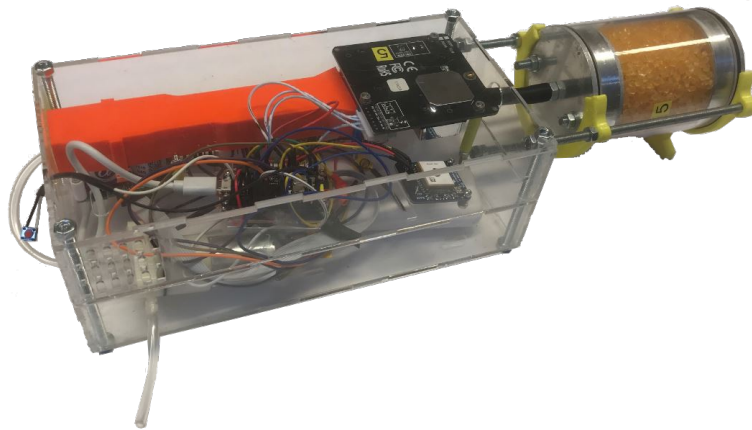




CHALMERS



Mätningar av luftföroreningar i Göteborg

Partikelemissioner från fordon och andra utsläppskällor

Kandidatarbete inom Mekanik och maritima vetenskaper

Joakim Edby
Axel Eiman
Nils Hansson Jutblad
Rasmus Hultén
Frej Perbo
Erik Stigling Svantesson

INSTITUTIONEN FÖR MEKANIK OCH MARITIMA VETENSKAPER

CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021
www.chalmers.se

KANDIDATARBETE 2021:07

Mätningar av luftföroreningar i Göteborg

Partikelemissioner från fordon och andra utsläppskällor

Joakim Edby
Axel Eiman
Nils Hansson Jutblad
Rasmus Hultén
Frej Perbo
Erik Stigling Svantesson



CHALMERS

Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Förbränning och framdrivningssystem
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2021

Mätningar av luftföroreningar i Göteborg
Partikelemissioner från fordon och andra utsläppskällor
Joakim Edby
Axel Eiman
Nils Hansson Jutblad
Rasmus Hultén
Frej Perbo
Erik Stigling Svantesson

©

Joakim Edby
Axel Eiman
Nils Hansson Jutblad
Rasmus Hultén
Frej Perbo
Erik Stigling Svantesson, 2021.

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

Examinator: Mats Andersson, Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper

Kandidatarbete 2021
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Förbränning och framdrivningssystem
Chalmers Tekniska Högskola
SE-412 96 Göteborg
Telefon +46 31 772 1000

Omslag: Plattformen LCAQMP

Skrivet i L^AT_EX
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Göteborg, Sverige 2021

Mätningar av luftföroreningar i Göteborg
Partikelemissioner från fordon och andra utsläppskällor
Joakim Edby
Axel Eiman
Nils Hansson Jutblad
Rasmus Hultén
Frej Perbo
Erik Stigling Svantesson
Institutionen för mekanik och maritima vetenskaper
Chalmers Tekniska Högskola

Abstract

Air pollution is a global health issue. Each year, approximately 4.2 million deaths are attributed to air pollution. Furthermore, many air pollutants, such as carbon dioxide (CO_2), are also greenhouse gases and contribute to global warming.

Traditionally, measuring air pollution requires expensive and immobile instruments. A previous bachelor thesis therefore developed a low cost air quality measuring platform (LCAQMP) with the ability to measure PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 , VOC, temperature, relative humidity, position and time.

The purpose of this project was to further develop and evaluate the LCAQMP and to collect data through outdoor and controlled measurements.

A new pump and air channel with an integrated housing for the CO_2 sensor was mounted on the LCAQMP. Tests showed promising results for the new air channel in regards to rise time. However, the air pump contributed less to this. In addition to this, two new sensors capable of measuring NO_2 and O_3 were implemented; these do not currently work.

The LCAQMP was able to show how air pollution changes geographically and over time. For instance, the platform was used to detect traffic during rush hour and show that PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ decrease with distance from major roads. Furthermore, LCAQMP was used to show that the mass concentration of PM_{10} was 80 % higher in the middle of Gothenburg compared to a nature reserve close to the center. Finally, the platform was used to calculate emission factors for gasoline and diesel.

Thus, LCAQMP is a useful measuring device but can be further examined, especially its sensors for measuring NO_2 and O_3 . Lastly, improvements can be made in regards to the user friendliness.

Keywords: LCAQMP, air quality, air pollution, PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO_2 , VOC, NO_2 , O_3

Sammanfattning

Luftföroreningar är ett globalt hälsoproblem. Varje år sker uppskattningsvis 4,2 miljoner dödsfall kopplade till luftföroreningar. Många luftföroreningar är växthusgaser och bidrar till den globala uppvärmningen.

Traditionellt har dyra och otympliga instrument använts för att mäta luftföroreningar. Ett tidigare kandidatarbete utvecklade därför lågkostnadsplattor benämnda LCAQMP (Low Cost Air Quality Measuring Platform) med möjlighet att mäta PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , VOC samt temperatur, relativ luftfuktighet, position och tid.

Syftet med detta arbete var att vidareutveckla och utvärdera LCAQMP samt använda den för att samla in luftdata för analys. Mätdata samlades in genom fältmätningar och kontrollerade mätningar.

En ny pump och luftkanal med integrerad kåpa har monterats på plattformen. Tester visade att den integrerade kåpan minskade stigtiden för CO_2 -sensorn men att pumpens inverkan på stigtiden är liten. Vidare har en två nya sensorer med möjlighet att mäta NO_2 och O_3 implementerats. De nya sensorerna behöver dock kalibreras.

Fältmätningar påvisade att LCAQMP kan användas för att se hur luftföroreningar varierar geografiskt och över tid. Bland annat användes plattformen för att detektera rusningstrafik och visa att PM_{10} samt $PM_{2.5}$ avtar i samband med avstånd från trafikleder. Dessutom kunde plattformen användas för att visa att masskoncentrationen PM_{10} är 80 % större i stadsmiljö än naturmiljö. Slutligen användes plattformarna för att ta fram emissionsfaktorer för bensin och diesel.

LCAQMP är därför en användbar plattform, men behöver undersökas ytterligare. Framförallt vad gäller dess tillförlitlighet med NO_2 och O_3 -sensorerna. Dessutom kan plattformen förbättras genom att öka användarvänligheten.

Nyckelord: LCAQMP, luftkvalitet, luftföroreningar, PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 , VOC, NO_2 , O_3

Förord

Denna rapport är ett kandidatarbete inom Maskinteknik genomfört på Chalmers Tekniska Högskola. Arbetet har utförts av Joakim Edby, Axel Eiman, Nils Hansson Jutblad, Rasmus Hultén, Frej Perbo, och Erik Stigling Svantesson. Projektet genomfördes under vårterminen 2021.

Vi vill rikta ett stort tack våra handledare Jonas Sjöblom och Patrik Wåhlin, samt examinator Mats Andersson för att ha bidragit med värdefull kunskap och råd som varit till stor hjälp under projektets gång. Björn Wåhlstedt och Erik Svensson från Göteborgs Miljöförvaltning, samt Peter Molnar tackas även för att ha möjliggjort intressanta mätningar. Ett sista tack riktas till Chalmers Vera Team för att ha bidragit med verktyg, och eXPerimentverkstaden för att ha erbjudit 3D-skrivare.

Innehåll

1	Introduktion	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	3
1.3	Frågeställningar	4
1.4	Avgränsningar	4
2	Teori	5
2.1	Luftföroreningar och meterologi	5
2.1.1	PM _{0.1} PM _{2.5} och PM ₁₀	5
2.1.2	Kvävedioxid	6
2.1.3	Ozon	6
2.1.4	VOC	7
2.2	Krafter på partiklar	7
2.3	Mätprinciper	8
2.3.1	Elektrokemiska sensorer	8
2.3.2	Optiska sensorer	9
2.3.3	MOX-sensorer	9
2.4	Emissionsfaktorer	9
3	Metod	11
3.1	Vidareutveckling av plattformen	11
3.1.1	Förbättring av stigtid	11
3.1.2	Implementering av sensorer för NO ₂ och O ₃	12
3.1.3	Kod för NO ₂ -A43F och OX-A431	13
3.1.4	Förändringar i kod	14
3.2	Kontrollerade mätningar	14
3.2.1	MOMENT I: Testmätning VOC	15
3.2.2	MOMENT II: CO ₂ , NO ₂ och VOC mätning för kalibrering	16
3.2.3	MOMENT III: Test av luftpump och kåpa	18
3.2.4	MOMENT IV: Stigtidexperiment CO ₂	19
3.2.5	MOMENT V: Batteritid med luftpump	21
3.2.6	MOMENT VI: NO ₂ - mätning av förbränningsmotorer	21
3.2.7	MOMENT VII: Dieselmotor i testcell	23
3.2.8	MOMENT VIII: Test av förluster i slang	24
3.3	Fältmätningar	25
3.3.1	MOMENT IX: Referensmätning för NO ₂ och O ₃ på Nordstan	25
3.3.2	MOMENT X: Nyttjandetid hos diffusionstork	26
3.3.3	MOMENT XI: Mätningar vid trafikleder	27
3.3.4	MOMENT XII: Stadsmiljö jämfört med naturmiljö	28
3.4	Emissionsfaktorer för PM	29
3.5	Datahantering	29

4	Resultat och analys	30
4.1	Vidareutveckling av plattformen	30
4.2	Kontrollerade mätningar	34
4.2.1	MOMENT I: Testmätning VOC	34
4.2.2	MOMENT II: CO ₂ , NO ₂ och VOC mätning för kalibrering	34
4.2.2.1	Resultat från CO ₂ -mätningen	35
4.2.3	MOMENT III: Test av luftpump och kåpa	36
4.2.4	Moment IV: Stigtidexperiment CO ₂	37
4.2.5	MOMENT V: Batteritid med luftpump	39
4.2.6	MOMENT VI: NO ₂ - mätning av förbränningsmotorer	39
4.2.7	MOMENT VII: Dieselmotor i testcell	40
4.2.8	MOMENT VIII: Test av förluster i slang	43
4.3	Fältmätningar	43
4.3.1	MOMENT IX: Referensmätning för NO ₂ och O ₃ på Nordstan	43
4.3.2	MOMENT X: Nyttjandetid av diffusionstork	45
4.3.3	MOMENT XI: Mätningar vid trafikleder	48
4.3.4	MOMENT XII: Stadsmiljö jämfört med naturmiljö	54
4.4	Emissionsfaktorer för PM	56
5	Diskussion	58
5.1	Problem och förbättringsmöjligheter hos LCAQMP	58
5.1.1	Användarvänlighet	58
5.1.2	Hållfasthet	58
5.1.3	Högt uppmätta temperaturer	58
5.1.4	Läckage in till luftkanal	59
5.1.5	Diffusionstork	59
5.1.6	Plattformen slutar skriva data	59
5.2	Individuella sensorer	59
5.2.1	CCS811 - VOC	60
5.2.2	Övergripande om OX4321 & NO2A43F	60
5.2.3	Problem med PT1000-sensorn	60
5.3	Mätmetoder	61
5.3.1	Kontrollerande mätningar	61
5.3.2	Fältmätningar	62
5.3.3	Stigtidsexperiment CO ₂	62
5.3.4	Alternativ metod för att bestämma diffusionstorkens nyttjandetid	63
5.3.5	Emissionsfaktor	63
5.4	Samhälleliga och etiska aspekter	64
6	Slutsats	65
6.1	NO ₂ - och O ₃ -sensorns pålitlighet	65
6.2	Luftpumpens förbättring av stigtiden	65
6.3	Geografiska och tidsmässiga variationer av luftföroreningar	65

6.4	Livslängd batteri i LCAQMP	66
6.5	Emissionsfaktor för PM	66
6.6	Slutliga rekommendationer och förhoppningar	66
Referenser		67
A	Ritning	II
B	Pseudokod	III
C	Datablad och produktblad	V
D	AlphaSense Application Notes	IX
E	Uppstartsguide av LCAQMP	XV
F	Plattformarnas uppställning	XVII

Begrepp- och ordlista

AAG: Förkortning av Atomizer Aerosol Generator. AAG är en partikelgenerator och genererar partiklar.

Adafruit Adalogger Feather M0: är ett utvecklingskort från Adafruit med förmåga 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.

Arduino: Är ett mikrokontrollerkort som är öppen hårdvara.

BME680: är ett utvecklingskort från Adafruit som mäter lufttryck, luftfuktighet, temperatur och VOC.

CCS811: är ett utvecklingskort som innehåller sensorn CCS811 från AME och mäter VOC samt CO₂.

CO₂: Koldioxid är en färglös gas i rumstemperatur och är en viktig växthusgas.

CozIR-LP: är en CO₂-mätare från Gas Sensing Solutions. Den använder sig av en IR-princip för att bestämma CO₂-halt.

Diffusionstork: Silica används som adsorptionsmedel för att binda fukt från luften.

GPS: Global Positioning System, är ett system för satellitnavigering som ger GPS-mottagare möjligheten att bestämma sin position.

IDE: Förkortning för integrated development environment, mjukvara som är en utvecklingsmiljö inom programmering.

LCAQMP: Förkortning för Low Cost Air Quality Measurement Platform, ett luftsensorpaket som mäter luftföroreningar utvecklat av studenter på Chalmers Tekniska Högskola.

Luftpump: Är en pump som med hjälp av en kolv och ett elastiskt membran förflyttar en fluid.

MFC: Förkortning för Mass Flow Controller, används för att kunna reglera gasflöden och dess koncentrationer.

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

NO₂-A43F: är en sensor som mäter NO₂.

O₃: En molekyl som består av tre sammansatta syreatomer. Skadlig vid inhalering vilket gör det farligt ifall gasen finns vid marknära nivåer. Kan annars återfinnas högt upp i atmosfären i det så kallade ozonskiktet där molekylen absorberar UV-strålning.

OX-A431: är en sensor som mäter O₃.

PM_{0.1}, PM_{2.5}, PM₁₀: PM är en förkortning för Particulate Matter, vilket är små luftburna partiklar. De klassas efter diameter i mikrometer vilket anges av tillhörande tal. PM_{2.5} är exempelvis partiklar som är mindre än 2,5 µm i diameter.

RH: Förkortning för relativ fuktighet (*eng. relative humidity*), ett mått på mättnadsgrad av vattenånga i luften.

SDS011: Är en sensor som mäter både PM_{2.5} och PM₁₀ via ljusspridningsteknik som mäter koncentrationen av partiklar i luften.

TVOC: Total Volatile Organic Compounds, betecknar sammanlagda koncentrationen av Volatile Organic Compounds i luften. TVOC är inte entydigt bestämd, och proportionerna och kombinationer av VOC varierar.

VOC: Lättflyktiga organiska föreningar (*eng. volatile organic compound*) är en grupp organiska föreningar som lätt förångas i rumstemperatur. Halten av lättflyktiga kolväten i luften påverkar hälsan och miljön. Bland annat bidrar de till bildandet av marknära ozon.

1 Introduktion

Luftföroreningar är ett globalt miljö- och hälsoproblem där några av de största utsläppskällorna är förbränningsmotorer, energiproduktion och industriella processer [1]. Varje år sker uppskattningsvis 4,2 miljoner dödsfall kopplade till luftföroreningar och nio av tio människor andas in luft som överstiger WHO:s gränsvärden. En av många åkommor med kopplingar till luftföroreningar är lungcancer. WHO uppskattar att 14 % av fallen orsakas av omgivande luftföroreningar [2]. Många av de ämnen som bidrar till luftföroreningar är också växthusgaser, och bidrar till den globala uppvärmningen [3].

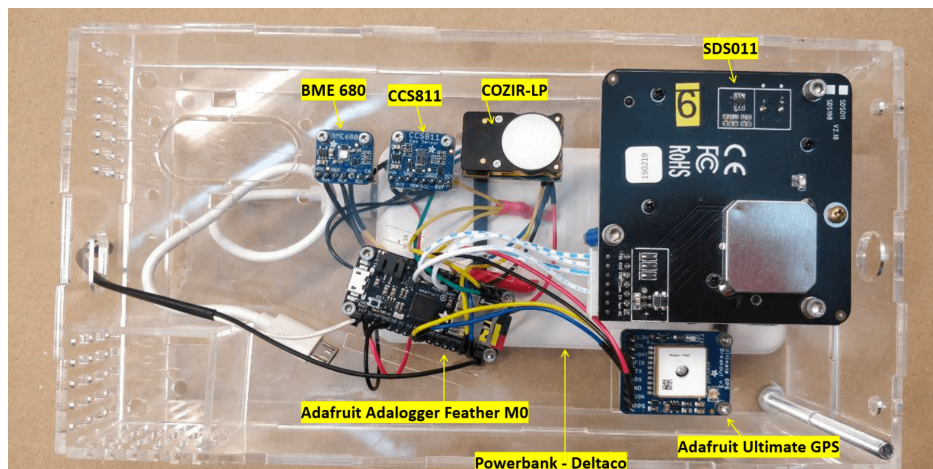
De senaste åren har luftkvaliteten förbättrats i Sverige [4] och år 2020 klarade Göteborg för första gången gränsvärdet för luftföroreningen kvävedioxid (kemisk beteckning NO_2) sedan mätningarna startade 1976 [5]. Gränsvärdet är en så kallad dygnsnorm, vilket innebär att halten under ett dygn i snitt ska ligga under en viss nivå, i detta fall $60 \mu\text{g}/\text{m}^3$ NO_2 . Halten får inte överstiga mer än sju dygn under ett år. I Göteborg utförs mätningar av luftföroreningarna Particulate Matter ($\text{PM}_{2.5}$, PM_{10}), kvävedioxid (NO_2) och marknära ozon (O_3) enligt lagkrav och miljömål [6].

De instrument som används vid mätningarna är otympliga och dyra, och lämpar sig därför inte för personligt bruk. Att privatpersoner kan bidra med mätningar är önskvärt då det ger dem möjlighet att samla in egen data och därmed vädja för att skapa en hälsosammare luftkvalitet. Vidare kan lågkostnadssensorer göra att privatpersoner samlar in en större mängd data från fler positioner än vad som är möjligt med de instrument som huvudsakligen används idag.

1.1 Bakgrund

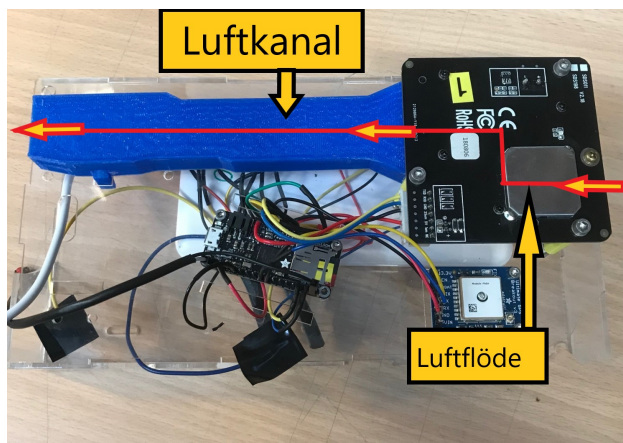
Arbetet bygger vidare på ett tidigare kandidatarbete där tio lågkostnadsplattformar benämnda LCAQMP (Low cost air quality measuring platform) med möjlighet att mäta luftkvalitet utvecklades. [7] Flera olika sensorer integrerades i lådor gjorda av akrylplast, se figur 1. Plattformarnas sensorer hade möjlighet att mäta $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , flyktiga organiska ämnen (VOC), koldioxid (CO_2), lufttryck, relativ luftfuktighet (RH), temperatur samt position och tid från GPS. Nedan följer en punktlista med de ingående sensorerna och vilka ämnen eller storheter de mäter.

- SDS011 - $\text{PM}_{2.5}$ och PM_{10}
- CozIR-LP - CO_2
- CCS811 - VOC
- BME680 - RH, lufttryck, temperatur och VOC
- Adafruit Ultimate GPS - Position och tid



Figur 1: Grundläggande komponenter i LCAQMP från föregående projekt [7].

En luftkanal är monterad ovanpå tre av sensorerna eftersom luftföroreningar förändras över tid, exempelvis vid en trafikerad väg innan och under rusningstrfik. Sensorn SDS011 agerar som plattformens inlopp och har en inbyggd fläkt som trycker luft genom kanalen vilket gör att sensorerna snabbare kan reagera på förändringar i den omgivande luften. Se figur 2 för illustration av luftkanalen och luftflödet.



Figur 2: Flödet genom luftkanalen.

Utöver sensorerna finns ett kretskort (Adafruit Adalogger Feather M0) som spänningssätter sensorerna och möjliggör att sensorernas mätvärden sparas på ett micro-SD kopplat till kretskortet. Ett batteri (Deltaco Powerbank) används som spänningskälla till kretskortet.

Vidare har en diffusionstork implementerats, se figur 3, i syfte att minska mätfel på grund av fuktens inverkan på partiklarna. Torken monteras vid inloppet så att luften dras igenom den och gör att fukt diffunderar in i silican. Detta resulterar i en torrare luft vid mätarna

och mindre mätfel till följd av luftfuktighet. Diffusionstorken har en begränsad nyttjandetid eftersom silican till slut mättas och inte kan binda mer fukt. Torr silica har en orange färg, men blir mer ljus och genomskinlig ju mer fukt som binds.



Figur 3: Diffusionstorken är fylld med silica och torkar luften.

I dagsläget mäts luftkvaliteten kontinuerligt från nio platser i Göteborg [8]. Från dessa stationer mäts olika luftföroreningar och med hjälp av beräkningsmodeller beräknas medelvärden för hela Göteborgs stad [9]. Det finns en kunskapslucka när det gäller huruvida dessa medelvärden ger en bra representation av specifika platser runt om i Göteborg. Fler mätpunkter skulle kunna ge en mer rättvis bild av luftföroreningarna i Göteborg och då LCAQMP utvecklats i en behändig storlek kan den enkelt flyttas runt och samla data från flera platser.

Däremot finns det flera delar av plattformen som kan utvecklas och behöver utvärderas. Exempelvis saknades sensorer för de viktiga luftföroreningarna NO_2 och O_3 . Föregående år köptes sensorerna NO2-A43F och OX-A431 in, men drabbades av leveransproblem till följd av covid-19, vilket är varför denna implementering kvarstod. Vidare var det inte klarlagt huruvida plattformen tillförlitligt kan mäta VOC, eller hur länge diffusionstorken fungerar. Stigtiden för vissa sensorer ansågs långsamma och därför behöver det undersökas om ett ökat luftflöde genom kanalen kan förbättra den. Därutöver fanns det goda möjligheter till förbättring av användarupplevelsen.

Omfattande fältmätningar med plattformen saknas. Dessa är viktiga för att undersöka varför luftföroreningar skiljer sig mellan olika platser men kan också användas för att jämföra plattformens mätningar mot andra referenser.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att vidareutveckla och utvärdera tidigare års plattform, LCAQMP. Vidareutveckling ska ske genom att implementera nya sensorer och förbättra stigtiden hos

samtliga sensorer. Utvärderingen fokuserar särskilt på huruvida plattformen kan användas för att se geografiska skillnader i luftföroreningar över tid och lokalisera emissionskällor.

1.3 Frågeställningar

Utifrån syftet har ett antal frågeställningar formulerats vilka projektet syftar till att besvara.

- Kan plattformens tidigare sensorer samt de nya sensorerna NO2-A43F och OX-A431 ge tillförlitliga data?
- Kan stigtiden för CO₂-sensorn förbättras?
- Kan man använda plattformen för att ta fram en emissionsfaktor för PM₁₀ och PM_{2.5}?
- Hur länge kan plattformen användas för att mäta i fält?
- Kan plattformen visa hur föroreningar varierar geografiskt och över tid?

1.4 Avgränsningar

O₃ är en skadlig gas att inhalera. Covid-restriktioner gjorde att experiment med gasen ej var genomförbara, då handledningen som krävdes för att utföra experimenten på ett säkert sätt var begränsad. Gruppen valde därför att inte utföra experiment i laborationsmiljö med O₃.

Då LCAQMP är en redan utvecklad sensorplattform baserat på Arduino kommer projektet begränsas till vidareutveckling av sensorplattformen med Arduinos mjukvara och hårdvara som är kompatibel till mjukvaran.

LCAQMP önskas hålla en relativt låg kostnad alltså att privatpersoner ska kunna inhandla en pålitlig sensorplattform till ett överkomligt pris. Därutav finns en begränsning på pris för de ingående komponenter i sensorplattformen.

Projektet kommer i första hand mäta luftkvaliteten i Göteborgsområdet således begränsas projektet geografiskt till Göteborgsområdet.

2 Teori

Följande kapitel ämnar till att ge läsaren en god teoretisk grund och därmed större förståelse för rapportens innehåll.

2.1 Luftföroreningar och meterologi

Luftföroreningar påverkar både hälsa och miljö negativt. De är gaser eller luftburna partiklar som uppstår naturligt eller från antropogena processer [1]. De vanligast förekommande är CO_2 , VOC och olika typer av aerosoler. I Göteborg står fordonstrafik för det enskilt största bidraget till luftföroreningar [8].

Fordonstrafiken bidrar till utsläpp av olika luftföroreningar [10]. Fordon med förbränningsmotorer har avgasutsläpp i form av bland annat CO_2 och NO_2 , men även fordon med elektriska drivlinor släpper ut partiklar vid slitage av däck och bromsar. Vidare kan fordon återsuspendera vägdamm.

Luftföroreningar sprids och påverkas av väder. Luftströmmar gör att luftföroreningar transporteras bort från dess utsläppspunkter. Kraftiga vindar skingrar luftföroreningar och har en ventilerande effekt på luftkvaliteten i städer. En studie visade att koncentrationen partiklar med diameter 0,5-20 μm avtog i samband med avstånd från en väg och påverkades av vindriktning [11]. Högst koncentration partiklar uppmättes nära vägen, och då vind blåste parallellt med vägen avtog partikelkoncentrationen till hälften efter 50-100 m.

Regn och luftfuktighet har en påvisad negativ korrelation med koncentrationen luftföroreningar [12]. Regndropparna binder till aerosoler i luften som därefter binds upp av marken [13]. Luftströmmar och regn kan alltså bidra lokalt till en minskad koncentration luftföroreningar.

Det finns andra väderfenomen som ökar koncentrationen av luftföroreningar. Inversion är ett sådant exempel, vilket uppstår när luftens temperatur ökar med höjden istället för att minska. Den kalla luften vid marken saknar då möjlighet att stiga förbi den varma luftens skikt vilket förhindrar att vertikala luftströmmar bildas. Inversion är problematiskt i storstäder då luftföroreningar fångas under skiktet utan möjlighet att spridas vidare, vilket resulterar i högre halter och allvarliga hälsorisker för människor. Väderfenomenet förekommer oftast på vinterhalvåret under vindstilla förhållanden och på eftermiddagen när värmestrålningen från marken överskrider värmestrålningen från solen. Även katabatiska vindar kan bidra till inversion vilket innebär att kyld luft från en högre höjd blåser ner till en lägre höjd. [14].

2.1.1 $\text{PM}_{0.1}$ $\text{PM}_{2.5}$ och PM_{10}

Luftburna partiklar (PM, Particulate Matter) är ett samlingsbegrepp för små fragment av material i luften. Partiklarna kan vara både fasta och flytande och härstamma från många olika källor, däribland bildäck, skogsbränder, industrier, och förbränningsmotorer. De klassi-

fieras baserat på storleken, och partiklar med en diameter mindre än 10 mikrometer kallas PM_{10} , medan partiklar vars diameter understiger 2,5 mikrometer kallas $PM_{2,5}$ och partiklar med en diameter under 0.1 mikrometer kallas $PM_{0,1}$, eller ultrafina partiklar [1][15].

Både $PM_{2,5}$ och PM_{10} har skadliga effekter på människors hälsa [15]. $PM_{2,5}$ och PM_{10} är tillräckligt små för att andas in i lungorna och komma in i blodomloppet [1] vilket bland annat kan leda till försämrad lungfunktion, irritation i luftvägarna, och ojämna hjärtslag [15]. En studie har dock visat att det inte enbart är halten PM i sig som är hälsofarlig [16], utan även de specifika ämnen som utgör halten. Särskilt kolbaserade ämnen kopplades till negativa hälsoeffekter.

Sot, i det här sammanhanget, är ultrafina partiklar med storleken 60–100 nm bestående av kol och klassas som en kolbaserad $PM_{0,1}$ [17][18]. Partikeln bildas vid ofullständiga förbränningsprocesser av biomassa och fossila bränslen och är ljusabsorberande, vilket gör att partikeln bidrar till klimatförändringar. Karaktäristiskt för sotpartiklar är deras låga massa som gör att de kan transporteras hundratals mil i atmosfären vilket medför att utsläppskällorna kan befinna sig på stora avstånd från partikeln [18].

I Sverige får koncentrationen PM_{10} inte överstiga $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ under ett dygn fler än 35 gånger per kalenderår, eller i genomsnitt mer än $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ under ett helt år enligt Luftkvalitetsförordningen [19]. Motsvarande medelvärdessiffra för $PM_{2,5}$ är $25 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Den högsta uppmätta halten av PM_{10} av Miljöförvaltningens mätstationer i Göteborg år 2020 var $24,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ och $6,2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för $PM_{2,5}$ [9] vilket innebär att Göteborg klarade kraven från Luftkvalitetsförordningen.

2.1.2 Kvävedioxid

Kvävedioxid (NO_2) är en brunröd giftig gas vilken likt PM främst bildas vid förbränningsprocesser från industrier och trafik. Det finns kopplingar mellan luftrörskatarr och inhalering av kvävedioxid vid låga halter. Utöver dess toxicitet bidrar även gasen till försurning när gasen kommer i kontakt med vatten och bildar salpetersyra [20]. Gasen spelar en betydande roll vid bildandet av marknära ozon [1].

2.1.3 Ozon

Ozon (O_3) är en treatomig syremolekyl som förekommer naturligt i stratosfären i ozonskiktet [21]. Marknära ozon förekommer i biosfären där de bildas när syremolekyler kommer i kontakt med flyktiga organiska ämnen (VOC) samt kvävedioxider. I miljöer med ansenlig mängd kväveoxid (NO) är mängden ozon mindre då ozon tillsammans med kväveoxid bildar syrgas och kvävedioxid. I atmosfären däremot är ozon långlivat och kan transporteras långa sträckor [9]. Forskning ger starkt stöd för koppling mellan korttidsexponering för ozon och hälsofarliga effekter på lungsystemet. I luftkvalitetsförordningen ska det eftersträvas att ozon inte överstiger $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ under ett åttatimmars medelvärde under ett dygn [19]. För Göte-

borg var det högsta uppmätta åttatimmarsmedelvärde 118,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ och därmed överstegs aldrig gränsen 2020 [9].

2.1.4 VOC

VOC är lättflyktiga organiska föreningar, det vill säga kolbaserade ämnen som lätt förångas vid rumstemperatur. De härstammar från både naturliga och antropogena källor och omfattar många olika ämnen.

Antropogena VOC:er kommer från bland annat förbränning och produktion av fossila bränslen, lösningsmedel i färger och beläggningar, användning av biobränsle samt förbränning av biomassa. Dessa utsläpp regleras av Naturvårdsverket då de koncentrationer som uppstår kan vara både hälso- och miljöfarliga [22]. Utöver att vissa är direkt farliga är VOC:er även en komponent vid bildning av marknära ozon och smog.

2.2 Krafter på partiklar

Det finns olika krafter som agerar på partiklar som flödar genom en passage. Dessa kan hindra eller störa partiklarnas rörelseriktning. Nedan redogörs för några av de viktigaste krafterna för det här arbetet.

Gravitationskraft: Partiklar har en massa vilket gör att de påverkas av gravitationen. Större partiklar påverkas mer än små. Vid låga hastigheter kan gravitationskraften påverka partiklarnas rörelsebana [23].

Diffusionskraft: Partiklar påverkas även av en diffusionskraft, som gör att partiklarna rör sig mot områden med lägre koncentration [23].

Elektrostatisk kraft: Partiklar kan vara elektriskt laddade och därmed påverkas av en elektrisk kraft. För en högt laddad partikel är den elektriska kraften mycket större än gravitationskraften [23].

Tröghetskraft: Partiklars tröghet kan påverka deras möjlighet att följa en luftström i en kanal. När partiklars tröghet är större än luftmotståndet innebär det att partikeln motstånd till rörelseförändringar är större än kraften av rörelseförändringen. Tröga partiklar kommer då avvika från luftströmmens vid förändringar av deras bana. I en kanal kan det innebära att partiklar med stor tröghet fastnar i väggar. Stora partiklar har större tröghet än små. Generellt gäller att partiklar mellan 5-10 μm (PM_{10}) har större tröghet än kraften från luftflödet [24].

Adhesion: Adhesion innebär att olika partiklar fästs vid varandra och bildar större partiklar. Fenomenet orsakas bland annat av Van der Waals-krafter, elektrostatiska krafter, och ytspänning. Adhensionskraften ökar i samband med högre relativ luftfuktighet och större partiklar [23].

Givet samma densitet gäller för partiklar mellan 0,1-10 μm i diameter att adhesionskraften är mycket större än gravitationskraften (mellan 6-10 tiopotenser). Även tröghetskraften är ungefär 100 gånger mindre än adhesionskraften [23].

2.3 Mätprinciper

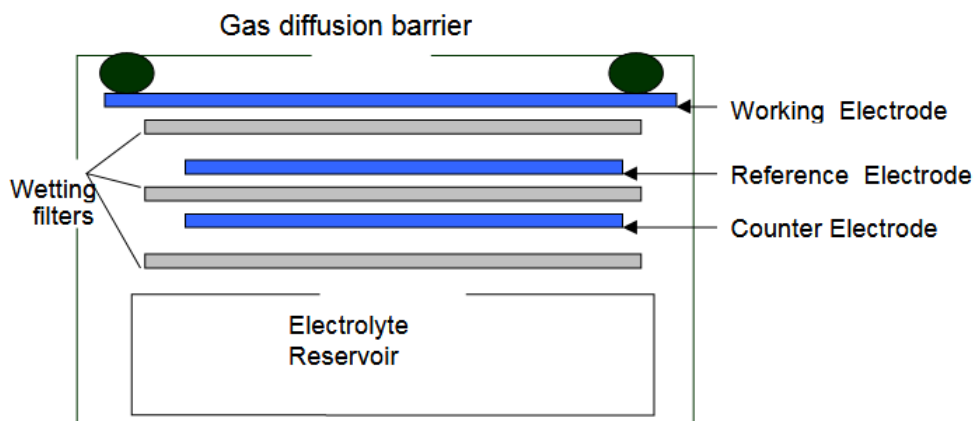
Plattformen har olika sensorer som har olika mätprinciper. I tabell 1 visas en sammanställning av plattformens sensorer samt deras mätprinciper. Dessa mätprinciper förklaras i mer detalj nedanför.

Tabell 1: De olika sensorernas mätprinciper.

Sensorer	Mätprincip
SDS011 & CozIR-LP	Optisk
BME680 & CCS811	MOX
OX-A431 & NO2-A43F	Elektrokemisk

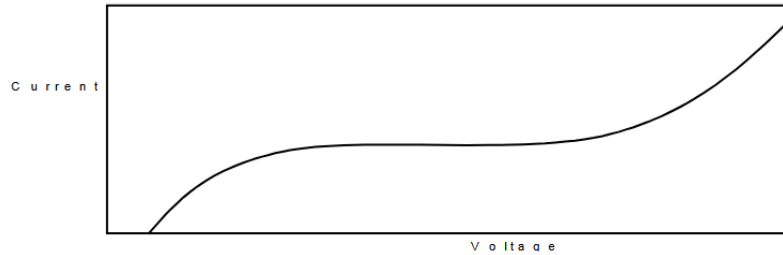
2.3.1 Elektrokemiska sensorer

Sensorerna NO2-A43F och OX-A431 (vilka mäter NO_2 respektive O_3) som implementerades under detta projekt bygger på en elektrokemisk mätprocess. Huvudprincipen bakom sensorerna är att det bildas en elektrokemisk reaktion när gas diffunderar genom membranet på toppen av sensorerna och kommer i kontakt med elektrodena inuti sensorn vilket ger upphov till strömmar som kan läsas av. Se figur 4 nedan för schematisk skiss. Beroende på vilken gas som kommer i kontakt med 'working electrode' först sker det antingen en oxidation vilket orsakar ett flöde av elektroner från 'working electrode' till 'counter electrode', eller en reduktion vilket istället orsakar ett elektronflöde i motsatt riktning. Oavsett riktning bildas en ström som är proportionerlig till mängden gas [25].



Figur 4: Schematisk skiss av en elektrokemisk gassensor. Från [26].

Den så kallade 'reference electrode' ser till att potentialen för 'working electrode' hålls på en stabil nivå. Detta beror på att man vill att sensorn ska arbeta i ett visst linjärt intervall, se figur 5 nedan.



Figur 5: Typisk ström/spänning-kurva för en elektrokemisk sensor. Hämtad från [26].

2.3.2 Optiska sensorer

Optiska mätmetoder baseras på att läsa av hur ämnet som mäts påverkar ljus i som strålas mot det. Beroende på mängd och storlek av de partiklar eller gaser som mäts kommer ljuset spridas på olika vis. Det spridda ljuset kan då avläsas och omvandlas till elektriska signaler som förstärks och processeras. Exempelvis för partikelsensorer kan man beroende på vågformens utseende härleda mängden partiklar och dess diametrar [27].

2.3.3 MOX-sensorer

Övergripande kan mätprincipen för MOX-sensorer (metal oxide) förklaras utifrån att halvledare reagerar på gaser i luften. Olika gaser förändrar halvledarens konduktivitet vilket framkallar en analog elektrisk signal som sedan används för att urskilja vilka gaser som finns i luften. Ett noggrant val av olika halvledande material krävs för att få en välfungerande sensor [28].

2.4 Emissionsfaktorer

En emissionsfaktor anger hur mycket av en viss typ av luftförorening (ex. NO₂, PM eller CO₂) som släpps ut i luften av en viss produkt eller tjänst [29]. Exempelvis kan en emissionsfaktor för CO₂ beskriva hur mycket CO₂ en personbil släpper ut per kilometer.

En emissionsfaktorn för PM, EF_{PM} kan beräknas enligt

$$EF_{PM} = \frac{PM_{Hög} - PM_{Bakgrund}}{CO_{2,Hög} - CO_{2,Bakgrund}} \cdot EF_{CO_2} \quad (1)$$

där $PM_{Hög}$ och $CO_{2,Hög}$ är koncentrationen PM respektive CO₂ precis vid utsläppskällan (exempelvis vid avgasröret på en bil), medan $PM_{Bakgrund}$ och $CO_{2,Bakgrund}$ är koncentrationen

PM respektive CO₂ i bakgrunden [29]. Bakgrundskoncentrationen uppmäts helst på samma plats och tid men med luftföroreningar från emissionskällan borttagna. Det är inte alltid möjligt att ta bort emissionskällan helt. Då görs istället en mätning vid en annan plats med färre utsläppskällor.

CO₂ agerar i det här fallet som spårgas. En spårgas är en gas som kan härledas till samma utsläppskälla och vars koncentration följer samma trend som luftföroreningen man mäter.

Liknande ekvationer, se (2) och (3), kan användas för att beräkna emissionsfaktorer för diesel och bensin. Då är emissionsfaktorn för CO₂ med enhet g/km istället kopplat till förbränningen av diesel och bensin [29].

$$EF_{PM,Diesel} = \frac{PM_{Hög} - PM_{Bakgrund}}{CO_{2,Hög} - CO_{2,Bakgrund}} \cdot EF_{CO_2,diesel} \quad (2)$$

$$EF_{PM,Bensin} = \frac{PM_{Hög} - PM_{Bakgrund}}{CO_{2,Hög} - CO_{2,Bakgrund}} \cdot EF_{CO_2,Bensin} \quad (3)$$

3 Metod

I följande avsnitt beskrivs hur plattformen vidareutvecklades och utvärderades samt hur fältmätningar och kontrollerade mätningar genomfördes. Metoder anges för hur plattformen utvecklades och hur dess prestanda undersöktes i olika former av mätningar.

3.1 Vidareutveckling av plattformen

Plattformen ansågs kunna förbättras och vidareutvecklas på flera olika sätt. En snabbare stigtid för CO₂-sensorn CozIR-LP hade möjliggjort att sensorn reagerade snabbare på förändringar i CO₂-halt. Därför konstruerades en ny luftkanal med en integrerad kåpa och en pump för att öka luftflödet i luftkanalen och därmed förbättra stigtiden för samtliga sensorer. Därutöver implementerades nya sensorer för att mäta NO₂ och O₃. I samband med implementeringen av dessa skrevs ny kod och vissa förändringar av förra års kod gjordes för att kunna skriva data till en CSV-fil under bestämda och jämna intervall. Dessa vidareutvecklingar beskrivs i detalj nedan. För resultat av vidareutvecklingen se kapitel 4.1.

3.1.1 Förbättring av stigtid

Den långsamma stigtiden hos CO₂-sensorn sågs som en tydlig utvecklingsmöjlighet, då en förbättring av stigtiden bland annat skulle kunna ge möjlighet för plattformen att tydligt identifiera olika emissionskällor. Förhoppningen är att man ska kunna särskilja föroreningar som olika fordon avger, och att ge möjlighet jämföra elbilar mot förbränningsfordon exempelvis.

För att förbättra stigtiden undersöktes marknaden efter snabbare sensorer. Vissa andra CO₂-sensorer liknande CozIR-LP baseras på flödessampling snarare än diffusionsprincipen som CozIr-LP använder. Detta fungerar genom att tvinga luften man vill mäta genom eller precis över sensorn istället för att lita på att gasen diffunderar in i sensorn naturligt. Även lösningar för att konvertera befintliga diffusionssensorer till flödessampling hittades [30], vilket är principen bakom lösningen som applicerades på LCAQMP.

Genom att skapa en ny luftkanal med kåpa över CozIR-LP och en luftpump som drar luften genom kanalen och kåpan med större hastighet än flödet som SDS011 bidrar med förväntas stigtiden för samtliga sensorer kunna minskas något.

Den slutgiltiga designen för luftkanalen med kåpa konstruerades och tillverkades i 3D-skrivare. Plasten PETG användes som material för luftkanalen. Den är att föredra gentemot exempelvis PLA då dess glastemperatur är 85 °C, jämfört med 65 °C hos PLA. En högre glastemperatur gör att plasten inte mjuknar lika enkelt. Ytterhöljet av plattformen är av akrylplast och kan vid exponering av direkt solljus värmas upp till höga temperaturer. Måttatta ritningar av luftkanal med integrerad kåpa återfinns i Appendix A.

Pumpen som användes för att driva flödet genom kanalen och kåpan visas i figur 6. Pumpens

inflöde kopplades via en slang till luftkanalens slut och dess utflöde kopplades även den med slang ut ur plattformen. På så vis sugts luft genom kanalen och avlägsnas från enheten.

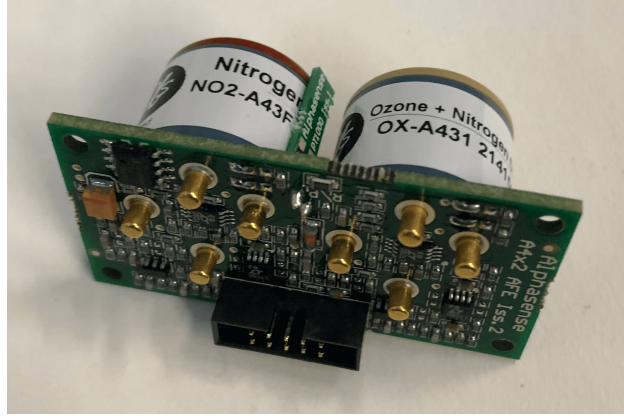


Figur 6: Luftpump innan montering på sensorplattformen.

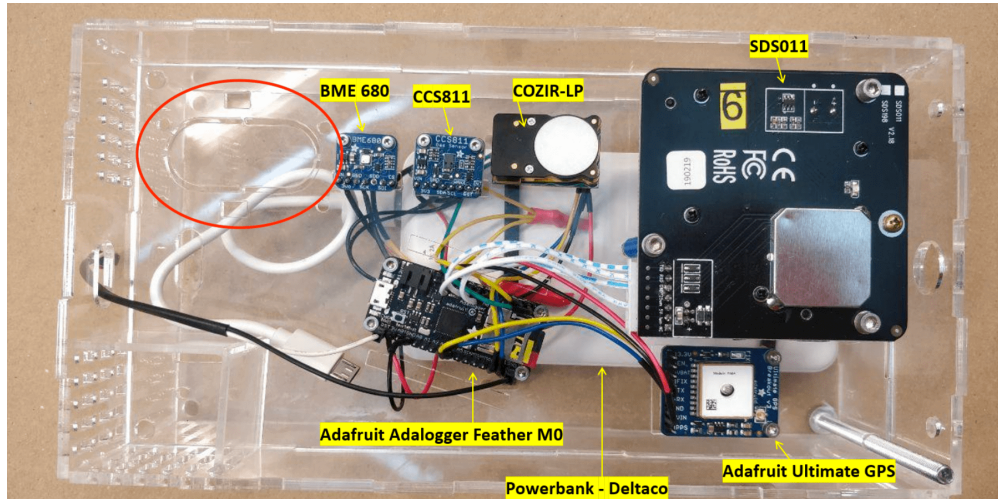
Luftpumpen kopplas till kretskortet och spänningssätts med 3,3 V. Pumpens luftflöde är beroende av spänningen, ju större spänning, desto högre luftflöde. Vid 3,0 V är flödet 0,4 l/min och vid 6,0 V är flödet 0,9 l/min. Vid antagandet om ett linjärt samband mellan flödet och spänningen fås vid 3,3 V ett flöde om 0,45 l/min.

3.1.2 Implementering av sensorer för NO_2 och O_3

Förutom den nya luftkanalen, kåpan och pumpan implementerades även nya sensorer för att mäta NO_2 och O_3 . Dessa var fästa på ett monteringskort enligt figur 7 och monterades med fyra skruvar i det omringade området i figur 8.



Figur 7: Monteringskortet med mätare för NO₂ och O₃.



Figur 8: Monteringsplatsen för NO₂- och O₃-sensorerna med förbereda hål för skruvar. Bild från tidigare års kandidatarbete [7], omarbetad med tillstånd.

3.1.3 Kod för NO₂-A43F och OX-A431

Koden har vidareutvecklats för att kunna läsa in data från sensorerna OX-A431 och NO₂-A43F. Båda är monterade på ett AFE-kort (analog front-end) som i sin tur är kopplat till Adafruit-kortet. OX-A431 mäter både O₃ och NO₂ medan NO₂-A43F endast mäter NO₂. Kortfattat beräknas O₃-koncentrationen genom att man subtraherar koncentrationen NO₂ från NO₂-A43F från OX-A431 enligt

$$(O_3 + NO_2) - NO_2 = O_3 \quad (4)$$

där O₃ och NO₂ inom parantesen är respektive gasers koncentrationer beräknade av OX-

A431, medan NO₂ utanför parantesen beräknats av NO₂-A43F.

Sensorerna har fyra elektroder var varav två av dem läses av programmet: en huvudelektrod benämnd Working Electrode och en hjälpelektrod benämnd Auxiliary Electrode. Mätvärdet från varje elektrod förs över via kablar märkta OP1-4. Utöver dessa sensorer finns också en temperatursensor på AFE-kortet kallad PT1000. Den ansluter till kortet via två sladdar; en som går till en analog pin och en som går till jord.

Sensorernas tillverkare AlphaSense har i dokumentet 'Application Notes' förklarat hur sensorerna ska kalibreras, se Appendix D. Algoritmerna som föreslås i dokumentet har implementerats i Arduino-koden. För OX-A431 användes 'Algoritm 3' och för NO₂-A43F användes 'Algoritm 1'. Bortsett från de uppmätta värdena från elektroderna använder sig dessa algoritmer av kalibreringskonstanter som finns dokumenterade i Arduino-koden. Kalibreringskonstanterna kommer från dokument som följde med sensorerna när de köptes och är baserade på test utförda av AlphaSense. Se Appendix C för datablad och värden.

Utöver kalibreringskonstanterna är NO₂- och O₃-koncentrationerna baserade på temperaturen. Tanken är att PT1000-sensorn ska användas för detta, men på grund av svårigheter med att få korrekta temperaturer från denna sensor har temperaturvärden från BME680 använts istället.

3.1.4 Förändringar i kod

Utöver den nya kod som NO₂- och O₃-sensorerna krävde gjordes två förändringar i koden. Den första förändringen var införandet av möjligheten att läsa mätvärden med ett jämnt intervall baserat på Arduinos inbyggda funktion millis() som ger antalet millisekunder som passerat sedan enheten startades. Tidigare sparade mätplattformen mätdata med oregelbundna intervall med ungefär två sekunders mellanrum. Den uppdaterade koden samplar numera data med exakt 2000 millisekunders intervall.

Den andra förändringen var att spara data i en lång sträng innan den skrivs ut. Det är onödigt att skriva till SD-kortet varje gång data samplas. Istället skapar koden nu en lång sträng som byggs på varje gång man samplar data och som sedan skrivs till SD-kortet var tioende sekund.

För att konfigurationen som används ska fungera har vissa kodrader ur kompileringsfilen 'variant.cpp' som innehåller Adafruit Feather M0's standardkonfigurationer skrivits över. Hur man gått till väga för att göra detta beskrivs i uppstartsguiden (se Appendix E).

3.2 Kontrollerade mätningar

För att undersöka sensorernas tillförlitlighet och plattformens tillägg gjordes ett antal kontrollerade mätningar. Vid dessa styrdes luftens egenskaper efter vad syftet med mätningen var. Exempelvis undersöktes luftpumpen och kåpan i olika stigtidstest där utandningsluft

användes för att förhöja CO_2 -koncentrationen. Vid kalibreringsmätningar användes kända halter av olika ämnen.

I flera av de kontrollerade mätningarna nyttjades en modifierad plastlåda vilken fungerade som kontrollmiljö, se figur 9. På lådans kortsidor har nio hål på vardera sida borrats till vilka LCAQMP kan kopplas. Ett av hålen agerar som inflöde för en önskad gas. Överblivna hål tejpas över i syfte att tätat lådan. Lådans volym är 20 liter.



Figur 9: Plastlåda användes som kontrollvolym.

3.2.1 MOMENT I: Testmätning VOC

I föregående års projekt gjordes en referensmätning för att utvärdera VOC-sensorn CCS811 men inga mätbara nivåer uppnåddes. I mätningen användes kolvätet dodekan som källa för VOC och späddes i olika halter för att ge olika stegsvar från mätaren. Anledningen till att sensorn inte gav utslag utreddes inte men misstänktes bero på att sensorn inte gav utslag för VOC på en dodekanaerosol, att dodekanmolekylerna föll ur luften på grund av lågt ångtryck, eller att massflödesmätarna inte gav korrekt flöde. [7]

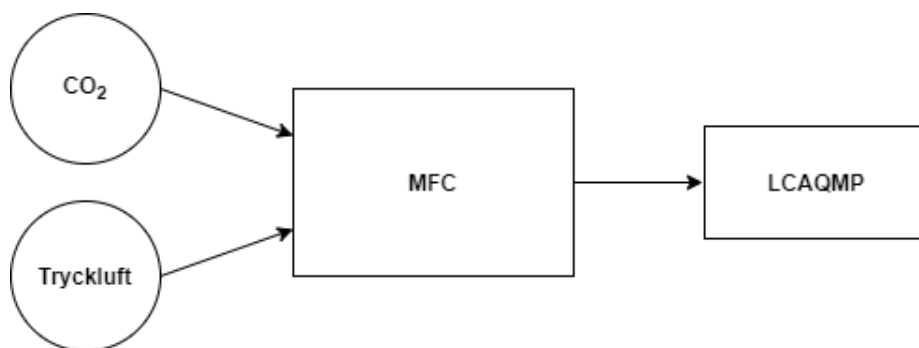
Det ansågs därför lämpligt att genomföra ett experiment med en annan VOC-källa för att få en indikation om hur sensorerna presterar. I samband med diskussion med handledare ansågs utspädd spolarvätska eller handsprit vara lämpliga källor [31]. Experimentet utfördes därefter genom att samtliga plattformar (förutom enhet 10) kopplades till kontrollmiljön. Efter ungefär 15 minuter placerades ett lock med handsprit på för att se hur plattformas mätvärden skildes åt. Efter ytterligare 30 minuter avlägsnades handspriten från kontrollmiljön och mätningar avslutades efter ytterligare tio minuter. I figur 10 visas uppställningen för experimentet. Resultatet och diskussionen för Moment I återfinns i kapitel 4.2.1 respektive 5.2.1.



Figur 10: Plattformar kopplade till kontrollvolymen. Inuti ligger ett lock med handsprit på.

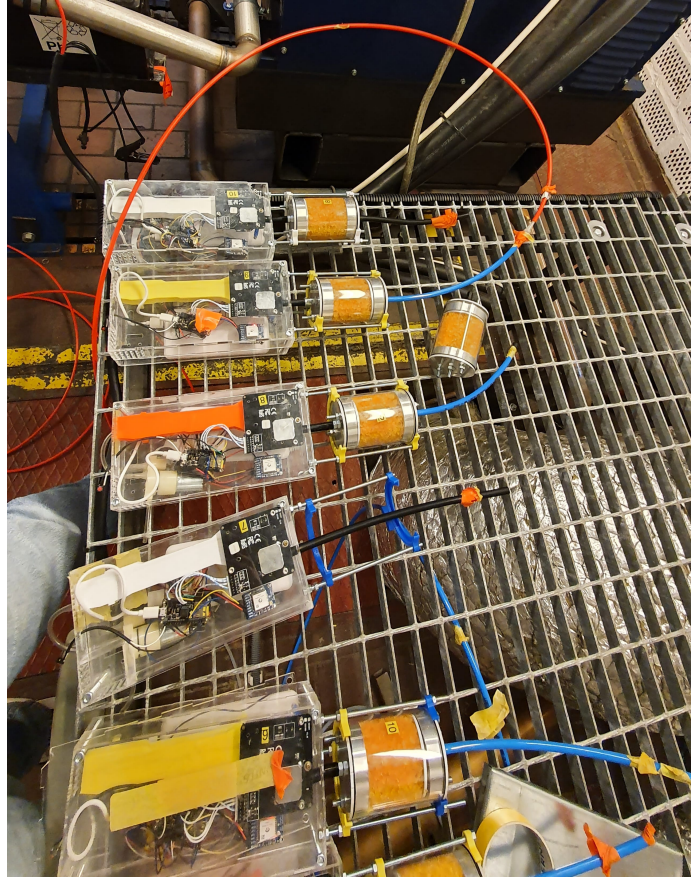
3.2.2 MOMENT II: CO₂, NO₂ och VOC mätning för kalibrering

För att kalibrera sensorerna gjordes mätningar med kontrollerade gaser. Gaserna som mättes reglerades av en massflödesregulator (MFC) där ren CO₂, propan och NO₂ späddes med tryckluft till önskad koncentration och flödes hastighet. Figur 11 nedan visar hur LCAQMP, MFC, och källorna med rena gaser kopplades ihop för experimenten.



Figur 11: Flödesschema för det kontrollerade gasflödet av CO₂ till LCAQMP.

Initialt kopplades utspädd gas till kontrollmiljön dit samtliga plattformar var kopplade. Dock visade plattformarna en betydligt lägre koncentrationen än vad flödet var inställt på, vilket indikerade att det uppstått läckage någonstans mellan MFC och sensorerna. Därför matades plattformarna istället individuellt med flödet, se figur 12 nedan.



Figur 12: Röd slang från massflödesregulatorn inkopplad i LCAQMP.

Först undersöktes koldioxid. Samtliga mätare matades med luft innehållande 5000 ppm CO_2 med flödes hastigheten 20 l/min och därefter med 1000 ppm CO_2 . Flödes hastigheten på 20 l/min är betydligt högre än plattformens normala (ungefärliga) flöde om 0,455 l/min och syftade till att undvika läckage fram till CO_2 -sensorn. Experimentet hade också kunnat utföras med en lägre flödes hastighet.

Samma metod med massflödesregulatorn användes för att testa VOC-sensorn, dock med vissa förändringar. Koncentrationen som sensorn gett utslag för tidigare hade i vissa experiment överstigit den maximala halt på 1187 ppb som databladet anger som gränsvärden, se exempelvis resultatet i kapitel 4.2.7. Därför tänktes olika koncentrationer testas efterhand för att se hur sensorn reagerar på koncentrationer inom det angivna spannet den ska klara, men även utanför. Ett flöde med utspädd propan i olika koncentrationer med flödes hastigheten 20 l/min användes som källa för VOC.

Liknande test utfördes även för NO_2 , där plattformarna matades individuellt med utspädd NO_2 med flödes hastigheten 20 l/min. Enligt databladet för NO_2 -A43F kan den mäta upp till 20 ppm [32]. Därför testades olika koncentrationer mellan 0-20 ppm för att se hur sensorn

reagerade. Resultatet redovisas i kapitel 4.2.2.

3.2.3 MOMENT III: Test av luftpump och kåpa

Kåpan och pumpens inverkan på CO₂-sensorns stigtid undersöktes genom ett experiment innehållande fyra olika delar. Gemensamt för delarna var att källan till CO₂ bestod av en påse med inomhusluft blandat med utandningsluft. Det innebär att CO₂-halten inuti påsen var okänd men detta ansågs inte vara problematiskt eftersom syftet med experimentet endast var att se ifall den nya luftpumpen och kåpan var snabbare. Det räckte därför att koncentrationen var ungefär densamma för mätningarna.

Samma LCAQMP användes för samtliga mätningar och tiderna presenteras i tabell 2.

Tabell 2: Struktur för mätningar

Tid efter start	Händelse
1 min	Slang kopplas in
7 min	Slang kopplas bort
27 min	Mätning avslutas

De olika delarna hade olika uppställningar av plattformen. Se tabell 3 för en sammanställning av uppställningarna.

Tabell 3: Uppställningarna för de olika mätningarna

Mätning nr	Uppställning LCAQMP
1	Ny luftkanal med integrerad kåpa + luftpump
2	Ny luftkanal med integrerad kåpa
3	Gammal luftkanal med pump
4	Gammal luftkanal

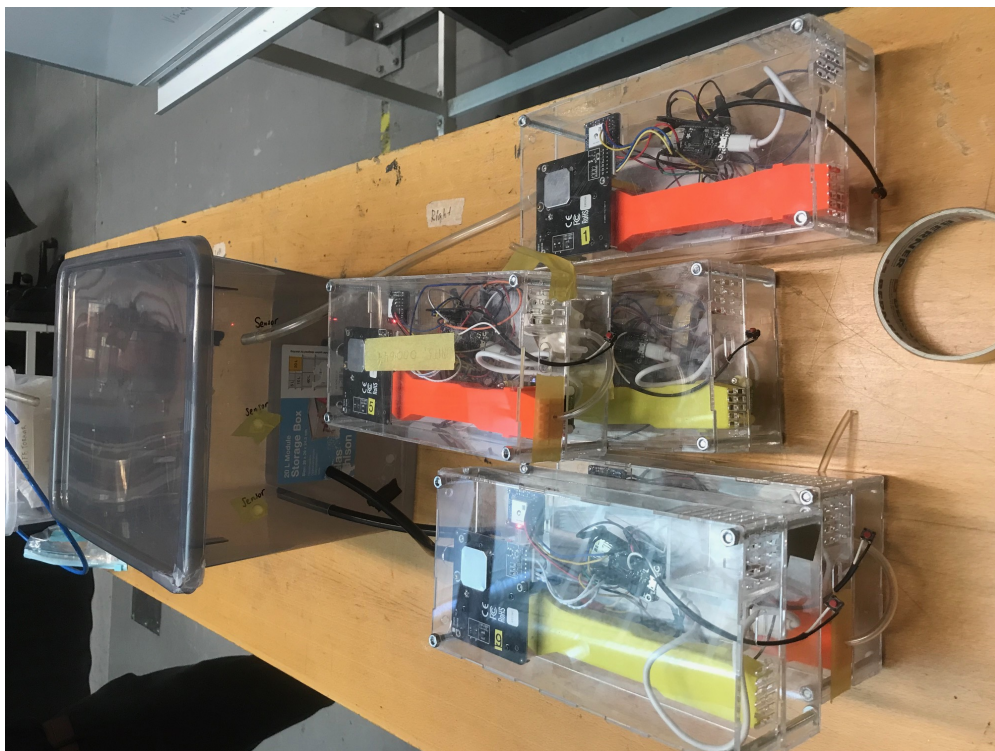
I figur 13 visas hur mätning 2 såg ut. Den nya luftkanalen med integrerad kåpa är monterad men pumpen är urkopplad. De andra mätningarna såg liknande ut, men med olika uppställningar av plattformen. Resultatet och diskussion redovisas i kapitlen 4.2.3 respektive 5.1.4.



Figur 13: LCAQMP kopplad till en grå påse innehållande en blandning av inomhusluft och utandningsluft.

3.2.4 MOMENT IV: Stigtidexperiment CO_2

Experimentet ovan tänktes endast ge en indikation om luftkanalens och pumpens inverkan på stigtiden. Följande experiment syftade till att närmare bestämma stigtiden för CO_2 -sensorn CozIR-LP för en plattform med ny lyftkanal och pump, jämfört med de utan. Fem plattformar, varav två hade både kåpa och luftpump, kopplades till kontrollmiljön enligt figur 14. Skillnaden i detta experimentet gentemot förra var att plattformarna mätte luften samtidigt. Resultatet redovisas i kapitel 4.2.4.



Figur 14: Stigtidstest där 5 plattformar kopplats till samma kontrollmiljö.

Plattformarna utsattes för tre impulser. Vid den första kopplades en påse med utandningsluft via en slang in i kontrollmiljön, vid den andra togs locket till kontrollvolymen av och man andades ut rakt in i den, och vid den tredje blåstes det lite lätt på slangarna inuti kontrollmiljön.

Idealt borde slangarna varit lika långa och tjocka för att undvika eventuella skillnader i fördröjningar och förluster till CozIR-sensorerna.

I tabell 4 visas uppställningen för plattformarna.

Tabell 4: Plattformarnas konfiguration vid experimentet.

Enhet	Konfiguration
1	Ny luftkanal med integrerad kåpa
5	Ny luftkanal med integrerad kåpa + pump
6	Gammal luftkanal
8	Ny luftkanal med integrerad kåpa + pump
9	Gammal luftkanal

3.2.5 MOMENT V: Batteritid med luftpump

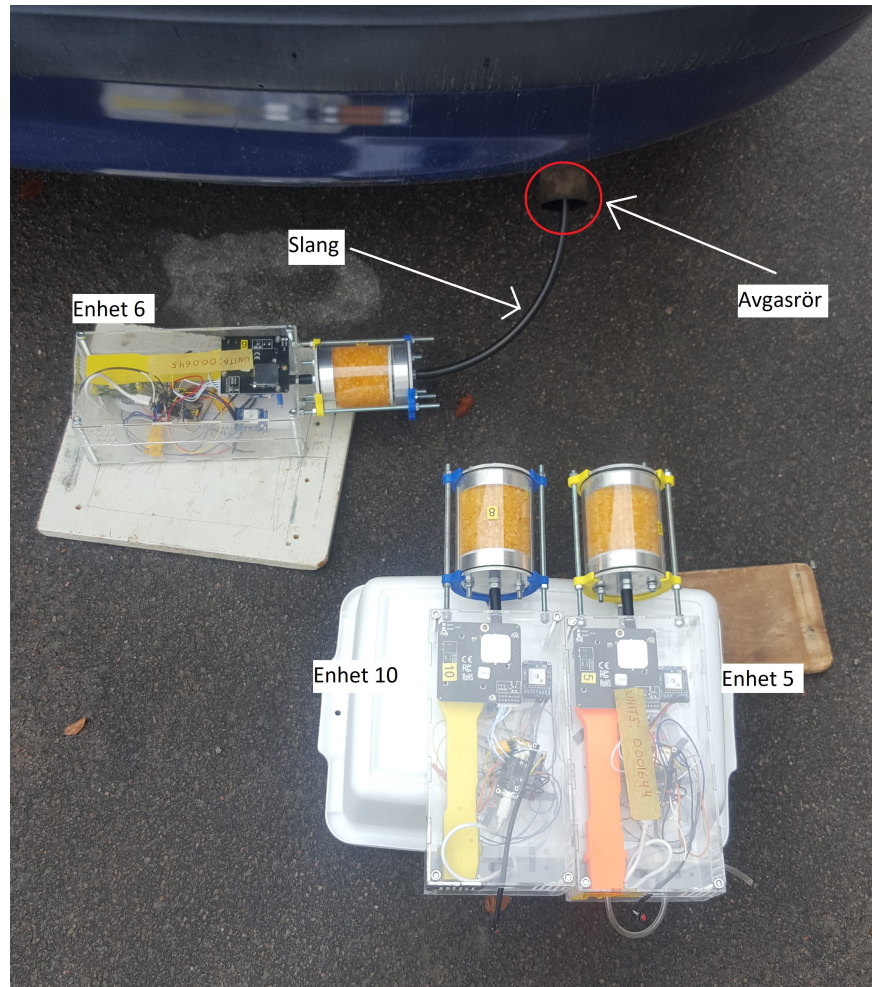
Ett enkelt experiment utfördes för att ta reda på batteritiden hos sensorplattformen efter att en pumpen och de nya sensorerna monterats. I kapitel 4.2.5 redovisas resultatet.

Batteritiden testades genom att placera två plattformar med pump i ett skåp där de lämnades påslagna i två dygn. Därefter undersöktes hur länge plattformen hade mätt med hjälp av tiden från GPS:en. Hypotesen var att en monterad pump drar mer ström och därmed minskar plattformens batteritid.

3.2.6 MOMENT VI: NO₂- mätning av förbränningsmotorer

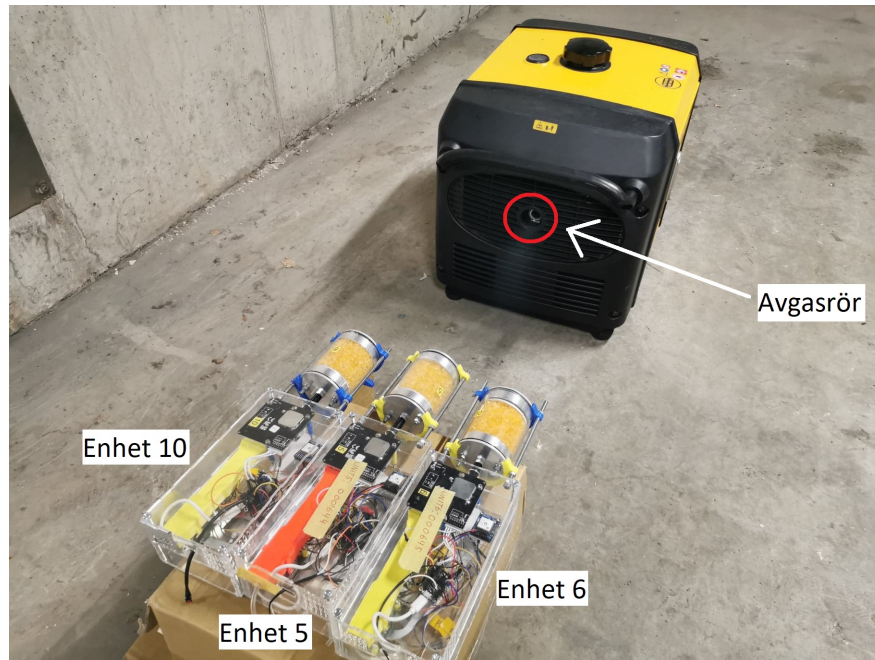
Följande mätningars primära syfte var att undersöka om NO₂-sensorerna hade möjlighet att upptäcka förhöjda halter av NO₂ som uppstår vid kallstart av en förbränningsmotor. För att mäta olika halter av NO₂ vid kallstart nyttjades en bensindriven Toyota Corolla, årsmodell 2001, samt en dieselgenerator. Det sekundära syftet med mätningarna var att genom mätdata från CO₂ beräkna en emissionsfaktor för bilen samt dieselaggregatet enligt underkapitel 3.4 som beskrivs senare. Moment VI:s resultat redovisas i kapitel 4.2.6.

Vid kallstart bakom bil placerades enhet 5, 6 och 10 bakom bilens avgasrör. Enhet 6 koplades till en slang som mätte NO₂-halten direkt inne i avgasröret medan enhet 5 och 10 placerades 30 centimeter bakom avgasröret på en plastback för att positionera luftintaget i jämnhöjd med avgasröret enligt figur 15. Vid genomförandet av mätningen fick plattformarna mäta i 13 minuter innan kallstart genomfördes och motorn fick sedan stå på tomgång i 10 minuter efter kallstarten innan motorn stängdes av. Därefter fick plattformarna mäta i ytterligare 10 minuter innan mätningen avslutades.



Figur 15: Placering av LCAQMP vid bilmätning

Vid kallstart bakom dieselaggregat placerades enhet 5, 6 och 10 cirka 50 centimeter ifrån och i jämnhöjd med avgasröret på aggregatet enligt figur 16. Därefter fick enheterna mäta omgivningen i 5 minuter innan kallstart av dieselaggregatet genomfördes. Efter kallstart stod aggregatet på tomgång i 10 minuter innan det stängdes av. Därefter fick mätarna mäta i ytterligare 13 minuter innan mätningen avslutades.



Figur 16: Placering av LCAQMP vid dieselaggregat

3.2.7 MOMENT VII: Dieselmotor i testcell

En mätning i Chalmers förbränningslaboratorium utfördes tillsammans med forskare från Göteborgs Universitet (GU). En trettonliters dieselmotor körde på låga laster där avgashalterna späckades från låga halter upp till strax över $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Det huvudsakliga syftet med testerna var att undersöka huruvida plattformens sensor för $\text{PM}_{2.5}$ och PM_{10} gav utslag på ultrafina partiklar, $\text{PM}_{0.1}$, som motorn producerade. En plattform anslöts till dieselmotorns avgasrör via en slang tillsammans med sex sensorer tillhörande GU, se figur 17 och 18. Testerna pågick i ungefär två timmar och resultatet redovisas i kapitel 4.2.7.



Figur 17: LCAQMP med diffusions-tork kopplad till avgasrör



Figur 18: Dieselmotorns avgasrör. Sensorerna i bild tillhör GU.

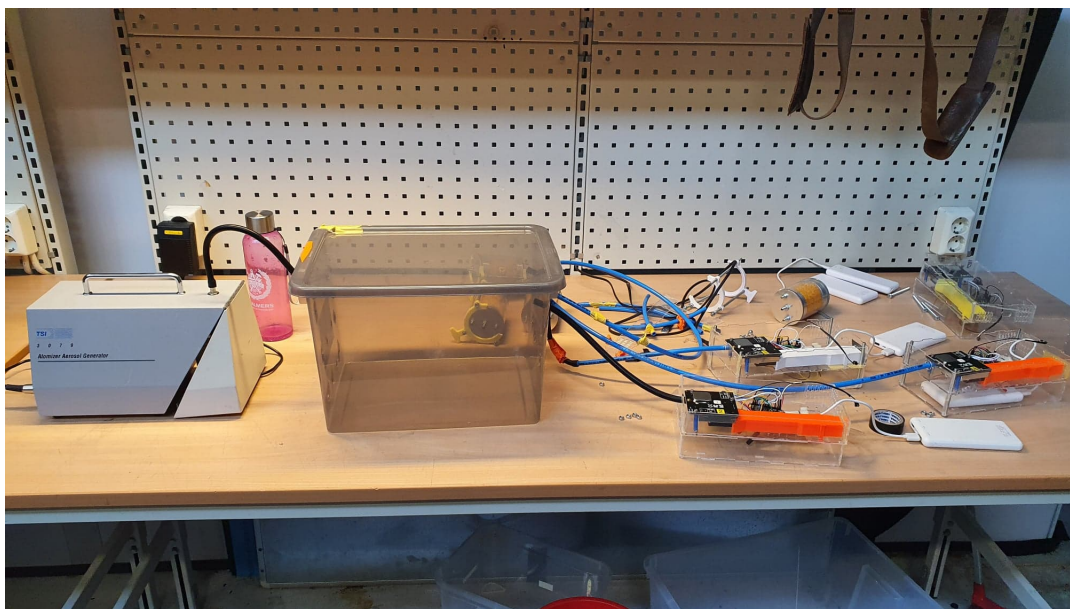
3.2.8 MOMENT VIII: Test av förluster i slang

Vid mätningar är en slang kopplad mellan plattformen och utsläppskällan. Slangen ger upphov till förluster eftersom partiklar kan fastna i slangens väggar. För att se hur slangens längd påverkar förlusterna gjordes ett test där tre olika slanglängder undersöktes. En Atomizer Aerosol Generator (AAG) genererade partiklar till kontrollmiljön. Dit var tre olika plattformar kopplade men med olika slanglängder, se tabell 5.

Tabell 5: Slanglängder för de olika plattformarna.

Enhet	Slanglängd
8	28 cm
2	48 cm
3	171 cm

Nedan i figur 19 visas en bild på uppsättningen.



Figur 19: AAG, till vänster i bild, genererar partiklar in i kontrollvolymen.

Mätningen startade genom att först starta de tre enheterna. Efter 20 sekunder startade AAG:n som genererade partiklar i 15 sekunder. Därefter stängdes AAG:n av och efter ytterligare 15 sekunder öppnades locket på kontrollvolymen. Efter 1 min och 30 sekunder avslutades testet. Resultatet av testet redovisas i kapitel 4.2.8.

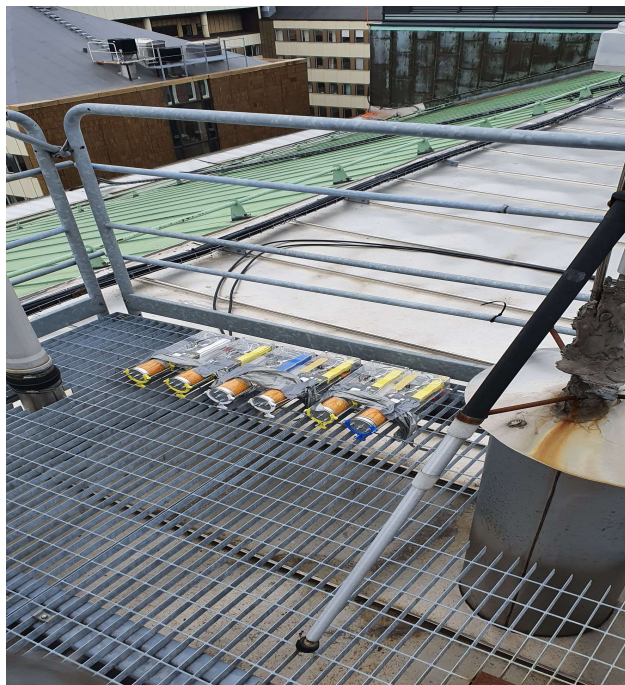
3.3 Fältmätningar

Fältmätningar utfördes på olika platser i Göteborg. Dessa hade olika syften men karaktäriseras av att de utfördes i utomhusmiljö. En del mätningar syftade till att undersöka om plattformarna kan användas för att se skillnader i luftföroreningar mellan skogsmiljö och stadsmiljö. Andra mätningar syftade till att undersöka diffusionstorkens nyttjandetid eller plattformens sensorer gentemot referenser. Dessa förklaras i mer detalj nedanför.

3.3.1 MOMENT IX: Referensmätning för NO_2 och O_3 på Nordstan

Miljöförvaltningen har en mätstation på ett tak i Nordstan i centrala Göteborg för att mäta luftföroreningar. För att bedöma funktion och tillförlitlighet av plattformarnas NO_2 - och O_3 -sensorer utfördes en mätning vid mätstationen där plattformarnas mätdata jämfördes mot Miljöförvaltningens data. Resultatet för mätningarna i redovisas i kapitel 4.3.1.

Uppställningen för mätningen kan ses i figur 20. Mätningen pågick i en timme.



Figur 20: Placering av LCAQMP vid Nordstans mätstation

3.3.2 MOMENT X: Nyttjandetid hos diffusionstork

Följande fältmätning utfördes med avsikt att undersöka hur länge diffusionstorken kan användas innan den torkande effekten upphör. Fyra plattformar ställdes upp på en balkong utomhus varav två hade diffusionstorkar monterade. Batterierna var kopplade till strömuttag vilket gjorde att plattformarna kontinuerligt försörjdes med el.

Efter 14 dagar undersöktes mätvärdena som plattformarna samlat in. Speciellt undersöktes värdena för luftfuktigheten för plattformarna med och utan diffusionstork. Tiden det tar för luftfuktigheterna att nå samma värde antas vara den ungefärliga tiden som diffusionstorken fungerar. Mätningen är starkt beroende av miljöns luftfuktighet, då en fuktigare miljö snabbare mättar diffusionstorken. Tabell 6 visar vilka enheter som hade diffusionstork monterad. I kapitel 4.3.2 redogörs resultatet för Moment X och det diskuteras i 5.3.4.

Tabell 6: Tabell över vilka LCAQMP som nyttjar diffusionstork

Enhet	Diffusionstork
1	Nej
2	Ja
3	Nej
7	Ja

3.3.3 MOMENT XI: Mätningar vid trafikleder

Följande fältmätningar syftade till att undersöka om luftkvaliteten förbättras ju längre ifrån vägen man befinner sig och om plattformarna kan upptäcka exempelvis rusningstrafik. Resultatet redovisas i kapitel 4.3.3.

Dag Hammarskjöldsleden är en trafikerad led och Storängsgatan vid Änggårdssbergen en närliggande gata i ett bostadsområde. Samtliga tio plattformar placerades ut i par vid fem mätpunkter längs Storängsgatan enligt figur 21. Två stycken plattformar fästes vid räcket på bron över leden. Därefter fästes plattformarna i lyktstolpar mellan 1-2 m ovanför marken. De fästes i grupper om två med avstånden 45, 120, 210 och 330 meter från Dag Hammarskjöldsleden, se tabell 7. Plattformarna lindades in i plastpåsar för att skydda de elektroniska komponenterna mot regn men in- och utloppet till plattformarna förblev ostörda.

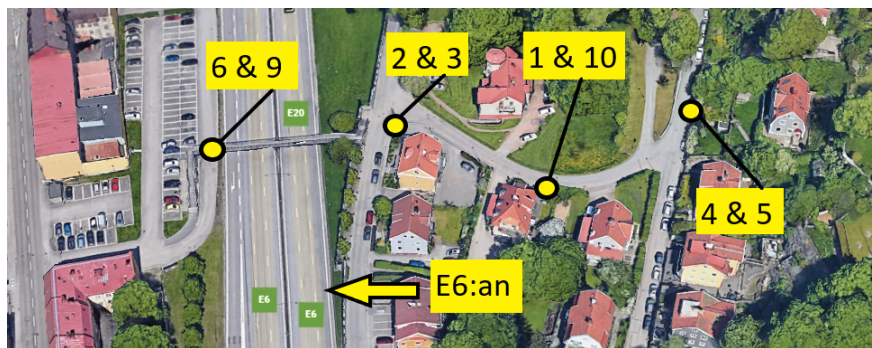


Figur 21: Plattformar utplacerade på mätpunkter längs Storängsgatan [33].

Tabell 7: Mätpunkternas avstånd från Dag Hammarskjöldsleden.

LCAQMP nummer	Avstånd från Dag Hammarskjöldsleden
1 & 5	0 m
3 & 9	45 m
4 & 6	120 m
2 & 7	210 m
8 & 10	330 m

En liknande fältmätning gjordes vid en gångbro över E6:an mellan Gårda och Örgryte, se figur 22. I mätningen användes endast åtta plattformar, då två krävde felsökning och underhåll. I tabell 8 visas plattformarnas avstånd från vägen.



Figur 22: Placering av Plattoformar mellan Gårda och Örgryte [33].

Tabell 8: Utplacering av plattformar, Gårda-Örgryte.

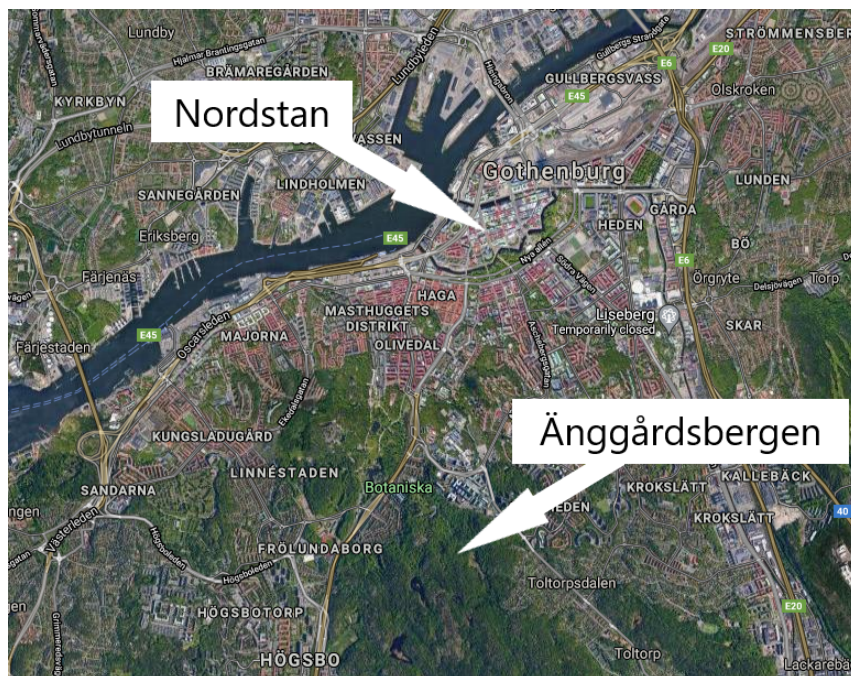
LCAQMP nummer	Avstånd från E6:an, Kungsbackaleden
6 & 9	-5 m ¹
2 & 3	40 m
1 & 10	80 m
4 & 5	120 m

Båda mätningarna har en viss problematik, då plattformarna är uppställda längs andra fordonstrafikerade vägar. Däremot är leden betydligt mer trafikerad än den mindre vägen, och således borde en skillnad i luftföroreningar kunna ses.

3.3.4 MOMENT XII: Stadsmiljö jämfört med naturmiljö

En ytterligare mätning för att se om plattformen kan visa hur luftföroreningar varierar geografiskt och över tid gjordes vid två olika platser under samma tid. Fyra plattformar placerades vid naturområdet i Änggårdsbergen medan fyra plattformar placerades återigen vid Miljöförvaltningens mätstation i stadsmiljö på Nordstans tak. I Änggårdsbergen fästes plattformarna med hjälp av buntband ca 2 m upp i ett träd. I figur 23 visas var plattformarna placerades. Mätningen pågick under ett dygn och hypotesen var att luftföroreningarna i naturområdet är mindre än i stadsmiljön. I kapitel 4.3.4 redovisas resultatet från mätningen.

¹Det negativa avståndet beror på att plattformarna placerats 5 m till vänster om mitten av vägen.



Figur 23: Placering av plattformar i staden och naturen [33]

3.4 Emissionsfaktorer för PM

Emissionsfaktorer för $PM_{2.5}$ och PM_{10} har framtagits med hjälp av CO_2 som spårgas. Det gjordes från mätningarna med bensenmotorn och diesellaggregatet i moment VI från avsnitt 3.2.6. Där användes de högst uppmätta nivåerna för PM och CO_2 samt deras bakgrundsnivåer och användes i ekvationerna 3 och 2. Bakgrundskoncentrationen beräknades som den koncentrationen PM och CO_2 på plats innan utsläppskällan startades. Resultat och diskussion redovisas i kapitlen 4.4 respektive 5.3.5.

Emissionsfaktorerna för CO_2 hämtades från trafikverket [34] och naturvårdsverket [35].

3.5 Datahantering

I alla mätningar som gjordes sparades data i CSV-filer. Datan visualiserades sedan med hjälp av MATLAB som läser in och plottar mätvärden över tid. För att kunna göra jämförelser mellan mätningar från flera plattformar som startats vid olika tidpunkter skapas ett tidsintervall utifrån GPS-tid på alla medverkande plattformar. Tidsintervallet som visualiseras är från den tidpunkt den sista LCAQMP startades, till den tidpunkt den första stängts av.

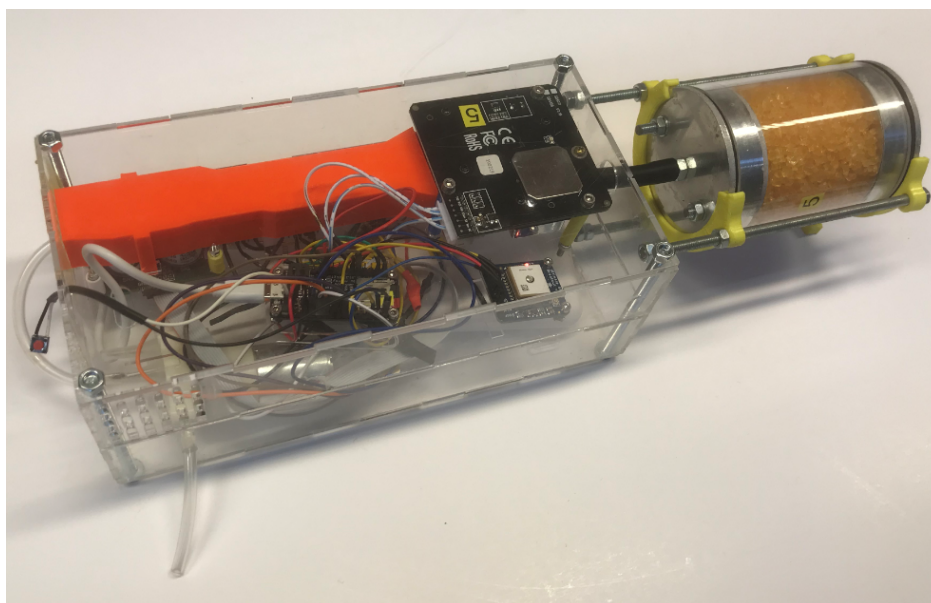
Vid vissa mätningar, framförallt de längre, har graferna blivit svåra att tyda på grund av brus i mätdata. Därför användes glidande medelvärden i ett antal av mätningarna för att kunna visa trender hos alla mätare som önskas utan att vissa försvinner bakom brusiga linjer.

4 Resultat och analys

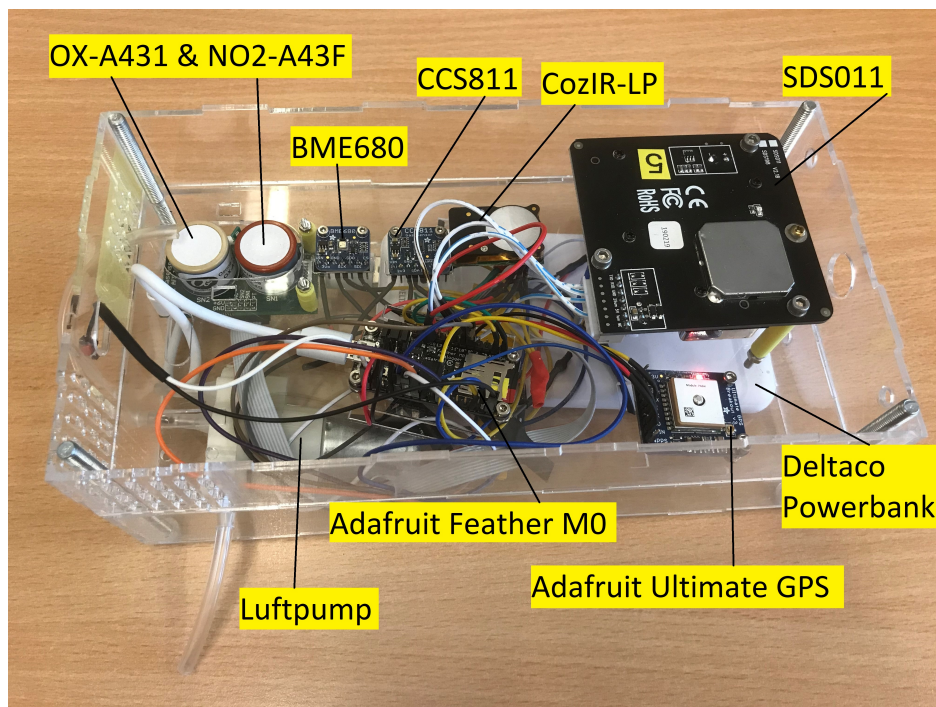
I detta kapitel presenteras de delar av LCAQMP som vidareutvecklats och hur plattformarna ser ut i dagsläget. Detta följs av resultat från mätningar som bedrivits enligt metod från tidigare kapitel.

4.1 Vidareutveckling av plattformen

Den slutgiltiga konstruktionen av plattformen visas i figur 24. En ny luftkanal med integrerad kåpa, en luftpump och sensorer för att mäta NO_2 och O_3 implementerades. I figur 25 visas de ingående komponenterna, med luftkanal och diffusionstork exkluderad. I appendix F visas vilka plattformar som har sensorer för de olika luftföroreningarna.

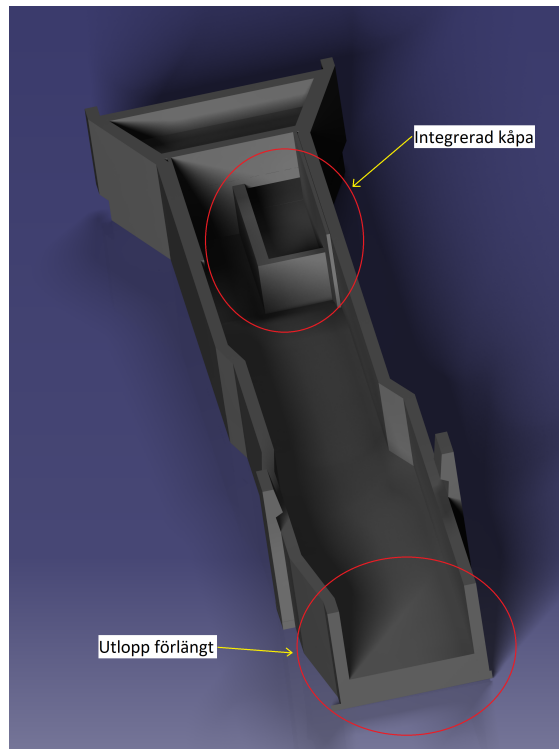


Figur 24: Slutgiltig konstruktion av plattformen.



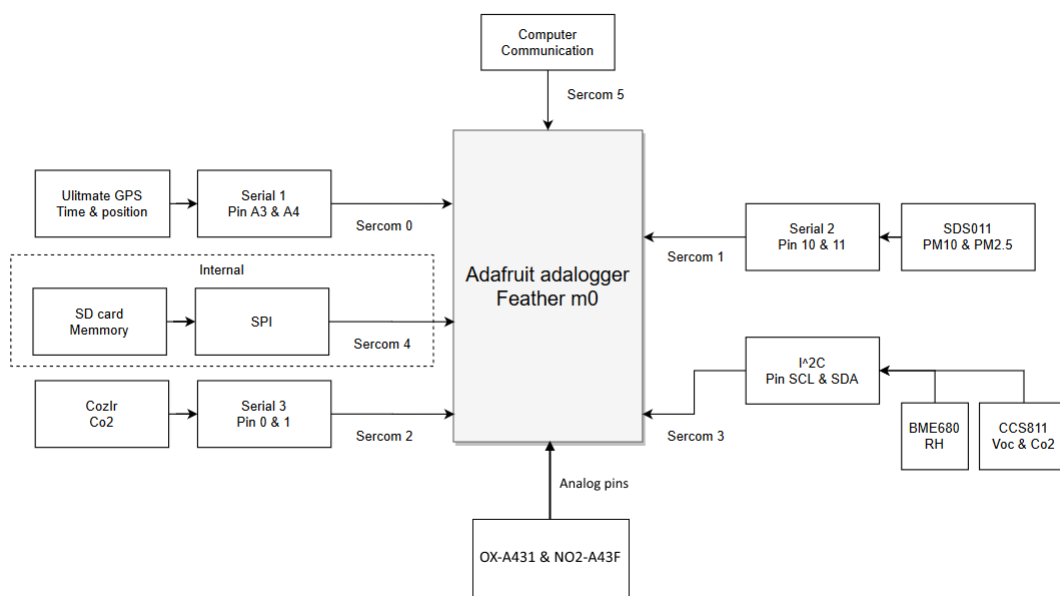
Figur 25: Slutgiltig konstruktion med ingående komponenter markerade.

En modell av den nya luftkanalen visas i figur 26. Utöver den integrerade kåpan förlängdes även slutet av luftkanalen för att ligga an mot lådans innervägg samt att passformen mellan utblåset på partikelmätaren och insuget till luftkanalen gjordes snävare. Detta förhindrar luft från att sugas in från andra ställen än genom luftkanalen.



Figur 26: Slutgiltig konstruktion av luftkanal med integrerad kåpa.

I figur 27 visas en schematisk skiss över sensorernas inkoppling och SERCOM- användning samt kopplingarna till Adafruit-kortet.



Figur 27: Schematisk skiss på sensorernas inkoppling. (Omarbetad med tillstånd från tidigare års kandidatarbete [7]).

I tabell 9 visas sensorernas SERCOM-modul, kommunikationsprotokoll och deras respektive pins.

Tabell 9: Sensorernas SERCOM-moduler, kommunikationsprotokoll och använda pins

SERCOM-modul	Sensor	Kommunikationsprotokoll	Pins
0	GPS	Seriell	A3 & A4
1	SDS011	Seriell	10 & 11
2	CozIR	Seriell	0 & 1
3	BME 680 & CCS811	I2C	SCL & SDA
4	SD-kort	SPI	Interna
5	Dator	Seriell	Interna
-	OX-A431 & NO2-A43F	-	A0, A1, A2, A5 & A7 ²

Arduinokoden för LCAQMP finns att hämta på GitHub [36].

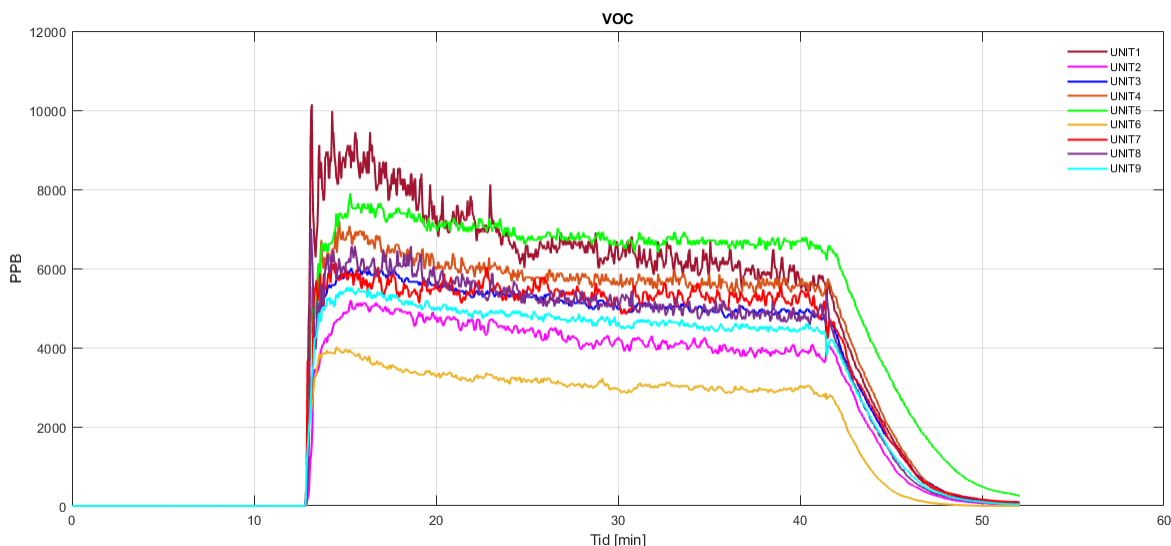
²Temperaturmätaren PT1000 är i nuläget kopplad till pin A7. Notera att denna pin enligt databladet 'naturligt sitter runt 2 V DC'.

4.2 Kontrollerade mätningar

Följande är resultat för mätningar som utfördes kontrollerade miljöer, det vill säga att den luft som mäts har påverkats aktivt.

4.2.1 MOMENT I: Testmätning VOC

Resultaterande data från experimentet där handsprit lades i kontrollvolym och mättes av samtliga LCAQMP presenteras i figur 28.



Figur 28: Mätdata från VOC-sensorerna.

Intressant är att VOC-sensorn gav utslag på handsprit. De uppmätta nivåerna skiljer sig mellan plattformarna. Enhet 1 hade ett toppvärde kring 10 000 ppb medan toppvärdet hos enhet 4 var ungefär 4 000 ppb. Plattformarna ser dock ut att följa samma trend sinsemellan.

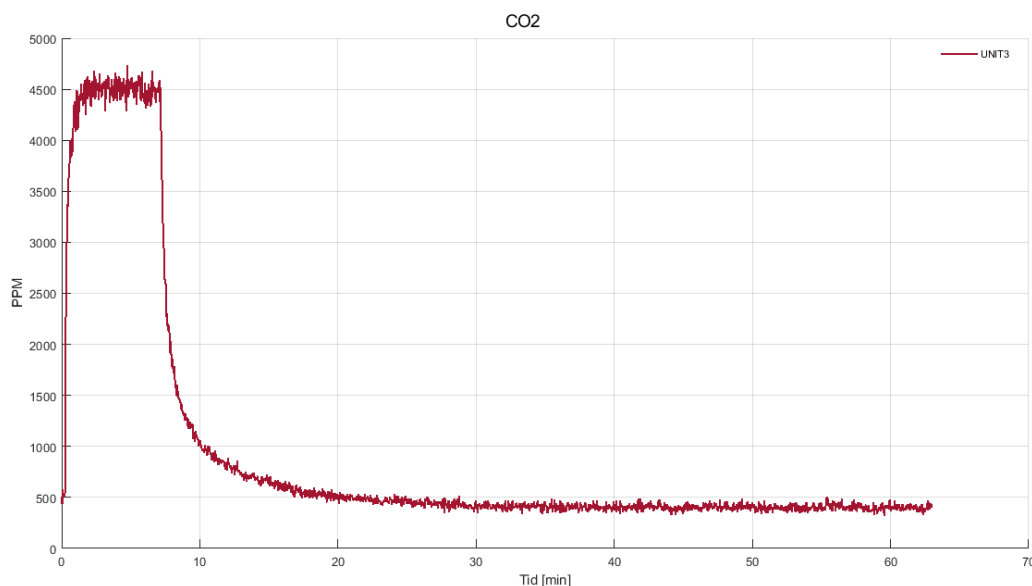
Den faktiska halten i kontrollvolymen är inte känd då varken flödet eller koncentrationen kontrolleras. Visserligen kan volymen handsprit erhållas, men noggrannare mätningar av kontrollvolymens faktiska koncentration av VOC bör göras.

Enligt databladet för CCS811 [37] är sensorn spann endast 0-1187 ppb, medan ovanstående graf visar nivåer upp mot 10 000 ppb, detta diskuteras mer i detalj i diskussionen.

4.2.2 MOMENT II: CO₂, NO₂ och VOC mätning för kalibrering

Plattformarna fick i kalibreringsmätningen mäta olika koncentrationer av CO₂, NO₂ och propan (C₃H₈). Sensorerna för NO₂ och propan gav inget utslag. Anledningen till detta diskuteras senare i diskussionen. Därför presenteras endast resultatet från CO₂-mätningen.

4.2.2.1 Resultat från CO₂-mätningen I figur 29 visas en typisk mätserie när sensorerna matades med 5000 ppm CO₂. För att avgöra hur nära de mätte referensvärdet togs ett medelvärde av ungefär 50 mätpunkter på toppen av kurvorna, beroende på hur länge sensorn utsattes för gasen.



Figur 29: UNIT3:s svar på en CO₂-nivå av 5000 ppm

Förutom medelvärdet har även avståndet till referensvärdet beräknats och redogörs som andel av 5000 ppm i procent. Därutöver redogörs den faktor som plattformarna hade behövt multiplicerats med för att nå det sanna värdet. Se tabell 10. På grund av tekniska problem saknas data från vissa enheter.

Tabell 10: Resultat från referensmätning med 5000 ppm

LCAQMP	Mdlv. på toppen	% av 5000 ppm	Korr.faktor	Antal datapunkter
UNIT1	4563.0	91.26 %	1.0958	50
UNIT2	4727.4	94.55 %	1.0577	50
UNIT3	4507.4	90.15 %	1.1093	50
UNIT7	4611.4	93.23 %	1.0726	50
UNIT8	4731.8	94.64 %	1.0567	30
UNIT9	4682.3	93.65 %	1.0679	30

Den största avvikelsen från referensvärdet återfinns hos enhet 3, där skillnaden mot referensvärdet var ungefär 10 %.

Tabell 11 visar samma typ av tabell fast för experimentet då enheterna matades med 1000 ppm CO₂.

Tabell 11: Resultat från referensmätning med 1000 ppm

LCAQMP	Mdlv. på toppen	% av 1000 ppm	Korr.faktor	Antal datapunkter
UNIT1	984.3	98.43 %	1.0159	50
UNIT2	979.0	98.00 %	1.0204	30
UNIT3	898.7	89.87 %	1.1128	50
UNIT5	950.2	95.02 %	1.0524	50
UNIT6	1092.9	109.30 %	0.9150	50
UNIT7	930.6	93.06 %	1.0745	50
UNIT8	960.9	96.09 %	1.0407	50
UNIT9	970.0	97.00 %	1.0309	100

Den största avvikelsen från referensvärdet återfinns återigen hos enhet 3 och är strax över 11 %.

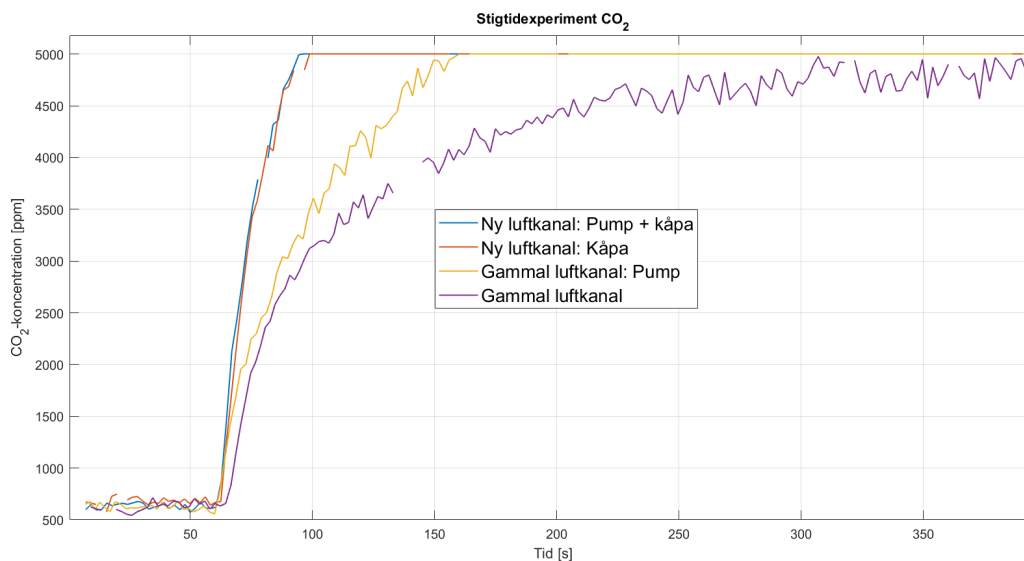
Tabellerna indikerar därmed att CozIR-sensorn mäter CO₂ relativt väl, och avviker som mest med strax över 11 % vid mätningen med 1000 ppm CO₂. Enligt databladet för CozIr-sensorn har den en noggrannhet på ± 3 %, vilket inte känns orimligt med tanke på dessa resultat. I och med detta bedömde vi att det inte är nödvändigt att korrigera CO₂-värdena för CozIR.

Experimentet redogör däremot inte för CO₂-koncentrationer mellan 0-999 ppm och 1001-4999 ppm, varför föregående slutsats har en viss problematik. Samtidigt är det sällan i utomhusmiljö sensorerna behöver reagera på halter större än 1000 ppm. Det är också sannolikt så att en del av CO₂-halten går förlorad innan den når sensorn, vilket förklarar att sensorerna generellt sett mäter under 100 % av referensvärdet.

4.2.3 MOMENT III: Test av luftpump och kåpa

I figur 30 nedan visas grafen över resultaten från moment III. Ur figuren framgår det tydligt att linjerna som är blå och orange har kortast stigtid. Dessa representerar plattformarna med ny luftkanal med integrerad kåpa, där den blåa linjen även har en pump. Detta indikerar att den nya luftkanalen ger en bättre stigtid än den gamla.

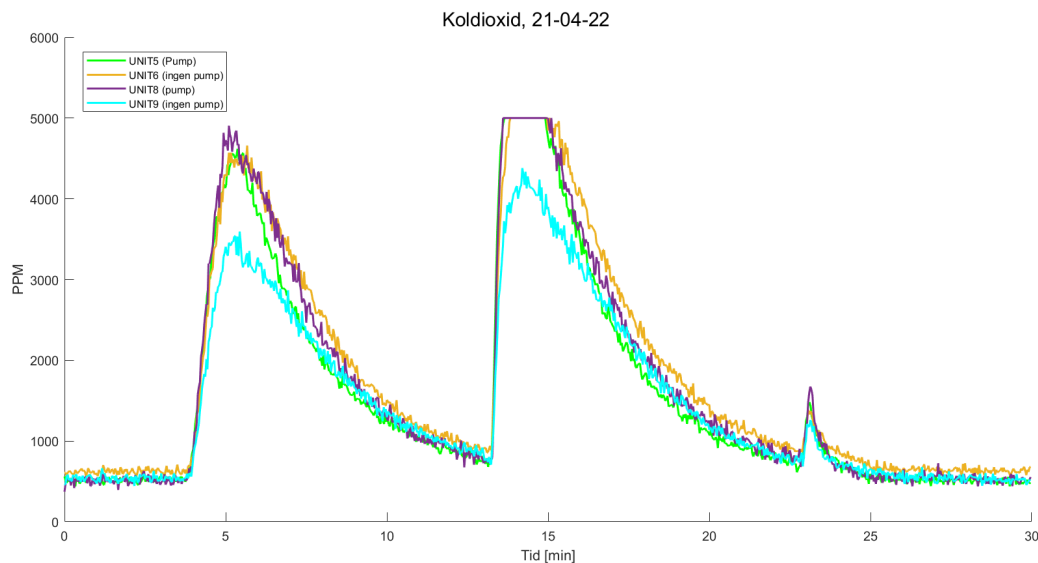
Den gula och lila linjen representerar mätningar utförda med gamla luftkanalen. För den gamla luftkanalen stiger den gula linjen snabbare än den orange linjen utan, vilket indikerar att pumpen förbättrar stigtiden. Ur testet kan det konstateras att den nya luftkanalen förbättrar stigtiden men att pumpen har mindre påverkan, förutom då den gamla luftkanalen används.



Figur 30: Stigtidsdata för LCAQMP med olika konfigurationer.

4.2.4 Moment IV: Stigtidsexperiment CO₂

I det här experimentet undersöktes huruvida implementeringen av pumpen kunde förbättra stigtiden hos CO₂-sensorn. I figur 31 ses resultatet från experimentet. Notera att endast fyra plattformar registrerade värden. En plattform lyckades inte mäta och exkluderades därför från grafen. Därmed blev experimentet egentligen ett test på skillnaden mellan den gamla och nya plattformen.



Figur 31: Mätdata från stigtidsexperimentet.

Från grafen kan man se att stigtiderna inte skiljer sig märkbart vid varken impuls ett, två eller tre. Enhet 9, ljusblå linje, verkar ha mätt en lägre nivå än de andra plattformarna.

Stigtiden har definierats som tiden det tar för plattformarna att gå från 10 % till 90 % av impulsens amplitud. För den första impulsen togs följande stigtider fram enligt tabell 12 nedan:

Tabell 12: Stigtider för LCAQMP 5, 6, 8 & 9.

Enhet	Stigtid	Tillbehör
5	61,2 s	Ny luftkanal+pump
6	55,2 s	Gammal luftkanal
8	53,7 s	Ny luftkanal + pump
9	54,9 s	Gammal luftkanal

Den snabbaste stigtiden erhöles med ny luftkanal och pump, men det gjorde även den långsammaste. Resultatet är motsägelsefullt mot det tidigare momentet, som ju visade att snabbast stigtid erhöles med ny luftkanal och pump.

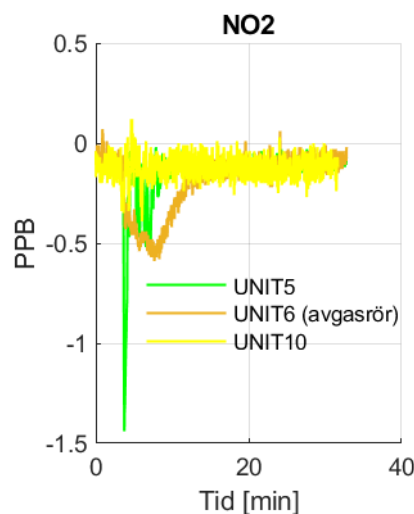
Vid impuls två och tre hann inte sensorerna återgå till nivån de hade innan föregående impuls. Dessutom bottenade några av mätarna. Därmed blir en stigtidsberäkning för dessa impulser problematiskt, då sensorerna inte hann återgå till grundnivå innan den nya impulsen tillfördes.

4.2.5 MOMENT V: Batteritid med luftpump

Batteritiden för en plattform med pump och nya sensorer var ungefär 28 timmar. Tidigare mätningar har indikerat att plattformar utan pumpen och de nya sensorerna haft en batteritid på mellan 36 och 48 timmar. Tidigare års arbete menar att plattformarna kunde mäta i fyra dygn [7].

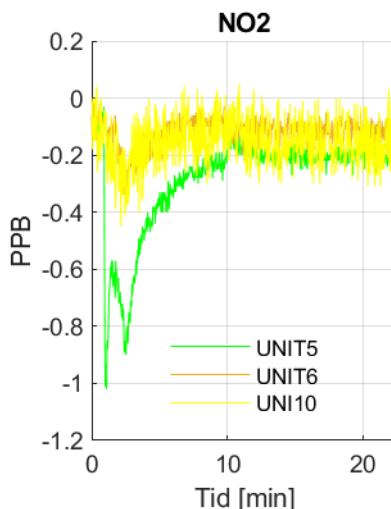
4.2.6 MOMENT VI: NO₂- mätning av förbränningsmotorer

I figur 32 visas mätresultatet från mätningen av NO₂ intill avgasrör vid kallstart av bilsinbil för LCAQMP enheterna 5, 6 och 10. Enhet 6 som mätte direkt i avgasröret via en slang uppmätte högre halter NO₂ (dock med negativt tecken, förklaring följer) än enhet 5 och 10 som var placerade 30 centimeter bakom avgasröret. Mätningen visar också hur utsläppen från en förbränningsmotor till en början är höga innan avgasreningssprocessen börjar verka och mätvärdena börjar närma sig noll på y-axeln i figur 32.



Figur 32: Mätresultat från bilmätning

Figur 33 visar mätresultaten från mätningen av NO₂ intill avgasröret av dieselaggregatet vid kallstart. Samtliga mätare ger ett högre utslag 1-2 minuter men avtar därefter. Enhet 5 var placerad närmast avgasröret och uppmätte högre nivåer än enhet 6 och 10.



Figur 33: Mätresultat från dieselaggregatsmätning.

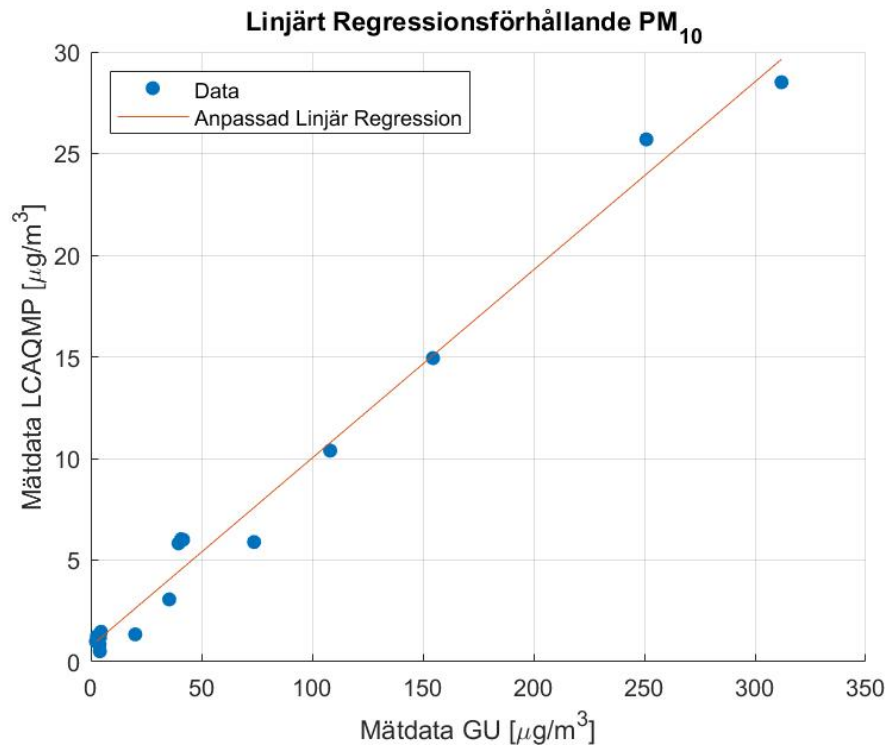
Mätdata över NO₂ för de två mätningarna visar på negativa mätvärden när den i själva verket borde uppvisa positiva mätvärden. Enligt sensorns tillverkare AlphaSense är det mycket komplext att kalibrera den här typen av sensorer och att negativa mätvärden är vanligt förekommande.

Mätningen visar alltså att NO₂-sensorerna reagerar på förhöjda halter NO₂, men att ytterligare kalibrering och tester krävs för att ge korrekta mätvärden.

4.2.7 MOMENT VII: Dieselmotor i testcell

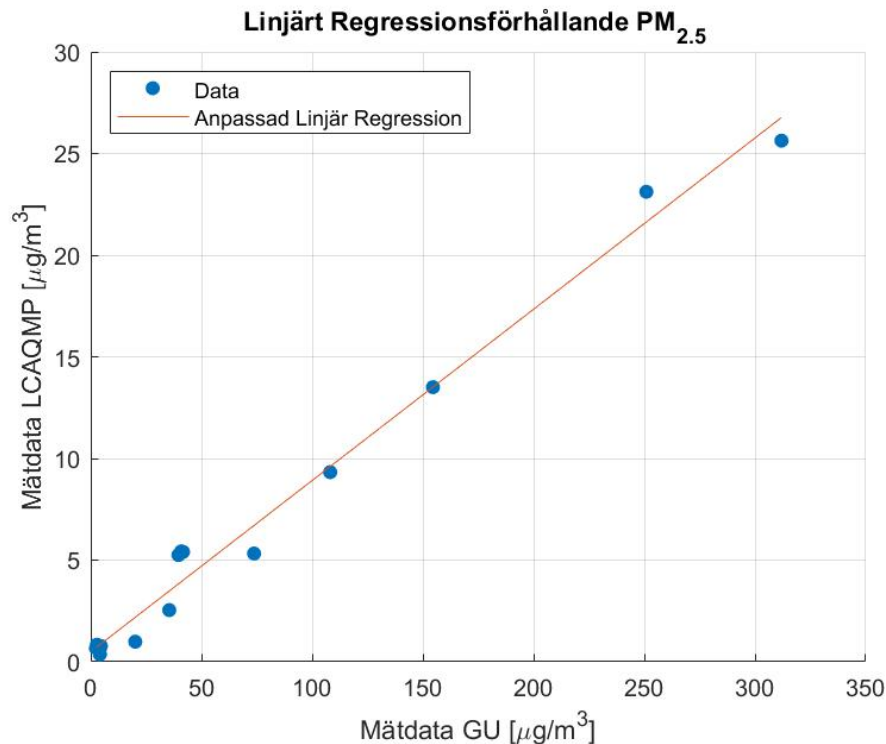
Nedan presenteras data från enhet 3 från dieseltestet som utfördes tillsammans med forskare från Göteborgs Universitet.

I figur 34 visas ett spridningsdiagram mellan GU:s värden och LCAQMP:s värden för PM₁₀. På x-axeln är GU:s mätdata plottade, och på y-axeln är LCAQMP:s värden plottade.



Figur 34: Spridningsdiagram för dieseltestet mellan PM₁₀ och data från GU.

I figur 35 visas ett liknande spridningsdiagram men för PM_{2.5}.



Figur 35: Spridningsdiagram för dieseltestet mellan $PM_{2.5}$ och data från GU.

En linjär anpassning med minsta kvadrat-metoden gjordes mellan mätpunkterna. Linjens ekvation samt korrelationskoefficienten sammanställs i tabell 13. Det höga R^2 -talet indikerar god korrelation mellan GU:s och LCAQMP:s data.

Tabell 13: Samband mellan GUs och LCAQMP:s mätdata.

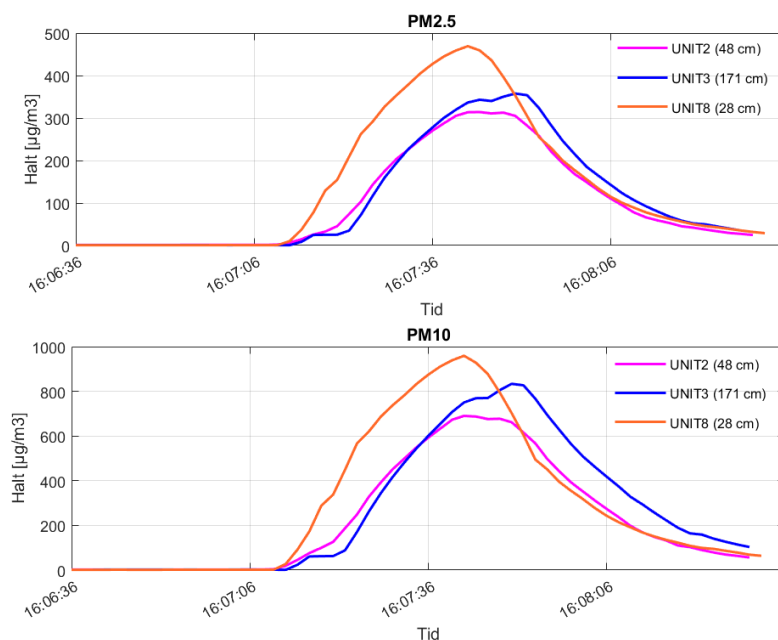
$PM_{2.5}$	PM_{10}
$y = 0.4946 + 0.0842x$	$y = 0.7668 + 0.0925x$
$R^2 = 0.985$	$R^2 = 0.9857$

Resultatet från dieseltestet är anmärkningsvärt. Initialt förväntades inte utslag av data för LCAQMP eftersom den implementerade sensorn SDS011 som mäter PM inte är avsedd för mätning av ultrafina partiklar ($PM_{0.1}$). Det är vedertaget att en dieselmotor avger sotpartiklar under drift, vilket klassas som $PM_{0.1}$, se rubrik 2.1.1 [17].

Datautslaget kan bero på att SDS011 använder sig utav optiska mätmetoder, se rubrik 2.3. Eftersom sot sprider ljus ger den troligtvis utslag hos SDS011. Att både $PM_{2.5}$ och PM_{10} ger nästan sammanfallande data tyder på att partiklarna ur dieselmotorn är mindre än $2,5\mu m$. Sensorn detekterar dessa och tolkar dem som både $PM_{2.5}$ och PM_{10} vilket är rimligt eftersom $PM_{0.1}$ är en delmängd av dem båda.

4.2.8 MOMENT VIII: Test av förluster i slang

Figur 36 nedan visar hur de tre enheterna reagerade på den ökade PM-halten från AAG:n. Enhet 8 har kort slang (28 cm), enhet 2 har medellång (48 cm) och enhet 3 har lång (171 cm).



Figur 36: Data från test av förluster i slang.

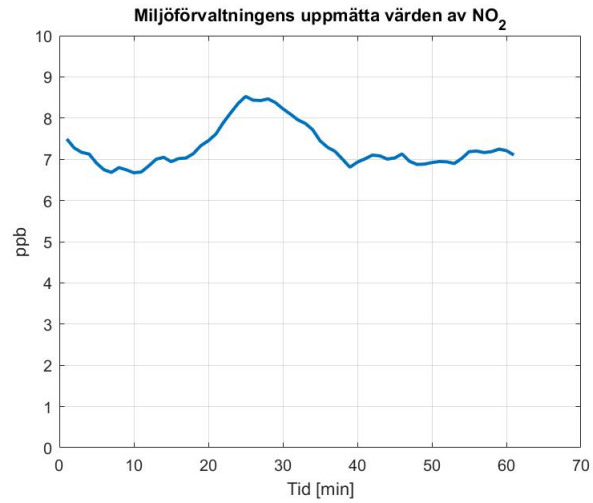
Den kortaste slangen kopplad till enhet 8 uppvisar de högsta mätvärdena vilket och indikerar att en kortare slang ger mindre förluster. Dock var enheterna vid testets tidpunkt okalibrerade, varför det är problematiskt att dra någon generell slutsats om experimentet. En kortare slang ser dock ut att reagera snabbare på förändringar i miljön, vilket indikerar att en kortare slang är att föredra om snabb stigtid eftertrakts.

4.3 Fältmätningar

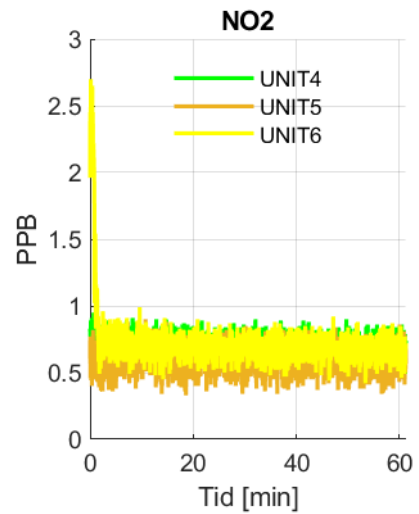
Här redogörs resultatet för alla mätningar utförda i fält vilka har beskrivits först i metoden.

4.3.1 MOMENT IX: Referensmätning för NO_2 och O_3 på Nordstan

Nedan presenteras resultat från referensmätningen med Miljöförvaltningen. I figur 38 och 39 visas plattformarnas uppmätta data för NO_2 respektive O_3 . Miljöförvaltningens värden för NO_2 presenteras i figur 37. Miljöförvaltningens mätare för O_3 var vid tillfället inlämnad för underhållsarbete. Därför saknas jämförelsedata för O_3 .

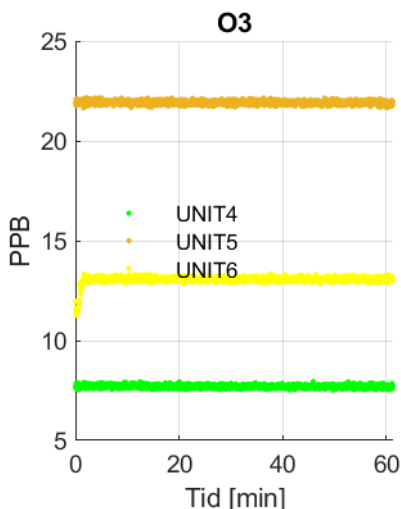


Figur 37: Uppmätt NO₂-koncentration av Miljöförvaltningen i Nordstan.



Figur 38: Uppmätta halter NO₂.

En jämförelse av LCAQMP:s NO₂-värden i figur 38 med Miljöförvaltningens NO₂-värden i figur 37 indikerar att plattformens nya sensor för NO₂ fungerar dåligt. Värdet för LCAQMP:s sensorer fluktuerar mellan 0.5-1 ppb, medan Miljöförvaltningens mätningar låg omkring 6-8.5 ppb.



Figur 39: Uppmätta halter O₃.

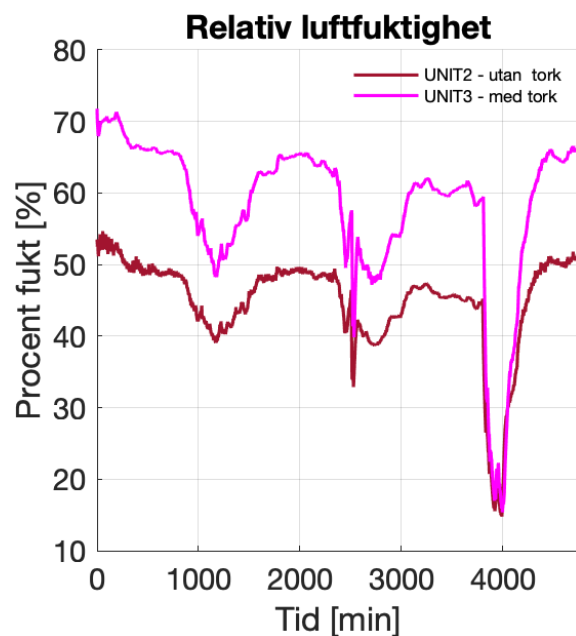
O₃-nivåerna i figur 39 ser ut att vara stabila, men skiljer sig relativt mycket sinsemellan.

Efter experimentet upptäcktes att sensorerna försetts med för låg spänning vilket kan förklara den stora skillnaden i NO₂-koncentration. Det kan också förklara den stora variationen i O₃-koncentration sensorerna sinsemellan. Därmed är det svårt att dra några slutsatser från experimentet, förutom att det förmodligen bör upprepas fast med korrekta spänningssatta sensorer.

4.3.2 MOMENT X: Nyttjandetid av diffusionstork

Mätningen som undersökte diffusionstorkens nyttjandetid utfördes mellan den 9-23 mars. Datumen är viktiga då det endast finns mätdata från enhet 2 och 3 mellan 11-15 mars samt 21-22 mars för alla plattformar. Trots bristen på fullständiga mätdata är det ändå möjligt att dra slutsatser om nyttjandetiden. Anledningen till bristen av data diskuteras senare i diskussionen.

Luftfuktigheten för enhet 2 och 3 mellan den 11-15 mars presenteras i figur 40. Enhet 2 hade diffusionstork monterade och uppvisar en lägre relativ fuktighet än enhet 3, som inte hade diffusionstork, under större delen av tiden, med undantag runt 2500 minuter och 4000 minuter. Gemensamt för de tider då luftfuktigheten för enheterna sammanfaller är att luftfuktigheten är relativt låg. Det indikerar att diffusionstorken fungerar väl för högre luftfuktigheter, men ungefär lika bra vid lägre luftfuktigheter. Mer intressant är det faktum att grafen även indikerar att diffusionstorken har en nyttjandetid på över sex dagar, eftersom mätningen startades 9 mars, och grafen slutar vid 15 mars.



Figur 40: Luftfuktigheten för enhet 2 och 3 från den 11 mars till 15 mars.

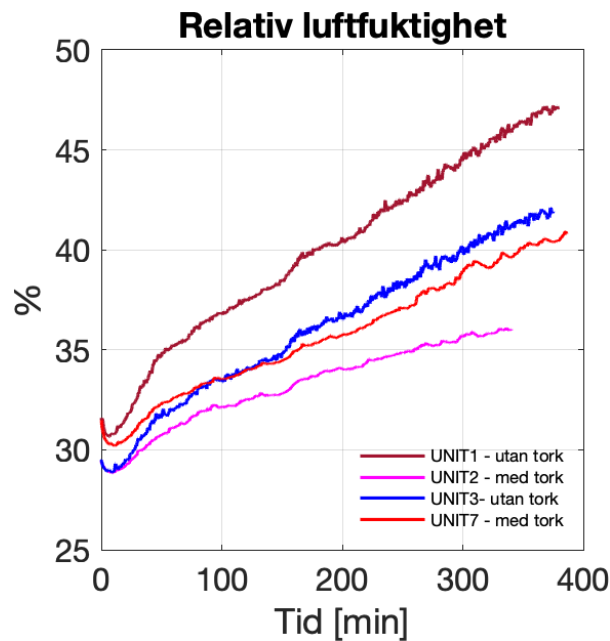
I figur 41 visas färgen på silican i diffusionstorken den 15 mars. Det konstaterades att den skiftat från orange till något mer genomskinlig.



Figur 41: Färgskiftning i diffusionstorken 15 mars.

I figur 42 visas luftfuktigheten för samtliga plattformar från 21-22 mars. Det kan konstateras

att skillnaden i luftfuktighet mellan enhet två och tre är liten i början av grafen, men ökar ju mer luftfuktigheten stiger. Återigen indikerar detta att diffusionstorken fungerar väl vid högre luftfuktigheter, men påvisar också att torkningsförmågan försämrats. Vid slutet av mätningen var skillnaden i luftfuktighet mellan plattform två och tre endast sju procentenheter vilket kan jämföras med den största uppmätta skillnaden i mätningen mellan 11-15 mars vilket var nästan 20 procentenheter. Dock är jämförelsen inte helt rättvis, då dessa skillnader är tagna vid olika nivåer av luftfuktighet.



Figur 42: Luftfuktighet mellan 21 mars till 22 mars.

I figur 43 visas diffusionstorken för enhet 1 den 23 mars. Jämfört med diffusionstorken den 15 mars i figur 43 är silican nästan helt genomskinlig.



Figur 43: Diffusionstork den 23 mars.

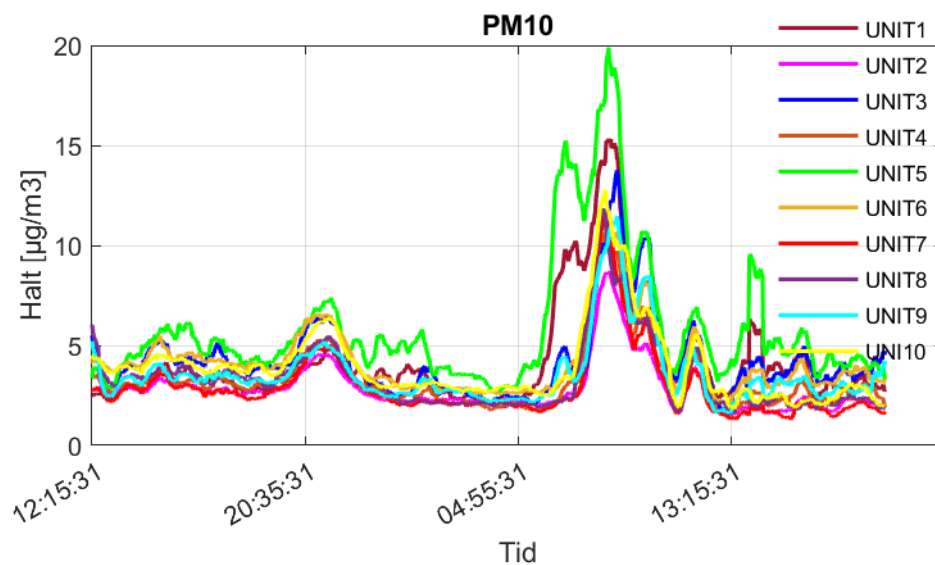
4.3.3 MOMENT XI: Mätningar vid trafikleder

Mätning vid Dag Hammarskjöldsleden

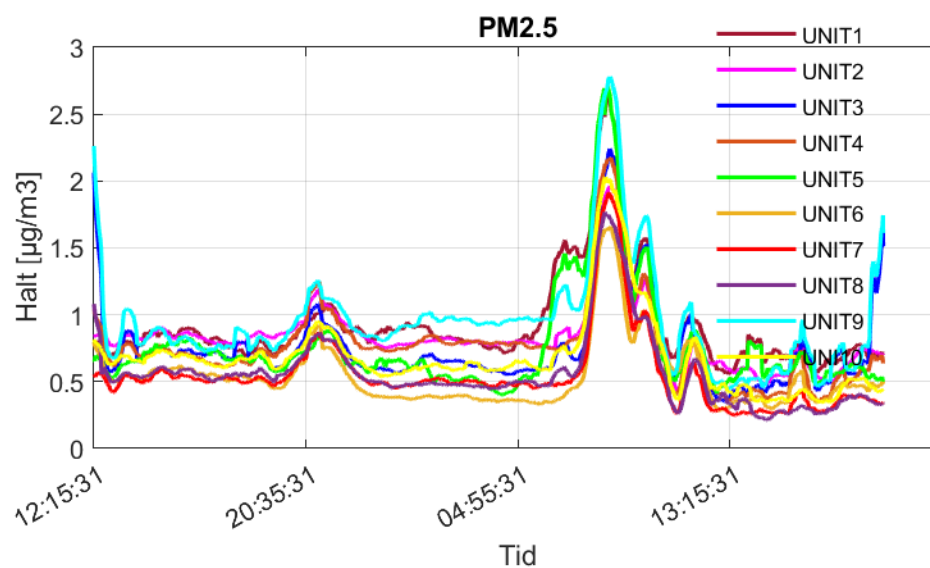
I figur 44 och 45 visas koncentrationen PM_{10} och $PM_{2.5}$. Data finns från den 13 april klockan 12:15 till 14 april klockan 18:30. Förhöjda halter av PM uppmättes särskilt den omkring 13 april klockan 20:30 samt den 14 april klockan 08:00. Natten mellan den 13 april och 14 april uppvisar låga nivåer PM. De högsta topparna är från de plattformar placerade närmast vägen.

Förhöjda halter PM runt klockan 08:00 kan antas vara kopplade till rusningstrafiken på morgonen, och de låga halterna PM på natten stärker indikationen om att plattformarna verkar följa trafikflödet. Den förhöjda halten runt 20:30 i mätningen är något av en avvikelse.

Inga plattformar överskrider $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ för PM_{10} vilket är den högsta tillåtna halten som svensk lag tillåter, se rubrik 2.1.1. Det skall dock tas i beaktning att mätarna för PM ej är kalibrerade och resultatet kan därför ej verifieras i nuläget.

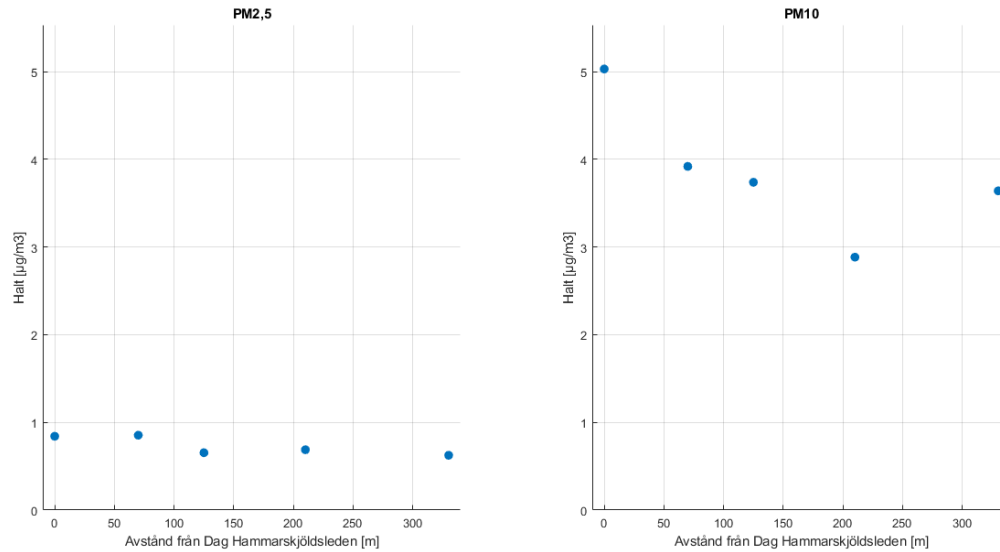


Figur 44: Uppmätt halt PM_{10} vid Dag Hammarskjöldsleden.



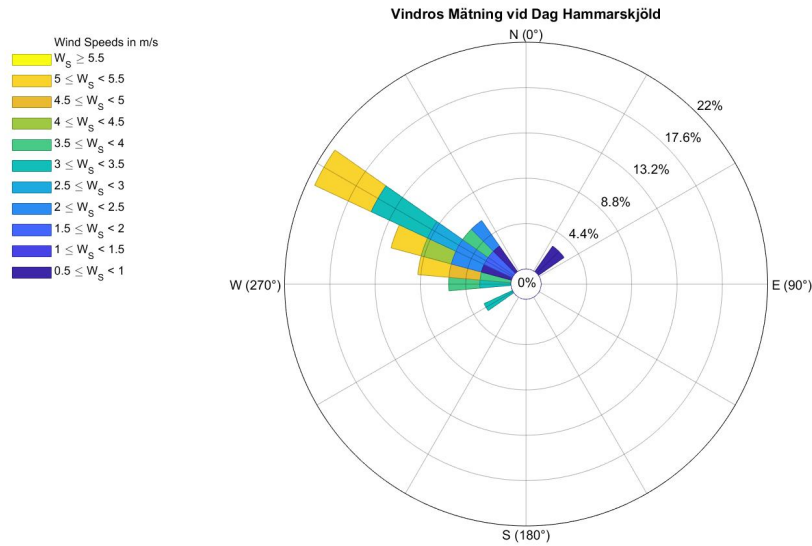
Figur 45: Uppmätt halt $PM_{2.5}$ vid Dag Hammarskjöldsleden.

Nedan i figur 46 illustreras medelvärdet under mätningen för de olika mätavstånden. Observera att uppmätta halter av PM_{10} har en större minskning än $PM_{2.5}$ i samband med avtagande avstånd från vägen. En sannolik orsak till detta är att PM_{10} påverkas mer av gravitationskraften än $PM_{2.5}$ vilket innebär att PM_{10} från Dag Hammarskjöldsleden faller ner till marken innan de når plattformarna längre bort.



Figur 46: Genomsnittlig PM-halt över hela mätningen avtog med avstånd från vägen.

Det finns möjlighet att undersöka hur vädret påverkar resultaten. I figur 47 visas ett histogram över vindriktning och vindstyrka mellan den från 11:00 den 13:e till 19:00 den 14:e april 2021 i Göteborg. Histogrammet antas vara representativt för hela Göteborg. Procentsatserna i figuren representerar frekvens av vindriktningen under tidsintervallet. Under mätningen var nederbörden 0,2 mm och vädret var molnigt. Data är hämtade från SMHI [38]. Utifrån histogrammet och information om nederbörd är det möjligt att dra ytterligare slutsatser som framkommer i diskussionen.



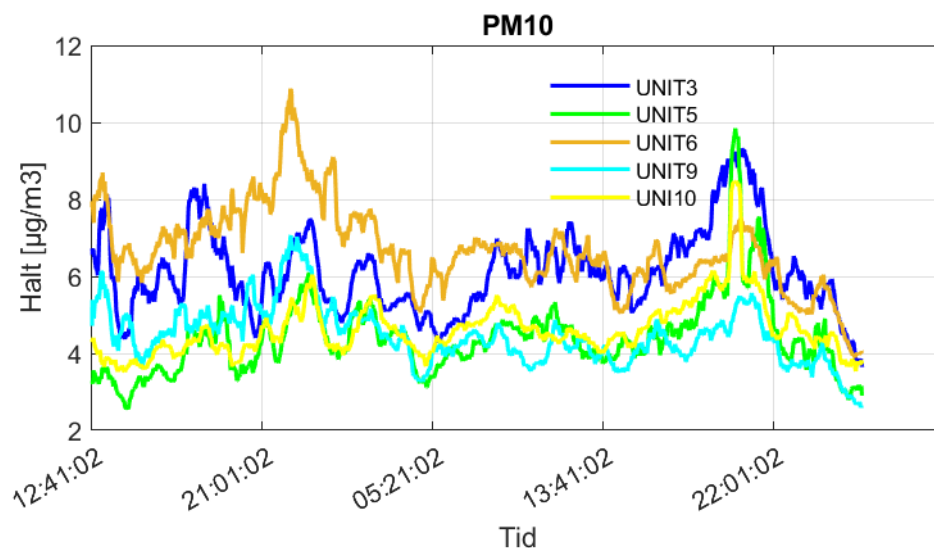
Figur 47: Vindros för Dag Hammarskjöldsleden mellan 13:e-14:e april

Observera att den nordvästliga vindriktningen i vindrosen innebär att majoriteten av vinden kommer ifrån nordvästväst och blåser sydost, vilket är in mot bostadsområdet.

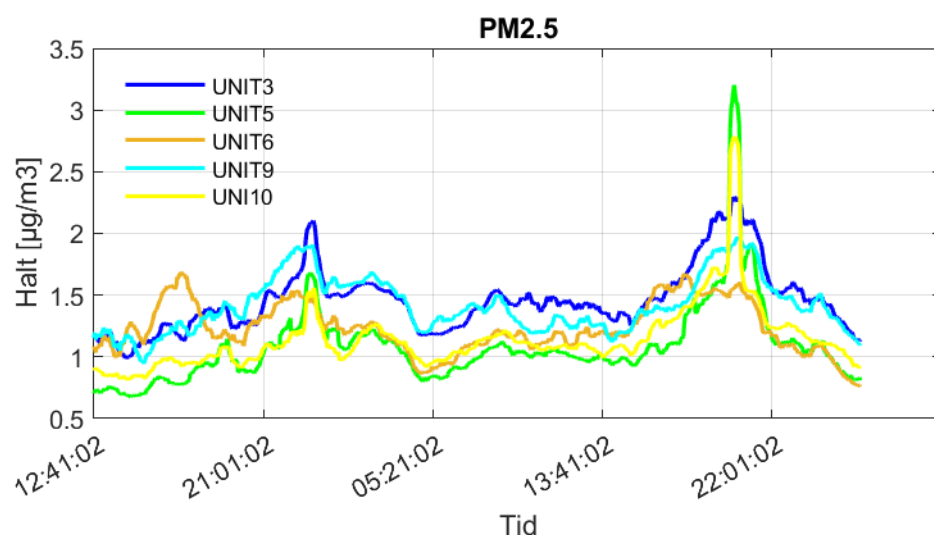
Mätning vid E6:an

Experimentet vid E6:an utfördes med 8 stycken LCAQMP:er med placering som visas i figur 22.

Graferna i figur 48 och 49 visar resultaten från mätningen, med ett glidande medelvärde över 899 mätpunkter, motsvarande ungefär 30 minuter. Några enheter mätte inte på grund av tekniska fel.



Figur 48: Halt PM_{10} vid E6:an.

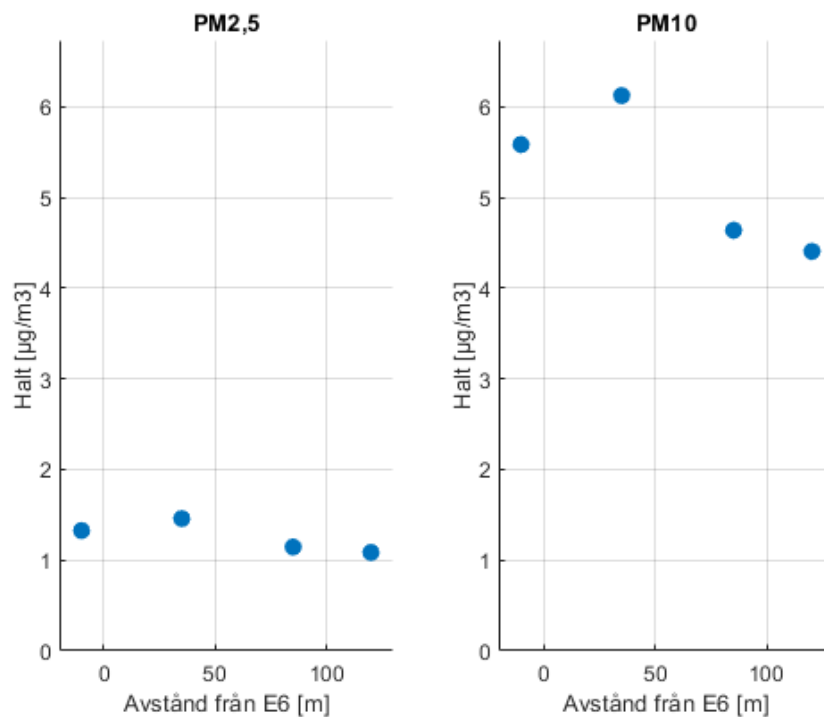


Figur 49: Halt $PM_{2.5}$ vid E6:an.

Till skillnad från mätningen vid Dag Hammarskjöldsleden har inte grafen inte tydliga toppar vid klockslag där man kan vänta sig rusningstrafik. Detta beror troligtvis på att mätningen utfördes under en helg där rusningstrafik ej förekommer på samma vis som under vardagar. Det är även värt att notera att halterna av PM var generellt sett betydligt lägre än Dag Hammarskjöldsleds mätningen vilket troligtvis kan hänföras till att mätningen skett under en helg.

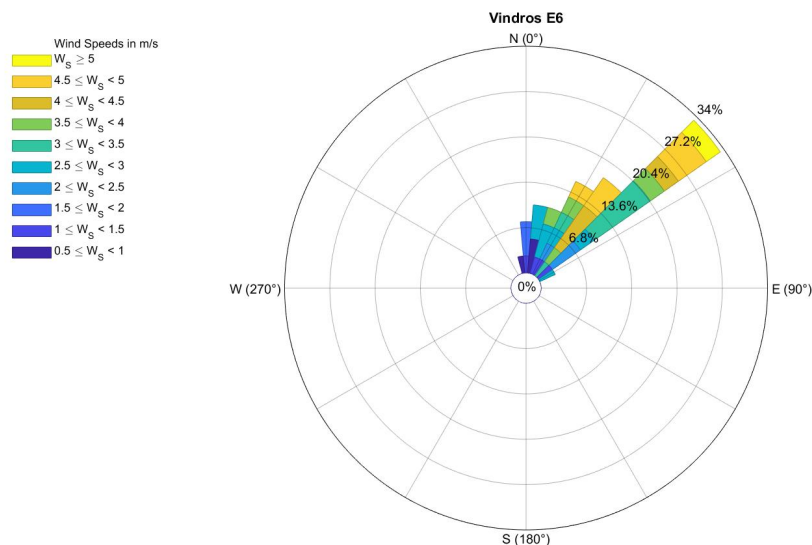
I figur 50 visas plattformarnas medelvärde av $PM_{2.5}$ och PM_{10} som funktion av avståndet till E6:an. Plattformsparet näst närmast vägen mätte störst mängd partiklar, annars avtar

halten med ökande avstånd från vägen.



Figur 50: Partiklar efter avstånd från E6:an

Vindrosen i figur 51 visar att vinden under mätningen kommer från nordost och är förhållandevis svag under mätperioden. Under mätperioden förblev vädret soligt. Datan är hämtad från SMHI:s mätstation nära Skansen Lejonet i Göteborg och vinden antas vara densamma vid mätplatsen [38].

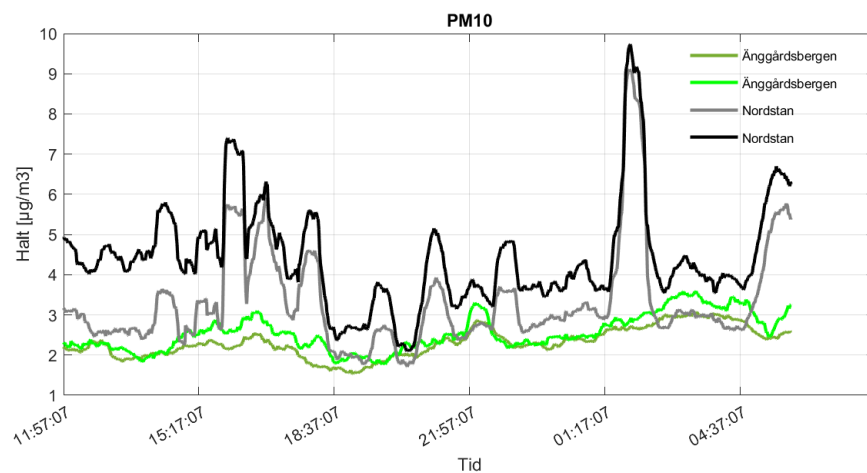


Figur 51: Vindros för E6 mellan 16:e-18:e april

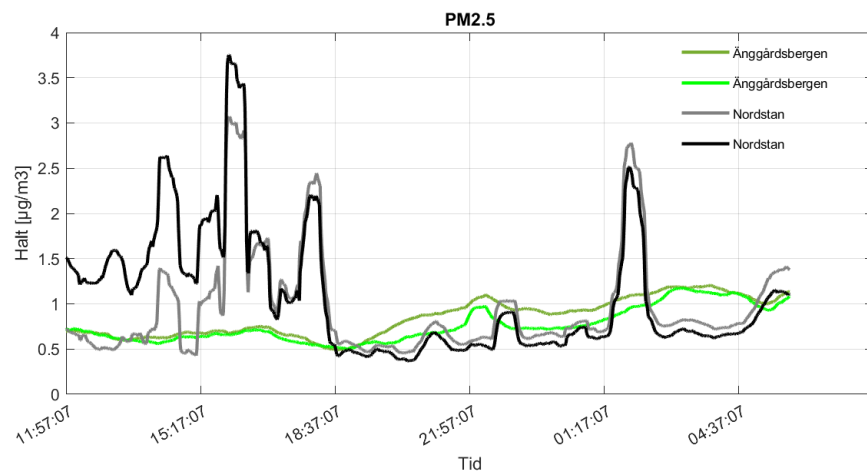
4.3.4 MOMENT XII: Stadsmiljö jämfört med naturmiljö

Här redogörs resultaten från den jämförande mätningen mellan stadsmiljö och naturmiljö. Mätningen redovisas figurerna 52, 53, 54 och 55. De visar koncentrationer för PM_{10} , $PM_{2.5}$, CO_2 och VOC.

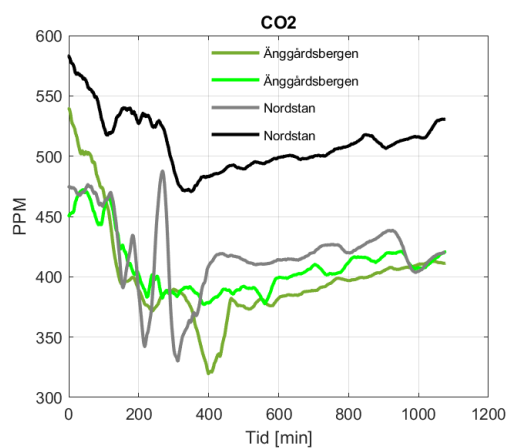
Den svarta och den grå linjen representerar data från plattformar placerade i Nordstaden medan de gröna representerar mätdata från plattformar i Änggårdsbergen. Ett glidande medelvärde har använts för $PM_{2.5}$, PM_{10} , och CO_2 för att undvika brus i grafer. Spannet som användes för medelvärdet är 899 mätpunkter, vilket motsvarar ungefär 30 minuter.



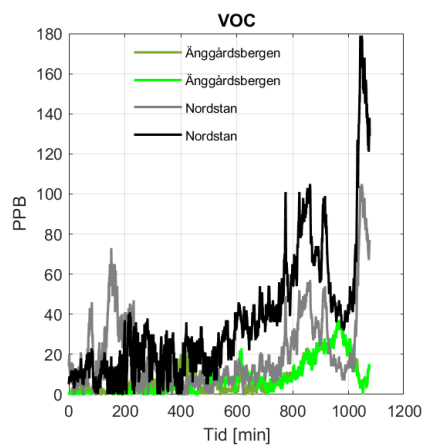
Figur 52: Halt PM_{10} i stads- och naturmiljö.



Figur 53: Halt $PM_{2.5}$ i stads- och naturmiljö.



Figur 54: Halt CO_2 i stads- och naturmiljö.



Figur 55: Halt VOC i stads- och naturmiljö.

Både PM_{10} och $PM_{2.5}$ i figur 52 respektive 53 visar att PM-nivåerna är högre i stadsmiljö än naturmiljö vilket stämmer överens med hypotesen att partikelhalterna borde vara större i staden. Detta tyder på att luften är renare i skogen än i staden.

Lite förvånande var det att även VOC skilde stort mellan stad och natur då innan experimentet förväntades det att träd och växter möjligtvis skulle kunna påverka VOC:er i luften men det verkar inte som att de har gjort det i detta fall.

Halterna CO_2 som syns i figur 54 indikerar att koncentrationen av växthusgasen är högre i stadsmiljö än skogsmiljö vilket troligtvis kan härledas till stadstrafiken.

4.4 Emissionsfaktorer för PM

Här redovisas vilka emissionsfaktorer som beräknades för kallstart med både dieselaggregatet och bilsinbil samt en jämförelse med emissionsfaktorer beräknade av trafikverket och en rapport. Emissionsfaktorerna beräknades i två olika enheter: (1) kg partiklar i luft per Joule bränsle och (2) kg partiklar i luft per kilometer.

I tabell 14 visas de värden som hämtades för att beräkna emissionsfaktorn för $PM_{2.5}$ och PM_{10} för bilsinbilen.

Tabell 14: Mätdata från bilsinmätning.

Variabel	Värde
$PM_{2.5,Hög}$	$97 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{2.5,Bakgrund}$	$0,80 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{10,Hög}$	$161 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{10,Bakgrund}$	$3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$CO_{2,Hög}$	$298 \cdot 10^6 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$CO_{2,Bakgrund}$	$732 \cdot 10^3 \mu\text{g}/\text{m}^3$
$EF_{CO_2,Bensin}$	$190 \text{ g}/\text{km}$
$EF_{CO_2,Bensin}$	$69,7 \text{ kg}/\text{GJ}$

Utifrån den datan användes ekvation 1 och emissionsfaktorer beräknades, de visas i tabell 15.

Tabell 15: Emissionsfaktorer från bilmätning.

Emissionsfaktor	Värde
$EF_{PM_{10},Bensin}$	$6,76 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{GJ}$
$EF_{PM_{10},Bensin}$	$1,01 \cdot 10^{-4} \text{ g}/\text{km}$
$EF_{PM_{2.5},Bensin}$	$2,26 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/\text{GJ}$
$EF_{PM_{2.5},Bensin}$	$6,15 \cdot 10^{-5} \text{ g}/\text{km}$

På liknande sätt beräknades emissionsfaktorn för dieselaggregatet. I tabell 16 nedanför

Tabell 16: Mätdata från dieselmätning.

Variabel	Värde
$PM_{2.5,Hög}$	340 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{2.5,Bakgrund}$	4,5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{10,Hög}$	510 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$PM_{10,Bakgrund}$	16,6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$CO_{2,Hög}$	4020 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$CO_{2,Bakgrund}$	1040 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
$EF_{CO_2,Diesel}$	130 g/km
$EF_{CO_2,Diesel}$	53,4 kg/GJ

I tabell 17 visas resultaten för emissionsfaktor för diesel.

Tabell 17: Emissionsfaktor från dieselaggregat.

Emissionsfaktor	Värde
$EF_{PM_{10},Diesel}$	8,8 kg/GJ
$EF_{PM_{10},Diesel}$	21,4 g/km
$EF_{PM_{2.5},Diesel}$	6,1 kg/GJ
$EF_{PM_{2.5},Diesel}$	14,8 g/km

Trafikverket anger att bensindrivna personbilar i snitt släpper ut PM 0,0013 g/km. För dieslbilar är motsvarande siffra 0.0045 g/km. Storleken på partiklarna är inte specificerad [34]. Emissionsfaktorerna beräknade utifrån plattformens mätningar är ungefär en faktor 10 mindre för bensin än Trafikverkets och för diesel ungefär en storleksskillnad på faktor 10^4 .

Att jämföra dessa värden direkt mot varandra är dock inte helt rättvist. Mätvärden som användes för att beräkna emissionsfaktor från LCAQMP kommer från stillastående kallstartade motorer, medan Trafikverkets siffror är baserade på alla utsläpp från vägtrafik i Sverige. Dessutom är dieselutsläppen beräknade från ett elverk som vi inte undersökt hur det förhåller sig till en dieslbil. Beräknade emissionsfaktorer gäller nästan enbart i de specifika fall de beräknats från, då stora variationer uppkommer beroende på vad och hur emissionerna är mätta. Till exempel publicerade Svenska miljöinstitutet 2015 en rapport där de tagit fram emissionsfaktorer för PM_{10} och $PM_{2.5}$ i Göteborg. Över fem år blev för PM_{10} deras emissionsfaktor 0.06 g/km och för $PM_{2.5}$ 0.021 g/km för alla partiklar E6:an[39].

Sammanfattningsvis kan LCAQMP användas för att beräkna en emissionsfaktor, men huruvida denna är korrekt eller användbar är svårt att avgöra.

5 Diskussion

I detta kapitel kommer projektet och dess resultat att diskuteras.

5.1 Problem och förbättringsmöjligheter hos LCAQMP

Nedan utvärderas plattformens konstruktion och hur dess utförda förbättringar påverkar mätresultaten. Även möjliga framtida vidareutvecklingar av plattformen diskuteras.

5.1.1 Användarvänlighet

Det är tidskrävande att utföra mätningar med plattformen. Exempelvis tar det lång tid att montera diffusionstorken och byta batteri eftersom plattformen är uppbyggd i flera olika delar och en omfattande mängd skruvar.

Ifall det utförs fler mätningar med plattformarna i framtiden skulle det underlätta att ha en förbättrad användarvänlighet, genom att exempelvis enkelt kunna komma åt saker som minneskort och strömförsörjningen utan att behöva ta isär lådan.

5.1.2 Hållfasthet

Plattformarnas tunna konstruktion i limmad akrylplast har medfört att många delar gått sönder. På flera ställen har spickor i akrylplasten uppstått och limfogar har gått sönder. Därutöver är delar av lådorna sneda, vilket gör att det ibland är svårt att montera ihop lådorna.

Att denna mängd skador uppstått efter endast två vårterminer av försiktig användning visar att konstruktionen skulle behöva revideras med ett hållfasthetsperspektiv på designen. Tillsammans med användarvänligheten är detta en tydlig aspekt som kan underlätta vidare arbete genom en omkonstruktion av lådan.

5.1.3 Högt uppmätta temperaturer

Vid flera mätningar har LCAQMP:s sensor BME680 registrerat temperaturer upp mot nästan 40 °C medan utomhustemperaturen aldrig överstigit 20 °C.

Troligtvis beror detta på att plattformen agerar som ett litet växthus vilket gör att värmen stannar inne i lådan. En korrekt temperatur är viktig för eftersom NO₂- och O₃-sensorerna använder temperaturen för att beräkna koncentrationerna.

En lösning på problemet med att det uppstår höga temperaturer inuti LCAQMP vore att måla lådan vit för att reflektera så mycket som möjligt av den inkommande solljuset. En annan lösning vore att utveckla ett nytt hölje till LCAQMP och eventuellt nyttja ett annat material som inte är lika transparent som akrylplasten.

5.1.4 Läckage in till luftkanal

När den nya luftkanalen med kåpa testades i MOMENT III visade det sig att stigtiden var ungefär densamma för den nya kanalen med och utan pump, se figur 30. En möjlig anledning till detta resultat är att luftkanalen inte är tillräckligt tät vilket orsakar läckage och därmed minskar pumpens sugkraft.

Ett lösningsförslag vore att nyttja någon form av packning eller fog som tätar luftkanalen och dess omgivning. Till exempel skulle nitrilpackningar kunna nyttjas kring in- och utlopp samt kring luftkanalens nedre anläggningsyta för att reducera läckage. Det finns även hål vid infästningen av sensorerna i botten av luftkanalen som kan skapa problem och komma behöva åtgärdas. Vid valet av fog är det viktigt att fogen i fråga ej ger utslag på VOC sensorn då detta resulterar i att felaktiga mätvärden registreras.

5.1.5 Diffusionstork

Resultatet från MOMENT X tyder på att diffusionstorken är kapabel till mätningar vid både höga och låga luftfuktigheter samt långtidsmätningar på minst 6 dygn. I nuläget är inte diffusionstorken den begränsande faktorn gällande hur länge plattformen kan mäta, utan snarare plattformens batteritid. Om batteritiden framöver skulle förbättras till att överstiga sex dygn skulle det bli intressant att göra en noggrannare undersökning, för att se hur länge diffusionstorken faktiskt är kapabel att nyttjas.

Silicagranulatet i diffusionstorken är kapabelt att absorbera en viss mängd vatten innan den blir mättad, men det hade varit intressant att se om diffusionstorkens prestanda försämras dessförinnan. Detta skulle kunna undersökas genom att mäta på en kontrollmiljö med en kontinuerligt känd stabil luftfuktighet. Utifrån dess mätdata sedan teoretiskt räkna ut hur mycket vatten diffusionstorken kan absorbera innan dess prestanda reduceras.

5.1.6 Plattformen slutar skriva data

Vid vissa av de längre mätningarna som utfördes har några LCAQMP misslyckats med att skriva data och ibland har plattformarna skrivit flera helt eller nästan tomma filer. Vad detta kan ha berott på lyckades aldrig riktigt förklaras. Vid någon av mätningarna är det möjligt att ett batteri inte blivit laddat ordentligt, men efter första gången dubbelkollades batterierna innan varje mätning. Någon form av glapp skulle kunna ligga bakom problemet som gör så att plattformen antingen stängs av eller startar om. En annan möjlighet är att det är något i koden strular.

5.2 Individuella sensorer

Nedan diskuteras diverse problem relaterade till de enskilda sensorerna.

5.2.1 CCS811 - VOC

I MOMENT I, underkapitel 4.2.1, visade det sig att CCS811 gav värden för VOC mer än tio gånger större än maxvärdet. Enligt databladet ska värdena begränsas till 1187 ppb, men som visat i figur 28 uppmättes nivåer omkring 10 000 ppb. En närmare undersökning av datablad till CCS811 visade att det fanns flera olika datablad till sensorn. Ett nytt datablad [40] visade att CCS811 mäter TVOC (total volatile organic compound) i spannet 0-32768 ppb och eCO₂ i spannet 400-29206 ppb.

Från VOC mätningen i MOMENT II, rubrik 4.2.2, framgick det att sensorn inte gav något utslag när alkanen propan (en sorts kolväte) forcerades in i LCAQMP. Under föregående års arbete utfördes ett liknande experiment där alkanen dodekan forcerades i LCAQMP utan att sensorn detekterade ämnet [7]. Hypotesen var då att dodekan som är ett relativt tungt ämne ej lyckades förångas ordentligt och blandas i luft. När nu sensorerna misslyckats att detektera två olika sorters alkaner är det nog mer sannolikt att CCS811 sensorn ej reagerar på alkaner, trots att alkaner klassas som VOC. Vidare undersökningar är nödvändiga för att fastställa denna teori.

Däremot är det tydligt att sensorn ger utslag mot andra ämnen som visades i MOMENT I, rubrik 4.2.1. I det testet var halten av VOC okänd vilket innebär att detta års arbete ej lyckats göra någon mätning med en med en känd referens att kalibrera emot. Detta är nödvändigt att åtgärda i framtiden.

5.2.2 Övergripande om OX4321 & NO2A43F

En ytterligare svårutvärderad sensor är OX-A431 och NO2-A43F. I MOMENT IX, mätningen med Miljöförvaltningen, var NO₂-koncentrationen mycket skild från Miljöförvaltningens mätvärden. Vidare har det inte funnits möjlighet att jämföra O₃-koncentrationen mot en referens.

Det uppdagades i senare delen av arbetet att sensorerna måste förses med minst 3,5 V. Tidigare hade de försetts med 3,3 V. Endast vid mätningarna med bilen och dieselaggregaten var sensorerna korrekt spänningssatta. Dock visade dessa mätningar negativa mätvärden för NO₂ vilket borde utredas ytterligare.

5.2.3 Problem med PT1000-sensorn

På kortet med sensorerna som mäter NO₂ och O₃ finns också en temperaturmätare som heter PT1000. Det är en analog input som man kan läsa av via Arduino-koden.

Eventuella felkällor till PT1000:s beteende:

- Det kan finnas en skillnad i hur Adafruit-kortet läser volt mellan olika pins, till exempel de 'vanliga' analog-pinsen A0-A5 och till exempel pin A7, som enligt databladet naturligt ligger runt 2 V. Pinsen A0-A5 borde rimligtvis vara säkrast att använda, men

de är upptagna i nuläget.

- Det kan vara något fel i koden som inte insetts. Kanske läses spänningen på fel sätt.
- Problem med själva PT1000-sensorn. Att det skulle vara fel på alla känns dock osannolikt. Snarare är det kanske bara så att de inte är precisa.
- Faktorer såsom luftfuktighet och solljus kanske påverkar hur sensorn läser av värdena.

Därför används istället BME680 som temperatursensor. Temperatur-sensorn på BME680 har alltid uppvisat mer korrekta och stabila temperaturvärden än PT1000. Dessutom behöver den inte kalibreras. Ska man nyttja PT1000 måste man teoretiskt ladda upp olika koder på alla de olika Adafruit-korten. Temperatursensorn på BME680 har dock givit alldeles för höga värden ibland vilket troligtvis beror på att solen står på och att det blir för varmt i LCAQMP-lådan. Men om så är fallet så mäter denna sensor ändå 'rätt', till skillnad från PT1000 som ger orimliga värden.

5.3 Mätmetoder

Under arbetets gång har mätningar utförts i kontrollerade miljöer och i fält. Här diskuteras hur olika mätningar har utförts och vad som kan ha påverkat resultatet på olika sätt.

5.3.1 Kontrollerande mätningar

På grund av rådande pandemi inleddes ej de kontrollerade mätningarna med kalibreringsmätningar. Det beslutades att kalibrering skulle utföras i efterhand och fokus skulle istället läggas på att samla in data. Därför är det huvudsakligen trender från utförda moment som är relevanta, mer än det faktiska värden som visas. Generellt visar alla partikelsensorer liknande kurvor när de exponeras för samma miljö, men ofta med en differens av de exakta värdet mellan kurvorna.

Från kalibreringsmätningarna som genomfördes senare under kandidatarbete gavs endast mätdata för CO₂ som gick att kalibrera. Vid fortsatta mätningar med LCAQMP rekommenderas att kalibreringsmätningar genomförs tidigt i projektet då problem med sensorer kan upptäckas och åtgärdas.

Den befintliga kontrollvolym, se figur 9, som använts för mätningar visade sig i MOMENT 3.2.6 läcka omkring hälften av den som gas som pumpades in i volymen. Detta kan troligtvis förklara resultaten från moment II och VII där det var stora skillnader när plattformarna var kopplade till kontrollvolymen jämfört direkt med partikelkällan.

Flera experiment kan vara lämpliga att genomföra igen. Ur MOMENT VII i 4.2.7 fastställdes det att PM-sensorn kan läsa sot som är en ultrafin partikel. Därefter har det inte undersökts hur väl sensorerna kan mäta fler ultrafina partiklar. Sensorn som mäter PM är baserad på ljusspridning, se 2.3, och eftersom sot sprider ljus anses det rimligt att sensorerna ger visst

utslag för detta.

Utöver de ovannämnda felkällorna för experimenten i kontrollerade miljöer upplevs utföranden relevanta och lämpliga för att utvärdera LCAQMP som mätplattform av luftföroreningar. Resultaten har givit god insikt kring plattformens möjligheter och begränsningar.

5.3.2 Fältmätningar

Vid mätningar i fält finns åtskilliga faktorer som påverkar halten av luftföroreningar i atmosfären. Detta innebär att mätningar på samma plats men vid olika tidpunkter inte ger samma resultat två gånger. Trafik och väder kan variera från den ena dagen till den andra. Förslag på framtida mätningar är att undersöka hur differenser i luftföroreningar är beroende av väderförhållanden vid samma plats (så som vindhastighet, vindriktning och regn) eller hur olika konstellationer av fordon i trafikflödet påverkar mätresultatet.

LCAQMP tros ha goda möjligheter att utföra mätningar under inversion ifall plattformar kan placeras på olika höjd. Mätningarna vid Dag Hammarskjöldsleden kan då göras en vindstilla vinterdag när förhållanden är optimala för inversioner. Anledningen till att platsen är intressant för inversioner är att det är relativt tätt med bostadsområden som inklämda mellan Änggårdsbergen och Slottskogen. Sådana förhållanden kan leda till höga halter av luftföroreningar som skulle kunna vara relevanta för politiska och strategiska beslut.

En intressant fältmätning hade därmed varit att mäta luftföroreningar vid regnväder för att se huruvida halten luftföroreningar skiljer sig jämfört med när det slutat regna. På så sätt kan man undersöka huruvida koncentrationen av luftföroreningar minskar vid regnigt väder jämfört med torrt väder. Tyvärr gjordes ej mätningar där sådana fenomen kunde observeras på grund av avsaknad av regn under våra experiment och experimentet görs troligtvis bäst under längre perioder. En av de största begränsningarna sensorplattformarna har är batteriets relativt korta livslängd, se MOMENT V i underkapitel 4.2.5. Detta gör att den ej kan mäta konsekvent i längre än 31 timmar och därmed olämplig för datainsamling längre än detta.

5.3.3 Stigtidsexperiment CO₂

Stigtidstestet visar på att det är olika stigtider för de fyra LCAQMP som nyttjades vid experimentet. Dock finns det flera faktorer som kan ha påverkat experimentet som borde åtgärdas innan ett eventuellt nytt experimentet görs. Till att börja var de nyttjade slangarna av olika material och längd vilket kan ha bidra till olika förluster mätplattformarna sinsemellan. Sedan har slangarna placerats på olika avstånd från den slang som tillgodoser kontrollvolymen med koldioxid vilket kan betyda att vissa av mätarna får ett direkt flöde till sig, medan andra inte får det vilket resulterar i att de får olika höga halter koldioxid. Det skulle gå att motverka genom att placera en fläkt i kontrollvolymen.

I nuläget samplar LCAQMP varannan sekund vilket innebär att om en förbättring i stig-

tiden ska registreras måste denna överstiga 2 sekunder för att den ska detekteras. Det kan åtgärdas genom att ha en samplingsfrekvens på en sekund eller mindre för att möjliggöra detektering av ännu mindre förbättringar av stigtiden. Slutligen är plattformarna i nuläget inte individuellt kalibrerade vilket innebär att mätdata från stigtidstesterna inte visar helt korrekt data, vilket kan ge missvisande resultat.

För att få mer korrekt mätdata kan en upprepning av stigtidstestet utföras med dessa problem åtgärdade. En mätning där alla LCAQMP är individuellt kalibrerade, mäter samma luftflöde med en bestämd CO₂-halt och har samma längd och material på slangarna.

5.3.4 Alternativ metod för att bestämma diffusionstorkens nyttjandetid

Då en exakt nyttjandetid för diffusionstorken inte gick att bestäm föreslås en alternativ metod för uppskattning av nyttjandetiden. Genom att väga diffusionstorken med torr silica och därefter väga den med mättad silica och ta differensen mellan kan mängden absorberat vatten beräknas. Om luftflödets hastighet genom diffusionstorken och luftfuktighet är känt kan nyttjandetiden erhållas.

5.3.5 Emissionsfaktor

De framtagna emissionsfaktorerna gäller för ett dieselaggregat och en Toyota Corolla från 2001 vilka är väldigt specifika fall. De visar endast korrelationen mellan PM och CO₂. För att ta fram emissionsfaktorer som kan användas för att beräkna olika emissioner för mer relevanta och generella fall krävs betydligt mer mätdata från mer relevanta och kända emissionskällor. Detta kan göras genom att utföra mätningar vid högtraffikerade leder i Göteborg under längre perioder och jämföra med bakgrundskoncentrationer av luftföroreningar som uppmätts. En sådan emissionsfaktor hade varit mer lämpligt i städer för att beräkna luftföroreningar då emissionsfaktorerna i så fall är baserade på data från stadstrafik. Emissionsfaktorer som är hämtade från IVL är framtagna på ett liknande vis [39]. Mer mätdata skulle även innebära mindre osäkerheter och därmed öka reliabiliteten.

Noterbart är att vissa enheter i tabellerna 14-17 som g/km trots att mätningarna är gjorda på stillastående motorer. Detta på grund av att g/km är vanlig vid beräkningar av emissionsfaktorer och därför beräknades gruppens emissionsfaktorerna i samma enhet. Emissionsfaktorer kan även tas fram på flera vis, i detta projekt har endast ett sätt utförts. Andra tillvägagångssätt hade kunnat vara relevanta att undersöka.

Den valda metoden kräver en spårgas för att kunna användas. Det måste fastställas att spårgasen och den eftersökta luftföroreningen för emissionsfaktor går att spåra till samma källa. Sedan behöver det undersökas om spårgasen och luftföroreningen efter att de släppts ut beter sig likartat i luften och inte påverkas annorlunda av exempelvis temperatur eller väder. Med andra ord är det betydande att spårgasen och vald luftförorening korrelerar väl för att emissionsfaktorn skall vara relevant. Koldioxid och PM valdes då båda kunde fastställas komma från samma källa och koldioxid är den gas som plattformen kan mäta

med högst träffsäkerhet. Det har inte undersökts hur väl de två föroreningarna korrelerar med varandra eller om det finns en lämpligare spårgas att välja. Detta hade kunnat göras på liknande sätt som i MOMENT VII, se 4.2.7, där korrelationsfaktor framtagits.

Det är väsentligt att poängtera att de använda metoderna för framtagning av trafikverkets och våra emissionsfaktorer skiljer sig, se 1. Den framtagna emissionsfaktorn i denna rapport beräknades med emissioner direkt från ett avgasrör från en äldre kallstartad bil samt avgaser från ett dieselaggregat. Datan hämtade ifrån studierna som Trafikverket gjort är baserade på utsläppen ifrån all vägtrafik i Sverige. Generellt sett har nyare bilar även bättre reningsfilter vilket kan leda till att emissionsfaktorer beräknade på detta vis inte nödvändigtvis korrelerar till snittet för all trafik. Bättre reningsfilter gör att nyare bilar emitterar lägre koncentrationer av kvävedioxid och PM jämfört med äldre bilar. Skalas detta sedan upp till ett samhällsperspektiv blir då emissionsfaktorer för PM för stora i takt med elektrifieringen och förhållandevis renare vägfordon.

En av baktankarna till att beräkna emissionsfaktorer med plattformen var att se om man skulle kunna identifiera olika typer av fordon baserat på uppmätt data från plattformen. Det som krävs för att detta ska vara möjligt är att det ska gå att se tydliga skillnader mellan emissionsfaktorer för olika typer av fordon. Med mätningar på två specifika motorer är det svårt att hitta något relevant att jämföra mot för att bedöma om det funkar, och det bästa vore kanske att göra fler mätningar med plattformen och jämföra resultaten mellan dessa mätningar för att göra en ordentlig bedömning av hur väl plattformen och emissionsfaktorer beräknade från dess data kan användas för att identifiera olika typer av fordon.

5.4 Samhälleliga och etiska aspekter

Projektets resultat visar på att det går och montera samt implementera sensorer som mäter flertalet olika föroreningar till en relativt låg kostnad vilket är ett lovande resultat. Dock kvarstår det i nuläget fortsatt arbete med att kalibrera sensorerna för att de ska producera korrekt och tillförlitlig mätdata. Projektets framtida strävan är att tillhandahålla en kostnadseffektiv mätplattform som på grund av dess låga kostnad därigenom kan brukas av flertalet användare för att öka antalet mätningar av luftföroreningar. Förhoppningen är att ett ökat antal mätningar av luftföroreningar kan resultera i en mer nyanserad kartläggning av luftföroreningar i samhället och därigenom öka medvetenheten kring detta problem.

I nuläget och framöver kan det förekomma att mätresultaten från LCAQMP är felaktiga på grund av till exempel felaktig mätdata från de billiga sensorer som nyttjats. Det är därmed viktigt att mätresultaten inte används för att dra några alarmerande slutsatser då det kan bero på att någon av sensorerna är felaktiga. Det är därmed ytterst viktigt att ta detta i hänseende när slutsatser baserat på mätdata dras för att inte skapa obefogad oro hos befolkningen.

6 Slutsats

Projektets syfte var att implementera en ny sensor, förbättra prestandan samt undersöka ytterligare tillämpningsområden för mätplattformen. De tio LCAQMP enheterna som nyttjats i projektet besvarar frågeställningen för projektet, men i nuläget kvarstår det dock arbete med flertalet förbättringsmöjligheter hos LCAQMP, vilka nämns nedan.

6.1 NO₂- och O₃-sensorns pålitlighet

Det är än så länge oklart ifall pålitlig data kan fås ifrån NO₂- och O₃-sensorerna. I nuläget är de enbart 'grundkalibrerade' utifrån datan som kom med sensorerna. Detta räcker inte med tanke på att NO₂-senorn i nuläget ger en negativ respons vid en ökning av NO₂-halten. Referensmätningar mot kända värden är nödvändiga för att skapa en bra kalibrering. Koden bör också ses över för eventuella misstag. O₃-senorn gick aldrig att verifiera då referens saknas.

6.2 Luftpumpens förbättring av stigtiden

Den slutgiltiga implementationen av pumpen påverkar inte stig- och falltid något avsevärt. Resultatet från MOMENT III i figur 30 visar dock att den nya designen utav luftkanalen gjorde responsen snabbare, men att själva pumpen inte hade stor inverkan. Testen med gamla luftkanalen antyder att pumpen faktiskt förbättrade stigtiden. Pumpen kan alltså användas för att göra stigtiden snabbare men behöver förmodligen implementeras bättre i den nuvarande designen för att det ska bli någon märkbar effekt.

6.3 Geografiska och tidsmässiga variationer av luftföroreningar

Med hjälp av LCAQMP kan man till synes märka av mindre lokala geografiska skillnader i luftkvalitet vilket mätningarna vid E6:an vid Örgryte antyder enligt figur 50. Där trenden är att partikelutsläppen minskar desto längre från E6:an man kommer. Detta är dock enbart en mätning, och skillnader på mätfel i olika LCAQMP skulle kunna ge en missvisande bild. Mätningen 'stadsmiljö jämfört med naturmiljö' i figurerna 52-55 uppvisar en tydlig skillnad i luftkvalitet mellan stad och skog. LCAQMP märker alltså av större geografiska skillnader utan problem och sannolikt även mindre lokala sådana.

Experimentet vid Dag Hammarsköldsleden i figurerna 44-46 visar hur LCAQMP kan detektera förändringar i luftkvalitet över tid då man tydligt kan se skillnader av föroreningsnivån över tid i mätdatan. En markant ökning av PM_{2.5}, PM₁₀, CO₂ och VOC detekterades runt kl 8:00 under rusningstrafiken då många färdas till jobbet. Precisionen med vilket LCAQMP mäter är inte tydlig, men experimentet visar ändå på dess förmåga att kunna urskilja förändringar av luftkvalitet över tid.

6.4 Livslängd batteri i LCAQMP

Resultaten från MOMENT V i underkapitel 4.2.5 visar att batteriet räcker ca 28 timmar med pump och mellan 36 och 48 timmar utan pump. Att batteriet utan pump nu räcker en kortare tid än vid föregående års arbete, där den ska ha kunnat mäta i fyra dygn, beror troligtvis på att batterierna har försämrats med tiden.

6.5 Emissionsfaktor för PM

Emissionsfaktorer för PM_{10} och $PM_{2.5}$ har med CO_2 som spårgas tagits fram från LCAQMP:s mätdata. Då mätdata endast är tagen från en relativt kort tidsperiod och väldigt specifika experiment finns det många möjliga felkällor vid applicering av emissionsfaktorn. För att de framtagna emissionsfaktorerna ska bli pålitliga måste mer mätdata samlas in. Val av spårgas bör undersökas då CO_2 möjligtvis inte är den mest lämpliga spårgasen och andra gaser kanske bättre följer partikelhalterna PM_{10} och $PM_{2.5}$ i luften.

6.6 Slutliga rekommendationer och förhoppningar

Kandidatgruppens rekommendation inför fortsatt arbete med LCAQMP är att åtgärda de brister som i nuläget existerar för att öka tillförlitligheten hos mätdata. Med detta åtgärdat är förhoppningen att det fortsatta arbetet med LCAQMP kan resultera i nyttjande vid kartläggning av olika utsläppskällor och dess luftföroreningar.

Referenser

- [1] WHO, “Ambient air pollution: pollutants.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.who.int/airpollution/ambient/pollutants/en/> hämtad: 2021-04-16.
- [2] A. Prüss-Ustün, J. Wolf, C. Corvalán, R. Bos, och M. Neira, “Preventing disease through healthy environments,” World Health Organization, Genève, Schweiz, , 2018.
- [3] Naturvårdsverket, “Andra växthusgaser,” 2020. [Online]. Tillgänglig: <http://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Klimat/Darfor-blir-det-varmare/Andra-vaxthusgaser/> hämtad: 2021-02-09.
- [4] Naturvårdsverket, “Statistik om luft,” 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/Sa-mar-miljon/Klimat-och-luft/Statistik-om-luft/> hämtad: 2021-02-09.
- [5] P. L. Martínez, “Förbättrad luftkvalitet i göteborg - bästa siffran sedan mätstarten,” dec. 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.gp.se/nyheter/g%C3%B6teborg/f%C3%B6rb%C3%A4ttrad-luftkvalitet-i-g%C3%B6teborg-b%C3%A4sta-siffran-sedan-m%C3%A4tstarten-1.39278841> hämtad: 2021-02-09.
- [6] Göteborgs Stad, “Mätplatser.” [Online]. Tillgänglig: <https://goteborg.se/wps/portal/start/miljo/miljolaget-i-goteborg/luft/matplatser?uri=gbglnk%3Aagbg.page.2ced6342-d6b4-44ac-856b-6c12525b4ce7> hämtad: 2021-04-27.
- [7] S. Forouhan, O. Hamidi, G. Lindström, S. Robertsson, P. Strive, och C. Thuve, “Låg-kostnadssensorer för luftkvalitetsmätning - utvärdering förbättring och mätning,” 2020, föregående års kandidatarbete.
- [8] Göteborgs stad - Miljöförvaltningen, “Göteborgs stad - miljöförvaltningen,” 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://karta.miljoforvaltningen.goteborg.se/?fbclid=IwAR3PlXqm9UwnWs3nQpW9u4fdNTDQwMuXwZgfrnKUDqBVsuchmI5tQOvwac> hämtad: 2021-02-11.
- [9] Göteborgs stad - Miljöförvaltningen, “Luften i göteborg - Årsrapport 2020,” 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://goteborg.se/wps/portal/start/kommun-opolitik/kommunens-organisation/forvaltningar/forvaltningar/miljoforvaltningen/miljoforvaltningens-rapporter-och-trycksaker/rapporter-fran-miljoforvaltningen?uri=gbglnk%3A2016326143938300> hämtad: 2021-05-11.
- [10] H. E. I. P. on the Health Effects of Traffic-Related Air Pollution, “Traffic-related air pollution: a critical review of the literature on emissions, exposure, and health effects,” 2010.
- [11] J. Hitchins, L. Morawska, R. C. Wolff, och D. Gilbert, “Concentration of submicrometre particles from vehicle emissions near a major road.” *Atmospheric Environment*, vol. 34,

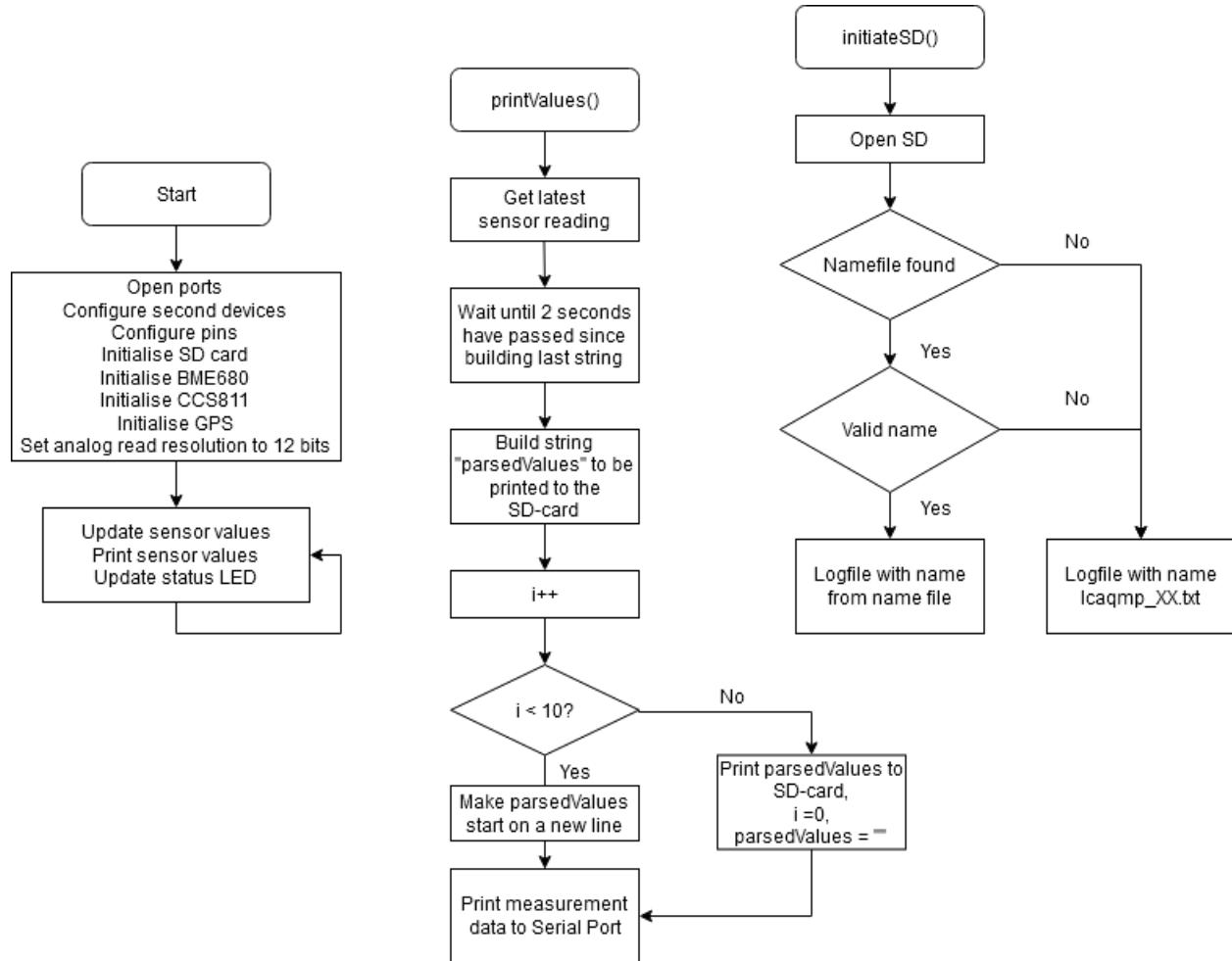
- nr. 1, ss. 51–59, January 2000. [Online]. Tillgänglig: <https://eprints.qut.edu.au/11492/>
- [12] Y. Liu, Y. Zhou, och J. Lu, “Exploring the relationship between air pollution and meteorological conditions in china under environmental governance,” *Scientific reports*, vol. 10, nr. 1, ss. 1–11, 2020.
 - [13] Massachusetts Institute of Technology, “Can rain clean the atmosphere?” 2015. [Online]. Tillgänglig: <https://news.mit.edu/2015/rain-drops-attract-aerosols-clean-air-0828> hämtad: 2021-05-10.
 - [14] General Multilingual Environmental Thesaurus, “Atmospheric inversion,” 2021. [Online]. Tillgänglig: <https://www.eionet.europa.eu/gemet/en/concept/12082> hämtad: 2021-05-10.
 - [15] EPA - Unites States Environmental Protection Agency, “Health and environmental effects of particulate matter (pm).” [Online]. Tillgänglig: <https://www.epa.gov/pm-pollution/health-and-environmental-effects-particulate-matter-pm> hämtad: 2021-04-16.
 - [16] A. C. Rohr och R. E. Wyzga, “Attributing health effects to individual particulate matter constituents,” *Athmospheric Environment*, vol. 62, 2012, s. 130-152.
 - [17] J. Sjöblom, “Privat kommunikation,” Maj. 2021, diskussion med Jonas 21-05-12.
 - [18] E. Pino-Cortés, L. A. Díaz-Robles, F. Cubillos, F. Cereceda-Balic, R. Santander, J. S. Fu, S. Carrasco, och J. Acosta, “The black carbon dispersion in the southern hemisphere and its transport and fate to antarctica, an anthropocene evidence for climate change policies,” *Science of the Total Environment*, vol. 778, s. 146242, 2021.
 - [19] Luftkvalitetsförordning, SFS 2010:477, Miljödepartementet, Stockholm, Sverige: Regeringskansliet, Maj. 2010. [Online]. Tillgänglig: <http://rkrattsbaser.gov.se/sfst?bet=2010:477> hämtad: 2021-04-30.
 - [20] European Environment Agency, “Europe’s environment - the dobris assessment 31. acidification,” 2020. [Online]. Tillgänglig: <https://www.eea.europa.eu/publications/92-826-5409-5/page031new.html> hämtad: 2021-04-11.
 - [21] WHO, “Air pollution.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.who.int/teams/environment-climate-change-and-health/air-quality-and-health/ambient-air-pollution> hämtad: 2021-02-09.
 - [22] Förordning om användning av organiska lösningsmedel, SFS 2013:254, Miljödepartementet, Stockholm, Sverige: Regeringskansliet, Maj. 2013. [Online]. Tillgänglig: <http://rkrattsbaser.gov.se/sfst?bet=2013:254> hämtad: 2021-05-14.
 - [23] W. C. Hinds, *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne*

particles. John Wiley & Sons, 1999.

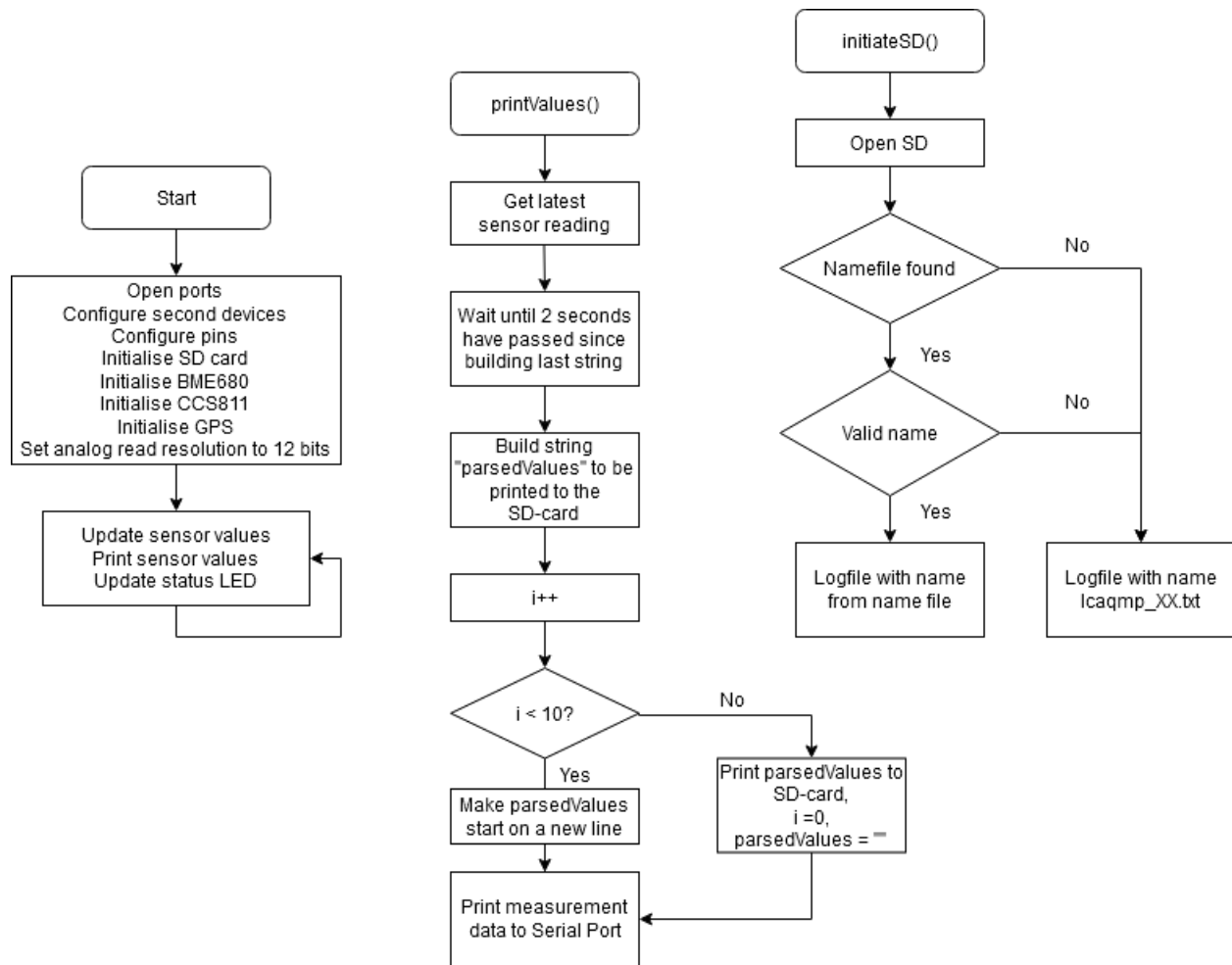
- [24] D. Zhang, “Ultra-supercritical coal power plants,” *Materials, Technologies and Optimization*, 2013.
- [25] Analytical Technology, “How do electrochemical sensors work?” [Online]. Tillgänglig: <https://www.analyticaltechnology.com/analyticaltechnology/gas-water-monitors/blog.aspx?ID=1327&Title=How%20Do%20Electrochemical%20Sensors%20Work> hämtad: 2021-05-07.
- [26] AlphaSense, “How electrochemical gas sensors work.” [Online]. Tillgänglig: https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2013/07/AAN_104.pdf hämtad: 2021-05-07.
- [27] Laser PM2.5 Sensor specification, Nova Fitness Co., Ltd., Jinan, Shandong, Kina, 2015. [Online]. Tillgänglig: <https://cdn-reichert.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf> hämtad: 2021-05-13.
- [28] D. Simpson, “Why does mox make the difference?” [Online]. Tillgänglig: <https://www.renesas.com/us/en/blogs/why-does-mox-make-difference> hämtad: 2021-05-08.
- [29] S. Janhäll, P. Molnar, och M. Hallquist, “Traffic emission factors of ultrafine particles: effects from ambient air,” *Journal of Environmental Monitoring*, vol. 14, nr. 9, ss. 2488–2496, 2012.
- [30] CO2Meter.com, “Sensor tube cap adapter for 20 mm sensors.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.co2meter.com/collections/accessories/products/co2meter-sensor-tube-cap> hämtad: 2021-04-30.
- [31] J. Sjöblom, “Privat kommunikation,” Mars. 2021, diskussion med Jonas i Mars.
- [32] NO2-A43F Nitrogen Dioxide Sensor 4-Electrode, Alphasense, Great Notley, Storbritannien, 2019. [Online]. Tillgänglig: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-A43F.pdf> hämtad: 2021-03-30.
- [33] Google maps, “Karta över göteborg.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.google.se/maps/@57.6909315,11.9884761,8050m/data=!3m1!1e3> hämtad: 2021-05-14.
- [34] Trafikverket, “Handbok för vägtrafikens luftföroreningar.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.trafikverket.se/contentassets/3c85ef29f30b4f58aa895dc52efbb14a/handbok-for-vagtrafikens-luftfororeningar/kapitel-6-bilagor-emissionsfaktorer-2017-2020-2030.pdf> hämtad: 2021-05-13.
- [35] Naturvårdsverket, “Emissionsfaktorer och värmevärden 2020.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.naturvardsverket.se/upload/stod-i-miljoarbetet/vagledning/Luft-klimat/emissionsfaktorer-och-varmevarden-klimat-2020.xlsx> hämtad: 2021-05-13.

- [36] “Arduino-kod.” [Online]. Tillgänglig: <https://github.com/Nils-SSBM/LCAQMP>
- [37] CCS811 Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality, ams AG, Premstätten, Österrike, 2016. [Online]. Tillgänglig: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf hämtad: 2021-05-13.
- [38] SMHI, “Ladda ner meteorologiska observationer.” [Online]. Tillgänglig: <https://www.smhi.se/data/meteorologi/ladda-ner-meteorologiska-observationer#param=airtemperatureInstant,stations=all,stationid=71420> hämtad: 2021-05-10.
- [39] M. Ferm och K. Sjöberg, “Concentrations and emission factors for pm2. 5 and pm10 from road traffic in sweden,” *Atmospheric Environment*, vol. 119, ss. 211–219, 2015.
- [40] CCS811 Ultra-Low Power Digital Gas Sensor for Monitoring Indoor Air Quality, ams AG, Premstätten, Österrike, 2019. [Online]. Tillgänglig: https://cdn.sparkfun.com/assets/2/c/c/6/5/CN04-2019_attachment_CCS811_Datasheet_v1-06.pdf hämtad: 2021-05-14.

B Pseudokod



Figur 56: Pseudokod för Star en enhet, printValues() och initiateSD()



Figur 57: Pseudokod för readNO2andO3() och updateValues()

C Datablad och produktblad

BME680 Mäter: RH, VOC, temperatur och atmosfärstryck

Produktsida: <https://www.adafruit.com/product/3660>

Datablad: <https://cdn-learn.adafruit.com/downloads/pdf/adafruit-bme680-humidity-temperature-barometric-pressure-voc-gas.pdf?timestamp=1622534656>

CCS811

Mäter: VOC, eCO₂

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

Datablad: https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf

[2FCCS811_Datasheet-DS000459.pdf&usg=AOvVaw0F7n-PawSzHOLZDuN3bYpP](https://cdn.sparkfun.com/assets/learn_tutorials/1/4/3/CCS811_Datasheet-DS000459.pdf&usg=AOvVaw0F7n-PawSzHOLZDuN3bYpP)

UltimateGPS

Mäter: Position och tid

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

Datablad: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/GlobalTop-FGPM0PA6H-Datasheet-VOA.pdf>

CozIR - LP

Mäter: CO₂

Produktsida: <https://www.gassensing.co.uk/product/cozir-lp-co2-sensor/>

Datablad: <https://www.gassensing.co.uk/wp-content/uploads/2020/07/CozIR-LP-Data-Sheet-Rev-4.4.pdf>

SDS011

Mäter: PM2.5, PM10

Produktsida: <http://inovafitness.com/en/a/chanpinzhongxin/95.html>

Datablad: <https://cdn-reichelt.de/documents/datenblatt/X200/SDS011-DATASHEET.pdf>

OX-A431

Mäter: O₃, NO₂

Produktsida: <https://www.alphasense.com/products/ozone/>

Datablad OX-A431: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/OX-A431.pdf>

NO2-A43F

Mäter: NO₂ Produktsida: <https://www.alphasense.com/products/nitrogen-dioxide/>

Datablad NO2-A43F: <https://www.alphasense.com/wp-content/uploads/2019/09/NO2-A43F.pdf>

Korrektionsfaktorer för NO₂ och O₃ mätare från AlphaSense erhållna vid inköp av sensorer:

Alphasense A4 (2-way) Air Quality Sensor Module

Customer: Chalmers University

Order No:

Zero Cal Date: 28-04-2020

AFE Serial No: 10-000644

Test Voltage:

AFE Type: 810-0021

Circuit Type: 00

Circuit Type	SN1	SN2
Type 00	NO2/O3	NO2/O3
Type 01	NO2/O3	NO
Type 02	NO2/O3	CO/SO2/H2S
Type 03	NO	CO/SO2/H2S
Type 04	CO/SO2/H2S	CO/SO2/H2S
Custom		

	SN1	SN2
Sensor Type	NO2-A43F	OX-A431
Serial Number	212010339	214150334
Working Electronic Offset, WE _e (mV)	296	409
WE Sensor Zero, WE _o (mV)* or PID*	-8	-6
Total WE Zero offset, WE _T (mV)	288	403
AE Electronic Offset, AE _e (mV)	300	408
AE Sensor Zero, AE _o (mV)	-1	-3
Total AE Zero Offset, AE _T (mV)	299	405
Sensitivity (nA/ppb)	-0.257	-0.471
Sensitivity NO2 (nA/ppb)	-0.257	-0.429
PCB Gain (mV/nA)	-0.73	-0.73
Sensitivity (mV/ppb)	0.188	0.344
Sensitivity NO2 (mV/ppb)	0.188	0.313

* at 101 kPa 23(±2)°C, 40(±15) %RH
 *PID sensor zero in zero air, sensitivity in isobutylene

Create CSV file

Print sheet

Clear sheet

Figur 58: Korrektionsdata för LCAQMP enhet 5



Alphasense A4 (2-way) Air Quality Sensor Module

Customer

Order No

Zero Cal Date

AFE Serial No

Test Voltage

Chalmers University
28-04-2020
10-000645

AFE Type

Circuit Type

810-0021
00

Circuit Type	SN1	SN2
Type 00	NO2/O3	NO2/O3
Type 01	NO2/O3	NO
Type 02	NO2/O3	CO/SO2/H2S
Type 03	NO	CO/SO2/H2S
Type 04	CO/SO2/H2S	CO/SO2/H2S
Custom		

Sensor Type

Serial Number

NO2-A43F	OX-A431
212010337	214150333

Working Electronic Offset, WE_e (mV)

WE Sensor Zero, WE_o (mV)* or PID*

Total WE Zero offset, WE_T (mV)

AE Electronic Offset, AE_e (mV)

AE Sensor Zero, AE_o (mV)

Total AE Zero Offset, AE_T (mV)

295	415
-3	-8
292	407
299	401
-3	-1
296	400

Sensitivity (nA/ppb)

Sensitivity NO2 (nA/ppb)

PCB Gain (mV/nA)

Sensitivity (mV/ppb)

Sensitivity NO2 (mV/ppb)

-0.280	-0.419
-0.280	-0.349
-0.73	-0.73
0.204	0.306
0.204	0.255

Create CSV file

Print sheet

Clear sheet

* at 101 kPa 23(±2)°C, 40(±15) %RH

*PID sensor zero in zero air, sensitivity in Isobutylene

Figur 59: Korrektionsdata för LCAQMP enhet 6



Alphasense A4 (2-way) Air Quality Sensor Module

Customer: Chalmers University

Order No:

Zero Cal Date: 28-04-2020

AFE Serial No: 10-000646

Test Voltage:

AFE Type: 810-0021

Circuit Type: 00

Circuit Type	SN1	SN2
Type 00	NO2/O3	NO2/O3
Type 01	NO2/O3	NO
Type 02	NO2/O3	CO/SO2/H2S
Type 03	NO	CO/SO2/H2S
Type 04	CO/SO2/H2S	CO/SO2/H2S
Custom		

Sensor Type: NO2-A43F

Serial Number: 212010338

Working Electronic Offset, WE_e (mV): 290

WE Sensor Zero, WE_o (mV)* or PID[#]: -5

Total WE Zero offset, WE_T (mV): 285

AE Electronic Offset, AE_e (mV): 302

AE Sensor Zero, AE_o (mV): -2

Total AE Zero Offset, AE_T (mV): 300

Sensitivity (nA/ppb): -0.256

Sensitivity NO2 (nA/ppb): -0.256

PCB Gain (mV/nA): -0.73

Sensitivity (mV/ppb): 0.187

Sensitivity NO2 (mV/ppb): 0.187

SN1	SN2
NO2-A43F	OX-A431
212010338	214150332
290	413
-5	-9
285	404
302	410
-2	-4
300	406
-0.256	-0.486
-0.256	-0.453
-0.73	-0.73
0.187	0.355
0.187	0.331

Create CSV file

Print sheet

Clear sheet

* at 101 kPa 23(±2)°C, 40(±15) %RH

[#]PID sensor zero in zero air, sensitivity in isobutylene

Figur 60: Korrektionsdata för LCAQMP enhet 10

D AlphaSense Application Notes

CORRECTING FOR BACKGROUND CURRENTS IN FOUR ELECTRODE TOXIC GAS SENSORS

Introduction

This application note provides some guidance on the correction of the zero background current within the temperature range from -30°C to +50°C using only the ambient sensor temperature and knowledge of the reference ambient calibration temperature.

Correction of the zero background is complex and the results obtained from these simple algorithms should be considered as the first step in a process to correlate sensor results to the gas concentration measured by a reference analyser. Secondary corrections are usually required to further correct for any residual offsets and gain changes to obtain an acceptably accurate gas concentration. This application note describes only the primary correction to the zero background current for the effects of temperature. Further residual corrections are only discussed below.

Electrochemical amperometric gas sensors generate a background current in addition to the current from oxidation or reduction of the sampled gas. This background current is commonly called the **zero background current**. Zero background currents can be significant and can frustrate attempts to make measurements at low gas concentrations. Sources of these zero currents can include anodic or cathodic reactions on the working electrode (**WE**), electrochemical oxidation or reduction of the sensor electrolyte or electrolyte contaminants, and reduction of oxygen in the sampled air. The auxiliary electrode (**AE**) will also generate a current which mostly tracks the WE current.

If you have purchased the Alphasense Individual Sensor Boards (ISB) or Analogue Front End (AFE) boards, the calibrated offsets and sensor outputs will be expressed in voltage (mV) rather than current (nA). You will also have been provided with values for the electronic offsets for the WE (mV) and AE (mV) channels, and the Total Zero Offsets (mV) as a sum of the electronic offsets and the sensor offsets as determined in zero air at a temperature of 20 - 25 °C. These values will be required when calculating the corrected WE output.

Term definitions

WE_u = uncorrected raw WE output
 AE_u = uncorrected raw AE output
 WE_c = corrected WE output
 WE_e = WE electronic offset on the AFE or ISB
 AE_e = AE electronic offset on the AFE or ISB
 WE_o = WE sensor zero, i.e. the sensor WE output in zero air
 AE_o = AE sensor zero, i.e. the sensor AE output in zero air
 WE_T = Total WE zero offset
 AE_T = Total AE zero offset

n_T = temperature dependent correction factor for algorithm 1, refer to Table 3 for values
 k_T = temperature dependent correction factor for algorithm 2, refer to Table 3 for values
 k'_T = temperature dependent correction factor for algorithm 3, refer to Table 3 for values
 k''_T = temperature dependent correction factor for algorithm 4, refer to Table 3 for values

Initial calibration

- 1 If the sensors have been purchased on Alphasense AFE (Analog Front End) or ISB (Individual Sensor Board) electronics, then the following parameters will have been provided :

WE electronic offset, WE_e (mV)

AE electronic offset, AE_e (mV)

Total WE zero offset, WE_T , (mV)

Total AE zero offset, AE_T , (mV)

WE sensor zero (WE_o)

AE sensor zero (AE_o)

WE sensitivity in units of nA/ppb and mV/ppb. The latter will allow you to directly convert the mV output into ppb of gas.

Program your software with the supplied values. Remember to subtract the electronic offsets WE_e and AE_e from the raw WE_u and AE_u readings before correcting.

If you are using your own electronics, then first measure the open circuit voltage to determine your own board's WE and AE electronic offsets. By default, Alphasense sets the electronic offsets on the AFE boards and ISBs to within the range 200 to 300 mV so that any zero sensor currents, either positive or negative about zero current can be measured as positive voltages.

Fit the sensor(s) to your board, apply power and allow several hours for the sensor to stabilise in ambient, clean air. Measure the outputs from the WE and AE channels, this will be your 'Total WE zero offset (WE_T)' and 'Total AE zero offset (AE_T)'. Note that the sensor will respond to any gases and VOCs in your ambient air. Alphasense calibrates zero current using filtered, scrubbed and dehumidified air.

- 2 Create a look-up table or other method in your software for determining the correction factor for your sensor at the measured sensor temperature (see table 3 for the complete list of temperature compensation factors). Correction factors are typically linearly interpolated between the temperatures listed in the Table.
- 3 Ensure that the temperature recorded as the sensor temperature is the temperature at the top of the sensor to within ± 1 °C to ensure using the correct temperature compensation factor.

Initial temperature corrections and calculating the gas concentration

- 1 Measure the WE and AE current (or voltage from your ISB or AFE) in your application.
- 2 If using Alphasense AFE boards or ISBs, subtract the working electrode and auxiliary electrode electronic offsets (WE_e and AE_e) from both the uncorrected WE and AE total outputs (WE_u and AE_u). On your own boards, determine the sensor output by subtracting any offsets to obtain the actual sensor output.
- 3 Determine the temperature of operation, and from this temperature select the appropriate correction factor of n_T , k_T , k'_T or k''_T depending on which algorithm is to be used (**Table 1**).
- 4 Table 1 illustrates how each equation uses a different approach for how the sensor parameters are combined. Table 2 is offered as a suggestion of which equation to use for a sensor type, but you are encouraged to explore the other equations in Table 1. Each model has their own limitations and you may find your own optimum choice to better suit the conditions in which the sensor is used.
- 5 Divide the final corrected WE result (WE_c) by the sensor's sensitivity to calculate the gas concentration. If desired, developers may wish to add a further refinement to the final gas concentration value by dividing the corrected WE output (WE_c) by a temperature corrected

sensitivity instead of only the single ambient sensor sensitivity value provided. Each sensor type usually has a plot in its technical datasheet illustrating how the sensor sensitivity varies with temperature. Thus a complete temperature profile for the sensor type can be produced that corrects for background current changes (above) and sensitivity (or gain) changes due to temperature changes.

Compensation on the OX-A431 or OX-B431 sensor

This is a special case for this sensor since it responds to both O₃ and NO₂ gases but with different sensitivities. In the environment the two gases are usually present at the same time where air quality measurements are being made. If you received your OX sensor on an AFE or ISB then you will have been given a calibration certificate that provides the sensitivity for NO₂ and O₃ on the sensor. To determine the O₃ concentration on the OX sensor you will require the NO₂ concentration determined from an NO₂ sensor (NO₂-A43F or NO₂-B43F). Use this value to calculate the output from the OX sensor by multiplying the NO₂ concentration by the NO₂ sensitivity of the OX sensor. The resulting mV value is equivalent to the WE_c result from any one of the algorithms, call this $WE_c(NO_2)$. Then take the total raw mV output from the OX sensor on an AFE or ISB and subtract WE_o and $WE_c(NO_2)$, treat the result as the equivalent of $(WE_u - WE_o)$ in the compensation algorithms. Treat AE_i (and WE_o and AE_o) as usual for the OX sensor in the algorithms and follow through the calculations to obtain $WE_c(O_3)$. Divide this value by the O₃ sensitivity to give the O₃ concentration.

Further residual corrections

After applying your chosen algorithm, you may find the results do not meet your expectations for accuracy when compared to reference values. You may find the gas concentrations are negative compared to reference values or appear to be much smaller or larger than the reference values but in general the sensor output is following the reference gas concentration. Respectively these are offset errors (which can also be in the positive direction) and gain errors.

Several factors may be skewing your results:

- thermal transients can temporarily destabilise the sensor signal
- humidity changes and humidity transients (usually due to temperature transients) can also destabilise temporarily the sensor signal, and
- diurnal and seasonal temperature/humidity patterns can shift calibration
- the difference between real environments where, amongst other things, humidity is present to varying levels compared to the lab testing environment where the correction factors were determined at controlled temperatures, dry gases, and no cross-sensitive gases.

These real but uncontrolled variations will affect the initial lab calibration. Although the sensors will adapt to the new environment the zero currents (WE_o and AE_o) will be different and sensitivity will change to a lesser degree. Cross-sensitivity to other gases and VOCs may also change to a lesser extent and contribute to the change of the WE_o zero current.

These residual errors can be corrected by empirically determining and applying a correction factor to the sensor sensitivity and applying a correction to minimise the offset error such that the sensor gas reading matches as closely as possible a set of reference gas values over a period of time, e.g. one week, although longer will provide more confidence in the corrections.

It should be noted that compensating the outputs of sensors for the effects of environmental effects, i.e. temperature, humidity, is complex.

These algorithms are provided as suggestions for attempting to correct for temperature changes only and should not be regarded as a complete solution for providing gas concentration results that meet an accuracy acceptable for your application.

For the calibration of a low cost air quality network, one suggested strategy would be to initially cluster your sensor nodes together around a reference station. Preferably they should be within about 1 m of the station to ensure as best as possible, the same gas sample is within this shared environmental volume. What follows will then be a process of sensor calibrations to your environment of your sensors as described above. Published papers, for example references 1,2,3, explain in much more detail air quality network deployment and the challenges on obtaining accurate results.

Alphasense follows a continual process improvement process and as such is working to refine the process of compensating sensor readings for the effects of the environment for our customers. Please contact us to follow our progress.

References

1. Mead et al., Atmos. Environ. 70 (2013) 186-203; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.11.060>
2. Popoola et al., Atmos. Environ. 147 (2016) 330-343; <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.10.024>
3. Cross et al., Atmos. Meas. Tech., 10, 3575–3588, 2017; <https://doi.org/10.5194/amt-10-3575-2017>

Table 1 : Algorithms to correct the WE output for the effects of temperature

Algorithm	Equation	Notes
1	$WE_c = (WE_u - WE_e) - n_T * (AE_u - AE_e)$	Subtraction of the electronic offsets from the raw WE_u and AE_u outputs then scales the net AE output with the n_T factor. Gross under or over compensation can occur if $(AE_u - AE_e)$ is of opposite sign to n_T , or if $(AE_u - AE_e)$ is significantly smaller or larger than $(WE_u - WE_e)$. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative, or much higher compared to a reference value.
2	$WE_c = (WE_u - WE_e) - k_T * \left(\frac{WE_o}{AE_o} \right) * (AE_u - AE_e)$	A refinement of Algorithm 1 where the AE scaling factor n_T is replaced with $k_T * (WE_o / AE_o)$. An error or gross over compensation will result if AE_o is very small compared to WE_o or is zero. If WE_o and AE_o are of opposite signs then over compensation can also occur. Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
3	$WE_c = (WE_u - WE_e) - (WE_o - AE_o) - k'_T * (AE_u - AE_e)$	Avoids the problem of Algorithm 2 with a zero AE_o value. Gross over or under compensation can result if AE_o is of opposite sign to WE_o , or if AE_o is significantly smaller or larger than WE_o . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.
4	$WE_c = (WE_u - WE_e) - WE_o - k''_T$	Correction without using the outputs from the auxiliary electrode. Gross under or over compensation can occur if WE_o or k''_T are significantly smaller or larger than WE_u . Over compensation could lead to the final gas concentration appearing negative or much higher compared to a reference.

Table 2 : Suggested algorithms for both A and B type sensors

Sensor	Suggested algorithm		Alternative algorithm	
	A	B	A	B
CO	1	1	4	2
H ₂ S	2	1	1	2
NO	3	2	4	3
NO ₂	1	1	3	3
OX	3	1	1	3
SO ₂	4	4	1 or 3	1 or 2

Table 3: Zero background current temperature compensation factors

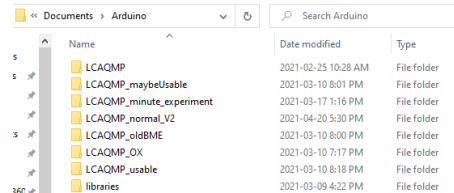
Sensor	Algorithm	Factor	T / °C								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
CO-A4	1	n_T	1	1	1	1	-0.2	-0.9	-1.5	-1.5	-1.5
	2	k_T	-1.1	-1.1	-1.1	-1.1	0.2	1	1.7	1.7	1.7
	3	k'_T	1.9	2.9	2.7	3.9	2.1	1	-0.6	-0.3	-0.5
	4	k''_T	13	12	16	11	4	0	-15	-18	-36
CO-B4	1	n_T	0.7	0.7	0.7	0.7	1	3	3.5	4	4.5
	2	k_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	1	1.2	1.3	1.5
	3	k'_T	-1	-0.5	0	0	0	1	1	1	1
	4	k''_T	55	55	55	50	31	0	-50	-150	-250
H2S-A4	1	n_T	3	3	3	1	-1	-2	-1.5	-1	-0.5
	2	k_T	-1.5	-1.5	-1.5	-0.5	0.5	1	0.8	0.5	0.3
	3	k'_T	9	9	9	9	3	1	0.3	0.3	0.3
	4	k''_T	50	46	43	37	25	0	-8	-16	-20
H2S-B4	1	n_T	-0.6	-0.6	0.1	0.8	-0.7	-2.5	-2.5	-2.2	-1.8
	2	k_T	0.2	0.2	0	-0.3	0.3	1	1	0.9	0.7
	3	k'_T	-14	-14	3	3	2	1	-1.2	-1.2	-1.2
	4	k''_T	52	51	48	45	26	0	-65	-125	-180
NO-A4	1	n_T	1.7	1.7	1.6	1.5	1.5	1.5	1.5	1.6	1.7
	2	k_T	1.1	1.1	1.1	1	1	1	1	1.1	1.1
	3	k'_T	0.7	0.7	0.7	0.7	0.8	1	1.2	1.4	1.6
	4	k''_T	-25	-25	-25	-25	-16	0	56	200	615
NO-B4	1	n_T	2.9	2.9	2.2	1.8	1.7	1.6	1.5	1.4	1.3
	2	k_T	1.8	1.8	1.4	1.1	1.1	1	0.9	0.9	0.8
	3	k'_T	0.8	0.8	0.8	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3
	4	k''_T	-25	-25	-25	-25	-16	0	56	200	615

Table 3 continued

Sensor	Algorithm	Factor	T / °C								
			-30	-20	-10	0	10	20	30	40	50
NO2-A43F	1	n_T	0.8	0.8	1	1.2	1.6	1.8	1.9	2.5	3.6
	2	k_T	0.4	0.4	0.6	0.7	0.9	1	1.1	1.4	2
	3	k'_T	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7	1	1.3	2.1	3.5
	4	k''_T	-4	-4	-4	-4	-2	0	10	35	132
NO2-B43F	1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.3	1	0.6	0.4	0.2	-1.5
	2	k_T	2.2	2.2	2.2	2.2	1.7	1	0.7	0.3	-2.5
	3	k'_T	1	1	1	1	1	1	0.4	-0.1	-4
	4	k''_T	7	7	7	7	4	0	0.5	5	67
OX-A431	1	n_T	1	1.2	1.2	1.6	1.7	2	2.1	3.4	4.6
	2	k_T	0.5	0.6	0.6	0.8	0.9	1	1.1	1.7	2.3
	3	k'_T	0.1	0.1	0.2	0.3	0.7	1	1.7	3	4
	4	k''_T	-5	-5	-4	-3	0.5	0	9	42	134
OX-B431	1	n_T	0.9	0.9	1	1.3	1.5	1.7	2	2.5	3.7
	2	k_T	0.5	0.5	0.6	0.8	0.9	1	1.2	1.5	2.2
	3	k'_T	0.5	0.5	0.5	0.6	0.6	1	2.8	5	5.3
	4	k''_T	1	1	1	1	1	1	8.5	23	103
SO2-A4	1	n_T	1.3	1.3	1.3	1.2	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4
	2	k_T	3.3	3.3	3.3	3	2.3	1	1	1	1
	3	k'_T	1.5	1.5	1.5	1.5	1	1	1	1	1
	4	k''_T	0	0	0	0	0	0	5	25	45
SO2-B4	1	n_T	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.6	1.9	3	5.8
	2	k_T	1	1	1	1	1	1	1.2	1.9	3.6
	3	k'_T	1	1	1	1	1	1	2	3.5	7
	4	k''_T	-4	-4	-4	-4	-4	0	20	140	450

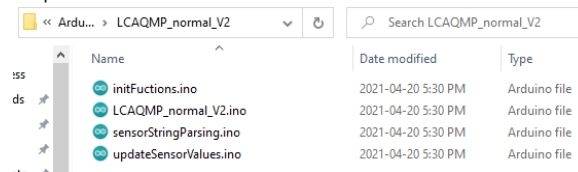
E Uppstartsguide av LCAQMP

1. Ladda ner Arduino. Ni kommer få en mapp i "dokument" som heter "Arduino". I Arduino-mappen ska ni ha en mapp med alla libraries, samt mappar för alla era "sketcher".



Name	Date modified	Type
LCAQMP	2021-02-25 10:28 AM	File folder
LCAQMP_maybeUsable	2021-03-10 8:01 PM	File folder
LCAQMP_minute_experiment	2021-03-17 1:16 PM	File folder
LCAQMP_normal_V2	2021-04-20 5:30 PM	File folder
LCAQMP_oldBME	2021-03-10 8:00 PM	File folder
LCAQMP_ox	2021-03-10 7:17 PM	File folder
LCAQMP_usable	2021-03-10 8:18 PM	File folder
libraries	2021-03-09 4:22 PM	File folder

Inuti varje mapp finns en huvudfil som måste ha samma namn som mappen. Alla andra filer är "tabs" som man kan säga "läggs nedanför" huvudfilens kod då man kompilerar.



Name	Date modified	Type
initFuctions.ino	2021-04-20 5:30 PM	Arduino file
LCAQMP_normal_V2.ino	2021-04-20 5:30 PM	Arduino file
sensorStringParsing.ino	2021-04-20 5:30 PM	Arduino file
updateSensorValues.ino	2021-04-20 5:30 PM	Arduino file

2. Ladda ner koden från GitHub och anordna koden som beskrivet ovan. Biblioteken ska ligga i 'libraries'.
3. Kolla igenom denna guiden:
<https://learn.adafruit.com/adafruit-feather-m0-adalogger>
Här förklaras hur man sätter upp Arduino för att fungera med kortet.
4. Till slut kommer man få ett visst error som har något att göra med filen "variant.cpp". Detta är eftersom kommunikationsportarna är omprogrammerade för att passa layouten som används. Man har gått in kommenterat bort vissa standardinställningarna för denna fil för att sedan definiera om dem i själva arduino-koden.

Filen "variant.cpp" ligger i mappen

C:\Users\admusr\AppData\Local\Arduino15\packages\adafruit\hardware\samd\1.6.5\variants\feather_m0

Leta upp den och öppna den i ett textredigeringsprogram och kommentera bort koden som visas i bilden.



```
//Uart Serial1( &sercom0, PIN_SERIAL1_RX, PIN_SERIAL1_TX,  
PAD_SERIAL1_RX, PAD_SERIAL1_TX ) ;  
Uart Serial5( &sercom5, PIN_SERIAL_RX, PIN_SERIAL_TX,  
PAD_SERIAL_RX, PAD_SERIAL_TX ) ;  
/*void SERCOM0_Handler()  
{  
    Serial1.IrqHandler();  
}*/
```

Efter ni har gjort detta så ska koden fungera, ifall det inte är några andra fel.

Övrigt

Alla sensorer förutom Alphasense kommunicerar med Adafruit-kortet via olika kommunikationsprotokoll. Ifall ni är intresserade av att lära er om dessa så är följande länkar bra:

SPI: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-spi-communication-protocol>

UART: <https://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>

I2C: <https://www.circuitbasics.com/basics-of-the-i2c-communication-protocol/>

F Plattformarnas uppställning

Tabell 18: Vad Plattformarna mäter

LCAQMP ID	NO ₂	O ₃	Pump	Övrigt
1	Nej	Nej	Nej	Trasig låda & CO ₂ -sensor
2	Nej	Nej	Ja	-
3	Nej	Nej	Ja	-
4	Nej	Nej	Nej	-
5	Ja	Ja	Ja	-
6	Ja	Ja	Nej	-
7	Nej	Nej	Ja	-
8	Nej	Nej	Ja	-
9	Nej	Nej	Nej	-
10	Ja	Ja	Nej	-



CHALMERS