



# TVOC-føleres anvendelse i vurdering af luftkvalitet



TEKNOLOGISK  
INSTITUT

**GI** GRUNDEJERNES  
INVESTERINGSFOND

**Titel:**

TVOC-føleres anvendelse i vurdering af luftkvalitet

**Udarbejdet med støtte fra:**

Grundejernes Investeringsfond

**Udarbejdet af:**

Teknologisk Institut  
Gregersensvej 1  
2630 Taastrup  
Bygninger & Miljø

**Forfattere:**

Nadja Lyng  
Thomas Witterseh

April 2018

## Forord

I dette projekt undersøges hvordan luftkvalitetsfølere reagerer på forskellige forureninger i form af flygtige organiske forbindelser, som er typiske i boliger. Projektet blev gennemført i perioden fra august 2016 til februar 2018 og er finansieret med støtte fra Grundejernes Investeringsfond.

Målgruppen for projektet er bygningsejere og -brugere, der vil have gavn af et sundere indeklima i bygningerne, og, på længere sigt, lavere omkostninger til ventilation. Rådgivere, som arbejder med bygningsdesign og udviklere af ventilationssystemer, vil gennem projektets resultater opnå viden om luftkvalitetsfølere, som vil kunne anvendes i forbindelse med deres rådgivningsydelser til bygherrer. Projektet resultater er ligeledes relevant for udviklere af ventilationsløsninger. Derudover er målgruppen også de myndigheder, der regulerer love og anbefalinger om anvendelse af mekanisk ventilation i boliger.

Nærværende projekts formål og arbejdsområde er delvist sammenfaldende med et samtidigt projekt med titlen "System solutions for demand-control and continuous-commissioning of room-based ventilation in dwellings", som Teknologisk Institut ligeledes deltager i. Projektet løber fra 2016-2019 og er finansieret af Det Energiteknologiske Udviklings- og Demonstrationsprogram (EUDP). EUDP-projektet omfatter blandt andet test og efterfølgende udvælgelse af en enkelt type VOC-føler, som skal integreres i styringen af mekaniske ventilationsløsninger i demonstrationsboligbyggeri. De eksperimentelle afprøvninger af VOC-følerne i nærværende projekt er derfor udbygget, bl.a. med online måling med avanceret 'state-of-the-art' analyseudstyr (PTR-MS), i forhold til den oprindelige projektplan og udført af

Nadja Lynge Lyng og Thomas Witterseh, Teknologisk Institut, Bygninger & Miljø,

i samarbejde med

Rossana Bossi, Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab, Atmosfærisk kemi og fysik, samt Jakub Kolarik, Kevin Michael Smith og Pawel Wargocki, Danmarks Tekniske Universitet, Institut for Byggeri og Anlæg.

## Indholdsfortegnelse

Forord.....	3
1. Resumé.....	5
2. Indledning og baggrund .....	6
3. Formål .....	8
4. Metode.....	9
4.1. Udvalgelse af VOC-følere .....	9
4.2. MOS-følernes virkemåde.....	10
4.3. Beskrivelse af forsøglokalet og forsøgsbetingelserne under målingerne .....	10
4.4. Udvalgte aktiviteter som blev anvendt til at påvirke luftkvaliteten .....	13
4.5. Beskrivelse af forsøgsopstillingen.....	17
4.6. Kontrolmålinger med PTR-TOF-MS .....	17
4.7. Kontrolmålinger med opsamling af luftprøver og efterfølgende kemisk analyse .....	18
5. Resultater og diskussion.....	19
5.1. Resultater og vurdering af kontinuerte målinger med VOC-følere og PTR-MS .....	19
5.2. Sammenligning af resultater fra følere og PTR-MS.....	26
5.3. Sammenligning af føler- og PTR-MS-målinger med analyse af Tenax-TA® .....	28
6. Samlet vurdering.....	30
7. Referencer.....	31

## 1. Resumé

Luftkvaliteten er en del af indeklimaet, og har stor betydning for vores komfort og sundhed, når vi opholder os inden døre. CO<sub>2</sub> er en af mange forureninger i indeluften, men i rum, hvor mennesker ikke er den primære forureningskilde, kan det være nødvendigt at vurdere luftkvaliteten på baggrund af indholdet af flygtige organiske forbindelser.

Formålet med dette projekt var at undersøge om TVOC-følere (dvs. følere, som registrerer summen af flygtige organiske forbindelser) kan benyttes til at vurdere luftkvaliteten i boliger og evt. bruges til behovsstyring af mekanisk ventilation.

Markedet blev screenet for TVOC-følere af typen 'Metal Oxide Semiconductor', og udvalgte føleres respons blev undersøgt i et forsøgslokale under typiske aktiviteter i boliger: Afbrænding af stearinlys, madlavning, vådrengøring, eksponering for byggematerialer, maling af gipsplader, personbelastning, luftfugtighedsændring, tørrengøring og fordampning af ethanol.

De undersøgte følere var i stand til at registrere ændringer i indholdet af flygtige organiske forbindelser (VOC'er) i luften, og de fleste af dem reagerede på ændringerne med samme responsmønster, som blev opnået med avanceret 'state-of-the-art' online analyseudstyr, der blev benyttet til løbende at registrere luftens indhold af VOC'er.

De fleste af følerne var gode til at registrere ændringer i luftkvaliteten, mens reaktionen på et uændret forureningsniveau var mere tvivlsom, da der observeredes markante forskelle i de koncentrations-/outputsignalniveauer, som følerne leverede.

Forsøgene har identificeret nogle begrænsninger i følerne: Følere af samme type og fabrikat viste forskellige niveauer af VOC. For en enkelt type af følerne faldt signalet ud, når føleren gik i 'mætning' ved koncentrationer over måleområdet. Desuden var der forskel på, hvor stor indflydelse den relative luftfugtighed havde på følernes outputsignal.

Generelt var leverandørernes information om følerne meget begrænset, hvilket gør det vanskeligt at tolke outputsignalerne, særligt for de følere, som ikke omregner outputsignal til TVOC-ækvivalenter.

Følernes udviste, som forventet, ikke reaktion på en stor stigning i antallet af ultrafine partikler i luften. Undersøgelserne i nærværende projekt er søgt udført ved konstant temperatur, og effekten af ændret temperatur på følernes outputsignal er ikke undersøgt.

En TVOC-koncentration giver i sig selv ikke oplysninger om hvilke kemiske stoffer, der findes i luften og i hvilke koncentrationer de individuelle kemiske stoffer findes. Man kan derfor ikke på baggrund af følernes outputsignaler afgøre om luftkvaliteten er acceptabel, eller bestemme hvilken luftmængde, der er nødvendig for at opretholde en given luftkvalitet.

## 2. Indledning og baggrund

Luftkvaliteten i bygninger har stor indflydelse på vores helbred og komfort. Tidligere antog man, at personer var den primære forureningskilde inden døre (Herberger et al. 2010) og flertallet af de eksisterende standarder og vejledninger for dimensionering af ventilation er baseret på luftens indhold af CO<sub>2</sub>, der afgives fra mennesker som en del af udåndingsluften. CO<sub>2</sub> er dog kun én af mange forureninger, som mennesker afgiver som følge af deres stofskifte. Antagelsen om, at mennesker er den eneste forureningskilde er forenklet, og op gennem 1980'erne opstod en erkendelse af, at luften indendørs også forurenes af de kemiske stoffer, der afgives fra inventar, møbler, byggematerialer mv. CO<sub>2</sub>-koncentrationen anvendes dog stadig som en indikator i vurderingen af luftkvaliteten og om udeluftskiftet i rummet er tilstrækkeligt i forhold til personbelastningen.

I rum, hvor personbelastningen er høj i forhold til rummets volumen, fx i klasselokaler og foredragssale, vil mennesker være den primære kilde til luftforurening, og her kan man med rimelighed benytte CO<sub>2</sub>-koncentrationen til at vurdere luftkvaliteten. Men høje CO<sub>2</sub>-koncentrationer er ikke den eneste årsag til dårlig luftkvalitet, og CO<sub>2</sub> kan ofte ikke bruges alene til at vurdere luftkvaliteten i rum, hvor mennesker ikke er den primære kilde til forureninger, fx i kontorer og boliger.

Afgivelsen af kemiske stoffer fra byggematerialer, inventar, elektronik mv. spiller en vigtig rolle for luftkvaliteten og dermed også for helbredet (Blas et al. 2012). Der sker hele tiden en udvikling af nye materialer og produkter, som i mange tilfælde forøger afgivelsen af kemiske stoffer til luften, hvilket gør det relevant at monitorere andre parametre end CO<sub>2</sub>, når luftkvaliteten skal vurderes.

CO<sub>2</sub>-følere er meget udbredt bl.a. på grund af deres lave pris, og benyttes ofte til behovsstyring af ventilationsanlæg (fx i kontorer og mødelokaler), eller i en enklere form som en 'alarm' for, hvornår man bør åbne et vindue og lufte ud (fx i klasselokalet eller børnehaven).

I boliger er der typisk et større areal, og dermed et større volumen, pr. person, hvorfor personers indvirkning på luftkvaliteten (i form af CO<sub>2</sub>) er mindre. Herved opstår der en risiko for, at luftskiftet (styret efter CO<sub>2</sub>-indhold) bliver for lille til at sikre en komfort- og sundhedsmæssig acceptabel luftkvalitet, når afgang fra byggematerialer, møbler og inventar tages i betragtning. Særligt i forbindelse med nybyggeri og renovering, hvor der introduceres mange nye materialer til indeklimaet, er det Teknologisk Instituts erfaring at luftkvaliteten, i en kortere eller længere periode, kan være uacceptabel og endda føre til helbredsgener hos beboerne, på grund af afgivelsen af kemiske stoffer.

I boliger kan nogle typiske dagligdags aktiviteter så som fx madlavning, brug af elektronisk udstyr, rengøring og brug af personlige plejeprodukter påvirke luftkvaliteten negativt uden at der sker en stigning i CO<sub>2</sub>-koncentrationen. Derudover kan hobbyrelaterede aktiviteter, der involverer brug af lim og/eller malingsprodukter, være en stor kilde til forurening af indeluften. Derfor vil en egnet føler eller alarm, der reagerer på disse gasformige forureninger, kunne være nyttig i vurderingen af luftkvaliteten i boliger.



Gas-følere er udbredt i mange brancher til vidt forskellige formål. Følere, som er følsomme over for en enkelt type gas, kaldet "Single gas sensor", har længe været udbredt i industrien. Gennem det sidste årti er der kommet stigende fokus på følere, som adskiller sig ved at være sensitive overfor flere forskellige kemiske stoffer (Herberger et al. 2010). Denne type følere registrerer den totale sum af flygtige organiske forbindelser (Total Volatile Organic Compounds, TVOC) og benævnes i dette projekt TVOC-følere.

Dermed åbnes muligheden for, at TVOC-følere kan være anvendelige i vurderingen af luftkvaliteten i indeklimaet, hvor der jf. Teknologisk Instituts erfaring ofte kan findes 30-80 forskellige stoffer i luften i et lokale. Hvilke stoffer, der detekteres, varierer afhængigt af byggematerialer, inventar, brugere og aktiviteter i lokalet. Nogle stoffer findes hyppigt og går igen fra indeklima til indeklima, mens andre kun findes i sjældnere tilfælde. Samlet set udgør de detekterede og identificerede stoffer i indeluften en liste på flere hundrede forskellige. Eftersom TVOC-følere er blevet langt billigere end tidligere, er interessen for at bruge disse som erstatning for, eller supplement til, CO<sub>2</sub>-følere blevet større. I takt med, at flere og flere renoveringer indebærer opsætning af enten decentrale eller centrale mekaniske ventilationsanlæg bliver det særdeles relevant at sikre, at disse styres så effektivt som muligt, både af hensyn til den indeklimamæssige kvalitet og energiforbruget.

Typen af TVOC-følere, som undersøges i dette projekt, er afgrænset til Metal Oxid Semiconductor sensorer (MOS-følere). Denne type følere er forholdsvis prisbillig, hvilket har gjort dem interessante for producenter og leverandører ved valg af 'luftkvalitetsfølere'.

Der er efterhånden en del leverandører på markedet, som sælger "lavpris" MOS-følere, men egentlig dokumentation for hvordan følerne reagerer på forskellige VOC'er er begrænset. Den meget begrænsede dokumentation (hvis den overhovedet eksisterer), der følger med følerne, gør det svært at tolke outputsignalet samt at styre ventilationen efter signalet. Der er derfor behov for mere viden om og dokumentation af de enkelte følere.

På trods af, at nogle TVOC-følere angiver en såkaldt 'TVOC ækvivalent' som måleenhed, er det umuligt at benytte den totale mængde kemiske stoffer i luften (TVOC), isoleret set, som til en 'sundhedsvurdering' af luftkvaliteten, idet luftkvalitetens påvirkning på helbredet afhænger af hvilke stoffer, der findes i luften, og ikke kun den samlede mængde (Painter et al. 2012). Det er dog tanken, at resultater fra nærværende projekt kan medvirke til på længere sigt at kunne anvende TVOC-følere i styring af ventilationsanlæg for at sikre en tilfredsstillende luftkvalitet og samtidig reducere energiforbruget.

### 3. Formål

Formålet med projektet er at undersøge om TVOC-følere (dvs. følere, som registrerer summen af flygtige organiske forbindelser) kan benyttes til at vurdere luftkvaliteten i boliger.

Projektet søger at undersøge, om udvalgte TVOC-følere på markedet kan bruges til løbende at registrere luftkvaliteten under episoder med typiske indeklimarelaterede aktiviteter som påvirker luftkvaliteten i boliger.

Endvidere undersøges det hvordan følerne reagerer på ændringer i luftfugtigheden og det vurderes om følerne er egnede til at styre behovstyret ventilation med variabel luftmængde.

Med projektet ønsker Teknologisk Institut at opnå og formidle viden om udvalgte TVOC-følere på markedet og deres anvendelighed i forbindelse med løbende vurdering af luftkvaliteten i boliger.



## 4. Metode

For at undersøge et udvalg af kommercielt tilgængelige VOC-føleres anvendelighed, er markedet først screenet for egnede følere. De udvalgte følere blev bestilt og de følere som blev leveret indenfor 3 måneder, blev medtaget i undersøgelsen. Følerne blev tilkoblet logningsudstyr, så det var muligt løbende at registrere signalet fra følerne. Herefter er der udført test i et forsøgslokale opbygget som et kontorlokale med mekanisk ventilation og mulighed for at styre og kontrollere en lang række indeklimaparametre. Forsøgene er gennemført ved at udføre forskellige udvalgte luftkvalitetsforringende aktiviteter i lokalet. Under forsøgene blev luftkvaliteten løbende analyseret med avanceret analyseudstyr (PTR-MS, Proton Transfer Reaction Mass Spectrometry). Desuden blev der foretaget enkelte luftkvalitetsmålinger med opsamling af luftprøver på adsorbenttrør, som efterfølgende er analyseret i laboratoriet.

### 4.1. Udvalgelse af VOC-følere

Tilgængeligheden af VOC-følere blev indledningsvist undersøgt ved en screening af det internationale marked. Screeningen blev foretaget ved dels at kontakte producenter af følere, som tidligere har været inkluderet i en undersøgelse (Kolarik, 2014), og dels ved en generel søgning på internettet. Screeningen blev bevidst tilrettelagt således, at den omfattede kendte fabrikater og mindre kendte producenter samt leverandører/distributører.

Der blev under screeningen fundet adskillige egnede MOS-følere fra leverandører fra det meste af verden. Nogle følere var, trods deres påståede evne til at måle en bred vifte af forskellige VOC'er, ikke egnede til indeklimarelateret luftkvalitet, men beregnet til fx industri. Andre følere kunne kun bestilles i kvantiteter på 1000 stykker ad gangen, og selvom der blev forsøgt at skaffe enkelte følere fra distributører lykkedes det ikke i alle tilfælde. I tabel 1 herunder er de udvalgte følere listet.

En del af de kommercielt tilgængelige MOS-sensorer er fra producenten monteret på et printkort og nogle har en indbygget algoritme, som omregner den målte modstandsændring over føleren til såkaldte CO<sub>2</sub>- eller TVOC-ækvivalenter, mens andre følere (uden printkort) alene giver et output i form af en spænding. De testede følere var alle integreret på et printkort og to af dem var integreret i en måleboks, som samtidig kan måle temperatur, fugtighed og CO<sub>2</sub>.

Tabel 1. Testede MOS-følere

Producent/ Fabrikant	Model	Kalde- navn	Model	Føler/in- tegreret i en boks	Ca. pris/stk. uden leve- ring [DKK]	Antal testede følere
SGX Sensor- tech	MiCS-VZ- 89TE	SGX	MiCS-VZ- 89TE	Føler	138,75	2
AMS	iAQ-Core C	iAQ	iAQ-Core C	Føler	148,20	2
Omelix	MQ-135	MQ135	MQ-135	Føler	41,25	5
Winsen	MQ503	MQ503	MQ503	Føler	18,00	2
Siemens	QPA1000	QPA1000	QPA1000	Boks <sup>1</sup>	1114,00	1
S+S Regel- technik	RLQ-W	RLQ	RLQ-W	Boks <sup>1</sup>	1222,50	1

<sup>1</sup> Figaro 2600 føler

De følere, som enten ikke blev vurderet egnede eller som det ikke lykkedes at få leveret til undersøgelsen, er oplyst i tabel 2.

Tabel 2. Liste over følere, der indledningsvis var i betragtning, men som ikke blev testet og årsagen hertil

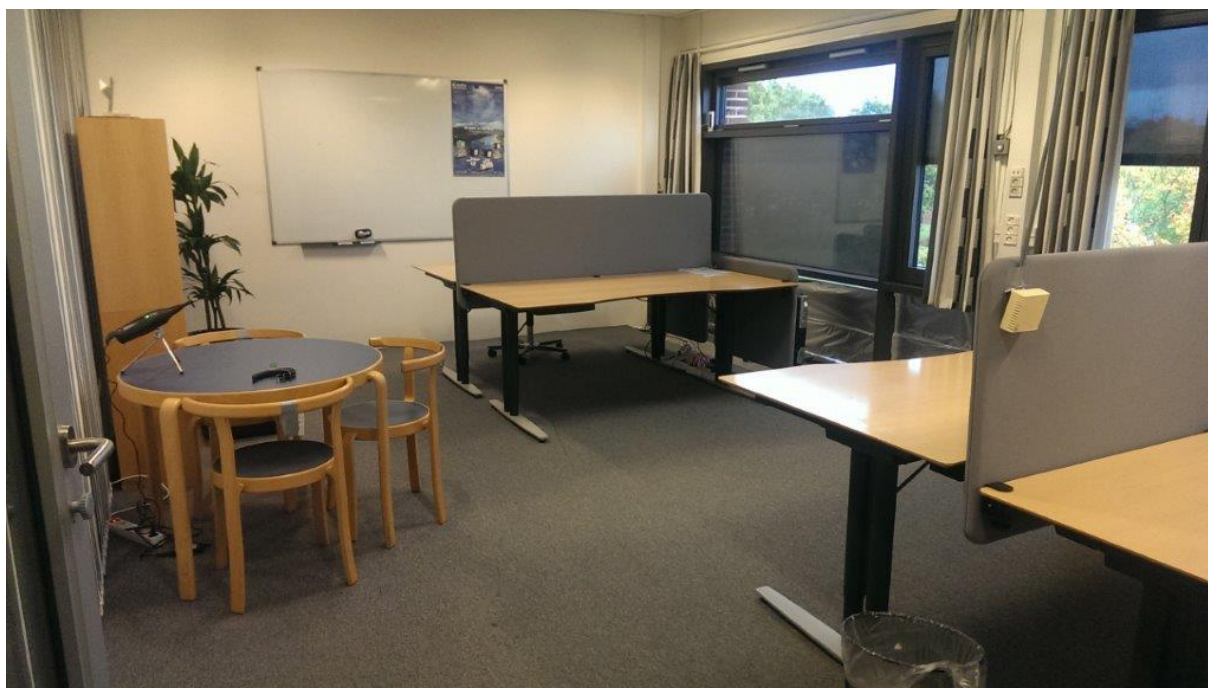
Producent/ Fabrikant	Model	Årsagen til udelukkelsen
AMS (fhv. Cambridge CMOS sensors)	CCS811	Ikke leveret i tide
AMS	iaQ -2000	Afløses af iAQ-Core C, som er testet
AMS	AS-MLV-P2	Analog føler
Figaro	TGS 2602	Ikke leveret i tide
Figaro	TGS 8100	Ikke egnet til indeklimaforhold
Figaro	TGS 2600	Ikke egnet til indeklimaforhold
FIS Inc.	SB-AQ1-06	For lang leveringstid
FIS Inc.	SP3-AQ2-01	For lang leveringstid
FIS Inc.	SP3S-AQ2-01	For lang leveringstid
SGX Sensortech	MiCS-5524	Ikke egnet til indeklimaforhold
Sensirion	SGPC10	Ikke lancereret i tide

#### 4.2. MOS-følernes virkemåde

De følere, som har fundet størst udbredelse på nuværende tidspunkt, bl.a. på grund af deres lave pris, er af typen MOS (Metal Oxide Semiconductor). Der er forskelle i hvordan de forskellige følere virker, men det er på baggrund af dataarkene for de forskellige følere ikke muligt at afgøre deres præcise virkemåde. MOS-sensorerne virker dog i hovedtræk ved, at modstanden over en membran med et tyndt lag af metaloxid løbende registreres. Det sensitive metaloxidlag på membranen er typisk af tindioxid ( $\text{SnO}_2$ ) og laget kan være doteret med eksempelvis palladium eller platin. Da ilt har høj stor affinitet til elektroner, adsorberes ilt i luften derfor af tindioxidlaget pga. tilstedeværelsen af elektroner i laget. Tilstedeværelsen af oxygen på membranlaget binder elektronerne og dermed øges den elektriske modstand over membranen. Tilstedeværelsen af ilt er derfor en nødvendighed for, at følertypen kan fungere. Følernes detekterer VOC'er ved, at iltmolekyler reagerer med VOC'erne, og dermed frigiver elektroner i metaloxidlaget. Ændringen af elektroner i metaloxidlaget registreres som en ændring af modstanden over membranen. Modstanden over membranen afgøres derfor af VOC-koncentrationen i luften.

#### 4.3. Beskrivelse af forsøgslokalet og forsøgsbetingelserne under målingerne

Målingerne blev udført i EnergyFlexOffice (EFO) på Teknologisk Institut, Taastrup. Lokalet er opbygget som et dobbelt kontor, der kan opdeles i to identiske lokaler ved hjælp af en foldevæg midt i lokalet. Den ene langside udgøres af bygningsfacaden med vinduer, og den modstående langside, der vender mod et gangareal, består af en glasvæg. Endevæggene består af malet gips. Gulvet er belagt med et væg-til-væg-gulvtæppe ovenpå vinyl. Loftet er nedhængte gipsakustikplader med indbyggede belyningsarmaturer. Lokalet er 7,0 m bredt og 4,5 m dybt, svarende til et gulvareal på 31,5  $\text{m}^2$ . Loftshøjden er 2,6 m, hvilket giver et lokalevolumen på ca. 80  $\text{m}^3$ , når volumenet af møbler og udstyr i rummet fratrækkes. Forsøgslokalet er vist på figur 1 nedenfor.



Figur 1. Fotografi af forsøgslokalet. Lokalet var uden det viste møblement under forsøgene.

Lokalet har mekanisk ventilation med indblæsning og udsugning gennem armaturer i det nedhængte loft. Ventilationssystemet er udstyret med separat væskebaseret køling- og opvarmingskreds. Indblæsningen foregår gennem to køleblæfere. Den mekaniske ventilation var indstillet til et luftskifte på  $0,5 \text{ h}^{-1}$ . Indblæsningstemperaturen var sat til  $19\text{-}21 \text{ }^\circ\text{C}$  afhængig af varmebelastningen i lokalet. Fem bordventilatorer sikrede fuld opblanding af rumluften i lokalet under hele forsøgsperioden.

For at mindske varmebelastningen fra solen på den sydvendte vinduesfacade var de udvendige perforerede solgardiner rullet ned i hele perioden. Under forsøgene blev lufttemperaturen i lokalet holdt på  $23 \text{ }^\circ\text{C}$  ved hjælp af to termostatstyrede elektriske radiatorer.

Den relative luftfugtighed blev kontrolleret og holdt konstant på ca. 50 % ved hjælp af tre ultralydsbefugtere.

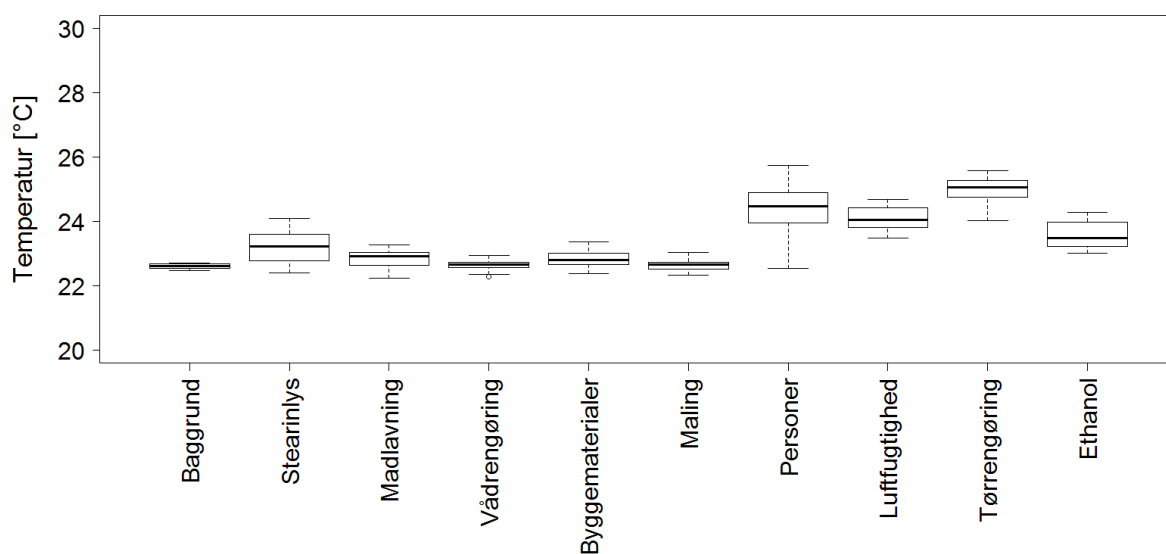
Temperatur og relativ luftfugtighed blev løbende registreret ved hjælp af et IC-meter. Luftskiftet blev målt med sporgas (R134a) efter henfaldsmetoden (Tracer gas decay method, ASTM standard E741-11). Metoden giver et gennemsnitsluftskifte over 1-3 timer. Koncentrationen af R134a er målt med Brüel & Kjær Photoacoustic Gas Analyzer, model 1302.

De målte middeltemperaturer og relative luftfugtigheder samt luftskifte er angivet i tabel 3. Middel, minimum og maksimum er angivet for en periode 30 minutter før de enkelte aktiviteter starttidspunkt (fremgår af tabel 4) og indtil kl. 22.00 om aftenen. En undtagelse fra dette er baggrundsmålingerne, hvor tidsperioden kun dækker perioden angivet i tabel 4.

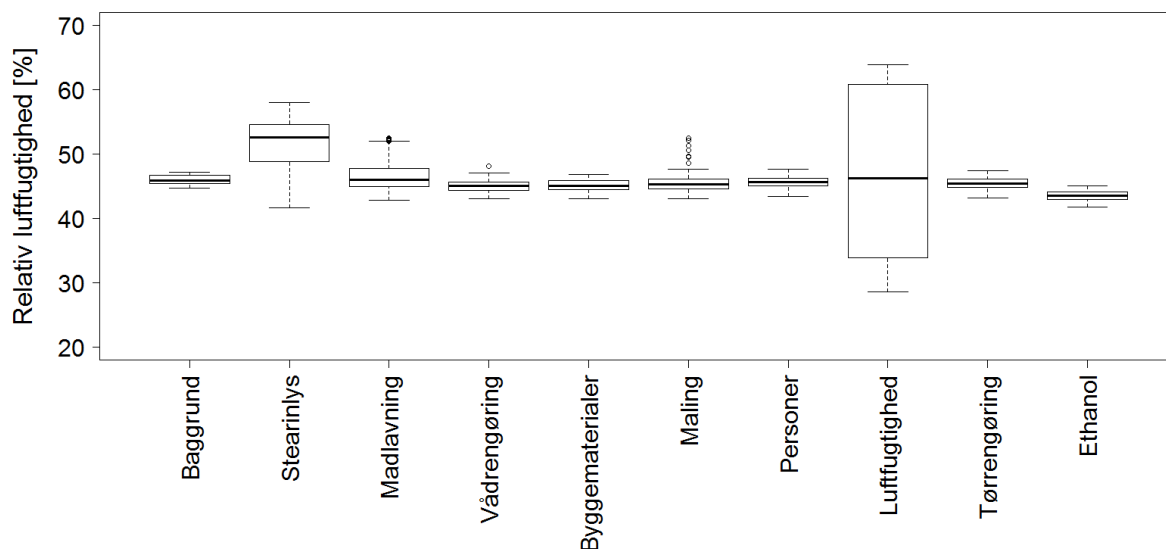
Tabel 3. Middel-, minimum- og maksimumtemperaturer samt relativ luftfugtighed, målt hvert femte minut. Derudover er samtlige resultater af luftskiftmålinger udført en til tre gange pr. aktivitet.

<b>Aktivitet</b>	<b>Middel- (min og maks) temperatur [°C]</b>	<b>Middel- (min og maks) relativ luftfugtighed [% RF]</b>	<b>Luftskifte [h<sup>-1</sup>]</b>
Baggrund før	22,6 (22,5-22,7)	46,0 (44,7-47,2)	0,7
Stearinlys	23,2 (22,4-24,1)	51,0 (41,7-58,1)	0,6
Madlavning	22,9 (22,3-23,3)	46,7 (42,9-52,5)	0,9
Vådrensøring	22,7 (22,3-23,0)	45,1 (43,1-48,2)	0,7; 0,8
Byggematerialer	22,9 (22,4-23,4)	45,1 (43,1-46,8)	0,7
Maling af gipsplader	22,7 (22,3-23,0)	45,6 (43,1-52,5)	0,7
Personbelastning	24,4 (22,6-25,7)	45,6 (43,5-47,7)	0,7; 0,7; 0,6
Luftfugtighedsændring	24,1 (23,5-24,7)	46,6 (28,6-63,9)	0,6; 0,5
Tørrensøring	25,0 (24,0-25,6)	45,5 (43,3-47,5)	0,6; 0,4
Ethanol	23,6 (23,0-24,3)	43,6 (41,9-45,1)	0,7; 0,4

I figur 2 og 3 ses boksplot for hhv. temperaturer og relativ luftfugtighed som er målt under aktiviteterne.



Figur 2. Boksplot af temperaturer under de forskellige aktiviteter.



Figur 3. Boksplot af relativ luftfugtighed under de forskellige aktiviteter.

På udvalgte tidspunkter blev antallet af ultrafine partikler i luften målt med partikeltæller, mrk. TSI P-TRAK® Ultrafine Particle Counter (UPC).

#### 4.4. Udvalgte aktiviteter som blev anvendt til at påvirke luftkvaliteten

For at undersøge VOC-følnernes evne til at registrere kemiske stoffer i luften blev de eksponeret for 'forureninger', som er typiske for boliger. Kilderne og aktiviteterne blev udvalgt således, at de dels er typiske for boliger, og dels genererede forureninger med forskellige kemiske stoffer. Herved kunne følnernes følsomhed overfor forskellige stofgrupper undersøges.

Eksponeringerne blev gennemført i perioden fra den 20. april til 11. maj 2017. En oversigt over alle aktiviteter fremgår af Tabel 4.

Baggrundsniveauet af VOC'er i det tomme forsøgslokale blev målt inden perioden med aktiviteter.

Tabel 4. Oversigt over aktiviteter, tidspunkter og information om materialer.

<b>Aktivitet</b>	<b>Dato</b>	<b>Starttidspunkt for aktiviteten</b>	<b>Materiale mm.</b>
Baggrund	20.4.2017	15:23 - 16:23	-
Stearinlys	23.4.2017	14:23 - 15:53	Afbrænding af tre kronelys (COOP Denmark A/S, ID kronelys af ren stearin)
Madlavning	24.4.2017	12:28 - 14:02	Opvarmning af karrysuppe (færdigret)
Vådrenngøring	25.4.2017	10:37 - 10:52	Universalrenngøring af glatte overflader
Byggematerialer	27.4.2017	10:31 - 13:47	Ældre linoleumsgulv (17 m <sup>2</sup> ) op-hængt på stålstativ
Maling af gipsplader	28.4.2017	11:00 - <sup>1</sup>	Maling af 11,6 m <sup>2</sup> gipsplade (1,54 kg maling, glans 10)
Personbelastning	1.5.2017	09:47 - 15:02	Seks stillesiddende personer med PC'er
Luftfugtighedsændring	2.5.2017	10:00 - 21:15	Sænkning og efterfølgende stigning i den relative luftfugtighed
Tørrenngøring	3.5.2017	11:08 - 11:21	Samme aktivitet i samme tidsperiode som under vådrenngøring, men uden anvendelse af renngøringsmiddel
Ethanol	10.5.2017	12:30 - <sup>2</sup>	34,186 g ethanol (99%) fordampes

<sup>1</sup> Intet sluttidspunkt, da de malede plader er placeret i lokalet i yderligere to dage.

<sup>2</sup> Tidspunktet for, hvornår ethanolmængden er fordampet er ikke registreret.

## Baggrund

Under baggrundsmålingerne, udført hhv. d. 20. april og 9. maj 2017, foregik der ikke anden aktivitet end at én person trådte ind i lokalet for at udføre prøvetagningen og forlod det ganske få minutter senere. Tre gange under baggrundsmålingen var det nødvendigt kortvarigt at gå ind i lokalet. Udstyret og det enkle møblement, som var til stede under samtlige aktiviteter, var også tilstede i lokalet under baggrundsmålingerne.

## Stearinlys

Afbrændingen af stearinlys foregik ved at tre kronelys i hver deres messing lystage blev tændt. Afbrændingen foregik over en periode på 1,5 time. I de første 30 minutter var flammen på alle tre lys skærmet fra luftbevægelserne i lokalet med metalskærm og alufolie. I de næste 30 minutter var lysene ikke afskærmet og flammerne blev tydeligt påvirket af luftbevægelserne i tidsrummet. De sidste 30 minutter blev lysene igen skærmet, som det var tilfældet i de første 30 minutter. I figur 4 (tv.) kan tidspunktet, hvor afskærmningen af stearinlysene skete, ses. Denne aktivitet forventedes primært at forårsage dannelse af ultrafine partikler, og i mindre grad kemiske stoffer på gasform.

## Madlavning

Tilberedning af mad er en af de mange aktiviteter i boliger, som påvirker luftkvaliteten. I forbindelse med madlavning afgives forskellige stoffer. Dette kan blandt andet registreres i form af lugt. I forbindelse med madlavningen afgives derudover en mængde fugt i form af vanddamp.



For at simulere madlavning i boligen blev der udført en forenklet 'madlavning' i forsøgslokalet i form af opvarmning af 2 liter færdiglavet karrysuppe. Opvarmningen foregik i en gryde ved hjælp af en elektrisk kogeplade. Opvarmningen forløb over en periode på 1,5 timer under konstant omrøring af en person, som var til stede under hele forløbet. Kogepladens varmeafgivelse blev løbende manuelt justeret, således at suppen efter den første opvarmningsperiode kogte svagt (simrede) i hele perioden. Der registreredes en tydeligt lugt i lokalet. Lugten karakteriseredes som en kraftig krydret karrylugt. På baggrund af karakteren af madlavningen (opvarmning og let kogning af vandig opløsning) forventedes ingen nævneværdig partikelafgivelse fra selve maden. Fotografiet i figur 4 (th.) viser, hvordan omrøringen af suppen foregik.



Figur 4. Fotografier fra aktiviteterne med afbrænding af stearinlys (tv.) og madopvarmning (th.).

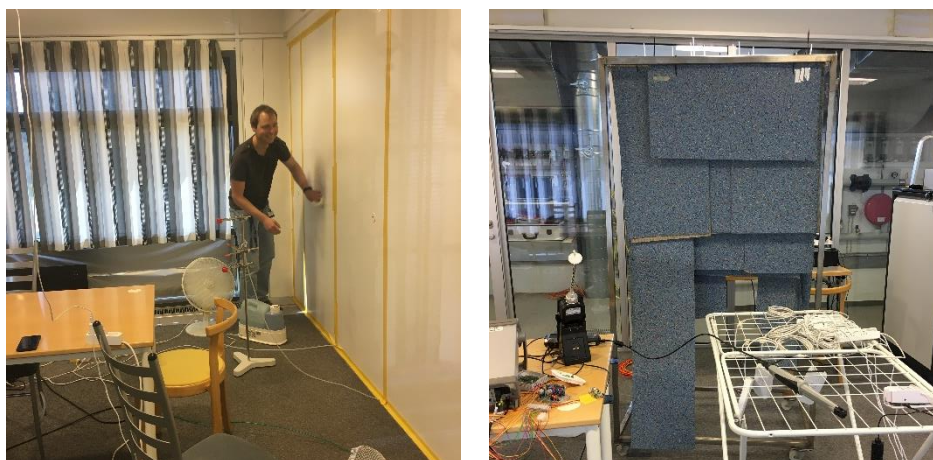
### Vådrensning

En brugsopløsning bestående af 60 ml universalrengøringsmiddel opblandet i fem liter vand, jf. producentens anvisning, blev anvendt til en almindelig rengøringsaktivitet. Rengøringsmidlet indeholdt duftstoffer, og aktiviteten medførte en tydelig lugt af rengøringsmidlet i lokalet. Forberedelse af brugsopløsningen foregik udenfor lokalet umiddelbart inden rengøringen. Rengøringen foregik ved, at en person afvaskede vægge og glasflader i lokalet med en klud opvredet i opløsningen. 240 ml af opløsningen blev brugt til afvaskningen. Vådrensningen tog 15 min og rengøringsopløsningen blev herefter fjernet fra lokalet. Fotografiet i figur 5 (tv.) viser rengøringsaktiviteten.

### Byggematerialer

For at eksponere følerne for afgang fra typiske byggematerialer blev en ældre brugt linoleumsgulvbelægning anvendt som kilde. Arealet af linoleumsgulvet (17 m<sup>2</sup>) svarede til det halve af gulvarealet i lokalet. Gulvbelægningen var monteret bagside mod bagside og ophængt på et stativ, der blev anbragt i forsøgslokalet af to personer. Efter 3 timer og 16 minutter blev stativet med gulvbelægningen fjernet fra lokalet igen af to personer. I figur 5 (th.) kan ses et fotografi af det ophængte linoleumsgulv under målingerne. Fra linoleum afgasser blandt andet organiske syrer og kemiske stoffer kaldet aldehyder, som bl.a. stammer fra materialets indhold af linolie.





Figur 5. Fotografier fra aktiviteterne med rengøring (tv.) og linoleumsgulvet (th.).

### Maling af gipsplader

Under en anden aktivitet blev følerne eksponeret for afgangningen fra malede gipsplader. Eksponeringen foregik ved, at 11,6 m<sup>2</sup> gipsplade blev malet med almindelig vægmaling, glans 10. Malingen blev åbnet og omrørt i to minutter i lokalet og herefter blev malingen hældt op i en bakke og efterfølgende påført pladerne med rulle. Påføring af malingen inkl. omrøring og ophældning tog 22 minutter. Ved vejning blev det bestemt, at i alt 1,54 kg maling blev påført pladerne. Kun personen, som udførte malingen, opholdt sig i lokalet i perioden. Herefter forblev de malede plader i lokaler i yderligere to dage. Vægmaling afgiver, udover fugt, bl.a. kemiske stoffer kaldet glykoler.

### Personbelastning

Følernes reaktion på stoffer afgivet fra personer blev undersøgt ved at seks personer opholdt sig i lokalet i fem timer og 15 minutter. Hver person havde en bærbar PC, som de stillesiddende arbejdede på under eksponeringen. Der var seks stole i lokalet under aktiviteten, således at alle kunne sidde ned. Ved mindre pauser i løbet af dagen, forlod kun en person lokalet ad gangen, mens en erstatningsperson trådte ind i lokalet, indtil personen, som forlod lokalet, var tilbage. Således var der konstant 6 personer til stede i lokalet. Der blev ikke spist i lokalet, men drukket vand. Mad, kaffe og te blev indtaget uden for lokalet.

### Ændring af luftfugtighed

Under forsøgene blev luften i forsøgslokalet befugtet med henblik på at opretholde en konstant relativ luftfugtighed. I dette forsøg blev følernes reaktion på en ændring af den relative luftfugtighed undersøgt. Ændring af den relative fugtighed foregik ved, at befugternes setpunkt blev ændret trinvist i løbet af perioden som angivet i tabel 5 herunder:

Tabel 5. Oversigt over ændringer i den relative luftfugtighed.

Tidspunkt for ændring	Ændring af indstilling
Kl. 10.00	50 % RF -> 30 % RF
Kl. 14.00	30 % RF -> 40 % RF
Kl. 14.20	40 % RF -> 50 % RF
Kl. 16.00	50 % RF -> 70 % RF
Kl. 21.15	70 % RF -> 50 % RF

## Tørrengøring

Tørrengøringen blev udført for at undersøge følernes påvirkning af tilstedeværelsen af den person, som udførte vådrengøringen. Samme person, som udførte vådrengøringen og maling af gipsplader, udførte aktiviteten. De samme overflader som tidligere var blevet rengjort under aktiviteten med vådrengøring, blev aftørret med en tør klud.

## Ethanol

Følernes reaktion på et enkelt kemisk stof blev undersøgt ved, at en afvejet mængde ethanol (34,186 g) blev doseret i en petriskål placeret på et bord i lokalet. Ethanolen fordampede passivt fra petriskålen, som forblev i lokalet til dagen efter.

### 4.5. Beskrivelse af forsøgsopstillingen

Følerne fra SGX Sensortech og AMS (2 stk. af hver) blev forbundet til hver deres til IC-meter (4 stk. i alt), som blev benyttet til at opsamle og transmittere output fra følerne. IC-metrene er i deres standardkonfiguration indstillet til at give 5 minutters gennemsnitsværdier af outputtet fra VOC-følernes. Der er taget udgangspunkt i måletidspunkterne for IC-meteret, som var koblet til SGX-1. IC-meteret, som var koblet til iAQ-2, målte på samme tidspunkter som SGX-1, mens SGX-2 og iAQ-1 var forskudt hhv. et og to minutter. Deres måleværdier er derfor blevet forskudt i forhold til tidspunktet. De resterende følere (7 stk.) og bokse (2 stk.) blev alle koblet til en datalogger fra Agilent Technologies (model 34970A). Agilent dataloggeren foretog en registrering en gang i minuttet og måleværdierne er midlet til 5 minutters gennemsnitsværdier. De 5 minutters gennemsnitsværdier er udvalgt så tidspunktet passer med IC-meteret, som var koblet til SGX-1 og iAQ-2.

### 4.6. Kontrolmålinger med PTR-TOF-MS

Proton Transfer Reaction-Time Of Flight-Mass Spektrometer (PTR-TOF-MS) er et kombineret samlings- og analyseapparat som bruges til at måle individuelle VOC'er i luft. Metoden gør det muligt løbende at monitorere og kvantificere VOC'er i med stor præcision og meget lav detektionsgrænse 10-50 ppt(v). Tidsopløsningen kan sættes ned til under 1 sec. PTR-TOF-MS virker, ved at der suges luft ind i et reaktions- og drivkammer hvor VOC-molekylerne kollideres med Hydronium ioner ( $H_3O^+$ ) fra en ionkilde. Under koalitionen overføres en proton ( $H^+$ ) til VOC-molekylet, som dermed bliver ioniseret, og Hydronium ( $H_3O^+$ ) bliver til almindeligt vand ( $H_2O$ ). VOC-ionen har nu en forøget masse med massen af en proton. Forudsætning for protonoverførslen er at VOC-molekylet har en større affinitet til proton end protons affinitet til vand, hvilket er tilfældet for de fleste organiske forbindelser. Dog er det ikke tilfældet for små kulbrinter som fx alkaner.

Efter ioniseringen tilføres samtlige af ionerne den samme energimængde ved en elektrisk puls. Energien omdannes til bevægelsesenergi og i TOF-MS'en måles flyvetiden (Time Of Flight) af VOC-ionerne, som er afhængig af massen (IONICON 2014). Flyvetiden og dermed massen kan bestemmes meget præcist. TOF-MS gør det muligt at adskille VOC'er med næsten samme molekylære masse (isobariske molekyler), men forskellig grundstofsammensætning (Bossi & Skov 2014). Molekyler med samme grundstofsammensætning fx Butanal (CAS-nr. 123-72-8) og 2-Butanone (MEK, CAS-nr 78-93-3), der begge har brutto formlen  $C_4H_8O$  inden ioniseringen, kan ikke identificeres individuelt med PTR-TOF-MS og såfremt de begge optræder i luften summeres de to stoffer.

PTR-TOF-MS'en foretog en måling hvert sekund. PTR-TOF-MS målingerne er herefter midlet til 5 minutters middelværdier. Minuttallet for PTR-MS-værdien angiver således middelværdien af de 5 foregående minutters målinger.

#### **4.7. Kontrolmålinger med opsamling af luftprøver og efterfølgende kemisk analyse**

Der er under aktiviteterne opsamlet luftprøver til analyse for flygtige organiske forbindelser (VOC'er). Luftprøverne er opsamlet ved at suge en kontrolleret mængde rumluft gennem Tenax-TA® adsorbenttrør. De anvendte pumper er af mærket Gillian, GilAir Plus.

VOC'er er i laboratoriet analyseret ved gaskromatografi-massespektrometri (GC-MS) i henhold til ISO 16000-6. Indoor Air – Part 6: Determination of volatile organic compounds in indoor air and test chamber air by active sampling on Tenax-TA® sorbent, thermal desorption and gas chromatography using MS/FID. Kvantificering er udført på baggrund af kalibrering med rene referencestoffer. Denne anvendte metode dækker alene, kemiske stoffer der kan adsorberes på Tenax-TA®, og som kan desorberes termisk. Metoden er egnet til at analysere flygtige organiske stoffer (VOC'er). GC-MS analysen blev udført af Fraunhofer WKI i Tyskland.

Der blev udtaget luftprøver på Tenax-TA® under baggrundsmålingerne samt under aktiviteterne med madlavning, vådrengøring, byggematerialer, maling og personbelastning. Der blev ikke udtaget luftprøver under aktiviteterne med stearinlysafbrænding, luftfugtighedsændring, tørrengøring og fordampning af ethanol.

## 5. Resultater og diskussion

I det følgende præsenteres måleresultaterne fra de forskellige aktiviteter. For hver føler præsenteres måleresultater registreret i en periode fra 30 minutter før aktiviteten start og frem til kl. ca. 22. Måleresultater er angivet som 5 minutters gennemsnitsværdier, hvilket er en beregnet gennemsnitsværdi fra de foregående 5 minutters målinger.

Derudover er målingerne fra de forskellige følere sammenholdt med resultater fra både PTR-MS (ligeledes 5 minutters gennemsnitsværdier) og laboratorieanalyse af luft opsamlet på Tenax TA® adsorbenttrør. Resultaterne af opsamling på Tenax-TA® er angivet som en gennemsnitskoncentration for hele opsamlingsperioden.

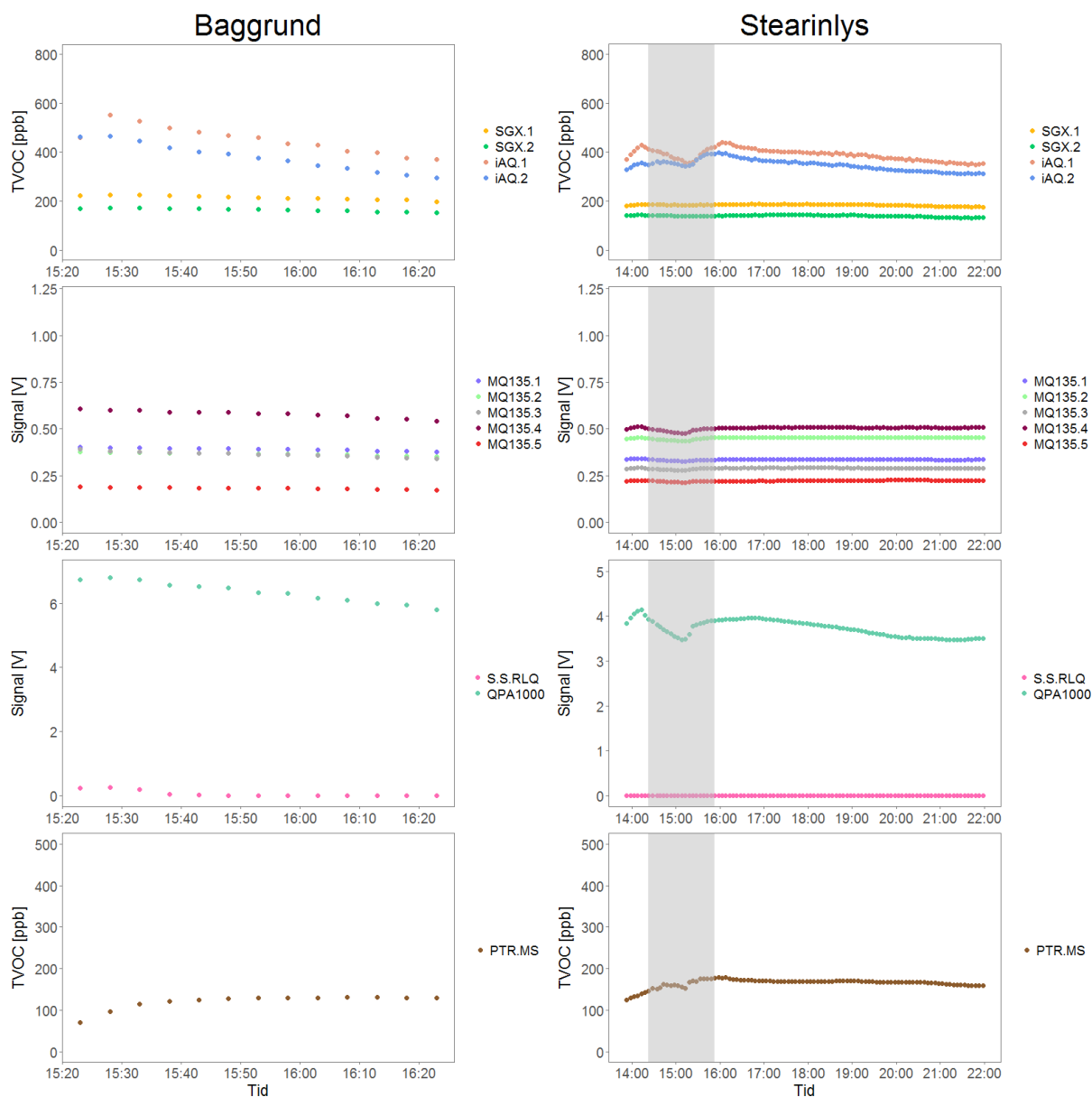
### 5.1. Resultater og vurdering af kontinuerede målinger med VOC-følere og PTR-MS

Følerne af mærket Winsen gav et outputsignal på en tre-trins skala, lav, middel eller høj. Det blev vurderet, at føleren, på grund af outputsignalets lave opløsning, ikke var egnet til at blive inkluderet i dette projekt. De opnåede resultater er ikke behandlet yderligere.

Forud for påbegyndelsen af de egentlige aktiviteter blev baggrundsniveauet af kemiske stoffer i luften i det ubenyttede lokale målt (benævnt Baggrund). På figur 6 (tv.) ses baggrundsmålingen fra de forskellige følere og PTR-MS.

I den tidsperiode (en time), som er vist på figuren, blev der samtidigt opsamlet luftprøver til laboratorieanalyse, hvilket medførte, at en person trådte ind i lokalet umiddelbart inden for at starte opsamlingen af luftprøve. Personens indtræden i lokalet registreres af iAQ og QPA1000 følerne og til dels af PTR-MS, hvilket ses af figuren. PTR-MS måleserien er stigende i starten og holder sig konstant resten af perioden, mens både iAQ og QPA1000 følerne falder i perioden. Det skal bemærkes, at iAQ-følerne og QPA1000 boksen starter på et højt outputsignal (høj koncentration), i forhold til PTR-MS-målingen og de senere målinger med QPA1000 under aktiviteterne. For at kunne vise baggrundsmålingen for QPA1000 er maksimumværdien på 'signal'-aksen forhøjet på denne figur i forhold til akseværdierne på figurer for de andre aktiviteter. De øvrige følere har ikke registreret ændringer.

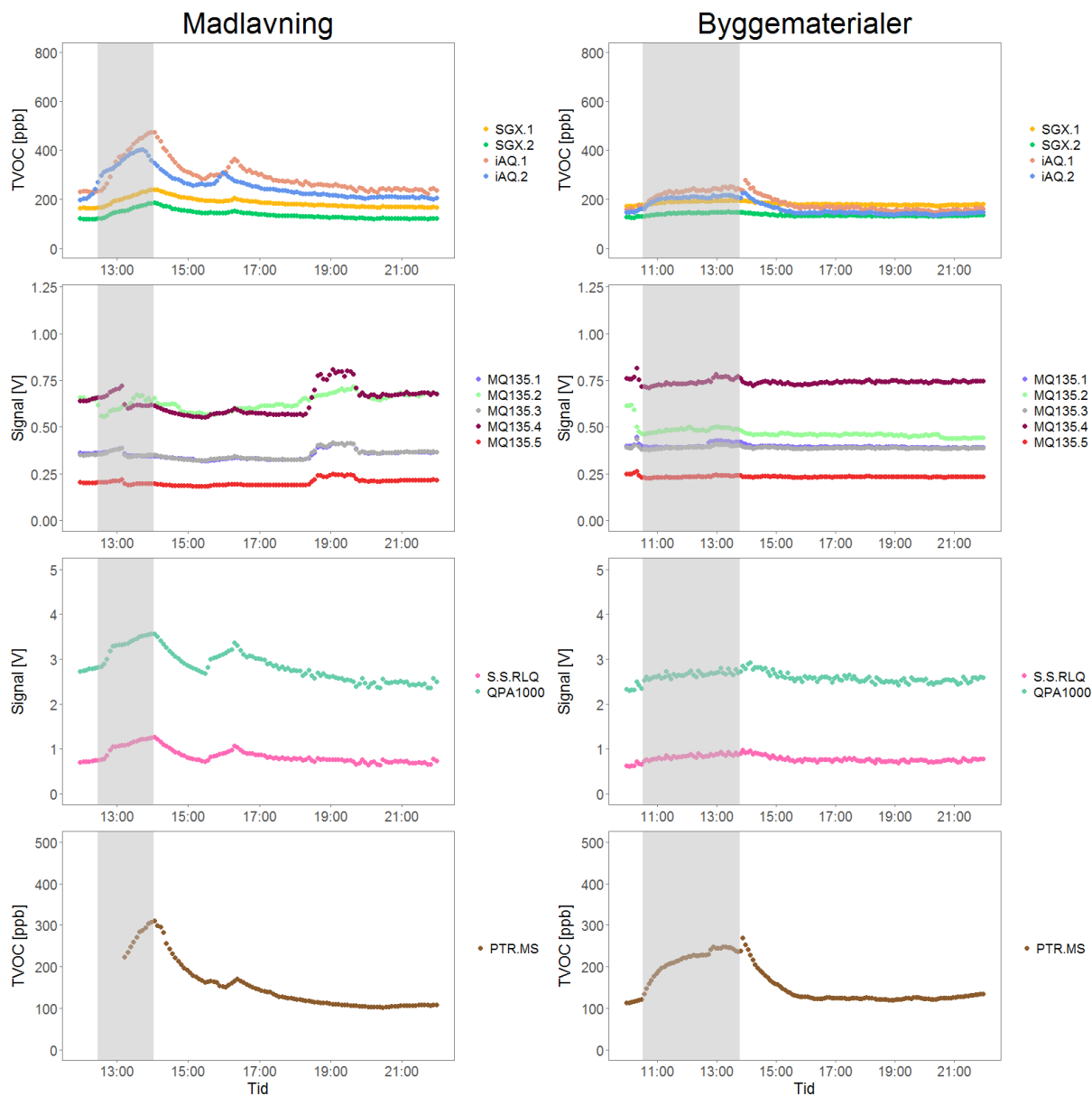
På figur 6 (th.) ses resultaterne af aktiviteten med afbrænding af stearinlys. En person indtrådte i lokalet ved aktivitetens start og efter hhv. ½, 1 og 1½ time. Efter 1½ time blev lysene slukket. Aktivitetsperioden er angivet med en grå markering på figuren.



Figur 6. Føler- og PTR-MS-resultater under baggrundsmålingen (tv.) og aktiviteten med afbrænding af stearinlys (th.) som funktion af tiden. Den grå markering repræsenterer tidsrummet for aktiviteten.

For SGX-følerne og 4 af MQ135-følerne blev der ikke observeret en målbar forringelse af luftkvaliteten under aktiviteten. Under aktiviteten steg koncentrationen af ultrafine partikler fra ca.  $2.500 \text{ pt/cm}^3$  til op til ca.  $160.000 \text{ pt/cm}^3$ . For iAQ-følerne, QPA1000, MQ135-4 og PTR-MS ses en stigning inden aktiviteten og efterfølgende et fald frem mod midten af aktivitetsperioden for herefter at stige igen. Tidspunkterne for ændringerne fra stigning til fald og omvendt afspejler ikke præcist aktiviteten. Det var ikke ventet, at følerne ville reagere på en ændring af partikelkoncentrationen, så den observerede ændring skyldes muligvis personens tilstedeværelse. Der har tilsyneladende været en fejl på S+S RLQ-boksen under aktiviteten, idet der ikke er registreret ændringer i signalet.

Under aktiviteten med madlavning ses som forventet en opbygning af koncentrationen i aktivitetsperioden og et fald efter aktiviteten er ophørt (figur 7 tv.). PTR-MS startede pga. en fejl først midt i aktivitetsperioden, hvilket er årsagen til de manglende målepunkter før og i begyndelsen af aktiviteten.

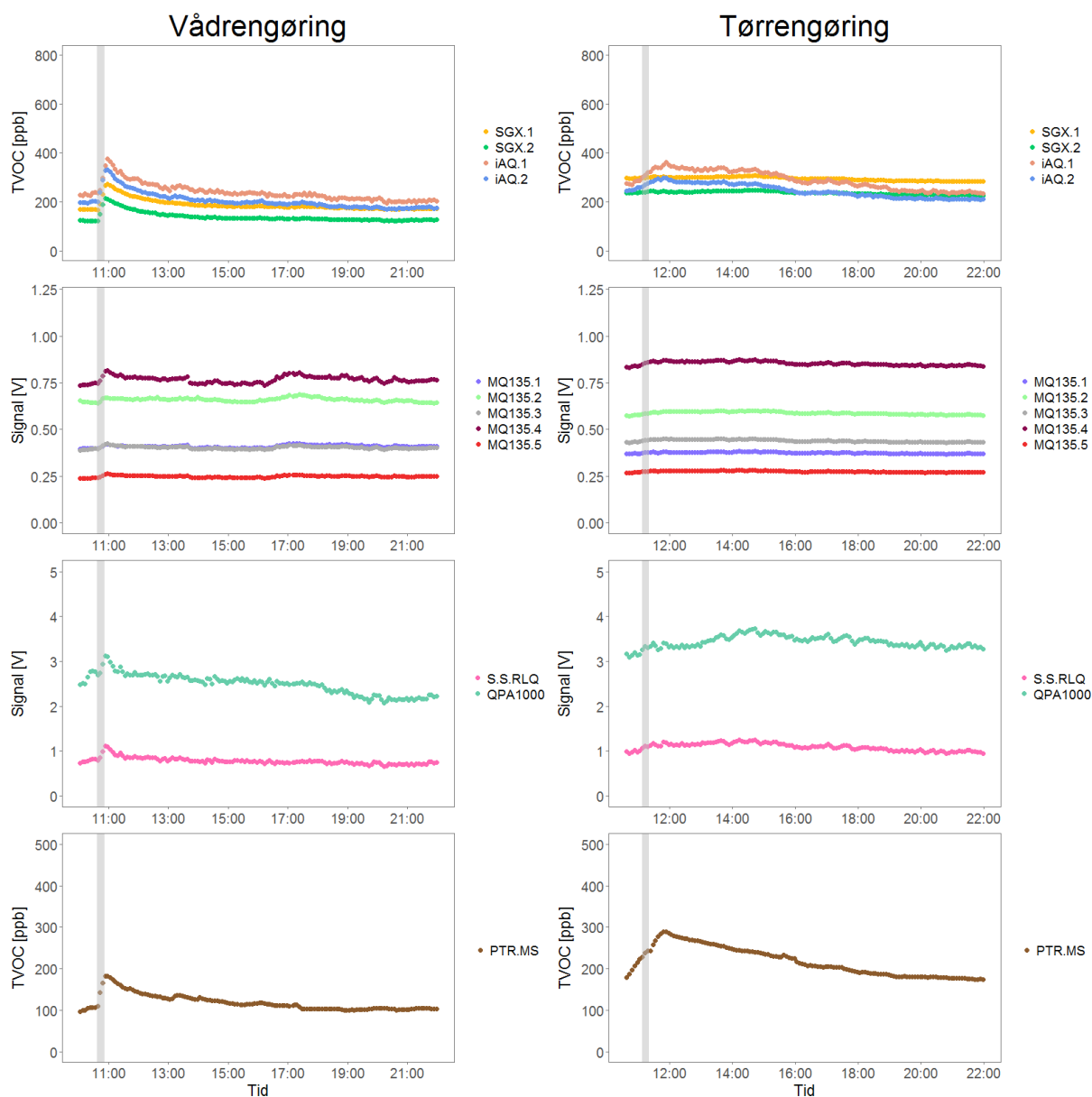


Figur 7. Føler- og PTR-MS-målingerne under madlavning (tv.) og aktiviteten med byggematerialer (th.) som funktion af tiden.

Kurven for MQ135-1 og MQ135-3 er stort set sammenfaldende. Efter kl. 18 ses en tydelig ændring i signalet fra samtlige MQ135-følere, som ikke ses for de andre følere. Kl. ca. 16.30 ses til gengæld en mindre ændring for de øvrige følere. Årsagen til disse variationer kan ikke forklares.

På figur 7 (th.) ses en opbygning i koncentrationen efter, at linoleumsgulvet er placeret i lokalet. For PTR-MS-målingerne er denne opbygning større end for TVOC-følerne. Efter linoleumsgulvet er fjernet fra lokalet falder koncentrationen. Samme mønster ses for alle følere, dog i varierende grad og mindst for MQ135-følerne.

Under vådrengøringen ses på figur 8 (tv.) en opbygning i koncentrationen under aktiviteten med et efterfølgende fald for samtlige følere og PTR-MS. Under rengøringsaktiviteten blev der brugt et limonenholdigt rengøringsmiddel, hvilket gav anledning til en kraftig lugt af citrus i lokalet under og efter aktiviteten. Aktiviteten med tørrengøring (figur 8 th.) blev udført for at undersøge hvor stor en del af følernes udslag under vådrengøringen, der kunne henføres til personens tilstedeværelse.

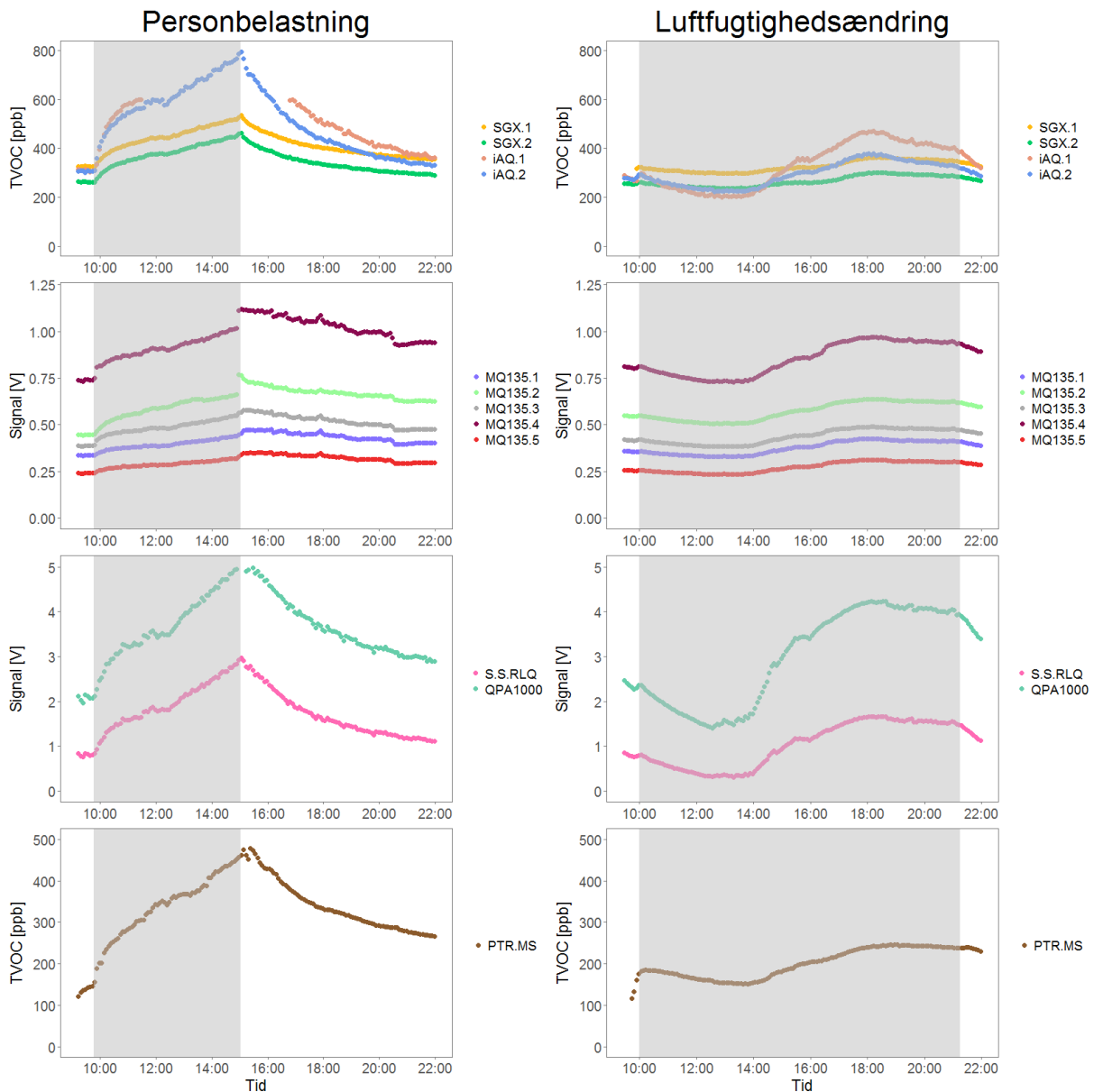


Figur 8. Føler- og PTR-MS-målinger under aktiviteter med hhv. vådrengøring (tv.) og tørrengøring (th.).



Der blev udført samme aktivitet som under vådrengøringen, men betingelserne for målingerne var forskellige, da der var en højere rumtemperatur under tørrengøringen ift. vådrengøringen, hhv. 22,7 og 25 grader. Derudover ses der en mere eller mindre udpræget stigning i signalet i perioden før, under og efter tørrengøringsaktiviteten for samtlige følere og mest udpræget for PTR-MS-målingerne. Der ses ingen ændring i tendens i målesignalerne under selv tørrengøringsaktiviteten og det vurderes derfor, at aktiviteten ikke har påvirket følerne, men at ændringen i signalerne skyldes andre forhold, som det ikke har været muligt at identificere.

På figur 9 (tv.) ses resultaterne af personbelastningen og igen ses en tydelig opbygning og efterfølgende fald i signalet for samtlige måleserier (følere og PTR-MS).



Figur 9. Føler- og PTR-MS-målinger under aktiviteter med personbelastning og luftfugtighedsændring.

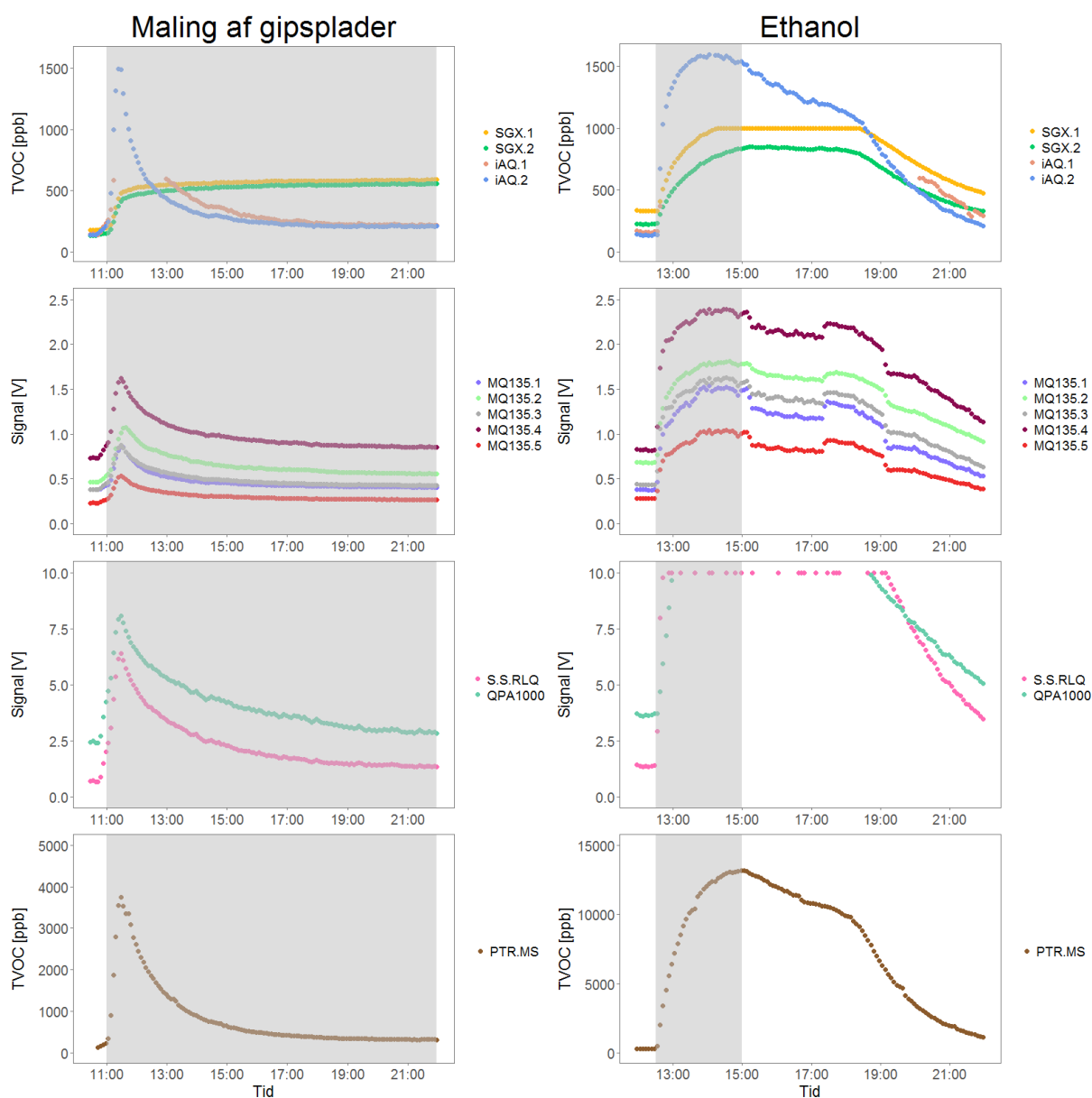
For flere af følerne ses frem mod kl. 12 en koncentrationsopbygning mod noget, der ligner et stabilt niveau. Efter kort tid ses herefter en tilnærmelsesvis lineær koncentrationsstigning. Det kan skyldes, at der fra kl. 12.25 og hvert 15-20. minut udskiftes en person i lokalet, med en person, som har spist frokost. Den konstante stigning i den registrerede forurening i lokalet kan muligvis skyldes en øget afgivelse af bioeffluenter (stofskifteprodukter) fra personerne pga. indtagelsen af mad. Stigningen kan også skyldes, at personerne bringer andre forureninger med ind i forsøgslokalet. Tendensen ses for samtlige følere og PTR-MS på nær iAQ-1, der har udfald i den periode af aktiviteten, hvor koncentrationen overstiger 600 ppbv og indtil koncentrationen efterfølgende er faldet til under 600 ppbv. MQ135-2 og MQ135-4 har desuden et uforklarligt spring på kurven på det tidspunkt, hvor aktiviteten afsluttes.

Der blev udført aktivitet med ændringer i den relative luftfugtighed (figur 9 th.) for at undersøge følerens reaktion på ændringer i luftfugtigheden. Der ses ændringer i samtlige af måleserierne. Målingerne med PTR-MS viser også en, om end begrænset, effekt af ændringen i den relative luftfugtighed. Ændringen i PTR-MS-signalet kan skyldes en egentlig ændring i baggrundskoncentrationerne i lokalet, hvor særligt de vandopløselige (polære) VOC'er kan blive påvirket (Markowicz & Larson, 2014). Ændringerne kan også skyldes, at PTR-MS-målemetoden, hvor der benyttes Hydronium ioner ( $H_3O^+$ ), kan være påvirket af ændringerne i fugtighed. Som det ses af figur 9 (th.) er effekten af aktiviteten forskellig for de forskellige føler-typer. Dog er der størst effekt på Figaro-følerne, som sidder i både S+S RLQ og QPA1000 boksene samt iAQ-1, og der ses ligeledes forskellig effekt på de fem MQ135-følere indbyrdes.

Under aktiviteterne med maling af gipsplader og fordampning af ethanol blev de højeste koncentrationer af TVOC registreret. Maksimumværdierne på grafernes y-akser er derfor fordoblet i figur 10 i forhold til figur 6-9. Maksimumværdien på y-aksen for PTR-MS-målingerne er dog øget 10 gange under malingsaktiviteten og 30 gange under fordampningen af ethanol, for at graferne kan indeholde kurverne.

Den grå markering i figur 10 th. angiver, at de malede gipsplader forblev i lokalet i hele den viste periode. Der ses for samtlige måleserier en stigning i TVOC-koncentration, med et efterfølgende fald. Undtagen for SGX-følerne, hvor koncentrationen ikke falder efterfølgende i måleperioden. Der er igen udfald på iAQ-1-føleren grundet koncentrationer over 600 ppbv.

På figur 10 th. angiver starten på den grå markering tidspunktet for dosering af ethanol, mens tidspunktet for, hvornår ethanol var fordampet helt (slutningen på den grå markering), er estimeret ud fra måleserierne. For følerne Figaro og SGX-1 overstiger koncentrationen af ethanol følerens maksimale målbare koncentration. PTR-MS-måleserien overstiger langt koncentrationerne, som blev målt under aktiviteten med maling af gipsplader. Dette er ikke tilfældet for de resterende følere. Her er koncentrationsstigningen i samme størrelsesorden, som under maling af gipsplader.



Figur 10. Følre- og PTR-MS-målinger under aktiviteter med maling af gipsplader og fordampning af ethanol.

Der er en tydelig forskel på måleseriernes niveau for de forskellige følere af samme type, hvilket gør sig gældende under alle aktiviteter. Der er størst spredning på MQ135-følterne imellem ift. SQX- og iAQ-følterne. Men der er også væsentlig flere følere af MQ135 (5 stk.), mens der kun er 2 stk. af hver af SQX- og iAQ-følterne. For boksene S+S RLQ og QPA100 er det ikke muligt at afgøre om variationen skyldes selve føleren (Figaro) eller forskel på de to bokse.

## 5.2. Sammenligning af resultater fra følere og PTR-MS

For hver aktivitetsperiode, dvs. i tidsrummet fra 30 min. før aktivitetens start og indtil kl. 22, er måledata fra følerne sammenholdt med måledata fra PTR-MS. Pearsons Korrelationskoefficient kan benyttes til at vurdere kontinuerte dataserier. Metoden er velegnet til at vurdere, hvor meget én variabel ændrer sig, når en anden variabel ændres. Altså en kvantificering af i hvilken grad to variable er relateret til hinanden. Pearsons Korrelation tager ikke højde for om niveauerne er forskellige, men udelukkende om der er en sammenhæng mellem stigning og fald i de to måleserier. Dermed kan niveauerne i den ene måleserie være langt højere end i den anden uden at korrelationen bliver svag af den grund.

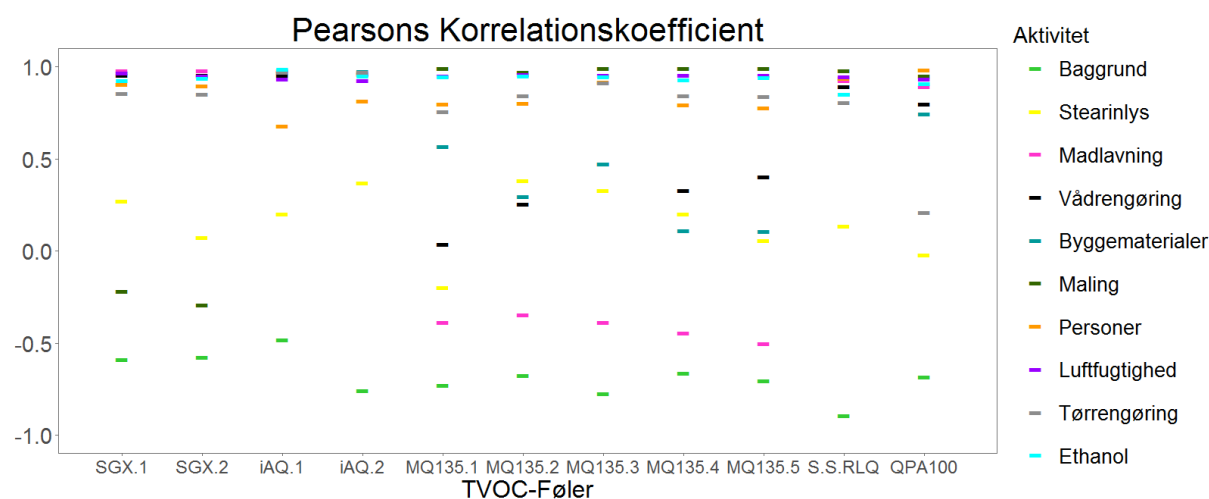
Koefficienten antager værdier mellem -1 og 1, hvor værdien 0 angiver, at der ikke er nogen korrelation, mens værdierne 1 og -1 angiver en absolut korrelation. Negative værdier af Pearsons Korrelationskoefficient angiver omvendt korrelation, dvs. at den ene variabel bliver større, når bliver den anden mindre.

Følgende graduering kan benyttes til at tolke Pearsons Korrelationskoefficient:

<0,3	ingen korrelation
0,3 - <0,5	svag korrelation
0,5 - <0,7	moderat korrelation
≥0,7	stærk korrelation

Ved sammenligning af følersignalet udvikling over tid med måledata fra PTR-MS, bør Pearsons Korrelationskoefficient være positiv og så tæt på værdien 1 som muligt for en fornuftig korrelation mellem de to målemetoder.

Pearsons Korrelationskoefficient er beregnet for hver aktivitets periode og angivet i Figur 11.



Figur 11. Pearsons Korrelationskoefficient for hver af følerne beregnet ud fra måledata fra PTR-MS.

Der er beregnet en koefficient for samtlige aktiviteter for hver af følerne. Dog er en del af værdierne sammenfaldende mellem ca. 0,9 og 1, og værdierne kan derfor ikke visuelt adskilles i figur 11. Det ses af figuren, at baggrundsmålingen for alle følerne har en negativ værdi, hvormed korrelationen er omvendt, dvs. en stigning i den ene dataserie betyder et fald i den anden. Dog skal det bemærkes, at der kun forekom små variationer i koncentrationerne for baggrundsmålingen over tid, jf. figur 6, hvilket gør det vanskeligt at afgøre om der er en sammenhæng (korrelation) mellem måledata. Den samme tendens gør sig gældende for aktiviteten med afbrænding af stearinlys, hvor der ses en svag korrelation for samtlige typer af følere.

Der ses ligeledes en omvendt korrelation for begge SGX-følere under aktiviteten med maling af gipsplader. Af figur 10 ses der også en meget anderledes udvikling i koncentrationen for SGX-følerne ift. både PTR-MS-målingerne og de andre følertyper. Årsagen til dette kendes ikke.

For samtlige fem MQ135-følere havde flere af aktiviteterne en svagere korrelation med PTR-MS-målingerne sammenlignet med de andre følertyper. Udover baggrund og stearinlys, var der en svagere korrelation for aktiviteterne med madlavning, byggematerialer samt vådrengøring. De resterende følere; SGX, iAQ og Figaro (hhv. S+S RLQ og QPA100) har markant bedre korrelation med PTR-MS-målingerne end MQ135-følerne og de adskiller sig ikke meget fra hinanden. iAQ-følerne vurderes en anelse bedre end de andre følere ud fra denne vurderingsmetode og det kan blandt andet skyldes, at iAQ-følerne reagerede kraftigst på tilstedeværelse af mennesker i lokalet. iAQ-følerne kunne således detektere, når en person trådte ind i lokalet for at holde aktiviteterne i gang, hvilket ligeledes var tilfældet for PTR-MS.

Under aktiviteterne med personbelastning, maling af gipsplader og fordampning af ethanol var der episoder, hvor iAQ-1 målte værdier over 600 ppbv og signalet faldt ud grundet følerens konfiguration. I perioder, hvor signalet fra føleren eller PTR-MS har manglet, er måledata ekskluderet. Dermed udregnes Pearsons Korrelationskoefficient for iAQ-1 kun på et begrænset antal målepar, som er under stigning og efterfølgende fald i koncentration for disse aktiviteter, hvilket antages at være med til at styrke korrelationen for denne føler.

SQX og iAQ-følerne er de eneste med et outputsignal omregnet til TVOC-koncentration i ppbv, det gør det muligt at sammenligne resultaterne direkte med PTR-MS-resultaterne. Niveauerne, som er målt med SGX-følerne, ligger under de fleste aktiviteter tættere på TVOC-niveauet målt af PTR-MS, end iAQ-følerne. Under aktiviteten med byggematerialer ligger iAQ-følerne dog tættere på PTR-MS-resultaterne end SGX-følerne. Under aktiviteterne med maling af gipsplader og ethanol, hvor koncentrationerne målt med PTR-MS var meget høje, hhv. 4.000 og 13.000 ppbv, ligger både iAQ- og SGX-følerne dog langt fra PTR-MS-niveauerne. IAQ-2 ligger dog tættest på PTR-MS-resultaterne.

### 5.3. Sammenligning af føler- og PTR-MS-målinger med analyse af Tenax-TA®

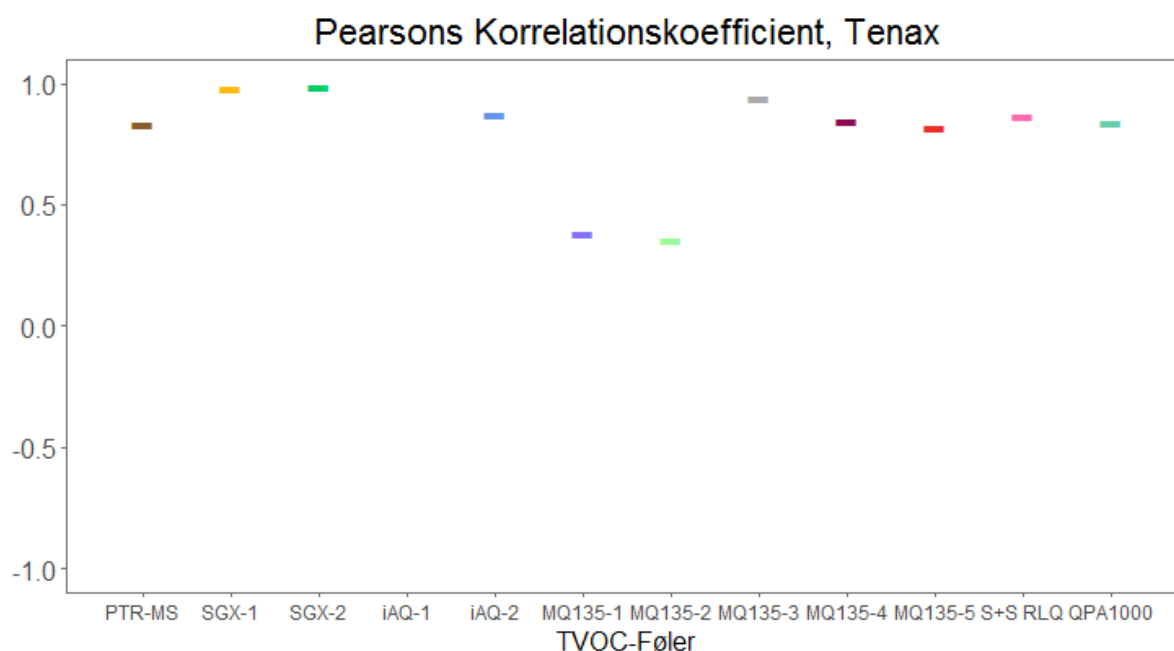
Ved opsamlingen på Tenax-TA® og efterfølgende kemisk analyse på GC-MS blev der identificeret i alt 90 individuelle VOC'er under de forskellige aktiviteter. Der blev identificeret aldehyder, ketoner, alkoholer, glycoler, -ethere, -estere, alifatiske og aromatiske kulbrinter, terpener, organiske syrer samt enkelte cycloalkaner. Derudover blev der detekteret både identificerede og uidentificerede VOC'er. Koncentrationen (summeret) af de uidentificerede VOC'er i  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  udgjorde i gennemsnit 5 % af TVOC. Under aktiviteten med maling af gipsplader blev der fundet den største procentvise andel af uidentificerede komponenter svarende til ca. 10 % af TVOC.

Generelt lå både antallet af identificerede komponenter og koncentrationerne af dem markant højere under aktiviteten med maling af gipsplader. Dog var antallet og koncentrationerne af terpener højere under aktiviteten med vådrengøring, og for de organiske syrer var antallet og koncentrationerne højest under aktiviteten med linoleumsgulvet.

Fra laboratoriet er resultaterne angivet som massebaserede koncentrationer i  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , mens alle øvrige målinger er volumenbaseret og angivet som koncentrationer i parts pr. billion (ppbv). Derfor er alle identificerede komponenter ved Tenax-målingerne omregnet til koncentrationer i ppbv. Dette er ikke muligt for de komponenter, som ikke er identificeret (fordi deres mol-masse dermed ikke kendes), og disse holdes derfor ude af sammenligningen. Ud fra de identificerede VOC'er er der beregnet en sum (TVOC) af alle komponenter, også de organiske forbindelser, som er kategoriseret som VVOC.

Tenax-målingerne, der giver en gennemsnitskoncentration over opsamlingsperioden, kan sammenlignes med følernes gennemsnitssignal i samme opsamlingsperiode. Derved fås parvise målinger, som kan sammenlignes ved beregning af Pearsons Korrelationskoefficient. Dog drejer det sig om ganske få korttidsmålinger, og sammenligningen bør ikke tillægges stor vægt ift. korrelationskoefficienter fra sammenligningen med PTR-MS i figur 11, som er baseret på langt flere målepar.

Figur 12 viser beregnede korrelationskoefficienter for de enkelte følere. Korrelationskoefficienterne er baseret på data fra aktiviteterne 'baggrund', 'madlavning', 'vådrengøring', 'byggematerialer' og 'personbelastning' samlet under et for hver føler. Dermed er Pearsons Korrelationskoefficient udregnet på ganske få parvise målinger. Udover de forskellige følere er korrelationskoefficienten også udregnet for PTR-MS.



Figur 12. Pearsons Korrelationskoefficient for hver føler og PTR-MS beregnet på baggrund af parvise målinger med opsamling på Tenax-TA® adsorbenttrør.

Da iAQ-1's måleinterval, på grund af en konfigurationsindstilling, maksimalt kunne nå et signal svarende til 600 ppbv, blev der ikke registreret et signal under aktiviteten med personbelastning i perioden, hvor der blev udtaget prøver på Tenax TA®. For de 4 resterende aktiviteter kunne der ikke registreres en egentlig korrelation med opsamlingen på Tenax TA®. MQ135-1 og MQ135-2 havde en svag korrelation, mens de resterende følere og PTR-MS havde stærk korrelation med Tenax-målingerne. Dette er dog baseret på få målinger og dermed skal vurderingen ikke tillægges for stor værdi.

Målingerne af VOC-koncentrationer med opsamling på Tenax TA® blev desuden brugt til at identificere individuelle komponenter målt med PTR-MS.



## 6. Samlet vurdering

De undersøgte (prisbillige) MOS-følere har vist at være i stand til at registrere ændringer i luftens indhold af flygtige organiske forbindelser, og for de flestes vedkommende at fremkomme med samme responsmønster, som det pt. mest avancerede måleudstyr til kontinuerte målinger af VOC'er i luften (PTR-TOF-MS). Følernes havde dog visse begrænsninger. Der var blandt andet store forskelle i, hvordan de forskellige fabrikater af MOS-følere reagerede på samme kemiske sammensætning i luften, og på koncentrationer af forskellige VOC'er. Der er ligeledes forskel på, hvordan forskellige eksemplarer af følere af samme fabrikat (der burde være identiske) reagerer på samme eksponering. Nogle af følerne har fx en større reaktion på forureninger afgivet fra mennesker end andre.

Der er endvidere også fundet forskelle i, hvor følernes øvre grænser går og om der sendes et signal eller om signalet falder ud ved eksponering over følernes maksimale målegrænse (mætning).

Der blev observeret forskel på, hvor stor indflydelse relative luftfugtighed havde på følernes outputsignal. Følernes viste, som forventet, ikke reaktion på en stor stigning i antallet af ultrafine partikler i luften. Undersøgelserne i nærværende projekt er søgt udført ved konstant temperatur. Effekten af ændret temperatur på følernes outputsignal er derfor ikke undersøgt.

Den sparsomme information fra leverandørerne om følerne og forskellene i signalet fra følere af samme type, gør det vanskeligt at tolke outputsignalet og gør det nødvendigt at teste følernes reaktion på kendte eksponeringer, inden de kan bruges til vurdering af luftkvaliteten og evt. som styresignal til behovsstyring af ventilation. Der var også forskel på niveauerne af TVOC målt med PTR-MS og de TVOC-ækvivalente koncentrationer fra følerne med dette output. Under nogle af aktiviteterne var niveauerne af følernes output og PTR-MS-resultatet mere sammenfaldende, end for andre.

De fleste af følerne var gode til at registrere ændringer i luftkvaliteten, mens reaktionen på et uændret forureningsniveau er mere tvivlsom, da der observeredes markante forskelle i de koncentrations-/outputsignalniveauer som følerne leverede. Desuden giver en TVOC-koncentration ikke oplysninger om, hvilke kemiske stoffer, der findes i luften og i hvilke koncentrationer de individuelle kemiske stoffer findes. Man kan derfor ikke på baggrund af følernes outputsignaler afgøre om luftkvaliteten er acceptabel, eller bestemme hvilken luftmængde der er nødvendig for at opretholde en given luftkvalitet.

## 7. Referencer

ASTM standard E741-11. Standard Test Method for Determining Air Change in a Single Zone by Means of a Tracer Gas Dilution Method. American Society for Testing and Measuring.

Blas M.d., Navazo M., Alonso, L., Durana, N., Gomez, M.C. & Iza, J. (2012) Simultaneous indoor and outdoor on-line hourly monitoring of atmospheric volatile organic compounds in an urban building. The role of inside and outside sources. *Science of The Total Environment* 426: 327-335.

Bossi, R., & Skov, H. (2014). PTF-TOF-målinger på Villum Research Station. *Dansk Kemi* nr. 12, 2014.

Herberger, S., Herold, M., Ulmer, H., Burdack-Freitag, A., Mayer F. (2010). Detection of human effluents by a MOS gas sensor in correlation to VOC quantification by GC/MS *Building and Environment* 45: 2430-2439.

IONICON Analytik Ges.m.b.H. Manual: Fundamentals of PTR-MS. PTR-QMS & PTR-TOF (incl. SRI). 5/9/2014.

Kolarik J. (2014) CO<sub>2</sub> Sensor versus volatile organic compounds (VOC) sensor – analysis of field measurements data and implications for demand controlled ventilation. *Proceedings of Indoor Air 2014*.

Markowicz, P., Larson L. (2014) Influence of relative humidity on VOC concentrations in indoor air. *Environmental Science and Pollution Research* 22: 5772-5779.

Painter, B., Brown, N. & Cook M.J. (2012). Practical application of a sensor overlay for building monitoring and commissioning. *Energy and Buildings* 48: 29-39.