet.

5.1.2 SDS011

Under projektets gång utfördes endast en mätning med pålitlig referens av partikelhalter $PM_{2,5}$ och PM_{10} då man kunde jämföra inhämtad sensordata från LCAQMP med Miljöförvaltningens partikelmätare, vilket presenteras i avsnitt 4.3.1. Resultatet visade att LCAQMP-enheterna uppmätt lägre dygnsmedelvärde än Miljöförvaltningen kontinuerligt under mätningen, även utslagstrender var problematiskt att urskilja. Mätskillnaden tros bero bl.a. på miljöskillnader mellan mätarna vilket redovisas i avsnitt 5.4 men det går inte att förbise utslagsskillnad utan mättrend vid utvärdering partikelsensorn. Även i mätningar där Sniffer bike-mätare använts uppvisades oegentligheter gentemot SDS011-utslag, vilket diskuteras vidare i avsnitt 5.3. Intressant för varje mätning med referens är att LCAQMP-enheterna ofta mäter lägre partikelhalter över tid än använda referensmätare.

Trots variation i mätutslag vid jämförelse med referens visade mätning i Klätterlabbet och partikelmätning med AAO, redovisade i avsnitt 4.3.4 samt 4.2.2, att LCAQMP-enheterna uppmäter likvärdiga utslagstrender och partikelförhållanden genom mätningarna. Det innebär att då mätarna är placerade i samma miljö uppmäter de kontinuerligt samma trender. Sensorfel hos enskilda SDS011-sensorer är alltså inte anledningen till tidigare nämnt mätfel, det beror snarare på ett utbredd problem hos SDS011 eller LCAQMP-plattformen. Vidare bör pålitligheten och noggrannheten hos SDS011 undersökas genom referenstester i labbmiljö för att få en bild av mätfel samt undersöka möjligheten att åtgärda dessa.

5.1.3 OX-A431 och NO2-A43F

I avsnitt 4.1.1 redogörs resultat för referensmätning av NO2-A43F vilket visade att uppmätt halt NO_2 inte var tillförlitlig. Då mätdata för O_3 är strikt beroende av uppmätt NO_2 kan från mätningen även LCAQMP-plattformens förmåga att uppmäta en tillförlitlig halt O_3 ogiltighetsförklaras. Det understyrks även från det resultat presenterat i avsnitt 4.3.1 där Miljöförvaltningens mätare användes som referens för mätvärden under en två-veckorsperiod. Ingen korrelation mellan referensen och LCAQMP-enheternas uppmätta värde kunde där urskiljas. Det är komplicerat att utvärdera felkällor hos OX-A431 och NO2-A43F då det finns många möjliga faktorer. För att undersöka funktionen hos OX-A431 och NO2-A43F bör sensorerna testas utanför LCAQMP-gränssnittet för att utesluta felkällor angående ledning och kommunikation med Adafruit Adalogger. När funktion fastslutits kan sedan sensorerna monteras på LCAQMP-plattformen för vidare felsökning.

5.1.4 CCS811

Den sensor som testats minst under arbetets gång är CCS811, som mäter VOC, eftersom det har varit svårt att dedikera specifika mätningar till den då VOC innehåller många olika ämnen. Den data som visats från samtliga mätningar är svår

att tolka och det är inga tydliga trender eller samband som visas. Detta orsakars, återigen, förmodligen av det breda spektrumet av olika ämnen som ingår i VOC, vilket gör att sensorn lätt ger oregelbundna utslag. Mellan de enskilda sensorerna i de olika enheterna finns det också en oregelbundenhet. Specifika tester behöver göras för att ytterligare undersöka offset mellan sensorerna för att kunna dra mer specifika slutsatser om sensorernas funktionalitet. Det går också att ifrågasätta sensorns relevans i mätplattformen då BME680 också har möjlighet att mäta VOC, eftersom de påvisade resultaten från CC811 är otydliga.

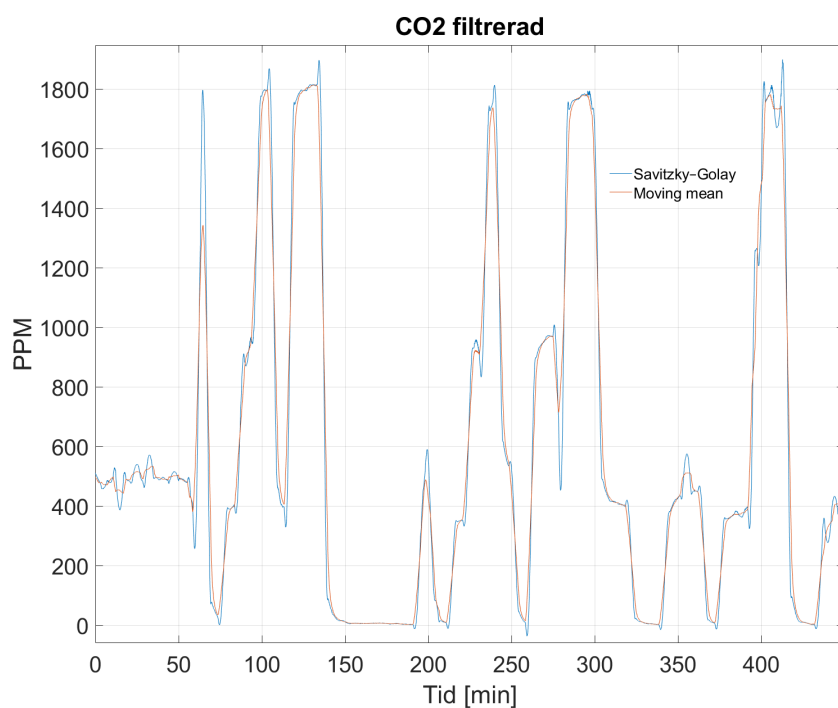
5.1.5 BME680

Funktionaliteten hos BME680 bör också undersökas noggrannare eftersom den mäter luftfuktighet, temperatur, VOC samt lufttryck men det endast är temperatur och luftfuktighet som undersökts i projektet. I den utsträckning som sensorns funktionalitet har undersökts visar den att den påverkas mycket av de förutsättningar som finns i LCAQP:s låda, vilket visas tydligt vid datan från Femmans tak. Ytterligare faktorer som påverkar sensorns funktionalitet är diffusionstorken, eftersom den vid jämförelse med Miljöförvaltningens data och Sniffer bike Sensor Kit visar avsevärt mycket lägre luftfuktighet. Därför finns det en relevans i att diskutera sensorns placering i LCAQMP. Tillförlitligheten hos sensorn hade till stor sannolik ökat om den hade placerats på utsidan av lådan men ändå varit skyddad från regn, eftersom den då inte påverkas av "växthuseffekten" som sker inne i lådan och att diffusionstorken påverkar luftfuktigheten. Det hade också möjliggjort att lufttrycket hade kunnat mätas.

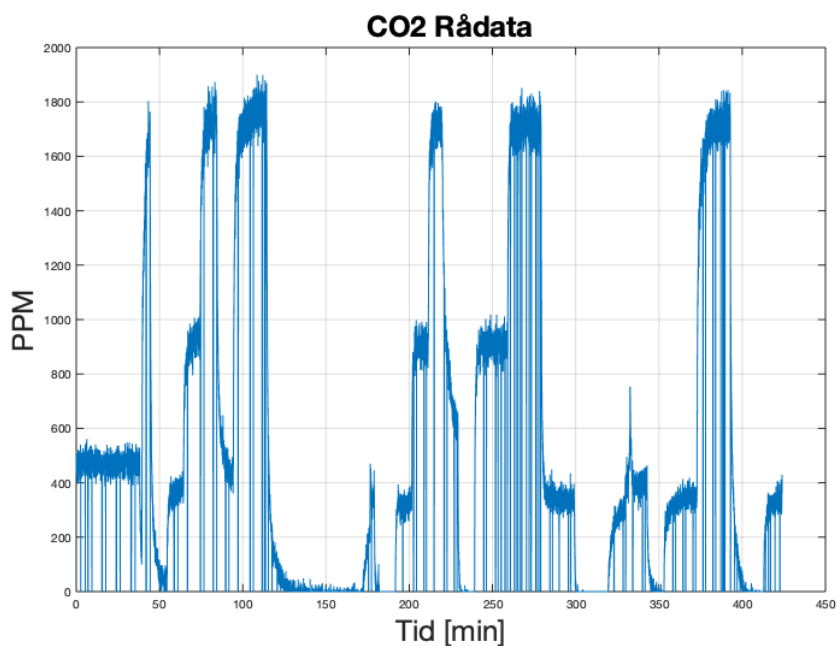
5.2 Matlab-kodens påverkan på avläst resultat

För att på ett enkelt och överskådligt sätt kunna studera och redovisa resultaten från olika mätningar har den insamlade datan behandlats med olika funktioner i MATLAB. Samtidigt som informationen ska göras lättöverskådlig är det även viktigt att inte påverka rådatan så mycket att det får en inverkan på hur resultatet tolkas.

Olika metoder för att reducera bruset i rådatan har använts genom arbetet, och utseendet på olika grafer kan förändras radikalt beroende på vilken metod som används. Ett exempel på detta visas i figur 5.1 där de två funktionerna "Savitzky–Golay" och "Moving mean" har använts. I figur 5.2 visas även hur rådatan såg ut innan brusreduceringen.



Figur 5.1: Savitzky–Golay jämfört med Moving mean. Datan är från mätningen som beskrivs i avsnitt 3.1.2.



Figur 5.2: Samma mätdata som i figur 5.1 fast ofiltrerad.

5.3 Jämförelse mellan LCAQMP och Sniffer bike sensor kit

I avsnitt 4.3.3 redovisas resultatet av mätningar i Slottskogen samt Kungsparken vid vilka Sniffer bike 790 samt 801 användes. Resultatet visade att LCAQMP och Sniffer bike-mätarna uppvisade samma trend under mätperioden. Däremot noterades en skillnad mellan mätarna, där Sniffer bike-mätarna gett högre utslag än LCAQMP i respektive mätning gällande $PM_{2,5}$. I avsnitt 1.2.8 nämns att uppmätta värden $PM_{2,5}$ för Sniffer bike-mätaren har visats vara relativt noggrann i tidigare studier vilket kan vara en indikation på att LCAQMP-mätaren uppmätker lägre halter $PM_{2,5}$ än faktisk halt. Vad som även nämns i studien är att uppmätkt halt PM_{10} inte är lika pålitlig som mängd $PM_{2,5}$ vilket är något som visades under mätningen på Chalmers campus, redovisat i avsnitt 4.3.2. Resultatet från mätningen visade att Sniffer bike-mätarna uppvisat ungefärligt samma mängd $PM_{2,5}$ och PM_{10} . Det skulle innebära att en större andel uppmätkta partiklar PM_{10} skulle vara mindre än $2.5\mu m$ vilket är ett orimligt resultat. I fallet PM_{10} skulle därför LCAQMP kunna argumenteras mer pålitlig, mätarnas pålitlighet skiljer sig alltså åt beroende på partikelstorlek.

Intressant är även uppmätkt relativ luftfuktighet, resultat från mätning i Slottskogen och Kungsparken visade att Sniffer bike-mätarna hade uppmätkt högre luftfuktighet än LCAQMP-enheterna. Eftersom LCAQMP-enheterna är utrustade med diffusionstorkar till skillnad från Sniffer bike är resultatet trovärdigt. LCAQMP-enheterna uppmätker torr luft till skillnad från Sniffer bike-mätarna som uppmätker luften oförändrad. De olika metoderna kan vara till orsak till det varierande resultatet av partikelmängder vid jämförelse av de två mätarna.

En annan skillnad mellan mätarna är att uppmätkt utslag hanteras av direkt av mikrokortet hos Sniffer bike-mätaren medan rådata från LCAQMP hanteras av MATLAB för grafisk presentation. Sniffer bike medelvärdeskorrigerar uppmätkta utslag över en tidsperiod vilket resulterar i mindre brusig redovisad data men ej lika verklighetsenlig som för LCAQMP-enheternas rådata. Det leder t.ex till att Sniffer bike-mätaren ej ger utslag för snabba förändringar i mätmiljön på samma sätt som LCAQMP.

Utifrån ett användarperspektiv framgår det större förändringar mellan mätarna. Under mätningen i Klätterlabbet, redovisat i avsnitt 4.3.4, användes Sniffer bike-mätare 790 och 801. Mätning fortgick i 2 dygn men Sniffer bike-mätarna slutade mäta efter 4 timmar samtidigt som uppmätkt utslag ej var jämförelsebart med mätvärden från LCAQMP. Dessutom skiftar även mätintervallet för medelvärdesbildning vilket gör resultatet mer svårtolkat än då mätintervallet är konstant.

5.4 För-och nackdelar med att mätare förvaras i en låda

Vid flertalet mätningar har mätplattformarna placerats i en större låda som antingen har använts som en typ av kontrollmiljö eller som regnskydd. Detta har vid mätningen på Nordstan och båda partikelmätningarna visats vara en felkälla till de uppvisade resultaten. Därför går det att argumentera för att det finns en problematik med denna typ av mätuppställning. Det gäller framförallt vid en partikelmätning eftersom partiklar inte sprider sig i ett rum på ett liknande sätt som en gas gör vilket nämns i avsnitt 2.5. För att kunna få tillförlitlig data vid laboratoriemätning av partiklar är det därför viktigt att kunna se till att det går att kontrollera partiklarnas flöde, vilket inte är möjligt i en låda med ett öppet hål som utflöde. Det är därför problematiskt att kunna genomföra en mätning med flera LCAQMP:er på samma gång i en kontrollmiljö. Ett mer fördelaktigt sätt att genomföra mätningar av den typen är till exempel att ansluta varje mätare för sig i en slang kopplad till en partikelgenerator som har ett konstant flöde av en viss mängd luft och partiklar och att utflödet av luften genom luftkanalen också är kontrollerad med hjälp av ett sug i rimlig storlek. Således undviks problematiken med att partiklarna inte fördelas jämnt i ett rum.

Även om en låda som kontrollmiljö kan vara problematisk finns det fall där det kan vara nödvändigt eller fördelaktigt. Mätplattformen har inte varit vattentät på grund av den gamla designen på lådan vilket gjorde att det var nödvändigt att den placerades i en regnskyddande låda trots att det medförde flertalet felkällor. Därav hade det varit fördelaktigt om mätarna hade kunnat placeras utomhus utan att behöva ett extra skydd från regn, vilket är något som hade kunnat uppnås med den nya låddesignen. De fall där det är fördelaktigt att förvara mätare i en kontrollmiljö-låda är när den är helt sluten och in- och utflödet av luft kan styras och att ämnet som ska mätas är i gasform. Detta eftersom det är möjligt att i hög grad kunna bestämma tillförlitlighet och funktionalitet på de sensorer som testas.

5.5 Utvärdering av den nya låd-designen

Nedan utvärderas den nya konstruktionen som tagits fram för LCAQMP. Förbättringsmöjligheter diskuteras också.

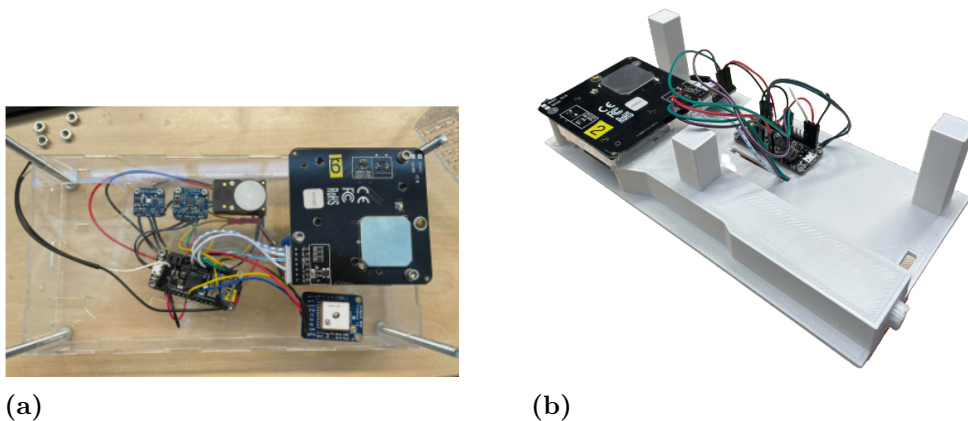
5.5.1 Lådan

Lådan till LCAQMP har gått en lång väg för att bli det den är idag. Lådan som existerade i början av arbetet hade många olika delar då den var indelad i en bottenplatta, sida till bottenplattan, mittenplatta, sida till mittenplattan och ett lock. Detta gör att lådan blev osmidig om den inte var helt monterad. Allt detta hölls ihop med en skruv i vardera hörn som gick igenom hela lådan. Den nya lådan är mycket mer användarvänlig då den istället för fem rörliga komponenter bara har tre rörliga komponenter: låda, mittenplatta samt lock. Den nya lådan är även lufttät

då den inte har några extra hål som föregående låda hade samt att locket och lådan är förslutna med en luft och vattentät förslutning. Utöver att den nya lådan är mer användarvänlig och lufttät även mer hållfast vilket är något som varit ett problem under föregående arbeten. Förut gick lådor sönder och fogar lossnade även under försiktig användning under projektets gång.

5.5.2 Mittenplattan

Mittenplattan skapades helt från start då även här saknades det en hel del i materialet som tagits över från tidigare kandidatarbeten. Den nya mittenplattan är en förbättrad version av den förra, skillnaderna är att luftkanalen och plattan är printade i samma del vilket gör det mer lufttät mellan plattan och kanalen. I figur 5.3 nedan visas den gamla och den nya mittenplattan.



Figur 5.3: Ny och gammal mittenplatta.

Distansringarna för SDS011 skrevs också ut rakt på mittenplattan men dessa blev feldimensionerade vilket gjorde att de gick av vid montering, detta bör förbättras till nästa prototyp. För att infästa mittenplattan i lådan designades det fyrkantiga stavar som kom i kontakt med locket när lådan var stängd detta för att klämma plattan mellan stöden och locket. En av stavarna blev feldimensionerade vilket gjorde att den inte är kontakt med locket. Vidare i arbetet borde denna lösning utvärderas samt förbättras genom att exempelvis ha färre stavar eller infästa plattan på något annat sätt. Något annat som kan tas med för framtiden är att göra det smidigt att ta av monteringsplattan och sätta på igen, detta exempelvis via skruvar samt att eventuellt använda någon siliconfog på kontaktytan. Själva monteringsplattan borde också förbättras för att minska luftläckage in i luftkanalen. Dessutom skulle användarvänligheten ökas om det skulle finnas en möjlighet att ansluta laddsladden och ta ut SD-kortet utan att behöva ta av locket på lådan.

5.6 Förbättringspotential hos LCAQMP

Den nya plattformen har fortfarande en hel del förbättringspotential. Distansringarna behöver dimensioneras på nytt för att inte gå av vid montering. Monterings-

plattan behöver förbättras och anpassas bättre till ändamålet.

För att LCAQMP, oavsett om den nya eller gamla lådan används, ska kunna utföra mätningar bättre måste ytterligare kalibrering av sensorerna göras. Därför behövs fler referensmätningar genomföras eftersom miljön och det som ska testas bör kunna kontrolleras för att öka tillförlitligheten av det påvisade resultatet och minska yttre felkällor. Eftersom resultatet från de genomförda mätningarna visar att det finns en offset mellan samtliga mätplattformar och alla dess ingående sensorer gäller det samtliga ingående sensorer. Kalibreringen som ska genomföras bör även kontrolleras efter att den är gjord så att det går att säkerställa att den är korrekt. Detta eftersom yttre faktorer kan påverka sensorerna även om de är placerade i en kontrollmiljö. Genom att ha kalibrerade sensorer kommer mätningarnas tillförlitlighet ökas och resultatet blir liknande oavsett vilken mätplattform som används.

Utöver nuvarande sex sensorer hade LCAQMP kunnat göras mer komplett om ytterligare sensorer skulle installeras, till exempel en UV-sensor. Om denna sensor hade implementerats och O₃-sensorn varit funktionell hade en korrelation mellan mängden solljus och bildandet av ozon gjorts. Dessutom hade det varit intressant att undersöka möjligheterna att driva LCAQMP på solenergi med hjälp av solceller.

5.7 Relevans av dygnsmedelvärden kontra timmedelvärde

I avsnitt 4.3.1 diskuteras de uppmätta dygnsmedelvärdena för PM₁₀ och PM_{2,5} i förhållande till miljö kvalitetsnormen och de lokala miljömålen från Göteborgs Stad. Därav finns det en relevans i att jämföra hur dygnsmedelvärde respektive timmedelvärde uppvisar olika resultat. Eftersom vissa källor till partiklar som exempelvis fordonstrafik har stora variationer olika tider på dygnet innebär det även att partikelmängden varierar över tid vilket mätningarna också visat. Därför kan ett dygnsmedelvärde visa att nivåerna i allmänhet är lägre än vad de är när majoriteten av människor vistas utomhus under framförallt rusningstrafik eftersom nivåerna är avsevärt mycket lägre nattetid. Det gäller framförallt vältraffikerade områden med hög befolkningsmängd. Därav kan ett timmedelvärde visa de halter som faktiskt kan komma att påverka människors hälsa om de är på en kritisk nivå och därför ge en tydligare bild av de risker som kan finnas.

Dock finns det fördelar med att använda dygnsmedelvärden då det kan ge en tydligare bild över luftföroreningars årliga säsongsvariationer, och reducera onödigt brus som kan uppstå vid en högre mätfrekvens. Därav anses båda medelvärdena vara relevanta men i olika avseenden.

6

Slutsats

Syftet med det genomförda projektet var att förbättra användarvänligheten och prestandan hos mätplattformen, samt att undersöka luftkvaliten på utvalda platser i Göteborg. I följande avsnitt sammanfattas och presenteras de slutsatser som arbetet har lett fram till.

6.1 Mätplattformens användarvänlighet

Den nya hårdvaran anses ha blivit mycket mer användarvänlig jämfört med den gamla modellen, då den nya lådan består av endast två komponenter som skruvas ihop. Det går betydligt snabbare att montera ihop och isär den nya lådan vilket är en stor förbättring. Användarvänligheten hos mittenplattan har ökat då den inte längre sitter fast i konstruktionen och därmed är lättare att plocka ut. Dessutom pekar mät försöken på att luftkanalen blivit mer lufttät.

Användarvänligheten på mjukvaran har blivit bättre då det är tydliga kommentarer i koden så att användaren har lättare att sätta sig in i och förstå dess olika delar. MATLAB-koden har gjorts om så att den har mindre buggar samt att det är lättare och tydligare att välja exakt vad som ska plottas upp genom popup-fönster som har alternativen på data plotter. Det som framförallt blivit bättre är att det inte behövs lika mycket hårdkodning för att köra koden.

6.2 Sensorplattformens tillförlitlighet

De ingående sensorerna har utvärderats i mer eller mindre utsträckning under arbetets gång och för att kunna dra några definitiva slutsatser om sensorernas tillförlitlighet krävs en djupare analys och flera tester på varje enskild sensor. Baserat på de mätningar som har gjorts påvisar ändå COzIR-LP lovande resultat med relativt snabb responstid och värden som efterliknar börvärden i referensmätningarna. Den nya lådan verkar även höja tillförlitligheten hos denna sensor. Prestandan hos sensorn SDS011 tycks variera vid olika mätningar och vidare analys och kalibrering krävs. Förhoppningen är att den nya lådan med en mer lufttät kanal kommer att leda till att alla de ingående sensorernas prestanda ökar, men detta bör utvärderas i större utsträckning för att kunna säkerställas.

6.3 Uppmätta värden jämfört med miljökvalitetsnormen

Utifrån de mätningar som gjorts kan slutsatser dras om huruvida de uppmätta värdena av partiklar på de utvalda platserna överskrider miljökvalitetsnormen och Göteborgs Stads lokala miljömål. I den långtidsmätning som gjorts på Femmantaket överstiger eller närmar sig inget dygnsmedelvärde av PM_{10} uppmätt av LCAQMP varken miljökvalitetsnormen eller de lokala miljömålen satta gränsvärde. På resterande utomhus-mätningar som varat kortare än ett dygn visas liknande resultat även om det inte är möjligt att räkna ut ett dygnsmedelvärde. Inget årsmedelvärde av $PM_{2,5}$ är möjligt att beräkna på grund av att mätningarna utförts under en kortare tid, dock visar inget resultat värden som är i närheten av att överstiga det satta årsmedelvärdet. Därför går det, utefter LCAQMP:s indikerade mätvärden, att dra en slutsats om att partikelmängden i Göteborg är under miljökvalitetsnormen och de lokala miljömålen. Dock bör det understrykas att LCAQMP:s uppmätta värden har en tvivelaktig tillförlitlighet och slutsatsen bör inte användas för att dra några ytterligare slutsatser om den allmänna kvalitén på luften i Göteborg.

6.4 Rekommendationer för fortsatt arbete

Rekommendationer för fortsatt arbete är att ytterligare förbättra och testa den nya lådans funktionalitet och användarvänlighet. Dessutom rekommenderas det att de ingående sensorerna fortsätter att undersökas och kalibreras i större utsträckning för att öka kvalitén på mätdata. Således kommer LCAQMP kunna fortsätta samla in luftdata men med högre tillförlitlighet.

Litteraturförteckning

- [1] World Health Organization, "Air pollution," n.d [Online], Tillgänglig https://www.who.int/health-topics/air-pollution#tab=tab_1, Hämtad 2022-02-07
- [2] World Health Organization, "Air quality and health," Tillgänglig <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/health-impacts>, Hämtad 2022-02-07
- [3] Euperiska Miljöbyrån, "Luftföroreningar," 2020-11-23. [Online]. Tillgänglig: <https://www.eea.europa.eu/sv/themes/air/intro>, Hämtad: 2022-02-06.
- [4] Naturvårdsverket, "EU:s luftvårdspolitik," n.d. [Online]. Tillgänglig <https://www.naturvardsverket.se/om-miljoarbetet/miljoarbete-i-eu/luftvardspolitik/>, Hämtad: 2022-02-07.
- [5] Folkhälsomyndigheten, "Hälsokonsekvenser av klimatförändring i Sverige," Folkhälsomyndigheten, 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/d12dc30a4b6b47549b018b53adf2b11a/halsokonsekvenser-klimatforandring-sverige.pdf>, Hämtad: 2022-02-05.
- [6] Naturvårdsverket, "Nationellt luftvårdsprogram," n.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/internationalt-arbete-med-luft/nationellt-luftvardsprogram/>, Hämtad: 2022-02-07.
- [7] H. Olofson, "Luften i Göteborg Årsrapport 2020," Miljöförvaltningen Göteborgs Stad, Göteborg, Sverige, 2021:12, 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://goteborg.se/wps/portal/start/miljo/miljolaget-i-goteborg/luft/rapporter-och-data>, Hämtad: 2022-02-06.
- [8] E. Malmqvist, "Luftkvalitet i överbyggda stationer," Trafikverket, Borlänge, Sverige, 2022, 2020:225. [Online]. Tillgänglig: <https://trafikverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1512757/FULLTEXT02.pdf> Hämtad: 2022-05-12.
- [9] Göteborgs stad "Luften just nu i Göteborg," 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://goteborg.se/wps/portal/start/miljo/miljolaget-i-goteborg/luft/luften-just-nu> Hämtad: 2022-02-08
- [10] Luftdaten.info "luftdaten.info – Feinstaub selber messe," 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://luftdaten.info/> Hämtad: 2022-02-08
- [11] Peter Krantz "Varför behövs fler mätstationer," 2018 [Online]. Tillgänglig: <https://luftdata.se/faq/varfor-fler-matstationer> Hämtad: 2022-02-08
- [12] S. Forouhan, O. Hamidi, G. Lindström, S. Robertsson, P. Strive, C. Thuve "Lågkostnadssensorer för luftkvalitetsmätning: Utvärdering, förbättring och mät-

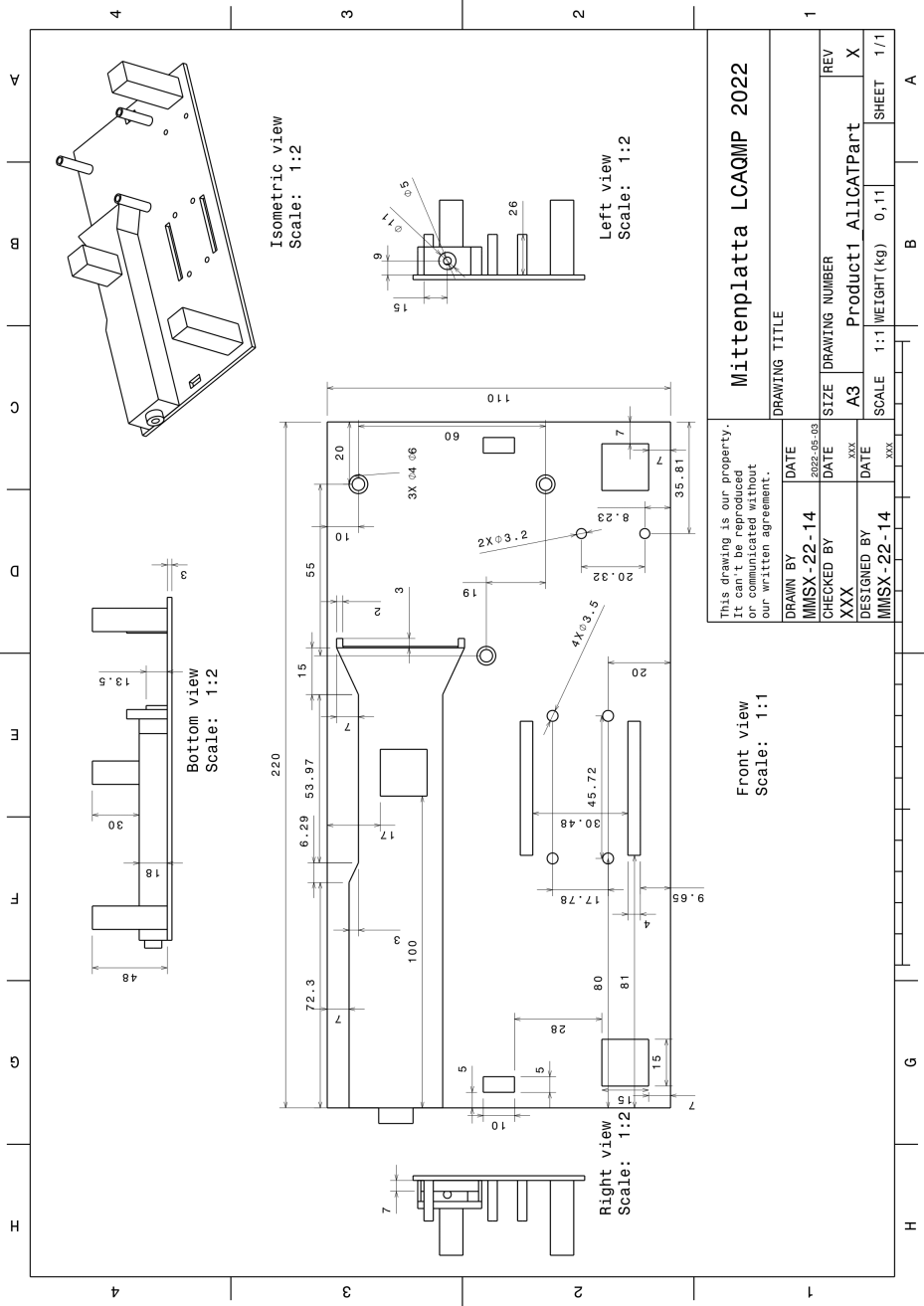
- ning,” Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sverige, 2020:11, 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/300915> Hämtad: 2022-02-06
- [13] J. Edby, A. Eiman, N. Hansson Jutblad, R. Hultén, F. Perbo, E. Stigling Svan-
tesson, ”Mätningar av luftföroreningar i Göteborg: partikelemissioner från for-
don och andra utsläppskällor,” Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, Sve-
rige, 2021:07, 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://hdl.handle.net/20.500.12380/303581> Hämtad: 2022-02-06
- [14] adafruit-ultimate-gps. USA, Adafruit Industries. 2022 [Online].
Tillgänglig: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-ultimate-gps.pdf> Hämtad: 2022-04-01
- [15] Laser PM2.5 Sensor specification, Kina: Nova Fitness Co.,Ltd. 2015 [On-
line]. Tillgänglig: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf> Hämtad: 2022-03-24
- [16] adafruit-bme680-humidity-temperature-barometric-pressure-voc-gas. USA,
Adafruit Industries. 2021 [Online]. Tillgänglig: <https://learn.adafruit.com/adafruit-bme680-humidity-temperature-barometric-pressure-voc-gas>
Hämtad: 2022-03-24
- [17] CCS811_Datasheet-DS000459.pdf. Österrike, austriamicrosystems AG.
2016 [Online]. Tillgänglig: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf Hämtad: 2022-03-29
- [18] OX-A431. England, Alphasense. 2019 [Online]. Tillgänglig: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-A431.pdf> Hämtad: 2022-03-29
- [19] CozIR-LP Data Sheet Rev 4.8_3. Storbritannien, Gas Sensing Solu-
tions Ltd. 2022 [Online]. Tillgänglig: https://www.gassensing.co.uk/file-dnld-link/CozIR-LP%20Data%20Sheet%20Rev%204.8_3.pdf Hämtad: 2022-04-01
- [20] J. Wesseling et al., ”Assessment of PM2.5 Exposure during Cycle Trips in The
Netherlands Using Low-Cost Sensors,” International Journal of Environmental
Research and Public Health, vol. 18, no. 11, s. 6007, Jun. 2021, doi: 10.3390/
ijerph18116007. Hämtad: 2022-04-07.
- [21] Institutet för hälsa och välfärd, ”Luftföroreningar, ” 2019. [Online]. Tillgänglig:
<https://thl.fi/sv/web/miljohalsa/luftfororeningar>, Hämtad: 2022-04-13.
- [22] Naturvårdsverket, ”Luftföroreningar och dess effekter, ” n.d. [Onli-
ne]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/luft/luftfororeningar-och-dess-effekter/>, Hämtad: 2022-04-13.
- [23] Sveriges Miljömål, ”Frisk Luft, ” 2022. [Online]. Tillgänglig: <https://www.sverigesmiljomal.se/miljomalen/frisk-luft/>, Hämtad: 2022-04-14.
- [24] Naturvårdsverket, *Luftguiden: Handbok om miljö kvalitetsnormer för ut-
omhusluft*, Bromma, Sverige: Arkitektkopia AB, 2019. [Online]. Till-
gänglig: <https://www.naturvardsverket.se/globalassets/media/publikationer-pdf/0100/978-91-620-0182-7.pdf>, Hämtad: 2022-05-05.
- [25] N. Andersson, ”Partiklar,” *Karolinska Institutet*. [Online]. Apr. 27, 2022. Till-
gänglig: <https://ki.se/imm/partiklar> Hämtad: 2022-05-10

- [26] G. M. Mutlu, R.B. Hamanaka, "Particulate Matter Air Pollution: Effects on the Cardiovascular System," *Front. Endocrinol.* 9:680. Nov. 2018. doi: 10.3389/fendo.2018.00680
- [27] M. Gustafsson, J. Lidén, L. Tang, B. Forsberg, H. Orru, S. Åström, K- Sjöberg, "Quantification of population exposure to NO₂, PM_{2.5} and PM₁₀ and estimated health impacts," IVL Swedish Environmental Research Institute Ltd., Stockhol, Sverige, C 317 ISBN 978-91-88787-60-6, 2018. [Online] Tillgänglig: <https://www.ivl.se/download/18.694ca0617a1de98f473872/1628417144173/FULLTEXT01.pdf> Hämtad: 2022-05-06.
- [28] J.S. Lindsey, "Carbon Dioxide," *AccessScience*, McGraw-Hill Education, Jan. 2019. doi: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.108400>
- [29] Naturvårdsverket, "Därför blir det varmare," n.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/amnesomraden/klimatfakta/darfor-blir-det-varmare/> Hämtad: 2022-05-06
- [30] N. Andersson, "Flyktiga organiska ämnen (VOC)," *Karolinska Institutet*. [Online]. Jan. 25, 2022. Tillgänglig: <https://ki.se/imm/flyktiga-organiska-amnen-voc> Hämtad: 2022-05-06
- [31] D. Nilsson, "Hälsoskadliga kemiska ämnen i byggprodukter – förslag till nationella regler," Kemikalieinspektionen, Stockholm, Sverige, ISSN 0284-1185, 361 170, 2015. [Online]. Tillgänglig: https://www.regeringen.se/4af7f7/contentassets/8464c1362f2b4892a45bd55edfada341/151202-kemi-rapport-8-15-halsoskadliga-kemiska-amnen-i-byggprodukter_-forslag-till-nationella-regler.pdf, Hämtad: 2022-05-06.
- [32] SMHI, "Kvävedioxid", 2014. [Online]. Tillgängligt: <https://www.smhi.se/reflab/om-luftfororeningar/luftfororeningar/kvavedioxid-1.19620>, Hämtad: 2022-03-24
- [33] N. Andersson, "Kväveoxider," *Karolinska Institutet*. [Online]. Apr. 27, 2022. Tillgänglig: <https://ki.se/imm/kvaveoxider> Hämtad: 2022-05-06
- [34] N. Andersson, "Ozon," *Karolinska Institutet*. [Online]. Apr. 27, 2022. Tillgänglig: <https://ki.se/imm/ozon> Hämtad: 2022-05-05
- [35] Scott Campbell, "Basics of the SPI communication protocol," u.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol> Hämtad: 2022-04-08
- [36] Scott Campbell, "Basics of UART communication," u.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/> Hämtad: 2022-04-08
- [37] Scott Campbell, "Basics of the I2C communication protocol," u.d. [Online]. Tillgänglig: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/> Hämtad: 2022-04-
- [38] S. Pashami, "Change Detection in Metal Oxide Gas Sensor Signals for Open Sampling Systems," Örebro University, Örebro, Sverige, ISSN 1650-8580, 2015. [Online]. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:874586/FULLTEXT02> Hämtad: 2022-04-29
- [39] A. M. Collier-Oxandale et al., "Understanding the ability of low-cost MO_x sensors to quantify ambient VOCs," *Atmospheric Measurement Techniques* 12,

- 1441–1460. Mar. 2019, doi: <https://doi.org/10.5194/amt-12-1441-2019>. Hämtad: 2022-04-07
- [40] PAMAS Partikelmess- und Analysesysteme, "The methods of optical particle counting – light extinction and light scattering," n.d. [Online]. Tillgänglig: <https://blog.pamas.de/en/the-methods-of-optical-particle-counting-light-extinction-and-light-scattering>. Hämtad: 2022-05-02
- [41] H. Kumar Gatty, "MEMS-based electrochemical gas sensors and wafer-level methods," Kungliga Tekniska Högskolan, Stockholm, Sverige, TRITA-EE: 2015:030, 2015. [Online]. Tillgänglig: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:851003/FULLTEXT01.pdf> Hämtad: 2022-04-29
- [42] wpengine, "How Do Electrochemical Gas Sensors Work," 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.nova-gas.com/how-do-electrochemical-gas-sensors-work/> Hämtad: 2022-05-02
- [43] D. V. Schroeder, *An Introduction to Thermal Physics*, San Francisco, CA, USA: Addison Wesley, 2000.
- [44] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2. utg. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999.
- [45] P. Olofsson och M. Andersson, *Probability, Statistics, and Stochastic Processes*, 2. uppl., Hoboken NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012.
- [46] Wikimedia Commons, "Linear least squares example," 2020. [graf]. Tillgänglig: https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=File:Linear_least_squares_example2.png&oldid=510169953, hämtad: 2022-05-07.
- [47] J. J. Faraway, *Practical regression and ANOVA using R*, Bath, Storbritannien: University of Bath, 2002.

A

Ritning på mittenplatta



Figur A.1: Ritning på ny mittenplattan.

B

Datablad för nya låda



ENGLISH

Datasheet
RS PRO Polycarbonate Enclosure, Light Grey, IP65
Stock No: 201-0161



Technical Specifications:

Body Material	Polycarbonate
Length	240,3 mm
Width	160,3 mm
Height	90 mm
IP	IP65
Colour	Light Grey

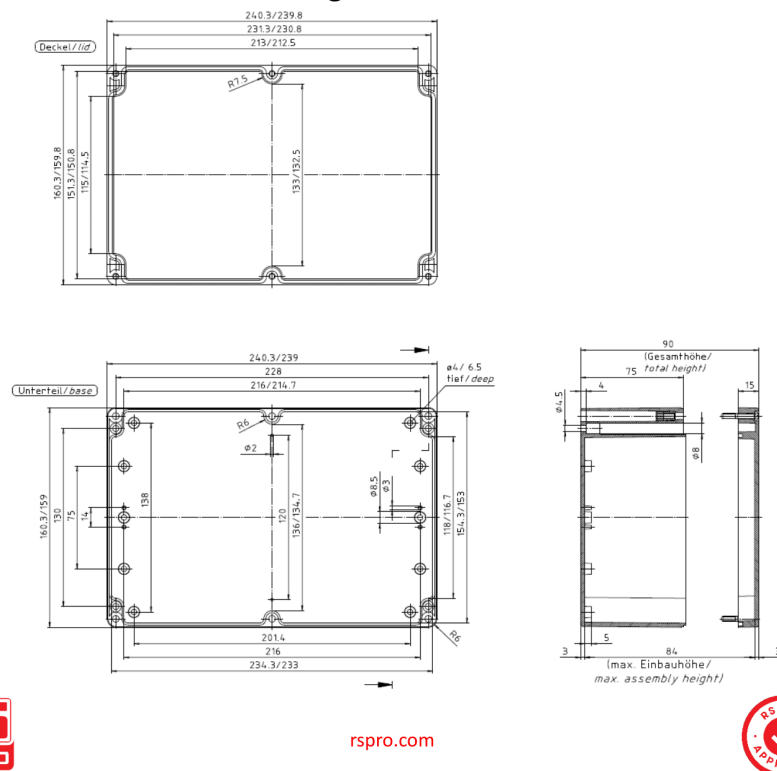
rspro.com

Figur B.1: Datablad på ny låda (sida 1).

Features & Benefits:

- seal factory-assembled
- IP-Protection (DIN EN 60529)
- supplied with screws
- crystal-clear lid

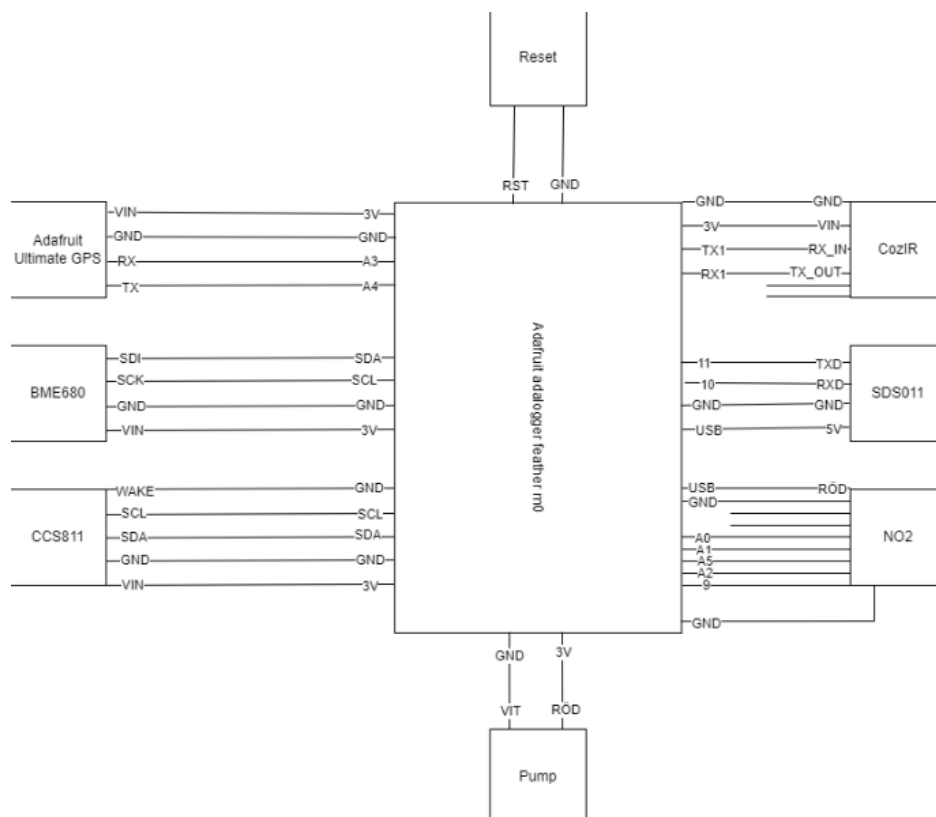
Dimensional line drawings



Figur B.2: Datablad på ny låda (sida 2).

C

Kopplungsschema



Figur C.1: Kopplungsschemat för LCAQMP.

D

Förutsättningar under referensmätning

Tabell D.1: Förutsättningar för alla LCAQMP under experimentet som beskrivs i avsnitt 3.1.2.

Förutsättningar	Mätning 1	Mätning 2	Mätning 3
LCAQMP 9	Folie, difftork	Folie, difftork	Folie, difftork
LCAQMP 5	Folie, difftork, pump	Folie, difftork, pump	Folie, difftork, pump
LCAQMP 6	Folie, difftork	Folie	Difftork
LCAQMP 8	Folie, difftork, pump	Folie, pump	Difftork, pump
LCAQMP 2	Ny låda, difftork	Ny låda, difftork	Ny låda, difftork

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige
www.chalmers.se



CHALMERS