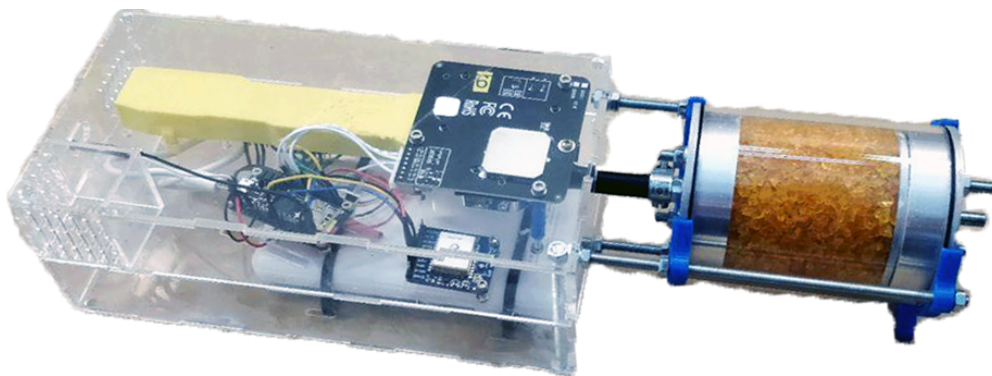




**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

---



# Lågstnadssensorer för luftkvalitetsmätning

**Utvärdering, förbättring och mätning**

Bachelor thesis in Mechanical engineering

Kandidatarbete inom Maskinteknik

Shahrooz Forouhan  
Oskar Hamidi  
Gustav Lindström  
Stig Robertsson  
Philip Strive  
Christoffer Thuve



BACHELOR THESIS 2020:11

# Lågstnadssensorer för luftkvalitetsmätning

Utvärdering, förbättring och mätning

Bachelor thesis in Mechanics and Maritime Sciences

Shahrooz Forouhan

Oskar Hamidi

Gustav Lindström

Stig Robertsson

Philip Strive

Christoffer Thuve



**CHALMERS**  
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Department of Mechanics and Maritime Sciences

*Division of Combustion and Propulsion Systems*

CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Gothenburg, Sweden 2020

Lågkostnadssensorer för luftkvalitetsmätning  
Utvärdering, förbättring och mätning

Shahrooz Forouhan  
Oskar Hamidi  
Gustav Lindström  
Stig Robertsson  
Philip Strive  
Christoffer Thuve

© Shahrooz Forouhan, Oskar Hamidi, Gustav Lindström, Stig Robertsson, Philip Strive, Christoffer Thuve, 2020.

Supervisors: Mats Andersson, Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Patrik Wåhlin, Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Examiner: Jonas Sjöblom, Department of Mechanics and Maritime Sciences

Bachelor Thesis 2020:11  
Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Division of Combustion and Propulsion Systems  
Chalmers University of Technology  
SE-412 96 Gothenburg  
Telephone +46 31 772 1000

Omslag: Bild på LCAQMP

Typeset in L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X  
Printed by Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Gothenburg, Sweden 2020

Lågstnadssensorer för luftkvalitetsmätning  
Utvärdering, förbättring och mätning  
Shahrooz Forouhan  
Oskar Hamidi  
Gustav Lindström  
Stig Robertsson  
Philip Strive  
Christoffer Thuve  
Department of Mechanics and Maritime Sciences  
Chalmers University of Technology

---

## Abstract

Air pollution is a global health issue which causes 4.2 million deaths each year. Means of monitoring the pollutants has conventionally been considered both expensive and cumbersome. Lately, cheaper models have been developed which both allows for a wider range of users and different types of measurements.

The projects aim has been to develop and evaluate a mobile low-cost measuring sensor platform which is capable of monitoring different types of common sources of airborne pollutions. Furthermore, a dehumidifier is to be constructed that uses silica to dry the air which reduces the measurement error of particulate matter caused by high relative humidity.

The product developed within the project was named Low Cost Air Quality Measuring Platform, abbreviated as LCAQMP, and a total of ten models were constructed. The LCAQMP consists of sensors capable of measuring  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$ , VOC and temperature as well as relative humidity, time and position. The Covid-19 pandemic influenced the project with prolonged deliveries of some components. The initial plan of including a sensor for measuring  $NO_2$  was therefore dismissed.

Evaluation of the constructed LCAQMP was conducted in both laboratory- and field-based experiments. Experiments regarding particulate matter indicate high correlation between the LCAQMP and the reference device. Some deviation in the observed levels did occur but results indicate that these can be adjusted for. Results also indicate that LCAQMP experiences difficulties when introduced to rapid altering levels of pollution. The silica-based dehumidifier worked well as a method for reducing measurement errors caused by high relative humidity. The losses in particulate matter caused by the dehumidifier were shown to be quite constant and so possible to adjust for. In a field environment tests which were meant to derive measured air pollution to specific vehicles were made. The results from these experiments were inconclusive, both for LCAQMP and the reference device.

Finally, it was established that further research and labor needs to be put into LCAQMP. Partly to better understand its behavior and results but also to improve the potential of the platform for measuring air pollutants and their sources.

---

## Sammanfattning

Luftföroreningar är ett globalt hälsoproblem och årligen dör 4.2 miljoner människor till följd av dem. Vid mätning av luftföroreningar har traditionellt både dyra och otympliga instrument använts. På senare tid har allt fler sensorer av lägre kostnad dykt upp, vilket möjliggör för både andra typer av mätningar samt att fler ges möjligheten att mäta.

Syftet med projektet var att utveckla och utvärdera en portabel lågkostnadsplattform för att mäta flera olika luftföroreningar. Dessutom skulle en diffusionstork innehållandes silica utvecklas för att minska mätfelen vid hög luftfuktighet för mätningar av partiklar implementeras och utvärderas.

Sensorplattformen som utvecklades gavs namnet LCAQMP (Low Cost Air Quality Measuring Platform) och tio enheter byggdes. I denna plattform ingår komponenter som kan mäta  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$ , VOC samt temperatur, relativ luftfuktighet, tid och plats. Den klarar att mäta i åtminstone fyra dygn vid fulladdat batteri. Mätdata sparas på ett SD-kort. På grund av Covid-19 uppstod flera förseningar, varav en följd blev att den tänkta  $NO_2$ -mätaren inte kom med i den slutgiltiga konstruktionen.

De framtagna enheterna utvärderades både i laborations- och fältmiljö. Vid partikelmätningar i laboratoriemiljö uppvisar LCAQMP hög korrelation mot referens. De absoluta mätfelen är betydande men resultaten tyder på att de går att justera för. Resultaten pekar även på att LCAQMP har svårt med att mäta noggrant vid snabba och transienta förändringar. Resultaten visar att diffusionstorken fungerar väl som ett sätt att minska mätfel för partikelmätningar vid hög relativ luftfuktighet. Resultaten tyder även på att de partikelförluster som uppstår i diffusionstorken går att kompensera för. I fältmiljö gjordes försök som syftade till att kunna härleda uppmätta luftföroreningar till specifika fordon. Detta visade sig varken vara möjligt för referensmätaren eller LCAQMP.

Slutligen konstateras att ytterligare undersökningar och arbete av och med LCAQMP krävs. Dels för att bättre förstå dess beteende och resultat men även för att utöka plattformens potential för mätningar av luftföroreningar och dess utsläppskällor.

Keywords: LCAQMP, luftkvalitet, luftkvalitetsmätningar, luftföroreningar, luftfuktighet, diffusionstork,  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO_2$ .



## Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete som genomförts på civilingenjörsprogrammet Automation och Mekatronik vid Chalmers tekniska högskola utav Sharooz Forouhan, Oskar Hamidi, Gustav Lindström, Stig Robertsson, Philip Strive och Christoffer Thuve. Projektet motsvarar 15 högskolepoäng och genomfördes under våren 2020.

Vi vill rikta ett tack till våra handledare Mats Andersson och Patrik Wåhlin samt examinator Jonas Sjöblom som bistått projektet med värdefulla kunskaper, resurser och diskussioner. Även tack till Johan Mellqvist som varit till hjälp med resurser och expertis.

Slutligen vill vi rikta ett stort tack till ETA(E-Sektionens Teletekniska Avdelning) och CASE-labbet (Chalmers Autonomous Systems and Electronics) som möjliggjort att projektet kunde slutföras.



# Innehåll

<b>1</b>	<b>Introduktion</b>	<b>1</b>
1.1	Bakgrund . . . . .	1
1.2	Syfte . . . . .	2
1.3	Frågeställningar . . . . .	2
1.4	Avgränsningar . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Teori</b>	<b>3</b>
2.1	Luftföroreningar . . . . .	3
2.1.1	CO <sub>2</sub> och VOC . . . . .	3
2.1.2	Aerosoler . . . . .	3
2.2	Fuktteori . . . . .	4
2.3	Diffusionstorkning . . . . .	5
2.4	Krafter vid partikelrörelse . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Metod</b>	<b>7</b>
3.1	Kravanalys . . . . .	7
3.2	Konstruktion av diffusionstork . . . . .	8
3.3	Konstruktion av huvudenhet . . . . .	9
3.3.1	Sensorer . . . . .	9
3.3.1.1	SDS011 . . . . .	9
3.3.1.2	BME680 . . . . .	9
3.3.1.3	CCS811 . . . . .	10
3.3.1.4	CozIR-LP . . . . .	10
3.3.1.5	Adafruit Ultimate GPS . . . . .	10
3.3.1.6	NO <sub>2</sub> -A43F samt OX-A431 . . . . .	10
3.3.2	Elektronik . . . . .	10
3.3.2.1	Adalogger Feather M0 . . . . .	10
3.3.2.2	Powerbank - Deltaco . . . . .	10
3.3.3	Programmering av huvudenhet . . . . .	11
3.4	Mätningar . . . . .	12
3.4.1	Datahantering . . . . .	13
3.4.2	Laboratorieutrustning . . . . .	13
3.4.2.1	Fidas Frog . . . . .	13
3.4.2.2	Atomizer Aerosol Generator . . . . .	13
3.4.2.3	Mass Flow Controller . . . . .	13
3.4.2.4	Gastvättflaska . . . . .	14

3.4.2.5	Kontrollmiljö . . . . .	14
3.4.3	Laboratoriemätningar . . . . .	14
3.4.3.1	Moment I - Referensmätning . . . . .	14
3.4.3.2	Moment II - Partikelförluster . . . . .	15
3.4.3.3	Moment III - Höga relativa luftfuktigheter . . . . .	16
3.4.3.4	Moment VII - CO <sub>2</sub> referensmätning . . . . .	17
3.4.3.5	Moment VIII - VOC referensmätning . . . . .	18
3.4.3.6	Moment IX - Stegsvär diffusionstork . . . . .	18
3.4.3.7	Moment X - Kapacitet diffusionstork . . . . .	19
3.4.4	Fältmätningar . . . . .	20
3.4.4.1	Moment IV - Mätningar på Frihamnens busshållplats	20
3.4.4.2	Moment V - Mätningar i Gårda . . . . .	20
3.4.4.3	Moment VI - Mätningar i parkeringsgarage . . . . .	20
3.5	Covid-19 . . . . .	20
<b>4</b>	<b>Resultat och analys</b>	<b>22</b>
4.1	Tekniska resultat - LCAQMP . . . . .	22
4.1.1	Diffusionstork . . . . .	22
4.1.2	Huvudenhet . . . . .	23
4.1.3	Kostnad . . . . .	23
4.2	Mätningar . . . . .	23
4.2.1	Laboratoriemätningar . . . . .	23
4.2.1.1	Moment I - Referensmätning . . . . .	24
4.2.1.2	Moment II - Partikelförluster . . . . .	27
4.2.1.3	Moment III - Höga relativa luftfuktigheter . . . . .	29
4.2.1.4	Moment VII - CO <sub>2</sub> och diffusionstork . . . . .	30
4.2.1.5	Moment VIII - VOC referensmätning . . . . .	31
4.2.1.6	Moment IX - Stegsvär - Diffusionstork . . . . .	32
4.2.1.7	Moment X - Kapacitet diffusionstork . . . . .	32
4.2.2	Fältmätningar . . . . .	33
4.2.2.1	Moment VI - Mätningar i parkeringsgarage . . . . .	33
4.2.2.2	Moment IV - Mätningar på Frihamnens busshållplats	34
4.2.2.3	Moment V - mätningar i Gårda . . . . .	34
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>36</b>
5.1	Konstruktionen av LCAQMP . . . . .	36
5.2	Mätningar . . . . .	36
5.2.1	Laboratoriemätningar . . . . .	37
5.2.1.1	Partikelmätaren SDS011 . . . . .	37
5.2.1.2	Diffusionstork . . . . .	37
5.2.1.3	Stigtider . . . . .	38
5.2.2	Fältmätningar . . . . .	38
5.3	Felkällor . . . . .	38
5.4	Samhälleliga och etiska aspekter . . . . .	39
<b>6</b>	<b>Slutsats</b>	<b>40</b>

## Innehåll

---

A Grafer	II
B Diffusionstorksritningar	XI
C LCAQMP ritningar	XVI
D Pseudokod	XXIV
E Datablad samt produktblad för sensorerna	XXV
F Experimentplan	XXVII
G Mätningar	XLVI
H Prislista	L
I Riskanalys	LI

# Figurer

2.1	Faskurva för vatten. Visulaliserar faser i förhållande till tryck och temperatur. . . . .	5
3.1	Komponenternas respektive placering i färdigställd huvudenhet. I förvaringslådans nedre vänstra hörn syns avdelningen som BME680 monteras inom då omgivande miljö önskas mätas. . . . .	11
3.2	Schematisk skiss över sensorernas inkopplingar och SERCOM användning . . . . .	12
3.3	Flödesschema för laboratorieutrustningen som användes under moment I. . . . .	15
3.4	Flödesschema för laboratorieutrustningen som användes under moment II. . . . .	16
3.5	Flödesschema för laboratorieutrustningen som användes under moment III. . . . .	17
3.6	Flödesschema över laboratorieutrustningen som användes under moment VII. . . . .	17
3.7	Flödesschema över laboratorieutrustningen som användes under moment VIII. . . . .	18
3.8	Flödesschema över laboratorieutrustningen som användes under moment IX. . . . .	19
3.9	Flödesschema över laboratorieutrustningen som användes under moment X. . . . .	19
4.1	Diffusionstork med och utan silica-pellets. Notera filterpapperets positionering inuti genomlöppsröret i enheten till höger i figuren. . . . .	22
4.2	Komplett LCAQMP med diffusionstork monterad. . . . .	23
4.3	Graf över mätdata av luftkvaliteten från moment I, LCAQMP utan diffusionstork jämförs mot referens Fidas Frog. Notera i partikelhalten till vänster hur trenderna följs väl men absoluta halter skiljs åt. . . . .	24
4.4	Korrelationsdiagram av $PM_{10}$ mellan medelvärde av LCAQMP och Fidas Frog från moment I. . . . .	25
4.5	Korrelationsdiagram av $PM_{2,5}$ mellan medelvärde av LCAQMP och Fidas Frog från moment I. . . . .	25
4.6	Illustrerande diagram för individuell LCAQMP offset relativt medelvärde av samtliga LCAQMP över olika försök. . . . .	26

4.7	Illustrerande diagram för individuell LCAQMP offset relativt medelvärde av samtliga LCAQMP över olika försök . . . . .	27
4.8	Graf över mätdata av luftkvaliteten från moment II. LCAQMP utrustade med diffusorstork är streckade. . . . .	28
4.9	Övre: Diagram över medelvärde av $PM_{10}$ och $PM_{2.5}$ för LCAQMP med och utan diffusionstork. Undre: Ratiodiagram med tillhörande medelvärde och standardavvikelse mellan dessa mätstorheter. . . . .	29
4.10	Graf över mätdata av luftkvaliteten från moment III. LCAQMP utrustade med diffusionstork är streckade . . . . .	30
4.11	Mätdata från moment VII där $CO_2$ beteende med- och utan diffusionstork betraktas. I övre grafen redovisas ratio och undre graf för inbördes differens. . . . .	31
4.12	Mätdata från fältmätning i garagemiljö. Övre graf visar partikelhalter och undre graf redovisar $CO_2$ och VOC för samma tidsaxel. Annoteringar i grafen visar de olika företeelserna under experimentet. . . . .	33
4.13	Mätdata från fältmätning vid Frihamnens busshållplats. Annoteringar för tidshändelser avläses till vänster om graferna. . . . .	34
4.14	Mätdata från fältmätning vid Gårda i nära anslutningen till E6-leden genom Göteborg. . . . .	35
A.1	Kompletterande mätdata från moment VII där stegsvar för $CO_2$ och partikelhalter analyseras. Övre grafen visar uppmätta halten $CO_2$ i PPM medan den nedre visar korresponderande partikelhalter under samma tidsperiod. Streckade linjer i grafen markerar LCAQMP utrustade med diffusionstork. . . . .	II
A.2	Mätdata från moment I, försök 1. LCAQMP utan diffusionstork jämförs mot referens Fidas Frog under varierande halter av luftburna partiklar genererade från AAG. . . . .	III
A.3	Mätdata från moment I, försök 2. LCAQMP utan diffusionstork jämförs mot referens Fidas Frog under varierande halter av luftburna partiklar genererade från AAG. . . . .	IV
A.4	Mätdata från moment I, försök 4. Experimentet utfördes med samtliga LCAQMP utan diffusionstork. Grafen visar grupperat medelvärde för de enheter som var utrustade med diffusionstork från tidigare mätning (M1F2), mot dem utan för att jämföra mätavvikelser. . . . .	V
A.5	Mätdata från moment II försök 1. Luftfuktigheten hölls konstant under experimentet medan de genererade partikelhalterna från AAG varierar. LCAQMP utrustade med diffusionstork är markerade med streckade linjer i grafen. . . . .	VI
A.6	Mätdata från moment III försök 1. LCAQMP jämförs mot referens Fidas Frog under varierande parametrar av genererade partikelhalter samt luftfuktigheter. LCAQMP utrustade med diffusionstork är markerade med streckade linjer i grafen. . . . .	VII

A.7	Mätdata från moment III försök 2. Luftfuktigheten behålls konstant under experimentet medan partikelhalten höjs kraftigt. Notera hur partikelhalterna för LCAQMP utrustade med diffusionstork (streckade linjer) ej påverkas av den förhöjda luftfuktigheten. . . . .	VIII
A.8	Mätdata från moment III försök 4. Partikelgenerering hålls konstant under experimentet medan luftfuktigheten regleras. Notera hur referensen Fidas Frog samt LCAQMP utan diffusionstork går mot maxvärdet då luftfuktigheten överstiger 70%. . . . .	IX
A.9	Mätdata från när volvo kördes i tomgång utomhus . . . . .	X
B.1	CAD-ritning av diffusionstork . . . . .	XI
C.1	CAD-ritning av komplett LCAQMP . . . . .	XVI
D.1	Pseudokod LCAQMP huvudprogram . . . . .	XXIV
G.1	Foto på hur laboratoriemätningen ser ut . . . . .	XLVI
G.2	Foto på hur mätningen på Volvo utomhus ser ut . . . . .	XLVII
G.3	Figur över hur fältmätning vid Frihamnen busshållplats genomfördes. . . . .	XLVIII
G.4	Figur över hur fältmätningen vid Gårda genomfördes. . . . .	XLIX
H.1	Prislista på komponenter samt pris per LCAQMP . . . . .	L
I.1	Risikanalyt för olika experiment och fall . . . . .	LI

# Tabeller

3.1	SERCOM konfiguration i LCAQMP . . . . .	12
4.1	Uppmätta CO <sub>2</sub> koncentration . . . . .	31
4.2	Fördröjningsökning med diffusionstork . . . . .	32
4.3	Stegsvarstider . . . . .	32

# Ordlista med förkortningar

**AAG:** Förkortning för Atomizer Aerosol Generator. Hänvisar till partikelgeneratoren som brukades inom projektet för att på ett kontrollerat vis skapa luftpartiklar av varierande halter. Se avsnitt 3.4.2 för vidare beskrivning.

**CASE:** Chalmers Autonomous Systems and Electronics. Laboratoriet som ägs av Chalmers och drivs av Elektrotekniska Institutionen. CASE förfogar över tillverkningsutrustning samt mätutrustning för elektroniska komponenter.

**ETA:** Förkortning för E-sektionens Teletekniska Avdelning. Studentdriven förening inom Chalmers som förfogar över laboratorieutrustning med inriktning mot elektronik. Inom ETA ges även tillgång till mekanisk verkstad för metallbearbetning.

**EURO 5:** Europeisk standard för utsläppskrav av fordon.

**IDE:** förkortning för integrated development environment som är en utvecklingsmiljö inom programmering som i detta fallet är för Arduino mikrokontrollerkort

**LCAQMP:** Förkortning för Low Cost Air Quality Measurement Platform som är ett luftsensorpaket med en diffusionstork som mäter luftkvalite.

**PM<sub>0.1</sub>:** Förkortning för Particulate Matter som är suspenderade partiklar i luft. De har en diameterlängd som går upp till 0.1  $\mu\text{m}$  eller 100 nm

**PM<sub>2.5</sub>:** Förkortning för Particulate Matter som är suspenderade partiklar i luft. De har en diameterlängd som går upp till 2.5  $\mu\text{m}$

**PM<sub>10</sub>:** Förkortning för Particulate Matter som är suspenderade partiklar i luft. De har en diameterlängd som går upp till 10  $\mu\text{m}$

**RH:** Förkortning för relativ fuktighet, ett mått på mätnadsgrad av vattenånga i luften.

**XP:** Experimentverkstaden på Chalmers. Studentdriven förening som under kvällstid och helger erbjuder tillträde till Chalmers Prototyplabb där maskiner för metallbearbetning tillhandahålls.

# 1

## Introduktion

I detta kapitel presenteras bakgrunden för projektet samt vad syftet är. Dessutom presenteras avgränsningar och frågeställningar för projektet.

### 1.1 Bakgrund

Globalt uppskattas 4.2 miljoner människor dö varje år till följd av luftföroreningar i utomhusluften [1]. Studier visar hur människor som bor i områden med högre halter av luftföroreningar uppvisar förhöjd dödlighet. Dödsorsakerna tillskrivs främst hjärt-och kärlsjukdomar men även förhöjd risk för cancer har påvisats [2]. I Sverige uppskattas 7600 människor dö i förtid per år till följd av exponering av luftföroreningar och hälsoeffekterna från luftföroreningar beräknas kosta det svenska samhället 42 miljarder kronor årligen [3, 4].

Det finns alltså flera goda skäl att mäta luftföroreningar. I Göteborg utför Miljöförvaltningen mätningar på  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  och  $NO_2$  utefter de miljökvalitetsmål och lagkrav som finns [4]. De instrument som används är dock både otympliga och dyra, där den genomsnittlige medborgaren inte har möjlighet att införskaffa och använda [5].

På senare tid har dock allt fler luftkvalitetssensorer i en avsevärt lägre prisklass framkommit på marknaden. Medborgarforskning har blivit allt mer populärt såsom luftdata.se [6]. Tanken är att vanliga medborgare köper lågkostnadsluftmätare så att de kan mäta partikelhalterna i luften i deras närområde. Med hjälp av egensamlade data kan medborgare sätta press på politiker och näringsliv för att åstadkomma bättre luftkvalitet. Med många sensorer av en lägre prisklass fås en större och avsevärt mer kostnadseffektiv potential för storskalig kartläggning av luftföroreningar.

Viss kritik har dock framförts om huruvida lågkostnadssensorer är tillförlitliga nog [7]. Särskilt verkar hög luftfuktighet ha en negativ inverkan på mätnoggrannheten vid mätning av partikelhalter [8, 9]. Olika tekniker för att komma tillrätta med detta har diskuterats. En särskilt intressant teknik är att leda mätluft genom en diffusionstork som torkar luften med hjälp av silica.

### 1.2 Syfte

Syftet är att utveckla en luftsensorplattform som kommer att benämnas LCAQMP (Low Cost Air Quality Measuring Platform). Den ska mäta ett flertal luftföroreningar och andra relevanta faktorer. Prestandan kommer att utvärderas i både laboratoriemiljö samt fält. Teknik för att minska mätfel från hög luftfuktighet kommer att tillämpas och utvärderas.

### 1.3 Frågeställningar

Följande kommer ett antal frågeställningar som rapporten ska besvara:

- Hur bra presterar luftsensorplattformen som utvecklas och framställs?
- Är en diffusionstork en lämplig metod för att minska påverkan för luftfuktighet vid mätning av partikelhalter?

### 1.4 Avgränsningar

Projektet avgränsas till att en utformad sensorplattform mäter luftkvaliteten baserat på faktorer från  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$  och VOC. Därutöver avläses även omgivande temperatur, lufttryck, relativ luftfuktighet samt position och klockslag. Av de uppmätta luftföroreningarna är det  $PM_{10}$  och  $PM_{2.5}$  som i störst utsträckning analyseras då det finns en referens tillgänglig som de kan jämföras med.

En tillverkad sensorplattform är tänkt att i första hand utföra mätningar under kortvariga tidsperspektiv. Produktutformningen avgränsas således för att huvudsakligen inte innefatta långtidsmätningar som överstiger två dygn. Vidare ämnar arbetet att mäta luftkvaliteten i Göteborg och mätningarna begränsas således geografiskt till Göteborgsområdet.

LCAQMP strävar efter att hålla en relativt låg kostnad för att tillgängliggöra luftkvalitetsmätning. Detta för att öka möjligheten att i framtiden skala upp antalet mätstationer för att ge en bättre och mer detaljerad bild av luftkvaliteten.

# 2

## Teori

Detta kapitel ämnar till att ge läsaren en god teoretisk grund för rapportens innehåll.

### 2.1 Luftföroreningar

Luftföroreningar är gasformiga eller partikelburna ämnen som till följd av naturlig eller mänsklig verksamhet uppträder i förhöjda halter i luften. Dessa kan bidra till skadlig inverkan på levande organismer [9]. De består dels av gaser såsom koldioxid ( $\text{CO}_2$ ) och lättflyktiga organiska föreningar (VOC), men även av luftburna partiklar (Aerosoler)[10, 11].

#### 2.1.1 $\text{CO}_2$ och VOC

Koldioxid är en växthusgas och bildas som huvudprodukt vid förbränningsprocesser. Vid beräkning av exempelvis partikelutsläpp kopplat till förbränningsmotorer kan uppmätta  $\text{CO}_2$ -halter användas som bas för att beräkna emissionsratio av partikelhalter[9, 12].

VOC i sin tur är blandningar av olika organiska utsläpp som är hälsofarliga i högre halter. VOC kan till viss del också spåras till förbränningsprocesser[13].

#### 2.1.2 Aerosoler

Aerosoler är fasta eller flytande partiklar suspenderade i luft. Begreppet aerosol innefattar både partikeln och den suspenderande luften. Sot, rök och smog är exempel på aerosoler som kan förknippas med mänskliga utsläpp, men det finns även naturliga aerosoler, såsom pollen och sporer. Även moln är exempel på aerosoler[14, s.1-8]. De suspenderade partiklarnas mest karaktäriserande egenskap är storlek. Storleken på partiklarna avgör deras hälsoeffekter, då mindre partiklar har en högre diffusivitet och lättare kan penetrera luftvägar. Storleken anger även hur länge partikeln kan existera i luften innan de faller mot marken. Därför klassificeras de efter sin diameterlängd.  $\text{PM}_{10}$  är partiklar med en diameter upptill  $10 \mu\text{m}$ .  $\text{PM}_{2.5}$  är partiklar med en diameter upp till  $2.5 \mu\text{m}$ . Ultrafina partiklar, så kallade  $\text{PM}_{0.1}$ , är partiklar med en diameter mellan  $1 \text{ nm}$  upptill  $0.1 \mu\text{m}$  [14, s.8-9].

Utsläppskällorna för partiklar varierar med vilken partikelstorlek som betraktas [4]. I Europa är de mest betydelsefulla sektorerna transport, energiproduktion, bostäder, industri, jordbruk och avfall [15]. I Göteborg är vägtrafiken en stor källa till luftföroreningar, men även källor som industri, sjöfart och arbetsmaskiner har inverkan på luftkvaliteten [4]. Utsläppen från vägtrafiken kommer dels från förbränningsmotorer, men även däckslitage och gatubeläggning bidrar till ökade partikelhalter [4]. Rörande förbränningsmotorer kopplas en stor del av  $PM_{0,1}$ -emissioner till fordonstrafik [16]. Vidare kan somliga partiklar färdas lång väg. Halten av exempelvis  $PM_{2,5}$  i Göteborg ökar när sydostliga vindar för in partiklar från Öst- och Centraleuropa [4].

I Göteborg mäter Miljöförvaltningen  $PM_{10}$  och  $PM_{2,5}$  på direktiv från EU, då halterna i luften anses överskrida tröskeln för vad som är tillåtet. Direktiven innefattar inte ultrafina partiklar, trots koppling till fordonstrafik [4]. I detta projekt hanteras inte ultrafina partiklar.

## 2.2 Fuktteori

I detta avsnittet kommer fuktteori att förklaras där partialtryck, mättnadstryck, relativ fuktighet och fuktiga partiklar ingår.

Luften är en blandning av flera gaser. Varje gas, givet en temperatur, håller ett visst tryck. Detta tryck är gasens partialtryck( $P$ ) i blandningen. Om luften endast skulle hålla en gas skulle dess partialtryck också vara luftens totaltryck. Vattenånga, eller fukt, existerar som en komponent i luftblandningen och dess partialtryck kan korreleras till luftens temperatur och vattenångans masskoncentrationen [14, s.278].

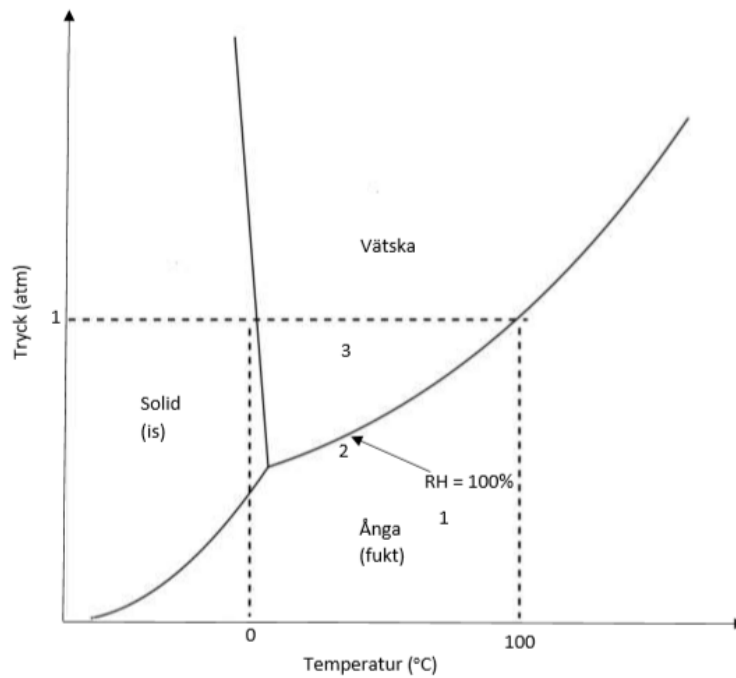
Ett mättnadstryck ( $P_{sat}$ ) anger gränsvärdet för fasövergång av ett visst ämne. Detta värde är temperaturberoende och typiskt större vid högre temperaturer. Detta innebär att vid högre temperaturer fordras ett större tryck för att en gas skall komprimeras nog för att kondensera [14, s.279].

Beroende på hur stort vattenångans partialtryck är varierar den relativa fuktigheten (RH) i luften. Definitionen för RH är kvoten mellan ångans befintliga partialtryck och mättnadstryck, givet i procent.

$$100 \cdot \frac{P}{P_{sat}} = RH \quad (2.1)$$

Vid låga RH-värden håller luften således lite fukt och vid ett högt värde håller den mycket innan mättnad uppnås när  $P = P_{sat}$ , varvid ångan börjar kondenseras. Eftersom  $P_{sat}$  är temperaturberoende är värdet av RH relativt vilken temperatur luften håller [14, s.279-281].

Följande diagram, figur 2.1, redovisar hur vattnets olika faser beror på tryck och temperatur. Markerad som 1 anger området där ångan är undermättad ( $RH < 100\%$ ). Linjen markerad som 2 anger mättnadsgränsen ( $RH = 100\%$ ). Markerad som 3 anger området där ångan är övermättad ( $RH > 100\%$ ) [14, s.279-281].



**Figur 2.1:** Faskurva för vatten. Visualiserar faser i förhållande till tryck och temperatur.

Vattenånga kan kondensera på luftburna partiklars ytor. Detta kallas för nukleär kondensation och är möjligt när vattenångan är svagt övermättad. Är vattnets partialtryck avsevärt högre än mättnadstrycket ( $RH \gg 100\%$ ) kan dessutom vattenaerosoler bildas, utan behovet av en kondensationsyta. Detta kallas för homogen kondensation och är ovanlig i atmosfärsbetingelser, men möjlig att skapa i laboratoriemiljö [14, s.283-290].

## 2.3 Diffusionstorkning

När en molekyl från en fluid (en gas eller en vätska) kolliderar med ett fast ämne kan molekylen binda till ytan. Fluiden som adsorberas lägger sig vid ytan och omsluter adsorbenten [17]. Adsorptionen skapar en koncentrationsgradient från fluiden mot adsorbenten. Diffusion är en mekanism som på grund av koncentrationsgradienten orsakar spontan masstransport av fluiden i gradientens riktning [18].

Silica är en kiseldioxid ( $\text{SiO}_2$ ), som används som adsorptionsmedel, till exempel för att torka luft [19]. I vissa fall impregneras silican med ett ämne som fungerar som en indikator så att silican ändrar färg när den är mättad.

Diffusionstorkning använder sig av dessa principer genom att fuktig luft transporteras genom en kammare fylld med silica. I kammaren adsorberar silica fukt och vilket gör att luften torkar.

## 2.4 Krafter vid partikelrörelse

För partiklar som flödar genom en passage finns det flera faktorer som påverkar dess rörelse. För detta projekt är följande krafter i fokus:

- Gravitation - Partiklar kan ha en signifikant massa och kan därför påverkas av gravitationskraften. Gravitationen kan störa rörelsen, och om partikeln har en tillräckligt låg hastighet kan partikeln avvika från rörelselinjen. Inverkan av kraften ökar för större partiklar [14, s.46-48].
- Diffusion - Partikelns diffusivitet i luft är signifikant för dess rörelsebanan. Större partiklar har typiskt en lägre diffusivitet. Den drivande kraften bakom diffusion sprider partikelflödet i alla riktningar där partikelkoncentrationen är låg, vilket innebär att deras rörelse kan bli hindrad [14, s.26-28].
- Elektrostatisk växelverkan - Beroende på om passagen har ett elektriskt fält kan laddade partiklar växelverka med den. För partiklar med en hög laddning kan den elektrostatiska kraften verka flera tusen gånger starkare än gravitationen [14, s.316-323].
- Tröghetskraft - Om passagen är exempelvis böjd ändras partikelns riktning när den passerar det böjda området. Beroende på partikelns hastighet och massa, kan den lämna rörelselinjen [14, s.27].
- Adhesion - Partiklar kan kollidera och fästas ihop. Produkten kan bli en partikel av större storlek. Beroende på hur hög partikelkoncentration är varierar sannolikheten för detta fenomen. Relativ luftfuktighet påverkar också sannolikheten för adhesion av två partiklar då vatten kan fungera som ett ytkemiskt klister. [14, s.141-144].

# 3

## Metod

I det här avsnittet beskrivs hur LCAQMP planerades, utvecklades och konstruerades samt hur både laboriemätningar och fältmätningar utfördes.

### 3.1 Kravanalys

Tillsammans med handledarna för projektet diskuterades målen med arbetet och vilka delar det skulle komma att innehålla. Det var tydligt att stort intresse låg vid att konstruera en portabel plattform av flera individuella lågkostnadssensorer för att mäta olika sorters luftföroreningar. Då det sedan tidigare var känt att hög luftfuktighet orsakar mätfel av partiklar bedömdes det vara betydelsefullt att kunna avfukta luften innan mätning genom att konstruera en diffusionstork.

Givet en sensorplattform med låg kostnad sågs ett värde i att skala upp mätkapaciteten genom att tillverka flertalet sensorplattformar. På så sätt skulle mätningar på flera ställen samtidigt möjliggöras och spridning av utsläpp kunna kartläggas.

För att kunna dra slutsatser utifrån uppmätta luftkvaliteter ansågs det också viktigt att utvärdera den konstruerade sensorplattformens prestanda. Den kompletta sensorplattformen, inklusive diffusionstorken, namngavs LCAQMP. Följande huvudsakliga moment för projektet identifierades.

- Konstruera diffusionstork
- Konstruera huvudenhet
- Tillverka 10 enheter
- Utvärdera enheterna

## 3.2 Konstruktion av diffusionstork

För att undvika problem med mätkvaliteten vid höga luftfuktigheter konstruerades en diffusionstork för att avfukta luften. Torkningsprocessen bygger på att silica-pellets adsorberar vattenmolekyler i den genomströmmande mätluft. Silican som användes i projektet har en kornstorlek mellan 2-6 millimeter och innehåller järnsalter som färgindikator. Då pelletsen är torr har den en orange nyans som övergår till genomskinlig då kapaciteten för adsorption uppnåtts. Kapaciteten är 23% av sin storlek vid 50% RH. Förbrukad silicapellets torkas vid 140°C för att återfå sin fuktadsorberande egenskap [20]. Diffusionstorkarna innehåller omkring 120 gram silica per enhet.

Liknande diffusionstorkar som redan fanns tillgängliga på marknaden inspirerade konstruktionen [21]. Fyra luftkanaler användes för att maximera den exponerade ytan mellan luften och den omgivande silican. Därutöver sattes även designmålet att hålla ett rakt flöde igenom diffusionstorken för att avvärja eventuella partikelförluster som kan inträffa vid krökar. Den slutgiltiga versionen utgick från en prototyp som utformades och testades. Prototypens torkningsförmåga bedömdes vara mycket bra men designen väl överdimensionerad för projektets behov. Den slutgiltiga versionen blev snarlik prototypen men gjordes något mindre.

För att förhindra elektrostatiska partikelförluster prioriterades att ytorna som kommer i kontakt med mätluft tillverkas av ett ledande material, lämpligen aluminium. För ytterhöljet, som ej kommer i kontakt med mätluft, valdes emellertid akrylplast. Detta för att på ett tydligt och överskådligt sätt kunna notera eventuella färgskiftningar i silicapelletsen.

Vid utvärdering av prototypen noterades att det som förmodligen var partiklar från silican gjorde utslag på partikelmätaren, särskilt när diffusionstorken skakades. I den slutgiltiga versionen monterades filterpapper i luftkanalerna vilket minskade denna effekt. Diffusionstorken konstruerades i prototypplabbet och i ETA (E-Sektionens Teletekniska Avdelning).

Slutligen består diffusionstorken av följande komponenter:

- Silicapellets
- Rör av akrylplast
- Gavlar i aluminium
- Luftkanaler för genomströmmande luft
- Filterpapper, 2  $\mu\text{m}$  porstorlek

Se B.1 i appendix för måttsatta ritningar av diffusionstorken.

### 3.3 Konstruktion av huvudenhet

Huvudenheten ämnade att mäta  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$ , VOC samt temperatur, relativ luftfuktighet. För att underlätta datahantering hämtas även tid och position in med hjälp av GPS. För att husera huvudenheten med sensorerna och kontrollera luftflödet så att sensorerna skulle kunna mäta luftkvaliteten konstruerades en förvaringslåda i akrylplast. I denna fästes sensorerna samt powerbanken, även diffusionstorken hölls fast med hjälp av lådan.

Huvudenhetens utformning erbjuder möjlighet att mäta relativ luftfuktighet och temperatur för antingen mät- eller omgivningsluften. Sensorn som mäter dessa två storheter har två avsedda monteringsplatser, dels i kanalen där mätluftens flöde genereras via SDS011 och dels i en avskild, separat plats där omgivande luft kan mätas via öppningar i huvudenhetens gavlar.

Vid inloppet till sensorn som mäter partikelhalter monterades en plastslang av ledande material, för att förhindra elektrostatiska förluster.

I figur C.1 visas en övergripande skiss över designen av den kompletta LCAQMP med huvudenhet och tillhörande diffusionstork.

#### 3.3.1 Sensorer

I detta avsnitt beskrivs vardera sensor, hur de fungerar och vilka mätprinciper de bygger på. I figur 3.1 visas en övergripande bild av sensorernas placering i huvudenheten av LCAQMP. För datablad till respektive sensor, se bilaga E.

##### 3.3.1.1 SDS011

För mätning av partiklar används NovaFitness SDS011. SDS011 mäter både  $PM_{2.5}$  och  $PM_{10}$ . Dataöverföring sker via seriell kommunikation med protokollet UART. SDS011 använder sig av ljusspridning för att fastställa partikelkoncentrationen i luften. En inbyggd fläkt genererar ett luftflöde. I sensorn sitter en laser som skiner på luftflödet. Beroende på partiklarnas storlek sprider sig ljuset i olika grad, varifrån partikelhalten kan bestämmas. SDS011 uppges ha en mätnoggrannhet på  $\pm 15\%$  och  $\pm 10\mu g/m^3$  och har ett mätområde från 0 till  $999.9\mu g/m^3$  för  $PM_{2.5}$  och från 0 till  $1999.9\mu g/m^3$  för  $PM_{10}$ .

##### 3.3.1.2 BME680

Adafruit BME680 är ett utvecklingskort från Adafruit vars huvudkomponent är Bosch miljösensor BME680. BME680 mäter lufttryck, luftfuktighet, temperatur och VOC. VOC-mätvärdet ges som ett resistansvärde och inte som ett absolut värde. Då LCAQMP även har en dedikerad VOC-sensor (CCS811) som anger VOC i ppm, användes BME680 främst för att mäta luftfuktighet och temperatur. Kommunikation sker via protokollet I2C. Luftfuktigheten rapporteras som ett värde från 0 till 100% med en noggrannhet på  $\pm 3\%$  i mätområdet 20% till 80% RH.

### 3.3.1.3 CCS811

Adafruit CCS811 är ett utvecklingskort som innehåller sensorn CCS811 från AME. Den använder sig av en MOX-sensor och skickar ut en TVOC-koncentration (Total Volatile Organic Compound) i spannet 0-1187 ppb. Den sänder även ut en eCO<sub>2</sub> (ekvivalent CO<sub>2</sub>) i spannet 400-8192 ppm. Kommunikation sker även här via protokollet I2C.

### 3.3.1.4 CozIR-LP

CozIR-LP är en CO<sub>2</sub>-mätare från Gas Sensing Solutions. Den använder sig av en IR-princip för att bestämma CO<sub>2</sub>. CO<sub>2</sub> molekyler i luften absorberar ljus med en särskild våglängd medan den släpper förbi övriga. Differensen mellan mängden ljus som skickas ut av en IR-lampa och som sedan mottages av en IR-sensor ger på så vis mängden CO<sub>2</sub> i luften. CozIR-LP använder sig av seriell kommunikation genom protokollet UART. Eftersom CozIR-LP mäter CO<sub>2</sub> direkt till skillnad från CCS811 används den som huvudsaklig CO<sub>2</sub> mätare. Sensorn har ett mätområde från 0 till 5000 ppm CO<sub>2</sub> med en mätnoggrannhet på  $\pm 30\%$ .

### 3.3.1.5 Adafruit Ultimate GPS

Adafruit Ultimate GPS är ett utvecklingskort från Adafruit med en GPS-modul. Modulen kommunicerar via ett seriellt gränssnitt där data såsom position och exakt tid kan hämtas.

### 3.3.1.6 NO2-A43F samt OX-A431

Tre uppsättningar av ozon (O<sub>3</sub>) och NO<sub>2</sub> sensorer beställdes. Förseningar uppstod till följd av COVID-19 vilket innebar att dessa inte kunde monteras och implementeras innan mätningarna skulle ske. Däremot är själva huvudenheten utformad för att sensorerna ska kunna monteras.

## 3.3.2 Elektronik

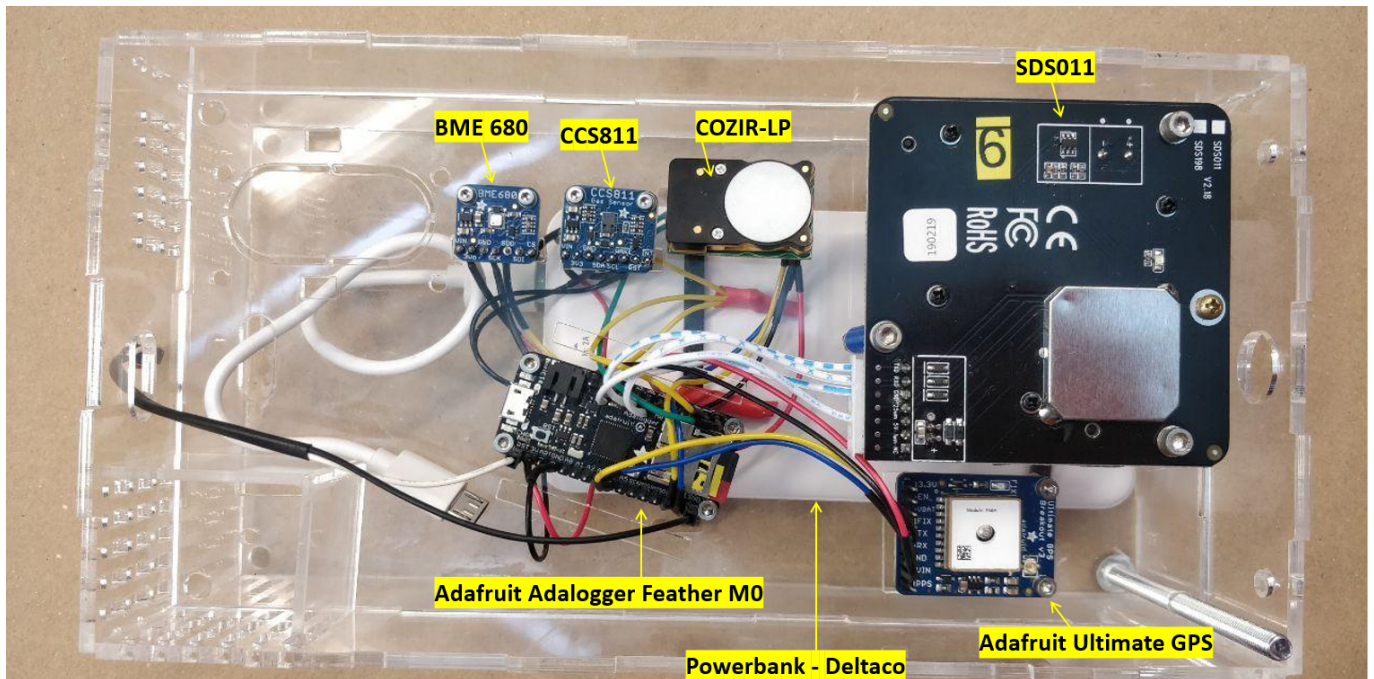
Utöver sensorerna ingick även annan elektronik i LCAQMP.

### 3.3.2.1 Adalogger Feather M0

Adalogger Feather M0 är ett utvecklingskort från Adafruit med förmågan att spara data på ett SD-kort. Den går att programmera med hjälp av Arduinos IDE vilket är en användarvänlig utvecklingsmiljö för programmering av mikrokontrollers.

### 3.3.2.2 Powerbank - Deltaco

LCAQMP behövde ca 100 mA under mätning. Strömförsörjningen kom från en powerbank av Deltaco med en kapacitet på 10800 mAh vilket var tillräckligt för att driva en enhet konstant i fyra dygn.



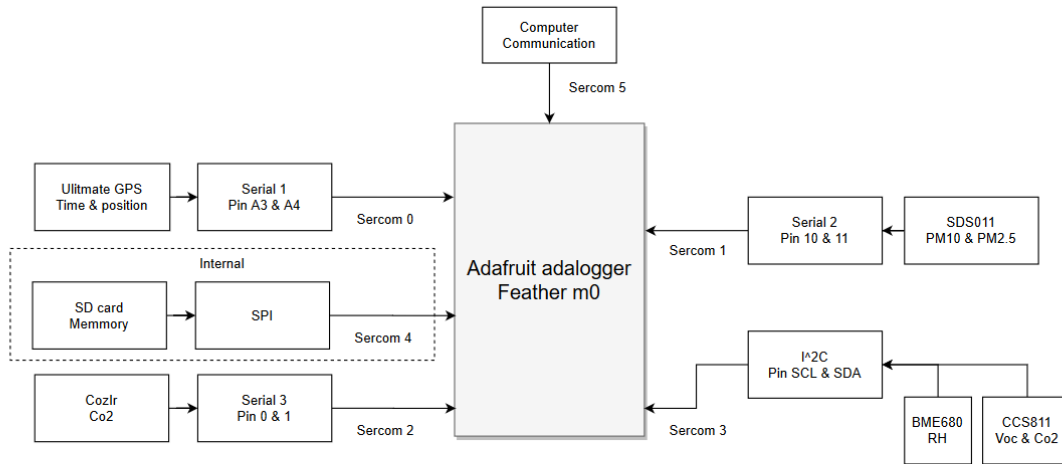
**Figur 3.1:** Komponenternas respektive placering i färdigställd huvudenhet. I förvaringslådans nedre vänstra hörn syns avdelningen som BME680 monteras inom då omgivande miljö önskas mätas.

### 3.3.3 Programmering av huvudenhet

Koden som användes för LCAQMP skrevs i Arduinos IDE. För att underlätta utvecklingen av koden användes ett flertal bibliotek som framförallt understödde kommunikationen mellan huvudprocessorn och sensorer. För fullständig kod och dokumentation, se GitHub [22].

När processorn startar körs först en uppstartsrutin där kommunikation mellan systemets olika moduler initieras. Därefter körs huvuddelen av programmet där nya mätvärden samlas in och skrivs till SD-kortet på CSV-format. Om ett fel uppstår under sensoravläsningen tänds utvecklingskortets inbyggda LED-lampa. Ett flödeschema över programstrukturen finns tillgängligt i appendix (D.1), som illustrerar hur enheten initieras och hur nya mätdata samlas in.

För att möjliggöra kommunikation mellan de olika sensorerna behövde Feather M0 chippets olika kommunikationsmoduler, som benämns 'SERCOM', konfigureras på korrekt sätt. Chippet har sex SERCOM-moduler som underlättar för utvecklare att kommunicera med andra enheter. Varje modul har en unik uppsättning av pins de kan använda. För att möjliggöra kommunikation på samtliga moduler samtidigt på detta utvecklingskort finns endast ett begränsat antal konfigurationer som är realiserbara. Nedan i figur 3.2 redovisas en schematisk skiss över kommunikationen.



**Figur 3.2:** Schematisk skiss över sensorernas inkopplingar och SERCOM användning

I LCAQMP konfigurerades kommunikationsmodulerna enligt tabell 3.1. För att realisera denna konfiguration behövde även kompileringsfiler för chipets standardkonfigurationer skrivas över.

**Tabell 3.1:** SERCOM konfiguration i LCAQMP

Kommunikationsmodul	Sensor	Kommunikationsprotokoll	Pins
0	GPS	Seriell	Pin A3 och A4
1	SDS011	Seriell	Pin 10 och pin 11
2	CozIR	Seriell	Pin 0 och 1
3	BME680 & CCS811	I2C	Pin SCL och SDA
4	SD card	SPI	Interna pins
5	Computer	Seriell	Interna pins

### 3.4 Mätningar

I detta avsnitt presenteras metoden för de mätningar som gjorts för att utvärdera LCAQMP, samt utrustningen som använts. Den laboriemiljö som använts fanns tillgänglig på avdelning för Förbränning och Framdrivningsystem på Chalmers tekniska högskola. Varje mätning har kategoriserats med ett momentnummer utefter när den utförts. Inför varje mätning skrevs en experimentplan (se appendix F) och en riskanalys (Se appendix I.1).

### 3.4.1 Datahantering

Data från SD-korten bearbetades och analyserades i MATLAB. Tidsaxlarna synkroniserades mellan olika LCAQMP och referensen Fidas Frog samt mätdata visualiserades med hjälp av grafer.

### 3.4.2 Laboratorieutrustning

Den övergripande hårdvaran som användes för att utföra kontrollerade mätningar bestod av ett antal utrustningar som presenteras nedan. Se appendix G.1 för figur.

#### 3.4.2.1 Fidas Frog

Fidas Frog är en portabel mätutrustning för partikelhalter från tyska Palas. Enheten användes vid referensmätning av LCAQMP som börvärde av partikelkoncentrationen i mätlufte. Fidas Frog har möjlighet att avläsa de specifika partikelstorlekarna  $PM_{10}$ ,  $PM_4$ ,  $PM_{2.5}$  och  $PM_1$ . Även storleksfördelningen av totala aerosola partikelhalten ( $C_N$ ) samt Total Suspended Particles (TSP) såväl som lufttemperatur och den relativa luftfuktigheten mäts och visualiseras i realtid på tillhörande monitor. Fidas Frog baseras på sensorer med optisk ljusfördelningsteknik vilket är jämförbart med vad som används för LCAQMP. Fidas Frog uppskattas hålla ett värde av ca 100 000 kr.

#### 3.4.2.2 Atomizer Aerosol Generator

För att på ett kontrollerat och säkert sätt framställa partikelhalter av varierande mängd användes en Atomizer Aerosol Generator från tillverkaren TSI med modellnummer 3079A. Enheten har en inbyggd kompressor som producerar tryckluft som i sin tur är reglerbar via en nålventil. En slutna bägare fylls med en ammoniumsulfatlösning, som via injektorprincipen skapar en partikelhalt i fluiden proportionellt mot luftflödet. Inom rapporten används förkortningen AAG för Atomizer Aerosol Generator.

#### 3.4.2.3 Mass Flow Controller

Då mätningar utfördes för att undersöka stegsvar samt vid referensmätning av sensorerna i LCAQMP behövde det säkerställas att massflödet av fluiden var ställbart samt att flödet inte avvek från börvärdet. Metoden som användes inom projektet för detta ändamål var att använda massflödesregulator, Mass Flow Controller eller MFC. MFC-enheten har inlopp som via en trevägsventil kan skiftas mellan tryckluft och valfri extern trycksatt fluid. MFC fungerar generellt som en ställbar ventil med hög precision. Via datorprogrammet LabView kan sedan ett börvärde för massflödet av fluiden anges till utloppet som ger en känd koncentration av fluiden som undersöks.

### 3.4.2.4 Gastvättflaska

Då behovet tillkom att undersöka beteendet av luftburna partiklar vid höga relativa luftfuktigheter användes en gastvättflaska. Den består av ett avlångt, slutet glaskärl som fylls med fluid, för projektet användes vatten. Glaskärl har en inloppskanal som ansluts till tryckluft via en nålventil och mynnar ut i kärlets botten. Tryckluften tvingas genom en finporig botten som består av sintrade glaspärlor som delar upp luftströmmen till många små strömmar. De små luftströmmarna bidrar till att forma en jämn och finfördelad bubbelbildning vilket ger en fördelaktigare masstransport när luftströmmarna förs genom fluiden. Utloppet är placerat i kärlets högsta punkt. Nålventilen styr följaktligen volymflödet av tryckluften som under konstant temperatur reglerar den relativa luftfuktigheten vid utloppet. Gastvättflaskan benämns även som gasbubblare i rapporten.

Nålventilen styr följaktligen volymflödet av tryckluften vilket blir direkt proportionerligt mot den relativa luftfuktigheten vid utloppet.

### 3.4.2.5 Kontrollmiljö

För att kunna kontrollera luften som LCAQMP skulle mäta i laboratoriemiljö konstruerades en kontrollmiljö. Kontrollmiljön bestod av en stor plastlåda i vilken det gjordes hål dit inkommande aerosoler och luft med olika fuktighet kunde anslutas. Liknande anslutningar skapades också för anslutning av LCAQMP och referensmätaren Fidas Frog. Det gjordes även ett hål som lämnades öppet där överflödigt luft som strömmat in i lådan kunde ventileras. Tack vare den skapade kontrollmiljön kunde sedan önskade egenskaper på luften skapas gällande partikelhalter och relativ luftfuktighet.

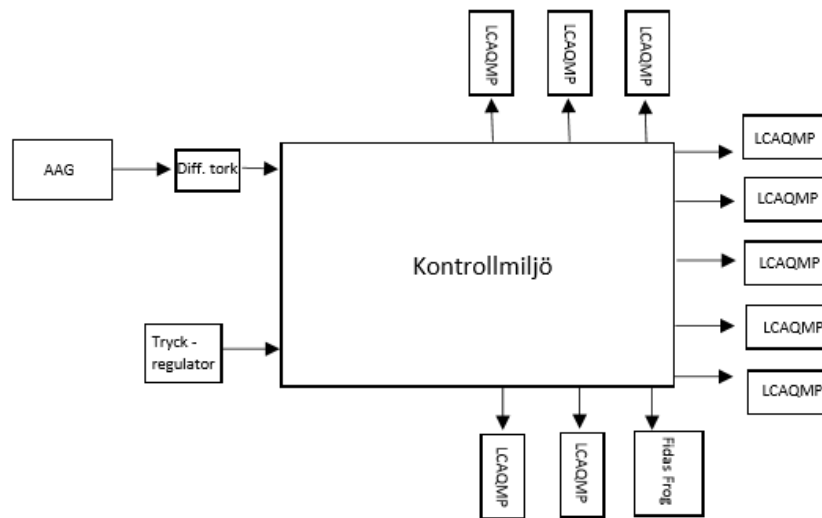
## 3.4.3 Laboratiemätningar

Följande avsnitt redovisar de mätningar som utförts i laboratoriemiljö, där momenten ämnar till att producera resultat som uppfyller projektet syfte och besvarar befintliga frågeställningar.

### 3.4.3.1 Moment I - Referensmätning

Antal försök: 4 st.

För att undersöka hur nära LCAQMP mäter mot dels en referens och dels varandra, utfördes ett moment där LCAQMP och referensen Fidas Frog fick mäta samma luft av varierande partikelhalter. Uppsättningen för detta moment bestod av att 10 st. LCAQMP utan diffusionstorkar samt Fidas Frog var anslutna till kontrollmiljön. Till miljön kopplades dessutom AAG in, samt torr tryckluft. Figur 3.3 illustrerar uppsättningen för mätningen. Mellan olika försök varierades slangposition för LCAQMP i kontrollmiljön.



**Figur 3.3:** Flödesschema för laboratorieutrustningen som användes under moment I.

För att illustrera hur likt varje LCAQMP mäter mot referensen Fidas Frog anpassades en regressionsmodell mellan mätdata från Fidas som förklarande variabel och medelvärdet av varje LCAQMP som responsvariabel. Ett polynom av andra ordningen anpassades för att beskriva detta samband i enlighet med ekvation 3.1

$$y = ax^2 + bx + c \quad (3.1)$$

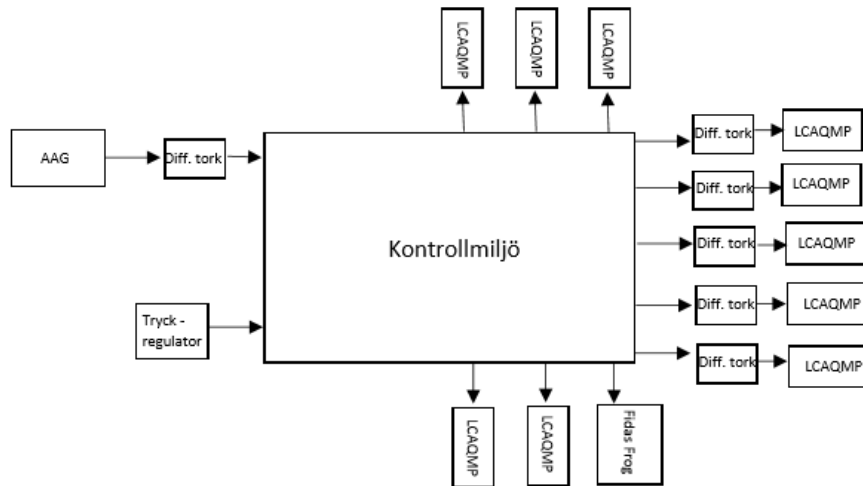
Koefficienterna anger hur mätavvikelsen varierar. Koefficienten a anger hur den varierar kvadratisk, koefficienten b anger hur den varierar linjärt och koefficienten c anger hur stor konstant offset som finns. För att ge ett konkret värde på korrelationen beräknades även en korrelationskoefficient.

Vidare utvärderades varje individuell LCAQMP mäter mot medelvärdet av samtliga enheter. Detta gjordes genom att medelvärdet av mätdata från tre försök ur moment I samlades. Medelvärdet var av mätdata från samtliga LCAQMP innefattade totalt åtta stationära intervall. Dessa värden sattes mot kvoten mellan varje individuell LCAQMP från tillhörande intervall i en graf.

### 3.4.3.2 Moment II - Partikelförluster

Antal försök: 2 st.

För att fastställa om diffusionstorken orsakar partikelförluster har ett jämförande moment utförts. Detta moment krävde identisk uppsättning som föregående moment, med undantaget att diffusionstork var monterad på fem LCAQMP. De övriga LCAQMP samt Fidas Frog behöll sitt otorkade inflöde. Även detta försök utfördes genom att varierande flöden av partikelhaltig luft sattes till kontrollmiljön. Figur 3.4 redovisar momentets uppsättning.



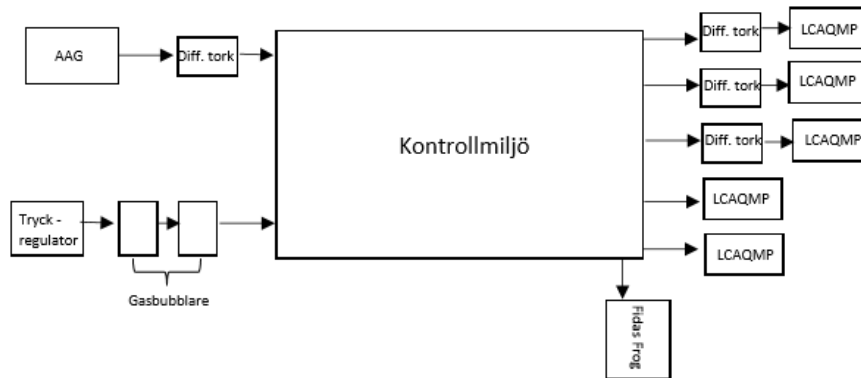
**Figur 3.4:** Flödesschema för laboratorieutrustningen som användes under moment II.

För att utvärdera förluster, utvärderades medelvärden av mätdata från LCAQMP med diffusionstork och LCAQMP utan diffusionstork från samma experiment. Ratio för varje mätpunkt mellan de olika grupperingarna beräknades och illustrerades i en figur. Tillhörande medelvärde och standardavvikelse för denna ratio beräknades.

### 3.4.3.3 Moment III - Höga relativa luftfuktigheter

Antal försök: 5 st.

Det huvudsakliga syftet med att konstruera och använda en apparat som torkar luften var att möjliggöra partikelmätningar vid högre luftfuktigheter. För att undersöka detta utfördes ett moment där partikelhalter och relativ luftfuktighet varierades i kontrollmiljön. Denna luftfuktighet erhöles när tryckluften fick passera igenom en gasbubblare fylld med vatten. Endast fem LCAQMP användes för varje försök, då ett större antal hade överskridit gasbubblarens maxkapacitet. Vidare hade tre LCAQMP diffusionstork och två var utan. Även denna gång användes Fidas Frog utan diffusionstork. Själva utförandet gick ut på att den relativa fuktigheten skulle överskrida 70%. Detta möjliggjordes genom att vattnet i båda gasbubblare förvärmades till ca 30 °C. Se figur 3.5 för uppsättning av momentet.

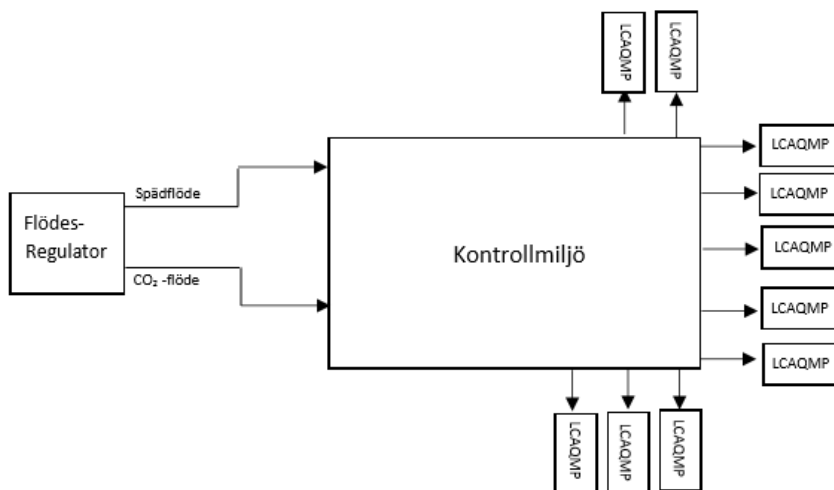


**Figur 3.5:** Flödesschema för laborieutrustningen som användes under moment III.

#### 3.4.3.4 Moment VII - CO<sub>2</sub> referensmätning

Antal försök: 2 st.

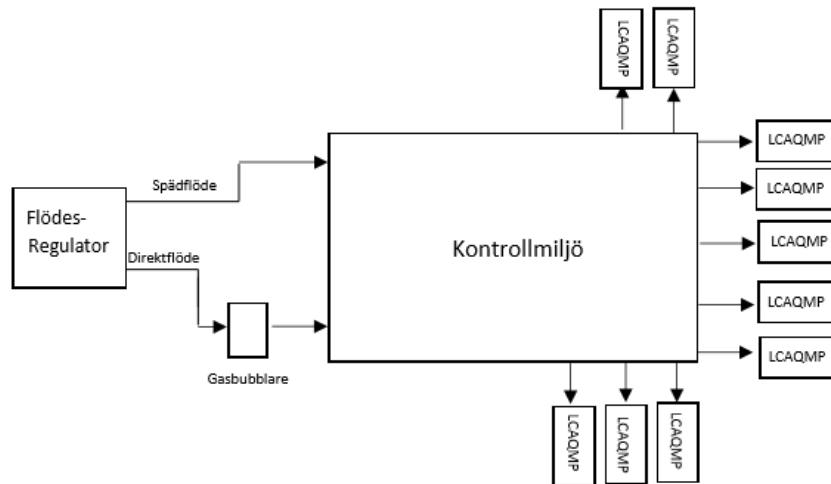
För att validera CO<sub>2</sub>-sensorns prestanda genomfördes ett moment för olika CO<sub>2</sub>-stegsvar där sensorns mätvärde kunde jämföras med ett börvärde. Gasnivåerna valdes för ett stort område av sensorns mätområde kunde kunna evalueras. För att vidare undersöka om diffusionstorken påverkade mätvärden genomfördes experimentet i två omgångar, en där enheter hade diffusionstork och en utan. Figur 3.6 presenterar den använda uppsättningen från omgången utan diffusionstork.



**Figur 3.6:** Flödesschema över laborieutrustningen som användes under moment VII.

### 3.4.3.5 Moment VIII - VOC referensmätning

För att validera VOC-sensors prestanda genomfördes ett moment för olika VOC-stegsvar där sensors mätvärde kunde jämföras med ett börvärde. Gasnivåerna valdes för ett stort område av sensors mätområde kunde kunna evalueras. Gasmängderna beräknas med hjälp av spädningsformeln. För experimentet användes Dodekan som källa för VOC. Figur 3.7 visar ett flödesschema på den använda uppsättning.



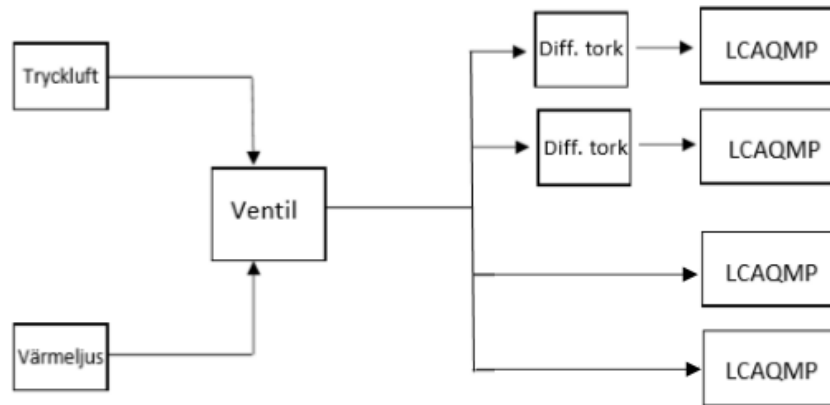
**Figur 3.7:** Flödesschema över laboratorieutrustningen som användes under moment VIII.

### 3.4.3.6 Moment IX - Stegsvär diffusionstork

Antal försök: 1 st.

För att undersöka hur diffusionstorken påverkar stegsvaret för LCAQMP har ett moment utförts där stegsvaret för partikelsensorn och CozIR-LP kunde analyseras. Detta utfördes genom att exponera LCAQMP för gaser som var distinkt olika. För detta experimentet var den ena gaskällan tryckluft och den andra kom från ett värmeljus där lågan var i kontakt med en bit aluminiumfolie.

Totalt användes fyra LCAQMP för detta moment, två hade diffusionstork och två var utan. Sträckan från gaskälla till LCAQMP var samma för samtliga enheter. Figur 3.8 presenterar uppsättningen för detta moment.



**Figur 3.8:** Flödesschema över laborieutrustningen som användes under moment IX.

Fördröjningen orsakad av diffusionstorken kunde räknas ut som skillnaden mellan stegsvarutslagen för de LCAQMP enheterna med diffusionstork och de LCAQMP enheterna utan diffusionstork.

#### 3.4.3.7 Moment X - Kapacitet diffusionstork

Antal försök: 1 st.

För att undersöka diffusionstorkens varaktighet och kapacitet gjordes ett moment där tre LCAQMP mätte luftfuktigheten. En LCAQMP var utan diffusionstork och mätte den relativa luftfuktigheten som fanns i kontrollmiljön. Två LCAQMP hade diffusionstork och mätte den relativa luftfuktigheten efter avfuktning. Figur 3.9 presenterar uppsättningen för detta moment.



**Figur 3.9:** Flödesschema över laborieutrustningen som användes under moment X.

### 3.4.4 Fältmätningar

Följande avsnitt presenterar metoden för de fältmätningar som genomförts. Syftet med mätningarna var att utvärdera hur bra LCAQMP presterar i fältmiljö. För bilder från fältmätningar se appendix G.

#### 3.4.4.1 Moment IV - Mätningar på Frihamnens busshållplats

Mätningar på Frihamnens busshållplats utfördes. En liten personbilstrafik kombinerat med ett varierat flöde av bussar som stannar på hållplatsen innebar att denna hållplats utgjorde ett bra tillfälle att testa LCAQMP's förmåga till att mäta enskilda händelser och utsläppskällor. Mätningen gjordes i tre halvtimmeslånga försök.

#### 3.4.4.2 Moment V - Mätningar i Gårda

Även vid motorvägen i Gårda utfördes fältmätningar. Ett nästan konstant högt flöde av personbilstrafik gjorde detta till en väl vald plats för att testa LCAQMP's förmåga att fånga upp en jämn och hög nivå av luftföroreningar. Även här gjordes tre halvtimmeslånga försök.

#### 3.4.4.3 Moment VI - Mätningar i parkeringsgarage

Mätningar utfördes i ett garage vid Chalmers tekniska högskola med en Volvo V70 som var miljöklassad till EURO 5, årsmodellen på bilen var 2008. LCAQMP enheterna placerades i garaget på olika avstånd från vägen. Bilen körde sedan förbi i 10, 20 och 30 km/h samt rivstartade och tvärbromsade vid närheten av LCAQMP och referensmätare.

Mätning utfördes också på Volvon utomhus där bilen stod vid tomgång och sedan höll 2000 varv/min i 5 minuter för att mäta om eller hur mycket partiklar den släpper ut.

## 3.5 Covid-19

Då pandemin av Covid-19 bröt ut under våren 2020 med stängda landsgränser och kraftigt reducerad internationell godstransport som följder krävdes även en del omställningar och åtgärder inom projektet.

Chalmers tekniska högskola instiftade, med rekommendationer från Sveriges regering och Folkhälsomyndigheten, åtgärder för att förhindra smittspridning inom skolans verksamhet. Förutom att all utbildning skedde på distans så begränsades även tillträdes till Chalmers universitetsbelagda lokaler.

Inverkan på projektets fortlöpande resulterade således i att den tillverkning och prototypframställning som var ämnad att ske i Prototyplabbet till viss del skedde i studentdrivna verksamheter såsom CASE, ETA och XP. Prototyplabbet var behjälpliga med att vattenskära detaljer för tillverkningen av diffusionstorken, övrig metallbearbetning fick dock omplaneras. Vidare utfördes ett studentinitiativ på Chalmers i att

tillverka skyddsutrustning åt sjukvården under utbrottet av Covid-19. Utfallet blev att en kraftig majoritet av de 3D-printers som högskolan har tillgång till åsidosattes för tillverkningen av skyddsutrustningen. Då flera komponenter i LCAQMP och diffusionstorken var tilltänkta att produceras genom 3D-printning fick viss omarbeting/revidering av designen ske för att anpassas efter den reducerade tillgången till 3D-printning.

Pandemin bidrog även till att kraftiga förseningar på beställningar förekom. Eftersom majoriteten av sensorerna beställdes från utländska leverantörer anlände dem senare än beräknat vilket försenade projektet. Därutöver var det initialt planerat att LCAQMP även skulle innefatta en sensor för mätning av  $\text{NO}_2$  halter. Eftersom denna leverans inte ankom förrän i absoluta sluttakten av projektet valdes den att exkluderas från LCAQMP.

På grund av Covid-19 ändrades metoden för konstruktionen av den kompletta LCAQMP då delar blev försenade eller inte kunde levereras. Chalmers stängde även ned stora delar av skolan som exempelvis prototypplabbet vilket gjorde att access till vattenskärning och svarvningen minskas. Tillgång till 3D-printerna på Chalmers sänktes då de används för att göra skyddsvisir till sjukvården vilket gör att LCAQMP behövde konstrueras med minskad användning av dessa verktyg. Den minskade användningen av 3D-printning resulterade i att laserskärning användes främst för att göra plattformen för LCAQMP.  $\text{NO}_2$ -mätaren som var tänkt att vara med i LCAQMP kunde inte implementeras då den inte kom fram i tid.

# 4

## Resultat och analys

I detta kapitel presenteras och analyseras resultat från de mätningar som gjordes.

### 4.1 Tekniska resultat - LCAQMP

LCAQMP är en mobil sensorplattform som kan mäta luftföroreningarna  $PM_{10}$ ,  $PM_{2.5}$ ,  $CO_2$ , VOC samt relevanta faktorer som luftfuktighet, tid, plats och temperatur. Data sparas på ett SD-kort. LCAQMP består utöver detta av en diffusionstork.

#### 4.1.1 Diffusionstork

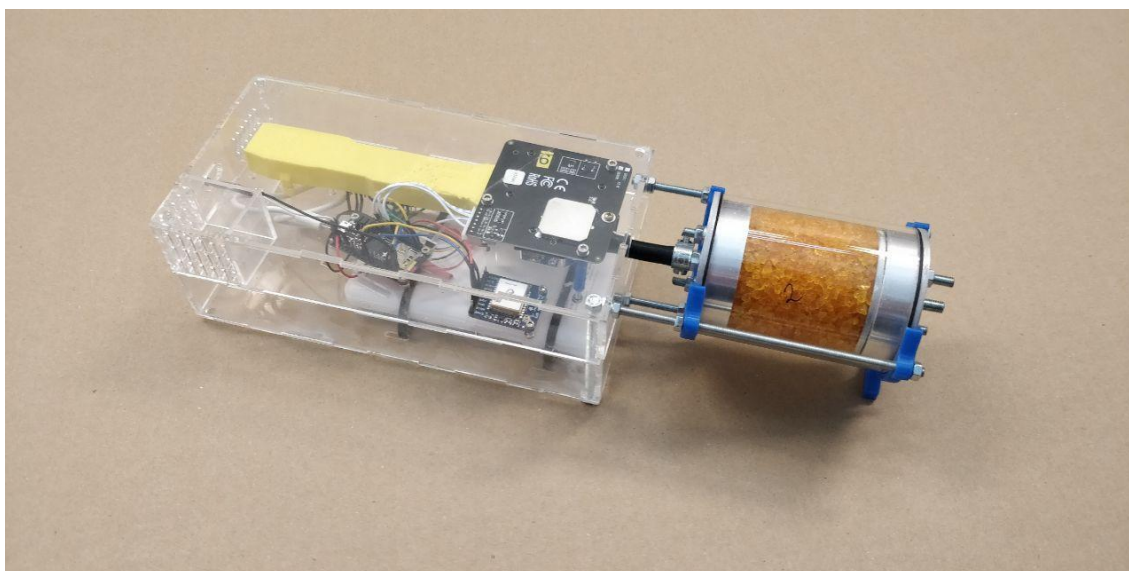
Diffusionstorken består av ett rör i akrylplast och två gavlar i aluminium. Fyra kvadratiska luftkanaler sitter inuti diffusionstorken och leder luften genom en kammar som innehåller silica. I luftkanalerna ligger filterpapper. Se figur 4.1 för diffusionstork med respektive utan silica-pellets. Ritningar på konstruktionen är bifogade i bilaga B.



**Figur 4.1:** Diffusionstork med och utan silica-pellets. Notera filterpapperets positionering inuti genomlöpsröret i enheten till höger i figuren.

### 4.1.2 Huvudenhet

Huvudenheten i LCAQMP består av en låda i akrylplast med fastmonterade sensorer inuti. Konstruktionen är gjord så att luftflödet som skapas av fläkten i partikelsensorn SDS011 styrs av en för ändamålet designad kanal förbi de övriga sensorerna. I den undre delen av huvudenheten sitter powerbanken fast. Diffusionstorken hålls fast i en ställning i anslutning till plastlådan. Se figur 4.2 för färdigställd huvudenhet.



**Figur 4.2:** *Komplett LCAQMP med diffusionstork monterad.*

### 4.1.3 Kostnad

Det slutgiltiga priset för en LCAQMP blev 5685 kronor per enhet. Om priset beräknades utan någon  $\text{NO}_2$ -sensor samt ozon-sensor blev det 3265 kronor per enhet. För en detaljerad prislista se H.1.

## 4.2 Mätningar

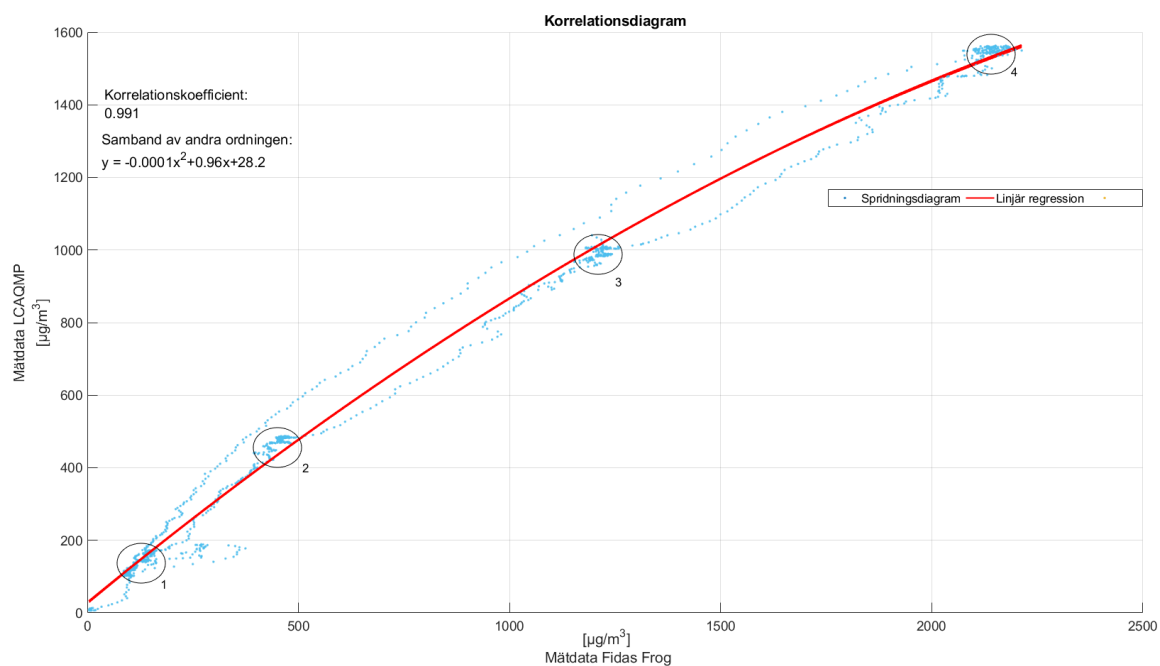
Följande avsnitt presenterar mätdata från LCAQMP och referensen Fidas Frog. Mätdata omfattar totalt sex storheter, nämligen  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{PM}_{2.5}$ , relativ fuktighet, temperatur,  $\text{CO}_2$  och VOC. Vidare presenteras även resultat som ämnar att besvara projektets frågeställningar. Resultatet delas upp i avsnitt utefter de momenten genomförts.

### 4.2.1 Laboratiemätningar

Följande avsnitt presenteras resultat från de laboratiemätningar som gjorts.

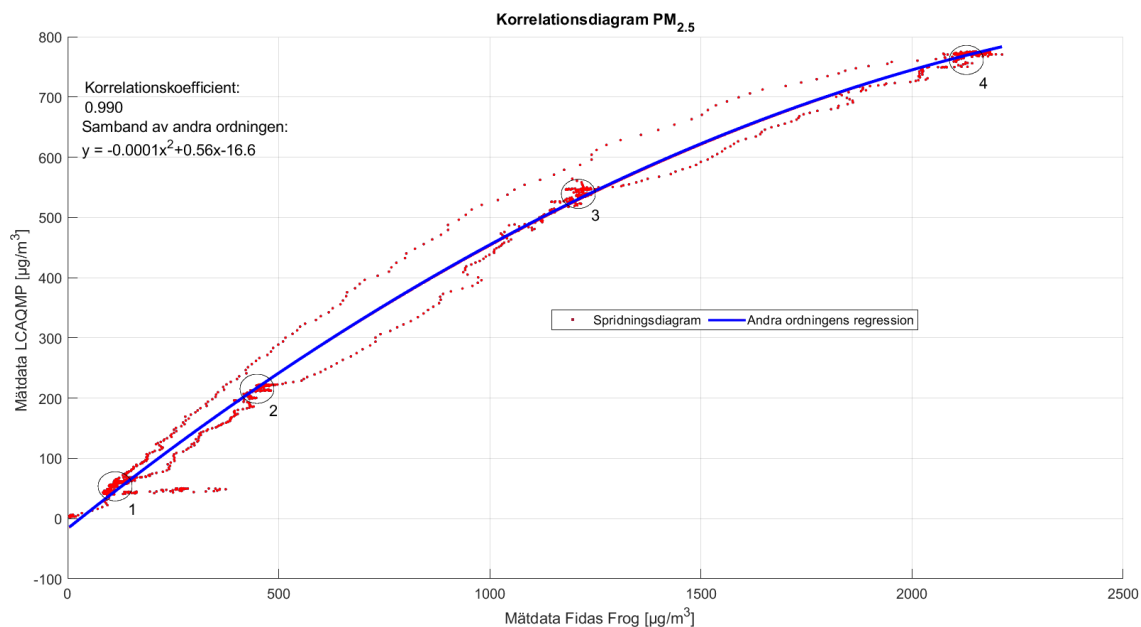


## 4. Resultat och analys



**Figur 4.4:** Korrelationsdiagram av  $PM_{10}$  mellan medelvärde av LCAQMP och Fidas Frog från moment I.

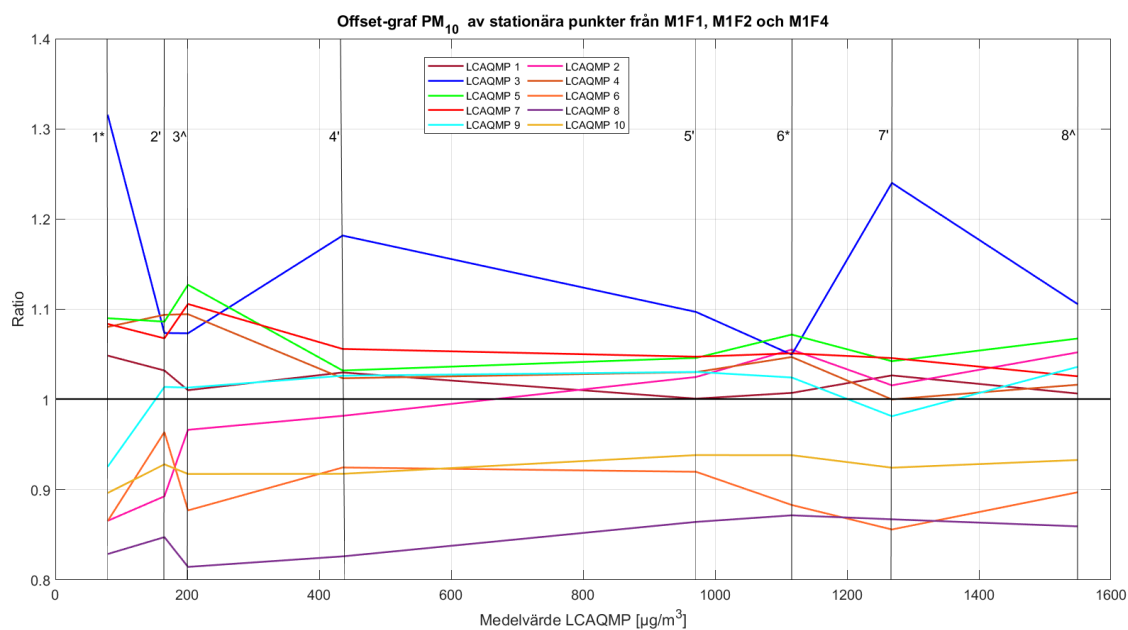
Följande graf, figur 4.5 presenterar samma mätdata som ovanstående, men för  $PM_{2.5}$ . Korrelationskoefficient har beräknats till 0.990.



**Figur 4.5:** Korrelationsdiagram av  $PM_{2.5}$  mellan medelvärde av LCAQMP och Fidas Frog från moment I.

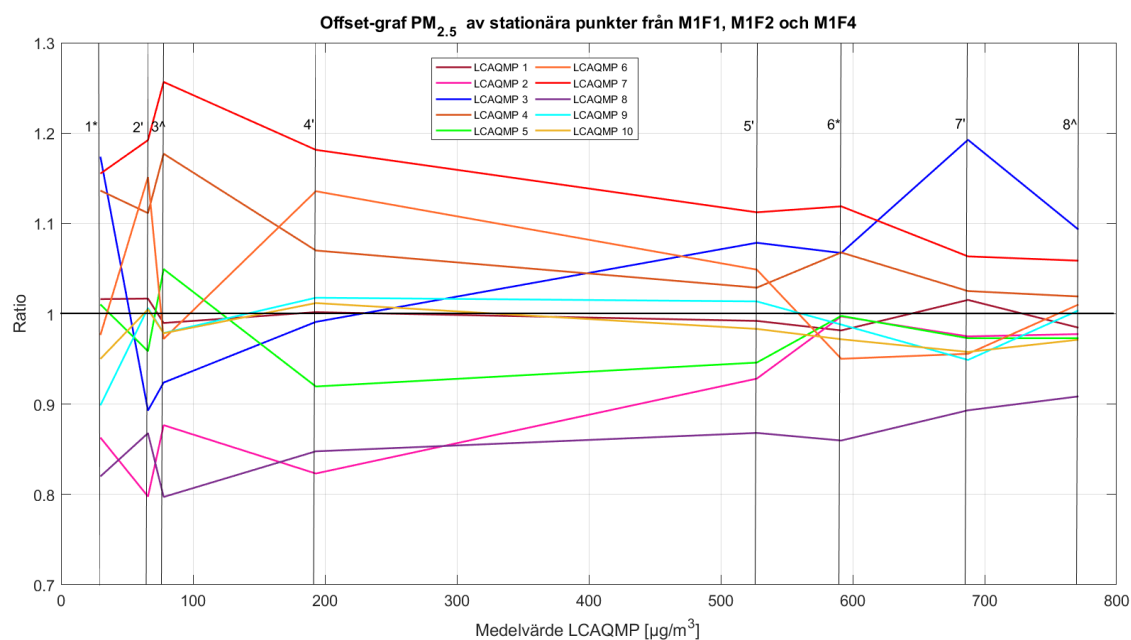
## 4. Resultat och analys

Följande graf, figur 4.6, illustrerar hur samtliga LCAQMP mäter mot varandra genom att redovisa hur mätdata av  $PM_{10}$  från varje LCAQMP avviker från medelvärdet av samtliga enheter vid åtta stabila partikelnivåer. Dessa nivåer är i sin tur tagna från olika försök ur moment I. I dessa mätningar gjordes totalt tre olika platskonfigurationer i kontrollmiljön för varje LCAQMP. Dessa olika platser är markerade i figuren, där \* = försök 1 (se A.2), ^ = försök 2 (se A.3) och ' = försök 4 (se 4.3).



**Figur 4.6:** Illustrerande diagram för individuell LCAQMP offset relativt medelvärde av samtliga LCAQMP över olika försök.

Följande graf, figur 4.7, redovisar samma information som figur 4.6, för  $PM_{2.5}$ .



**Figur 4.7:** Illustrerande diagram för individuell LCAQMP offset relativt medelvärde av samtliga LCAQMP över olika försök

En analys av resultatet från mätningen i figur 4.3 visar på hög korrelation mellan LCAQMP och referensen Fidas Frog. Detta visar på att LCAQMP med hög tillförlitlighet kan mäta både  $PM_{10}$  och  $PM_{2.5}$  vid varierande partikelhalter i laboriemiljö. Det finns dock en beloppsskillnad av mätdata, vilket regressionsuttrycken visar. Det konstanta värdet i varje uttryck redovisade i figur 4.4 och 4.5 kan tolkas som en konstant mätavvikelse för LCAQMP mot referensen. Vidare verkar differensen mellan Fidas Frog och LCAQMP öka när de utsätts för större partikelhalter, vilket uttryckta linjära och kvadratiska koefficienter anger. Differensen verkar även vara större för  $PM_{2.5}$  än för  $PM_{10}$ . De framtagna polynomen skulle ha kunnat användas till kalibrering av LCAQMP, men detta har inte gjorts.

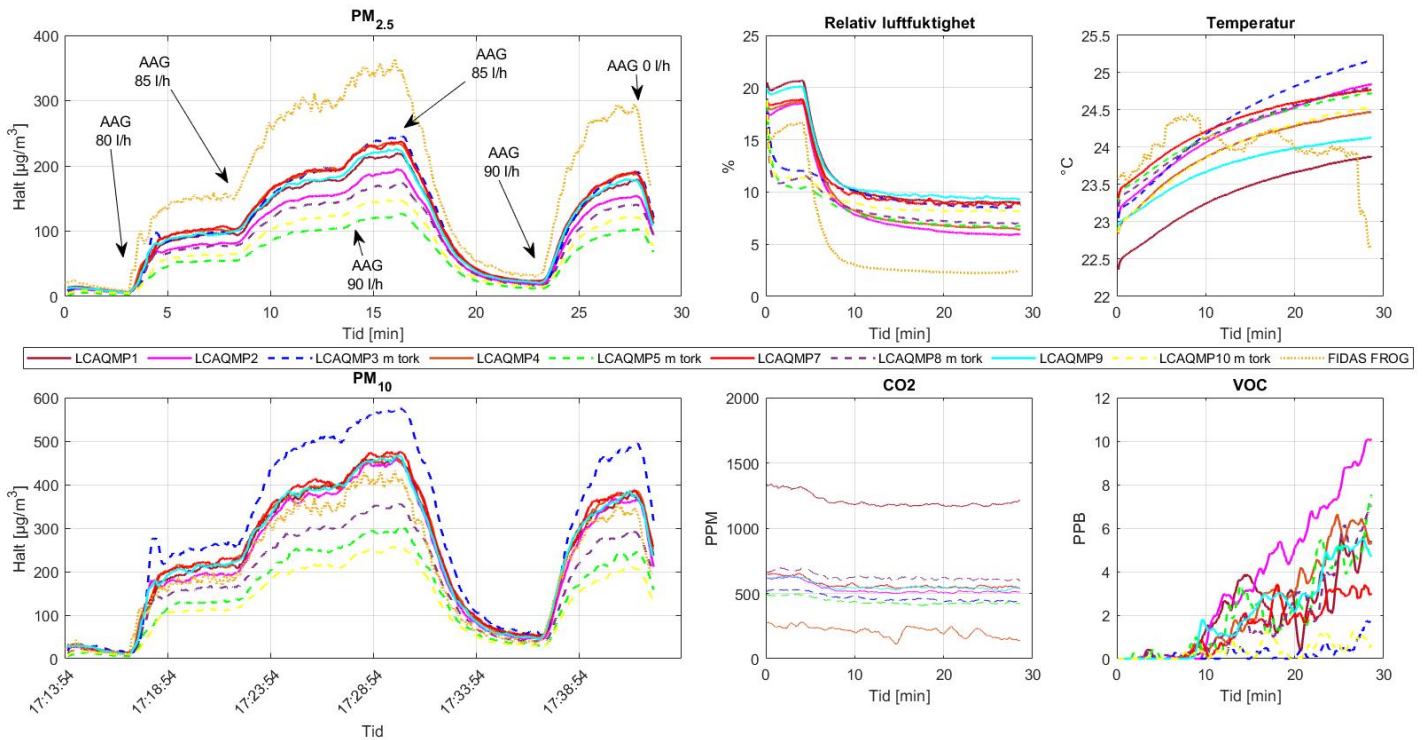
Figur 4.7 och 4.6 visar även att det finns en intern variation mellan de olika partikelmätarna. Särskilt för  $PM_{10}$  verkar denna variation vara relativt konstant för vissa enheter, men varierande för exempelvis LCAQMP 3.

#### 4.2.1.2 Moment II - Partikelförluster

Följande graf, figur 4.8, presenterar mätdata från ett försök där fem LCAQMP med diffusionstork och fem LCAQMP utan, samt Fidas Frog har använts för att mäta torr luft av varierande partikelhalter. Samtliga enheter har mätt luft i kontrollmiljön. Justeringarna som gjordes på partikelgeneratoren är markerade i linjegrafen. LCAQMP 6 är bortplockad från diagrammet på grund av stora mätfel.

## 4. Resultat och analys

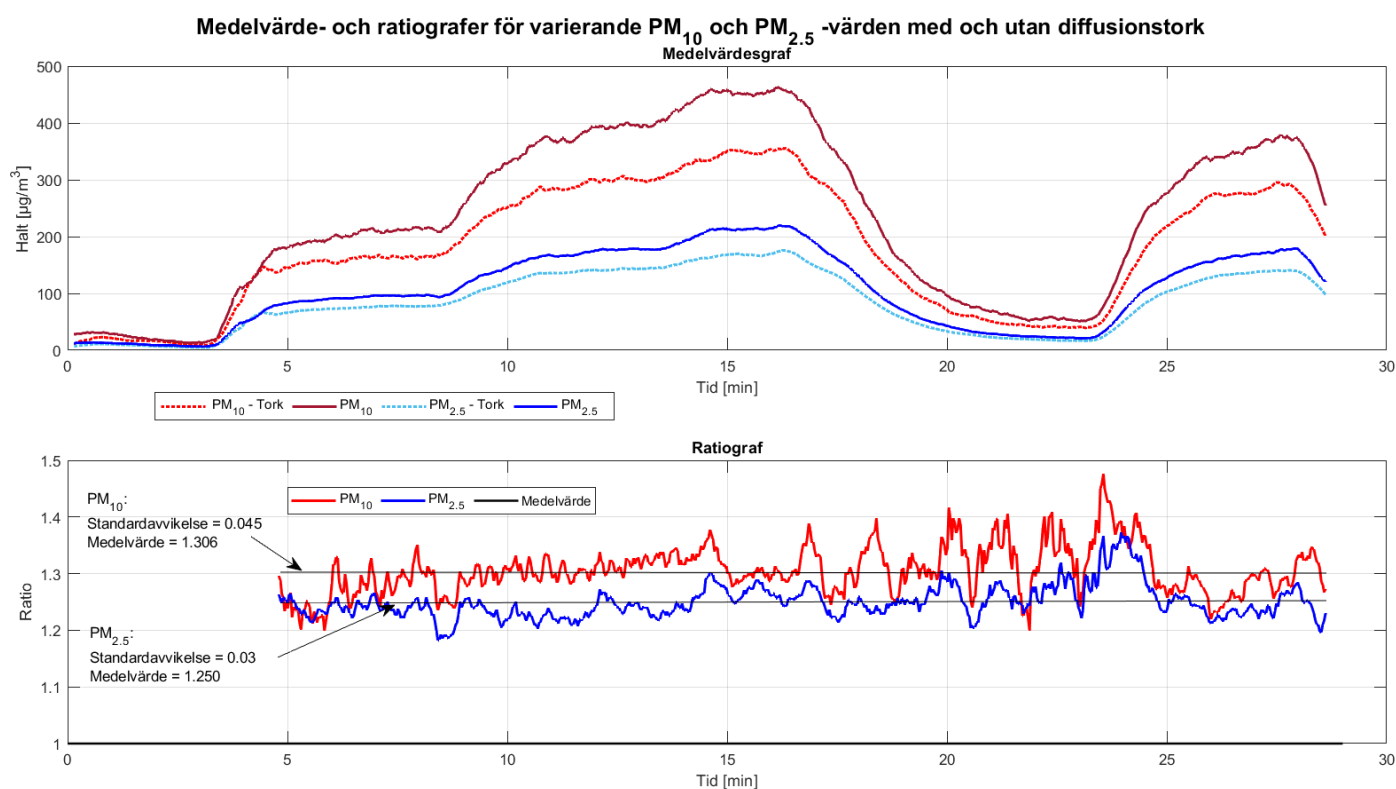
Mätning i kontrollerad miljö, M2F2  
Fidas Frog mot LCAQMP, med och utan diffusionstork



**Figur 4.8:** Graf över mätdata av luftkvaliteten från moment II. LCAQMP utrustade med diffusionstork är streckade.

I följande graf, figur 4.9, har enheterna med diffusionstork respektive enheterna utan diffusionstork slagits ihop till var sitt medelvärde, för PM<sub>2.5</sub> samt PM<sub>10</sub>. Nedanstående graf illustrerar ration dessa medelvärden. Utöver LCAQMP 6 har även LCAQMP 3 plockats bort då den enligt figur 4.5 mätte med en varierande olikhet från resterande enheter. Observera även att mätdata från de första fem minuterna av försöket är borttagna.

## 4. Resultat och analys



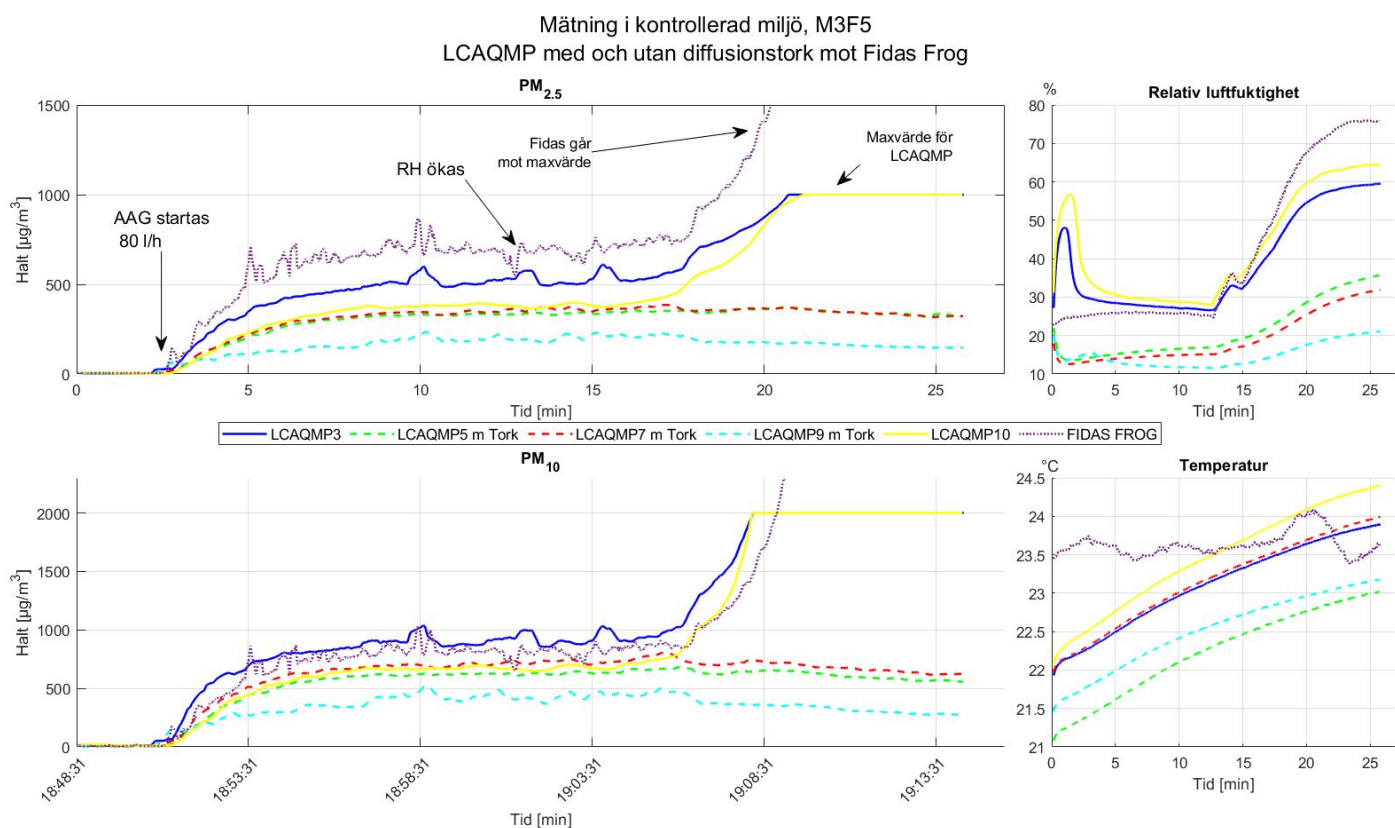
**Figur 4.9:** Övre: Diagram över medelvärde av  $PM_{10}$  och  $PM_{2.5}$  för LCAQMP med och utan diffusionstork. Undre: Ratiodiagram med tillhörande medelvärde och standardavvikelse mellan dessa mätstorheter.

En analys av resultatet presenterat i figur 4.9 visar på att partikelförluster sker vid användning av diffusionstork. En relativt låg spridning kring medelvärdet av den undre grafen i figur 4.9 kan observeras, vilket visar på en relativt konstant förlust. För att ytterligare undersöka detta gjordes en liknande graf, se appendix A.4, men med data från Moment I där ingen LCAQMP hade diffusionstork. Samma gruppering av medelvärdena för LCAQMP som i 4.9 gjordes men ingen betydande skillnad i partikelhalter kunde ses. Detta speglas väl i ratiovärdena. Ratio för  $PM_{10}$  med respektive och utan diffusionstork blev 1.31 respektive 0.96. För  $PM_{2.5}$  blev ratio med och utan diffusionstork 1.25 respektive 1.04.

### 4.2.1.3 Moment III - Höga relativa luftfuktigheter

Följande graf, figur 4.10, presenterar mätdata från ett experiment där fem LCAQMP samt Fidas Frog användes. Tre LCAQMP hade diffusionstork och två var utan diffusionstork. Fidas Frog använde inte diffusionstork. 2.5 minuter in startades partikelgeneratoren som därefter hölls på en konstant nivå genom experimentet. 13 minuter in ökades flödet genom gastvättflaskan och den relativa luftfuktigheten i kontrollmiljön steg.

## 4. Resultat och analys



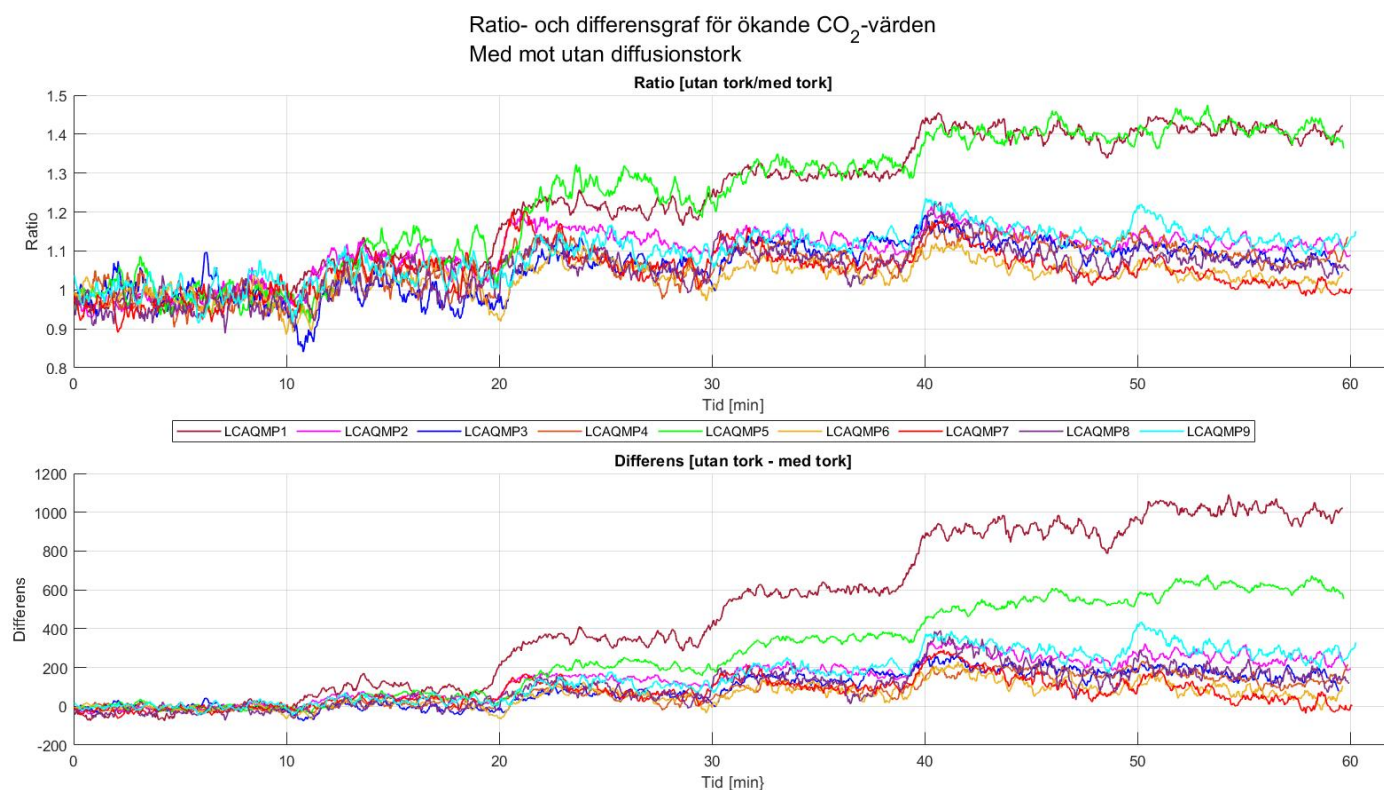
**Figur 4.10:** Graf över mätdata av luftkvaliteten från moment III. LCAQMP utrustade med diffusionstork är streckade

En analys av resultatet presenterat i figur 4.10 visar på att diffusionstorken fungerar. Enheterna utan diffusionstork anger mycket höga partikelhalter när de börjar utsättas för hög luftfuktighet. Detta trots att partikelhalterna i lådan hålls på konstant nivå. Däremot uppvisar mätvärdena från enheterna med diffusionstork inte dessa höga halter, utan uppehåller nästan samma nivå, utöver en liten minskning.

### 4.2.1.4 Moment VII - CO<sub>2</sub> och diffusionstork

Följande grafer, figur 4.11, visar på påverkan från diffusionstork vid mätning av CO<sub>2</sub>. Nio LCAQMP utan diffusionstork utsattes för stegvis ökande halter av CO<sub>2</sub>. Därefter gjordes samma sak för samma nio LCAQMP med diffusionstork. Ration och differensen för respektive LCAQMP med och utan diffusionstork togs sedan fram.

## 4. Resultat och analys



**Figur 4.11:** Mätdata från moment VII där CO<sub>2</sub> beteende med- och utan diffusionstork betraktas. I övre grafen redovisas ratio och undre graf för inbördes differens.

Följande tabell, 4.1, visar medelvärdet av sensorernas rådata från försöket med och utan diffusionstork för de sista två minuterna av varje steg.

**Tabell 4.1:** Uppmätta CO<sub>2</sub> koncentration

Mätsteg	Uppmätt medelvärde med diffusionstork [ppm]	Uppmätt medelvärde utan diffusionstork [ppm]
0 (omgivning)	578	568
1	711	743
2	1111	1226
3	1508	1727
4	1874	2170
5	2089	2385

En analys av graferna visar hur differensen ökar med höjda CO<sub>2</sub>-nivåer. Spridningen ökar även vid högre nivåer. För alla enheter utom enhet 1 och 5 överstiger inte spridningen 11.4% vid den högsta mängden CO<sub>2</sub>.

### 4.2.1.5 Moment VIII - VOC referensmätning

Från VOC-experimentet lyckades aldrig mätbara nivåer uppnås. Orsaken till denna problematik blev aldrig helt utredd. Det är möjligt att sensorn inte lyckades läsa av VOC på en dodekanaerosol, men en mer trolig anledning är att orsaken berodde på

massflödesmätarna som inte gav korrekt flöde eller att Dodekan molekylerna föll ur luften då dess ångtryck är såpass lågt.

#### 4.2.1.6 Moment IX - Stegsvär - Diffusionstork

Följande tabell, 4.2, är framtagen från mätvärden i figur A.1, se appendix. Där utsattes tre LCAQMP för ett stegsvär. Två LCAQMP var utan diffusionstork, en hade diffusionstork. Stegsväret skapades genom att först låta enheterna mäta tryckluft och därefter ändra mätluften till luft från ett tänt värmeljus. Därefter noterades den förskjutning som uppstod hos enheterna med diffusionstork.

**Tabell 4.2:** Fördröjningsökning med diffusionstork

Enhet	Fördröjning [s]
PM <sub>2.5</sub>	18
PM <sub>10</sub>	26
CO <sub>2</sub>	28

Från experimentet sågs att diffusionstorken lägger till en fördröjning till LCAQMPs stegsvär. Denna fördröjning är inte konstant utan skiljer sig beroende på vilken luftförorening som mäts, men ligger mellan 18 och 28 sekunder för PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> och CO<sub>2</sub>.

Följande tabell, 4.3, är skapad från samma experiment men illustrerar hur själva stigtiden för partiklar och CO<sub>2</sub> förändras av diffusionstorken. Tiden är tagen från det att värdet ökat med 10% från ursprungsvärdet tills dess att det uppnått 90% av det nya stationärvärdet.

**Tabell 4.3:** Stegsvärstider

Enhet	Med diffusionstork	Utan diffusionstork medelvärde [s]
PM <sub>2.5</sub>	1:26	110
PM <sub>10</sub>	1:52	108
CO <sub>2</sub>	>10	~240-300

Från experimentet ses att alla sensorer som testades har tämligen långa stigtider. Skillnaden för stigtiderna vid partikelmätningar med och utan diffusionstork är inte dramatisk. Stigtiden för CO<sub>2</sub> på en enhet med diffusionstork gick inte att beräkna då stabilt värde inte uppnåddes efter 10 min se A.1. Dock visar resultatet på att stigtiden ökar mycket med diffusionstork för CO<sub>2</sub>-sensorn.

#### 4.2.1.7 Moment X - Kapacitet diffusionstork

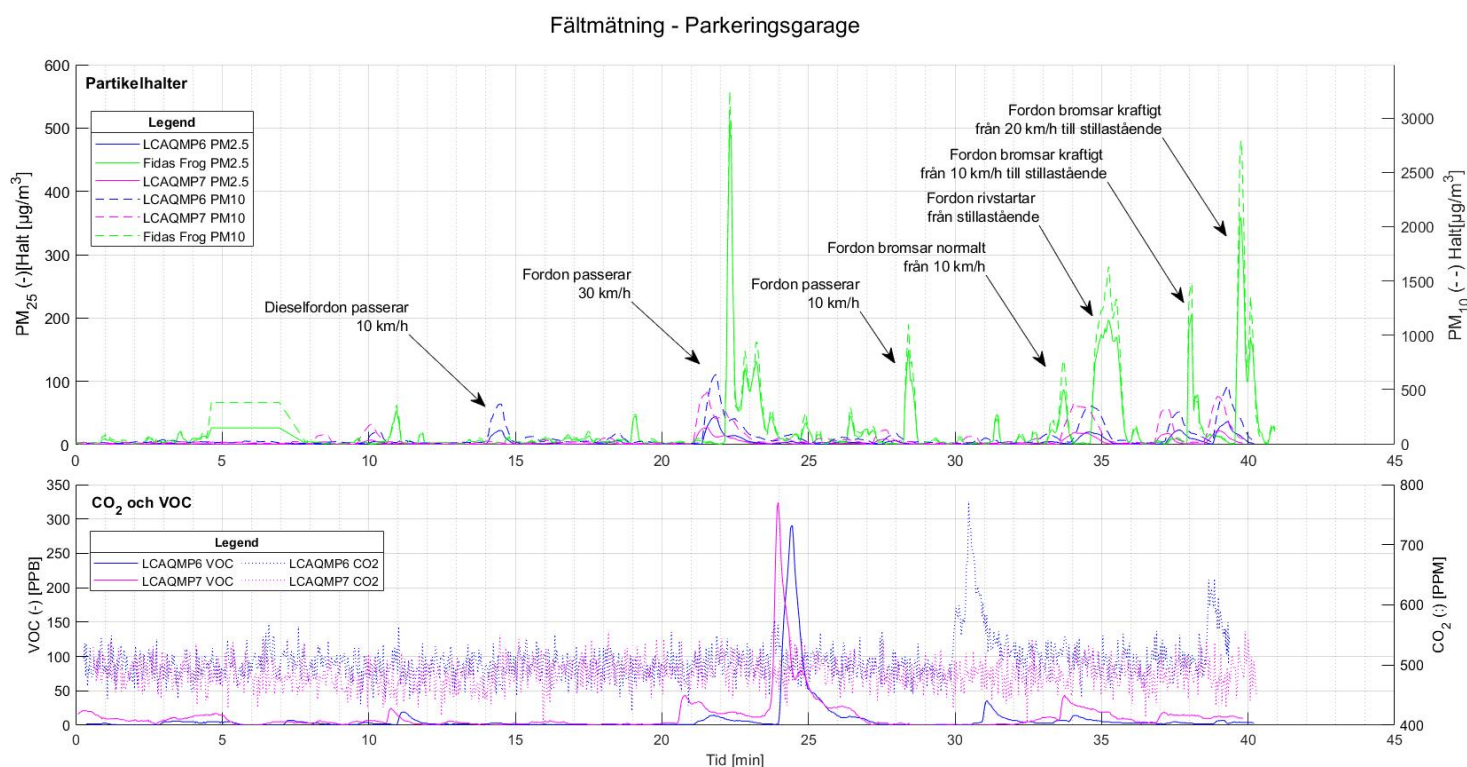
Kapaciteten för diffusionstorken testades genom att utsätta två LCAQMP med diffusionstork och en LCAQMP utan diffusionstork för fuktig luft under totalt tre dygn. I genomsnitt sänkte enheterna med diffusionstork den relativa luftfuktigheten hos den uppmätta luften från 57.8% till 33.2%. Under experimentet adsorberade diffusionstorkarna i genomsnitt 26.95 g vatten vilket motsvarade 23.5 % av silicans massa. Mot slutet av experimentet gick det inte att se någon märkbar avmattningseffekt gällande torkningsförmågan.

## 4.2.2 Fältmätningar

Följande avsnitt redovisar resultat från fältmätningar.

### 4.2.2.1 Moment VI - Mätningar i parkeringsgarage

Följande graf, figur 4.12, visar en mätning som gjordes i ett parkeringsgarage. En Volvo V70 från 2008 klassad som EURO-5 kördes i olika hastigheter förbi flera LCAQMP samt referensmätaren Fidas Frog. Enheterna i grafen placerades längs körbanan med en meters mellanrum. De placerades så nära körbanan som möjligt. I grafen är olika händelser som verkar ha gett utslag utmärkta med pilar. Viktigt att påpeka är att fler körningar än de som är utmärkta gjordes, men många av de gav inte utslag på varken Fidas Frog eller LCAQMP.



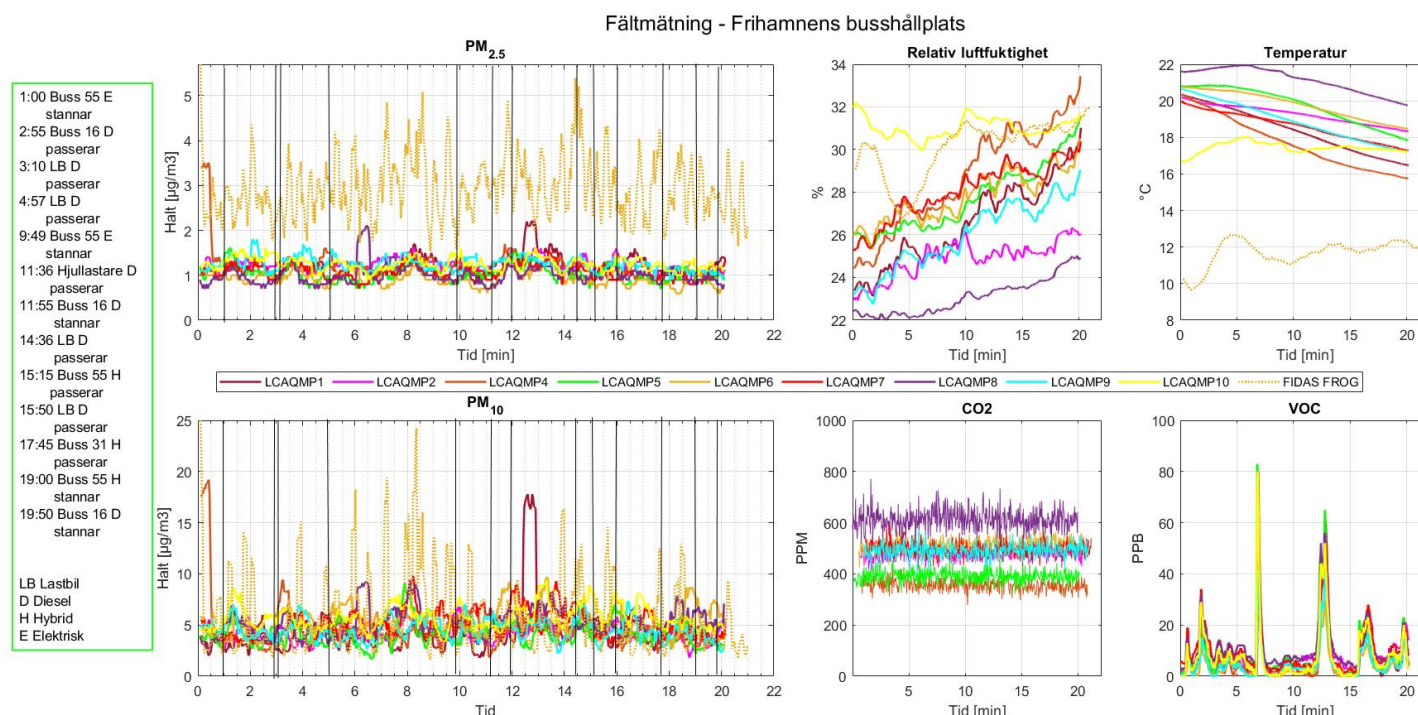
**Figur 4.12:** Mätdata från fältmätning i garagemiljö. Övre graf visar partikelhalter och undre graf redovisar  $CO_2$  och VOC för samma tidsaxel. Annoteringar i grafen visar de olika företeelserna under experimentet.

Resultatet från mätningen är utifrån laboriemätningarna motsägelsefullt. Resultatet visar att Fidas Frog reagerar med en betydande fördröjning, runt en minut, på de händelser som ger utslag. Laboriemätningar har visat på ett omvänt beteende där Fidas Frog brukar vara avsevärt snabbare än LCAQMP.

Det utfördes även experiment på Volvon i utomhusmiljö där den kördes på tomgång. Se appendix G.2 för graf.

#### 4.2.2.2 Moment IV - Mätningar på Frihamnens busshållplats

Figur 4.13 visar resultatet från en mätning vid Frihamnens busshållplats. Under ett samplingsintervall om tjugo minuter trafikerades hållplatsen av bussar med olika typer av framdrivningssystem. Mätningen utfördes med nio LCAQMP inklusive diffusionstork samt referensmätning med Fidas Frog. De var alla placerade så nära varandra som möjligt med tre meters avstånd till körbanan. Mätningen skedde på en fuktig dag med blöt körbana och periodvis även lätt regn. De händelser som registrerades under mätningen är utmärkta med tidsdatering till vänster i figuren. I figur G.3 under appendix kan experimentutförandet observeras.



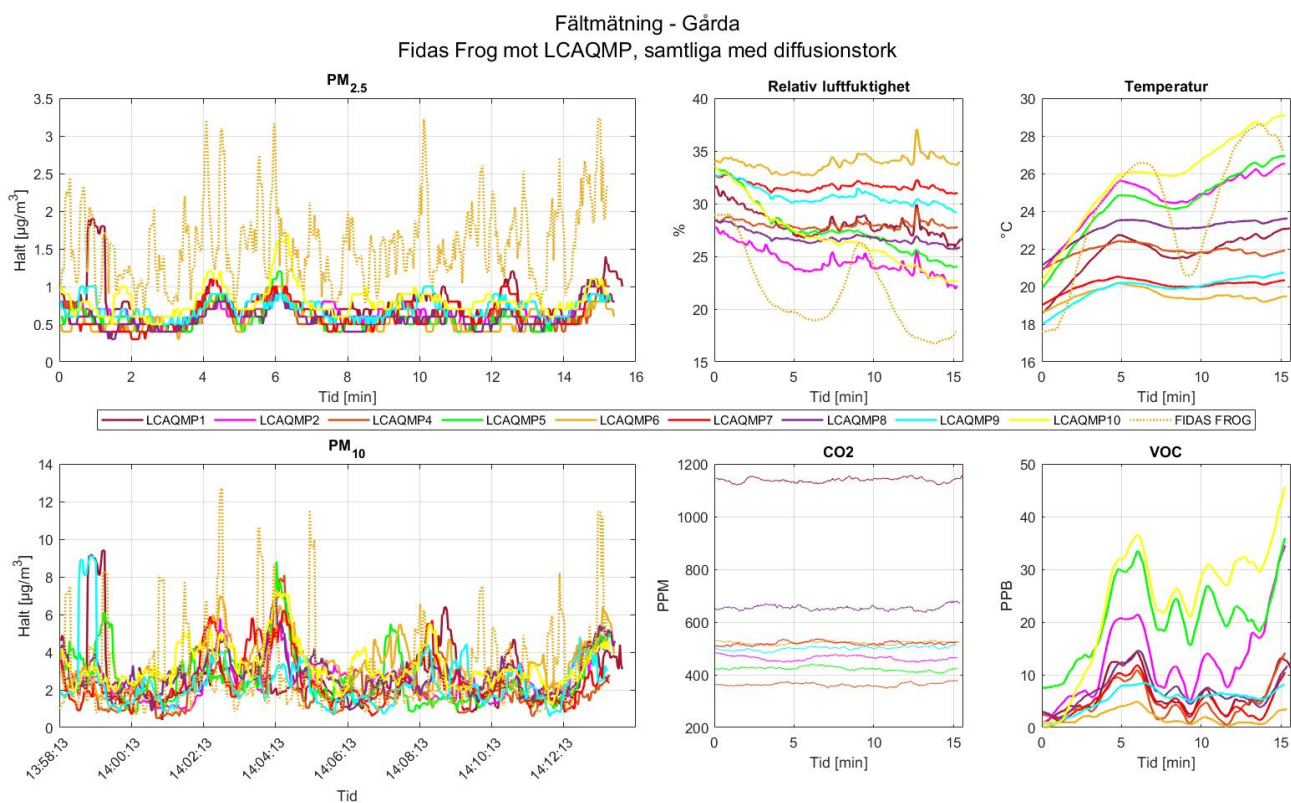
**Figur 4.13:** Mätdata från fältmätning vid Frihamnens busshållplats. Annoteringar för tidshändelser avläses till vänster om graferna.

Resultatet visar att varken Fidas Frog eller LCAQMP verkar fånga upp de händelser som noterats. De spikar som syns korrelerar inte med de tidsnoteringar som gjorts.

#### 4.2.2.3 Moment V - mätningar i Gårda

Följande mätning presenterad i figur 4.14 gjordes på taket av ett parkeringshus i Gårda nära motorvägen. Mätningarna utfördes under tisdagseftermiddag med betydande kontinuerlig trafik. Väderförhållandena var fuktiga med svaga vindar. Tio LCAQMP användes samt Fidas Frog.

## 4. Resultat och analys



**Figur 4.14:** Mätdata från fältmätning vid Gårda i nära anslutningen till E6-leden genom Göteborg.

Resultaten visar på låga halter av partiklar, såväl för PM<sub>10</sub> som för PM<sub>2.5</sub>, trots att mätningen gjordes nära en trafikerad led. Även Fidas Frog uppmäter låga partikelhalter. Figur G.4 i appendix visar hur experimentet genomfördes.

# 5

## Diskussion

Följande kapitel diskuterar resultaten och projektet.

### 5.1 Konstruktionen av LCAQMP

LCAQMPs konstruktion bedöms uppfylla många av de kriterier som ställdes vid början av projektet. Vid korrekt montering är konstruktionen robust och kompakt. Sensorerna är monterade och orienterade på ett smart sätt i förhållande till hur luftflödet styrs. Däremot är den besvärlig att hantera varje gång den måste monteras isär. Eftersom detta måste ske varje gång SD-kort eller powerbanken ska kommas åt sker detta tämligen ofta. Detta hade kunnat åtgärdas genom en annan konstruktion som gör det smidigare att komma åt innehållet. En annan men mer arbetsintensiv lösning vore att ha en trådlös datahantering så att lådan inte hade behövt öppnas lika ofta. Det hade även varit önskvärt att under mätningens gång kunna ta del av resultaten i realtid, potentiellt via en skärm.

Konstruktionen av diffusionstorken uppfyllde kraven som ställdes vid början av projektet. Den är robust och enkel att hantera. Att byta silica är omständligt men detta är inte något som i behövdes göra särskilt ofta.

LCAQMP inklusive diffusionstorken designades utifrån en redan existerande prototyp och några särskilda designval utifrån exempelvis luftflödesanalyser gjordes inte. Det hade varit intressant att i större grad teoretiskt förankra designen av diffusionstorken.

Priset på LCAQMP jämfört med den dyra referensmätaren skiljer sig på cirka 95 000 kronor. LCAQMP har då en relativt låg kostnad jämfört med vad den dyra referensmätaren kostar.

### 5.2 Mätningar

I följande avsnitt diskuteras resultaten från samtliga mätningar.

## 5.2.1 Laboratoriemätningar

I följande avsnitt diskuteras resultaten från mätningar i laboratoriemiljö.

### 5.2.1.1 Partikelmätaren SDS011

Vid mätning av partikelhalter avviker de olika LCAQMP dels från varandra i varierande utsträckning men även från referensmätaren Fidas Frog.

De interna avvikelserna kan bero på flera faktorer. Vad gäller  $PM_{10}$  (se figur 4.6) ser avvikelserna någorlunda stabila ut, vilket skulle kunna tyda på "inbyggda" variationer i sensorerna i sig. Dessa variationer ligger även nära spannet för SDS011s inbyggda mätnoggrannhet på  $\pm 15\%$ . För  $PM_{2.5}$  (se figur 4.7) varierar avvikelserna i större grad, vilket skulle kunna tyda på att andra faktorer också spelar in. Trots att flera platskonfigurationer under de olika försöken gjordes varierar avvikelserna även för samma konfiguration. Detta skulle kunna tala för att position spelar en mindre roll för den interna avvikelserna. Fler och mer rigorösa mätningar med fokus mot intern variation av SDS011 skulle behöva göras för att bättre undersöka detta.

Den höga korrelationen mot Fidas Frog tyder på att LCAQMP följer de verkliga partikelvärdena trendmässigt. De stora skillnaderna, särskilt för  $PM_{2.5}$ , mellan LCAQMP samt Fidas Frog i absoluta värden tyder dock på att individuell kalibrering gentemot referens för varje enhet ses som nödvändig.

### 5.2.1.2 Diffusionstork

Resultatet från Moment II tyder starkt på att diffusionstorken bidrar till partikelförluster. Slutledande resultat för en önskvärd förlustfaktor var dock inte lika entydigt utan varierade med omständligt för experimenten. Resultaten presenterade i figur 4.9 pekar dock på att förlusterna blir större för högre halter av partiklar samt att en någorlunda konstant faktor existerar. Förlusterna ser ut att vara större för  $PM_{10}$  än för  $PM_{2.5}$ . Detta pekar på att gravitations- och tröghetsbaserade effekter i diffusionstorken hindrar rörelsen av de större partiklarna i större grad. Tröghetskraften kan spela en signifikant roll när inflödet till diffusionstorken delas upp i de fyra kanalerna. En mer djuplodande undersökning kring partikelförluster och framförallt hur luftfuktighet påverkar dem vore av godo.

Vidare pekar resultat från Moment III (se figur 4.10) på att diffusionstorken fungerar bra som ett sätt att motverka de stora mätfelen som uppstår vid RH över 70%. Dessa mätfel kan uppstå till följd av homogen kondensation då de bildade vattenaerosolerna uppfattas som partiklar av de optiska partikelmätarna. Även mindre partiklar som ökar i storlek till följd av nukleär kondensation kan uppfattas som större partiklar. Vid hög luftfuktighet ökar även sannolikheten för adhesion vilket kan påverka partikelstorleken. Den ringa minskningen som observeras för enheterna med diffusionstork vid ökad luftfuktighet kan möjligtvis förklaras utifrån samma tanke. Om nukleär kondensation sker på redan relativt stora partiklar kan gravitations- och tröghetsförluster komma att spela en större roll och orsaka förluster. Denna effekt bör undersökas vidare.

Vidare pekar resultat från Moment IX på att diffusionstorken håller i minst tre dygn. Beroende på typen av mätningar kan detta anses vara både kort eller lång tid. Ytterligare mätningar som undersöker verkan över längre tid är viktiga för att undersöka diffusionstorkens potential, särskilt i förhållande till långtidsmätningar.

CO<sub>2</sub>-sensorerna uppvisar, med två undantag, en någorlunda konstant faktor för förluster som uppstår i diffusionstorken. Detta tyder på att justering är möjlig för dess förluster. Varför två enheter har större förluster är inte helt klart. Skillnaden kan bero på individuella variationer i diffusionstorken, mängden silica och vilken torkkapacitet silican har. Det är även möjligt att kontrollmiljön inte var helt blandad.

### 5.2.1.3 Stigtider

Diffusionstorken påverkar stigtiderna för de olika mätarna i varierande grad. Eftersom stigtiden minskar med diffusionstork för PM<sub>2.5</sub> får denna tid anses vara inom felmarginalen för experimentet. Detta betyder i sin tur att det inte går att fastställa någon stigtidsförändring för partiklar till följd av diffusionstorken från detta experiment. Mer rigorösa experiment med varierande partikelhalter och med fler enheter krävs för att fastställa detta. För CO<sub>2</sub> noteras däremot en signifikant förlängning i stigtid med diffusionstork jämfört med utan. En möjlig förklaring till denna ökning är att diffusionstorken späder koncentrationen för ett stegsvar.

## 5.2.2 Fältmätningar

För inga av mätningarna i parkeringsgaraget, Gårda eller Frihamnens busshållplats överensstämde resultaten med de noterade händelserna, varken för referensmätaren Fidas Frog eller LCAQMP. Partikelmätarna fick utslag, men dessa gick inte att härleda till specifika fordon. Även VOC-mätarna visade utslag men dessa gick inte att korrelera med vare sig specifik trafik eller uppmätta partikelhalter från respektive LCAQMP. Med diffusionstorkens påverkan på CO<sub>2</sub>-mätarens stigtider som ovan diskuterats är det inte förvånande att CO<sub>2</sub>-nivåerna är närmast konstanta för alla mätningar.

Nuvarande resultat tyder på att det är invecklat, både för Fidas Frog samt LCAQMP, att utföra mätningar som i fält kan koppla specifika fordon till specifika uppmätta luftföroreningar. Dessa resultat går dock inte att ses som slutgiltiga. Dels behöver ytterligare undersökningar av LCAQMP beteende göras, särskilt i förhållande till stegsvar och fördröjningar. Dessutom behöver effekter från väder och vind undersökas mer.

## 5.3 Felkällor

Det finns faktorer i projektet som kan ha bidragit till felaktiga och missvisande resultat. I detta avsnitt diskuteras dessa i syfte att nyansera resultatet.

Alla experiment som utförts har varit beroende av det luftflöde som genereras av SDS011. Hur variationer av detta flöde påverkar resultat har inte undersökts.

Fidas Frog användes som referens och ett antagande om att den uppmätte sanna värden gjordes. I vilken grad mätvärdena från Fidas Frog skiljer sig från verkliga värden har inte undersökts.

Rörande partikelmätningar, utfördes experiment i laboratorie för endast en typ av aerosol (utöver vatten), nämligen ammoniumsulfat. Denna aerosol har egenskaper som inte behöver vara detsamma för partiklar av andra slag. Om resultatet hade blivit annorlunda med andra partiklar är inte undersökt.

Vidare kan det förekomma en viss skillnad i stegsvar mellan Fidas Frog och LCAQMP, vilket i sin tur inte ger helt korrekta resultat vid korrelationsberäkningar.

Dessutom kan misstag på grund av den mänskliga faktorn och bristande erfarenhet och kunskap begåtts.

### 5.4 Samhälleliga och etiska aspekter

Resultaten från projektet visar på att lågkostnadssensorer framgångsrikt kan monteras och implementeras ihop. Den höga korrelationen med den mer kostsamma referensmätaren samt lösningen med att torra mätluftens ökar mätkvaliteten vid högre luftfuktighet visar på potential hos lågkostnadssensorer. Med en strävan att i framtiden kunna mäta luftkvalitet på ett billigare och mer tillgängligt sätt är detta ett lovande resultat. Det skulle kunna leda till en bredare kartläggning av hur luftföroreningar i samhället ser ut samt öka medvetenheten kring detta i samhället.

Genom att mäta flera olika luftföroreningar med samma enhet på ett kvalitativt sätt sågs en möjlighet att vidare korrelera och kartlägga utsläpp från just förbränningsmotorer. Den låga mätkvaliteten vid transienta förändringar gör att det i nuläget är svårt att spåra dessa specifika utsläpp. Vidare arbete med LCAQMP skulle kunna lösa detta problem och i framtiden kan lågkostnadssensorer användas för att spåra utsläpp från förbränningsmotorer och deras effekter på miljön.

Det finns en problematik i eventuella felaktiga resultat som LCAQMP ger. Skulle alarmerande slutsatser dras ifrån resultaten kan det bidra till en ökad oro bland befolkningen. Skulle resultaten visa sig vara felaktiga innebär det en obefogad eller felaktig oro hos befolkningen. Därför är detta en viktig aspekt när slutsatser dras.

# 6

## Slutsats

Projektets syfte var att konstruera en sensorplattform med flera lågkostnadssensorer samt att utvärdera den. Tio fungerande enheter konstruerades och sammantaget kan det konstateras att de uppfyller kraven som sattes. Det finns dock flera förbättringsmöjligheter för LCAQMP. En är att mätdata kan skickas och sammanställas trådlöst snarare än sparas på ett SD-kort. Det vore även bra om det går att se hur mätdata ser ut i realtid under mätningens gång, exempelvis via en skärm.

Vidare var projektets syfte att utvärdera en diffusionstork vars ändamål var att minska mätfelen som uppstår vid hög luftfuktighet vid partikelmätningar. Resultaten visar att diffusionstorken fungerar väl för sitt ändamål. De förluster som sker till följd av användning av diffusionstorken, både för partiklar och  $\text{CO}_2$ , ser även ut att följa en konstant faktor vilket pekar på de är möjliga att kompensera för.

Utvärderingen av LCAQMP för partikelmätningar pekar på att LCAQMP överlag presterar väl i laboratoriemiljö, vilket speglas av hög korrelation med referensmätare. Gentemot referens har LCAQMP absoluta mätfel men resultaten tyder på att dessa bör gå att justera för. Mätningar som undersöker stigtid och stegsvar visar på en långsam reaktionsförmåga. Detta speglas även i de försök till fältmätningar som gjorts där det var svårt att fastslå de uppmätta luftföroreningarnas specifika källor.

Det är svårt att dra definitiva slutsatser om LCAQMPs förmåga för att mäta luftföroreningar. Fortsatt utvärdering och undersökning krävs för att bättre förstå dess beteende vid olika mätningar, särskilt för de i fältmiljö. Av särskild vikt är att undersöka närmare hur luftflödet samt fördröjningarna för de olika sensorerna ser ut. Implementering av  $\text{NO}_2$ -mätaren skulle innebära att LCAQMP kan mäta ytterligare en viktig luftförorening. Förhoppningen är att fortsatt arbete med LCAQMP kan leda till att den har ett användningsområde i arbetet med kartläggning av luftföroreningar och dess olika utsläppskällor.

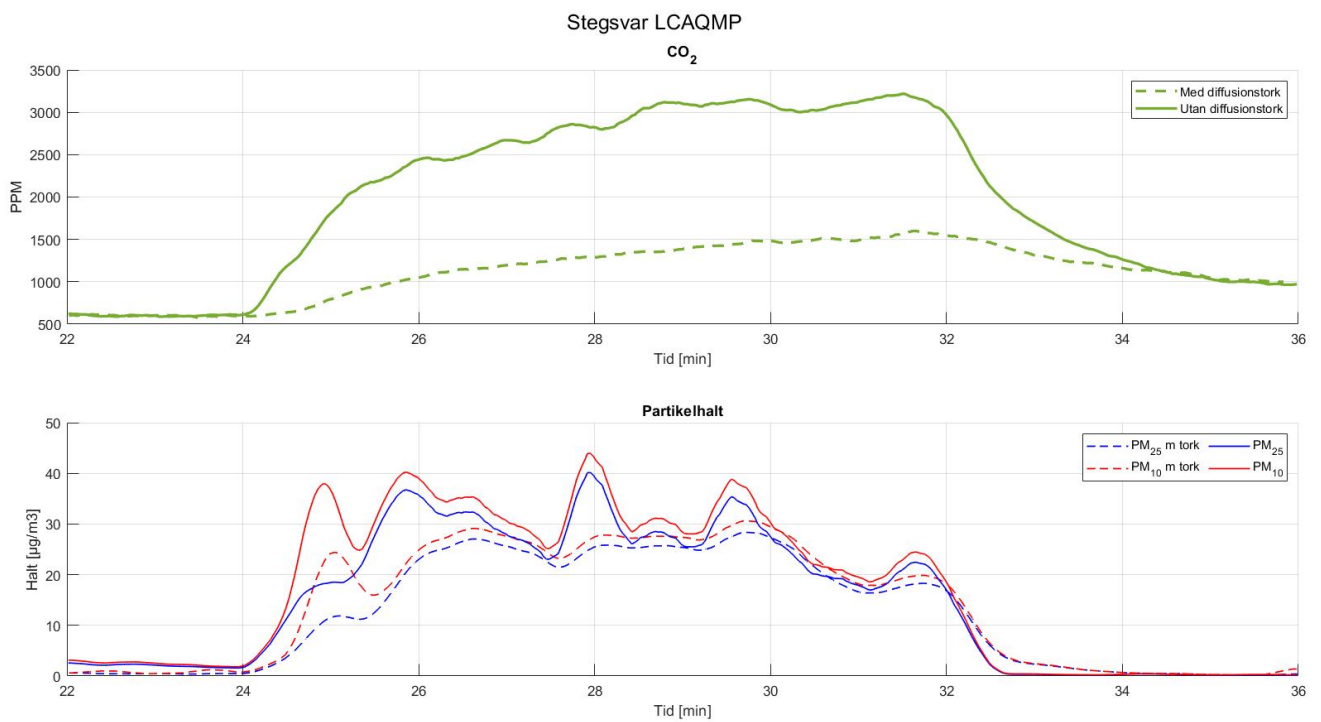
# Litteratur

- [1] World Health Organization, *Mortality and burden of disease from ambient air pollution*, 2018. URL: [https://www.who.int/gho/phe/outdoor\\_air\\_pollution/burden/en/](https://www.who.int/gho/phe/outdoor_air_pollution/burden/en/) (hämtad 2020-02-07).
- [2] Folkhälsomyndigheten, Karolinska Institutet, *Miljöhälsorapport 2017*, Government Document, 2017. URL: <https://www.folkhalsomyndigheten.se/contentassets/c44fcc5df7454b64bf2565454bbdf0e3/miljohalsorapport-2017-02096-2016-webb.pdf>.
- [3] Malin Gustafsson, Jenny Lindén, Lin Tang, Bertil Forsberg, Hans Orru, Stefan Åström, Karin Sjöberg, *Quantification of population exposure to NO<sub>2</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> and estimated health impacts*, Government Document, 2018. URL: <http://naturvardsverket.diva-portal.org/smash/get/diva2:1242584/FULLTEXT01.pdf>.
- [4] Miljöförvaltningen Göteborgs Stad, *Luften i Göteborg*, Government Document, 2019. URL: [https://goteborg.se/wps/wcm/connect/2485bad2-4214-46b7-96b3-84d5b0eeb186/N800\\_R\\_2019\\_15.pdf?MOD=AJPERES](https://goteborg.se/wps/wcm/connect/2485bad2-4214-46b7-96b3-84d5b0eeb186/N800_R_2019_15.pdf?MOD=AJPERES).
- [5] Åke Axelund, Magnus Carlsson, Simon Duchén, Henrik Hagfeldt, Lina Lagerquist, and Zdjelar, Sofija, “Användning av kollektivtrafik för luftkvalitetsmätning - Ambulerande Sensorer för Luftkvalitet”, Thesis, 2019.
- [6] Luftdata, *Luftdata.se*, 2020. URL: <https://luftdata.se/bygg> (hämtad 2020-02-05).
- [7] M. Budde m. fl., “Potential and limitations of the low-cost SDS011 particle sensor for monitoring urban air quality”, *ProScience*, årg. 5, s. 6–12, 2018.
- [8] H. Y. Liu, P. Schneider och M. Haugen R. och Vogt, “Performance assessment of a low-cost PM 2.5 sensor for a near four-month period in Oslo, Norway”, *Atmosphere*, årg. 10, nr 2, 2019, ISSN: 20734433 (ISSN). DOI: 10.3390/atmos10020041. URL: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85060648978&doi=10.3390%2fatmos10020041&partnerID=40&md5=5e39588aba18af61fdc42fd54099043a>.
- [9] N. Castell m. fl., “Can commercial low-cost sensor platforms contribute to air quality monitoring and exposure estimates?”, *Environment International*, årg. 99, s. 293–302, 2017, ISSN: 0160-4120. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.007>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0160412016309989>.

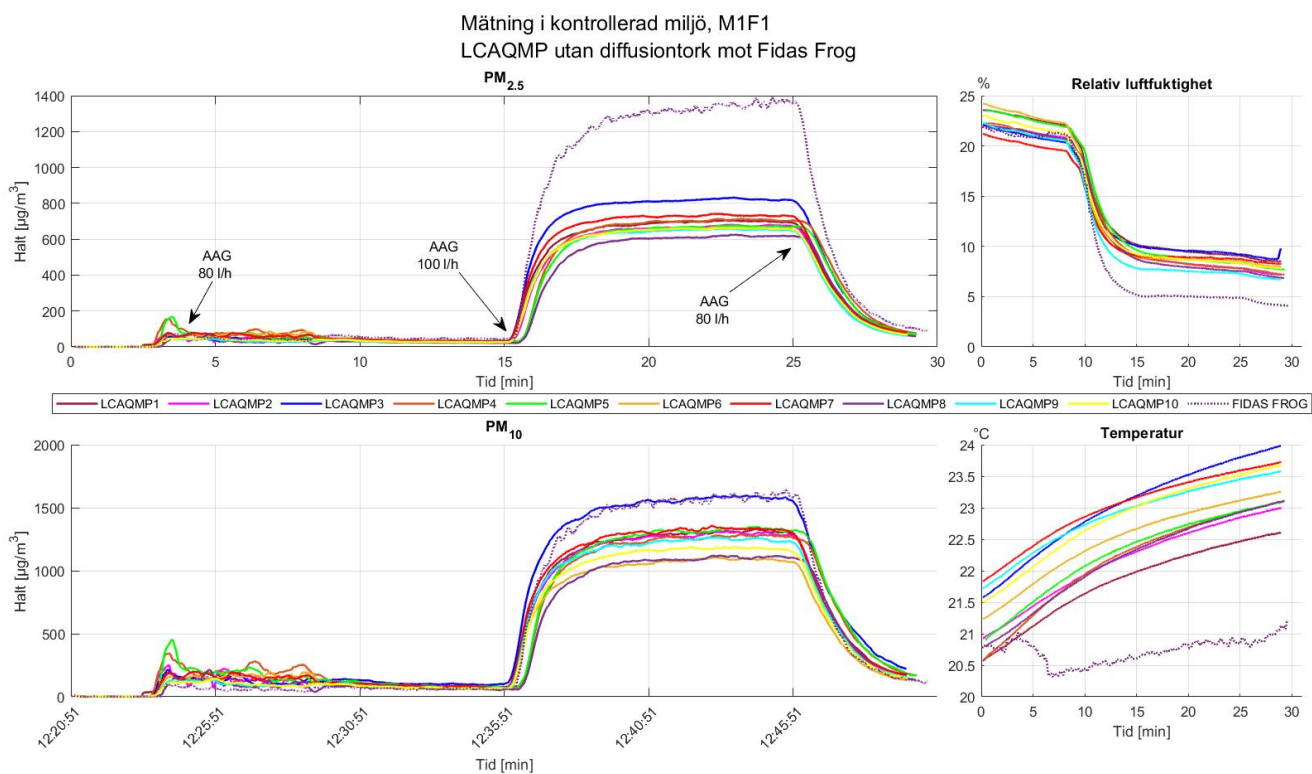
- 
- [10] "Flyktiga Organiska Ämnen", i *Nationalencyklopedin*. [online]. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/flyktiga-organiska-%C3%A4mnen> (hämtad 2020-05-10).
- [11] "Luftföroreningar", i *Nationalencyklopedin*. [online]. URL: <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/luftf%C3%B6rorening> (hämtad 2020-05-10).
- [12] Å. M. Hallquist, M. Jerksjö, H. Fallgren, J. Westerlund och Å. Sjödin, "Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses", *Atmospheric Chemistry and Physics*, årg. 13, nr 10, s. 5337–5350, 2013. DOI: 10.5194/acp-13-5337-2013. URL: <https://www.atmos-chem-phys.net/13/5337/2013/>.
- [13] A. Persson, Flyktiga organiska ämnen (VOC) | Karolinska Institutet", 2014. URL: [https://ki.se/imm/flyktiga-organiska-amnen-voc?fbclid=IwAR3V\\_R0b2pEU27RuNifPhIG7oPfzS30VvURiyVzcs7qWtjFmXhcpWQamJnI](https://ki.se/imm/flyktiga-organiska-amnen-voc?fbclid=IwAR3V_R0b2pEU27RuNifPhIG7oPfzS30VvURiyVzcs7qWtjFmXhcpWQamJnI) (hämtad 2020-05-14).
- [14] W. C. Hinds, *Aerosol Technology: Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particles*, 2. utg. New York, USA: Wiley, 1999.
- [15] European Environment Agency, "Air quality in Europe - 2019 Report", 2019, ISSN: 1977-8449. DOI: 10.2800/822355.
- [16] J. Sikorová m. fl., "Internal Combustion Engines as the Main Source of Ultra-fine Particles in Residential Neighborhoods: Field Measurements in the Czech Republic", *Atmosphere*, årg. 6, s. 1714–1735, nov. 2015. DOI: 10.3390/atmos6111714.
- [17] "Adsorption", i *Nationalencyklopedin*. [online]. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/adsorption> (hämtad 2020-05-10).
- [18] "Diffusion", i *Nationalencyklopedin*. [online]. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/diffusion> (hämtad 2020-05-10).
- [19] "Kiselgel", i *Nationalencyklopedin*. [online]. URL: <https://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/l%C3%A5ng/kiselgel> (hämtad 2020-05-10).
- [20] VWR-Chemicals, "Kiselgel, granulat Chameleon<sup>®</sup> C 2 - 6 mm torkmedel", 2020. URL: <https://se.vwr.com/store/product/2995524/kiselgel-granulat-chameleon-c-2-6-mm-torkmedel> (hämtad 2020-05-12).
- [21] Topas GmbH, *Diffusion Dryer - DDU 570*, 2020. URL: <https://www.topas-gmbh.de/en/produkte/ddu-570/> (hämtad 2020-05-12).
- [22] S. Frouhan, O. Hamidi, G. Lindström, S. Robertsson, P. Strive och C. Thuve, *LCAQMP*. URL: <https://github.com/guslinds/LCAQMP> (hämtad 2020-05-14).

# A

## Grafer

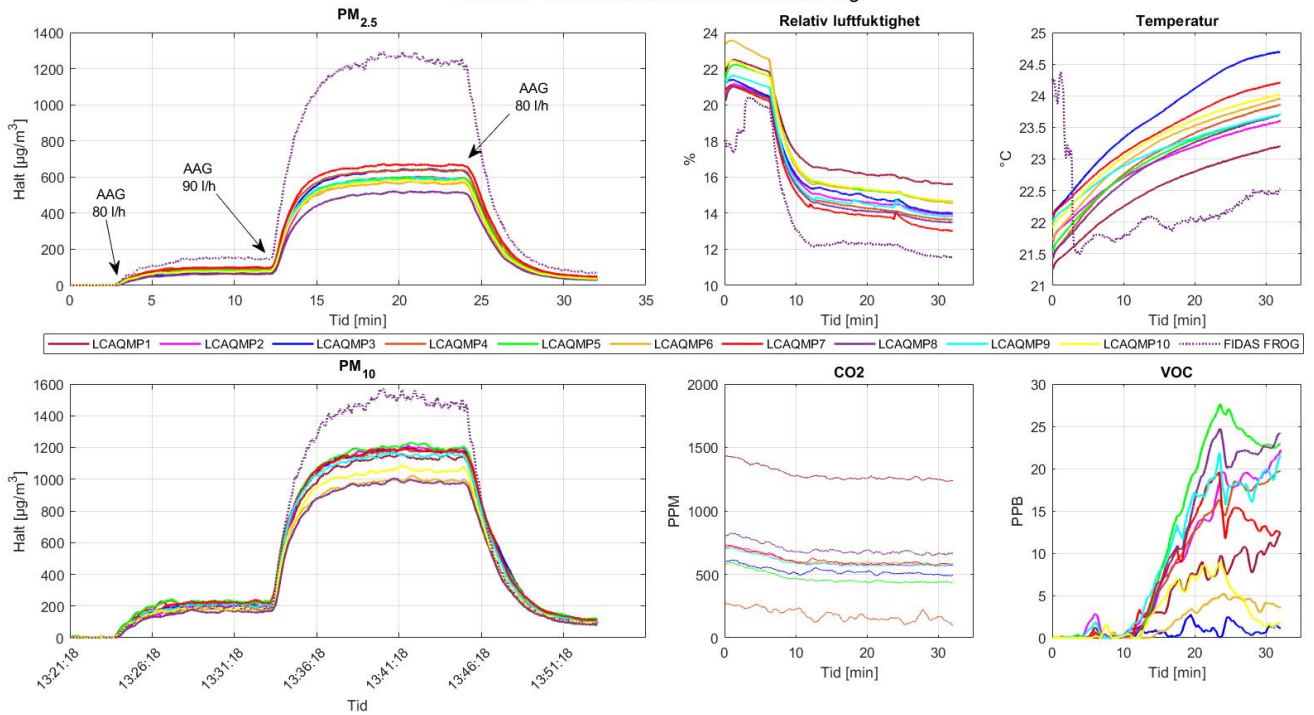


**Figur A.1:** Kompletterande mätdata från moment VII där stegsvar för CO<sub>2</sub> och partikelhalter analyseras. Övre grafen visar uppmätta halten CO<sub>2</sub> i PPM medan den nedre visar korresponderande partikelhalter under samma tidsperiod. Streckade linjer i grafen markerar LCAQMP utrustade med diffusionstork.

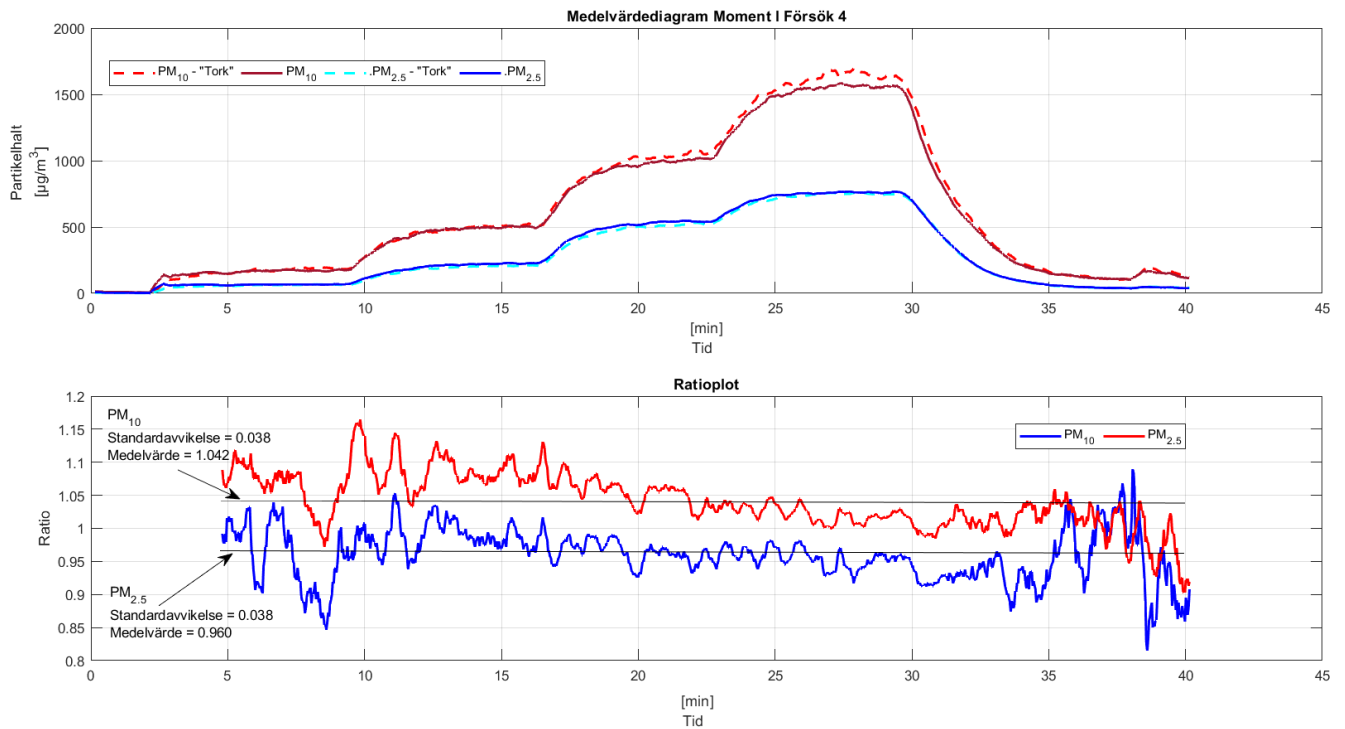


**Figur A.2:** Mätdata från moment I, försök 1. LCAQMP utan diffusionstork jämförs mot referens Fidas Frog under varierande halter av luftburna partiklar genererade från AAG.

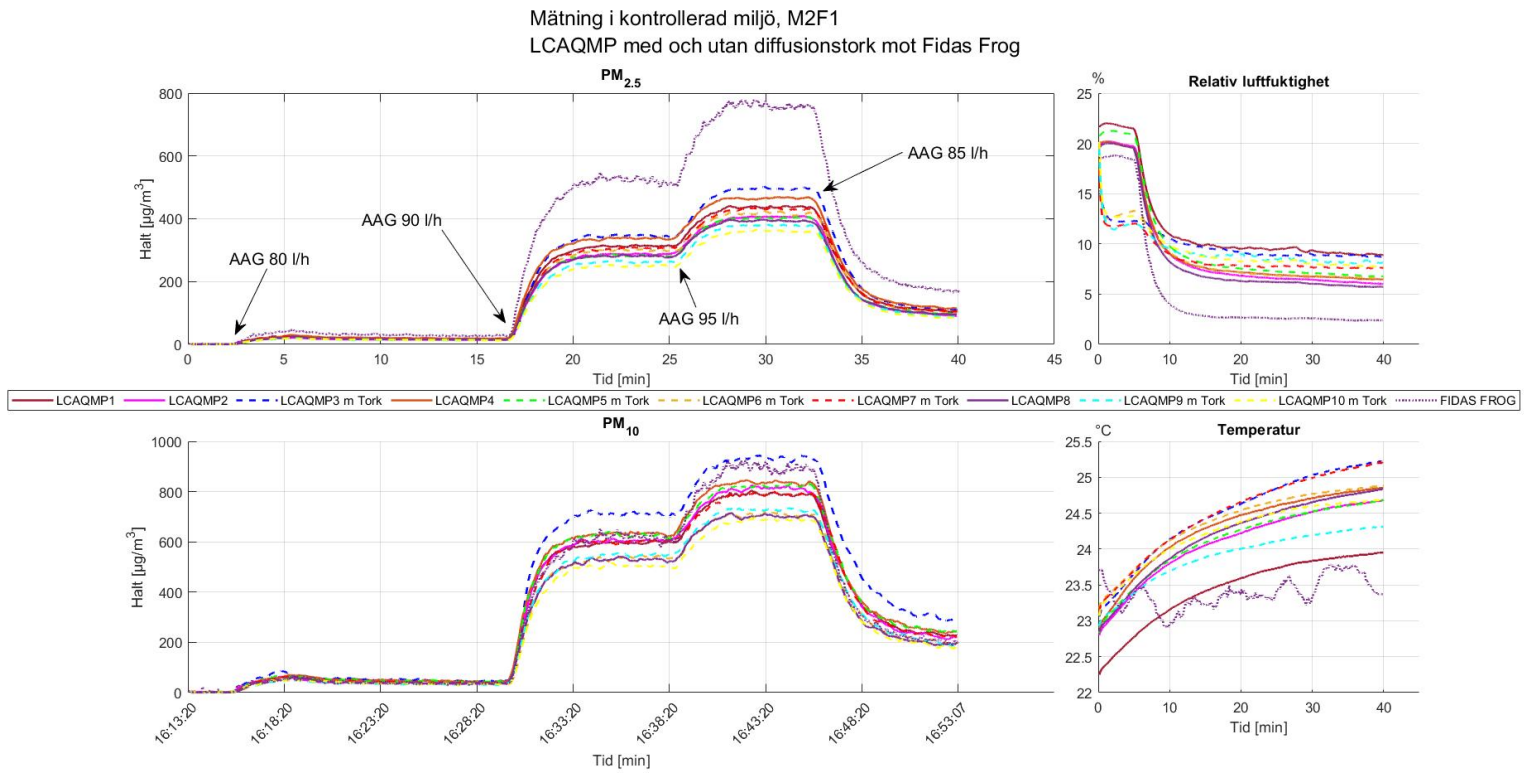
Mätning i kontrollerad miljö, M1F2  
LCAQMP utan diffusionstork mot Fidas Frog



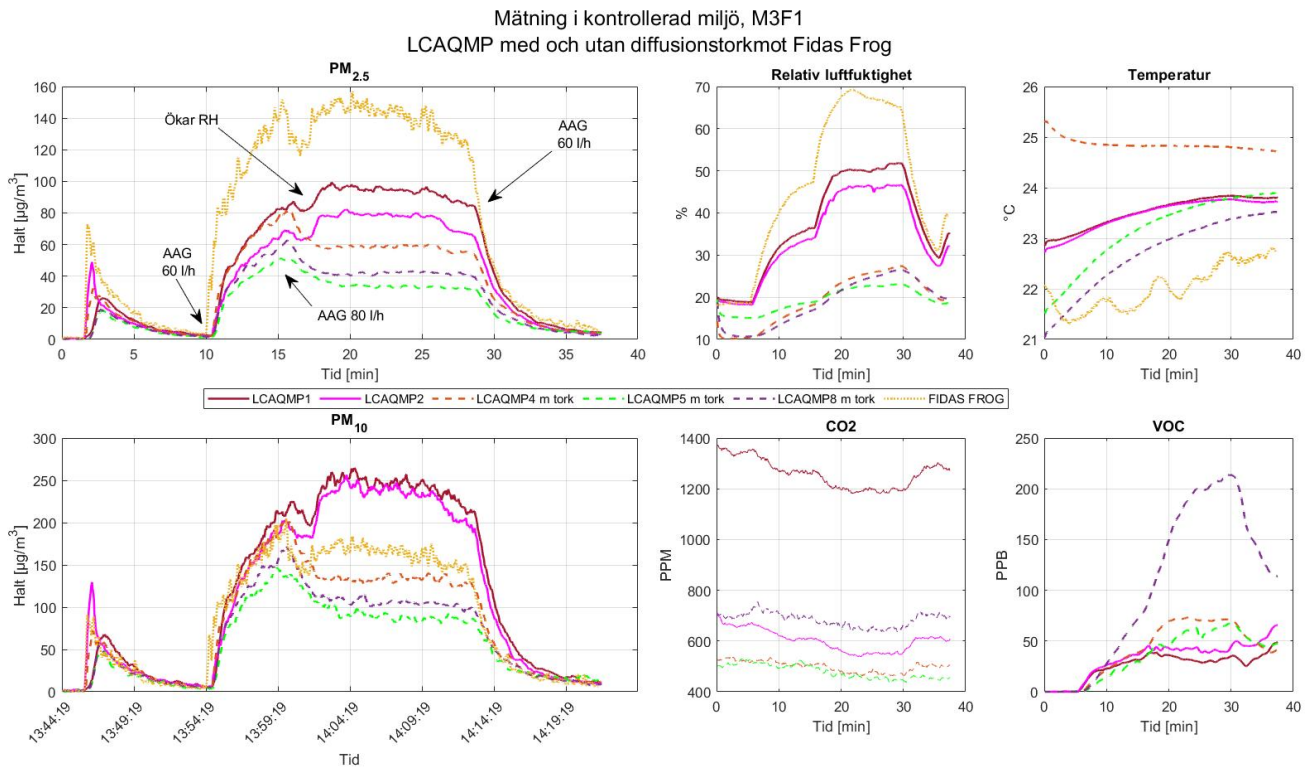
**Figur A.3:** Mätdata från moment I, försök 2. LCAQMP utan diffusionstork jämförs mot referens Fidas Frog under varierande halter av luftburna partiklar genererade från AAG.



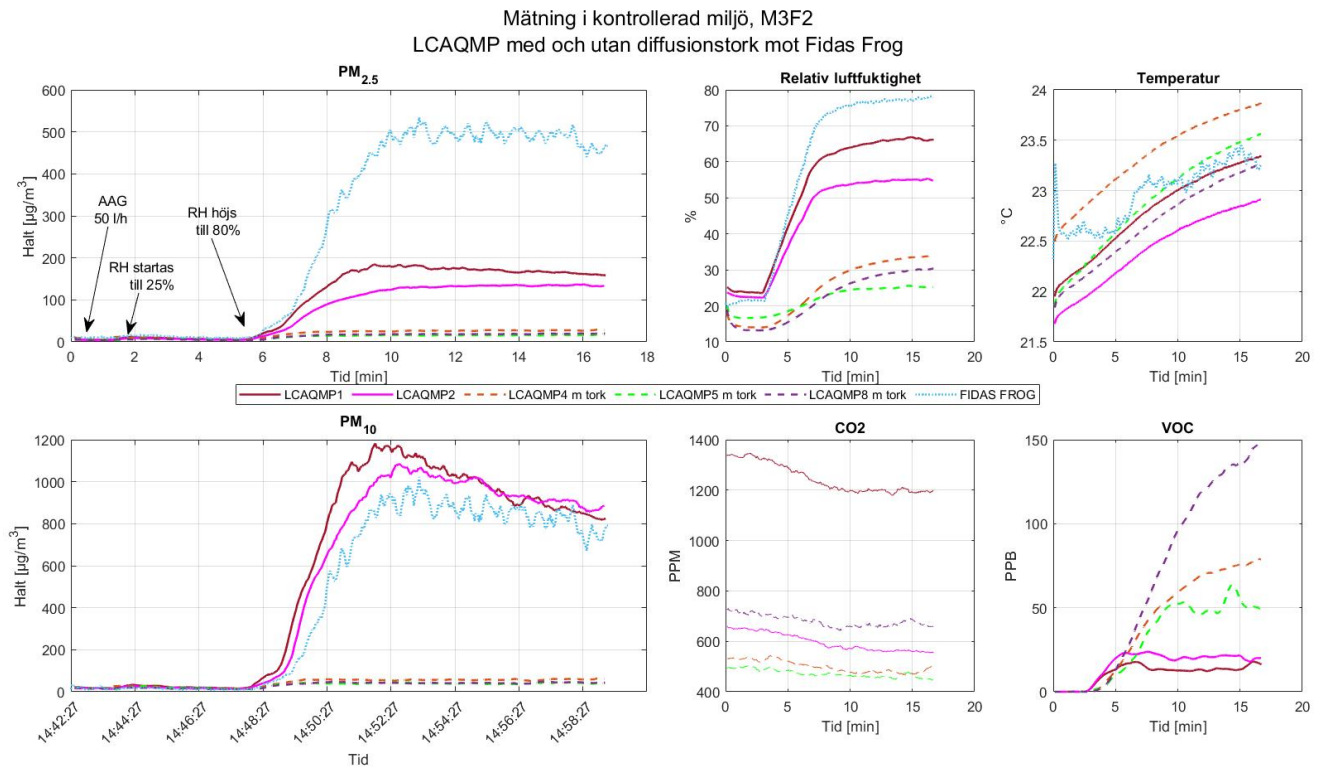
**Figur A.4:** Mätdata från moment I, försök 4. Experimentet utfördes med samtliga LCAQMP utan diffusionstork. Grafen visar grupperat medelvärde för de enheter som var utrustade med diffusionstork från tidigare mätning (M1F2), mot dem utan för att jämföra mätavvikelser.



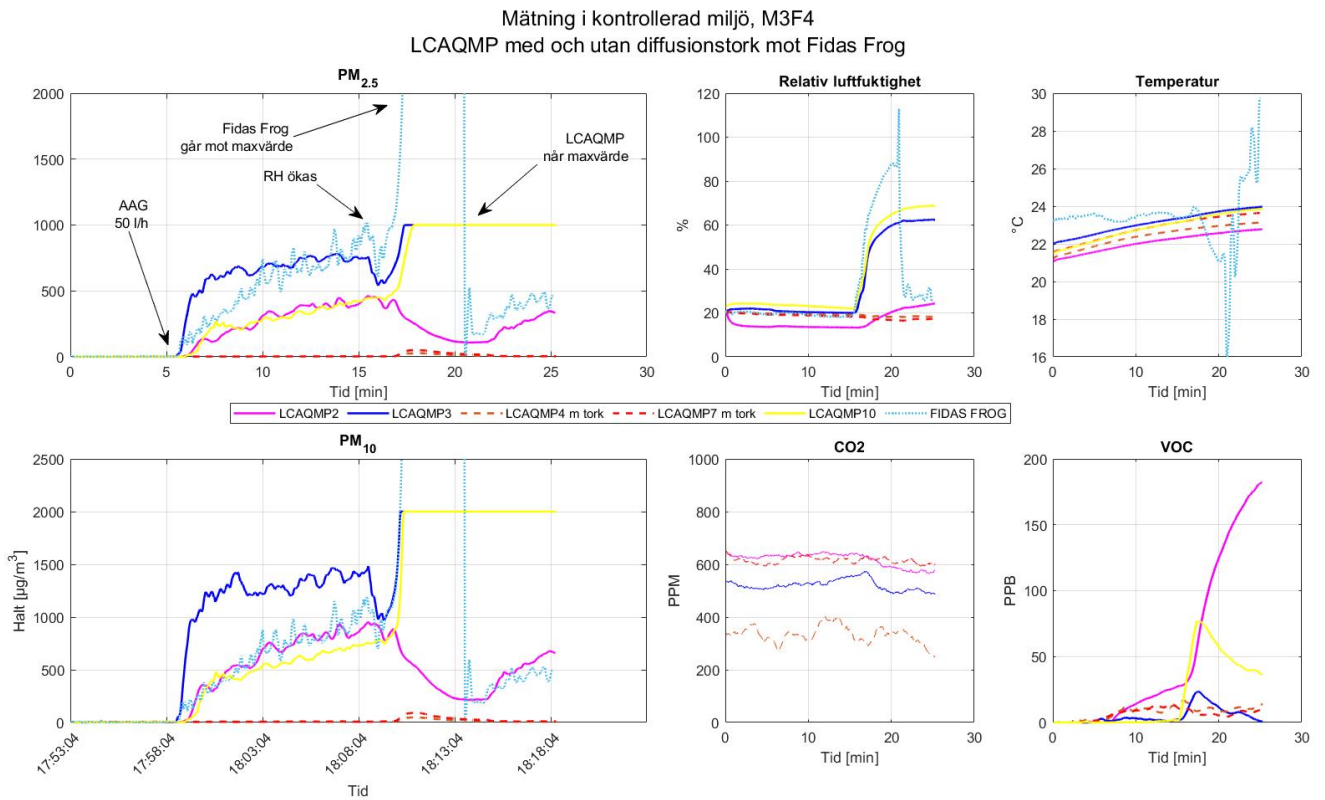
**Figur A.5:** Mätdata från moment II försök 1. Luftfuktigheten hölls konstant under experimentet medan de genererade partikelhalterna från AAG varierar. LCAQMP utrustade med diffusionstork är markerade med streckade linjer i grafen.



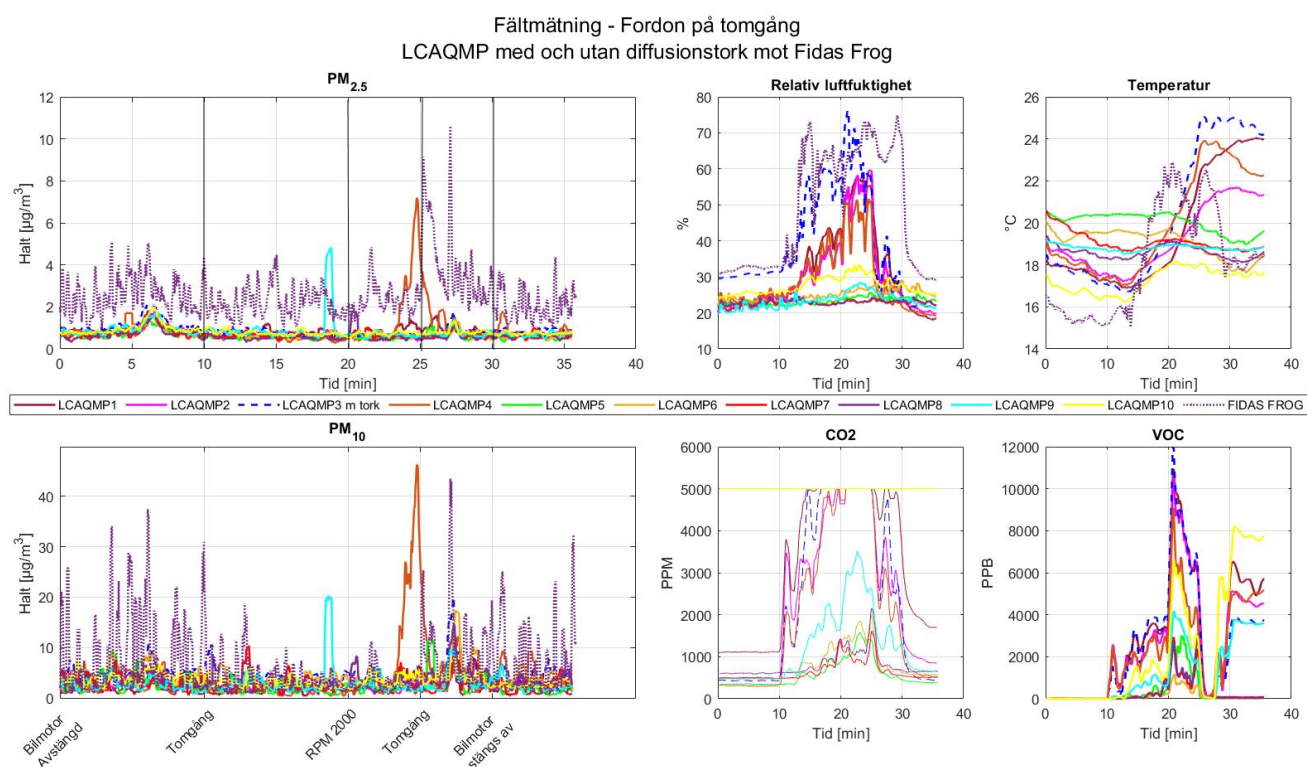
**Figur A.6:** Mätdata från moment III försök 1. LCAQMP jämförs mot referens Fidas Frog under varierande parametrar av genererade partikelhalter samt luftfuktigheter. LCAQMP utrustade med diffusionstork är markerade med streckade linjer i grafen.



**Figur A.7:** Mätdata från moment III försök 2. Luftfuktigheten behålls konstant under experimentet medan partikelhalten höjs kraftigt. Notera hur partikelhalterna för LCAQMP utrustade med diffusionstork (streckade linjer) ej påverkas av den förhöjda luftfuktigheten.



**Figur A.8:** Mätdata från moment III försök 4. Partikelgenerering hålls konstant under experimentet medan luftfuktigheten regleras. Notera hur referensen Fidas Frog samt LCAQMP utan diffusionstork går mot maxvärden då luftfuktigheten överstiger 70%.

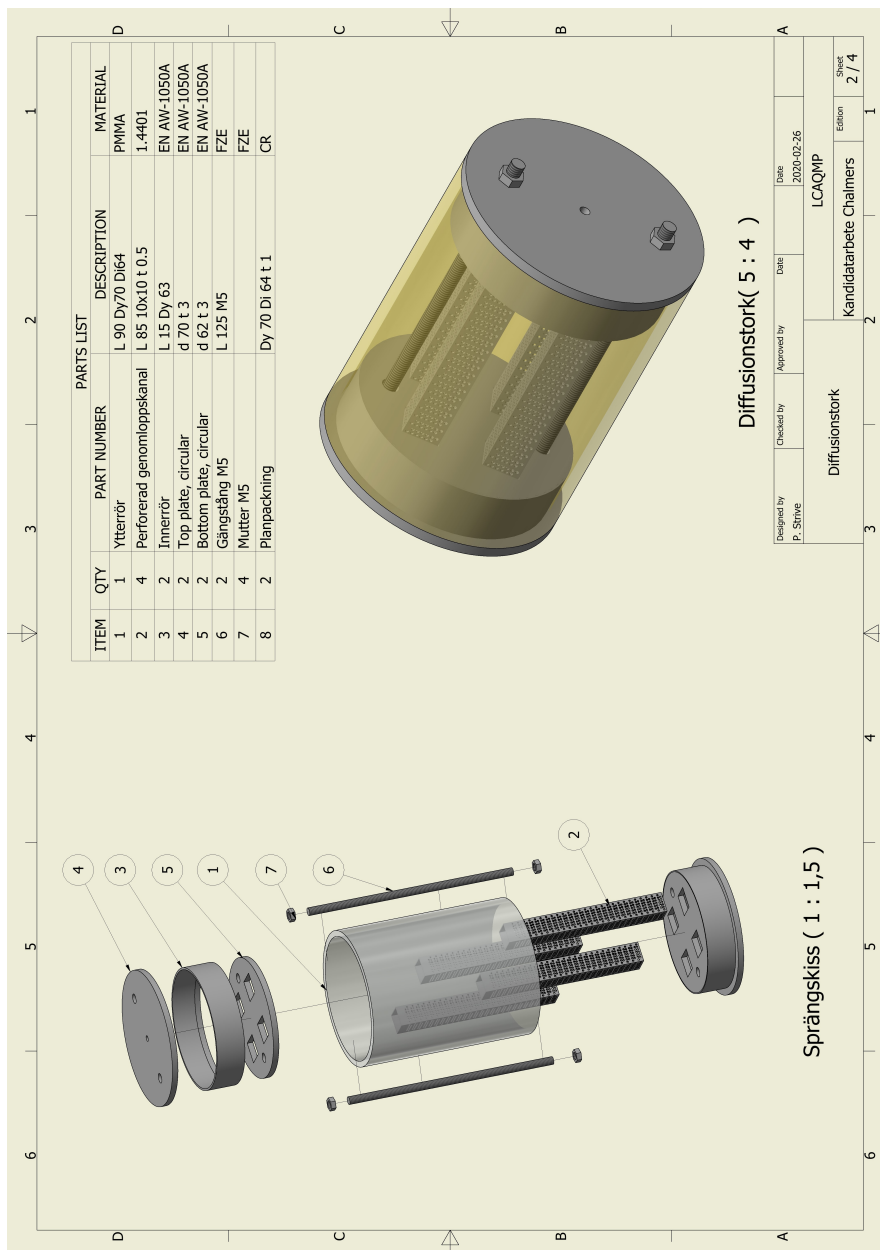


**Figur A.9:** Mätdata från när volvo kördes i tomgång utomhus

Se G.2 för uppsättning av utrustning.

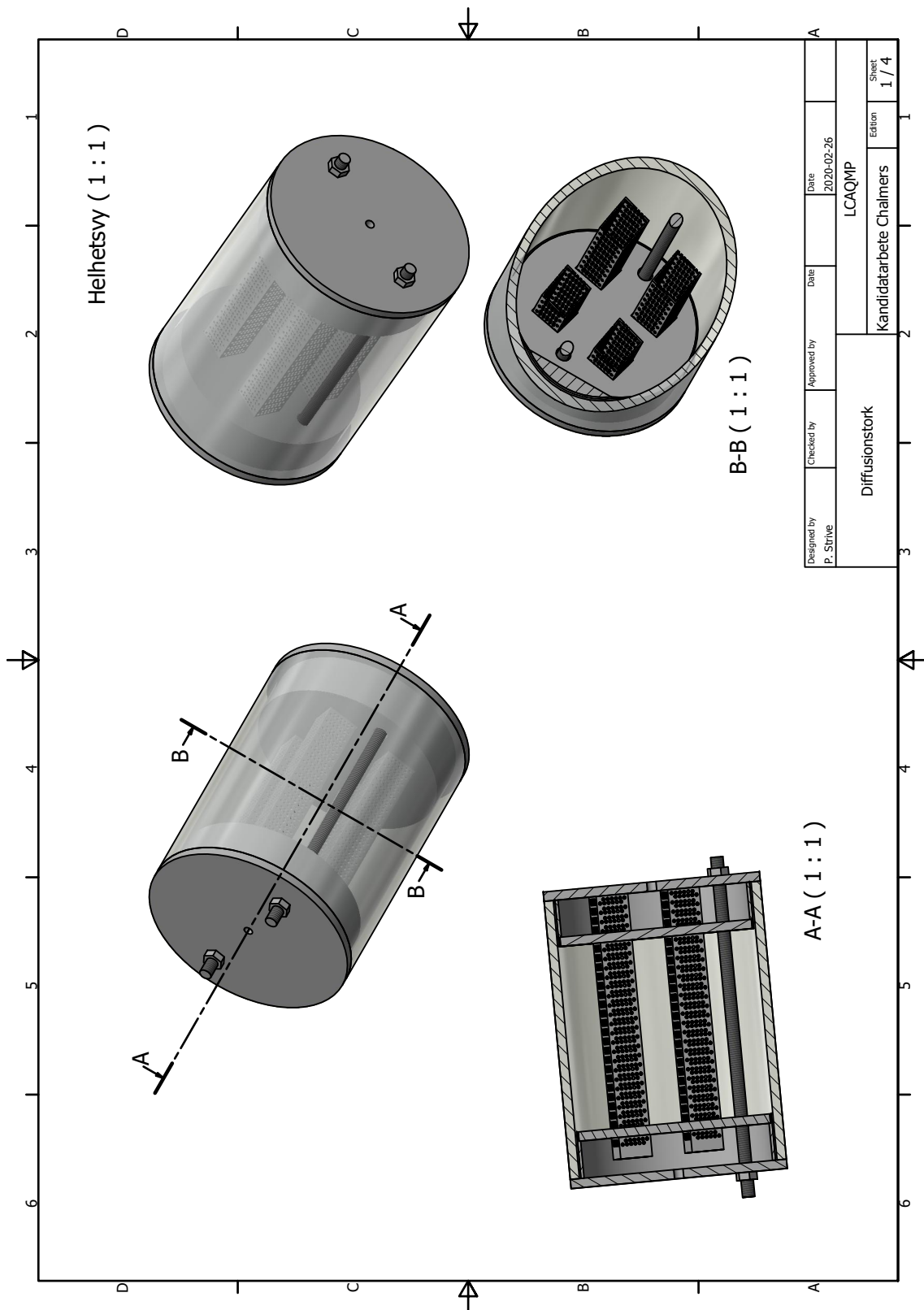
# B

## Diffusionstorksritningar

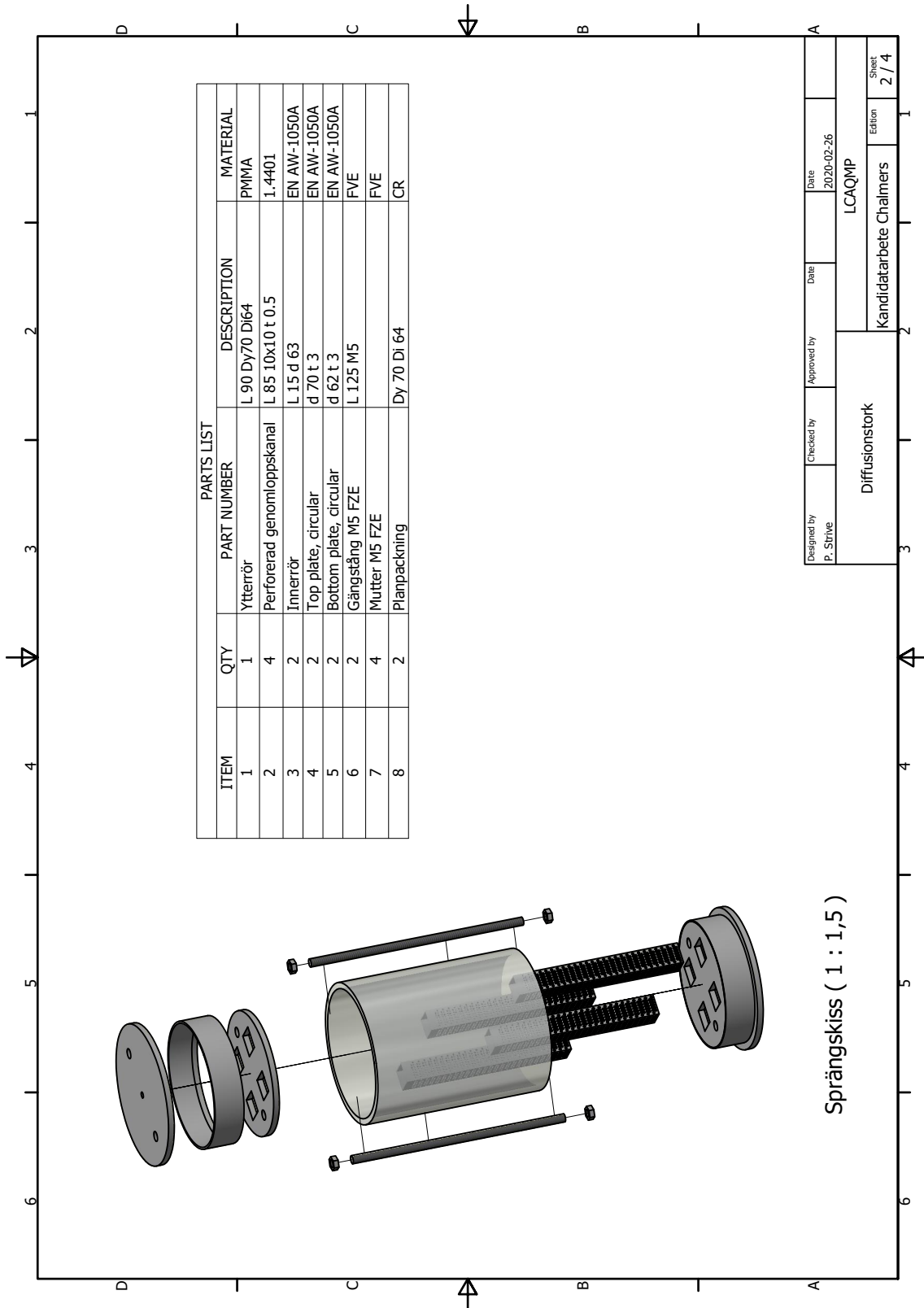


Figur B.1: CAD-ritning av diffusionstork

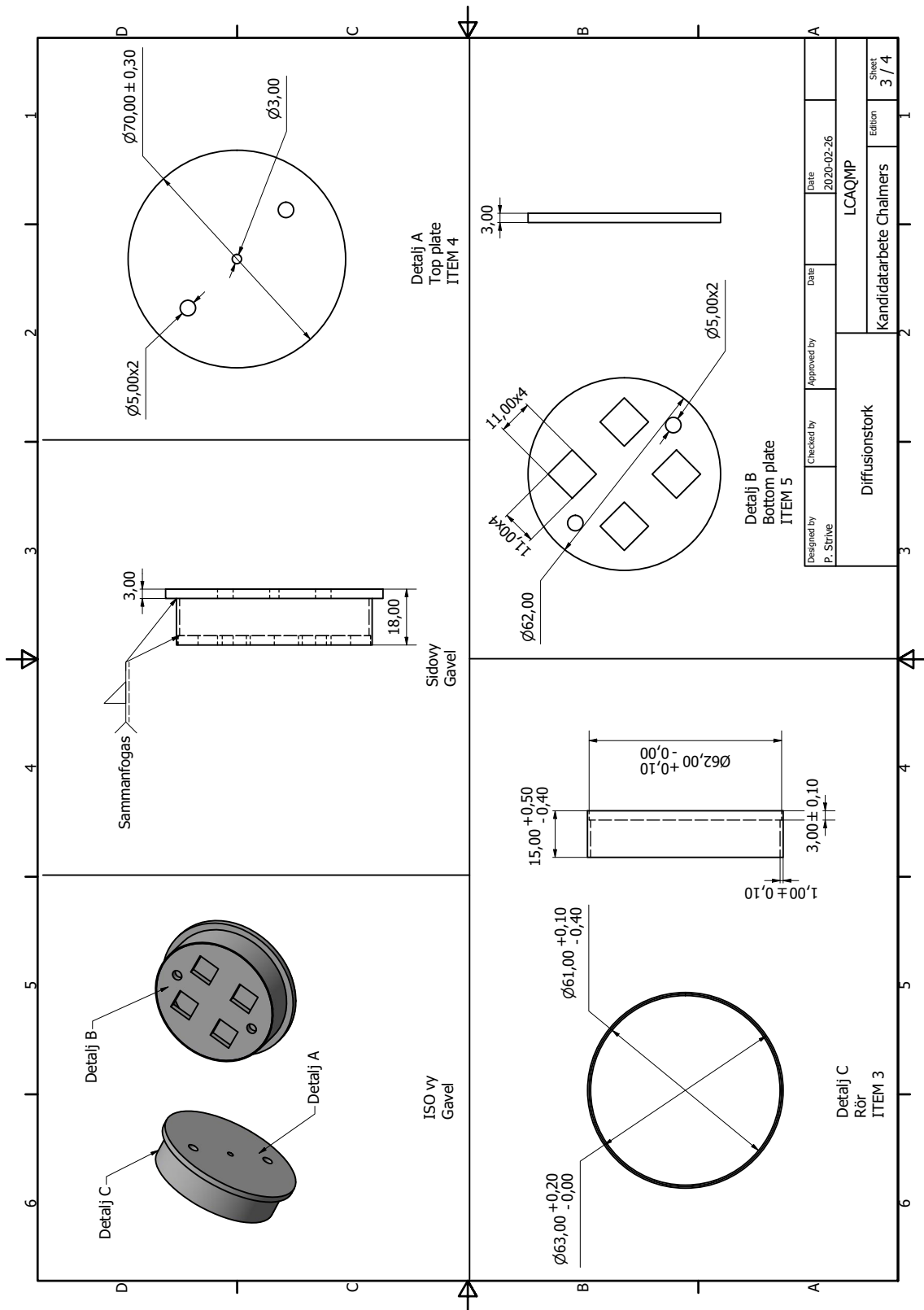
B. Diffusionstorksritningar



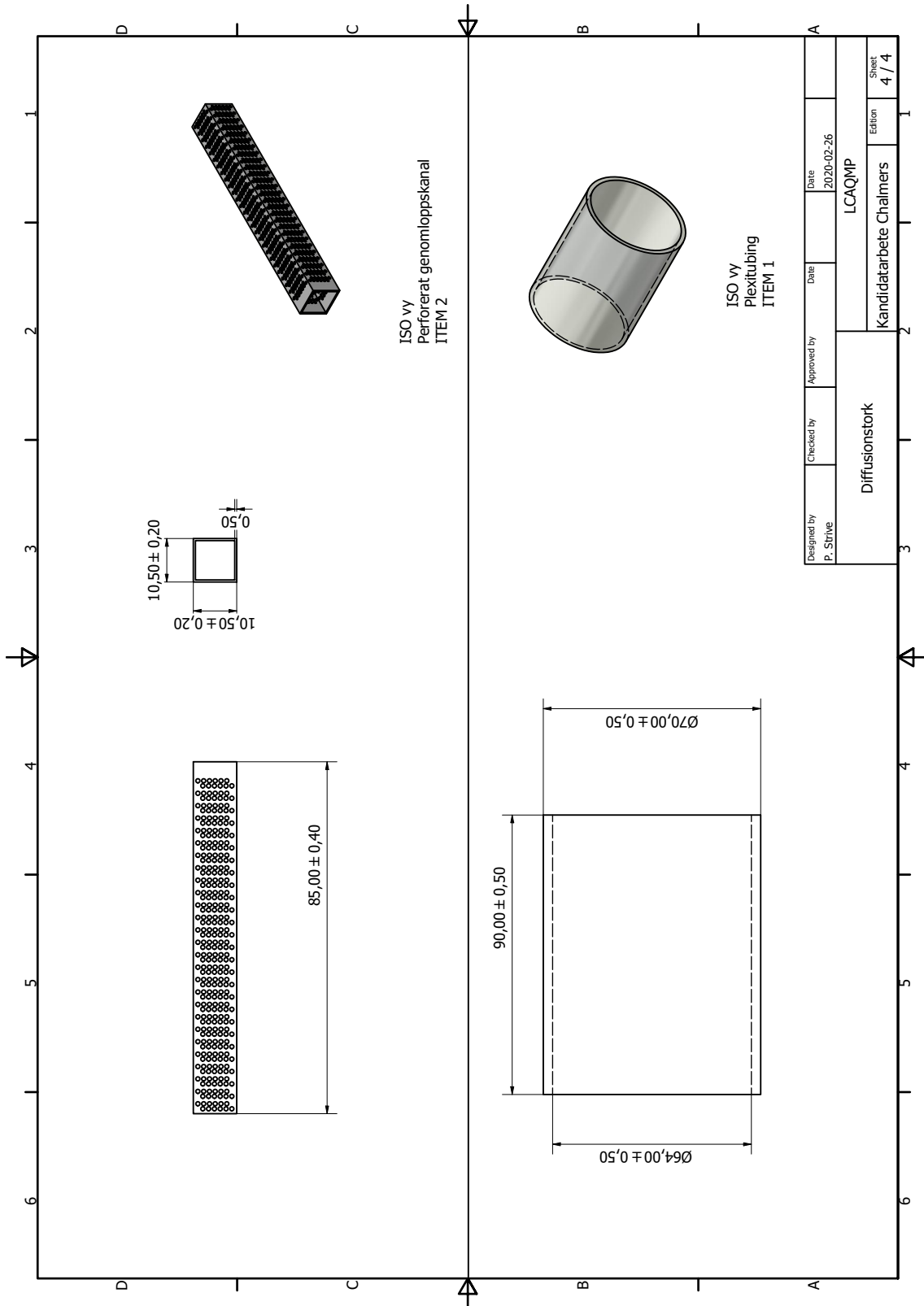
## B. Diffusionstorksritningar



## B. Diffusionstorksritningar

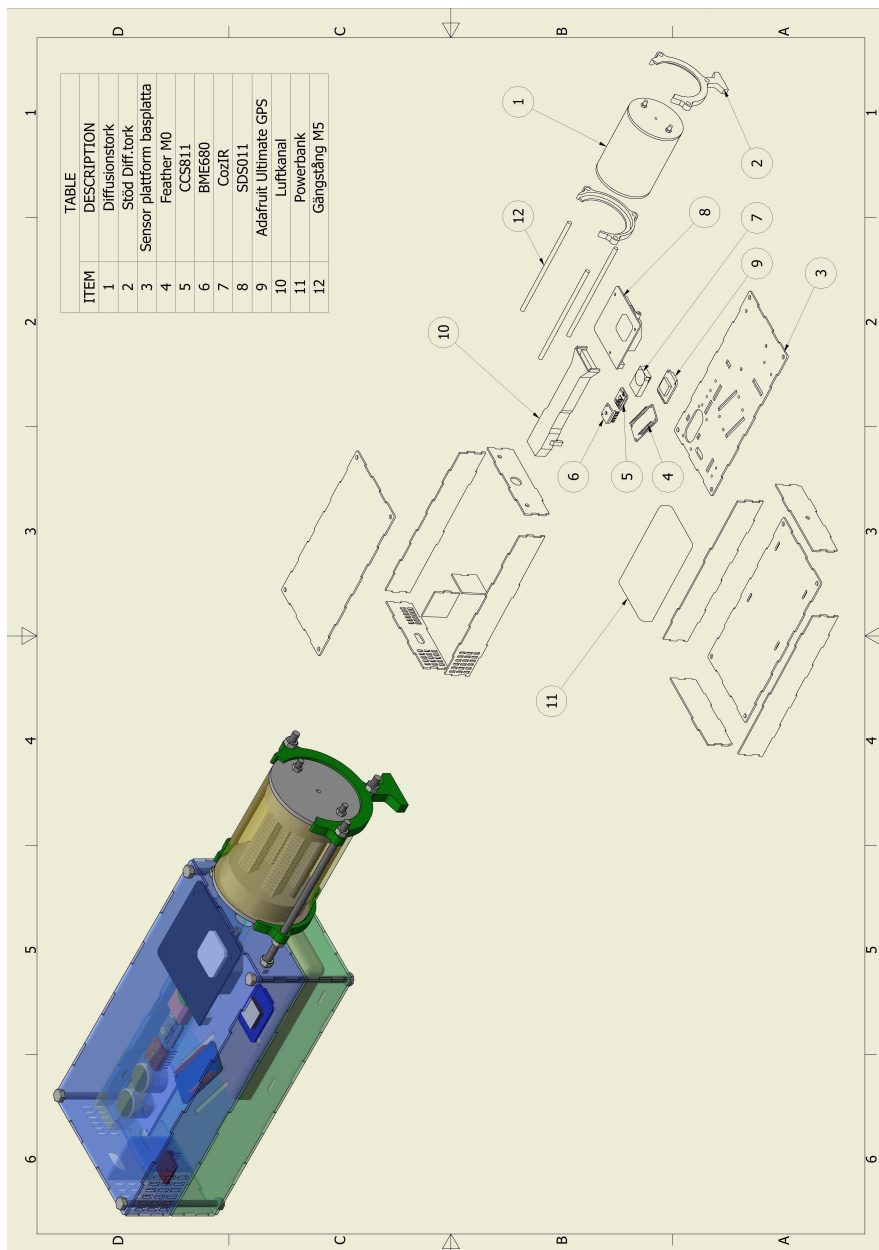


## B. Diffusionstorksritningar



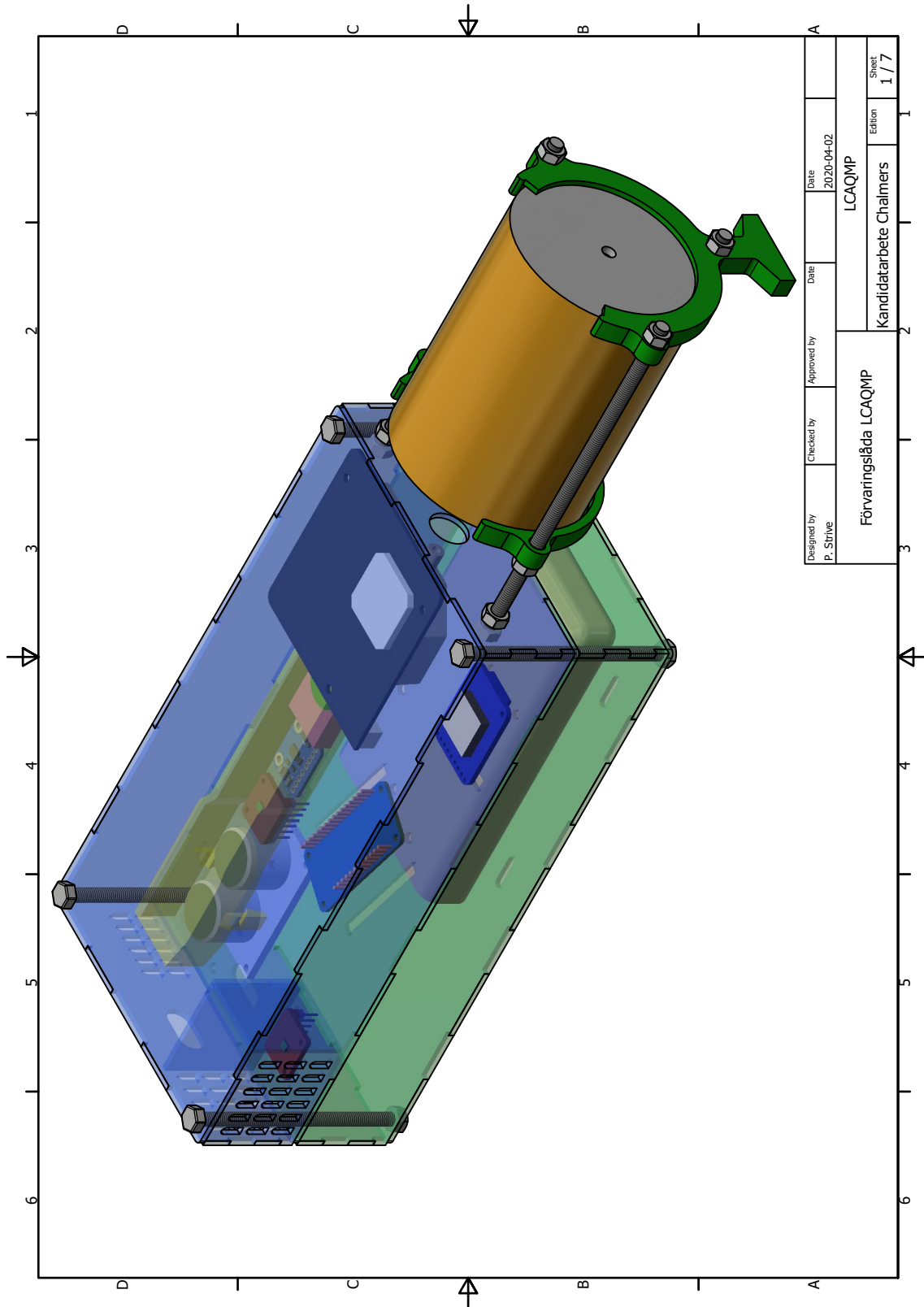
# C

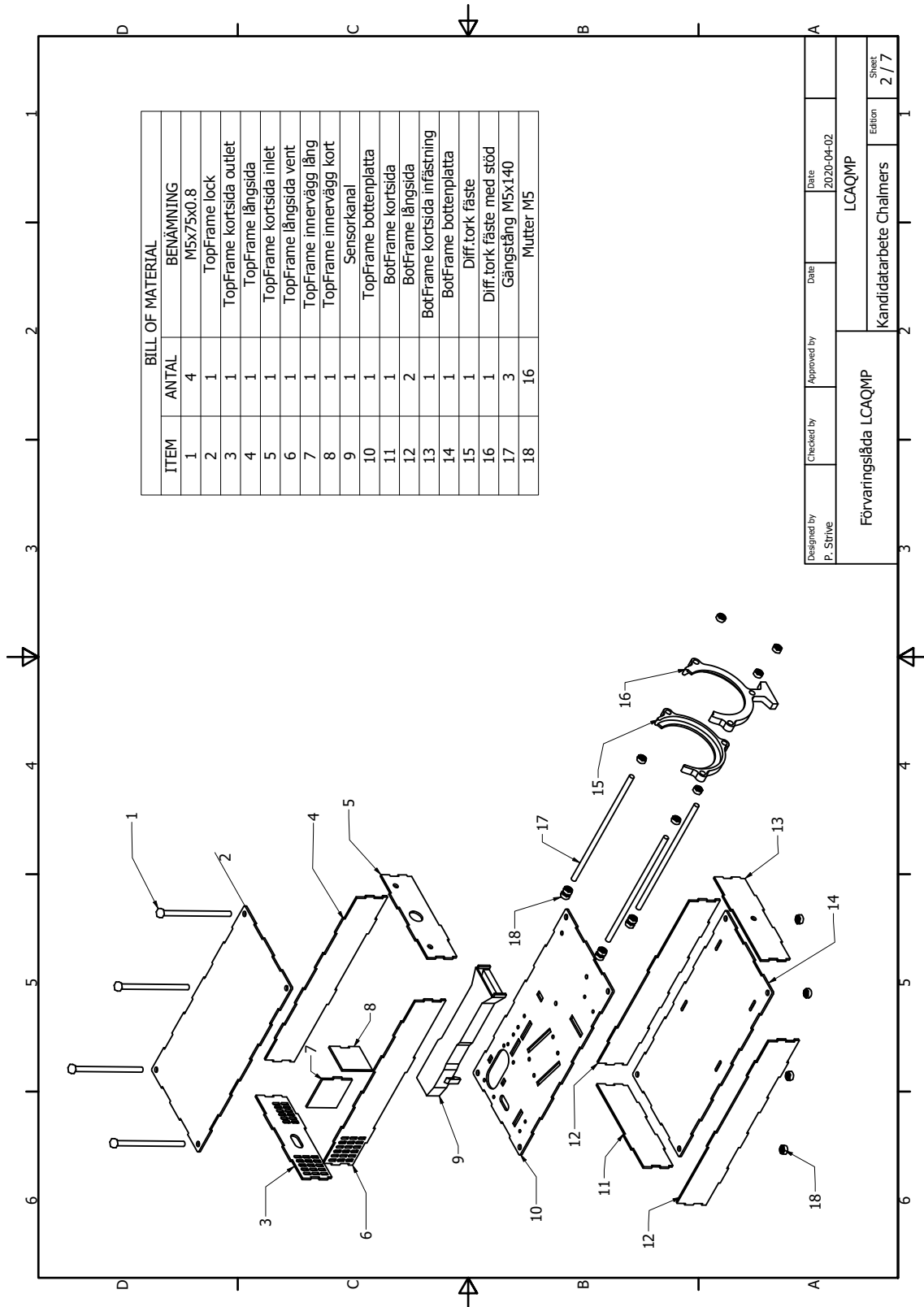
## LCAQMP ritningar



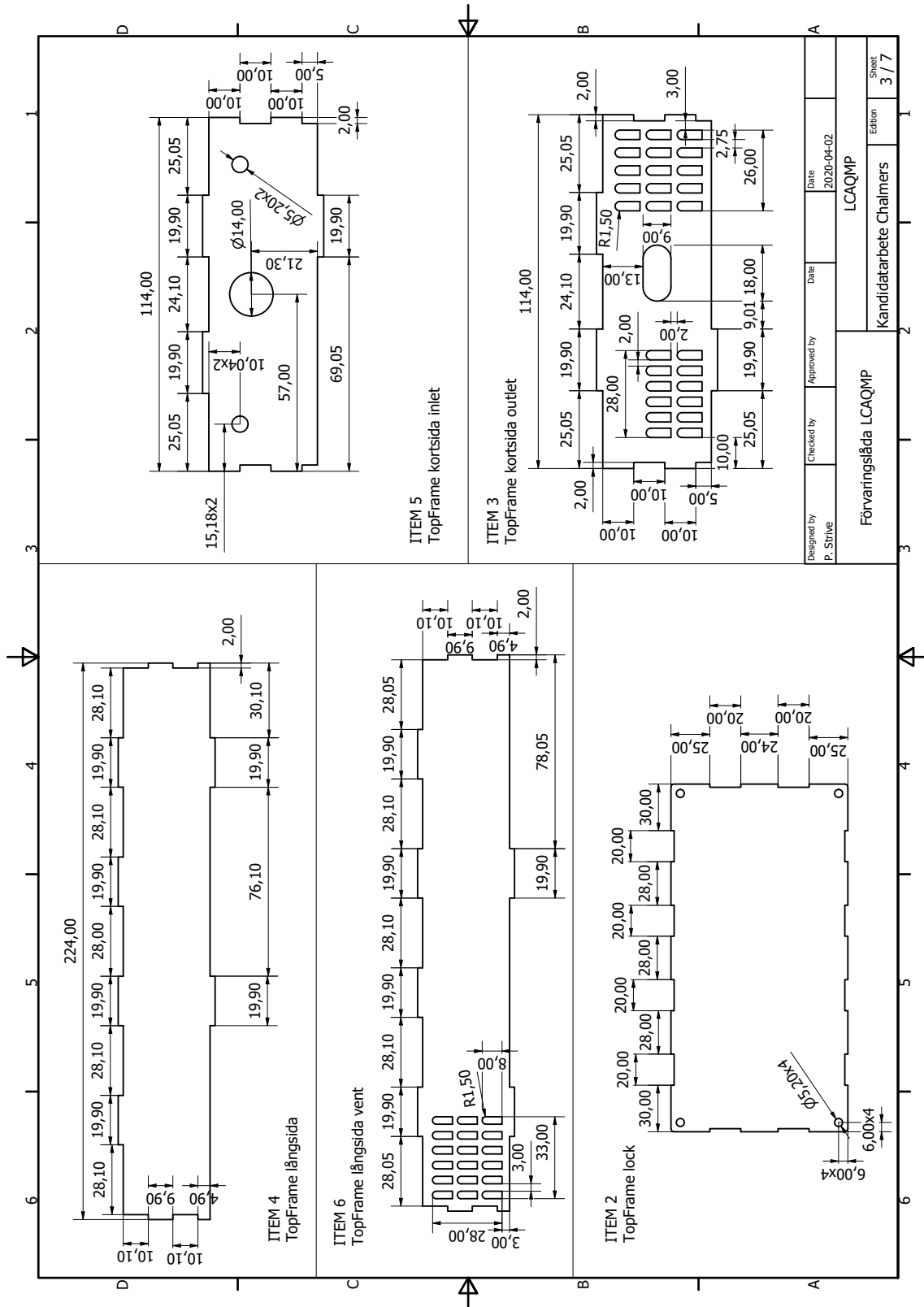
Figur C.1: CAD-ritning av komplett LCAQMP

C. LCAQMP ritningar

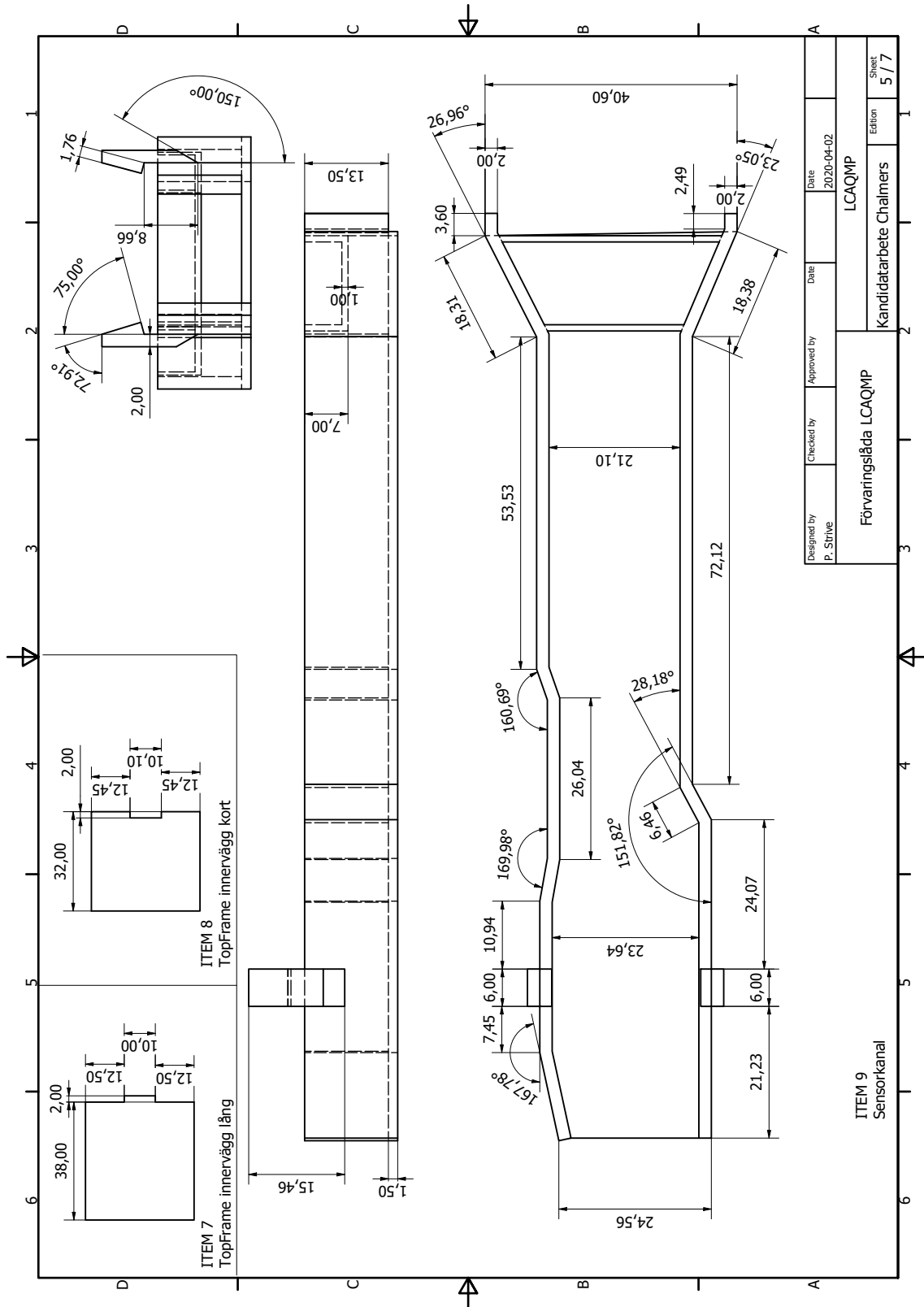




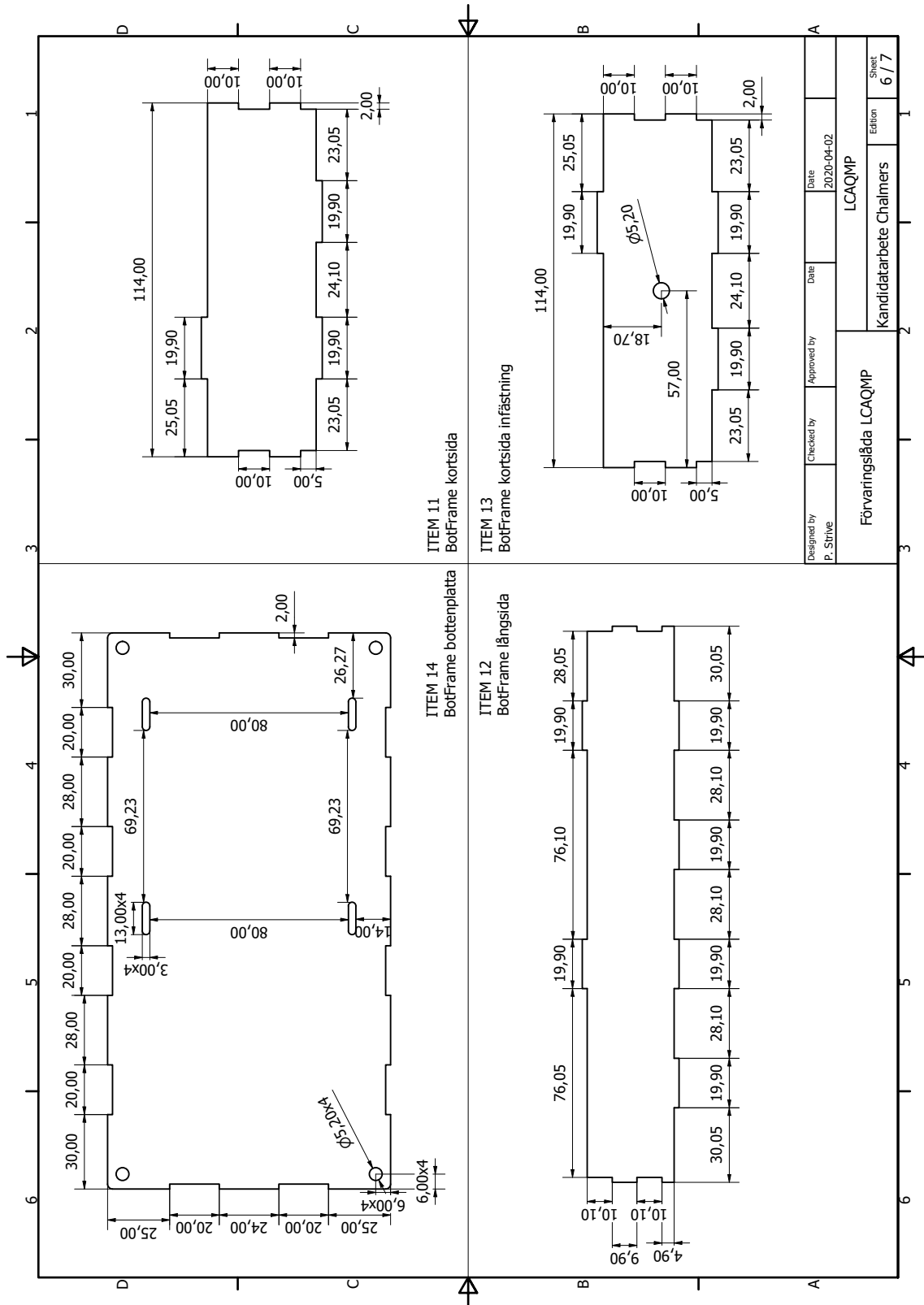
Designed by P. Strive	Checked by	Approved by	Date 2020-04-02
Förvaringslåda LCAQMP		LCAQMP	
Kandidatarbete Chalmers			Sheet 2 / 7

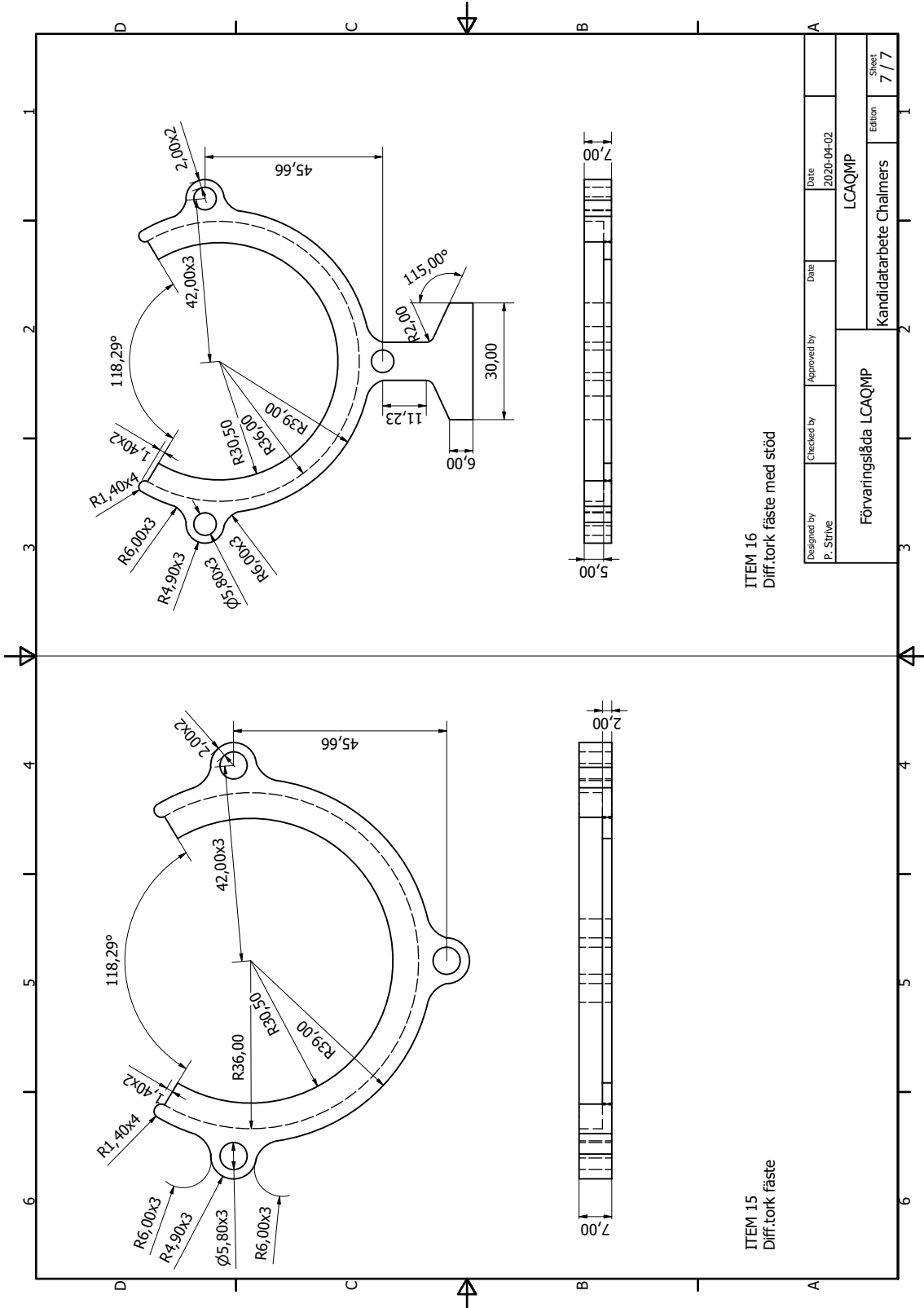






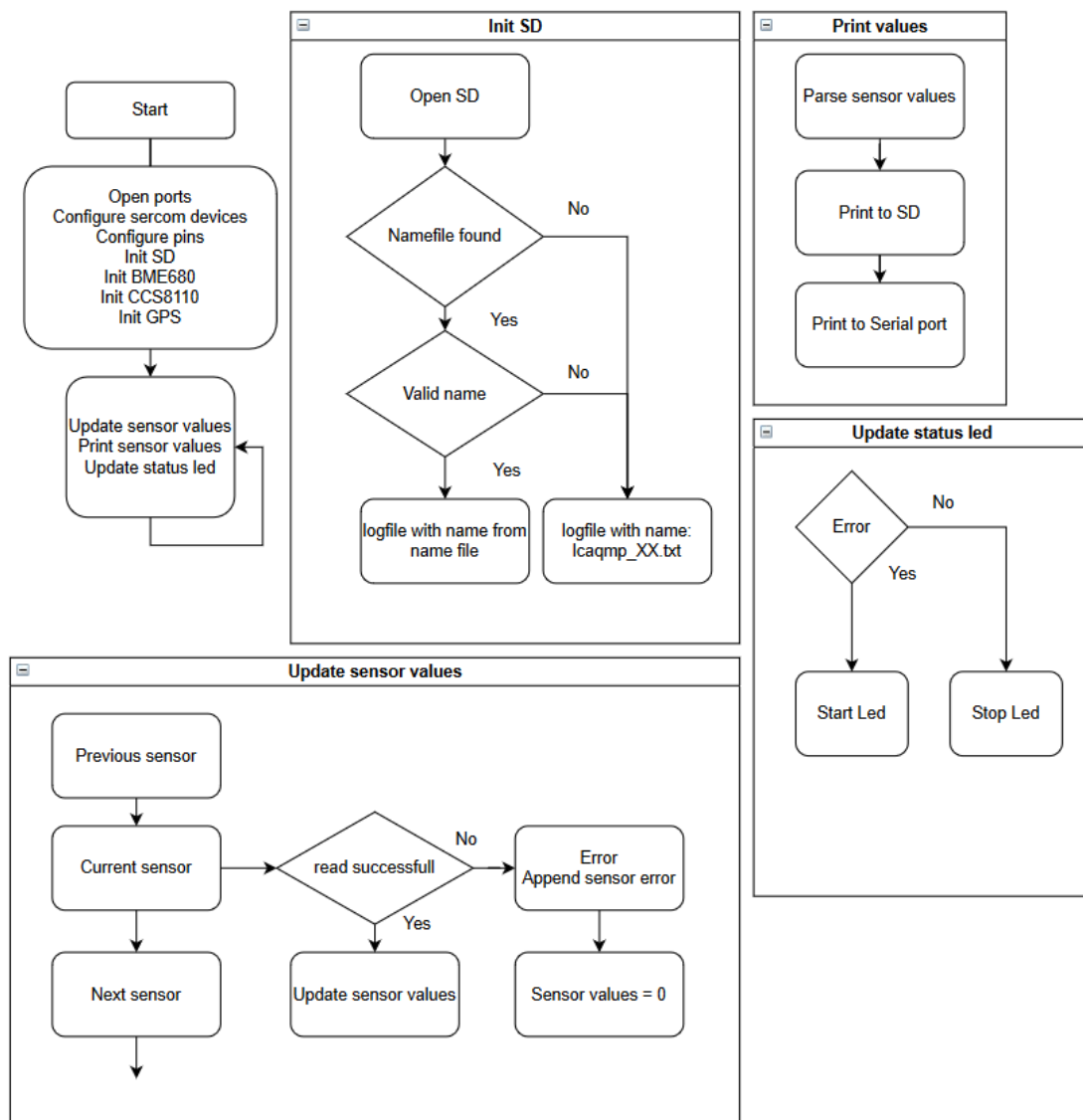
Designed by P. Strive	Checked by	Approved by	Date 2020-04-02
Förvaringslåda LCAQMP			LCAQMP
Kandidatarbete Chalmers			Sheet 5 / 7
			Edition





# D

## Pseudokod



Figur D.1: Pseudokod LCAQMP huvudprogram

# E

## Datablad samt produktblad för sensorerna

### **BME680**

Mäter: RH, VOC, temperatur och atmosfärstryck

Produkt sida: <https://www.adafruit.com/product/3660>

Datablad: <https://www.digikey.se/en/datasheets/bosch-sensortec/bosch-sensortec-bst-bme680-ds001-00>

### **CCS811**

Mäter: VOC, eCO<sub>2</sub>

Produktsida: <https://www.adafruit.com/product/3566>

Datablad: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj\\_k-nCgaTpAhWNwAIHHXMXB4QQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fcdn.sparkfun.com%2Fassets%2Flearn\\_tutorials%2F1%2F4%2F3%2FCCS811\\_Datasheet-DS000459.pdf&usq=A0vVaw0F7n-PawSzHOLZDuN3bYpP](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwj_k-nCgaTpAhWNwAIHHXMXB4QQFjAAegQIARAB&url=https%3A%2F%2Fcdn.sparkfun.com%2Fassets%2Flearn_tutorials%2F1%2F4%2F3%2FCCS811_Datasheet-DS000459.pdf&usq=A0vVaw0F7n-PawSzHOLZDuN3bYpP)

### **UltimateGPS**

Mäter: Position och tid

Produktsida: <https://www.adafruit.com/product/746>

Datablad: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/GlobalTop-FGPMOPA6H-Datasheet-V0A.pdf>

### **CozIR - LP**

Mäter: CO<sub>2</sub>

Produktsida: [https://se.rs-online.com/web/p/gas-sensor-ics/1809024/?cm\\_mmc=SE-PPC-DS3A--google--DSA\\_SE\\_EN\\_Semiconductors\\_Feed--Sensor\\_Ics%7CGas\\_Sensor\\_Ics%7CProducts--DYNAMIC+SEARCH+ADS&matchtype=b&aud-830986524389:dsa-783419050223&gclid=Cj0KCQjwhT1BRciARIsAGlY51K2JuVE9kAqDJsn\discretionary{-}{-}{-}4-WzVcu1phTaxJTzH5PBobLQepBTrBPHXoKOhY8aAvLtEALw\\_wcB&gclsrc=aw.ds](https://se.rs-online.com/web/p/gas-sensor-ics/1809024/?cm_mmc=SE-PPC-DS3A--google--DSA_SE_EN_Semiconductors_Feed--Sensor_Ics%7CGas_Sensor_Ics%7CProducts--DYNAMIC+SEARCH+ADS&matchtype=b&aud-830986524389:dsa-783419050223&gclid=Cj0KCQjwhT1BRciARIsAGlY51K2JuVE9kAqDJsn\discretionary{-}{-}{-}4-WzVcu1phTaxJTzH5PBobLQepBTrBPHXoKOhY8aAvLtEALw_wcB&gclsrc=aw.ds)

Datablad: <https://docs.rs-online.com/3eea/0900766b8168eab5.pdf>

### **SDS011**

Mäter: PM<sub>2.5</sub> PM<sub>10</sub>

Produktsida: [https://www.m.nu/sensorer-matinstrument/nova-pm-sensor-sds011-1?nosto=frontpage-nosto-4&gclid=CjOKCQjwhtT1BRCiARIsAGl\discretionary{-}{-}{-}Y51IyEIwmFganJPugQt2HVbomUrfEwh03amTYOVtMwrhYkN4I-zIrZyEaAjkAEALw\\_wcB](https://www.m.nu/sensorer-matinstrument/nova-pm-sensor-sds011-1?nosto=frontpage-nosto-4&gclid=CjOKCQjwhtT1BRCiARIsAGl\discretionary{-}{-}{-}Y51IyEIwmFganJPugQt2HVbomUrfEwh03amTYOVtMwrhYkN4I-zIrZyEaAjkAEALw_wcB)

Datablad: [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjh-uXg\\_qPpAhXSMewKHUIrAl0QFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fcdn-reichelt.de%2Fdocuments%2Fdatenblatt%2FX200%2FSDS011-DATASHEET.pdf&usq=A0vVaw3DK8CStM52ay3E3urAjos5](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjh-uXg_qPpAhXSMewKHUIrAl0QFjAAegQIAhAB&url=https%3A%2F%2Fcdn-reichelt.de%2Fdocuments%2Fdatenblatt%2FX200%2FSDS011-DATASHEET.pdf&usq=A0vVaw3DK8CStM52ay3E3urAjos5)

### **Palas Fidas Frog**

Datablad: <https://www.palas.de/en/product/download/fidasfrog/datasheet/pdf>

### **AAG**

Datablad: [https://www.tsi.com/getmedia/a93f150f-0f76-4d04-b089-aeb88eed53b/3079A\\_Atomizer\\_Aerosol\\_Generator\\_Topas\\_6007492A\\_web?ext=.pdf](https://www.tsi.com/getmedia/a93f150f-0f76-4d04-b089-aeb88eed53b/3079A_Atomizer_Aerosol_Generator_Topas_6007492A_web?ext=.pdf)

F

## Experimentplan

### Experiment

#### Mål

Det finns således ett antal mål med experimenten som utförs i laborationsmiljön, dels att fastställa hur nära LCAQMP:s SDS011 mäter mot en referens och dels hur väl de mäter mot varandra. Ett ytterligare mål är att även studera hur väl de mäter vid högre luftfuktigheter. Eftersom en diffusionstork kommer användas för att sänka den relativa fuktigheten måste även eventuella partikelförluster som denna orsakar undersökas. Dessutom skall mättnadstiden för diffusionstorken undersökas.

#### Metod

För att kunna uppnå slutmålen skall ett antal moment utföras, som härnäst refereras till efter momentnummer. Dessutom skall en inställningsmätning göras, för att fastställa att uppsättningen fungerar. Denna refereras till som Moment 0.

Mellan varje försök skall uppsättningen nollställas, vilket innebär att strömmen skall slås av och tryckluft skall kopplas bort, samt att glasslådan öppnas. Antalet försök anpassas efter dels den tiden som finns och dels det minimala antal försök som fordras för att ge ett relevant och relativt komplett resultat.

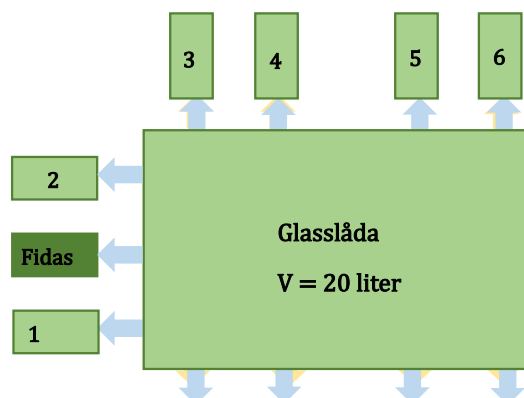
För de försök som använder partikelgenerering tillsätts ett tillflöde till den slutna lådan. Varje sensor suger dock åt sig luft ur lådan för mätning, och tillsammans utgör de ett utflöde ur lådan som partikelgeneratoren Atomizer Aerosol Generator ej kan matcha. Därför används torr tryckluft för att se till att nettotillflödet till lådan är högre än nettoutflödet. Hål i lådan finns in-borrade för att ventileras och undvika betydande tryckskillnader mellan lådans insida och omgivningen.

#### Moment 0

Eftersom flera faktorer kan orsaka felaktiga mätningar och försämrade datainsamling skall en inställningsmätning göras. Denna utförs genom att samtliga sensorenheter och referensen Fidas Frog™ skall endast mäta rumsluften som finns i glasslådan. Följande instrument förväntas behövas:

- 10 st. SDS011-sensorer med luftfuktighetsmätare och loggningsenheter
- 1 st. Fidas Frog
- 1 st. plastlåda av 20 liter
- Ett tjugotal jordade slangar av varierande längd

Dessa instrument skall ställas upp enligt följande figur





Där varje nummer anger vilken sensorenhet som representeras och varje pil motsvarar en jordad slang som skall koppla samman sensorenheten och glasslådan. **Locket på lådan skall även vara av**, då luften i lådan annars töms av sugen från varje sensorenhet. Denna uppsättning har även valts efter hur mycket utrymme som förväntas behövas.

Arbetsgången för detta moment, efter att uppsättningen förberetts, ser ut som följande:

1. **Påbörja datainsamling** genom att slå på strömmen som samtliga sensorer är kopplade till, efter ca 1, starta även Fidas Frogs datainsamling. Detta beror på att SDS011 ej omedelbart börjar logga data, utan kräver denna tid, vilket Fidas Frog ej gör. Notera även vilket klockslag detta görs.
2. **Avvakta** i ca 15 minuter och slå sedan av strömmen och avbryt även inspelningen på Fidas Frog för att avsluta mätningen.

Samtliga mikro-SD kort i varje sensorenhet skall insamlas och inspelningen på Fidas Frog skall föras över till .txt format. Resultatet skall sedan hanteras i lämpligt datorprogram, till exempel MATLAB **där huruvida varje sensorenhet ger användbara data** skall avgöras.

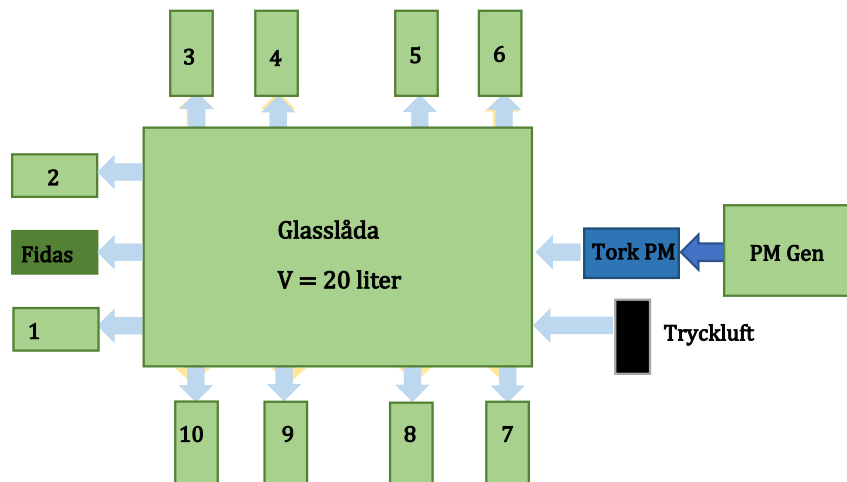
Detta försök behöver ej upprepas om varje sensorenhet loggar data som uppfattas som tillräcklig bra för kommande moment. När alla sensorenheter har godkänts kan laboranten fortsätta vidare till nästa moment.

### Moment I - Referensmätning

För att först undersöka hur likt de olika sensorerna mäter mot varandra samt hur de mäter mot en referens, i detta fall är denna referens Fidas Frog™, skall ett experiment där samtliga sensorer och referens är närvarande utföras. Följande instrument förväntas behövas:

- 10 st. SDS011-sensorer med luftfuktighetsmätare och loggningsenheter
- 1 st. Fidas Frog
- 1 st. plastlåda av 20 liter
- 1 st. Atomizer Aerosol Generator
- 10 st. + 1 st. diffusionstorkar
- Ett tjugotal jordade slangar av varierande längd
- Tryckluftregulator

Dessa instrument skall sedan ställas upp efter syfte med mätning. Denna mätning fordrar en uppsättning som tillåter att samtliga instrument får plats på ett praktiskt vis. Följande uppsättning ämnar detta



Denna uppsättning har alltså valts efter hur mycket utrymme som förväntas behövas. Det som på figuren står som "PM Gen" är Atomizer Aerosol Generator (AAG) och denna tillsammans med tryckluften står för inflöde till lådan. För att undvika ett flöde av hög fuktighet till Glasslådan torkas inflödet först. Väl där inväntas Steady State vilket är beroende av vilket flöde AAG och tryckluften genererar. I detta moment skall alltså samtliga sensorer användas för att försöken skall vara så tids och resurseffektiva som möjligt.

Arbetsgången för detta delmoment, efter uppsättning förberetts, ser ut som följande:

1. **Påbörja datainsamling** genom att slå på strömmen som samtliga sensorer är kopplade, efter ca 1 sekund, starta även Fidas Frogs datainsamling. Notera även vilket klockslag detta görs.
2. **Starta AAG** och ställ in flödesregulatorn runt 60 l/h (=1 l/min), vänta i 5 minuter för att partikelhalter skall kunna ackumuleras i lådan.
3. **Skruva på tryckluften**, dess flöde plus AAG's flöde skall tillsammans vara större än nettoutflödet, dvs summan av alla sensorers sug. Vänta i 5 minuter för att Steady State skall ställas in. Notera även på Fidas Frog om mätningen stabiliseras efter denna tid.
4. **Avvakta** i ca 5 minuter för att vara säker på att Steady State uppnåtts.
5. **Öka flödet** på AAG till 80 l/h (=1.33 l/min) och sänk tryckluften med 0.33 l/min. Vänta i 5 minuter för Steady State.
6. **Avvakta** i ytterligare 5 minuter för att vara säker på att Steady State uppnåtts.
7. **Sänk flödet** på AAG till 60 l/h igen och öka tryckluften med 0.33 l/min. Vänta i 5 minuter för Steady State.
8. **Avvakta** i ytterligare 5 minuter för att vara säker på att Steady State uppnåtts.
9. **Avsluta mätningen** genom att slå av strömmen och avbryta inspelningen på Fidas Frog.

Samtliga mikro-SD kort i varje sensorenhet skall insamlas och inspelningen på Fidas Frog skall föras över till .txt format. All data skall sedan hanteras enligt kommande rubrik angående datahantering.

Detta försök behöver minimalt utföras en gång. I mån av tid skall det upprepas maximalt 10 gånger, **där ändringen mellan varje försök är att sensorpositionen roteras.**

### Moment II - Partikelförluster

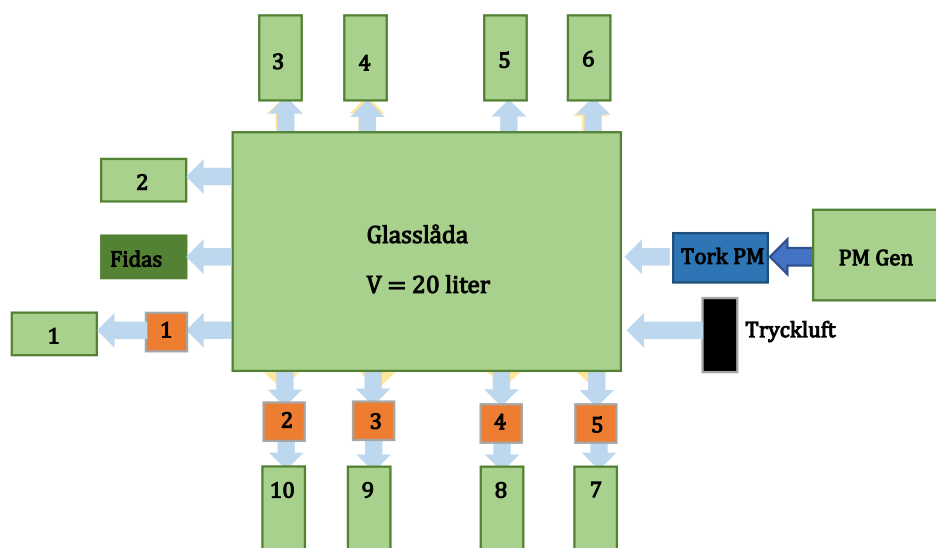
I detta moment skall partikelförluster varje tork kan orsaka identifieras. Den insamlade data skall således användas för att finna en förlustfaktor för varje tork. För att kunna utföra detta moment fordras följande utrustning:

- 10 st SDS011-sensorer med luftfuktighetsmätare och loggningsenheter

## F. Experimentplan

- 1 st Fidas Frog
- 1 st plastlåda av 20 liter
- 1 st Atomizer Aerosol Generator
- 10 st + 1 st diffusionstorkar
- Ett tjugotal jordade slangar av varierande längd
- Tryckluftregulator

Uppsättningen för detta moment kommer behöva variera beroende på vilken tork som skall utvärderas. Tanken är att **fem torkar skall testas vid varje försök**, där deras tillhörande sensorenheter skall producera data som skall jämföras med de fem sensorer (samt Fidas Frog) som ej torkar sitt luftinflöde. Sedan skall de resterande fem torkarna testas byta ut de fem som just testades. Generellt sett kommer uppsättningen se ut som följande



Det som i figuren är orangea boxar är torkar som numreras för systematikens skull. Utöver det, följer strukturen och arbetsgången Moment I, där partikelgenerering och tryckluft används för att skapa ett partikelhaltigt inflöde som matchar sugen från samtliga sensorenheter.

Arbetsgången för detta moment ser ut som följande:

1. **Påbörja datainsamling** genom att slå på strömmen som samtliga sensorer är kopplade, efter ca 1–5 sekunder, starta även Fidas Frogs datainsamling. Notera även vilket klockslag detta görs.
2. **Starta AAG** och ställ in flödesregulatorn runt 60 l/h (=1 l/min), vänta i 5 minuter för att partikelhalter skall kunna ackumuleras i lådan.
3. **Skruva på tryckluften**, dess flöde plus AAG's flöde skall tillsammans vara lika större än nettoutflödet, dvs summan av alla sensorers sug. Vänta i 5 minuter för att Steady State skall ställas in. Notera även på Fidas Frog om mätningen stabiliseras efter denna tid.
4. **Avvakta** i 10 minuter. Detta görs för att sensorerna skall kunna samla in nog med data.
5. **Öka flödet** på AAG till 80 l/h (=1.33 l/min) och sänk tryckluften med 0.33 l/min. Vänta i 5 minuter.
6. **Avvakta** i 10 minuter.

7. **Sänk flödet** på AAG till 60 l/h igen och öka tryckluften med 0.33l/min. Vänta i 5 minuter.
8. **Avvakta** i 10 minuter.
9. **Avsluta mätningen** genom att slå av strömmen och avbryta inspelningen på Fidas Frog.

Samtliga mikro-SD kort i varje sensorenhet skall insamlas och inspelningen på Fidas Frog skall föras över till .txt format. All data skall sedan hanteras enligt kommande rubrik angående datahantering.

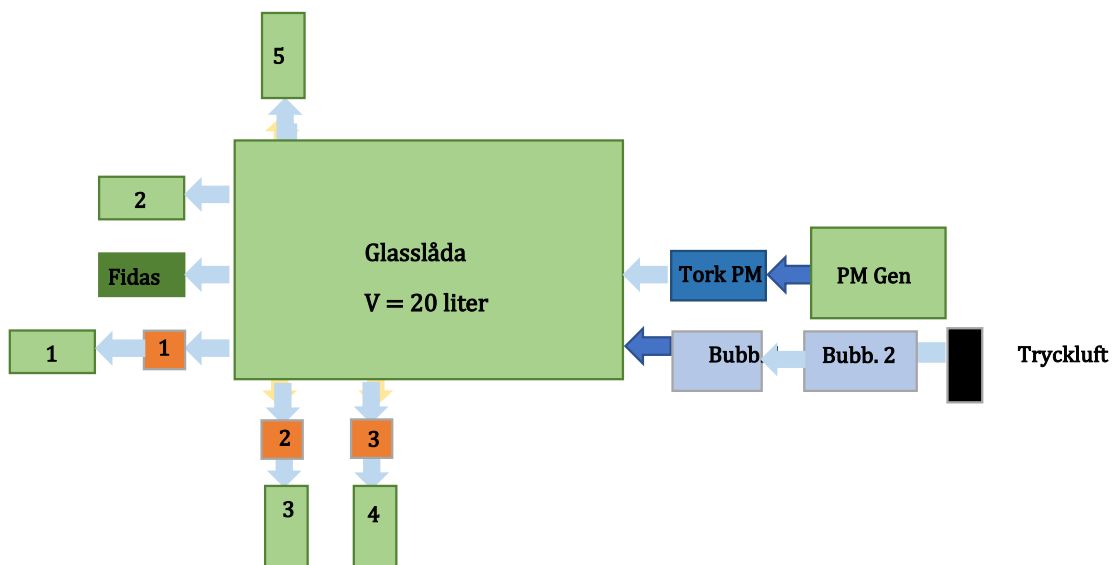
**Byt sedan ut två av torkarna och rotera uppsättningen en position.** Dvs om t ex tork ett 1 byts ut mot en annan tork, skall den nya torken sitta där tork två satt. Upprepa försöket tills varje tork har testats, vilket blir minimalt tre försök.

### Moment III – Mätningar vid höga luftfuktigheter

För att undersöka huruvida högre luftfuktigheter (över 75%) skall en sådan situation skapas i den kontrollerade miljön. För att kunna utföra detta moment fordras följande utrustning:

- 5 st. + 5 st. SDS011-sensorer med luftfuktighetsmätare och loggningsenheter
- 1 st. Fidas Frog
- 1 st. plastlåda av 20 liter
- 1 st. Atomizer Aerosol Generator
- 5 st. + 5 st. + 1 st. diffusionstorkar
- Ett tjugotal jordade slangar av varierande längd
- 2 st. luftfuktighetsbildare (Bubblare) med tryckregulator

För detta försök kommer inte lika många sensorer användas samtidigt, då det instrument som används för skapandet av luftfuktighet inte kan matcha strömstorleken. Fem sensorer kommer istället användas för varje försök, där inflödet på tre kommer torkas och två kommer ej. **Dock skall alla sensorer genomgå detta moment.** Uppsättningen som kommer användas ser ut som följande



Där skillnaden från tidigare uppsättningar är att tryckluftströmmen förbipasserar bubblare och för med sig fuktig luft till glasslådan och att färre sensorer används. Dessutom torkas inte varje sensorenhets inflöde, vilket är menat för att ge ett resultat som kan jämföras mellan varje sensorenhet. Vidare skall varje tork delta i detta moment vilket fordrar ett flertal försök.

Arbetsgången för detta moment ser ut som följande:

1. **Påbörja datainsamling** genom att slå på strömmen som samtliga sensorer är kopplade, efter ca 1–5 sekunder, starta även Fidas Frogs datainsamling. Notera även vilket klockslag detta görs.
2. **Starta AAG** och ställ in flödesregulatorn runt 60 l/h (=1 l/min), vänta i 5 minuter för att partikelhalter skall kunna ackumuleras i lådan.
3. **Skruva på tryckluften**, dess flöde plus AAG's flöde skall tillsammans vara lika stort som nettoutflödet, dvs summan av alla sensorers sug. Vänta i 5 minuter för att Steady State skall ställas in. Notera även på Fidas Frog om mätningen stabiliseras efter denna tid. Obs! Det får inte följa med vattendroppar ur bubblaren!
4. **Avvakta** i 10 minuter. Detta görs för att sensorerna skall kunna samla in nog med data.
5. **Öka flödet** på AAG till 80 l/h (=1.33 l/min) och sänk tryckluften med 0.33 l/min. Vänta i 5 minuter.
6. **Avvakta** i 10 minuter.
7. **Sänk flödet** på AAG till 60 l/h igen och öka tryckluften med 0.33l/min. Vänta i 5 minuter.
8. **Avvakta** i 10 minuter.
9. **Avsluta mätningen** genom att slå av strömmen och avbryta inspelningen på Fidas Frog.

Samtliga mikro-SD kort i varje sensorenhet skall insamlas och inspelningen på Fidas Frog skall föras över till .txt format. All data skall sedan hanteras enligt kommande rubrik angående datahantering.

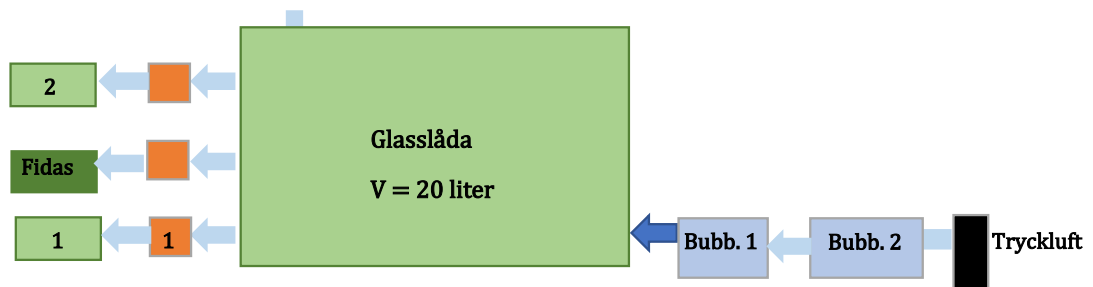
**Byt sedan ut två torkar och sensorenheter**, dock skall en uppsättning av tork och sensorenhet vara oförändrad, och upprepa försöket. Det minimala antalet försök blir 4.

### Moment IV – Mättnadstid och adsorberad mängd vatten

För att undersöka den tid som krävs för att en tork skall bli mättad och sluta torka skall detta moment utföras. Dessutom skall torken vägas innan och efter mättnad, för att undersöka massan vatten som fångas. Detta moment förväntas att kräva längre tid för varje försök relativt tidigare moment. För att kunna utföra detta moment fordras följande utrustning:

- 2 st. SDS011-sensorer med luftfuktighetsmätare och loggningsenheter
- 1 st. Fidas Frog
- 1 st. plastlåda av 20 liter
- 6 st. diffusionstorkar
- Ett tjugotal jordade slangar av varierande längd
- 2 st. luftfuktighetsbildare (Bubblare) med tryckregulator
- Våg

För detta försök kommer inte lika många sensorer användas samtidigt, då det instrument som används för skapandet av luftfuktighet inte kan matcha strömstorleken. Dessutom behöver inte AAG längre användas och därför räcker det med två sensorer och Fidas Frog med torkat inflöde. **Torkarna skall emellertid bytas ut mellan varje försök.** Uppsättningen som kommer användas ser ut som följande




Arbetsgången för detta moment ser ut som följande:

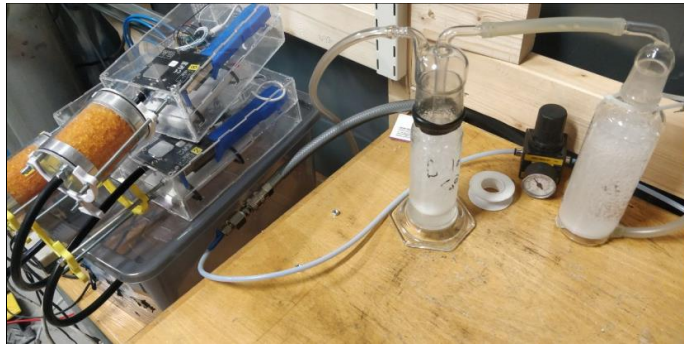
1. **Väg** samtliga torkar och notera vikten.
2. **Påbörja datainsamling** genom att slå på strömmen som samtliga sensorer är kopplade, efter ca 1–5 sekunder, starta även Fidas Frogs datainsamling. Notera även vilket klockslag detta görs.
3. **Skruva på tryckluften**, dess flöde plus AAG's flöde skall tillsammans vara lika stort som nettoutflödet, dvs summan av alla sensorers sug. Vänta i 5 minuter för att Steady State skall ställas in. Notera även på Fidas Frog om mätningen stabiliseras efter denna tid. Obs! Det får inte följa med vattendroppar ur bubblaren!
4. **Avvakta** tills att Fidas Frog visar att torkningen börjar avta, dvs att den relativa fuktigheten börjar öka igen. Detta kan ta en lång tid.
5. **Avsluta mätningen** genom att slå av strömmen och avbryta inspelningen på Fidas Frog.
6. **Väg** samtliga torkar återigen och notera vikten.

Samtliga mikro-SD kort i varje sensorenhet skall insamlas och inspelningen på Fidas Frog skall föras över till .txt format. All data skall sedan hanteras enligt kommande rubrik angående datahantering.

## F. Experimentplan

<b>Experiment 1</b>	
<b>Introduktion</b>	Genomförs på förbränningsintuitionen på Chalmers
<b>Bakgrund</b>	Vi behöver undersöka vilken kapacitet dif-torkarna som sitter på lcaqmp har.
<b>Teori/Hypotes</b>	<p>Följande fråga ska besvaras med experimenten som omnämns i detta experimentplan:</p> <p><b><i>"Vilken kapacitet har dif-toren på lcaqmp?"</i></b></p> <p>Undersökningarna vill visa resultat, baserad på praktiskt mätdata, som utvärderar hur länge diftorken kan förväntas vara brukbar i fältmätning.</p> <p>Sensorn som kommer användas för mätning av fuktighet är en BME680. Sensorn har ett mätområde om 0-100% RH.</p> <p>Vi förväntar oss att torken klarar att hålla XX g vatten, detta innebär att torken skall klara 100% RH i XX h.</p> <p>Vi förväntar oss att torken blir gradvis sämre under experimentet, därmed kommer det inte finnas en definitiv tid där torken slutar torka. Denna gradvisa förlust av torkförmåga är av stort värde för torkens prestanda.</p>
<b>Experiment:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Två torkenhets silikamängd mäts upp och dokumenteras.</li> <li>• Torkarna monteras på två lcaqmp enheter. Samt en enhet utan tork som kommer agera referens för luftfuktigheten.</li> <li>• De tre enheterna monteras mot en kontrollvolym dit en fuktig luftström tillförs. Denna fuktigheten skall ligga på så hög nivå som som är möjlig.</li> </ul> <p>UNDER EXPERIMENT  Tork #3 silica gel 116g  Tork #5 silica gel 113g  Flöde sätts till 4.4 l/min  Bild från när experiment började 30/4 : 17:22</p>  <p>Bild på experiment kl 1/5 kl 01:20</p>

## F. Experimentplan



1/5 kl 17:30

Flöde ökas för att öka luftfuktigheten, flöde 4.5 -> 7.5

Batteri tog slut under experiment

Experiment avslutas 3/5 kl 23:10

Unti 2 – utan tork

Unit 8 – tork #5

Unit 1 – tork #3

<b>-Mål</b>	Att utvärdera dif torken på LCAQMP:s kapacitet
<b>-Mätningar och utvärdering</b>	
<b>-Dataevaluering, Analys, Variabler</b>	Analys av uppmätt fuktighet med hjälp av Matlab
<b>-Tidsplan</b>	Testet inleds 30/4 och avslutas ::::::
<b>Resursbehov/metod</b>	Tre lcaqmp enheter Två difforkar  Kontrollvolym Utrustning för att tillföra fukt till luft.
<b>Skisser/layout/ritningar</b>	Uppkoppling: Vi ansluter LCAQMP enheterna till kontrollvolymen (låda) med slangar. Kontrollvolymen är i sin tur ansluten till två bubblare som är ihopsatta i serie. För att uppnå maximal luftfuktighet. Därefter lämnas enheterna till att logga fuktigheten under en längre tid.
<b>Resultat/felkällor/slutsats</b>	
<b>Risker</b>	Inga uppenbara risker. Då experimentet kommer ske utan uppsikt är det viktigt att säkra upp allting och sprida information till ovetande att experiment pågår.

## F. Experimentplan

---

<b>Hypotes 1</b>	
<b>Introduktion</b>	Genomförs på förbränningsintuitionen på Chalmers
<b>Teori/Hypotes</b>	Följande hypotes ska besvaras med experimenten som omnämns I denna experimentplan:  <i>"Hur bra mäter LCAQMP transienta ändringar i fältmiljön"</i>
<b>Experiment:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Projektgruppen placerar ut LCAQMP vid en busshållplats tillsammans med Fidas Frog som i experimentet används som referens. LCAQMP börjar sedan mäta luftföroreningar.</li> <li>• När en buss kommer till hållplatsen noteras tiden som den anländer, tiden som den lämnar hållplatsen samt typen av buss(eldriven, hybrid eller diesel).</li> </ul>
<b>-Mål</b>	Att utvärdera LCAQMP:s förmåga att mäta transienter i fältmiljö.
<b>-Mätningar och utvärdering</b>	
<b>-Dataevaluering, Analys, Variabler</b>	Analys av resultaten med hjälp av Matlab.
<b>-Tidsplan</b>	Experimentet utförs under förmiddagen 27/4.
<b>Resursbehov/metod</b>	10 LCAQMP samt Fidas Frog
<b>Skisser/layout/ritningar</b>	
<b>Resultat/felkällor/slutsats</b>	

## F. Experimentplan

<b>Experiment 1</b>	
<b>Introduktion</b>	Genomförs på förbränningsintuitionen på Chalmers
<b>Bakgrund</b>	Vi behöver undersöka stegsvaret som LCAQMP enheten har.
<b>Teori/Hypotes</b>	<p>Följande fråga ska besvaras med experimenten som omnämns i detta experimentplan:</p> <p><b><i>”Vilket stegsvar har LCAQMP?”</i></b></p> <p>Undersökningarna vill visa resultat, baserad på praktiskt mätdata, som utvärderar vilket stegsvar LCAQMP har.</p> <p>LCAQMP består av flera sensorer som har olika individuella stegsvar. Därmed är frågan “vilket stegsvar har lcaqmp” något vag. För att evaluera stegsvaret behöver experimentet utformas så att varje sensor får ett tydligt stegsvar samtidigt.</p> <p>Vi analyserar stegsvaret genom att först mäta atomsfärsluften för att ge oss ett sstartvärde. Därefter, vid en given tidpunkt, ändras mätmiljön till en där så många sensorer som möjligt get så högt utslag som möjligt.</p> <p>En sådan miljö är en kontrollvolym med en nyligen släckt tändsticka där luftfuktigheten är mycket hög. I denna miljö finns det därmed mycket partiklar, co2, luftfuktighet och kanske en del voc.</p>
<b>Experiment:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Experimentet utförs med fyra lcaqmp enheter där två är utan diftork och två med.</li> <li>• Lcaqmp enheterna startas på en anteckand tid och låts mäta så att sensorvärden har hunnit normalisera sig.</li> <li>• En kontrollvolym förbereds på ett sådant sätt att atmosfären har hög halt av luftfuktighet och mycket pm och co2 samt voc.</li> <li>• Samtliga enheter ansluts till kontrollvolymen och låst mäta så under så pass lång tid att utföraren är säker på att hela stegsvaret har hunnit registreras på samtliga enheter.</li> </ul>
<b>-Mål</b>	Att utvärdera LCAQMP:s stegsvar för dess olika sensorer.
<b>-Mätningar och utvärdering</b>	
<b>-Dataevaluering, Analys, Variabler</b>	Analys av VOC med hjälp av Matlab
<b>-Tidsplan</b>	Experimentet utförs under förmiddagen 29/4.
<b>Resursbehov/metod</b>	<p>10 LCAQMP, flödesmaskin som genererar VOC, samt en kontrollvolym i form av en plastlåda.</p> <p>Dodecane –C12H26</p> <p>Utrustning för flödeskontroll</p>
<b>Skisser/layout/ritningar</b>	<p>Uppkoppling: Vi ansluter alla LCAQMP enheter till kontrollvolymen (låda) med slangar. Kontrollvolymen är i första fasen av experimentet ansluten till tryckluft så att en baslinje på mätningen kan identifieras.</p> <p>Efter att mätvärden stabiliserats ersätts tryckluften med en slang in till en annan kontrollvolym där atmosfären skall vara sådan att sensorerna ger ett tydligt utslag.</p> <p>Slangarna och kontrollvoymen skall vara så liten som möjligt så att stegsvaret inte blir utdraget av turbulens i stora volymer.</p>

## F. Experimentplan

---

<b>Resultat/felkällor/slutsats</b>	Felkällor: Finns risker med att använda kontrollvolym och okänd volym i slangar, detta kommer resultera i att stegsvar kan ses som utdraget.
<b>Risker</b>	Tändstickan, en öppen flamma kan starta en eld, så undvik det...

## F. Experimentplan

<b>Experiment 1</b>			
<b>Introduktion</b>	Genomförs på förbränningsintuitionen på Chalmers		
<b>Bakgrund</b>	Vi behöver validera LCAQMP mätprestanda för VOC. Detta genomförs genom att genomföra mätexperiment med kända referensvärden som LCAMQP mäter på.  Sensorn som vi använder är en CCS811		
<b>Teori/Hypotes</b>	<p>Följande fråga ska besvaras med experimenten som omnämns i detta experimentplan:</p> <p><b><i>"Hur bra mäter LCAQMP VOC?"</i></b></p> <p>Undersökningarna vill visa resultat, baserad på praktiskt mätdata, som utvärderar hur bra LCAQMP mäter VOC</p> <p>Sensorn som mäter VOC heter CCS811 och mäter TVOC (Total Volatile Organic Compounds). Sensorn har ett mätområde om 0-1187 PPB.</p> <p>Dodecane har ett ångtryck på 18Pa, vilket innebär att det har en gasandel av 177 ppm i atmosfäriskt tryck.</p> <p>För ett totalt flöde av 20L/min behöver x PPB komma från Voc. För att beräkna flödet av spädvolymen (SF) och flödet av Dodecane aerosolen (DF) används <math>C1V1=C2V2</math> sambandet</p> <p>Vi har att:</p> <p><math>177 \text{ ppm} * (DF) \text{ ml/min} = x/1000 * 20\ 000 \text{ ml/min}</math> där x är sökt voc i ppb.</p> <p>Spädflödet SF beräknas genom <math>20\ 000 \text{ ml/min} - DF \text{ ml/min}</math>.</p>		
<b>Experiment:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• VOC-flödet ansluts till kontrollvolymen i form av en plastlåda.</li> <li>• Projektgruppen ansluter LCAQMP till kontrollflödet och låter LCAQMP mäta halter av VOC.</li> <li>• Flödet ändras för att utvärdera mätnoggrannheten vid olika nivåer av VOC. Sedan mäter LCAQMP de nya VOC-nivåerna. Det är först efter att den nya nivån av VOC uppnåtts i kontrollvolymen som mätningarna är intressanta.</li> <li>• Flödet ändras ett antal gånger för att täcka en stor del av sensorns mätområde. Med en minsta stegtid på 6 minuter för att garantera att kontrollvolymen har ersatts och att sensorerna har stabiliserat sig mot det nya värdet.</li> <li>• Inflödet i kontrollvolymen bör minst vara 15 men rekommenderas vara 20L/min då mätenheterna suger 12L/min</li> </ul>		
<b>-Mål</b>	Att utvärdera LCAQMP:s förmåga att mäta VOC och skapa underlag för kalibrering.		
<b>-Mätningar och utvärdering</b>			
	Steg	VoC ppb	Kommentar
	1	0	Baseline på omgivning

## F. Experimentplan

	2	200	VOC :22.59 ml/min luft: 19977.40
	3	400	VOC: 45.1977 luft: 19954.80
	4	600	VOC: 67.7966 luft: 19932.20
	5	800	VOC: 90.39 luft: 19909.60
	6	1000	VOC:112.99 luft: 19987.005
<b>-Dataevaluering, Analys, Variabler</b>	Analys av VOC med hjälp av Matlab		
<b>-Tidsplan</b>	Experimentet utförs under förmiddagen 29/4.		
<b>Resursbehov/metod</b>	10 LCAQMP, flödesmaskin som genererar VOC, samt en kontrollvolym i form av en plastlåda.  Dodecane –C <sub>12</sub> H <sub>26</sub> Utrustning för flödeskontroll		
<b>Skisser/layout/ritningar</b>	<p>Uppkoppling: Vi ansluter alla LCAQMP enheter till kontrollvolymen (låda) med slangar. Kontrollvolymen är i sin tur ansluten till FLÖDESMASKINEN.</p> <p>Med flödesmaskinen kan vi ställa väldigt exakta flöden för olika gaser.</p> <p>I detta experiment konfigureras båda kanalerna till att kontrollera luft där den ena kanalen går direkt in till kontrollvolymen medans det andra flödet först passerar genom en mängd dodecane. En mängd dodecane kommer därmed följa med luftströmmen som där med blir en aerosol.</p> <pre> graph TD     FM[FlödesMaskin] -- DF --&gt; B[Bubblare]     FM -- SF --&gt; KV[Kontrollvolym]     B --&gt; KV     KV --&gt; LCAQMP[10 x LCAQMP]     </pre>		
<b>Resultat/felkällor/slutsats</b>	Felkällor: Den exakta temperaturen som dodecane har under experimentet kommer vara okänd. Detta kommer leda till att ångtrycket kanske inte stämmer. Ett ångtryck på 1Pa fel leder till 10% fel ppb.		

**Risker**



Dodecane är inte bra att förtäras, därmed skall hög aktsamhet tas när dodecane handskas. Trätta händerna är bra att göra när utrustning som kommit i kontakt med dodecane handskas.

Dodecane självantänder vid 400c\* vilket inte är i närheten av temperaturer som experimentet kommer att utföras vid.

<b>Experiment 2</b>	
<b>Introduktion</b>	Genomförs på förbränningsintuitionen på Chalmers
<b>Bakgrund</b>	Vi behöver validera LCAQMP mätprestanda på CO2. Detta genomförs genom att genomföra mätexperiment med kända referensvärden som LCAMQP mäter på.

## F. Experimentplan

	Sensorn som vi använder är en CozIR-LP
<b>Teori/Hypotes</b>	<p>Följande hypotes ska besvaras med experimenten som omnämns I detta experimentplan:</p> <p><b><i>"Hur bra mäter LCAQMP CO2"</i></b></p> <p>Undersökningarna vill visa resultat, baserad på praktiskt mätdata, som utvärderar hur bra LCAQMP mäter CO2.</p> <p>LCAQMP är utrustad med två sensorer som kan mäta Co2, den ena sensorn heter CozIR-LP och har ett mätområde till 5 000ppm Den andra sensorn heter CCS811 och mäter eCo2 vilket är en beräknad ekvivalent co2 värde som är beroende på mängden VOC i luften.</p> <p>Vi förväntar oss att endast CozIR ger bra mätvärden då vi inte har någon tillagd VOC i mätgasen förutom den som finns i tryckluften vilket antas vara försummbart. Därmed kan en någon ekvivalent co2 beräknas av CCS811 sensorn.</p> <p>Beräkningar  Viktigt att notera är att vår spädgas(luft) <a href="#">innehåller ca 400ppm co2</a>.  Därmed används sambandet <math>C1F1 + C2F2 = C3F3</math></p> <p>F1 = koldioxid gas  F2 = luft utspädnings gas  F3 = blandad gas  C1 = Koldioxid koncentration i co2 gas  C2 = koldioxid i spädgas  C3 = co2 koncentration i blandad gas</p> <p><math>(c1 f1) + (c2 f2) = (c3 f3)</math>  <math>(c1 f1) = (c3 f3) - (c2 f2)</math>  vi har att flöde 1 + flöde 2 = 20000 ml/min  <math>f2 = f3 - f1</math>  <math>c1 * f1 = c3 * f3 - c2 * (f3 - f1)</math>  <math>c1 * f1 + c2 * f1 = c3 * f3 - c2 * f3</math>  <math>f1 * (c1 + c2) = c3 * f3 - c2 * f3</math>  <math>f1 = (c3 * f3 - c2 * f3) / (c1 + c2)</math>  <math>f2 = f3 - f1</math></p> <p>C1 antas till 100% = 1000000 ppm  C2 mäts med lcaqmp under experimentet  C3 är vårt börvärde</p> <p><b>UNDER EXPERIMENT</b>  Det visar sig att det inte går att sänka flödet till under 1ml/min, där med sätts flödet på co2 som minst till 1.1ml/min</p> <p>Detta leder till nya beräkningar  <math>f3 = f1 + f2</math>  <math>c1 f1 + c2 f2 = c3 (f1 + f2)</math>  <math>c2 f2 - c3 f2 = (f1 c3 - c1 f1)</math></p>

## F. Experimentplan

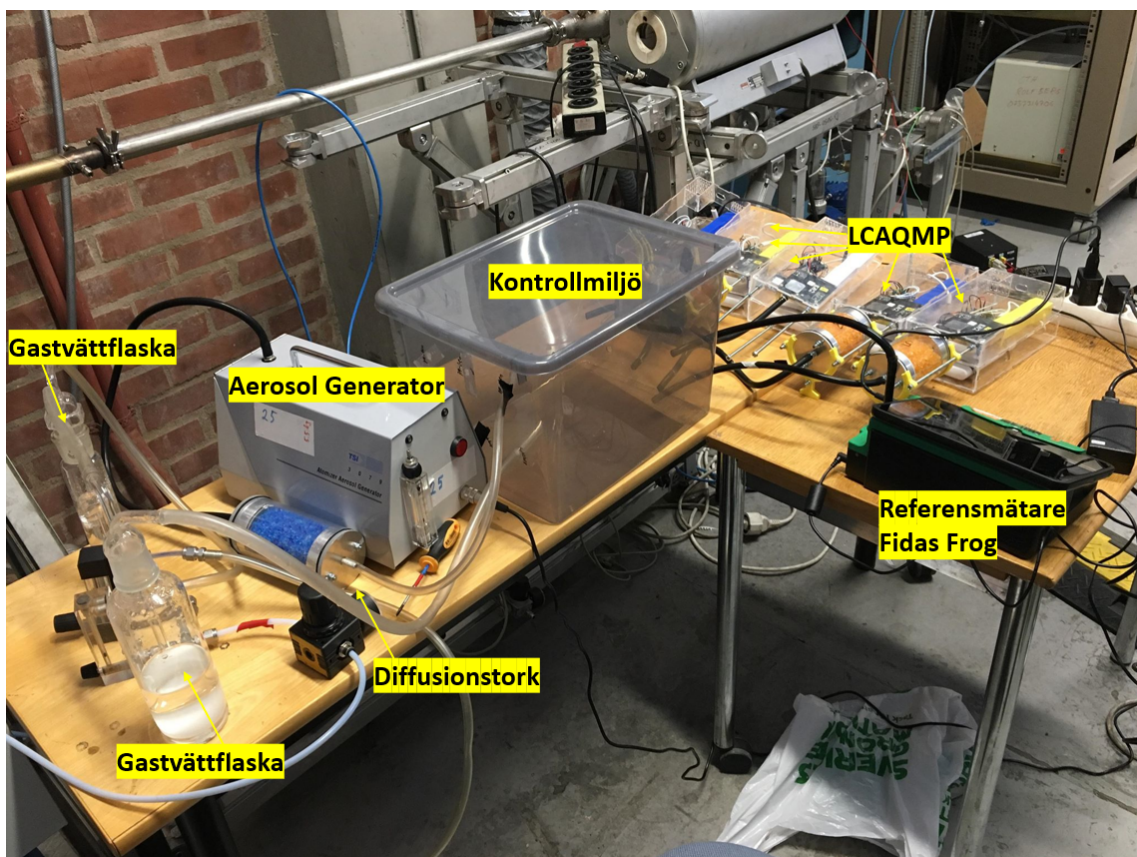
	$f_2 = (f_1 c_3 - c_1 f_1) / (c_2 - c_3)$ <p>Flöde 1 bestäms så att f3 är så nära 20 l / min som möjligt</p> <p>Under testning har mistankar höjts om att diffusionsforke ändrar CO2 nivåerna, där genomförs experimentet två gånger, en där alla enheter har tork och en utan.</p>																																	
<b>Experiment:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CO2 -flödet ansluts till kontrollvolymen i form av en plastlåda.</li> <li>• Projektgruppen ansluter LCAQMP till kontrollflödet och låter LCAQMP mäta halter av CO2.</li> <li>• Flödet ändras för att utvärdera mät noggrannheten vid olika nivåer av CO2. Sedan mäter LCAQMP de nya CO2 -nivåerna. Det är först efter att den nya nivån av CO2 uppnåtts i kontrollvolymen som mätningarna är intressanta.</li> <li>• Flödet ändras ett antal gånger för att täcka en stor del av sensorernas mätområde. Med en minsta stegtid på 6 minuter för att garantera att kontrollvolymen har ersatts och att sensorerna har stabiliserat sig mot det nya värdet.</li> <li>• Inflödet i kontrollvolymen bör minst vara 15 men rekommenderas vara 20L/min då mätenheterna suger 12L/min</li> </ul>																																	
<b>-Mål</b>	Att utvärdera LCAQMP:s förmåga att mäta CO2 och skapa underlag för kalibrering.																																	
<b>-Mätningar och utvärdering</b>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; margin-bottom: 10px;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Steg</th> <th style="width: 30%;">CO2 ppm</th> <th style="width: 50%;">Kommentar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>Endast tryckluft för mätning av omgivning</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>500</td> <td>Co2 : 0.005 Luft : 19999.995</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2000</td> <td>Co2 : 0.08 Luft : 19999.92</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>6000</td> <td>Co2 : 0.28 Luft : 19999.72</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>12000</td> <td>Co2 : 0.58 Luft : 19999.42</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>18000</td> <td>Co2 : 0.88 Luft : 19999.12</td> </tr> </tbody> </table> <p>UNDER EXPERIMENT:</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">Steg</th> <th style="width: 30%;">CO2 ppm</th> <th style="width: 50%;">Kommentar</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>Baseline fastställning av omgivningens CO2</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>1000</td> <td>Co2:8 luft:20492</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>2000</td> <td>Co2:30 luft: 21540</td> </tr> </tbody> </table>	Steg	CO2 ppm	Kommentar	1	0	Endast tryckluft för mätning av omgivning	2	500	Co2 : 0.005 Luft : 19999.995	3	2000	Co2 : 0.08 Luft : 19999.92	4	6000	Co2 : 0.28 Luft : 19999.72	5	12000	Co2 : 0.58 Luft : 19999.42	6	18000	Co2 : 0.88 Luft : 19999.12	Steg	CO2 ppm	Kommentar	1	0	Baseline fastställning av omgivningens CO2	2	1000	Co2:8 luft:20492	3	2000	Co2:30 luft: 21540
Steg	CO2 ppm	Kommentar																																
1	0	Endast tryckluft för mätning av omgivning																																
2	500	Co2 : 0.005 Luft : 19999.995																																
3	2000	Co2 : 0.08 Luft : 19999.92																																
4	6000	Co2 : 0.28 Luft : 19999.72																																
5	12000	Co2 : 0.58 Luft : 19999.42																																
6	18000	Co2 : 0.88 Luft : 19999.12																																
Steg	CO2 ppm	Kommentar																																
1	0	Baseline fastställning av omgivningens CO2																																
2	1000	Co2:8 luft:20492																																
3	2000	Co2:30 luft: 21540																																

## F. Experimentplan

	<table border="1"> <tbody> <tr> <td>4</td> <td>3000</td> <td>Co2:50 luft: 20858</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>4000</td> <td>Co2:60 luft: 17628</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>4500</td> <td>Co2:70 luft: 17914</td> </tr> </tbody> </table>	4	3000	Co2:50 luft: 20858	5	4000	Co2:60 luft: 17628	6	4500	Co2:70 luft: 17914
4	3000	Co2:50 luft: 20858								
5	4000	Co2:60 luft: 17628								
6	4500	Co2:70 luft: 17914								
<b>-Dataevaluering, Analys, Variabler</b>	Analys av CO2 med hjälp av Matlab									
<b>-Tidsplan</b>	Experimentet utförs under förmiddagen 29/4.									
<b>Resursbehov/metod</b>	<p>10 LCAQMP, flödesmaskin som genererar CO2 samt en kontrollvolym i form av en plastlåda.</p> <p>Koldioxid Co2 Utrustning för flödeskontroll</p>									
<b>Skisser/layout/ritningar</b>	<p>Uppkoppling: Vi ansluter alla LCAQMP enheter till kontrollvolymen (låda) med slangar. Kontrollvolymen är i sin tur ansluten till FLÖDESMASKINEN.</p> <p>Med flödesmaskinen kan vi ställa väldigt exakta flöden för olika gaser.</p> <p>I detta experiment konfigureras en kanal till att styra flöde av tryckluft och en kanal till flödet av Co2 gas.</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD     FM[FlödesMaskin] -- F1 (Co2) --&gt; KV[Kontrollvolym]     FM -- F2 (luft) --&gt; KV     KV --&gt; LCAQMP[10 x LCAQMP]         </pre> </div>									
<b>Resultat/felkällor/slutsats</b>	<p>Felkällor: Den exakta koldioxidhalten är okänd för spädluften, därmed kan mängden spädninggas som används inte vara korrekt för den co2 halt vi söker.</p>									
<b>Risker</b>	<p>Co2 är inte bra i för höga mängder, enligt <a href="#">sida</a> är koncentrationer högre än 1000ppm ej rekommenderat. Därmed är det en bra ide att vid experimenttillfället göra vad som kan göras för att öka ventilations luften i rummet.</p>									

# G

## Mätningar



Figur G.1: Foto på hur laboriemätningen ser ut



**Figur G.2:** Foto på hur mätningen på Volvo utomhus ser ut

Testuppsättning: Enhet 1, 2, 3 och 4 samt frog sattes närmast avgasrör. Enhet 5 och 6 ställdes 70 cm till vänster om avgasröret. Enhet 7 och 8 ställdes 70 cm bakom avgasröret och enhet 9 samt 10 ställdes 70 cm till höger om avgasröret.



**Figur G.3:** *Figur över hur fältmätning vid Frihamnen busshållplats genomfördes.*



**Figur G.4:** *Figur över hur fältmätningen vid Gårda genomfördes.*

# H

## Prislista

	Antal tot	Styckpris kr	Reglerat styckpris	Antal per enhet	Styckpris per enhet
<b>Sensorer</b>					
Adafruit BME680	10	212	212	1	212
Adafruit CCS811	10	190	190	1	190
Adafruit Feather Cortex-M0 Adalogger	10	215,7	215,7	1	215,7
CoziR-LP CO2	10	1367,95	1367,95	1	1367,95
SDS011 Joy-it-sen	10	349	349	1	349
AdaFruit Ultimate GPS MTK3339	10	396	396	1	396
AlphaSense NO2 sensor, NO2-A43F	10	523,2	523,2	0	0
AlphaSense Ozone sensor, OX-A431	10	545	545	0	0
AlphaSense AFE, monteringskort	10	1351,6	1351,6	0	0
				tot:	<b>2 730,65 kr</b>
<b>Elektronik och kablage</b>					
Litiumbatteri 3v CR1220	10	21,9	21,9	1	21,9
Powerbank Deltaco 10000mAh	10	88	88	1	88
Transcend 16GB microSDHC	10	85,76	85,76	1	85,76
Stacking Headers 12-pin	12	12	12	1,2	14,4
Red 3mm LED, 15 deg	10	4,36	4,36	1	4,36
MRS15 Resistor A/P, 0.4W 22R	10	0,546	0,546	1	0,546
Carbon Resistor, 0.5W	10	0,407	0,407	1	0,407
Wire jumpers M/M	10	24,92	24,92	1	24,92
Wire jumpers F/M	10	24,92	24,92	1	24,92
				tot:	<b>265,21 kr</b>
<b>Material Huvudenhet</b>					
Akrylplast ark 2mm 1kvm	1	750	30	1	30
Filament 3D printning	10	10	10	1	10
				tot:	<b>40,00 kr</b>
<b>Diffusionstork</b>					
Packningsmaterial	20	1	1	2	2
Aluminiumrör 65x2 1m	1	100	40	1	40
Filterpapper	1	252	2,52	4	10,08
Silicapellets, Kiselgel med fuktindikator 5kg	1	992,6	23,8224	1	23,8224
Akrylrör 70x3 2m	1	324	11,34	1	11,34
Filament 3D printning	10	15	15	1	15
Gummislang Dy 9mm, L 40mm	10	20	20	1	20
				tot:	<b>122,24 kr</b>
<b>Fästelement</b>					
Gängstång M5 1m	8	24,56	17,192	1	17,192
Skruv och mutter M5	1	29,8	29,8	1	29,8
Loctite All-Plastic superlim	5	79,9	39,95	1	39,95
Slangklämmor	20	9,99	9,99	2	19,98
				tot:	<b>106,92 kr</b>

Pris per LCAQMP exkl NO2&Ozon

**3 265,0 kr**

Pris per LCAQMP inkl NO2&Ozon

**5 684,8 kr**

Figur H.1: Prislista på komponenter samt pris per LCAQMP

# I

## Risicanalys

Nr	Area / Objekt / Task <i>Describe what is being assessed</i>	RISK ASSESSMENT										ACTION PLAN						FOLLOW UP			EMERGENCY RESPONSE		
		Risk source <i>Describe the risks identified. One line for each risk.</i>	Risk Descriptions / Comments <i>Describe the damage the risk may cause as a result of the identified event.</i>	Designation <i>PP/PA/PP/PA/K</i>	Risk analysis 1-5			Improvement Suggestions / Measures <i>Measures to eliminate or reduce the risk. Also state if they are NP/No or other document reference</i>			Risk analysis 1-5			Responsible / Owner <i>Personnel, department, division (short)</i>	Follow up date <i>When the next assessment is to be carried out</i>	Risk analysis 1-5			What to do if the identified event occurs.				
					K	S	Risk	K	S	Risk	K	S	Risk										
1	Tabell i förfrågningsformulär	Material, verktyg och redskap	Fysiska skador av material, redskap och verktyg	PP/PA/K	3	2	6	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	(Nej inget ska göras)	2	3	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag						
		Färdutrustning av material redskap och verktyg kan skada man och miljö	PP/PA/K	2	3	6	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	(Nej inget ska göras)	2	3	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Tyckskrift	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	PP/PA/K	4	2	8	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	(Nej inget ska göras)	4	1	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag						
		Ammunitionsstift (partiklar)	PP/PA/K	2	2	4										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Partiklgenerering	PP/PA/K	2	2	4										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Dålig hållning, långa perioder stående eller sitta, hög energi, bestrålning, kan också bli skadligt	PP/PA	3	5	15	Try passera och säkerställa arbetsmiljö	(Nej inget ska göras)	3	3	9	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Dålig ljudnivå och icke-ergonomi	PP/PA/K	1	3	3										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Temperaturen kan också bli skadlig och luftkonditioneringssystem	PP/PA	1	3	3										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Luftkonditioneringssystem kan också bli skadligt	PP/PA	1	3	3										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Koncentrationen av material, redskap och verktyg	PP/PA/K	3	3	9	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	(Nej inget ska göras)	2	2	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	PP/PA/K	2	3	6										Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Dålig ljudnivå och icke-ergonomi	PP/PA/K	3	4	12	Ven systemet inte redskapen och in passera varan arbetet	(Nej inget ska göras)	2	2	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Temperaturen kan också bli skadlig och luftkonditioneringssystem	PP/PA	3	5	15	Try passera och säkerställa arbetsmiljö	(Nej inget ska göras)	2	2	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Luftkonditioneringssystem kan också bli skadligt	PP/PA	3	5	15	Try passera och säkerställa arbetsmiljö	(Nej inget ska göras)	2	2	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Generella försiktighetsåtgärder har kommunicerats till alla verkstadsarbetare		3	3	9	Verksamhetsplanering har kommunicerats till alla verkstadsarbetare	(Nej inget ska göras)	2	3	6	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Generella försiktighetsåtgärder har kommunicerats till alla verkstadsarbetare		3	3	9	Verksamhetsplanering har kommunicerats till alla verkstadsarbetare	(Nej inget ska göras)	2	3	6	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Generella försiktighetsåtgärder har kommunicerats till alla verkstadsarbetare		3	3	9	Verksamhetsplanering har kommunicerats till alla verkstadsarbetare	(Nej inget ska göras)	2	3	6	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Person utomhus i väntande, vänta		3	4	12	Try passera och säkerställa arbetsmiljö	(Nej inget ska göras)	3	4	4	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							
		Challans arbetsbeteende om man jämför		3	3	9	Try passera och säkerställa arbetsmiljö	(Nej inget ska göras)	1	3	3	(Nej inget ska göras)				Actual planer, work meeting, handling, follow-up and eventuellt materia tillhandtag							

Figur I.1: Risicanalys för olika experiment och fall