

Avdelningen för Byggnadsfysik

Examensarbete TVBH-5078

Lund 2014

Metoder för spårgasmätning i kalla vindsutrymmen

Björn Pettersson



LUND
UNIVERSITY

Metoder för spårgasmätning i kalla vindsutrymmen

Björn Pettersson

© Björn Pettersson

ISRN LUTVDG/TVBH-14/5078--SE(62)

Avdelningen för Byggnadsfysik
Institutionen för bygg- och miljöteknologi
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
22100 LUND

Förord

Detta examensarbete har tillkommit som ett avslutande moment på civilingenjörsutbildningen i väg- och vattenbyggnad vid Lunds tekniska högskola och omfattar 30 högskolepoäng. Arbetet har till stor del tillkommit i en stuga bakom V-huset på LTH där jag mestadels huserat själv och styrt, ställt, kört fast, löst saker och förhoppningsvis kommit fram till något som kommer andra till användning i framtiden.

Jag vill först och främst tacka min handledare Petter Wallentén för allt stöd, all kunskap och allt engagemang du bidragit med i detta arbete. Även Johan Stein vid institutionen för byggnadsfysik har varit till stor hjälp i fråga om både mätutrustning och många bra synpunkter under arbetets gång.

Vidare vill jag tacka mina föräldrar och Ina för att ni aldrig tar saker på för stort allvar.

Utöver ovanstående vill jag även tacka Nöjet, Sonen, Smällfete Sigge, Doffe, Punken, Klubban, Kantorn, Sweet Yoyo, Benizio, Korv-Lars, Jaken, Ekan, Box2, Oldsberg, Nyttan och LoCash och alla andra livsproffs för er del i det här, ni har gjort mer än vad ni tror. Ni är bäst.

Björn Pettersson
Malmö, juni 2014.

Sammanfattning

Fuktproblem i olika former är något som ständigt gäckar byggbranschen och orsakar skador. I takt med att energikraven för nya byggnader skärps kommer även förändringar i metoder och utförande vid byggnation, vilket ofta yttrar sig i ökad isolering i olika byggnadsdelar. I fråga om småhus innebär detta oftast att mellanbjälklaget är betydligt mer välisolerat än för några decennier sedan, vilket leder till att utrymmen ovanför mellanbjälklaget blir kallare än tidigare. Då många småhus har takkonstruktioner av typen kallt tak, eller kall vind som det även benämns, innebär denna förändring att dessa konstruktioner får ett förändrat klimat. Det kallare klimatet innebär att en mindre mängd fukt kan tas upp av luften i vindsutrymmet, vilket kan leda till mögel och rötskador på grund av den högre relativa fuktighet som uppstår. Främst råsponten är utsatt då den oftast är den yta som är i direkt kontakt med vindsklimatet. Med syfte att förhindra detta krävs att den fuktiga luften förs bort genom ventilation, varför ett mått på ventilationsflödet är intressant för att kunna kontrollera detta. Då det förefaller ha gjorts få mätningar av denna typ är det aktuellt att ta fram en metod för att med hjälp av spårgasteknik kunna mäta ventilationsflödet på en kall vind, vilket är syftet för detta examensarbete. Metoden har arbetats fram genom att på tre olika sätt dosera och mäta spårgaskoncentrationen på fyra punkter i en testvind, där olika inställningar i mätutrustningen justerats tills en fungerande mätning erhållits. De tre metoder som arbetats fram och utvärderats är

- Dosering i samtliga fyra kanaler simultant och kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.
- Dosering i en kanal i taget men kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.
- Dosering via en kanal till ett t-stycke som fördelar dosen till fyra punkter och kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.

Mätningarna har pågått i ungefär två och ett halvt dygn för varje metod varpå resultaten har behandlats i programmet VindAnalyt1, skrivet i Matlab. Programmet gör en linjär regressionsanalys där en luftomsättning tas fram genom de exponentiella avklingningskurvor som uppstår, samt beräknar ett antal parametrar för att hantera de fel som uppstår vid anpassning av kurvan. Genom att studera resultaten både grafiskt och i form av de felparametrar som beräknats har de tre olika metoderna bedömts varpå en har ansetts vara mer pålitlig än övriga. En granskning av mätresultaten visar att mätmetod 3, med dosering via ett antal t-stycken, förefaller ge mest pålitliga resultat. De tre mätmetoderna ger dock relativt likartade resultat och är samtliga fungerande, även om de har god potential att förbättras och utvecklas.

Totalt har knappt 40 mätningar genomförts med både svavelhexafluorid och dikväveoxid som spårgas. Hänsyn har inte tagits till yttre parametrar så som väderlek, vindhastighet, temperatur eller tryckbild vilket lämnar utrymme till förbättring och utveckling av metoden.

Nyckelord: spårgasmätning, fukt, mögel, kalla vindar, ventilation, luftomsättning

Abstract

Different kinds of issues related to moist are always up to date regarding the problems that it causes. As the restrictions regarding energy consumption in new buildings get harder new methods and ways to deal with this constantly evolve, which in most cases shows in thicker layers of insulation in various building components. In case of single houses it is now common that this evolves in thicker insulation in the inner roof frame structure than a couple of decades ago. With this follows a colder climate in the attic above the inner roof frame, and because of this it is often referred to as a cold attic space. The colder air in the attic space is not capable of carrying as much moist as warmer air would, which leads to a risk of problems with moist and mould, mostly on the inside of the roof, caused by the increased relative humidity. Since this part is usually made of wood, problems can easily occur because of the additional moist. To prevent this the moist air must be able to be led out of the attic space in a proper way, preferably by ways of ventilation, which makes the air flow an interesting and important factor. Few measurements of air flow seem to have been made in cold attic spaces, which makes the subject of developing a method to measure the air flow in these spaces by way of tracer gas technique an important one. The subject for this thesis is therefore to come up with a working method for this kind of measurement, trying out different methods of dosing tracer gas into a cold attic space at four different spots, using four dosing channels. Three methods have been used and further analyzed:

- Dosing in all four channels simultaneously while sampling is done continuously in all channels.
- Dosing in one channel at a time while sampling is done continuously in all channels.
- Dosing via one channel through a t-connector that distributes the tracer gas into four different spots, while sampling is done continuously in all channels.

Measurements have been going on for about two and a half days after which the data have been processed in Matlab using the program VindAnalys1, written as a part of this thesis. The program does a linear regression analysis of the exponential curves caused by the gas concentration decay, and also calculates a number of parameters to handle the errors that follow with the curve fitting. By studying the results both graphically and by the error parameters, the three methods have been evaluated leading to one being a bit more accurate than the others. Method 3, dosing through a t-connector, seems to give the best results. All three methods seem to work well and give quite similar results, even though they all can be further developed to perform even better.

A total of almost 40 measurements have been made using nitrous oxide and sulphur hexafluoride as tracer gases. No account has been taken to outer factors such as weather, wind speed, temperature or air pressure which makes for good possibilities to improve and refine the used methods.

Keywords: tracer gas, moist, mould, cold attic, ventilation, air flow.

Innehållsförteckning

1	Inledning.....	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte och målsättning	2
1.3	Frågeställning	2
1.4	Metod	2
1.4.1	Litteraturstudie	2
1.4.2	Mätningar	2
1.5	Avgränsningar	3
2	Teori.....	5
2.1	Fukt i luft	5
2.2	Nattutstrålning	5
2.3	Fukttransport	5
2.4	Ventilation	6
2.5	Kalla tak	6
2.6	Mögel	8
2.7	Spårgas	9
2.8	Omblandning och luftrörelser	9
2.9	Diffusion	10
3	Mätningar.....	11
3.1	Testvind	11
3.2	Mätutrustning	12
3.2.1	Försöksmätning 1	13
3.2.2	Försöksmätning 2	15
3.2.3	Försöksmätning 3	17
3.2.4	Försöksmätning 4	18
3.3	Sammanfattning av försöksmätningar	20
4	Hantering av mätresultat.....	21
4.1	Kurvanpassning	21
4.1.1	Linjär regression	22
4.1.1.1	Hantering av fel i modellen	24
4.2	Utdata	26
5	Mätresultat.....	29
5.1	Mätmetod 1	29
5.2	Mätmetod 2	35
5.3	Mätmetod 3	41
5.4	Mätmetod 2 med byte av spårgas	45
5.5	Sammanfattning av mätresultat	50
6	Påverkande faktorer och felkällor.....	51
6.1	Parametrar som påverkar mätningen	51
6.2	Felkällor	51
7	Diskussion.....	53
8	Slutsatser.....	55
9	Fortsatt forskning.....	57

Referenser.....	59
Bilaga 1 – VindAnalys1	61

1 Inledning

Att bygga energisnålt är ett ständigt aktuellt ämne inom byggbranschen då BBRs krav på energianvändning hela tiden stramas åt, samtidigt som samhället i stort strävar mot att använda mindre energi. I fråga om byggnader generellt, och småhus i synnerhet, innebär detta en avsevärd ökning av isolertjockleken i klimatskalet jämfört med hur det såg ut för några decennier sedan. Detta leder till att mindre värmeenergi behöver tillföras en byggnad för att den ska hålla en önskvärd temperatur inomhus (Harderup & Arfvidsson, 2008).

1.1 Bakgrund

Med en utveckling mot allt tjockare och tätare klimatskal uppstår även en del problem som kan relateras till en förändrad fördelning av värme och fukt i konstruktioner. I frågan om kalla vindar, det vill säga den typ av vindsutrymmen där mellanbjälklaget är isolerat och själva vindsutrymmet är ouppvämt och oisolerat, innebär detta att klimatet i vindsutrymmet närmast liknar klimatet utomhus. Detta beror på att den värme som i sämre isolerade konstruktioner läcker från inomhusklimatet, genom mellanbjälklaget och upp i vindsutrymmet, i moderna konstruktioner inte tillåts läcka i samma utsträckning på grund av den ökade isoleringen. Detta medför att klimatet i vindsutrymmet blir ungefär detsamma som utomhusklimatet. Under kalla klara nätter kan detta innebära problem då risken för högre relativ fuktighet ökar, både då temperaturen sjunker men också på grund av nattutstrålning mot himlen. Med hög relativ fuktighet kommer risk för mögel och röta, samt i vissa fall även kondens på takets insida, vilket inte är önskvärt. För att avhjälpa denna problematik är det därför viktigt att fukten ska kunna transporteras bort, till exempel genom ventilation. För att ta hänsyn till detta och kunna anpassa ventilationen är ett första steg att ta reda på den faktiska ventilationen i en aktuell konstruktion, varför det är aktuellt att ta fram lämpliga metoder för detta (Harderup & Arfvidsson, 2008). Samuelson (1995) skriver dock att ventilationen främst är gynnsam under sommarhalvåret då uteluften är varmare än luften på vinden, medan den under vinterhalvåret snarare kan ha en negativ effekt. Detta bygger dock på att temperaturen på vinden i sådana fall är densamma som utomhustemperaturen, vilket trots tjockare isolering i mellanbjälklaget är föga troligt då en viss mängd värme i princip alltid kan förväntas läcka ut. Den något högre temperaturen i vindsutrymmet gör dock att luften som tas in genom ventilationen värms upp vilket medför att den relativa fuktigheten sänks.

Då beräkningar i någon form i princip alltid utförs vid projektering av byggnader krävs hela tiden tillgång till relevanta och pålitliga indata, särskilt då utbudet av datorprogram och modeller för olika typer av beräkningar ständigt breddas och används i allt större utsträckning. I fråga om indata för ventilationsflöden förefaller detta vara en bristvara då det förekommer få redovisade mätningar i litteraturen, vilket gör att uppmätta värden, och metoder för att ta fram sådana, bör vara av stort intresse. Forest och Walker (1992) redovisar ett antal mätningar gjorda i Kanada i början av 1990-talet där antalet luftomsättningar per timme plottats som funktion av vindhastigheten, vilket förefaller vara en av få tillgängliga publikationer innehållandes faktiska mätresultat.

1.2 Syfte och målsättning

Detta examensarbete har som huvudsakligt syfte att ta fram en fungerande metod för att med hjälp av spårgasmätning kunna bestämma luftomsättningen i ett vindsutrymme med kallt tak, med angiven eller likvärdig mätutrustning. Med den bakgrund i fuktproblematik i kalla vindsutrymmen som föreligger är ett delsyfte även att belysa och anknyta till detta och koppla samman med ventilationsflödet.

Målet är att en fungerande och pålitlig metod ska kunna presenteras och att liknande mätningar med samma eller likvärdig mätutrustning ska kunna utföras och utvecklas med gott resultat. Förhoppningen är att metoden dels ska kunna användas rakt av och kunna ge pålitliga resultat, men även att den ska utgöra en god grund för vidare utvärdering och förbättring inom området.

1.3 Frågeställning

Hur kan luftomsättningen i ett kallt vindsutrymme bestämmas med hjälp av spårgasmätning?

1.4 Metod

Nedan beskrivs vilken metod som kommer att tillämpas för att på ett välgrundat sätt kunna besvara frågeställningen.

1.4.1 Litteraturstudie

Som teoretisk grund för detta examensarbete kommer en litteraturstudie att utföras där de resonemang och den teori som är aktuell för ämnet kommer att belysas. Aktuell litteratur utgörs främst av forskningsrapporter och artiklar inom området, samt litteratur inom byggnadsfysik, spårgasteknik och husbyggnad generellt.

För att på ett adekvat sätt kunna hantera de mätresultat som erhålls ingår även en teoretisk del om linjär regression och den hantering av de fel som följer med detta.

1.4.2 Mätningar

För att ta fram en lämplig mätmetod enligt frågeställningen ovan kommer ett antal spårgasmätningar med olika inställningar och upplägg att utföras för att sedan utvärderas. Själva hanteringen och analysen av mätdata kommer att utgöra en stor del av metoden, dels då detta kommer att ligga till grund för användbarheten av mätmetoden och dels då det är nödvändigt för att en korrekt tolkning av resultaten ska kunna göras. Hanteringen och analysen av mätdata kommer huvudsakligen att utföras med hjälp av ett program skrivet i Matlab där en matematisk modell för spårgaskoncentrationens avklingning tas fram och där hantering av felet i denna modell ligger till grund för bedömningen av mätresultatet. När det fastställts hur hanteringen av mätdata bör göras kommer tre längre mätningar att genomföras för de mätmetoder som bedöms vara mest välfungerande, varefter dessa tre mätningar utvärderas för att avgöra vilken metod som är bäst lämpad.

Ytterligare en mätning med en annan typ av spårgas kommer att genomföras för att ge möjlighet till jämförelse mellan olika spårgastyper.

1.5 Avgränsningar

Detta examensarbete kommer endast att ta hänsyn till den problematik som uppstår i konstruktioner av typen kalla vindar. Andra typer av takkonstruktioner med de eventuella problem de bär med sig behandlas inte. Vidare kommer en metod för mätning av luftomsättning endast att tas fram för vindsutrymmen som består av en enda cell, vilket innebär att luftrörelser mellan celler inte beaktas. Även påverkan av klimatrelaterade aspekter så som temperatur utomhus och på vinden, vindhastighet, tryckfördelning och liknande förbises.

Examensarbetet avgränsas även till att endast undersöka och utvärdera den begränsade kombination av inställnings- och justeringsmöjligheter som redovisas i denna rapport, då mätutrustningen och mätutrymmet erbjuder en i princip obegränsad mängd möjliga fall att undersöka.

2 Teori

Nedanstående avsnitt grundar sig i en litteraturstudie och har för avsikt att ge en teoretisk bakgrund till frågeställningen och ämnesområdet för detta examensarbete.

2.1 Fukt i luft

Fukt i luft utgörs av vatten i ångfas, det vill säga de vattenmolekyler som finns i luften. Den maximala mängd vattenånga som kan finnas i luften benämns *mättnadsånghalt* och betecknas v_s [g/m^3]. Mättnadsånghalten är temperaturberoende, där varm luft kan hålla en betydligt större mängd ånga jämfört med kall luft. Till exempel är $v_s(20^\circ\text{C})=17,28 \text{ g}/\text{m}^3$ medan $v_s(0^\circ\text{C})=4,86 \text{ g}/\text{m}^3$. Den ånghalt som är föreligger vid ett visst tillstånd betecknas v . Kvoten mellan ånghalt och mättnadsånghalt benämns relativ fuktighet, förkortad RF, och ger ett värde på den fuktighet som föreligger i förhållande till mängden fukt luften är kapabel att hålla vid en viss temperatur. Relativ fuktighet anges vanligtvis som en procentandel.

$$RF = \frac{v}{v_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

Då den aktuella ånghalten når mättnadsånghalten för en viss temperatur, vilket innebär att luften inte kan hålla den aktuella mängden vattenånga, fälls denna istället ut som vattendroppar, oftast på en yta, vilket benämns kondens (Nevander & Elmarsson, 1994).

2.2 Nattutstrålning

Det fenomen som ibland benämns nattutstrålning innebär att det strålningsutbyte som alltid sker mellan en yta som vetter mot utomhusklimatet och himlavalvet. Då naturen strävar efter utjämning kommer värme vid klart väder att stråla från ytan och till den kallare himlen sker en nettoförlust, vilket leder till att ytan kan komma att få en temperatur som är lägre än den omgivande luftens. Denna sänkning av ytans temperatur, och därmed ofta det som finns bakom ytan om utrymmet inte är väldigt stort, leder således även till en lägre mättnadsånghalt (Nevander & Elmarsson, 1994).

2.3 Fukttransport

Då de fuktproblem som uppstår i kalla vindsutrymmet främst beror på för hög relativ fuktighet i luften eller i vissa fall kondens begränsas teorin om fukttransport här till att behandla fukttransport i ångfas. Den fukt som i vätskefas kan anses vara aktuell i sammanhanget är främst fritt vatten från nederbörd eller någon form av läckage från till exempel installationer, och anses inte behöva någon djupare teoretisk förklaring, även om den naturligtvis kan orsaka problem i form av fuktskador.

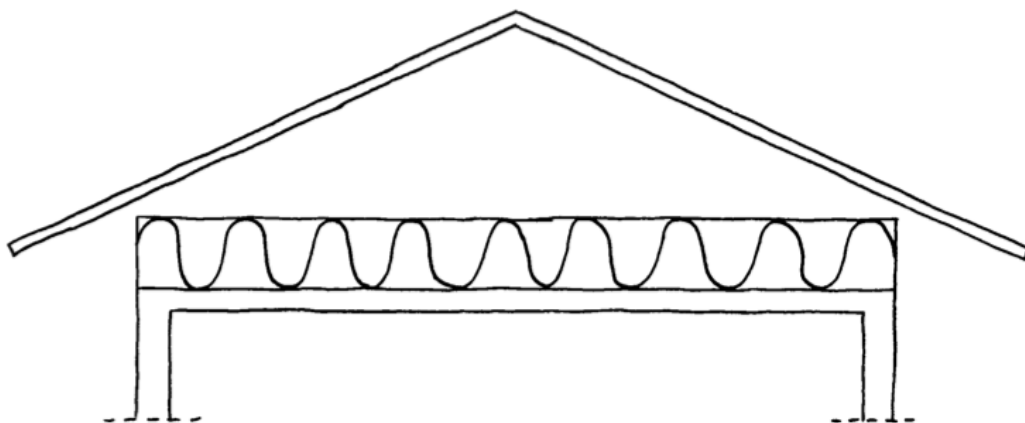
Fukt i ångfas kan transporteras på olika vis, varav de två sätt som beskrivs nedan är de för sammanhanget mest relevanta. Transport genom *diffusion* innebär att luft med en större mängd vattenmolekyler strävar mot utjämning mot luft med en mindre mängd, varpå en ångtransport sker på grund av den drivkraft som skillnaden i ånghalt i detta fall utgör.

Transport genom *konvektion* innebär att vattenånga följer med luftrörelser. Drivkraften kan i detta fall till exempel vara skillnaden i densitet, där kall luft är tyngre än varm och rör sig nedåt vilket skapar luftrörelser som tar med sig vattenångan som finns i luften. Även lufttrycksdifferenser mellan olika utrymmen eller byggnadsdelar utgör en drivkraft som kan skapa luftrörelser, vilka i sin tur ger upphov till ångtransport (Nevander & Elmarsson, 1994).

2.4 Ventilation

Med begreppet ventilation menas luftutbyte i någon form, vilket i byggnadssammanhang är det luftutbyte som sker i en del av eller en hel byggnad. Ventilationen har som syfte att föra bort olika typer av föroreningar som finns i luften, men även till exempel fukt som alstras från människor som vistas i utrymmet. Även kontroll av temperaturen i ett utrymme kan göras med hjälp av ventilationen, då det till exempel vid kylning tillförs kall luft i ett utrymme medan varm luft ventileras ut. För ventilationskanaler och andra installationskomponenter mäts luftflödet vanligtvis i enheten m^3/s medan det för hela utrymmen oftast anges i antalet omsättningar per tidsenhet. Detta mått anger hur många gånger per tidsenhet som luften i utrymmet byts ut, vilket ger ett mått på hur välventilerat utrymmet är. Vanligt är att ange luftomsättningen i antalet oms/h eller oms/dygn (Abel & Elmroth, 2008).

2.5 Kalla tak



Figur 1. Principskiss över hur ett kallt tak är uppbyggt.

I framförallt småhus är den takkonstruktion som benämns kallt tak vanligt förekommande vid både nybyggnation och i äldre byggnader. Den principiella uppbyggnaden av ett kallt tak framgår av Figur 1. Den här typen av takkonstruktion innebär, som namnet antyder, att själva yttertaket förblir kallt i förhållande till inomhusklimatet då isoleringen ligger i mellanbjälklaget och ingen värme tillförs vindsutrymmet. Detta innebär att vindsutrymmet under yttertaket kommer att få ett klimat som i stor utsträckning liknar utomhusklimatet, vilket även innebär att snösmältning inte sker i samma utsträckning som för en varm konstruktion (Nevander & Elmarsson, 1994). Ventilation till vindsutrymmet sker vanligtvis

genom öppningar längs med takfoten och ibland även i form av ventilationsgaller på gavlarna. I takt med att riktlinjerna för energianvändning i byggnader har skärpts har isolertjockleken i denna typ av konstruktion ökat avsevärt, vilket innebär att en mindre mängd värme tillåts läcka igenom bjälklaget och ut i vindsutrymmet. Jämfört med äldre hus med tunnare isolering i mellanbjälklaget innebär detta att temperaturen på vinden sänks ytterligare vilket ger ett fuktigare klimat. (Hägerhed & Samuelson, 2006).

De problem med fukt som uppstår i den här typen av konstruktioner består främst av att luftens relativa fuktighet blir så pass hög att mögel och röta får förutsättningar att etablera sig. Detta kan bero på ett antal olika orsaker. Ett problem är att det kalla klimat som uppstår i vindsutrymmen ovanför välisolerade mellanbjälklag får förutsättningar som liknar uteluftens, där mängden vattenånga som luften kan hålla är liten när temperaturen är låg. Är det samtidigt klart väder kommer en viss nattutstrålning mot himlen att ske vilket sänker temperaturen innanför taket. Detta leder till en hög relativ fuktighet i vindsutrymmet, i vissa fall så pass hög att risk för kondens föreligger på takets insida, vilket är en stor källa till fuktproblem (Samuelson et al, 2007).

En annan källa till problem är om diffusion tillåts ske genom mellanbjälklaget och upp i vindsutrymmet. Detta kan uppstå om mellanbjälklaget inte är väl tätat med någon typ av ångspärr, till exempel en polyetenfolie, som hindrar den varma luften från inomhusklimatet från att ta sig igenom isoleringen och upp till det kalla klimatet i vindsutrymmet. Kan denna diffusion ske finns stor risk för ökad relativ fuktighet då den kalla luften i vindsutrymmet inte kan hålla några större mängder vattenånga (Nevander & Elmarsson, 1994).

En tredje potentiell problemkälla beror på hur tryckbilden i byggnaden ser ut. Råder det undertryck i det kalla vindsutrymmet och samtidigt övertryck inomhus föreligger risk för att varm luft pressas ut genom byggnadens klimatskal, i detta fall främst mellanbjälklaget, vilket medför risk för inuti klimatskalet då luften kyls av. Av denna anledning är det alltid eftersträvänsvärt att hålla undertryck i utrymmet innanför klimatskalet (Nevander & Elmarsson, 1994).

Kombinationer av de ovanstående problemkällorna är tänkbara vilket kan öka riskerna för problem med fukt ytterligare. Även fukt som tillkommit i byggskedet kan ge upphov till problem. Exempel på detta är fuktigt material som byggts in eller fukt som tillkommit via nederbörd eller läckage innan byggnadens väderskydd färdigställts. Även denna fukt behöver kunna transporteras bort för att inte orsaka skador. I fråga om utbredning finns det enligt Åberg & Thunborg (2010) ungefär 1,6 miljoner småhus i Sverige med kallt tak, varav så många som drygt 20 % bedöms vara fuktskadade i någon form.

Den ventilation som föreligger i kalla vindsutrymmen har visat sig både vara till nytta och till nackdel då den under vissa förutsättningar kan tillföra fukt till vindsutrymmet. Då utomhusklimatet varierar över året kommer uteluften under sommarhalvåret att vara varmare och därmed kunna transportera bort fukt genom ventilation, medan uteluften under vinterhalvåret är betydligt kallare och därför inte kan ta upp samma mängd fukt

(Samuelson, 1995). Denna slutsats har även dragits av Sasic Kalagasidis & Mattsson (2005) som simulerat klimatet för ett antal vindar i småhus. De skriver att ventilationen är till nytta i de fall där det förekommer ett läckage genom mellanbjälklaget och upp i vindsutrymmet då den fukt som då uppkommer i vindsutrymmet kan ventileras bort. Är dock mellanbjälklaget helt lufttätt anser de att ventilationen på vinden kan strypas helt för att den inte ska riskera att föra med sig fukt in i vindsutrymmet. Nevander & Elmarsson (1994) skriver i sin tur att vindsutrymmet *skall* ventileras, men de anger inga konkreta siffror på lämplig luftomsättning.

2.6 Mögel

Mögel och andra fuktproblem är bekymmer som ständigt gäckar byggbranschen, dels då de återkommer trots stora motverkande satsningar, och dels då det ofta är kostsamt att åtgärda de skador som uppkommer. Med mögel avses mögelsvampar som växer ytligt och som vanligtvis livnär sig av dött vegetabiliskt material och som sprider sig via luftburna sporer. De optimala levnadsförhållandena för de flesta vanligt förekommande mögelsvampar är vid temperaturer mellan 20-28 °C och en relativ fuktighet mellan 70-100 %. Flera mögelarter kan dock gro och leva även utanför dessa intervall, samt överleva under mindre gynnsamma förhållanden genom att gå in ett slags viloläge (Ekstrand-Tobin, 2003). I fråga om byggnadstillämpningar används enligt Åberg & Thunberg (2010) följande definition: *”Med fukt och mögel avses en fuktnivå i en byggnadskonstruktion som medfört en okulärt synlig mikrobiell påväxt, onormal kemisk emission eller elak lukt.”*

Att mögel anses vara ett så pass allvarligt problem, trots att det sällan påverkar den rent statistiska funktionen hos en byggnad, grundar sig i de hälsoproblem och olägenheter som kan kopplas till mögel. Enligt socialstyrelsen (2006) kan fuktiga miljöer ge upphov till, bland annat, risk för infektioner i luftvägarna, astma och allergirelaterade besvär. De exakta kopplingarna mellan mögel, utbredning, typ och vilka hälsoeffekter det har är inte fullständigt utredda, men att det finns ett samband anses vara klarlagt.

I Boverkets byggregler (BBR) finns inga exakta angivelser för hur mögel ska hanteras eller förebyggas, mer än i avsnitt 6.51 där det står att *”Byggnader ska utformas så att fukt inte orsakar skador, elak lukt eller hygieniska olägenheter och mikrobiell påväxt som kan påverka människors hälsa”* (Boverket, 2011).

För att mögel ska kunna gro och växa på trämaterial krävs initialt att fritt vatten finns tillgängligt, men när mögelsvamparna väl etablerat sig kan de klara sig även utan detta. Om förutsättningarna för tillväxt i fråga om temperatur, fuktkvot och relativ fuktighet inte är de rätta under en viss period kan mögelsvamparna inta ett vilande stadium tills förutsättningarna blir mer gynnsamma. Ofta anges den relativa fuktigheten som dimensionerande värde för risk för tillväxt av mögelsvamp, där 80 % är det angivna dimensionerande värdet för trä. Detta tar dock inte hänsyn till temperaturens inverkan (Nevander & Elmarsson, 1994).

I Boverkets Byggregler framgår i avsnitt 6.52 även att *”Om det kritiska fukttillståndet för ett material inte är väl undersökt och dokumenterat ska en relativ fuktighet (RF) på 75% användas som kritiskt fukttillstånd”* (Boverket, 2011).

Med ovanstående gränsvärden i åtanke framgår det tydligt att relativa fuktigheter som överskrider nämnda värden är av största vikt att uppmärksamma och åtgärda för att problem med mögel och andra fuktskador inte ska kunna uppstå.

2.7 Spårgas

Att bestämma luftflöden i större utrymmen så som hela rum är oftast både enklast och mest effektivt att genomföra med hjälp av mätning med spårgas. Metoden innebär att en känd koncentration av spårgas sprids i det utrymme som undersöks, varpå koncentrationen mäts, vilket ger information om hur spårgasen förflyttat sig i utrymmet. Själva spårgasen utgörs av någon gas som inte finns naturligt i luften, till exempel olika växthusgaser. Vanligt förekommande är dikväveoxid (N_2O) som ofta benämns lustgas, eller svavelhexafluorid (SF_6). Spårgasmätning ger möjlighet till framförallt två typer av mätningar som kan vara av intresse för detta examensarbete. Dels kan luftomsättningen i ett utrymme bestämmas genom att en känd koncentration spårgas släpps ut vid mätningens början varpå koncentrationen mäts kontinuerligt tills ingen eller obetydligt lite spårgas finns kvar i utrymmet. Med kännedom om tiden det tagit för koncentrationen att avta samt utrymmets volym kan en luftomsättning bestämmas. Detta är av intresse för att till exempel kontrollera att ventilationen i en byggnad uppfyller de funktionskrav som ställts vid projektering. En annan typ av undersökning som möjliggörs med spårgas är bestämning av luftrörelser i ett utrymme. Detta görs genom att en känd koncentration spårgas kontinuerligt, ibland över flera dygn, disponeras i ett utrymme samtidigt som koncentrationen kontinuerligt mäts på en eller flera punkter. Fördelningen av spårgas mellan mätpunkterna kan då identifieras vilket ger information om hur luften förflyttar sig i utrymmet. En variant på detta är att kontrollera hur mycket spårgas som behöver doseras för att kunna hålla koncentrationen konstant i ett utrymme (Mattson, 1991).

Även kombinationer av ovanstående mätmetoder är tänkbara, då med olika sorters spårgas som antingen mäts parallellt eller där mätningarna är periodiserade i någon form.

2.8 Omblandning och luftrörelser

För att mätmetoden ska fungera väl och ge pålitliga mätresultat förutsätts att omblandningen i den eller de utrymmen, ofta benämnt celler, där mätningen sker är god. Detta för att den eller de mätpunkter som används ska ge ett värde som är representativt för hela den volym där mätningen sker. Omblandningen kan till exempel åstadkommas med hjälp av fläktar, men i många fall där någon form av ventilation finns antas denna vara tillräcklig för att ge den omblandning som eftersträvas (Mattson, 1991). Både Mattson (1991) och Hedin (1994) har beskrivit metoder för att utföra spårgasmätningar i flera celler, så kallad multicellmetod, där de även beaktat hur luftrörelser sker mellan celler. Komplexiteten i hur luftens beteende och rörelser ser ut gör att detta är en parameter som är svår att ta hänsyn till, men som bör noteras då den påverkar hur spårgasen rör sig i mätutrymmet.

Vad som kan utgöra ett problem vid spårgasmätningar är om luften rör sig i en kolvform från intag till utblås och inte blandar sig med luften i resten av utrymmet, utan passerar helt enkelt förbi. Applicerat på en spårgasmätning innebär detta att luftflödet i sådana fall rör sig förbi en eller flera mätpunkter, beroende på luftrörelserna, och således sker en form av kortslutning där mätningen inte ger ett resultat som speglar verkligheten. Kolvströmningsgraden har beskrivits av Jensen (1988) där fenomenet får en djupare förklaring.

2.9 Diffusion

Även om omblandningen av luft i ett utrymme till största delen beror av luftrörelser orsakade av konvektion, differenser i tryck eller temperatur, eller av ventilation i någon form, finns också en viss påverkan i form av diffusion. Hur fort diffusion mellan två gaser sker beror på gasmolekylernas form och storlek samt gasernas viskositet, och anges vanligtvis som en diffusionskoefficient D [m^2/s]. Högre temperatur medför en högre diffusionskoefficient, och diffusion i gaser sker vanligtvis fortare än diffusion i vätskor. I detta examensarbete är det således aktuellt med information om hur snabbt blandningen mellan de använda spårgaserna, i det här fallet svavelhexafluorid och dikväveoxid, och den omgivande luften sker. Enligt CRC Handbook of Chemistry and Physics (2014) är $D = 0,15 \text{ cm}^2/\text{s}$ vid temperaturen 100°C och lufttrycket 101325 Pa , vilket omvandlat till SI-enheter ger en diffusionskoefficient med värdet $1,5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Detta kan jämföras med diffusionskoefficienten för blandning mellan luft och vattenånga som under samma förutsättningar är $3,99 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, alltså nästan tre gånger snabbare än för svavelhexafluorid och luft. Avklingningskurvan hos en spårgas kan alltså inte enbart härledas till att bero på ventilationen och luftflödet i utrymmet utan har teoretiskt sett en viss påverkan av diffusionskoefficienten (Schroeder, 2000). Enligt Jensen (1988) är dock diffusionen så pass långsam att den vid spårgasförsök inte medför någon skillnad stor nog för att alltid anses relevant att beakta. Detta kan dock visa sig relevant att revidera då Jensen (2014) vid senare utförda beräkningar även har undersökt hur lång tid det tar för en spårgas att blanda sig med luft beroende på vilken höjd spårgasen appliceras i ett utrymme. Undersökningen har gjorts för olika höjder och för olika diffusionskoefficienter, $1 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ respektive $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, samt för de olika tiderna 1, 10, 100 samt 1000 sekunder, och visar hur stor andel av spårgasen som blandat sig med luften vid olika höjder och efter olika lång tid. Även om förloppet är långsamt går det ändå så pass fort att det i viss mån kan påverka spårgasmätningar som sker över längre tid, vilket kan vara aktuellt att notera i detta examensarbete.

3 Mätningar

Med syftet för detta examensarbete i åtanke följer att en större mängd mätningar har utförts, i ett första skede för att kunna hantera mätutrustningen på ett bra sätt och i ett senare skede för att kunna ta fram underlag för en relevant och väl fungerande mätmetod. De numrerade försöksmätningarna nedan avser grupper av mätningar där utrustningen successivt justerats för att kunna ge relevanta mätdata. Samtliga av dessa mätningar har utförts på en testvind som tillhör Lunds Tekniska Högskola.

3.1 Testvind

På Lunds Tekniska Högskola finns en laboratoriebyggnad som används gemensamt av avdelningarna för byggnadsmaterial och byggnadsfysik där mätningar och fältstudier kan utföras. Byggnaden består av ett enda rum med längden 7 m och bredden 3,6 m, vilket ger en area om cirka 25,2 m², samt ett kallt vindsutrymme och ett mindre källarutrymme med fri höjd om cirka en meter. Byggnaden är uppförd med en grund av betong och trästomme, där ytterväggarna består av en träregelstomme med ett antal mellanliggande fack som tillåter att olika väggmaterial kan användas. Detta möjliggör mätning på till exempel olika typer av betongelement under likvärdiga förutsättningar.



Figur 2. Testvindens utseende.

Den vind där mätningarna i detta examensarbete utförts är indelad i två sektioner med en mellanliggande vägg där den första sektionen är uppförd som en typisk kall vind enligt tidigare beskrivning. Ventilationen utgörs i denna del av två stycken kvadratiska ventilationsgaller på gaveln med en area på 0,04 m² vardera, där den ena tätades under

mätningarna då två stycken ventilationsgaller ansågs ge ett alltför stort ventilationsflöde för en så pass liten vind. Denna del har även takfotsventilation längs med båda långsidorna i form av en längsgående öppning om cirka 20 mm. Den bortre delen av vinden saknar både ventilationsgaller på gaveln och längsgående öppningar vid takfoten.

Mellanbjälklaget består av takstolar med c/c-avstånd 1200 mm, plywood som även utgör innertak, plastfolie och 195 mm mineralull överst. Yttertaket är belagt med betongpannor upplagda på läkt med underliggande papp och sist råspont.

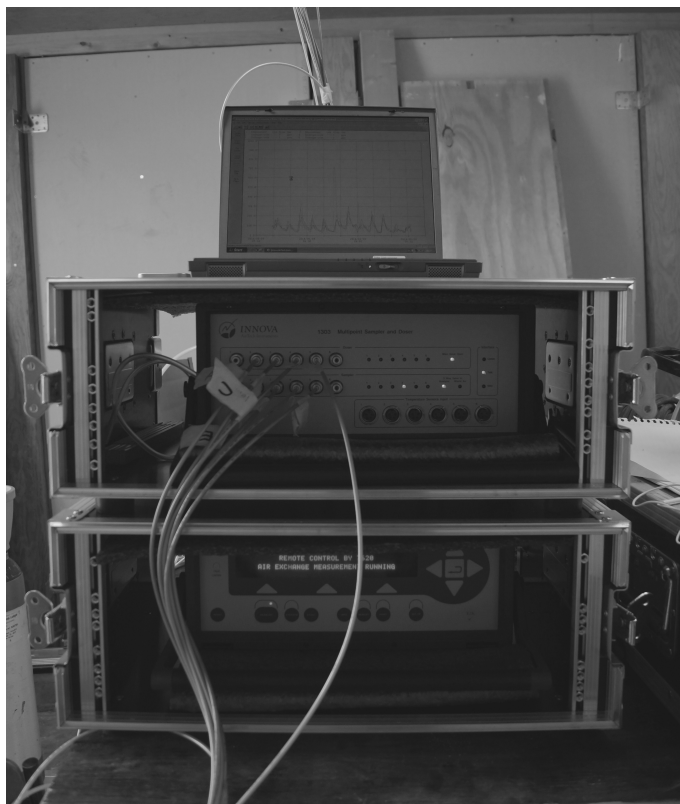
Vinden har måtten 3,95*3,5*1,8 m per sektion vilket ger en volym på 25 m³ totalt och 12,5 m³ per sektion. Under mätningarna har endast den första sektionen av vinden används och en avdelning har gjorts genom att hålla dörren mellan de två sektionerna stängt. Anledningen till detta är att undvika att lufrörelser mellan de två utrymmena påverkar mätresultatet, då hantering av lufrörelser mellan olika celler inte ingår i detta examensarbete. Det är även vanligt att kalla vindar i småhus består av en enda cell varför mätningar i ett så likvärdigt utrymme som möjligt antas ge en metod som är lättare att applicera på ett faktiskt fall. Vidare anses ventilationen i det utrymme där mätningarna utförts vara mest representativt för hur en kall vind vanligtvis är ventilerad.

3.2 Mätutrustning

Utrustningen som använts vid mätningarna består i huvudsak av tre enheter. Den första är en *1303 Multipoint Sampler and Doser* av märket Innova AirTech Instruments. Denna del är en så kallad multiplexor och hanterar disponeringen av gas via sex stycken munstycken för dosering och ytterligare sex stycken för mätning, där varje munstycke som är aktivt förses med en slang som doserar samt en slang som mäter där slangens ände placeras. Enheten har även uttag för gastillförsel via tub samt en utgång för överskott som släpps ut via en separat slang. Inuti multiplexorn är systemet för sampling konstruerat av rostfritt stål och polytetrafluoreten (PTFE) för inte absorbera något av spårämnet som används. Även om mätningen (sampling) benämns som kontinuerlig i manualen är enheten konstruerad så att de sex mätkanalerna går samman i en gemensam kanal till vilken själva mätsensorn är kopplad. Disponeringen mellan de olika mätkanalerna och mätsensorn görs via en trevägs magnetventil och eventuellt överskott av spårgas leds bort. Detta innebär att mätningen inte sker kontinuerligt i samtliga kanaler utan i en kanal i taget, men kontinuerligt i den meningen att mätning alltid pågår i en kanal. Multiplexorn kan mäta sex olika sorters spårgas och har även uttag för sex stycken temperatursensorer, vilket innebär att temperaturen vid de olika mät- eller disponeringspunkterna kan mätas parallellt med spårgaskoncentrationen (LumaSense, 2011).

Nästa enhet är en *1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor*, också tillverkad av Innova AirTech Instruments. Denna monitor hanterar mätdata, lagrar sparade data samt kommunicerar med en eventuell tredje del i form av en dator. I detta fall används en PC som tredje del där programmet *7620* används för hantering av inställningar, data och grafisk framställning av mätningarna. Programmet möjliggör även export av mätdata i form av en textfil, som sedan kan importeras i Excel för bearbetning och analys. Vidare är det även möjligt att använda ytterligare en multiplexor tillsammans med monitorn för att i

sådana fall dubbla antalet disponerings- respektive mätanslutningar till 12 stycken, men i detta fall används endast en (Innova, 2007).



Figur 3. Mätutrustningen som använts. PC:n längst upp, därefter multiplexorn och längst ner monitorn. Slangarna som syns bakom PC:n fortsätter upp genom mellanbjälklaget till vinden.

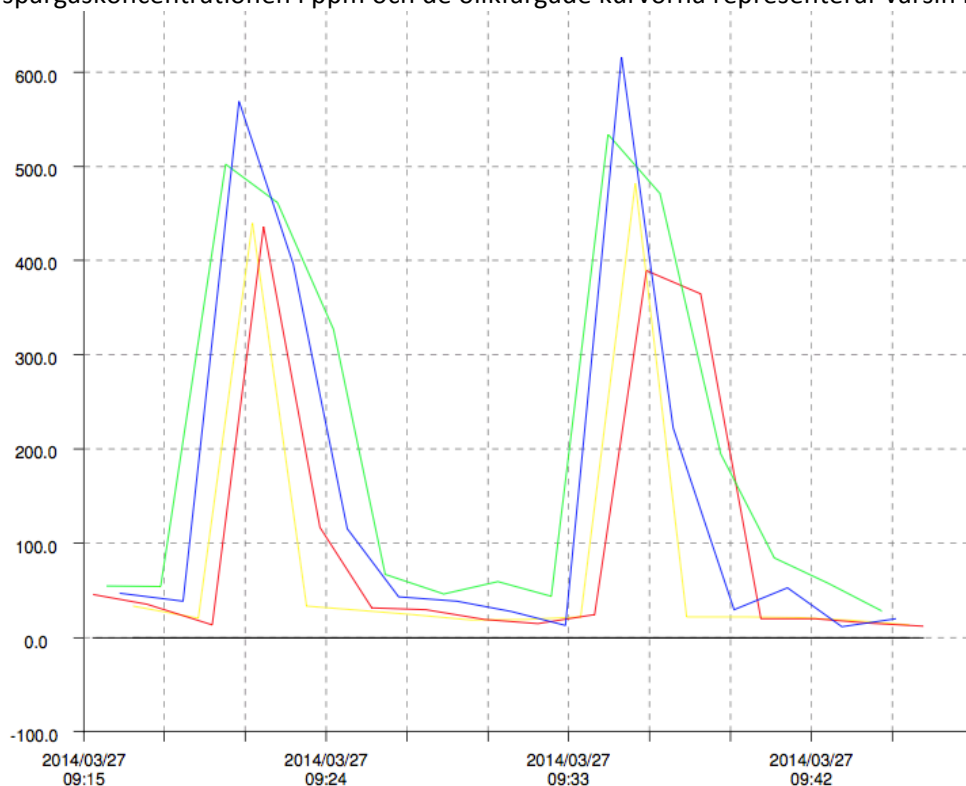
Utrustningen mäter koncentrationen av spårgas med en noggrannhet upp till enstaka ppm. Gasen som använts för försöksmätning 1 – 3 är svavelhexafluorid, SF_6 , som är en luktlös och färglös växthusgas. Gasen har en densitet på $6,17 \text{ kg/m}^3$, vilket är betydligt högre än till exempel luft som har densitet $1,225 \text{ kg/m}^3$. Molvikten för svavelhexafluorid är $146,06 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$. Dikväveoxid, som även den är en växthusgas, har använts vid försöksmätning 4 för att en jämförelse mellan resultaten för olika spårgaser ska vara möjlig, då egenskaperna hos dikväveoxid skiljer sig mot de för svavelhexafluorid. Den förstnämnda har en molvikt på $44,01 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$ och en densitet på $1,977 \text{ kg/m}^3$ vilket är något högre än för luft men lägre än för svavelhexafluorid (CRC, 2014).

För både dosering och sampling används polyetylenslangar av modell PUN 4x0,75, tillverkade av Festo, med innerdiameter 4 mm.

3.2.1 Försöksmätning 1

I syfte att kunna hantera mätutrustningen på ett korrekt sätt utfördes initialt ett antal mätningar där resultatet i princip enbart är av intresse för att identifiera utrustningens känslighet för olika inställningar. *Försöksmätning 1* avser därför en grupp mätningar och

alltså inte en enstaka. De första försöken gjordes med vindsutrymmet avdelat, vilket innebär en volym på $12,5 \text{ m}^3$, och med slangar för både dosering och sampling liggandes på bjälklaget. De justeringar som gjorts i det här skedet är dels olika procentandelar på dosen, men framförallt olika dostider för både dosering och sampling då detta snabbt visade sig ha en klart märkbar påverkan. Resultaten gav dock väldigt snabba avklingningskurvor på endast någon minut, där en tydlig form på kurvan var svår att urskilja. Vid dessa mätningar har till största delen tre kanaler använts, vilket innebär tre doseringspunkter respektive mätpunkter. Dosering har skett i samtliga tre slangar samtidigt och sampling har skett kontinuerligt. Slangarna har dragits upp genom mellanbjälklaget i ett gemensamt hål som tätats med tejp, medan själva mätutrustningen och gastuben placerats på bottenplan. Kurvornas principiella utseende framgår av Figur 4, där y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm och de olika färgade kurvorna representerar varsin mätkanal.



Figur 4. Avklingningskurvor för försöksmätning 1, där kanal två är gul, kanal tre är röd, kanal fyra är grön och kanal fem är blå. Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm.

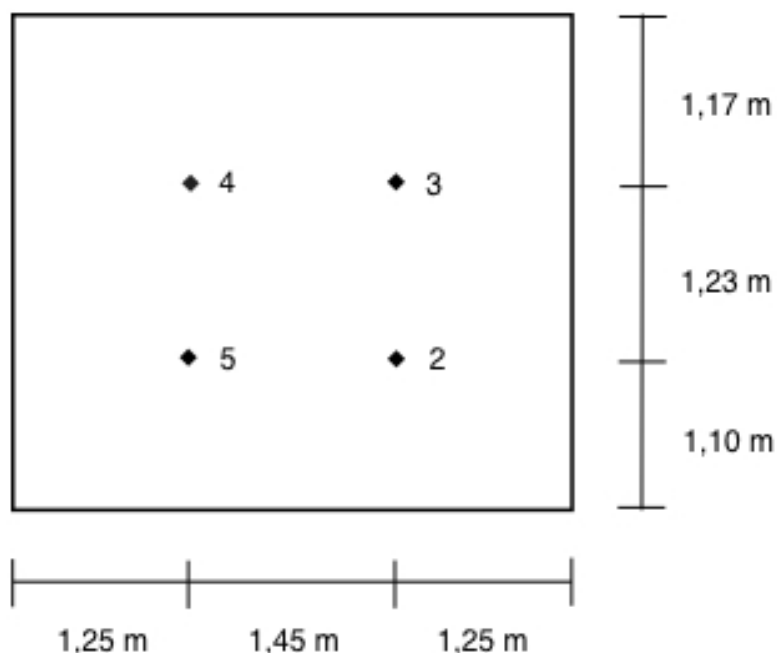
De parametrar som justerats i försöksmätning 1 via 7620 och som visat sig påverka mätresultatet anges i tabell 1.

Tabell 1. Funktioner och deras påverkan i 7620.

Parameter	Funktion	Påverkan
Dosprocent	Styr andelen av dostiden som ventilen ska vara öppen.	Dosprocenten förefaller inte ha särskilt stor påverkan på hur avklingningen beter sig, men då den påverkar mängden spårgas som doseras medför en större procent också ett större ventilationsbehov och en längre tid innan koncentrationen klingat av. Detta påverkar således hur lång tid mätning tar.
Dostid	Anger under hur lång tid spårgas ska doseras ut.	Dostiden har viss påverkan, då en alltför kort dostid på under cirka 1,5 minut förefaller ge något instabila doseringar med stor spridning. En alltför lång dostid på över ungefär 6 minuter förefaller inte tillföra mätningen särskilt mycket då doskoncentrationen tidigt stabiliserar sig och den långa dostiden endast förlänger mätningen.
Avklingningstid	Anger under hur lång tid doseringen ska ha uppehåll.	Avklingningstiden har visat sig ha relativt stor påverkan på mätresultatet, då en längre avklingningstid på uppemot cirka 20 minuter ger spårgasen möjlighet att helt ventileras bort innan ny spårgas doseras ut. En tydlig avklingningskurva kan då avläsas.

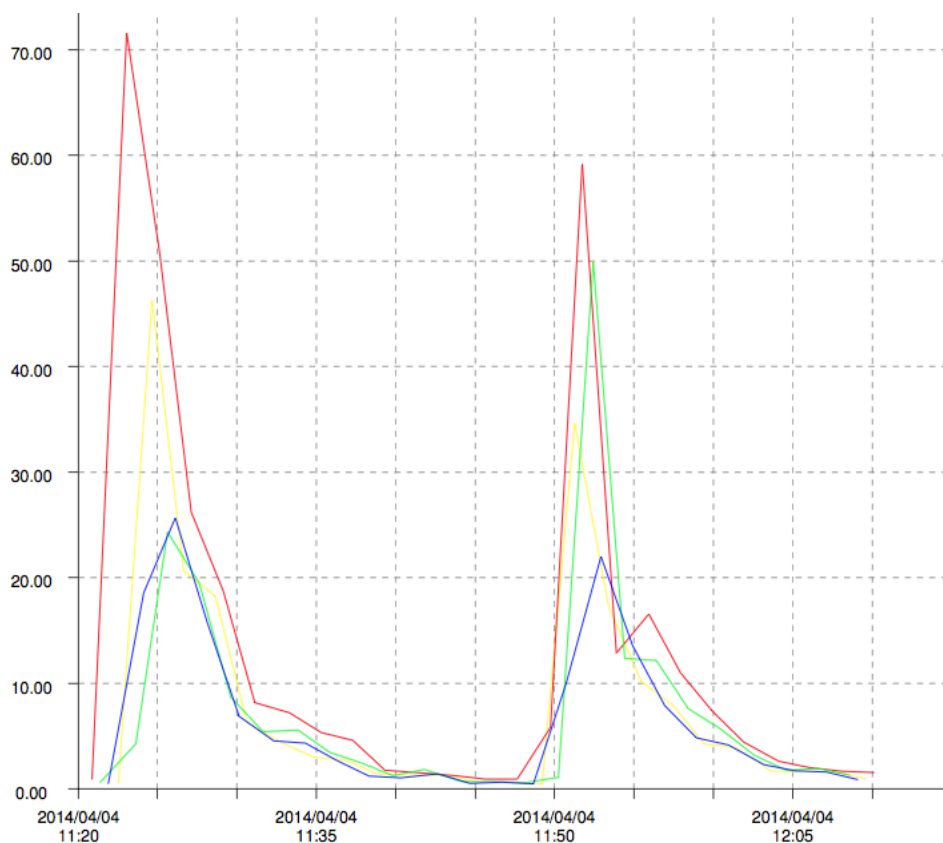
3.2.2 Försöksmätning 2

I nästa steg ändrades placeringen av slangarna för dos och mätning. I planet placerades slangändarna för dos respektive mätning relativt symmetriskt vid samma punkter i rummet, se Figur 5 nedan. Placeringen motiveras med att den antas ge en representativ bild av hela mätutrymmet.



Figur 5. Mätpunkternas placering i planet. Siffrorna anger vilken kanal som använts på respektive plats.

Slangarna för dosering höjdes dock i detta steg upp en meter ovanför golvytan, vilket med hänsyn till den skillnad i densitet som föreligger mellan svavelhexafluorid och luft antogs kunna ge en bättre omblandning av spårgasen än vid tidigare försök. Detta föreföll stämma då avklingningskurvorna genast blev betydligt flackare jämfört med tidigare försök och en tydligare form på kurvan kunde urskiljas. Det visade sig även krävas en betydligt mindre dosprocent än tidigare, närmare 50 % än 100 % som tidigare. Vidare ökades avklingningstiden till runt 20 minuter för att spårgaskoncentrationen skulle hinna gå ner helt innan nästa dosering påbörjades. Även här har dosering skett i samtliga kanaler samtidigt och sampling har skett kontinuerligt. Kurvornas principiella utseende framgår av Figur 6, där y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm och de olivfärgade kurvorna representerar varsin mätkanal. En tydlig skillnad mot utseendet för kurvorna i försöksmätning 1 syns då de i bilden nedan antar en flackare form vid avklingningen.



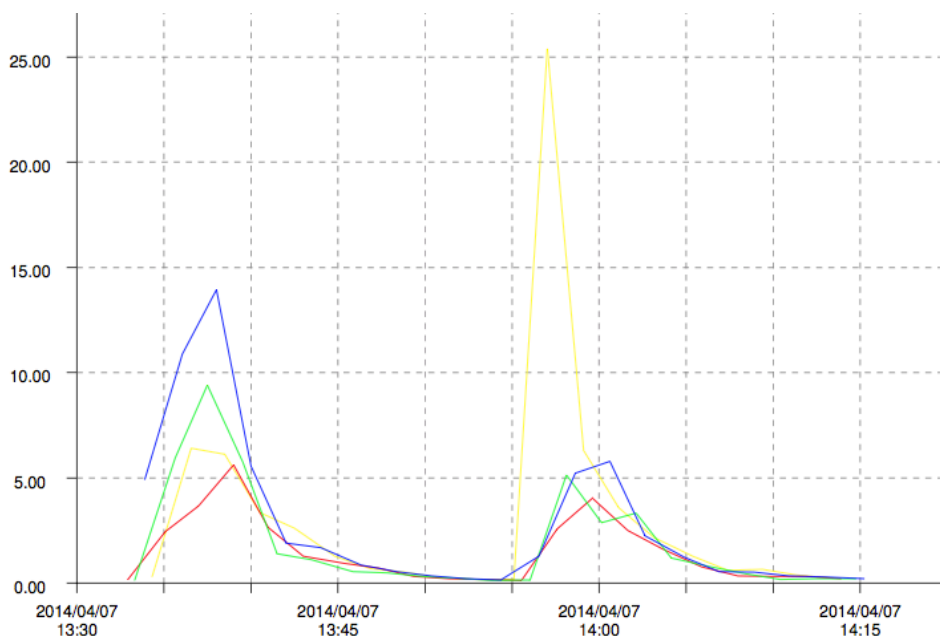
Figur 6. Avklingningskurvor för försöksmätning 2, där kanal två är gul, kanal tre är röd, kanal fyra är grön och kanal fem är blå. Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm.

I de ovan beskrivna försöken har ingen hänsyn tagits till längden på slangarna som doserat respektive mätt spårgasen, varför information om huruvida längden påverkar mätresultaten saknas.

3.2.3 Försöksmätning 3

De justeringar som gjorts i nästa steg är dels längden på slangarna. Samtliga är gjorda av polyetylen för att minimera mängden spårämne som absorberas på vägen till analysatorn och uppmätta så att alla är tio meter långa, både för dosering och sampling. Detta för att kunna utesluta eventuella skillnader i resultat som skulle kunna uppstå på grund av till exempel olika tryckfall i slangarna, samt tidsfördröjningen som uppstår när gasen ska transporteras olika långt till och från olika mätpunkter. Vidare har även doseringsrutinen ändrats så att dosering endast sker i en punkt åt gången medan sampling pågår kontinuerligt i samtliga aktiva kanaler. Detta för att bättre kunna se tendenser till huruvida en omblandning sker eller om större delen av spårgasen från en doseringspunkt tas upp av den mätpunkt som ligger närmast. Dosprocenten har hållits till runt 50 %, dostiden till 3 minuter och avklingningstiden till 18 minuter. Då mätutrustningen är begränsad till att endast kunna utföra sex stycken olika doseringsmanövrar har dosering endast skett i tre av kanalerna, då hälften av de tillgängliga doseringsmanövrarna tas upp av det nolläge som utgör avklingningstiden. Mätning sker dock kontinuerligt i samtliga aktiva kanaler.

Slangarnas längd förefaller ha haft viss påverkan på resultaten då avklingningskurvorna för de olika mätpunkterna efter justering av slangarnas längd tenderar att vara mer lika varandra än vid tidigare försök. Den generella spårgaskoncentrationen har också gått ner, vilket är naturligt med tanke på att dosering endast sker i en slang åt gången, från ungefär 60 ppm vid kurvtopparna som uppstår vid dosering vid tidigare mätningar till betydligt lägre koncentrationer vid motsvarande ställen på kurvan vid de senare mätningarna. Noterbart är även att den uppmätta koncentrationen vid dosering är relativt likvärdig i alla fyra mätpunkter vilket tyder på att en relativt god omblandning sker i mätutrymmet trots att dosering endast sker i en punkt åt gången. Kurvornas principiella utseende framgår av Figur 7, där y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm och de olikfärgade kurvorna representerar varsin mätkanal.



Figur 7. Avklingningskurvor för försöksmätning 3, där kanal två är gul, kanal tre är röd, kanal fyra är grön och kanal fem är blå. Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm.

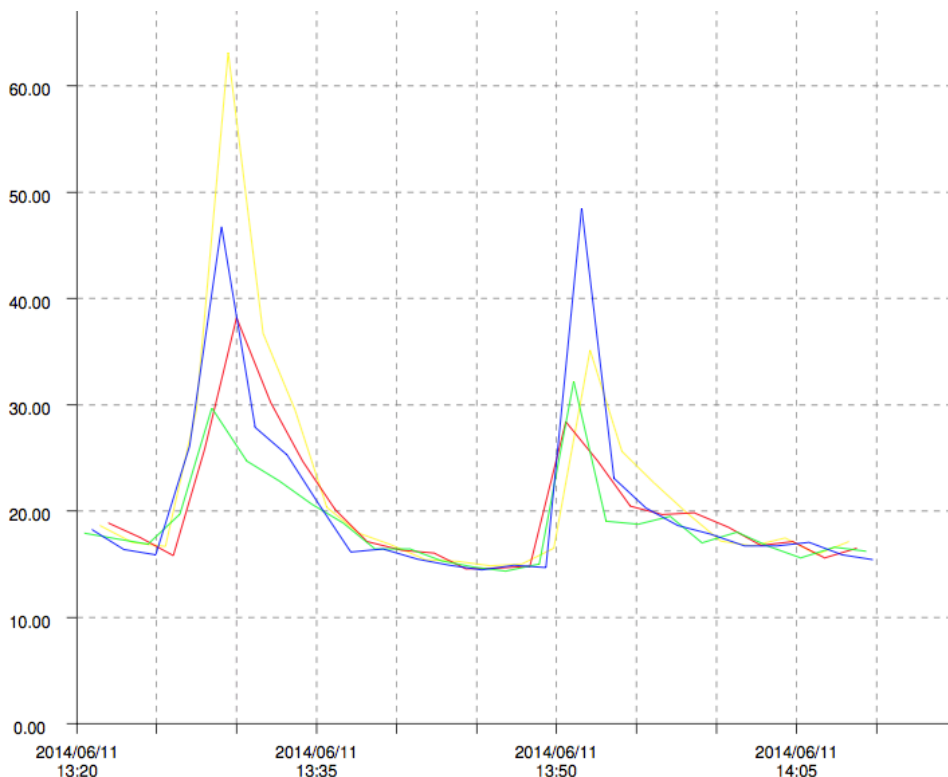
I detta skede gjordes även ett första försök över längre tid, det vill säga mer än någon enstaka timme. Detta försök påbörjades klockan 13.10 2014-04-09 och pågick till klockan 10.20 dagen efter med syfte att se eventuella förändringar över tid, samt för att kontrollera mätutrustningens stabilitet. Mätningen utfördes under samma förutsättningar som försök tre beskrivet ovan. Mätningen gav ett resultat nära det förväntade i fråga om jämna och likvärdiga avklingningskurvor genom hela mätningen, men resultatet visade även ett antal toppar med värden långt över övriga. Systematiken i när dessa toppar uppstår är dock inte klarlagd då ett direkt mönster ej kan utläsas.

3.2.4 Försöksmätning 4

Då multiplexorn som används inte doserar exakt samtidigt i alla aktiva doseringskanaler, utan doserar via en kanal i taget, uppstår en fördröjning mellan doserna. För att kringgå

denna fördröjning och kunna dosera spårgasen på flera punkter simultant används ett antal t-stycken som möjliggör disponering via en doseringskanal ut i flera förgreningsslangar. Principen innebär att dosering endast sker genom en kanal som disponeras till flera punkter, medan mätningen fortfarande sker kontinuerligt i flera kanaler. T-styckena som används är av typen QST (Festo) och har kopplats så att en slang går ifrån multiplexorn till ett t-stycke med en slang i varje utgång, varpå ett t-stycke i sin tur har monterats på dessa två. Detta ger alltså fyra slangändar ifrån en enda utgång på multiplexorn. Slangen mellan multiplexorn och det första t-stycket är 8 m, varpå ytterligare 1,5 m adderas till de förgrenade slangarna innan de når doseringspunkterna.

Dostiden har även här hållits till 3 minuter och avklingningstiden till 18 minuter. Detta dels då det snabbt visade sig vara lämpligt även för denna mätmetod och dels för att en relevant jämförelse mellan metoderna ska underlättas vid likvärdiga förutsättningar. Dosprocenten har hållits till runt 65 %. Mätmetoden förefaller ge jämna kurvor vilket troligtvis beror på att dosering sker simultant, men metoden avviker ifrån övriga då koncentrationen spårgas inte går ner till noll. Försök har gjorts med längre en avklingningstid på över 30 minuter utan märkbar skillnad då koncentrationen förefaller stabiliseras vid runt 15 ppm. Kurvornas principiella utseende framgår av Figur 8, där y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm och de olikfärgade kurvorna representerar varsin mätkanal.



Figur 8. Avklingningskurvor för försöksmätning 4, där kanal två är gul, kanal tre är röd, kanal fyra är grön och kanal fem är blå. Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm.

De kurvor som genereras ifrån försöksmätning 4 förefaller ge jämna och tydliga kurvor med en tydlig exponentiell avklingning. Det bör också poängteras att även om själva doseringen med användning av t-stycken sker helt simultant, så sker samplingen fortfarande inte exakt samtidigt i samtliga kanaler vilket beskrivits närmare i kapitel 3.2.

3.3 Sammanfattning av försöksmätningar

Mot bakgrund i ovanstående försöksmätningar har tre metoder för mätningens utförande identifierats och valts ut för vidare utvärdering då de förefaller ge bäst resultat under de aktuella förutsättningarna. Samtliga tre mätmetoder bedöms även vara likvärdiga i fråga om svårighet i utförande varför en jämförelse anses vara relevant och väl underbyggd. De tre metoderna som valts för vidare utvärdering i kapitel 5 är följande:

- Dosering i samtliga fyra kanaler simultant och kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.
- Dosering i en kanal i taget men kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.
- Dosering via en kanal till ett t-stycke som fördelar dosen till fyra punkter och kontinuerlig mätning i samtliga kanaler.

4 Hantering av mätresultat

Med syftet för detta examensarbete i åtanke är det aktuellt att studera hur avklingningen av spårgaskoncentrationen beter sig. Mätresultaten som hanterats i 7620 har exporterats till textfiler, en per aktiv kanal för sampling vid varje mätning. Textfilerna har sedan importerats till Excel där varje mätkanal givits ett separat kalkylblad. Varje textfil innehåller information om koncentrationen spårgas, hur mycket gas som doserats samt tidsangivelser för när dosering respektive mätning gjorts, vanligtvis med ungefär 1,5 - 2 minuters mellanrum. Tiden anges i antal dygn med start vid en tid noll, som programmet räknar ifrån 1 januari år 1900.

Den uppmätta spårgaskoncentrationen för varje mättillfälle anges i ppm i 7620, men anges i mg/m^3 när mätdata exporterats till textfiler och förts in i Excel. För att kunna räkna om koncentrationen tillbaka till ppm används för svavelhexafluorid respektive dikväveoxid formel 2 och 3. Konstanten 24,45 motsvarar den molvikt [$\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$] för luft som programmet använder sig av. Denna varierar naturligtvis beroende av luftens sammansättning av syre, kväve och väte, men då 7620 använder sig av detta värde anses det inte motiverat att justera det.

$$ppm = \frac{24,45 \cdot \text{mg}/\text{m}^3}{\text{Molvikt}} \quad [\text{ppm}] \quad (2)$$

där molvikten är $146,06 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$.

För dikväveoxid får formeln istället utseendet

$$ppm = \frac{24,45 \cdot \text{mg}/\text{m}^3}{44,01} \quad [\text{ppm}] \quad (3)$$

där 44,01 är molvikten för dikväveoxid.

4.1 Kurvanpassning

För att teoretiskt kunna beskriva hur spårgaskoncentrationen klingar av vid mätningarna har en kurvanpassning gjorts. Då spårgaskoncentrationen klingar av exponentiellt blir ekvationen för koncentrationen y av typen

$$y = C \cdot e^{-n \cdot t} \quad [\text{ppm}] \quad (4)$$

där t anger tiden i antal timmar sedan koncentrationen spårgas var som högst för den aktuella avklingningskurvan, C är en konstant och n anger luftomsättningen i oms/h. Kurvanpassningen har gjorts genom att systematiskt pröva olika värden på C och n tills en acceptabel likhet med kurvan för de faktiska mätvärdena uppnåts. Detta har till en början gjorts i Excel för att på ett enkelt och effektivt sätt kunna hitta en passande kurvform. För att kunna hantera den tidsangivelse som mätutrustningen använder har det angivna värdet

justerats så att tidstegen anges i antal timmar, vilket innebär att det angivna värdet subtraherats från det nästkommande värdet, och sedan multipliceras med 60. Värdena har sedan justerats ytterligare genom att låta tidsvärdet som motsvarar toppen på avklingningskurvan vara det första, vilket innebär att detta värde alltså fås genom att subtrahera värdet med tidigare tidsvärden. Detta ger följande utseende på ekvation 4:

$$y = C \cdot e^{-n \cdot (t-t_0)} \quad [\text{ppm}] \quad (5)$$

där t_0 alltså anger starttiden för varje avklingningskurvan, vilket gör att varje enskild regressionsanalys (se nästa kapitel) får starttiden 0.

De första försöken till en kurvanpassning gav en luftomsättning n på runt 16 oms/h. Detta värde kan anses vara av någorlunda rimlig storleksordning men bör inte ägnas alltför stor uppmärksamhet då anpassningen är gjord endast för en avklingningskurva i taget och för en enda mätkanal, varför det i längden är ohållbart att analysera mätdata med denna metod. Metoden ger dock en snabb uppfattning om kurvans karaktär och bekräftar att det rör sig om en exponentiell avklingning.

4.1.1 Linjär regression

För att på ett mer vetenskapligt korrekt sätt behandla avklingningskurvan som uppstår när spårgasen ventileras bort har en linjär regressionsanalys genomförts (Andersson et al, 2007). Detta innebär att mätvärden ifrån spårgasförsöken analyseras för att hitta en modell som beskriver hur de ingående variablerna beror av varandra. I det aktuella fallet är det koncentrationen spårgas i förhållande till tiden som är av intresse att undersöka. Då den aktuella funktionen enligt tidigare avsnitt är exponentiellt avtagande krävs att den skrivs om för att fungera enligt principen för en linjär regression. Då funktionen innehåller det naturliga talet e görs detta genom att använda den naturliga logaritmen för samtliga ingående termer, vilket ger följande utseende för funktionen:

$$\ln(y) = \ln(C) + \ln(e^{-n \cdot t}) \quad [-] \quad (6)$$

Med förenklingar enligt räknelagarna för logaritmer ges följande utseende för funktionen:

$$\ln(y) = \ln(C) - n \cdot t \quad [-] \quad (7)$$

Denna omskrivning möjliggör en linjär anpassning av de logaritmerade mätvärdena, vilket är betydligt enklare än att hitta en funktion som är en direkt anpassning till de faktiska mätvärdena. Anpassningen har gjorts i Matlab med dess backslash-operator, vilken använder sig av minstakvadratmetoden för att lösa ekvationen. Minstakvadratmetoden innebär att summan av de kvadrerade residualerna, som är avstånden mellan den anpassade funktionen och de faktiska mätvärdena, ska bli så liten som möjligt då detta ger den bästa anpassningen. Med denna metod ges de modellerade värdena φ då av följande uttryck:

$$\varphi = (A^T \cdot A)^{-1} \cdot A^T \cdot Y \quad [-] \quad (8)$$

Här är A den matris som byggs upp av en vektor med tidsangivelser för en viss mätserie och Y är en kolonnvektor med de logaritmerade mätvärdena (Johansson, 1993).

Ekvationssystemet som sätts upp för att lösa problemet får då följande utseende:

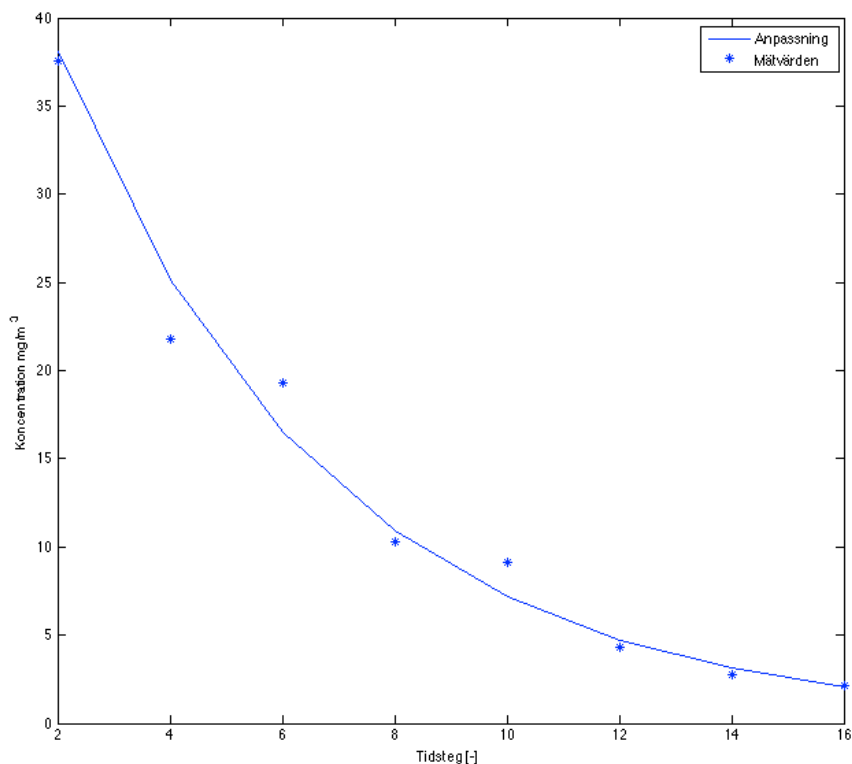
$$\begin{bmatrix} 1 & t_1 \\ 1 & t_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & t_n \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \ln(y_1) \\ \ln(y_2) \\ \vdots \\ \ln(y_n) \end{bmatrix}$$

$$A \cdot k = Y \quad (9)$$

Här anger n antalet mätvärden i den aktuella mätserien, A är en matris enligt ovan, k är en kolonnvektor med två obekanta variabler och Y är en kolonnvektor med de logaritmerade mätvärdena. Backslashoperatoren i Matlab ger då Lösningsvektorn k innehållandes två konstanter a och b som beskriver linjens lutning enligt formeln nedan:

$$\ln(y_n) = a - b \cdot t_n \quad [-] \quad (10)$$

Här motsvarar högerledet de logaritmerade y -värdena, a motsvarar den logaritmerade konstanten C och b motsvarar luftomsättningen n . För att gå tillbaka till det ursprungliga utseendet med en exponentiellt avtagande funktion bildas konstanten C genom att talet e upphöjs med den framräknade konstanten a , varefter en funktion enligt formel (4) kan tas fram med den framräknade konstanten b som luftomsättningen n . Med ovanstående räkningar genomförda kan en kurvanpassning göras. Exemplet i Figur 9 nedan visar en anpassning för en godtyckligt vald mätserie med tidsangivelser i jämna steg utan enhet.



Figur 9. Anpassning av mätdata med minstakvadratmetoden.

För samtliga ovanstående redogörelser gäller att de endast stämmer för en enda avklingningstid. Då samtliga mätningar utförts under en eller flera timmar innehåller varje mätserie ett antal avklingningskurvor som med denna metod måste behandlas separat, en för varje avklingningstid och mätkanal, vilket är ett tidsödande arbete. För att förenkla hanteringen av mätdata och effektivisera arbetet med att anpassa avklingningskurvorna har därför ett Matlabprogram tagits fram för ändamålet. Indata i programmet är de Excel-filer med importerad data ifrån 7620 vilket innebär information om spårgaskoncentration, doserad mängd gas, omsättning samt tider för dessa. Programmet *Vindanalys1* har skrivits så att det kan hantera analys av en mätkanal i taget, där den uppmätta koncentrationen och tiden för denna läses in som varsin kolonnvektor i Matlabs workspace. Värdena tas då från Excel och tidsvärdena har justerats så att starttiden för den första avklingningstiden är noll för samtliga kanaler. Koden för programmet finns i Bilaga 1.

4.1.1.1 Hantering av fel i modellen

Regressionsanalys och anpassningar till mätdata är alltid behäftade med felaktigheter i någon utsträckning, då en anpassning är just en anpassning och ingen perfekt modell. Att ta hand om och beakta felaktigheter i modellen ger ett mått på hur tillförlitlig modellen kan anses vara. De nedan beskrivna parametrarna används för att bedöma modellens kvalitet.

Förklaringsgraden R^2 ger ett mått mellan 0 och 1 på hur stor andel av variationen i mätvärdena som kan förklaras med hjälp av modellen. Förklaringsgraden beräknas med följande ekvation:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum(Y_i - \varphi_i)^2}{\sum(Y_i - \bar{y})^2} \quad [-] \quad (11)$$

Här anger Y_i de logaritmerade mätvärdena, φ_i anger anpassningen av de logaritmerade värdena och \bar{y} anger medelvärdet av de logaritmerade mätvärdena (Andersson et al, 2007).

Korrelationskoefficienten r beräknas med följande ekvation:

$$r = \frac{\sum(t_i - \bar{t}) \cdot (Y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(t_i - \bar{t})^2 \cdot \sum(Y_i - \bar{y})^2}} \quad [-] \quad (12)$$

Här motsvarar t_i värdet på x-axeln, det vill säga tiden, för ett visst mätvärde och \bar{t} anger det aritmetiska medelvärdet för samtliga tider för en avklingningskurva.

Korrelationskoefficienten anger med en siffra mellan -1 och 1 hur stark den linjära modellen är, där ett absolut värde nära 1 innebär att modellen korrelerar väl med den framtagna modellen medan ett absolut värde nära 0 innebär en betydligt sämre modell. Tecknet avgör om modellen är negativ eller positiv, vilket medför att modellen som tas fram i detta examensarbete kommer att vara negativ då det rör sig om en avtagande funktion (Andersson et al, 2007).

Residualvariansen ϵ , som ibland även benämns som det kvadratiska medelfelet, anger den genomsnittliga avvikelserna och beräknas med följande ekvation:

$$\epsilon = \frac{1}{n} \sum(\varphi_i - Y_i)^2 \quad [-] \quad (13)$$

Med samma beteckningar som ovan ger residualvariansen ett mått på hur pass väl modellen är anpassad till verkligheten. Ett större värde på ϵ innebär en sämre modell då värdet som synes växer med större differenser mellan de verkliga värdena och modellen. Detta har även beräknats på ett annat sätt, då benämnt logerror, i VindAnalys1 med koden `logerror=norm(log(phi)-Y)/sqrt(m-2)` där tvåan anger antalet skattade parametrar i modellen (Andersson et al, 2007). Uttryckt i en formel får beräkningen av logerror följande utseende:

$$\text{logerror} = \frac{\|\log(\varphi) - Y\|}{\sqrt{m-2}} \quad [-] \quad (14)$$

Här anger m antalet mätvärden per avklingningskurva.

Kovariansmatrisen ger även ett mått på hur bra den framtagna modellen är då den innehåller både variansen, som anger hur utspridd en mätserie är i förhållande till medelvärdet, och kovariansen, som anger hur pass benägna två variabler är att öka eller minska tillsammans. Kovariansmatrisen beräknas med följande uttryck:

$$\sigma^2 \cdot (A^T \cdot A)^{-1} \quad [-] \quad (15)$$

Här anger σ^2 variansen, vilken även är detsamma som standardavvikelsen i kvadrat. En kovariansmatris får således följande utseendet:

$$\begin{bmatrix} \text{var}(y_1) & \text{kov}(y_1, y_2) \\ \text{kov}(y_2, y_1) & \text{var}(y_2) \end{bmatrix} \quad [-] \quad (16)$$

Här anger *var* variansen och *kov* anger kovariansen. En kovariansmatris för en modell med god anpassning kännetecknas av att varianserna på diagonalen har högre värden än kovarianserna, men att samtliga värden är relativt låga. (Johansson, 1993), (Rawlings et al, 1998). I de kovariansmatriser som fås som utdata i VindAnalys1 anger $\text{var}(y_1)$ variansen för skattningen av konstanten C och $\text{var}(y_2)$ anger variansen för skattningen av luftomsättningen n .

Kovariansmatrisen möjliggör även att ett konfidensintervall kan tas fram för skattningen av konstanten C och luftomsättningen n . Konfidensintervallet anger ett intervall inom vilket det sanna värdet ligger med en vald säkerhet vilket är ett sätt att ange hur väl en modell är anpassad till verkligheten. Ett smalare intervall indikerar en bättre modell och ett bredare indikerar således en sämre. För utvärdering av modellen som använts i detta examensarbete har ett 90-procentigt konfidensintervall valts med hänsyn till utseendet på de kurvanpassningar som gjorts. Formeln för att ta fram konfidensintervallet har utseendet

$$\left[\theta - \tau_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{m}}, \theta + \tau_{\alpha/2} \cdot \frac{\sigma}{\sqrt{m}} \right] \quad [-] \quad (17)$$

där θ anger det skattade värdet för C eller n , τ anger konstanten för det aktuella intervallet, m anger antalet mätvärden i den aktuella avklingningskurvan och α anger vilket intervall det rör sig om. Då intervallet anger ett värde baserat på en skattad modell och inte verkliga värden används tabellvärden för α för t-fördelning istället för normalfördelning. Antalet mätvärden per avklingningskurva är vanligtvis tio stycken vilket ger konstanten 1,812, medan den för nio mätvärden är 1,895 (Vännman, 2002).

Samtliga ovanstående beräkningar för att hantera modellens felaktigheter görs i programmet VindAnalys1.

4.2 Utdata

De utdata som är av intresse ur programmet VindAnalys1 är, förutom de fel och hanteringen av dessa som behandlas i nästa kapitel, de luftomsättningar n som beräknats. Med hänsyn till syftet och frågeställningen i detta examensarbete är luftomsättningen av stort intresse då denna knyter an till den fuktproblematik som föreligger i kalla vindsutrymmen och som kan vara till stor hjälp för att ge en ökad förståelse samt en bättre grund för att kunna hantera problemen. För att verifiera en mätmetod som välfungerande

är dock hanteringen och bedömningen av dess brister en central del, varför det anses motiverat att belysa de fel som uppstår i modellen.

Då varje enskild avklingningstid genererar en omsättning, vilket för fyra aktiva kanaler ger fyra olika mått på luftomsättningen, krävs en hantering av det stora antalet framräknade luftomsättningar. Detta har hanterats genom att beräkna ett medelvärde av rådata i form av mätvärden från de fyra mätpunkterna innan hanteringen i VindAnalys1 påbörjas.

Följaktligen gäller att även tiden beräknats som ett medelvärde för de fyra kanalerna.

Hanteringen genom att beräkna ett aritmetiskt medelvärde på spårgaskoncentrationen för varje enskild avklingningskurva medför alltså att antalet beräknade luftomsättningar för varje mätning blir detsamma som antalet avklingningskurvor. Detta anses motiverat då metoden syftar till att ta fram en luftomsättning för hela mätutrymmet och inte bara en enskild mätpunkt. Hanteringen av fel i modellen kommer även den att generera de parametrar som beskrivs i kapitel 5.1.1.1 i samma antal som antalet luftomsättningar.

I granskningen av resultaten ifrån VindAnalys1 framgår tidigt inte alla värden är helt korrekta enligt ett idealt fall i den linjära regressionsanalysen. Avvikande värden är bland annat luftomsättningar med positivt tecken, värden på förklaringsgraden som ligger utanför intervallet 0 till 1, värden på korrelationskoefficienten som ligger utanför intervallet -1 och 1, och orimligt stora värden på felet.

5 Mätresultat

Nedan presenteras utdrag ifrån resultaten av de mätningar som utförts, analyserade enligt föregående kapitel och med kommentarer om inställningar för respektive mätning. För samtliga tre metoder utom mätmetod 2 har mätningarna utförts under mellan 62 och 66 timmar med dosering en meter ovanför mätpunkterna enligt figur 1. Mätmetod 2 är något kortare, endast 54 timmar, då mätningen avbröts i förtid på grund av problem med utrustningen. Mätningarnas längd anses motiverat då eventuella skillnader i väderlek, vindhastigheter och tryckbild under mätningen antas jämnas ut i viss mån vid en längre mätning, vilket bör ha gett mer pålitliga resultat än för mätningar över endast ett fåtal timmar. En längre mätning antas även ge en bättre bild av i vilken utsträckning störningar förekommer.

För de första tre mätningarna har dikväveoxid använts som spårgas medan mätmetod 2 även har utförts med svavelhexafluorid som spårgas, vilket redovisas i kapitel 5.4.

På grund av det stora antalet avklingningskurvor som genereras i varje mätning är det inte rimligt att varken undersöka eller presentera samtliga beräknade parametrar i detta kapitel, då det skulle innebära en mängd orimligt långa tabeller. Resultaten presenteras därför i detta kapitel i form av utdrag ur mätningar som bedöms som intressanta, samt med kommentarer om respektive mätmetods resultat. För varje mätmetod kommer ett par av de avklingningskurvor som ger avvikande värden att undersökas närmare, likväl som de som ger bra värden. Även jämförelser med grafer ifrån 7620 kommer att utföras, för att ge en bild av hur väl det fungerar att använda ett medelvärde för de fyra mätkanalerna.

För samtliga figurer gäller att y-axeln anger spårgaskoncentrationen i ppm medan x-axeln anger tiden. För grafer genererade i 7620 anges tiden med datum och klockslag medan den för grafer genererade i VindAnalys1 anges i antal minuter ifrån mätningens början.

5.1 Mätmetod 1

Metodmetod 1 innebär att spårgas doseras genom fyra aktiva kanaler simultant och att mätning görs kontinuerligt. Inställningarna som gjorts i 7620 anges i tabellen nedan och har sedan repeterats under hela mätningens längd.

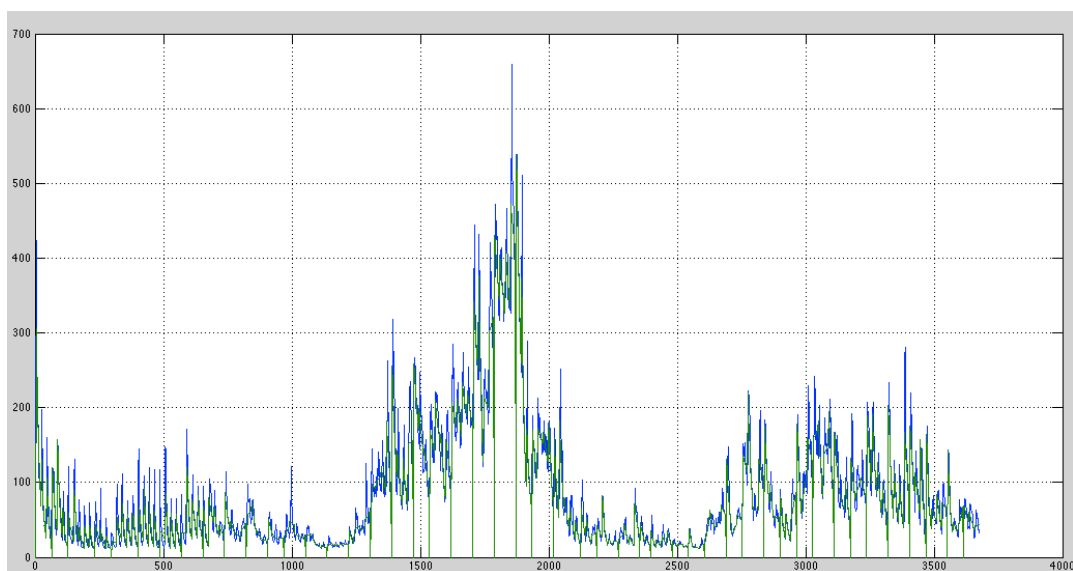
Tabell 2. *Inställningar i 7620 för mätmetod 1.*

Dos	Kanal	Dosprocent [%]	Dostid [h]
1	Samtliga	75	0,05
2	Samtliga	0	0,3

Mätmetod 1 med dikväveoxid som spårgas pågick i 2 dygn och strax under 14 timmar, vilket genererade 175 avklingningskurvor. Av de genererade avklingningskurvorna hade 64 stycken, eller 37 %, en förklaringsgrad R^2 med negativt tecken, vilket innebär att den ligger utanför det intervall mellan 0 och 1 den bör hamna i. Dessa avvikande värden sammanfaller i sju fall med omsättningar med negativt tecken vilket kan tolkas som en ej

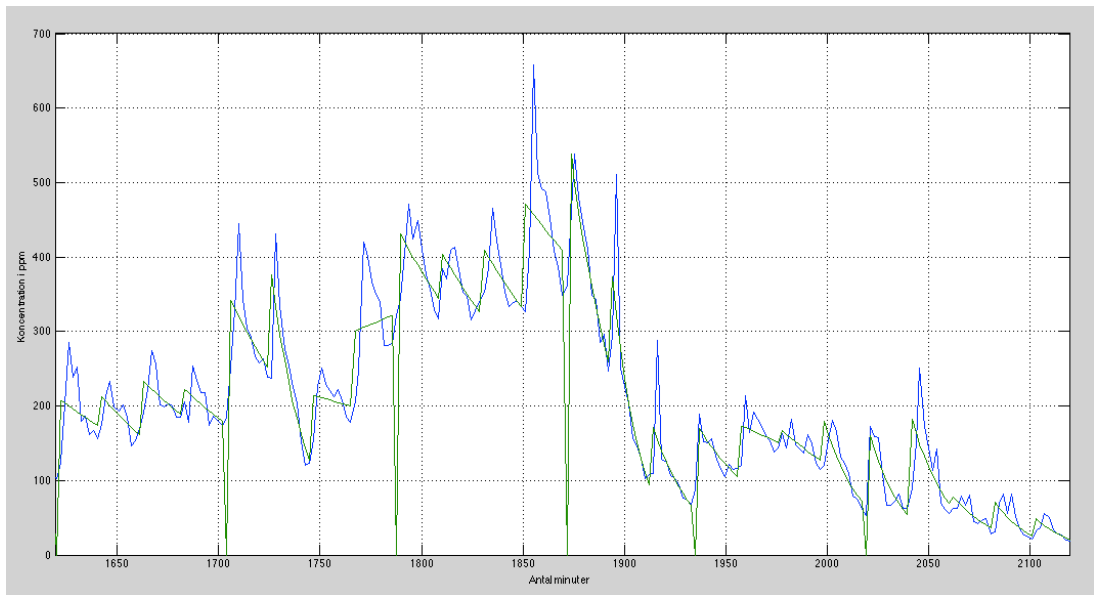
fungerande anpassning av modellen, men i de flesta fall är även omsättningen positiv när förklaringsgraden är det. De omsättningar som genererats med negativt tecken återfinns däremot i samma antal som antalet korrelationskoefficienter r , totalt 30 stycken, vilket motsvarar 17 %.

Hela mätningens utseende framgår av Figur 10 där tydliga variationer i spårgaskoncentrationen är synliga. Den blå kurvan motsvarar medelvärdet av de fyra mätkanalerna medan den gröna motsvarar anpassningen som gjorts i VindAnalys1.



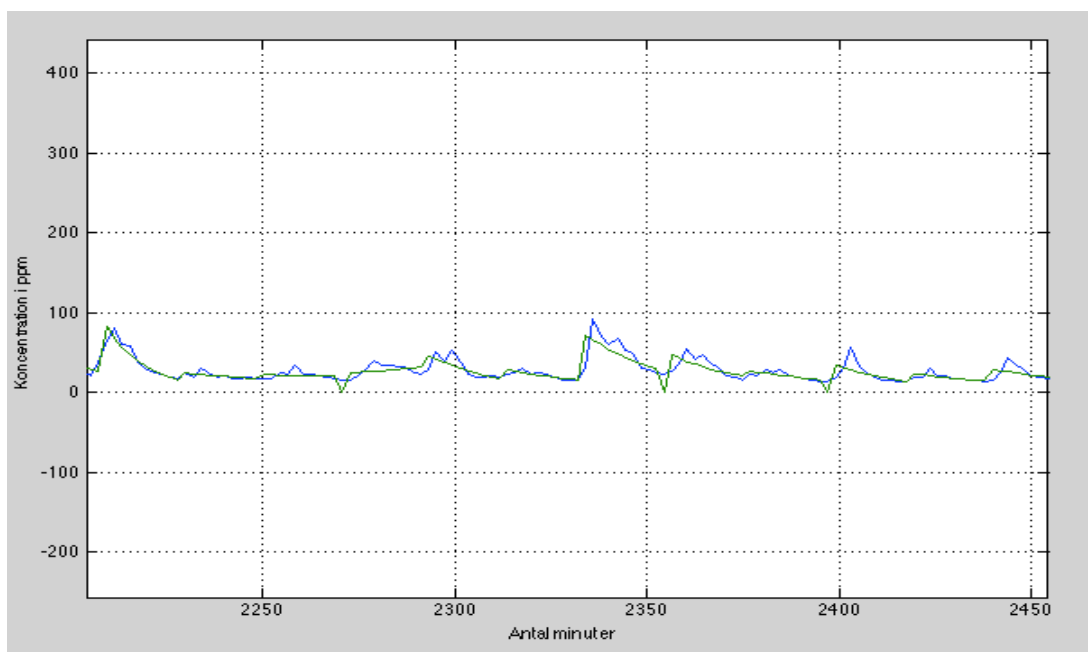
Figur 10. Graf över resultatet ifrån mätmetod 1 samt anpassningen ifrån VindAnalys1..

Som Figur 10 visar är variationerna i spårgaskoncentrationen stora sett till hela mätningens längd. En närmare granskning av den del av mätningen där koncentrationen är som högst, kurvorna som uppstår mellan tiderna 1600 till 2100 minuter enligt Figur 11 nedan, visar på relativt dåliga anpassningar till mätvärdena och endast ett fåtal tydliga avklingningskurvor av den form som förväntas.



Figur 11. Detaljvy ifrån mätmetod 1, avklingningskurvor vid tiden 1600 – 2100 minuter.

Av kurvorna i Figur 11 har alla utom de två sista, strax innan tiden 2100 minuter, negativa värden på förklaringsgraden och ett flertal har relativt låga värden på korrelationskoefficienten. I jämförelse med nämnda kurvor har kurvorna mellan tiderna 2200 - 2250 som visas i Figur 12 allihop förklaringsgrader nära 1, men en grafisk granskning visar att kurvorna inte ger några relevanta värden på luftomsättningen trots detta. Tolkningen av mätresultaten bör alltså inte enbart baseras på de framräknade parametrarna utan även på den grafiska framställningen av mätningen. Detta bekräftar även av värdena på residualvariansen och logerror för kurvorna i Figur 12 då dessa värden är förhållandevis höga vilket antyder en god anpassning, medan de nämnda kurvornas utseende indikerar annorlunda då de är nästan helt flacka.

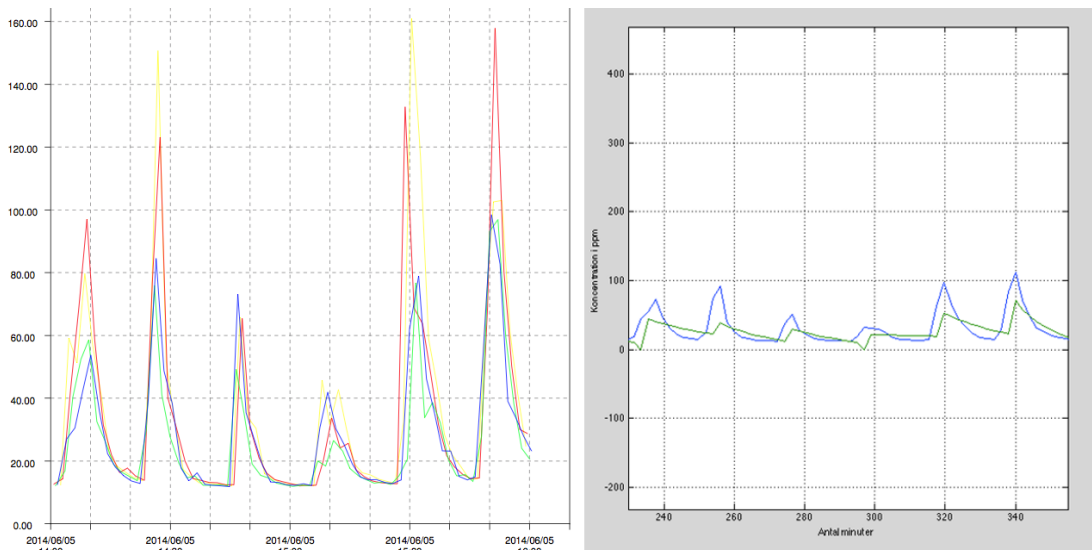


Figur 12. Detaljvy ifrån mätmetod 1, avklingningskurvor vid tiden 2200 – 2450 minuter.

Gällande konfidensintervallen för C respektive n förefaller de följa övriga parametrar då de kurvor som ger sämre anpassningar oftast får större intervall för både C och n . För C ligger gränserna för intervallet vid goda anpassningar, till exempel kurvorna runt 1900 minuter samt 2229 minuter, mellan ungefär 0,05 och 0,1 ppm upp respektive ner. För samma kurvor varierar n med mellan 3 och 9 oms/h åt vardera håll. Även variansen för C respektive n följer detta mönster, med lägre värden för kurvor med goda anpassningar och högre för kurvor med sämre anpassningar, även om det förekommer undantag.

Luftomsättningen för nämnda kurvor med goda anpassningar varierar sig mellan ungefär 2,4 och 5,4 oms/h vilket är ett relativt stort spann, även om värdena anses vara rimliga.

För att undersöka och eventuellt bekräfta huruvida en medelvärdesbildning av mätresultatet ifrån samtliga fyra kanaler är ett adekvat sätt att hantera mätdata visas i Figur 13 nedan samma sex avklingningskurvor direkt ifrån 7620 till vänster och ifrån VindAnalys1 till höger.

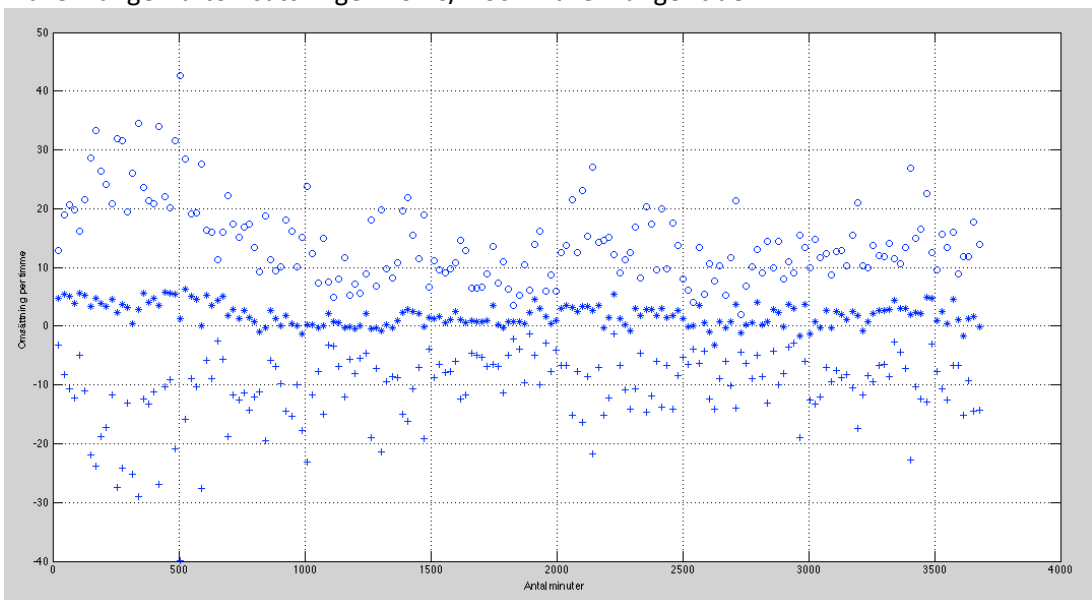


Figur 13. Jämförelse mellan kurvor ifrån 7620 respektive VindAnalysis1.

I figuren framgår tydligt, trots den annorlunda skalningen av y-axeln, att ett medelvärde ger en representativ bild av spårgaskoncentrationen i hela mätutrymmet och inte bara för de aktuella mätpunkterna.

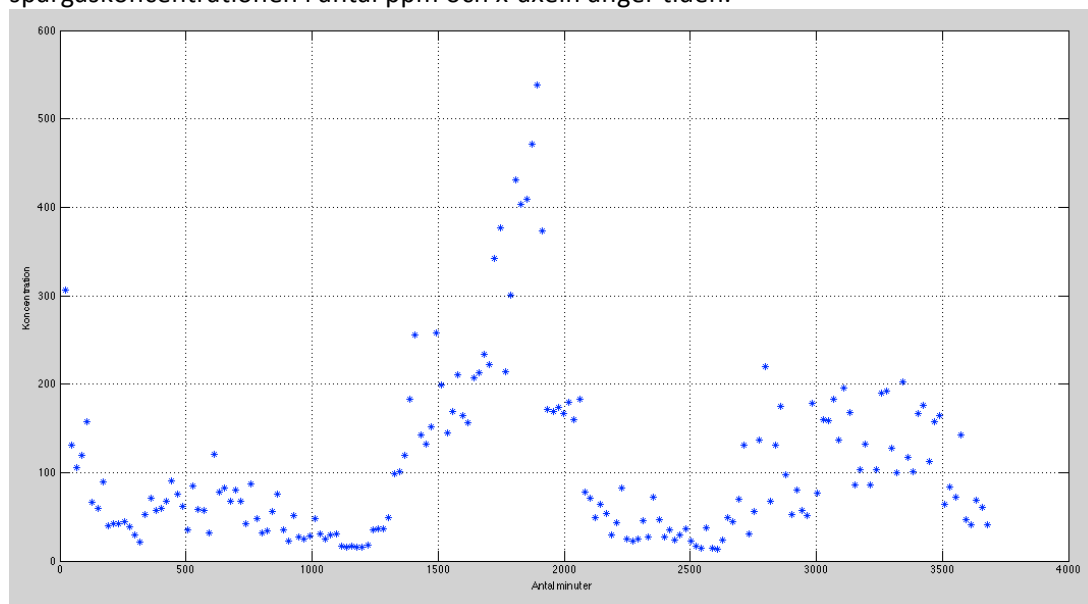
Gällande luftomsättningen n varierar de värden som genererats med positivt tecken mellan 0,0045 och 6,3175 oms/h, varav 50 % av de beräknade värdena ligger mellan 1 och 4,5 oms/h.

Luftomsättningens variation över tiden, samt dess konfidensintervall, framgår av Figur 14. Y-axeln anger luftomsättningen i oms/h och x-axeln anger tiden.



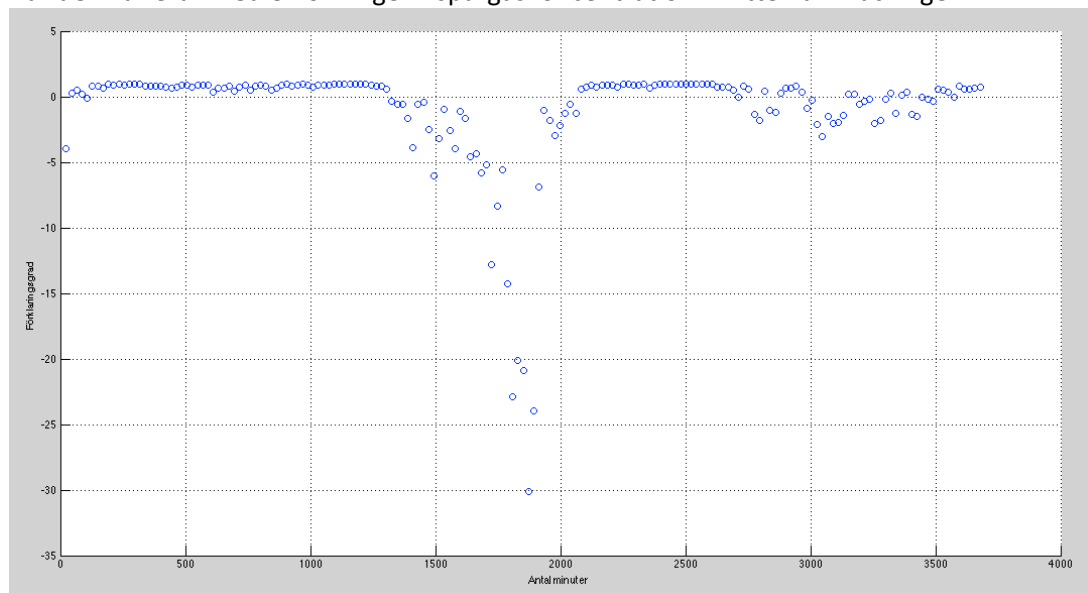
Figur 14. Luftomsättningen n i oms/h som funktion av tiden, där omsättningen markeras med *, konfidensintervallets övre gräns med o och dess undre med +.

Motsvarande graf för koncentrationen C syns i Figur 15, där konfidensintervallen utelämnats då de ligger så pass nära det beräknade värdet på C . Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i antal ppm och x-axeln anger tiden.



Figur 15. Spårgaskoncentrationen C som funktion av tiden, där y-axeln anger antal ppm.

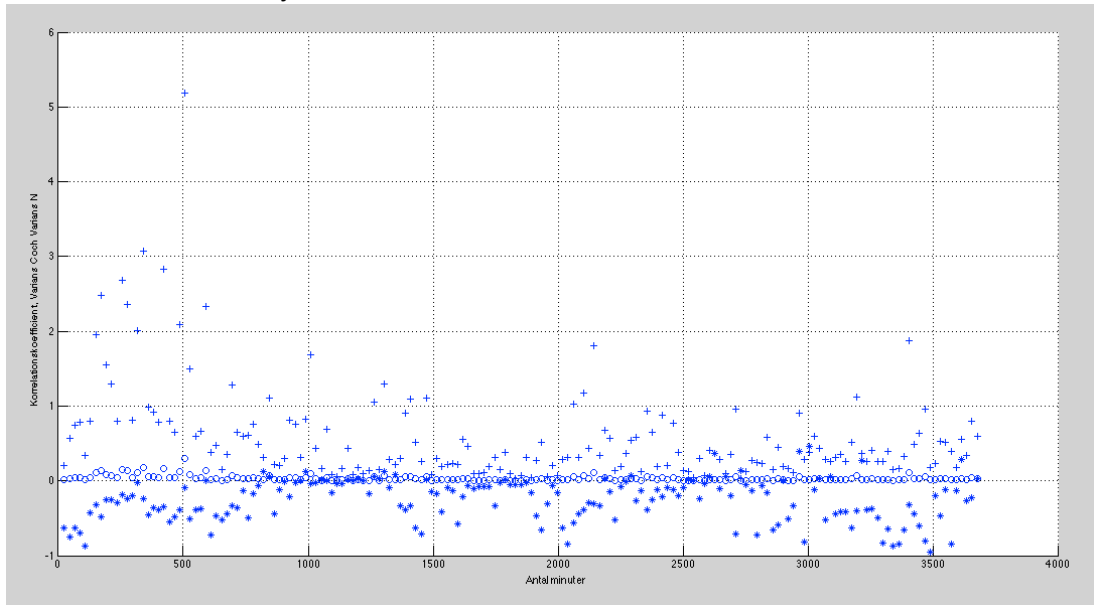
I figur 16 presenteras förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden, där det tydligt framgår hur den varierar med en ökningen i spårgaskoncentration i mitten av mätningen.



Figur 16. Förklaringsgraden som funktion av tiden.

I Figur 17 presenteras hur korrelationskoefficienten r , variansen för C samt variansen för n varierar som funktion av tiden. Större delen av värdena håller sig mellan -1 och 1 vilket är väntat, medan en del får tydligt avvikande värden. Särskilt under mätningens första del kan

en viss instabilitet skönjas med klart avvikande värden.



Figur 17. Korrelationskoefficienten r , markerad med *, variansen för C , markerad med o samt variansen för n , markerad med $+$ och multiplicerad med 10^3 , som funktion av tiden.

5.2 Mätmetod 2

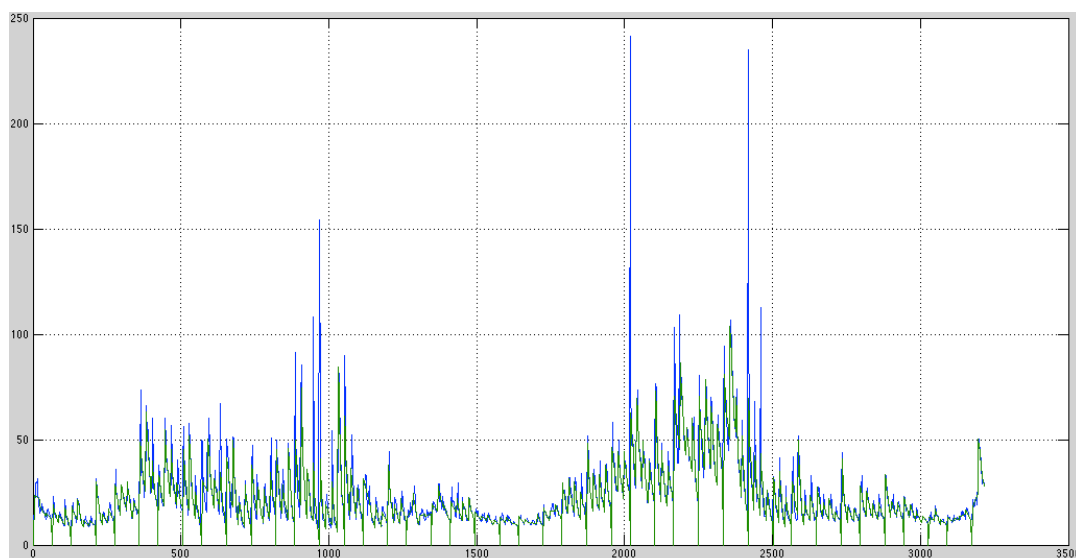
Mätmetod två innebär att spårgas disponeras i en kanal i taget, totalt genom tre stycken slangar på grund av begränsningen i 7620, medan mätning sker kontinuerligt i samtliga fyra aktiva kanaler. Inställningar som gjorts i 7620 anges i tabellen nedan.

Tabell 3. Inställningar i 7620 för mätmetod 2.

Dos	Kanal	Dosprocent [%]	Dostid [h]
1	2	75	0,05
2	Samtliga	0	0,3
3	3	75	0,05
4	Samtliga	0	0,3
5	4	75	0,05
6	Samtliga	0	0,3

Mätmetod 2 med dikväveoxid som spårgas pågick i 2 dygn och strax under 6 timmar, vilket genererade 153 avklingningskurvor. Anledningen till det lägre antalet avklingningskurvor jämfört med övriga mätningar beror på att monitorn av någon anledning tappade kontakten med den övriga utrustningen vilket medförde att mätningen avbröts i förtid. Av de genererade avklingningskurvorna hade 55 stycken, eller 36 %, en förklaringsgrad med negativt tecken. Av dessa är det dock inga som sammanfaller med en omsättning n med negativt tecken. De omsättningar som genererats med negativt tecken återfinns däremot i samma antal som antalet korrelationskoefficienter r med positivt tecken, totalt 6 stycken vilket motsvarar 3,9 %.

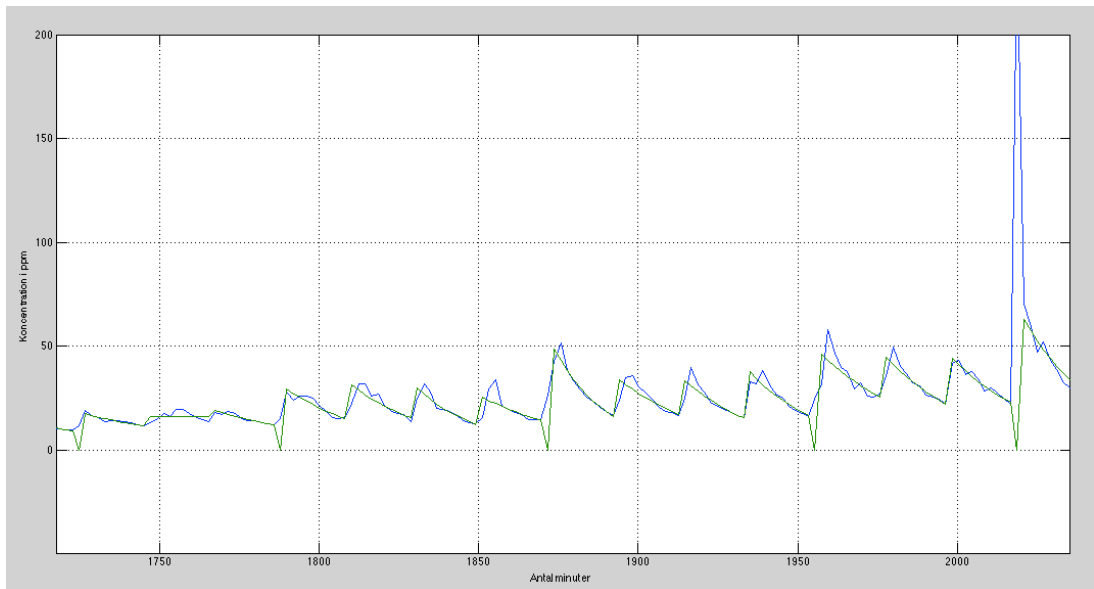
Hela mätningens utseende framgår av Figur 18 där tydliga variationer i spårgaskoncentrationen är synliga. Den blå kurvan motsvarar medelvärdet av de fyra mätkanalerna medan den gröna motsvarar anpassningen som gjorts i VindAnalys1.



Figur 18. Graf över resultatet ifrån mätmetod 2 samt anpassningen ifrån VindAnalys1.

Denna graf säger dock inte något mer än det generella utseendet och större variationer under mätningen. De delar av mätningen med högre spårgaskoncentrationer, från ungefär 400 minuter till ungefär 1100 minuter samt från ungefär 2000 minuter till ungefär 2400, inträffar nattetid. Då mätningar av väderrelaterade parametrar ej har utförts görs ingen utförlig utvärdering av detta mer än att det noteras. En jämförelse med timvärden för vindhastigheten i Sturup, erhållna ifrån Petter Wallentén, visar dock att vindhastigheten sjunker i samband med att koncentrationen ökar, för att sedan minska igen i samband med att vindhastigheten ökar. Korrelationen är inte lika tydlig under den andra natten, men vindhastigheten ökade under några timmar på eftermiddagen. Detta ska inte tolkas som ett direkt samband, dels då Sturup och Lund inte har precis samma vindförutsättningar och dels eftersom vindens påverkan inte är klarlagd, men det ger en fingervisning om att ett samband kan finnas.

För att bedöma mätningens kvalitet krävs en noggrannare granskning av enskilda avsnitt i mätserien, varför ett antal sådana har utförts.



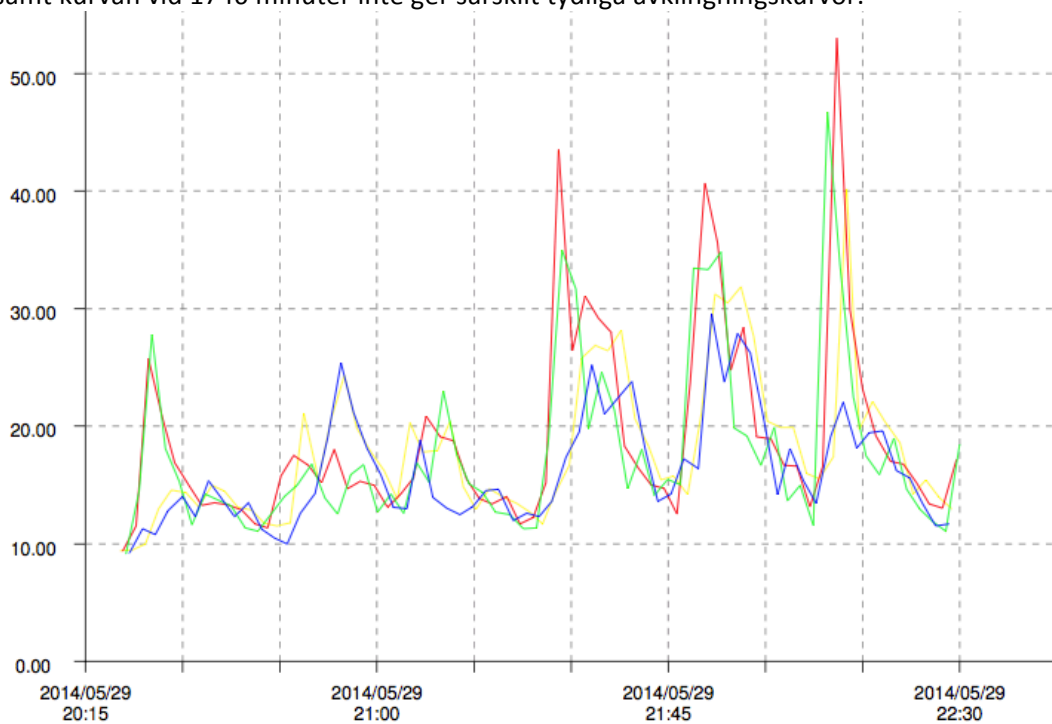
Figur 19. Detaljvy ifrån mätmetod 2, avklingningskurvor vid tiden 1720 – 2040 minuter.

I figur 19 framgår tydligt att kurvorna precis före och efter tiden 1750 minuter inte har det utseende som är önskvärt för en avklingningskurva, medan de efterföljande kurvorna har både ett korrekt utseende och vad som ser ut att vara relativt goda anpassningar. Grafens utseende svarar väl mot de framräknade parametrarna ifrån VindAnalys1, då kurvan vid 1746 minuter, som är nästan helt flack, har en beräknad luftomsättning på $-0,018$ oms/h, so dessutom är negativt, och en låg korrelationskoefficient på endast 0,0043. Även residualvariansen, logerror samt variansen för n respektive C är högre än för de flesta efterföljande kurvorna. De kurvor i grafen med högst absolutvärde på korrelationskoefficienten genereras vid tiderna 1872, 1914 respektive 1935 minuter. Samtliga av dessa kurvor har även relativt låga värden på residualvariansen, logerror samt variansen för n respektive C , vilket talar för en god anpassning. Omsättningen för dessa tre kurvor är beräknad till 3,58, 2,54 respektive 2,7 oms/h vilket bedöms som rimliga värden. Gällande konfidensintervallen för n respektive C är värdena för dessa inte utmärkande för nämnda kurvor, då de håller sig i samma storleksordning genom hela mätningen.

Gällande konfidensintervallen för C respektive n förefaller de även för mätmetod 2 följa övriga parametrar då de kurvor som ger sämre anpassningar oftast får större intervall för både C och n , men inte alltid. För C ligger gränserna för intervallet vid goda anpassningar, till exempel kurvorna vid 1872 och 1914 minuter, mellan ungefär 0,03 och 0,05 ppm upp respektive ner. För samma kurvor varierar n med mellan 3 och 7 oms/h åt vardera håll. För kurva 1746, som anses vara en dålig anpassning, är dock inte intervallen påtagligt större varför konfidensintervallen inte förefaller kunna utgöra ett ensamt bedömningsunderlag.

En vidare granskning av kurvorna vid tiden 1720 – 1830 minuter i 7620 visar att det även kan vara till nackdel att göra medelvärdesbildningar av mätdata ifrån samtliga kanaler då det gör att viss data går förlorad. I Figur 20 framgår tydligt att kanal 3 och 4, röd respektive grön kurva, genererar avklingningskurvor med adekvat utseende för kurvorna vid 1724

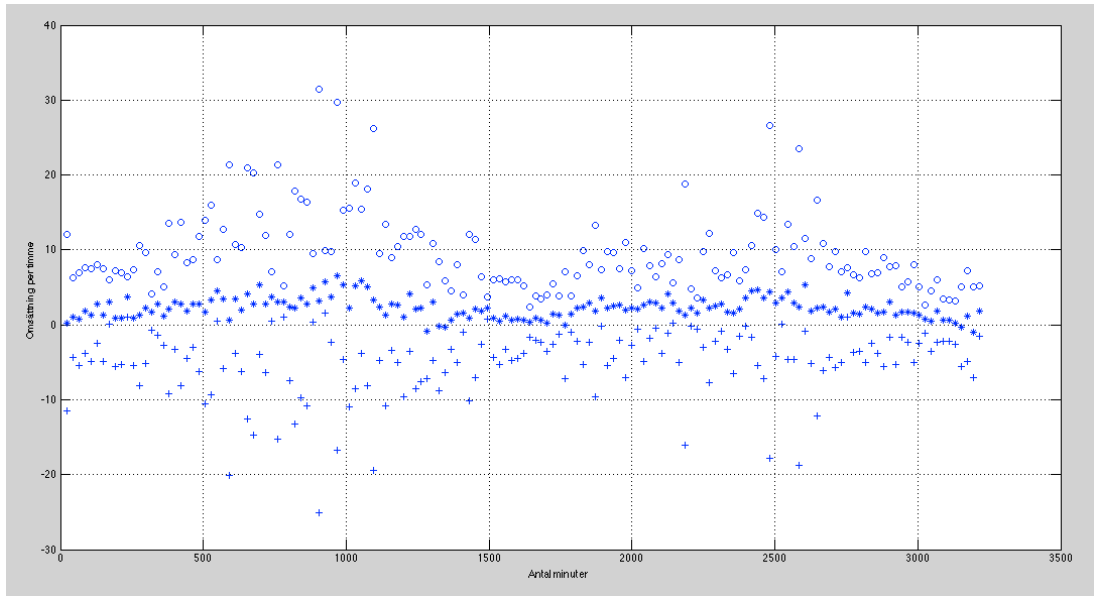
respektive och 1767 minuter, det vill säga den första och tredje i figuren. Dessa går dock förlorade i medelvärdesbildningen på grund av att övriga kanaler som för samma kurvor samt kurvan vid 1746 minuter inte ger särskilt tydliga avklingningskurvor.



Figur 20. Detaljvy av kurvorna vid tiden 1720 - 1830 ifrån 7620.

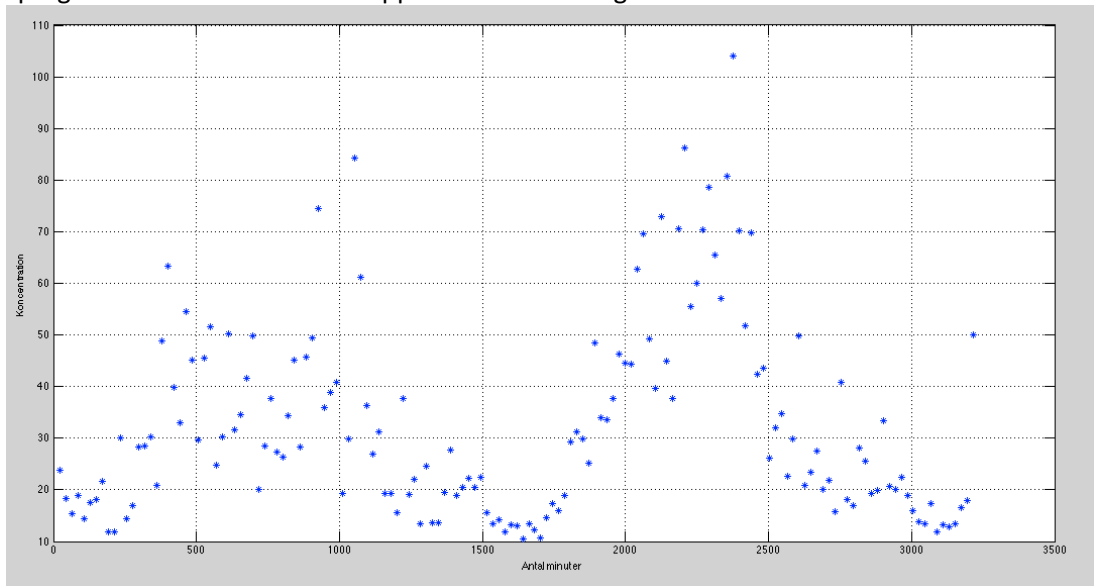
Gällande luftomsättningen n varierar de värden som genererats med negativt tecken mellan 0,2083 och 6,5163 oms/h, varav 74 % av de beräknade värdena ligger mellan 1 och 4,5 oms/h.

Luftomsättningens variation över tiden, samt dess konfidensintervall, framgår av Figur 21. Y-axeln anger luftomsättningen i oms/h och x-axeln anger tiden.



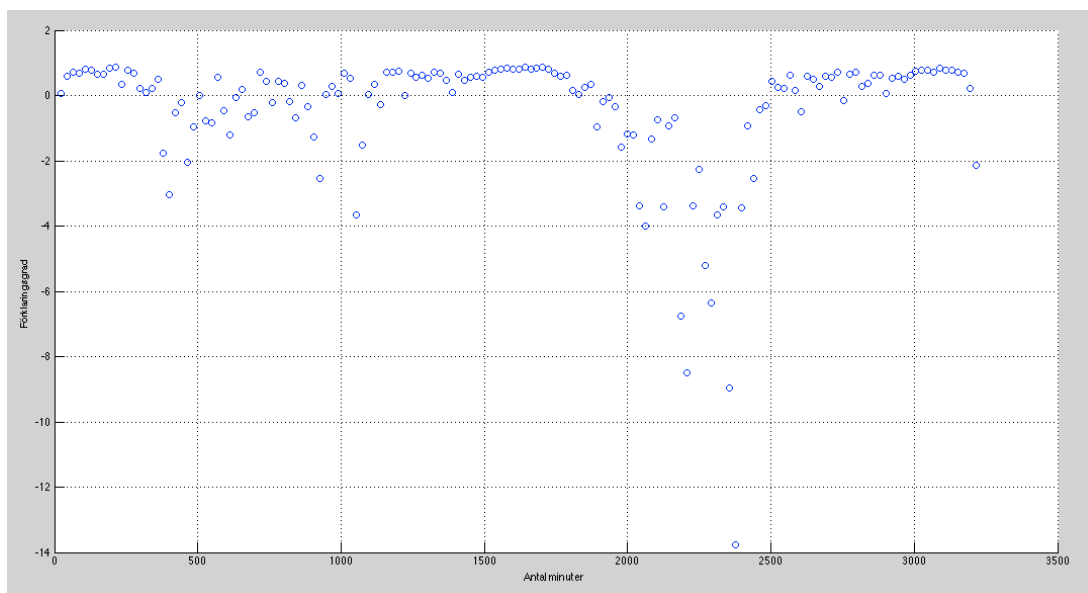
Figur 21. Luftomsättningen n i oms/h som funktion av tiden, där omsättningen markeras med *, konfidensintervallets övre gräns med o och dess undre med +.

Motsvarande graf för koncentrationen C syns i Figur 22, där konfidensintervallen utelämnats då de ligger så pass nära det beräknade värdet på C . Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i antal ppm och x-axeln anger tiden.



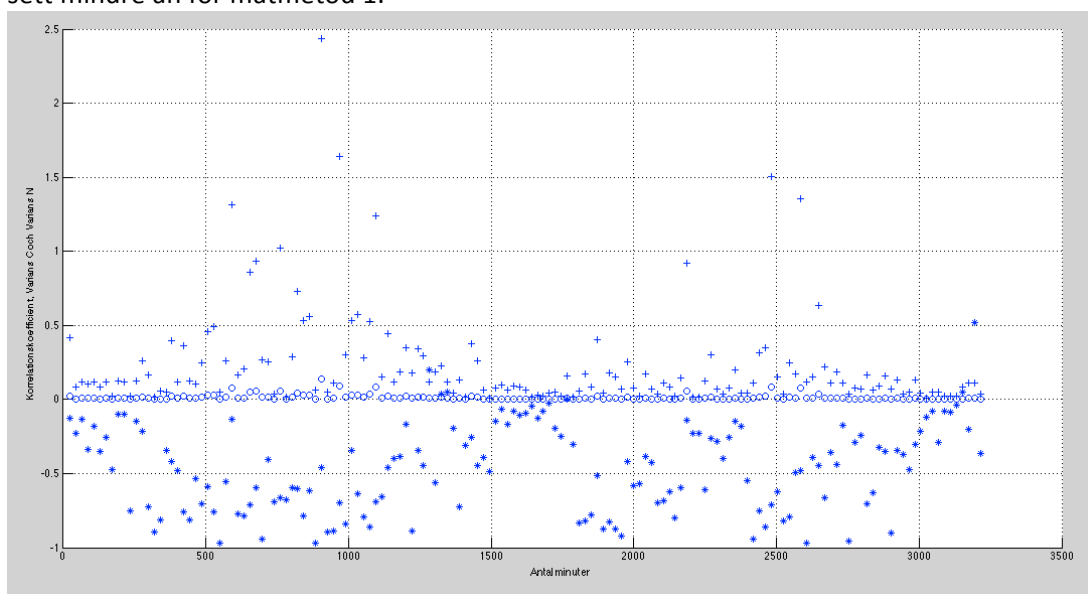
Figur 22. Spårgaskoncentrationen C som funktion av tiden, där y-axeln anger antal ppm.

I figur 23 presenteras förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden, där det tydligt framgår hur den varierar med en ökningen i spårgaskoncentration i början av mätningen, och i ytterligare större utsträckning strax efter halva mätningen.



Figur 23. Förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden.

I Figur 24 presenteras hur korrelationskoefficienten r , variansen för C samt variansen för n varierar som funktion av tiden. Större delen av värdena håller sig mellan -1 och 1 vilket är väntat, medan en del får tydligt avvikande värden. De avvikande värdena är dock generellt sett mindre än för mätmetod 1.



Figur 24. Korrelationskoefficienten r , markerad med *, variansen för C , markerad med o samt variansen för n , markerad med $+$ och multiplicerad med 10^3 , som funktion av tiden.

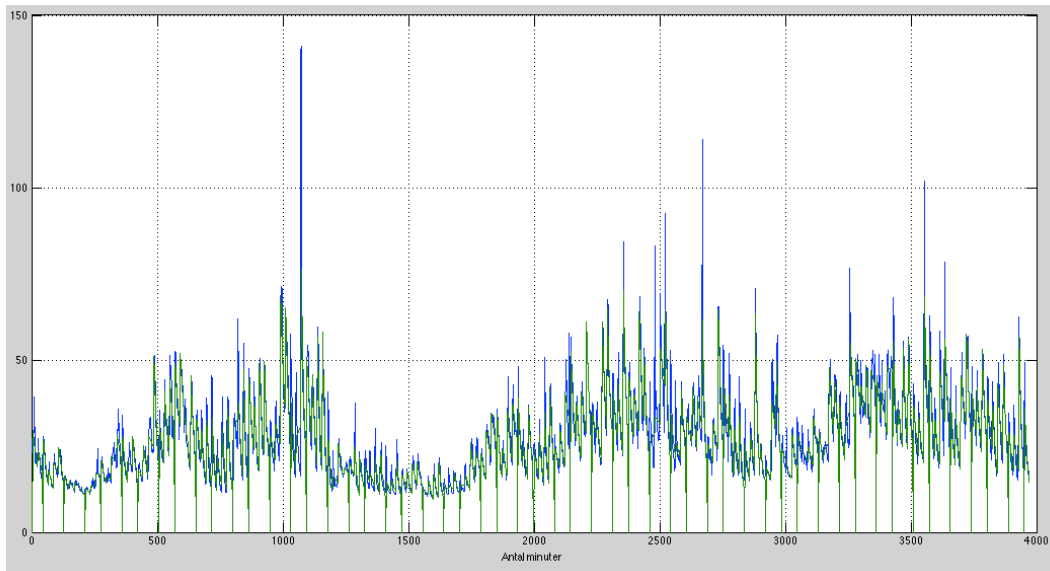
5.3 Mätmetod 3

Mätmetod 3 innebär att disponering av spårgas görs via en enda kanal, men att denna via t-stycken fördelas till fyra disponeringspunkter. Mätning sker kontinuerligt i samtliga fyra aktiva kanaler.

Tabell 4. Inställningar i 7620 för mätmetod 3.

Dos	Kanal	Dosprocent [%]	Dostid [h]
1	2 – förgrenad till fyra punkter	65	0,05
2	Samtliga	0	0,3

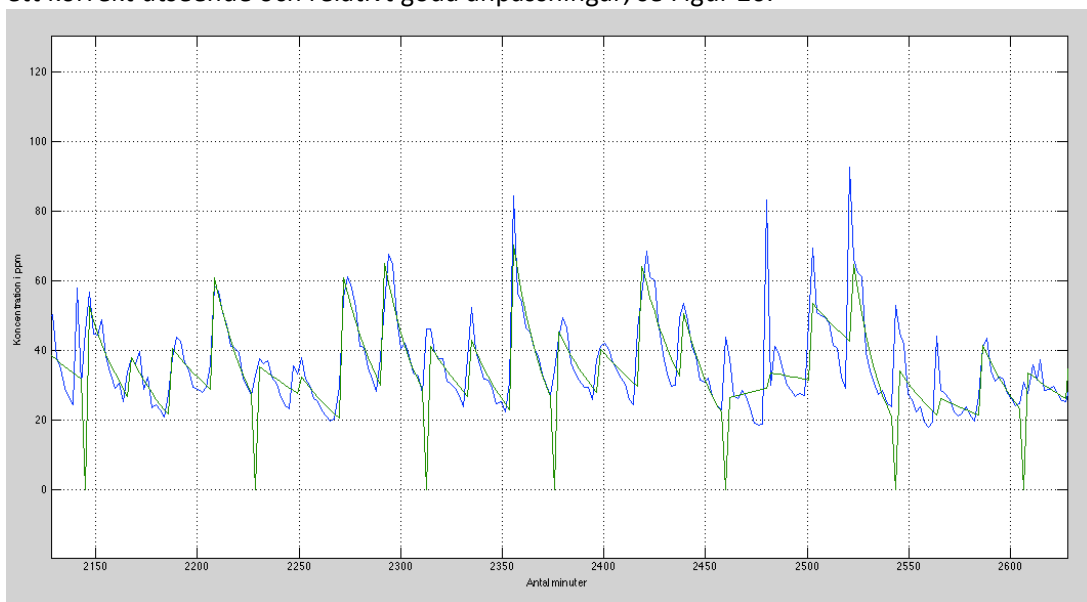
Hela mätningens utseende framgår av Figur 25 där tydliga variationer i spårgaskoncentrationen är synliga, även om det är svårt att koppla dem till variationer över dygnet. Den blå kurvan motsvarar medelvärdet av de fyra mätkanalerna medan den gröna motsvarar anpassningen som gjorts i VindAnalys1.



Figur 25. Graf över resultatet ifrån mätmetod 3 samt anpassningen ifrån VindAnalys1.

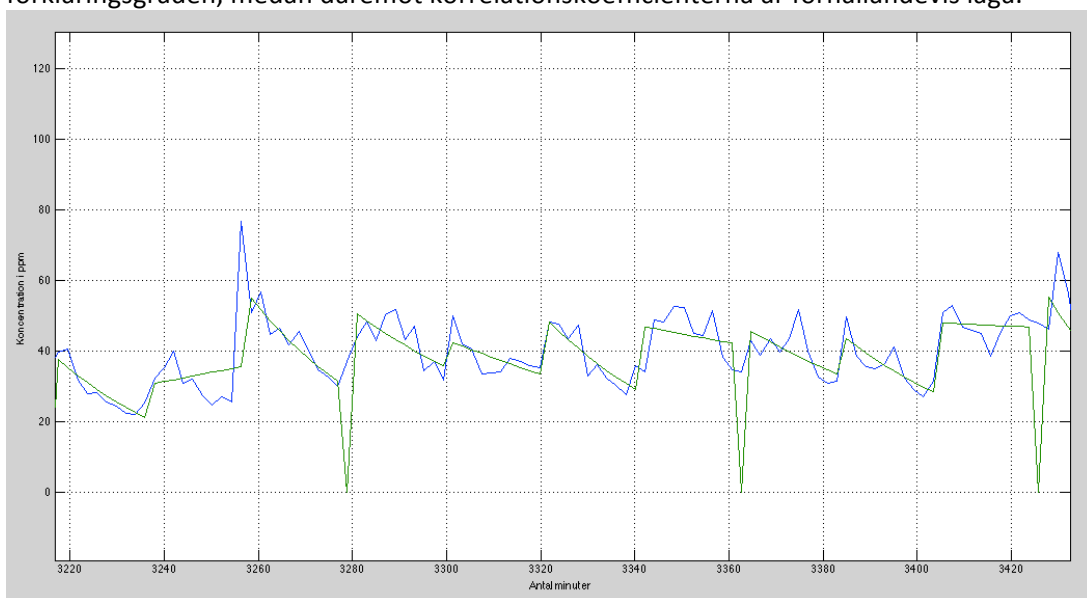
Mätmetod 3 med dikväveoxid som spårgas pågick i 2 dygn och strax över 18 timmar, vilket genererade 189 avklingningskurvor. Av de genererade avklingningskurvorna hade 90 stycken, eller 47 %, en förklaringsgrad med negativt tecken. Av dessa är det 4 stycken som sammanfaller med en omsättning n med negativt tecken. De omsättningar som genererats med negativt tecken återfinns däremot i samma antal som antalet korrelationskoefficienter r med positivt tecken, totalt 6 stycken vilket motsvarar 3,2 %. Antalet negativa värden på förklaringsgraden är högre än för övriga mätmetoder, varför det är aktuellt att undersöka dessa ytterligare. I spannet från och med avklingningskurvorna vid tiden 2124 till och med 2523 minuter är samtliga förklaringsgrader negativa utom en, totalt 19 stycken. En närmare titt på den del av kurvan

där dessa förekommer ger dock en annorlunda bild då de aktuella kurvorna förefaller ha ett korrekt utseende och relativt goda anpassningar, se Figur 26.



Figur 26. Detaljvy ifrån mätmetod 3, avklingningskurvor vid tiden 2124 – 2523 minuter.

Korrelationskoefficienterna för de nämnda kurvorna avviker inte nämnvärt ifrån övriga, och inte heller varianserna för varken n eller C utmärker sig särskilt. Detta kan i viss mån tolkas som att förklaringsgraden i den aktuella tillämpningen inte ger ett adekvat mått på anpassningens kvalitet, samtidigt som en negativ förklaringsgrad sammanfaller med sämre kurvor i flera fall. Exempel på detta är kurvorna vid tiden 3216 – 3405 minuter, se bild nedan, som inte avviker utöver kurvorna beskrivna ovan i fråga om värden på förklaringsgraden, medan däremot korrelationskoefficienterna är förhållandevis låga.

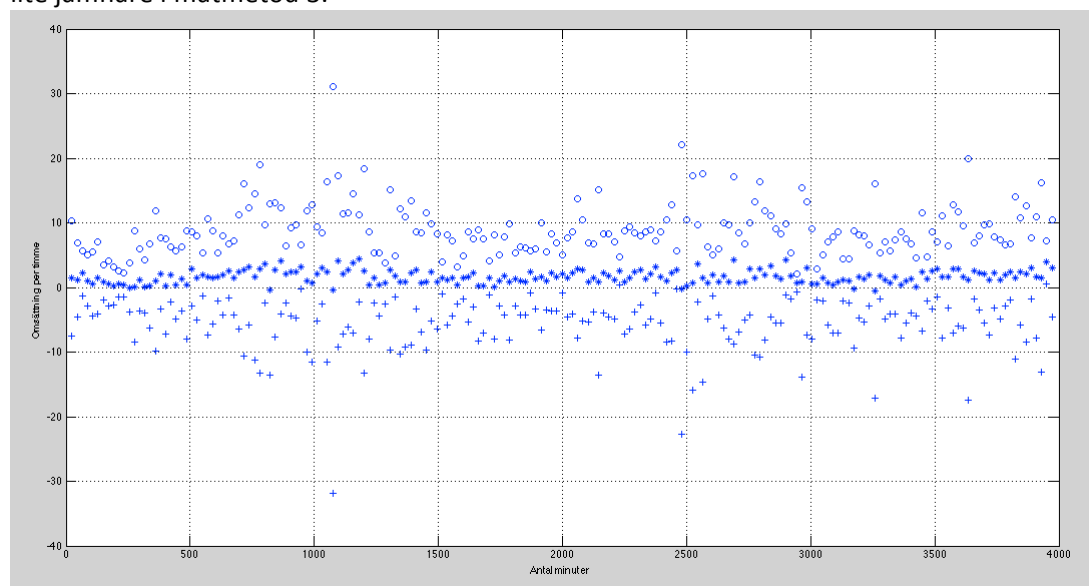


Figur 27. Detaljvy ifrån mätmetod 3, avklingningskurvor vid tiden 3216 – 3405 minuter.

Gällande konfidensintervallen för C respektive n förefaller de även i mätmetod 3 följa övriga parametrar då de kurvor som ger sämre anpassningar oftast får större intervall för både C och n , men inte alltid. För C ligger gränserna för intervallet vid goda anpassningar, till exempel kurvorna vid 2271 och 2292 minuter, runt ungefär 0,03 och 0,05 ppm upp respektive ner. För samma kurvor varierar n med mellan 5 och 6 oms/h åt vardera håll. Även variansen för C respektive n följer detta mönster, med lägre värden för kurvor med goda anpassningar och högre för kurvor med sämre anpassningar, även om det förekommer undantag. Till exempel har kurvan vid 2460 en markant högre varians för C än för övriga i Figur 26, vilket bekräftas av att den förefaller ha en sämre anpassning enligt grafen.

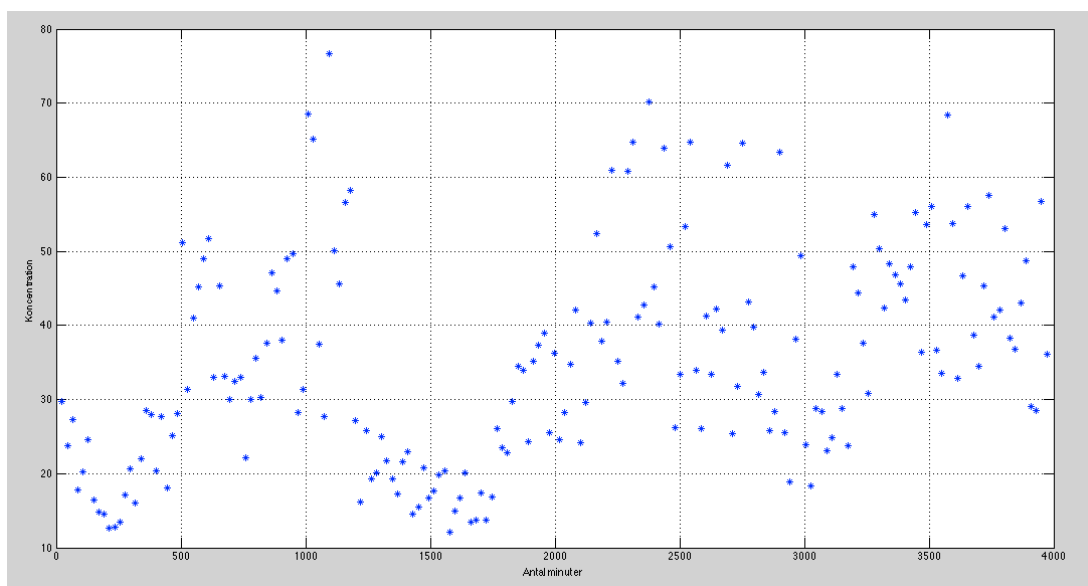
Gällande luftomsättningen n varierar de värden som genererats med positivt tecken mellan 0,0347 och 4,4712 oms/h, varav 71 % av de beräknade värdena ligger mellan 1 och 4,5 oms/h.

Luftomsättningens variation över tiden, samt dess konfidensintervall, framgår av Figur 28. Y-axeln anger luftomsättningen i oms/h och x-axeln anger tiden. I likhet med mätmetod 1 och 2 håller sig luftomsättningen relativt stabil, även om den möjligtvis tenderar att vara lite jämnare i mätmetod 3.



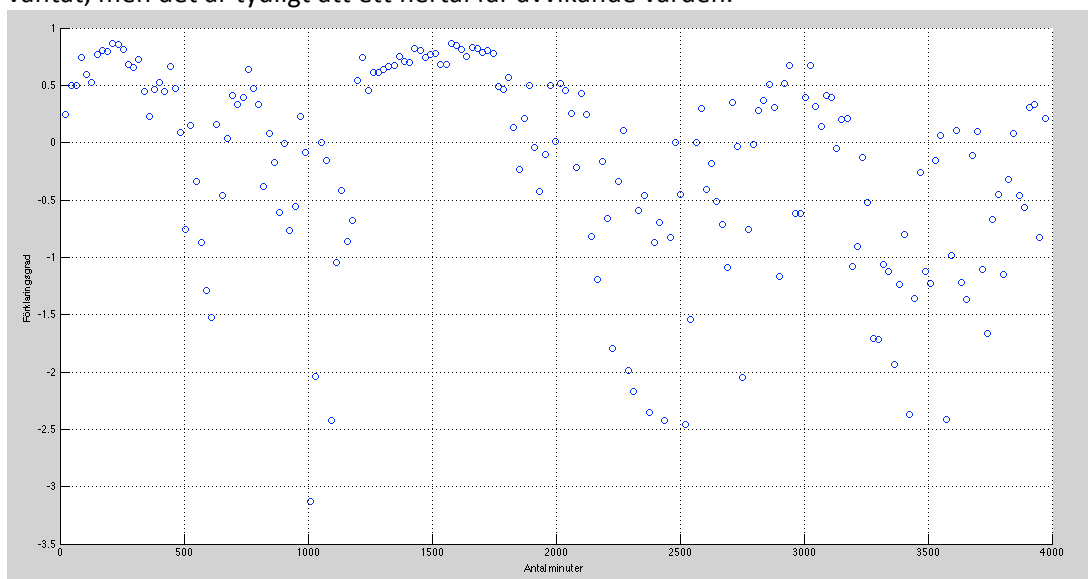
Figur 28. Luftomsättningen n i oms/h som funktion av tiden, där omsättningen markeras med *, konfidensintervallets övre gräns med o och dess undre med +.

Motsvarande graf för koncentrationen C syns i Figur 29, där konfidensintervallen utelämnats då de ligger så pass nära det beräknade värdet på C . Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i antal ppm och x-axeln anger tiden. Här varierar värdena kraftigare än för tidigare mätmetoder, trots att luftomsättningen håller sig relativt jämn.



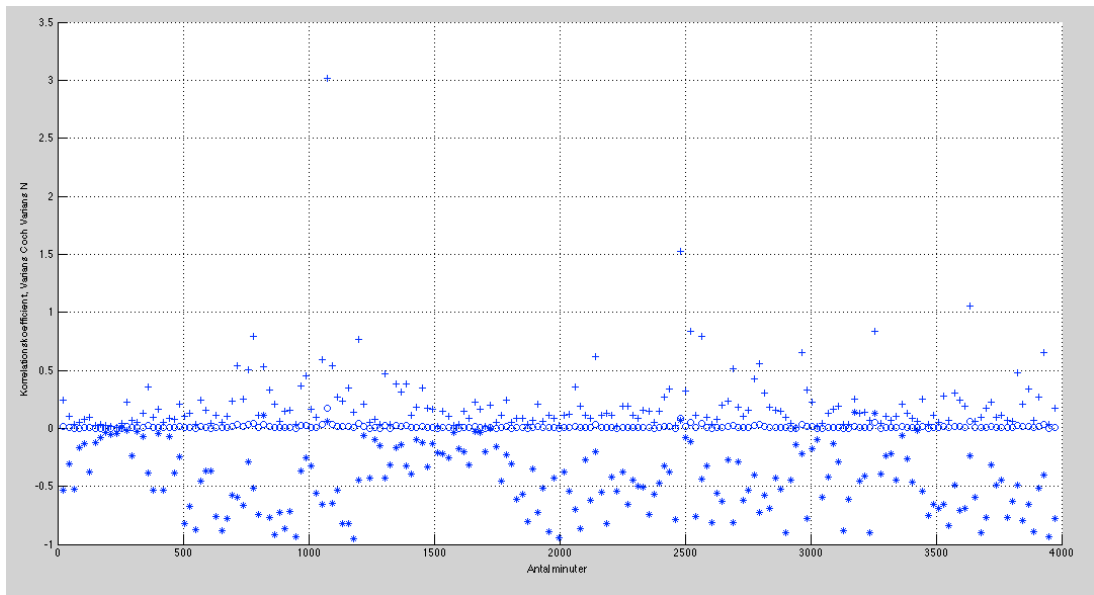
Figur 29. Spårgaskoncentrationen C som funktion av tiden, där y -axeln anger antal ppm.

I figur 30 presenteras förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden, där variationen är stor. Större delen av de beräknade värdena är positiva och håller sig mellan 0,5 och 1 som väntat, men det är tydligt att ett flertal får avvikande värden.



Figur 30. Förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden.

I Figur 31 presenteras hur korrelationskoefficienten r , variansen för C samt variansen för n varierar som funktion av tiden. Större delen av värdena håller sig mellan -1 och 1 vilket är väntat, medan en del får tydligt avvikande värden. De avvikande värdena är dock inte av någon betydande mängd vilket tyder på en generellt sett god anpassning.



Figur 31. Korrelationskoefficienten r , markerad med *, variansen för C , markerad med o samt variansen för n , markerad med $+$ och multiplicerad med 10^3 , som funktion av tiden.

5.4 Mätmetod 2 med byte av spårgas

För att undersöka huruvida en annan typ av spårgas ger ett annorlunda resultat gentemot tidigare mätningar har mätmetod 2, där spårgas disponeras i en kanal i taget och mätning sker kontinuerligt i samtliga fyra aktiva kanaler, även utförts med spårgasen svavelhexafluorid. Mätningen föregicks av tre stycken försöksmätningar för att med de justeringsmöjligheter i 7620 som beskrivs i tabell 1 hitta lämpliga inställningar för användandet av svavelhexafluorid. Mätmetod 2 valdes för mätning med en annorlunda spårgas med motiveringen att den med sin doseringsrutin antas behöva en relativt liten mängd spårgas, vilket ur miljösynpunkt är att föredra.

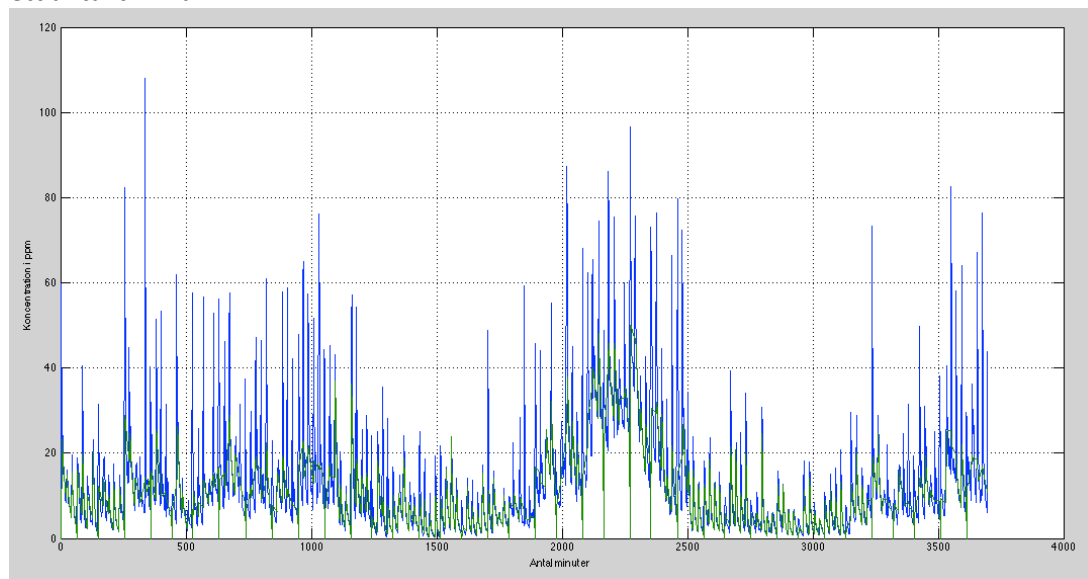
De inställningar som gjorts i 7620 framgår ur tabellen nedan, där den distinkta skillnaden mot mätmetod 2 i kapitel 5.2 är att dosprocenten sänkts till 60 %.

Tabell 5. Inställningar i 7620 för mätmetod 2 med svavelhexafluorid som spårgas.

Dos	Kanal	Dosprocent [%]	Dostid [h]
1	2	60	0,05
2	Samtliga	0	0,3
3	3	60	0,05
4	Samtliga	0	0,3
5	4	60	0,05
6	Samtliga	0	0,3

Hela mätningens utseende framgår av Figur 32 där tydliga variationer i spårgaskoncentrationen är synliga, även om en direkt koppling till variationer över dygnet

inte är helt självklar. Den blå kurvan motsvarar medelvärdet av de fyra mätkanalerna medan den gröna motsvarar anpassningen som gjorts i VindAnalyt1. En ökning i spårgaskoncentration strax innan tiden 2000 minuter vilket sammanfaller med att vindhastigheten i Sturup, enligt samma data som tidigare nämnts, avtar ner till noll under ett antal timmar.

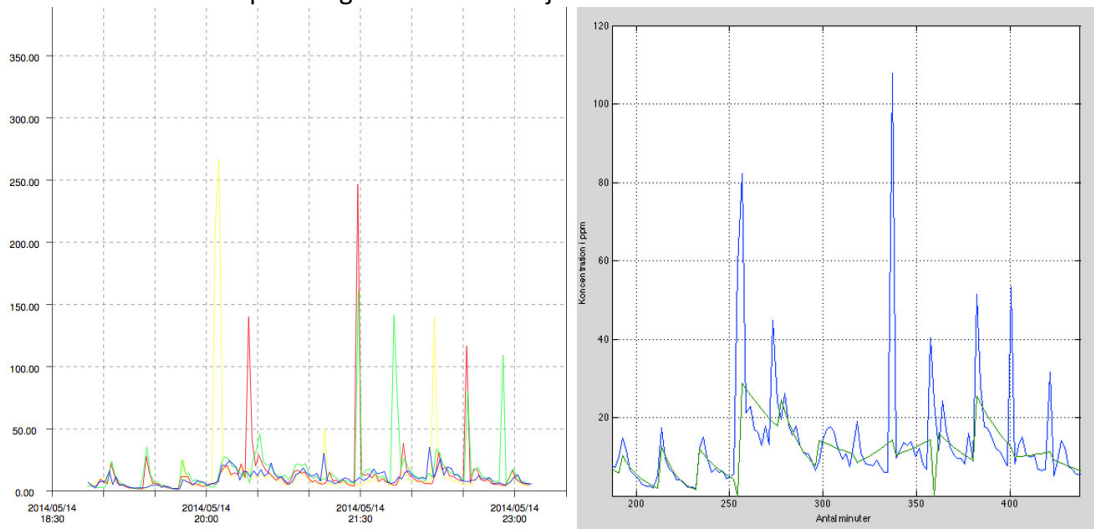


Figur 32. Graf över resultatet ifrån mätmetod 2 med byte av spårgas samt anpassningen ifrån VindAnalyt1.

Mätmetod två med svavelhexafluorid som spårgas pågick i 2 dygn och knappt 14 timmar och genererade 176 stycken avklingningskurvor. Av dessa hade 56 stycken, eller 32 %, en förklaringsgrad R^2 med negativt tecken, vilket innebär att den ligger utanför det intervall mellan 0 och 1 som den bör hamna i. Dessa avvikande värden sammanfaller i 15 fall med omsättningar med negativt tecken vilket kan tolkas som en ej fungerande anpassning av modellen, men i de flesta fall är även omsättningen positiv när förklaringsgraden är det. Däremot sammanfaller en positiv korrelationskoefficient r i samtliga fall, totalt 30 stycken eller 17 % av kurvorna, med en negativ omsättning. Detta är rimligt med hänsyn till att de båda variabelernas tecken anger lutningen på kurvan.

Mätmetod 2 med svavelhexafluorid som spårgas är den metod som ger lägst toppar i spårgaskoncentrationen, endast en går över 100 [ppm], men det är också den mätmetod som ger absolut flest antal tydliga toppar. En närmare granskning av kurvorna visar dock att de flesta toppar orsakas av att spårgaskoncentrationen är markant högre i en enstaka mätkanal och inte i mätutrymmet som helhet, vilket gör att medelvärdesbildningen av de fyra mätkanalerna i viss mån döljer det faktiska utseendet. En jämförelse mellan grafen ifrån 7620 och VindAnalyt1 för kurvorna vid tiden 192 – 402 minuter finns i Figur 33 nedan. Bilden visar också att anpassningen tenderar att bli sämre för de avklingningskurvor som börjar med en distinkt topp, då kurvorna vid 192, 213 och 234 minuter genererar bra anpassningar medan övriga blir betydligt sämre. Detta återspeglas även i förklaringsgraden R^2 som är högre för de tre första och lägre eller negativ för de efterföljande, samt

korrelationskoefficienten r och logerror som båda pekar åt att kurvorna vid 192 – 234 minuter är bättre anpassningar än de efterföljande kurvorna.

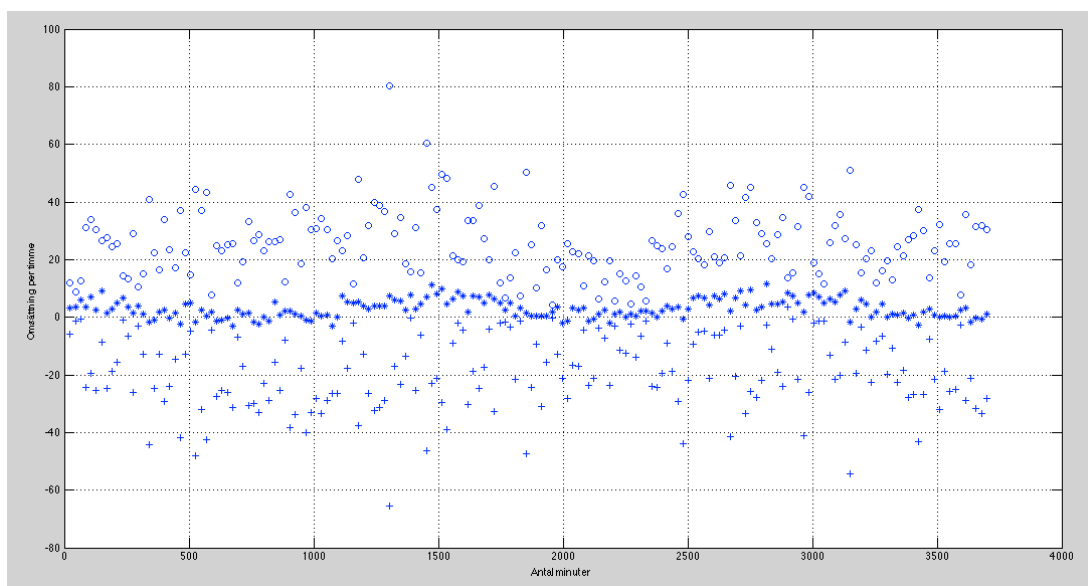


Figur 33. Detaljvy ifrån mätmetod 2 med byte av spårgas, avklingningskurvor vid tiden 192 – 402 minuter ifrån 7620 respektive VindAnalysis1.

Gällande konfidensintervallen för C respektive n förefaller de även i mätmetod 2 med svavelhexafluorid som spårgas följa övriga parametrar då de kurvor som ger sämre anpassningar oftast får större intervall för både C och n , men i kurvorna som syns i Figur 33 förefaller detta stämma sämre. För C ligger gränserna för intervallet vid goda anpassningar, till exempel kurvorna vid 192 och 213 minuter, runt ungefär 0,16 och 0,06 ppm upp respektive ner vilket är relativt högt. För kurvan vid 192 minuter varierar n med så mycket som 20 oms/h åt vardera håll, medan motsvarande för kurvan vid 213 minuter är ungefär 7 oms/h. Vidare är intervallet för n för kurvor med sämre anpassningar, till exempel kurvorna vid 255 och 381 minuter, betydligt högre med gränser runt 25 oms/h upp respektive ner. Överlag förefaller mätmetod 2 med byte av spårgas vara behäftad med större osäkerheter än övriga mätningar.

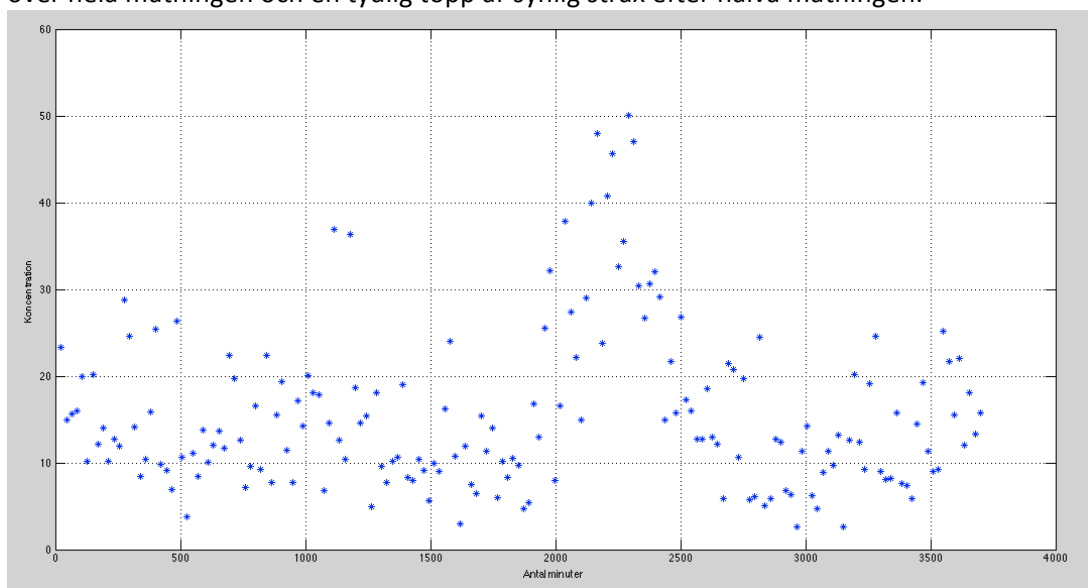
Gällande luftomsättningen n varierar de värden som genererats med positivt tecken mellan 0,033 och 11,4635 oms/h, varav endast 37,5 % av de beräknade värdena ligger mellan 1 och 4,5 oms/h.

Luftomsättningens variation över tiden, samt dess konfidensintervall, framgår av Figur 34. Y-axeln anger luftomsättningen i oms/h och x-axeln anger tiden. Luftomsättningen förefaller variera något mer i mätmetod 2 med byte av spårgas än för tidigare mätmetoder.



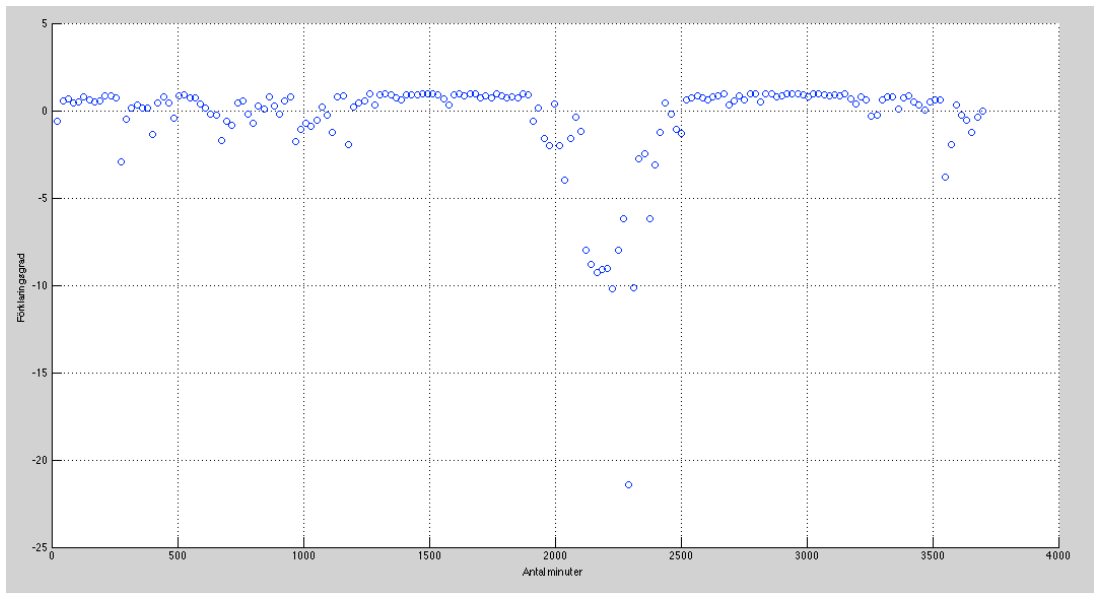
Figur 34. Luftomsättningen n i oms/h som funktion av tiden, där omsättningen markeras med *, konfidensintervallets övre gräns med o och dess undre med +.

Motsvarande graf för koncentrationen C syns i Figur 35, där konfidensintervallen utelämnats då de ligger så pass nära det beräknade värdet på C . Y-axeln anger spårgaskoncentrationen i antal ppm och x-axeln anger tiden. Koncentrationen varierar över hela mätningen och en tydlig topp är synlig strax efter halva mätningen.



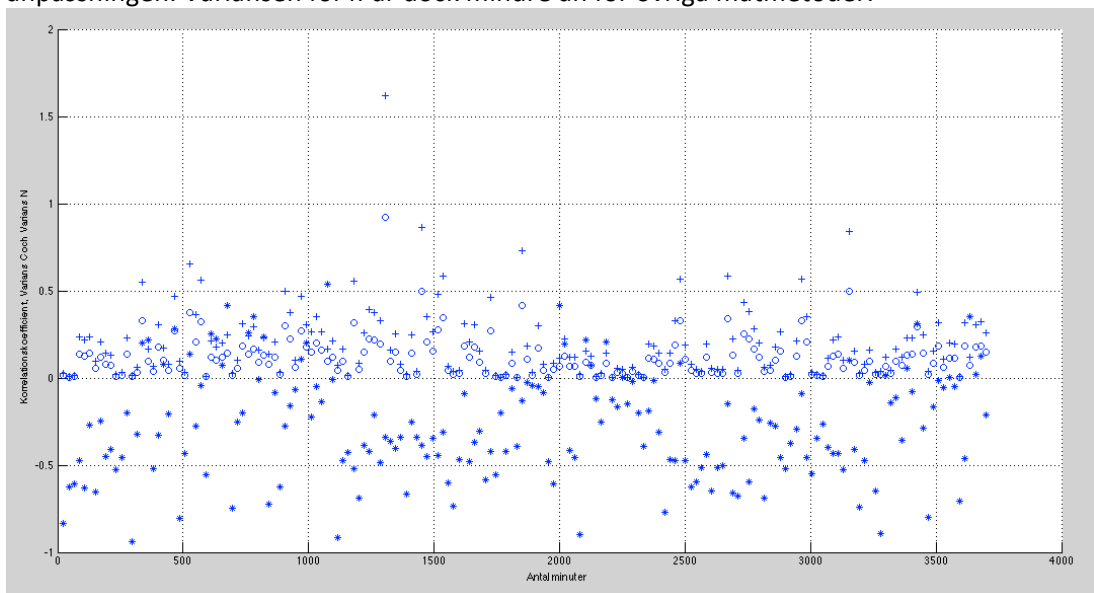
Figur 35. Spårgaskoncentrationen C som funktion av tiden, där y-axeln anger antal ppm.

I figur 36 presenteras förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden. Större delen av de beräknade värdena är positiva och håller sig mellan 0,5 och 1 som väntat, med ett antal tydligt avvikande värden strax efter halva mätningen.



Figur 36. Förklaringsgraden R^2 som funktion av tiden.

I Figur 37 presenteras hur korrelationskoefficienten r , variansen för C samt variansen för n varierar som funktion av tiden. Större delen av värdena håller sig mellan -1 och 1 vilket är väntat, medan en del får tydligt avvikande värden. De avvikande värdena är dock generellt sett mindre än för mätmetod 1. Variansen för C varierar markant mer i mätmetod 2 med byte av spårgas än vid övriga mätmetoder vilket tyder på en större osäkerhet i anpassningen. Variansen för n är dock mindre än för övriga mätmetoder.



Figur 37. Korrelationskoefficienten r , markerad med *, variansen för C , markerad med o samt variansen för n , markerad med $+$ och multiplicerad med 10^4 , som funktion av tiden.

5.5 Sammanfattning av mätresultat

För samtliga tre metoder förefaller mätningen ha fungerat och gett resultat som kan anses vara rimliga och användbara i olika utsträckning. Resultaten skiljer sig inte markant åt utan är förhållandevis likartade för de tre metoderna.

I samtliga mätningar har någon form av brus förekommit i olika stor utsträckning, vilket gjort att de olika mätningarna fått olika antal avklingningskurvor med vad som anses vara pålitliga resultat. För samtliga mätmetoder gäller att värdena på luftomsättningen varierar i olika stor utsträckning. Detta bekräftar nyttan av att utföra mätningar över längre tid då enstaka avklingningsförsök endast ger ett värde på luftomsättningen vid en tidpunkt. Vidare är det uppenbart att endast de beräknade parametrarna för felhantering inte är tillräckliga för att bedöma en mätningens tillförlitlighet då det även krävs en grafisk granskning.

De parametrar som förefaller vara mest värdefulla vid bedömningen av mätresultaten är dels korrelationskoefficienten då dess värde och tecken ofta sammanfaller med kurvans utseende, och dels variansen för n som även den tenderar att vara relativt pålitlig som bedömningsunderlag. Förklaringsgraden ger i vissa fall värden som stämmer väl överens med utseendet för en viss avklingningskurva men i många andra fall värden som inte alls är representativa. Denna kan därför ej användas som ensam grund för bedömningen utan förefaller fungera bättre som ett komplement.

6 Påverkande faktorer och felkällor

I detta kapitel anges och belyses ett antal parametrar som kan ha påverkat resultatet av mätningarna i viss utsträckning, samt rena felkällor som även de kan ha gett resultat med mindre akkuratess.

6.1 Parametrar som påverkar mätningen

Då själva kärnan i spårgasmätningen bygger på att luften i det utrymme där mätningen utförs har god omblandning blir således luftens rörelser kritiska för hur väl mätningen fungerar och hur pass pålitliga resultat den ger. Då samplingen i multiplexorn inte sker simultant för samtliga aktiva kanaler är det därför möjligt att luften hinner förflytta sig så pass mycket mellan tidpunkterna då mätvärdena tas att det påverkar mätningens resultat. De yttre faktorer i form av väderlek som påverkar hur ventilationen i vindsutrymmet beter sig torde även ha påverkat mätningen i någon utsträckning. Vindriktning och vindstyrka är direkt kopplade till hur mycket luft som tas in i vindsutrymmet och hur denna rör sig efter att ha passerat ventilationsöppningarna, varför vinden bör ha haft viss inverkan på mätresultaten. Även utvärdering av placeringen av mätutrymmets ventilationsöppningar har förbisetts, dels då de helt sonika är fasta och därmed svåra att ändra, men också då det inte ansetts helt nödvändigt att utvärdera eftersom själva mätmetoden - och inte ventilationen i det specifika mätutrymmet - varit i fokus för detta arbete. Med hänsyn till komplexiteten och ovissheten kring luftrörelserna i vindsutrymmet är det därför rimligt att tro att detta spelat roll för mätningens noggrannhet.

6.2 Felkällor

Vidare är även mätutrustningens möjligheter en källa till eventuella felaktigheter i mätresultaten. Detta då den komplexitet i form av inställnings- och justeringsmöjligheter som finns hos utrustningen möjliggör en mängd kombinationer som potentiellt skulle kunna ge bättre och säkrare resultat än de som presenterats i detta examensarbete. Det är till exempel inte omöjligt att användande av en annan spårgas eller ett annorlunda doseringsprogram skulle kunna ge annorlunda mätresultat, men även här har arbetets omfattning varit den begränsande faktorn.

Hanteringen av mätdata kan även den utgöra en källa till felaktigheter då beräkningen av luftomsättning och de olika parametrarna felhanteringen delvis görs automatiserat i VindAnalys1. Detta medför att en noggrannare granskning för varje enskild avklingningskurva inte utförts och således kan eventuella felaktigheter som programmet inte kan hantera passera igenom hanteringen.

7 Diskussion

Samtliga tre mätmetoder som använts och utvärderats förefaller fungera och ge relevanta värden vilket är positivt. De är dock inte på något sätt perfekta då de allihop dras med felaktigheter och bristande noggrannhet i någon utsträckning, men de visar samtliga på potential att förbättras och utvecklas till mer exakta och välfungerande metoder. Framförallt mätmetod 3 som anses vara den bättre av de tre bör utan alltför mycket vidare arbete kunna förfinas till en pålitlig mätmetod för den här typen av konstruktioner och förhållanden. Vad som främst är intressant att undersöka är, som tidigare nämnts, de yttre parametrar som bör ha påverkat mätningarna i form av vind, temperatur och tryckfördelning i mätutrymmet. Detta är särskilt intressant då det i mätmetod 2 kan skönjas variationer över dygnet som i viss mån verkar sammanfalla med vindhastigheten. Då vindriktning och vindhastighet onekligen kommer att påverka ventilationsflödet i vindsutrymmet i någon omfattning är det därför relevant att undersöka dessa. Klimatets påverkan gör också att jämförelsen mellan de tre mätningarna kan ha gett en bild som inte helt motsvarar verkligheten, då förutsättningarna för jämförelsen varierat i viss utsträckning. Att genomföra den här typen av mätningar under helt likvärdiga förutsättningar är naturligtvis inte möjligt, men med bättre vetskap om klimatets variationer under tiden som mätningen pågår bör bättre och mer pålitliga resultat kunna erhållas.

Det tycks inte föreligga någon markant större skillnad mellan spårgaserna svavelhexafluorid och dikväveoxid då resultaten ifrån mätmetod 2 är relativt likartade för respektive spårgas. Möjligtvis kan mätningen med svavelhexafluorid anses ge sämre resultat då den är behäftat med ett större antal fel, men metoden förefaller fungera för båda spårgaserna. Även här vore det intressant att utvärdera de yttre omständigheterna mer noggrant för att klarlägga huruvida en typ av spårgas är bättre lämpad än en annan.

Att kunna koppla samman mätresultaten med det aktuella klimatet skulle eventuellt även kunna förklara de toppar i spårgaskoncentration som förekommer i mätningarna. Då mätutrustningen inte doserar i samtliga kanaler exakt samtidigt är det tänkbart att spårgasen vid kraftiga luftrörelser hinner förflytta sig till en annan mätpunkt under tiden doseringen sker och därmed får en ökad koncentration vid den aktuella mätpunkten. Detta har i viss mån eliminerats i mätmetod 3 där dosering sker simultant med hjälp av t-stycken, men då även samplingen sker för en kanal i taget kan problemet förekomma även här. Detta skulle eventuellt även kunna förklara de kurvor där en tydlig exponentiell avklingning inte är synlig.

Valet att bilda ett medelvärde för samtliga fyra kanaler medför troligtvis också en påverkan på resultatet. Då mätmetoden är avsedd att fungera för en kall vind och inte en specifik punkt i ett utrymme anses det motiverat att kombinera samtliga uppmätta värden till ett gemensamt för hela vinden. Detta medför dock att vissa relevanta mätvärden försvinner i hanteringen, vilket tas upp i kapitel 5. Detta utgör därför också en anledning att granska resultatet grafiskt. Det är även tänkbart att en fiktiv volym skulle kunna beräknas för varje enskild mätpunkt och ge ett mått på hur väl spårgasen spridits runt denna punkt, vilket

skulle kunna komplettera de medelvärdesbildade mätvärdena och ge ett ytterligare bedömningsunderlag.

Hantering av mätdata som gjorts i programmet VindAnalys1 förefaller ge rimliga och förhållandevis säkra värden, även om det förekommer felaktigheter och finns potential till förbättring. För att göra en helt korrekt anpassning och bedömning av varje enskild avklingningskurva krävs troligtvis en betydligt noggrannare granskning än vad programmet klarar av, men då mätmetoderna bygger på att ett så pass stort antal avklingningskurvor genereras är detta inte rimligt. Metoden medför dock att vissa av kurvorna får felaktiga tolkningar, både till det bättre och till det sämre. Detta motiverar därför att en grafisk granskning av mätresultaten som en viktig del för att kunna dra slutsatser utifrån mätningarna. Vidare förefaller de parametrar för felhantering i modellen vara till olika stor nytta för att dra slutsatser och bedöma resultatet. Det är tänkbart att andra eller fler parametrar för att hantera felet skulle kunna vara behjälpliga och kunna förbättra programmet. Förklaringsgraden som beräknas för respektive avklingningskurva förefaller ge något osäkra värden och anses därför inte vara helt pålitlig i bedömningen av mätresultaten. Detta då den i flera fall visar sig indikera dåliga resultat när flera övriga parametrar pekar på att resultaten är bra, och omvänt i andra fall.

8 Slutsatser

Samtliga tre mätmetoder anses fungera och ge relevanta resultat. Resultaten varierar dock över mätperioden för samtliga metoder vilket troligen kan kopplas till yttre parametrar så som vindhastighet, vindriktning, temperatur och tryckfördelning på vinden där mätningarna genomförts. Det är även tydligt att samtliga metoder, även om de fungerar, har potential att förbättras och utvecklas ytterligare för att kunna ge mer precisa och pålitliga resultat. Detta belyser också den komplexitet som ämnet innebär med hänsyn till alla de olika inställningar, klimatförutsättningar och övriga justeringsmöjligheter som mätmetoderna erbjuder.

Av de tre mätmetoder som undersökts förefaller metod 3, med disponering av spårgas genom en kanal fördelat på fyra punkter simultant via t-stycken, vara den som ger bäst resultat. Denna bedömning grundar sig i att denna mätning får lägst antal positiva korrelationskoefficienter och relativt jämna värden på luftomsättningen hela mätningen igenom. Övriga parametrar är förhållandevis likvärdiga för samtliga mätningar, även om mätmetod 1 kan anses ha gett ett något sämre resultat överlag. En definitiv slutsats om huruvida en mätmetod är markant bättre än en annan är dock svårt att bestämma då det skulle kräva vidare utvärdering av metoderna, varför slutsatsen att mätmetod 3 är bättre än övriga ska behandlas med viss försiktighet.

9 Fortsatt forskning

Då detta examensarbete endast täckt upp en liten del av det djup som frågeställningen erbjuder finns det stora möjligheter att bredda och arbeta vidare med ämnet. Det vore därför intressant att arbeta vidare med mätmetod 3 och utföra tester med denna under former där klimatpåverkan kan utgöra ytterligare parametrar i form av mätvärden för vindhastighet, temperatur, tryckförhållanden i mätutrymmet och liknande. Det vore även intressant att i förhållande till detta granska varje mätkanal och respektive kurva mer utförligt för att hitta eventuella samband. Det är även troligt att programmet VindAnalys1 har potential att förbättras till en större noggrannhet och eventuellt till att hantera andra eller fler parametrar för hantering av felet som uppstår i modellen.

Referenser

- Abel, E. & Elmroth, A. (2008). *Byggnaden som system*. 2., rev. uppl. Formas, Stockholm.
- Andersson, G., Jorner, U. & Ågren, A. (2007). *Regressions- och tidsserieanalys*. 3., [utök. och uppdaterade] uppl. Studentlitteratur, Lund.
- Boverket (2011). *Regelsamling för byggande, BBR 2012*. 1. uppl. Boverket, Karlskrona. Tillgänglig:
<<http://www.boverket.se/Global/Webbokhandel/Dokument/2011/Regelsamling-for-byggande-BBR.pdf>> 2014-03-06
- CRC handbook of chemistry and physics: a ready-reference book of chemical and physical data*. (2013-2014). [Elektronisk resurs]. CRC Press, Cleveland, Ohio.
- Ekstrand-Tobin, A. (2003). *Hälsopåverkan av åtgärder i fuktiga byggnader*. Diss. Linköping: Univ., 2004
- Festo (2014). *Push-in fittings and connectors QS, Quick Star*. Tillgänglig:
<https://www.festo.com/cat/fi_fi/data/doc_engb/PDF/EN/QS_EN.PDF> 2014-05-07
- Forest, TW. & Walker, IS. (1992). Attic Ventilation Model. *Proceedings ASHRAE/DOE/BTECC 5th Conf. on Thermal Performance of Exterior Envelopes of Buildings*. Atlanta, GA. 1992, ss 399-408.
- Harderup, L-E. & Arfvidsson, J. (2008). *Fuktsäkerhet i kalla vindsutrymmen*. Avdelningen för byggnadsfysik, Lunds tekniska högskola (LTH), Lund.
- Hedin, B. (1994). *Mätteknik med spårgas: aktiva metoder för bestämning av volymer, luftflöden, flödesvägar och strömningssätt i småhus*. Diss. Lund: Univ., 1994
- Innova (1997). *1312 Photoacoustic Multi-gas Monitor*. Tillgänglig:
<http://innova.lumasenseinc.com/uploads/media/1312_User_Manual_be6002-11_01.pdf> 2014-03-10
- Jensen, L. (1988). *Enklare kontroller vid spårgasförsök*. Lund.
- Jensen, L. (2014). *Matlab-program för beräkning av diffusion*. [opublicerat manuskript].
- Johansson, R. (1993). *System modeling and identification*. N.J: Prentice Hall, Englewood Cliffs.
- LumaSense (2011). *User Manual for 1303 Multipoint Sampler and Doser*. Tillgänglig:
<<http://innova.lumasenseinc.com/uploads/media/BE1085-14.pdf>> 2014-03-10
- Matsson, J-B. (1991). *Mätning av luftflöden med spårgas*. Statens råd för byggnadsforskning, Stockholm.
- Nevander, L E. & Elmarsson, B. (1994). *Fukthandbok. Praktik och teori*. Svensk Byggtjänst, Stockholm.
- Rawlings, John O., Pantula, Sastry G. & Dickey, David A. (1998). *Applied regression analysis: a research tool*. 2. ed. Springer, New York.

Samuelson, I., Arfvidsson, J. & Hagentoft, C-E. (2007). *Få bukt med fukt*. Forskningsrådet för miljö, areella näringar och samhällsbyggande (Formas), Stockholm.

Samuelson, I. (1995). *Fuktbalans i kalla vindsutrymmen: betydelsen av ventilation och val av isoleringsmaterial*. Sveriges provnings- och forskningsinstitut (SP), Borås.

Samuelson, I. & Hägerhed, L. (2006). Kalla vindar – problem och förbättringar. *Bygg & teknik*. (4), ss. 22-26. Tillgänglig:

<<http://www.sp.se/sv/units/energy/eti/Documents/Kalla%20vindar.pdf>> 2014-02-20

Sasic Kalagasidis, A. & Mattsson, B. (2005). *Modelling of moisture conditions in a cold attic space*. Tillgänglig:

<<http://www.kuleuven.ac.be/bwf/projects/annex41/protected/data/CTH%20Oct%202005%20BGinf%20A41-T1-S-05-3.pdf>> 2014-05-14

Schroeder, Daniel V. (2000). *An introduction to thermal physics*. Addison Wesley, San Francisco.

Socialstyrelsen (2006). *Meddelandeblad – Hälsorisker vid fuktproblem i byggnader*.

Tillgänglig: <http://www.socialstyrelsen.se/Lists/Artikelkatalog/Attachments/9372/2006-1-18_2006118.pdf> 2014-03-01

Vännman, K. (2002). *Matematisk statistik*. 2., [omarb.] uppl. Studentlitteratur, Lund.

Åberg, O. & Thunborg, J. (2010). *God bebyggd miljö: förslag till nytt delmål för fukt och mögel: resultat om byggnaders fuktskador från projektet BETSI*. 1. uppl. Boverket, Karlskrona.

Bildkällor

Samtliga foton och figurer är framtagna av författaren. Utskrifter av diagram kommer samtliga ifrån programmen 7620 respektive Matlab.

Bilaga 1 – VindAnalys1

```

function [ n,error ] = VindAnalys1( A, Y, StartTid, AnalysTid, DiffTid )
%n = omsättningar
% A = mätvärden
% StartTid= Minuter från mätstart
% i dygn
close all
Y=Y*(24.45/44.01); %Ange nornaren beroende på spårgas, 146.06 fr S6F och
44.01 fr lustgas
Nlength=length(A);
AnalysTid=AnalysTid/(24*60);
DiffTid=DiffTid/(24*60);
NyStartTid=StartTid/(24*60)+A(1);
AntalN=floor((A(Nlength)-A(1))/DiffTid);
MedelY=mean(Y);
Medelvec=MedelY*ones(Nlength,1);
SlutpaFil=A(length(A));
NyA = [A.^0 A];
TidskorrigeringA=[zeros(Nlength,1) A.^0];
i=1;
n=zeros(AntalN,2);
logerror=zeros(AntalN,1);
ForkGr=zeros(AntalN,1);
ResVar=zeros(AntalN,1);
KorrKoeff=zeros(AntalN,1);
VarC=zeros(AntalN,1);
VarN=zeros(AntalN,1);
MatLangd=zeros(AntalN,1);
PunktTid=zeros(AntalN,1);

while NyStartTid < (SlutpaFil - AnalysTid)
    [Nstart]=find(A>NyStartTid,1);
    Matstart=A(Nstart);
    Matslut=Matstart+AnalysTid;
    [Nslut]=find(A>Matslut,1);
    TempA=NyA(Nstart:Nslut, :)-TidskorrigeringA(Nstart:Nslut,:)*Matstart;
    n(i, :)=(TempA)\log(Y(Nstart:Nslut));
    logYskattat(Nstart:Nslut,1)=TempA*n(i, :)' ;
    Yskattat(Nstart:Nslut,1)=exp(logYskattat(Nstart:Nslut));
    error(i)=norm(Yskattat(Nstart:Nslut)-Y(Nstart:Nslut))/sqrt(Nslut-
Nstart-2);
    logerror(i)=norm(logYskattat(Nstart:Nslut)-
log(Y(Nstart:Nslut)))/sqrt(Nslut-Nstart-2);
    Vari=var(log(Y(Nstart:Nslut)));
    kov1=logerror(i)^2*inv(TempA'*TempA);
    VarC(i)=kov1(1,1);
    VarN(i)=kov1(2,2);
    kov2=abs(sqrt(kov1)); %standardavvikelsen fr varje element i
kovariansmatrisen
    MatLangd(i)=length(Y(Nstart:Nslut));

    x=A(Nstart:Nslut);
    xMedel=mean(x)*ones(length(x),1);
    KorrKoeff(i)=(sum((x-xMedel).*(log(Y(Nstart:Nslut))-
log(Medelvec(Nstart:Nslut)))))/(sqrt(sum((x-
xMedel).^2)*sum((log(Y(Nstart:Nslut))-log(Medelvec(Nstart:Nslut))).^2)));
    ResVar(i)=sum((log(Yskattat(Nstart:Nslut))-
log(Y(Nstart:Nslut))).^2)/length(Y(Nstart:Nslut));
    ForkGr(i)=1-(sum((log(Y(Nstart:Nslut))-

```

```

Yskattat(Nstart:Nslut).^2)/sum((log(Y(Nstart:Nslut))-
Medelvec(Nstart:Nslut)).^2));
    NyStartTid=NyStartTid+DiffTid;
    PunktTid(i)=NyStartTid;
    i=i+1;
    [r1,r1s]=regress(log(Y(Nstart:Nslut)),TempA);
end
MatLangd;
VarC;
VarN;
C=exp(n(:,1));
Oms=n(:,2)*(-1)/24;
IntCNedre=zeros(AntalN,1);
IntCOvre=zeros(AntalN,1);
IntNNedre=zeros(AntalN,1);
IntNOvre=zeros(AntalN,1);
for j=1:AntalN

    if MatLangd(j)==10;
        CNedre(j)=C(j)-sqrt(VarC(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.812;
        COvre(j)=C(j)+sqrt(VarC(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.812;
        NNedre(j)=Oms(j)-sqrt(VarN(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.812;
        NOvre(j)=Oms(j)+sqrt(VarN(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.812;
    else
        CNedre(j)=C(j)-sqrt(VarC(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.833; %Om
MatLangd=9
        COvre(j)=C(j)+sqrt(VarC(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.833;
        NNedre(j)=Oms(j)-sqrt(VarN(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.833;
        NOvre(j)=Oms(j)+sqrt(VarN(j))/sqrt(MatLangd(j))*1.833;
    end
    IntCNedre(j)=CNedre(j);
    IntCOvre(j)=COvre(j);
    IntNNedre(j)=NNedre(j);
    IntNOvre(j)=NOvre(j);

end
SkattLength=length(Yskattat);
s=(Y(1:SkattLength)-Yskattat)*(Y(1:SkattLength)-Yskattat);
Stand2=std(log(Y(Nstart:Nslut)));
Vari=var(log(Y(Nstart:Nslut)));
Stand2=Stand2^2;
n(:,1)=exp(n(:,1));
MinutTid=(A-A(1))*24*60
NyA(Nstart:Nslut, :);
plot(MinutTid(1:Nslut),[ Y(1:Nslut) Yskattat(1:Nslut)])
zoom XON
xlabel('Antal minuter')
ylabel('Koncentration i ppm')
logerror
ForkGr
ResVar
KorrKoeff
Oms
IntNNedre
IntNOvre
IntCNedre
IntCOvre
grid on

end

```