Aalborg Universitet

AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Forsegling af skjult skimmelsvampevækst

Andersen, Birgitte; Hjerrild Smedemark, Signe; Jensen, Nickolaj Feldt; Andersen, Helle Vibeke

Creative Commons License
Ikke-specificeret

Publication date:
2022

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

Link to publication from Aalborg University

Citation for published version (APA):
Andersen, B., Hjerrild Smedemark, S., Jensen, N. F., & Andersen, H. V. (2022). *Forsegling af skjult skimmelsvampevækst*. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Nr. 2022:11

General rights
Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy
If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

Downloaded from vbn.aau.dk on: April 18, 2024

BUILD

RAPPORT

2022:11

Forsegling af skjult skimmelsvampevækst

Birgitte Andersen, Signe Hjerrild Smedemark, Nickolaj Feldt Jensen & Helle Vibeke Andersen.

FORSEGLING AF SKJULT SKIMMELSVAMPEVÆKST

Birgitte Andersen, Signe Hjerrild Smedemark,
Nickolaj Feldt Jensen & Helle Vibeke Andersen

BUILD Rapport 2022:11
Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet
2022

TITEL	Forsegling af skjult skimmelsvampevækst
SERIETITEL	BUILD Rapport 2022:11
FORMAT	Digital
UDGIVELSESÅR	2022
UDGIVET DIGITALT	April 2022
FORFATTER	Birgitte Andersen, Signe Hjerrild Smedemark, Nickolaj Feldt Jensen & Helle Vibeke Andersen
SPROG	Dansk
SIDETAL	59
LITTERATURHENVISNINGER	Side 43-45
EMNEORD	Skimmelsvampe, Fugt, Renovering, Boliger
ISBN	978-87-563-2034-4
ISSN	2597-3118
FOTO	Birgitte Andersen & Helle Vibeke Andersen
OMSLAGSILLUSTRATION	Andrew Small
UDGIVER	Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post build@build.aau.dk www.build.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven.

INDHOLDSFORTEGNELSE

FORORD 5

1 INTRODUKTION 8
1.1 Problemformulering 8
1.2 Formål 8
1.3 Afgrænsning 8

2 BAGGRUNDSVIDEN 10
2.1 Skimmelsvampebiomasse 10
2.1.1 Detektion af partikler, skimmelsporer og -fragmenter 11
2.2 Flygtige organiske forbindelser (VOCer) 12
2.2.1 Detektion af VOCer 13
2.3 Forsegling af skimmelsvampevækst 13

3 MATERIALER OG METODER 16
3.1 Byggematerialer og forseglingsprodukter 16
3.2 Forsøgsopstilling 16
3.3 Analysemetoder 17
3.4 Partikel- og biomasseanalyser 17
3.4.1 Prøveforberedelse 17
3.4.2 Partikelmåling i CLIMPAQ kammer 18
3.4.3 Biomassemåling i CLIMPAQ kammer 19
3.4.4 Kontrolmålinger laboratorieluft og trykluft 19
3.4.5 Materialer uden behandling (forsøg 1) 19
3.4.6 Materialer med skimmelsvampevækst (forsøg 2) 19
3.4.7 Materialer med skimmelsvampevækst og overfladebehandling (forsøg 3) 20
3.5 Materiale-diffusionsanalyser 20
3.5.1 Prøveforberedelse 20
3.5.2 Forsøgsopstilling 20
3.5.3 Måling af lufthastigheden i CLIMPAQ kamrene 22
3.5.4 Temperatur og lufthastighed 22
3.5.5 TVOC-måling og CO_2 måling 22
3.5.6 Måling ad luftskiftet i CLIMPAQ kamrene 22
3.5.7 Sammenhæng mellem ethanol og TVOC 23
3.5.8 Diffusionskoefficient 23
3.5.9 Materialer uden behandling 23
3.5.10 Materialer med overfladebehandling 24
3.6 Fejlkilder for TVOC-målinger 24
3.6.1 Temperatur og RF 24
3.6.2 Baggrundsniveau af TVOC 24
3.6.3 Afsmitning 24

4 RESULTATER **26**
4.1 Identifikation af skimmelsvampearter og deres sporestørrelser 26
4.2 Partikler og sporer fra materialer 26
4.3 Kontrol- og enkeltmålinger 28
4.4 Diffusion af ethanol gennem materialerne 29
4.4.1 TVOC-målinger 29
4.4.2 D_{eff} og ubehandlede materialer 32
4.4.3 D_{eff} og behandlede gipsplader 33
4.4.4 Temperatur og RFs indflydelse på den effektive diffusionskoefficient 34
4.5 Omregning af TVOC-koncentrationen til ethanol 34

5 DISKUSSION **36**
5.1 Forsegling af skimmelsvampevækst 36
5.1.1 CLIMPAQ kamrene 36
5.1.2 Skimmelsvampevækst på byggematerialer 36
5.1.3 Mycometermåling 37
5.1.4 Partikelmåling 37
5.2 Forsegling af flygtige stoffer 37
5.2.1 Byggematerialerne 37
5.2.2 Forseglingsprodukterne 37
5.2.3 Fejlkilder til diffusionsbestemmelsen 38

6 KONKLUSION **42**

7 LITTERATURLISTE **44**

BILAG 1 **48**
Koncentrationen af TVOC 48

BILAG 2 **50**
Luftskifte 50

BILAG 3 **51**
Temperatur og RF 51

BILAG 4 **54**
Den effektive diffusionskoefficient 54

BILAG 5 **56**
Omregning af TVOC til ethanol 56

BILAG 6 **57**
Den effektive diffusionskoefficient og temperatur og RF 57

FORORD

Renovering efter skimmelsvampevækst kan være en bekostelig affære for bygningsejerne og efterlades der skimmelsvampevækst, kan det give tilbagevendende helbredsgener for bygningsbrugerne. Forsegling af skimmelsvampevækst i svært tilgængelige konstruktioner bruges i nogle tilfælde ved renovering i danske bygninger, men der findes hverken national eller international videnskabelig forskning, hvor effekten af en forsegling er blevet undersøgt. Dette pilotprojekt har derfor afprøvet forskellige metoder til påvisning af skimmelsvampesporer, partikler og flygtige organiske forbindelser (VOCer) og testet forskellige overfladebehandlinger i CLIMPAQ kamre i laboratorieskala. Resultaterne indikerer et potentiale for forsegling, idet overfladebehandling reducerede frigivelsen af biomasse og VOC, men resultaterne ikke er entydige.

Forskningsprojekter er udført på BUILD/Aalborg Universitet i København med økonomisk støtte fra Grundejernes Investeringsfond og Landsbyggefonden.

En stor tak rettes til Professor Lars Gunnarsen for lån af illustrationer og indkøb af materialer og til Laboratorieleder Lasse Borgstrøm Eriksen for opskæring og spraymaling af materialer.

BUILD – Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet
Sektion for bæredygtighed, energi og indeklima
April 2022

Tine Steen Larsen
Sektionsleder

1

INTRODUKTION

1 INTRODUKTION

1.1 Problemformulering

Under deres vækst i bygninger, danner skimmelsvampe både sporer og flygtige stoffer, der er mistænkt for at give helbredsgener for bygningsbrugere. Ved renovering af skimmelsvamperamte bygninger anbefales det, at **al** inficeret materiale fjernes eller afrenses (SBI Anvisning 205). Men somme tider er dette ikke fysisk eller økonomisk muligt. Der kan for eksempel være tale om tagkonstruktioner, krybekældre eller skunkrum, der ikke anvendes til ophold og hvor pladsen er for trang til at arbejde eller hvor fjernelse af inficerede materialer vil kræve en decideret nedrivning af ikke-inficerede konstruktioner.

1.2 Formål

Formålet med projektet er at undersøge om det er muligt at forsegle/indkapsle skimmelsvampevækst i bygningens svært tilgængelige dele af klimaskærmen, således at sporer og flygtige stoffer forbliver på og i de materialer, de er dannet på og ikke trænger ud i indeklimaet, hvor mennesker opholder sig.

1.3 Afgrænsning

På grund af corona-epidemien har det ikke været muligt at udføre forsøg i felten. Alle forsøg er derfor udført i laboratoriet i lukkede 50 liters forsøgskamre (CLIMPAQ kamre), som er anbragt i stinkskabe eller med aftræk til stinkskabe af sikkerheds- og sundhedsmæssige hensyn.

Præmissen for projektet er, at forseglingen skal kunne sprayes på, så sporer og svampemycelium ikke spredes med pensel eller rulle til ikke-inficerede dele i en konstruktion. Der testes to almindelige malinger og et dedikeret forseglingsprodukt på forskellige byggematerialer. Derudover er det kun de tre skimmelsvampearter (*Chaetomium globosum*, *Stachybotrys chartarum* og *Trichoderma harzianum*), som naturligt voksede frem på byggematerialerne, der er testet for deres sporefrigivelse. Der er ligeledes kun testet et flygtigt stof (ethanol) for dets evne til at trænge igennem malings- og forseglingsprodukterne. Ethanol blev valgt, da det er let tilgængeligt i laboratoriet og har et forholdsvist lavt kogepunkt (78°C). Det lave kogepunkt gør det muligt at bestemme diffusionen gennem materialer inden for en rimelig tidsperiode.

2

BAGGRUNDSVIDEN

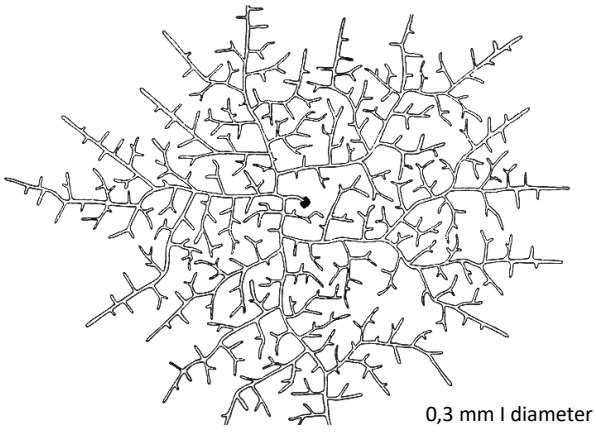
2 BAGGRUNDSVIDEN

Skimmelsvampevækst i bygninger opstår enten efter en vandskade eller ved en kombination af for høj luftfugtighed og en dårligt isoleret klimaskærm. Væksten kan være synlig på vægge, lofter og i vinduespartier eller være skjult i lukkede konstruktioner som skunk- og tagrum og i gulvkonstruktioner. Under væksten kan skimmelsvampene udsende flygtige organiske forbindelser, de såkaldte VOCer (Volatile Organic Compounds), eller frigive deres sporer. Når skimmelsvampevæksten tørrer ud, kan der frigives mycelie- og hyfefragmenter, også kaldet mikro-partikler. VOCer, sporer og mikro-partikler er mistænkt for at kunne give helbredsgener i form af hovedpine eller slimhindeirritation (Thrane et al. 2001; Bjørnsson 2018). Sporer og mikro-partikler er desuden mistænkt for at kunne forværre eksisterende sygdomme som astma og allergi (Thrane et al. 2001).

VOCer og partikler kan også komme fra andre kilder end skimmelsvampevækst. Byggematerialerne selv kan afgasse flygtige stoffer såsom formaldehyd og acetone og frigive partikler i form af træfibre og gipsstøv. Sidst men ikke mindst findes der mange flygtige stoffer og partikler i almindelig indeluft, som fx parfumestoffer fra rengøringsmidler og bilos fra udeluften.

2.1 Skimmelsvampebiomasse

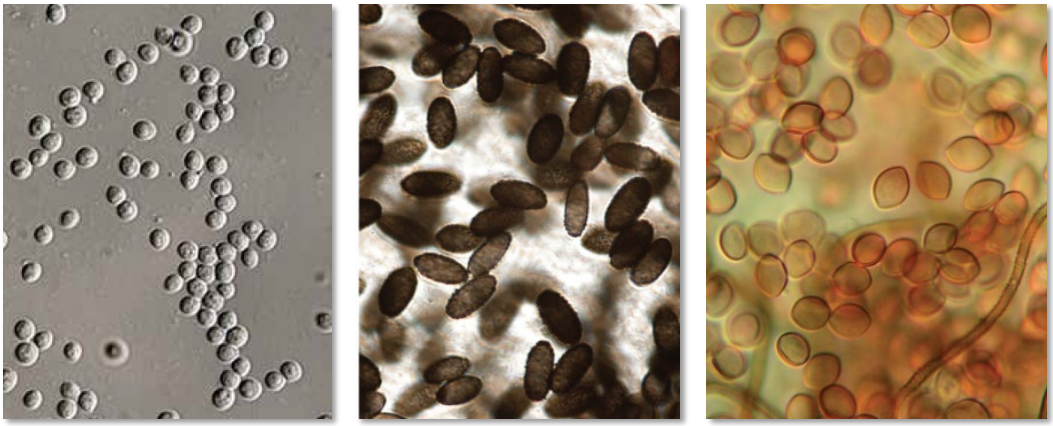
Skimmelsvampe er mikroskopiske organismer, der hører hjemme i deres eget rige (svamperiget eller Fungi (Kendrick 2017)). De består af hyfer, der igen danner et netværk, som kaldes et mycelium (Fig. 1). Hyferne har en diameter på 3-10 µm (0,003-0,01 mm) og kan teoretisk blive uendeligt lange. Oftest er deres længde begrænset af det materiale svampen vokser på og ses ofte som kolonier på op til 20-30 cm i vandskadede bygninger.



FIGUR 1. Et svampemycelium bestående af hyfer, der er vokset ud fra sporen i midten (Kendrick 2017).

Der findes mindst 50.000 skimmelsvampearter, men kun 50 arter forekommer almindeligt på vand- og fugtskadede byggematerialer. *Penicillium chrysogenum* og *Aspergillus versicolor* er de mest almindelige og kan vokse på de fleste materialer i bygninger, mens *Chaetomium globosum*, *Stachybotrys chartarum* og *Trichoderma harzianum* (Fig. 2) oftest findes på våde gipsplader, spånplader, OSB og krydsfiner (Andersen et al. 2011). Fælles for *C. globosum* og *S. chartarum* er, at de producerer aflange, klistrede sporer, der er 4-6 µm brede og 12

µm lange, mens *T. harzianum* danner små runde, klistrede sporer, ca. 3 µm i diameter, der kan klumpe sammen og give ophav til partikler på 5-8 µm (Kildesø et al. 2003). *C. globosum* og *T. harzianum* danner mange sporer under væksten, mens *S. chartarum* danner færre.



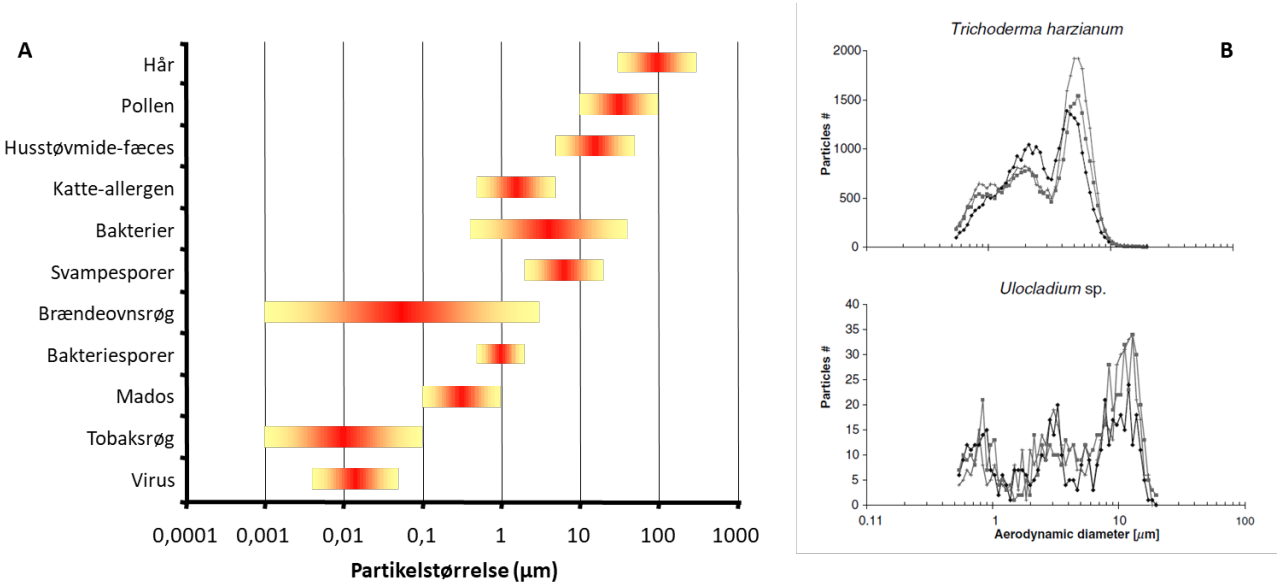
FIGUR 2. Sporeudseende af *Trichoderma harzianum* (tv), *Stachybotrys chartarum* og *Chaetomium globosum* (th) (Samson et al. 2019).

Under væksten danner skimmelsvampene forskellige kemiske stoffer, der skal beskytte mod eller tiltrække andre organismer. Mange af disse stoffer bliver siddende i sporerne og er mistænkt for at give mange af de helbredsgener, der rapporteres af brugere og beboere af skimmelramte bygninger. Når skimmelsvampene tørrer ud, kan der frigives både indtørrede sporer og nedbrudte hyfefragmenter (tilsammen biomasse eller mikro-partikler). De er som regel lidt mindre end hos de levende skimmelsvampe, men de kan stadigvæk give helbredsgener, da de kemiske stoffer stadig sidder i sporerne og hyfe-fragmenterne.

2.1.1 Detektion af partikler, skimmelsporer og -fragmenter

Skimmelsvampebiomassen kan som nævnt bestå af både sporer og hyfefragmenter, som kan være enten levende eller døde. Der findes flere metoder til at indsamle skimmelsvampe i indeluften (SBi-anvisning 274). En metode er Mycometer Air metoden, som påviser både levende og døde sporer og hyfefragmenter. Alle dele af biomassen indeholder et enzym, β-N-acetylhexosaminidase (NAHA), i deres cellevægge. Ved at opsamle sporer og hyfefragmenter på et filter og tilsætte et substrat, reagerer substratet med skimmelsvampeenzymet og frigiver et fluorescerende stof, der kan måles. Jo mere biomasse, jo kraftigere fluorescens (https://mycometer.com/). Ulemperne ved denne metode er, at den ikke identificerer, hvilken skimmelsvampeart biomassen kommer fra, eller om biomassen er levende eller død. Til gengæld er den kvantitativ og giver et tal for, hvor meget biomasse der er.

Derudover kan man indsamle partikler med en partikelmåler. Denne målemetode identificerer heller ikke, om partiklerne kommer fra skimmelsvampe, men alle slags partikler i luften. For eksempel kan en fraktion af partikler på 1,0 µm bestå af bakteriesporer, brændeovnsrøg, bakterieceller og katte-allergener, jævnfør Fig. 3 (A). Laboratorieforsøg viser at man kan få en størrelsesfordeling af sporer og fragmenter, og dermed vide om det er enkel-sporer, store klostre af sporer eller små hyfefragmenter. Fig. 3 (B) viser at *Trichoderma harzianum* frigiver mikro-partikler (0,7-1,0 µm), sporer enkeltvis (2,5 µm) og parvis (5-6 µm), mens *Ulocladium* sp. frigiver færre, men større sporer (Kildesø et al. 2003).

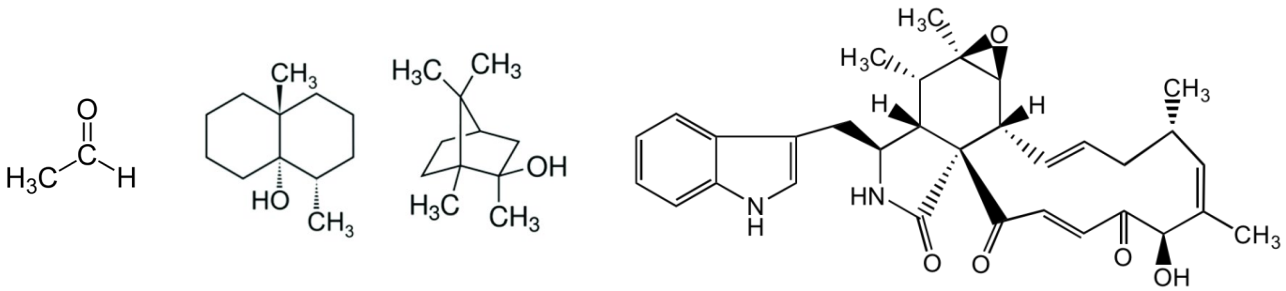


FIGUR 3. Størrelser af forskellige partikler, der kan findes i indeluft (A) (modificeret figur af Lars Gunnarsen) og partikelstørrelser på to forskellige skimmelsvampearter (B) (fra Kildesø et al. 2003).

Til sammenligning kan nævnes at et vandmolekyle er 0,28 nm (0.00028 µm) og et ethanol molekyle er 0,44 nm (0.00044 µm) i diameter (https://www.essentialchemicalindustry.org/chemicals/ethanol.html).

2.2 Flygtige organiske forbindelser (VOCer)

Skimmelsvampe kan producere mange forskellige flygtige stoffer (VOCer) under vækst på byggematerialer. Et litteraturstudium rapporterer om fund af mere end 200 forskellige VOCer produceret af skimmelsvampe (Korpi et al. 2009). Nogle VOCer, som for eksempel ethanol, produceres af mange forskellige skimmelsvampearter, mens andre er begrænset til en eller få arter (Micheluz et al. 2016). De mest bemærkelsesværdige VOCer er geosmin og 2-isomethylborneol (Fig. 4), som giver den karakteristiske lugt af jordslåethed, fugtig kælder eller gammelt sommerhus. Mange af de VOCer, skimmelsvampe producerer, kan vores næse detektere ved selv ekstremt lave koncentrationer. Geosmin og 2-isomethylborneol, for eksempel, kan vi lugte i koncentrationer på henholdsvis 0,0009 ppm (7,6 µg/m^3) og 0.000001 ppm (0.007 µg/m^3) (Korpi et al. 2009).



FIGUR 4. De kemiske formler for forskellige flygtige og semi-flygtige forbindelser, der kan detekteres i indeklimaet: ethanol (tv), geosmin, 2-isomethylborneol og chaetoglobosin A (th).

Skimmelsvampe kan derudover også producere stoffer, som betegnes som semi-flygtige (SVOCer). Disse stoffer kan genfindes i støv og byggematerialer (Došen et al. 2016) længe

efter, at skimmelsvampene er blevet inaktive. Et eksempel er chaetoglobosin A (Fig. 4), der dannes af *Chaetomium globosum* (Wang et al. 2016).

VOCer kan diffundere gennem materialer. Lappalainen et al. (2015) har eksempelvis målt den totale koncentration af VOCer (TVOCer) på ydersiden af en vægkonstruktion med og uden skjult skimmelsvampevækst. Vægkonstruktionerne var opbygget af gipsplader monteret på lægter af fyrretræ med mineraluldsisolering og podet med en suspension af *Aspergillus versicolor*, *Penicillium brevicompactum*, *Chaetomium globosum*, *Cladosporium sphaerospermum*, *Paecilomyces variotii* og *Trichoderma viride*. Huller på 6 mm blev boret i væggen for at øge luftgennemstrømningen. Målingerne viste, at den indbyggede skimmelsvampevækst gav anledning til en stigning i koncentrationen af TVOCer sammenlignet med kontrolvæggen.

Diffusionen af VOCer gennem byggematerialer afhænger dels af forbindelsernes egenskaber såsom damptryk, polaritet og molekylvægt og dels af materialegenskaber som porøsitet. Xu et al. (2012) har eksempelvis målt en effektiv diffusionskoefficient på 23,3 m^2/h for formaldehyd gennem gipsplader, mens Meininghaus et al. (2000) har målt en effektiv diffusionskoefficient på 3,02 x 10^{-3} m^2/h for oktan og 4,05 x 10^{-3} m^2/s for ethylacetat gennem gipsplader. Bodalal et al. (2001) målte diffusionen af ikke-polære alkaner, semi-polære aromatiske karbonforbindelser og polære alifatiske aldehyder gennem blandt andet gipsplader, krydsfiner, spånplader og OSB. Målingerne viste, at diffusionskoefficienten var omvendt proportional med VOCers molekylvægt.

Niedermayer et al. (2013) målte diffusionen af hexanal, butyl acetat, p-xylene, nonan og a-pinene gennem forskellige byggematerialer heriblandt gipsplader, spånplader, massivt træ, MDF og OSB. Målingerne viste, at diffusionen afhang af materialets egenskaber. Efter 72 timer var diffusionen størst gennem de porøse gipsplader (6,50 til 19,69 mg/m^3), mens diffusionen gennem eksempelvis spånplader (3,12 til 5,31 mg/m^3) var langt mindre.

2.2.1 Detektion af VOCer

Der findes flere metoder til at bestemme koncentrationen af VOCer i luften (Salthammer og Uhde 2009). Koncentrationen af de forskellige VOCer i luften kan eksempelvis bestemmes ved at suge luften med konstant hastighed gennem et adsorberende medie med efterfølgende ekstraktion og kemisk analyse i laboratoriet. Denne type måling giver et gennemsnit af koncentrationen af VOCer i luften i opsamlingsperioden. Andre metoder såsom en fotoakustisk gasmonitor kan anvendes til at bestemme koncentrationen af VOCer med en høj tidsopløsning (minutter). En fotoakustisk gasmonitor kan enten bestemme koncentrationen af en bestemt VOC eller den totale koncentration af flygtige organiske forbindelser (TVOC) i luften (https://www.advancedenergy.com/products/gas-sensors/gas-monitors/).

2.3 Forsegling af skimmelsvampevækst

Der findes en håndfuld produkter til forsegling af fugt og skimmelsvampevækst på både det danske og internationale marked (fx Protox Forsegler og B&J 705 Forsegler). Ifølge producenterne kan produkterne bruges til at forsegle vandskadede overflader indendørs og fjerne lugtgener ved at indkapsle VOCer og partikler (https://protox.dk/protox-content/uploads/2020/08/Protox-Forsegler-SDS-DNK.pdf og http://www.bj.dk/productFiles/705/da/PI-705.pdf). SBi anvisning 205 'Renovering af bygninger med skimmelsvampevækst' anbefaler desuden anvendelsen af alufolie til forsegling af skimmelsvamp for at reducere lugtgener, mens plastfolie frarådes, da lugten trænger igennem.

I 2011 har et stort litteraturstudie gennemgået eksisterende retningslinjer og viden om metoder til afhjælpning af skimmelangreb. Rapporten konkluderer, at selvom der findes flere produkter til forsegling af skimmelsvamp, var det ikke muligt at finde publicerede data, der bekræfter dets effekt (Palaty 2011). Litteraturstudiet til dette projekt gav ingen nye videnskabelige publikationer om forsegling, men enkelte publikationer, der undersøger effekten af renseprodukter til fjernelse af skimmelsvampevækst og af maling fremstillet til at hæmme mikrobiologisk vækst. Menetrez et al. (2007a) målte eksempelvis 13 forskellige rensningsprodukters evne til at fjerne *Stachybotrys chartarum* fra porøse gipsplader uden maling. Renseprodukternes evne til at fjerne skimmelsvamp blev listet fra 0 (ingen vækst) til 5 (vækst der dækker hovedparten af materialets overflade) ud fra synlig inspektion af gipspladerne. Undersøgelsen viste, at enkelte renseprodukter kan fjerne synlig vækst fra de porøse gipsplader men, at deres effekt i stort omfang afhang af gipsens overflade.

Peitzsch et al. (2012) har målt, hvor effektivt forskellige rensemetoder kan fjerne skimmelsvampevækst fra byggematerialer. De undersøgte rensemetoder var boron- og ammoniumbaserede kemikalier samt ozon, peroxid, damp m.fl. Undersøgelsen blev udført på gipsplader og fyrretræ inficeret med *S. chartarum* og *Aspergillus versicolor*. Undersøgelser af byggematerialernes overflade i mikroskopet viste, at ingen af de undersøgte rensemetoder var i stand til at fjerne alle giftstoffer og partikler.

Herudover viste litteratursøgningen eksempler på undersøgelser af forskellige typer malings evne til at forhindre genvækst af skimmelsvamp på byggematerialer. Menetrez et al. (2007b) har eksempelvis undersøgt porøse gipsplader. Syv forskellige typer maling, der ifølge producenterne kan anvendes til at forhindre genvækst af skimmelsvamp, samt to kommercielt tilgængelige typer maling til indendørs brug blev undersøgt. Gipspladerne blev først inficeret med *S. chartarum*, derefter renset og deres overflade forseglet med en af de ni typer maling. Herefter blev gipspladerne placeret i fugtige omgivelser og skimmelsvampevæksten observeret visuelt i op til seks måneder. Tre af de syv typer maling forhindrede genvækst efter seks måneder i fugtige omgivelser.

I forbindelse med nærværende projekt fandt litteraturstudiet som nævnt ingen videnskabelige publikationer, der undersøger effekten af forsegling af skimmelsvamp. Det er dermed fortsat uvist om forsegling af skimmelsvampevækst udgør en sundhedsrisiko for bygningsbrugerne. I forlængelse af litteraturstudiet blev et antal aktører, der til daglig arbejder med udbedring af skimmelsvampeangreb, kontaktet for at undersøge, hvor udbredt anvendelsen af forsegling er i branchen. Samtalerne viste, at alle aktører kendte til forseglingsproduktet Protox og at alle havde anvendt produktet i tilfælde, hvor afrensning eller renovering havde været for omkostningstungt, hvilket gør dette projekt aktuelt.

3

MATERIALER OG METODER

3 MATERIALER OG METODER

3.1 Byggematerialer og forseglingsprodukter

Der er anvendt 5 forskellige byggematerialer, der ofte bruges i tag-, kælder- og skunkkonstruktioner. Materialerne er indkøbt i byggevaremarked. Tabel 1 viser typer, vareinformation og materialetykkelse.

TABEL 1. Byggematerialer anvendt i forsøgene.

Materiale	Vareinformation	Tykkelse (mm)
Gips	Raw standard gips ak (4100 1991000)	13
Krydsfiner	Raw fyr krydsfiner a/c (3200 9590207)	12
Masonit	Raw træfiber plade (4200 9526539)	3
OSB	Raw OSB 2 sq (3200 9648332)	15
Spånplade	Raw standard spånplade (3400 9582621)	17

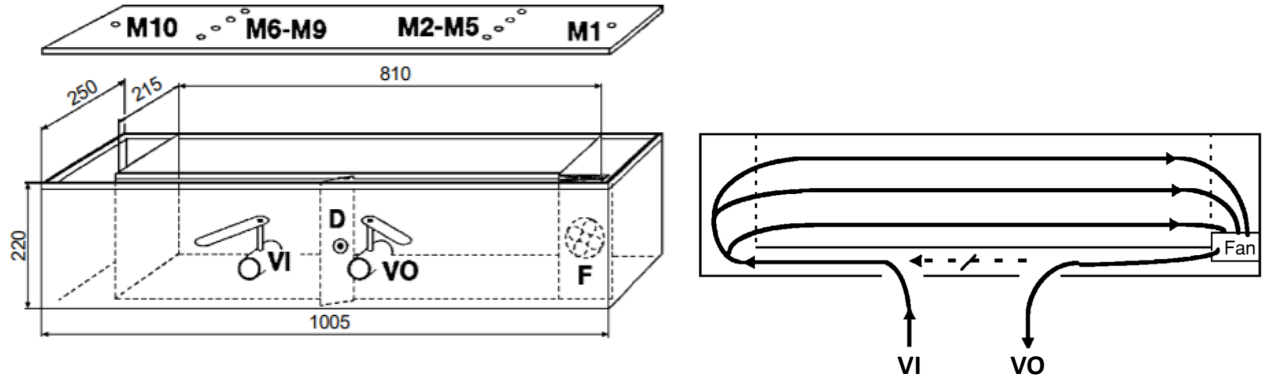
Tabel 2 viser, hvilke produkter udvalgte materialer er blevet behandlet med. Der er anvendt to typer maling til forsegling: en mat hvid Flügger akrylmaling til indendørs brug på vægge og loft og en almindelig spraymaling på dåse. Det tredje produkt er et decideret forseglingsprodukt, Protox Forsegler, specielt udviklet til forsegling af skimmelsvampevækst på utilgængelige steder. Protox Forsegler indeholder et akryl-modificeret alkyd bindemiddel.

TABEL 2. Produkter anvendt til overfladebehandling i forsøgene.

Produkt	MAL-kode	VOC (g/L)	Sikkerhedsblad
Flügger Flutex 5	00-1	10	http://gm.flugger.com/Sikkerhedsblade/DK/FLUTEX%205.pdf
Luxi spraymaling på dåse	3-3	600	https://medieserver.jemogfix.dk//fotoweb/dk/pdf/6113_9051972_015.pdf
Protox Forsegler	00-1	5	https://protox.dk/protox-content/uploads/2020/08/Protox-Forsegler-SDS-DNK.pdf

3.2 Forsøgsopstilling

I alle forsøg blev de såkaldte CLIMPAQ kamre anvendt (Fig. 5). Kamrene er enten anvendt enkeltstående med låg eller i en dobbelt opstilling uden låg, hvor et kammer vendes på hovedet og anbringes oven på et andet kammer. Lufthastigheden i kammerets bund, hvor materialeprøverne stod, blev målt til 0,06 m/s, mens den maximale lufthastighed blev målt til 0,26 m/s ca. 11 cm over bunden. Ifølge Kildesø et al. (2003) er det ikke nok til at få sporer luftbårne. Et pust fra en dåse med trykluft øgede lufthastigheden i bunden af kammeret til mellem 0,54 og 0,78 m/s, hvilket gav god sporefrigivelse, især fra OSB-prøverne. Ved partikel- og biomasseforsøgene blev der taget prøver gennem hul M4 og tilsat trykluft gennem hullerne M2 og M6 i låget. Ved diffusionsanalyserne blev der taget prøver gennem luftafkastet (VO) i siden af kammeret. De to forskellige opstillinger er beskrevet i afsnit 3.4 og 3.5.



FIGUR 5. Skematisk opbygning af et CLIMPAQ kammer med placering af blæser (F), spjæld (D), luftindtag (VI), luftafkast (VO) og prøvetagningshuller (M1, M2-M5, M6-M9 og M10). Prøverne tages i M4. (Nordtest, 1998).

3.3 Analysemetoder

I forsøgene blev der udført 3 forskellige analyser. Materialeprøverne blev undersøgt for deres partikel- og biomassefrigivelse (afsnit 3.4) og for deres gennemtrængelighed for ethanol, bestemt som TVOC (afsnit 3.5). Tabel 3 giver et overblik over hvilke overfladebehandlinger og efterfølgende analyser, de enkelte byggematerialer blev underlagt.

TABEL 3. Overfladebehandling og analyser udført på de forskellige byggematerialer.

Overfladebehandling	Gips	Krydsfiner	Masonit	OSB	Spånplader
Ubehandlet materiale	TVOC + Partikler + Biomasse	TVOC	TVOC	TVOC + Partikler + Biomasse	TVOC
+ Protox Forsegler	TVOC	-	-	-	-
+ Flügger	TVOC	-	-	-	-
+ Luxi spraymaling	TVOC	-	-	-	-
+ Skimmelvækst	Partikler + Biomasse	-	-	Partikler + Biomasse	-
+ Skimmelvækst + Protox	Partikler + Biomasse	-	-	Partikler + Biomasse	-
+ Skimmelvækst + Luxi	Partikler + Biomasse	-	-	Partikler + Biomasse	-

3.4 Partikel- og biomasseanalyser

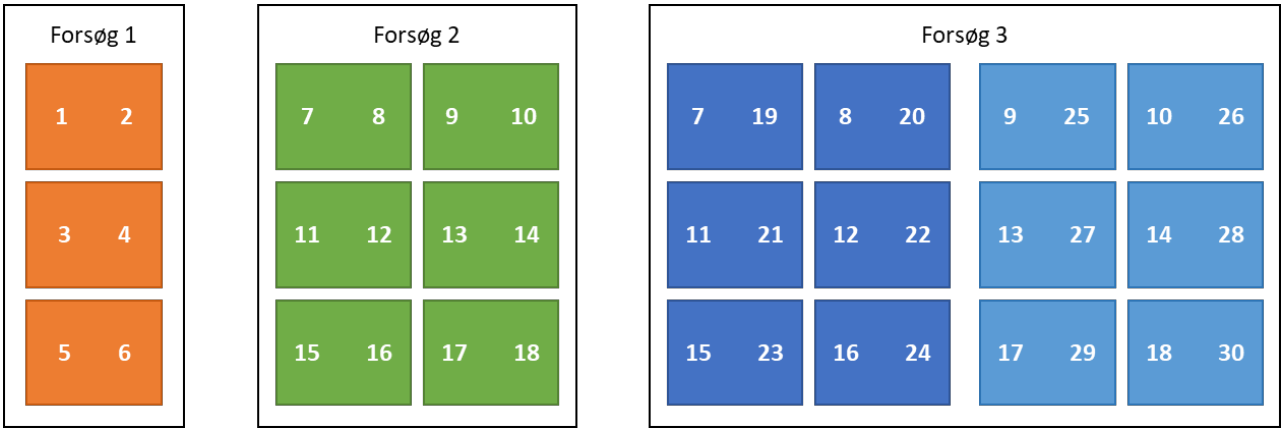
3.4.1 Prøveforberedelse

For hver af de to materialer, gips og OSB, skæres der prøvestykker på 10 x 15 cm (30 af hvert materiale), som anbringes i par i plexiglas-beholdere (17,5 x 22,4 × 6 cm) med låg. Et sæt består af 3 beholdere med hver 2 prøver. Tabel 4 viser, hvor mange sæt der udføres partikel- og biomasseanalyser på. Fig. 6 viser grafisk præsentation af fordelingen af de enkelte prøvesæt for ét materiale, der er anvendt i de 3 forsøg.

TABEL 4. Overblik over antal prøver og behandling til partikel- og biomasseanalyse.

Forsøg #: Behandling	Gips	OSB
Forsøg 1*: Prøver uden behandling (kontrol)*	1 sæt med 3 x 2 prøver	1 sæt med 3 x 2 prøver
Forsøg 2: *Prøver med skimmelvækst*	2 sæt med 3 x 2 prøver	2 sæt med 3 x 2 prøver
Forsøg 3: *Prøver med skimmel og Luxi spraymaling*	2 sæt med 3 x 2 prøver *	2 sæt med 3 x 2 prøver *
Forsøg 3: *Prøver med skimmel og Protox Forsegler*	2 sæt med 3 x 2 prøver *	2 sæt med 3 x 2 prøver *

* Hvert sæt i forsøg 3 indeholder prøver fra forsøg 2 (se Fig. 6).



FIGUR 6. Overblik over de enkelte prøvesæts anvendelse. Kontrol-sæt (orange), sæt med skimmelvækst (grøn) og sæt med skimmel og Luxi (mørkeblå) og skimmel med Protox (lyseblå). Prøvesættene 7-18 fra forsøg 2 indgår i mikset orden i forsøg 3. Hvert sæt består af 6 prøver (2 i hver bakke) og der er lavet dobbeltbestemmelse i forsøg 2 og 3.

3.4.2 Partikelmåling i CLIMPAQ kammer

Der måles partikler med en Lasair II 310A (Particle Measuring Systems, USA) bærbar partikeltæller. Partiklerne tælles ved hjælp af en laser og måler partikler i størrelsesintervallerne (?) 0,1 µm, 0,5 µm, 1,0 µm, 3,0 µm, 5,0 µm og 10 µm. Partikler opsamles i M4 (i M2-M5 rækken) i kammerets låg (Fig. 5) og der måles i 10 cyklusser med et flow på 28 L/min i 1 min og 47 sek. svarende til i alt 500 L. Der beregnes et gennemsnit af de 10 målinger, som automatisk omregnes til antal partikler pr. m^3. Partikelmålerens HEPA-filter er afmonteret og luftafkastet føres tilbage til kammeret gennem VI i kammerets side (Fig. 5 og Fig. 7) således, at partikeltabet minimeres. For at illudere en trykændring i en bygningskonstruktion (fx en smækkende dør, der får partiklerne til at blive luftbårne), sendes der trykluft fra dåse (mærke Lyreco) ind i kammeret gennem prøvetagningshullerne M2 og M6 i den 4. cyklus. Mellem hver prøveserie renses Lasair'en med et HEPA-filter, der monteres på indsugningen.

FIGUR 7. Forsøgsopstilling til partikelmåling (tv), hvor afkastet fra Lasair II recirkuleres gennem luftindtag (med den røde prop), og Mycometermåling (th), hvor luftindtaget er åbent til laboratorieluften. I begge opstillinger tages prøverne i M4 i M2-M5 rækken i låget. (Foto: Birgitte Andersen).

3.4.3 Biomassemåling i CLIMPAQ kammer

Der måles spore- og hyfe-frigivelse (biomasse) med en Mycometer test. Biomassen opsamles gennem M4 i låget (se Fig. 5 og 7) på et filter ved hjælp af en pumpe med et flow på 28 L/min i 10 min og 42 sek. Indblæsningsventilen (VI) på siden af kammeret er åben og der opsamles et volumen på 300 L, som erstattes af laboratorieluft. Der bruges også trykluft i disse forsøg for at illudere en trykændring i en bygningskonstruktion, som sendes ind i kammeret gennem prøvetagningshullerne M2 og M6 ved målingens start. Filtret analyseres efter Mycometers anvisninger.

3.4.4 Kontrolmålinger laboratorieluft og trykluft

Der laves 1 kontrolmåling af baggrundsniveauet af partikler og biomasse i laboratorieluften på hver forsøgsdag med samme flow og volumen, som nævnt ovenfor. Der laves også kontrolmålinger af partikelindholdet af trykluften i et rent, tomt kammer, hvor der køres 8 analyser á 10 cyklusser med trykluft (gennem prøvetagningshullerne M2 og M6 i 4. cyklus) over 2 dage.

3.4.5 Materialer uden behandling (forsøg 1)

Et sæt á 6 prøver af hvert materiale uden nogen form for behandling anbringes i bunden af hver deres kammer og analyseres 3 gange for partikel- og biomasseafgivelse samme dag. Alle prøver er konditioneret ved 20 °C og ca. 30 % relativ luftfugtighed, svarende til 7-10 % vandindhold.

3.4.6 Materialer med skimmelsvampevækst (forsøg 2)

Fire sæt (24 prøvestykker) af hvert materiale tilsættes vand svarende til 25 vægt-%. Prøverne inkuberes ved rumtemperatur (18-22 °C og 28-40 % RH) i 8-10 uger, hvorved de sporer, der naturligt er i materialerne, vil spire og vokse ud på overfladen. Identiteten af de fremvoksede skimmelsvampe bestemmes i stereo- og lysmikroskop ved brug af Samson et al. (2019). De fire sæt prøver med skimmelsvampevækst af hvert materiale sorteres og deles i to grupper, der er så ens som muligt med hensyn til mængden af biomasse og arten af skimmelsvampe.

To sæt gemmes til overfladebehandlingen, mens de to andre sæt af hvert materiale anbringes i bunden af hver deres kammer og analyseres 3 gange for partikel- og

biomasseafgivelse over 3 dage. Prøverne tørres ikke ud inden analyse, men der måles relativ luftfugtighed inden analyserne begynder.

3.4.7 Materialer med skimmelsvampevækst og overfladebehandling (forsøg 3)

De to sæt fra ovennævnte analyse samt de to gemte sæt (4 sæt i alt af hvert materiale) anbringes i stinkskab og konditioneres ved 20 °C og ca. 30 % relativ luftfugtighed, svarende til 7-10 % vandindhold. De fire sæt prøver sorteres med hensyn til mængden af biomasse og arten af skimmelsvampe og deles i to grupper, der er så ens som muligt.

To sæt af hvert materiale spraybehandles en gang med Luxi spraymaling (dåse) og to sæt sprayes en gang med Protox (forstøverflaske). Alle prøver tørres i stinkskab og konditioneres i laboratoriet i 3 dage inden forsøgsstart. De 4 sæt anbringes i bunden af hver deres kammer og analyseres 3 gange for partikel- og biomasseafgivelse over 6 dage.

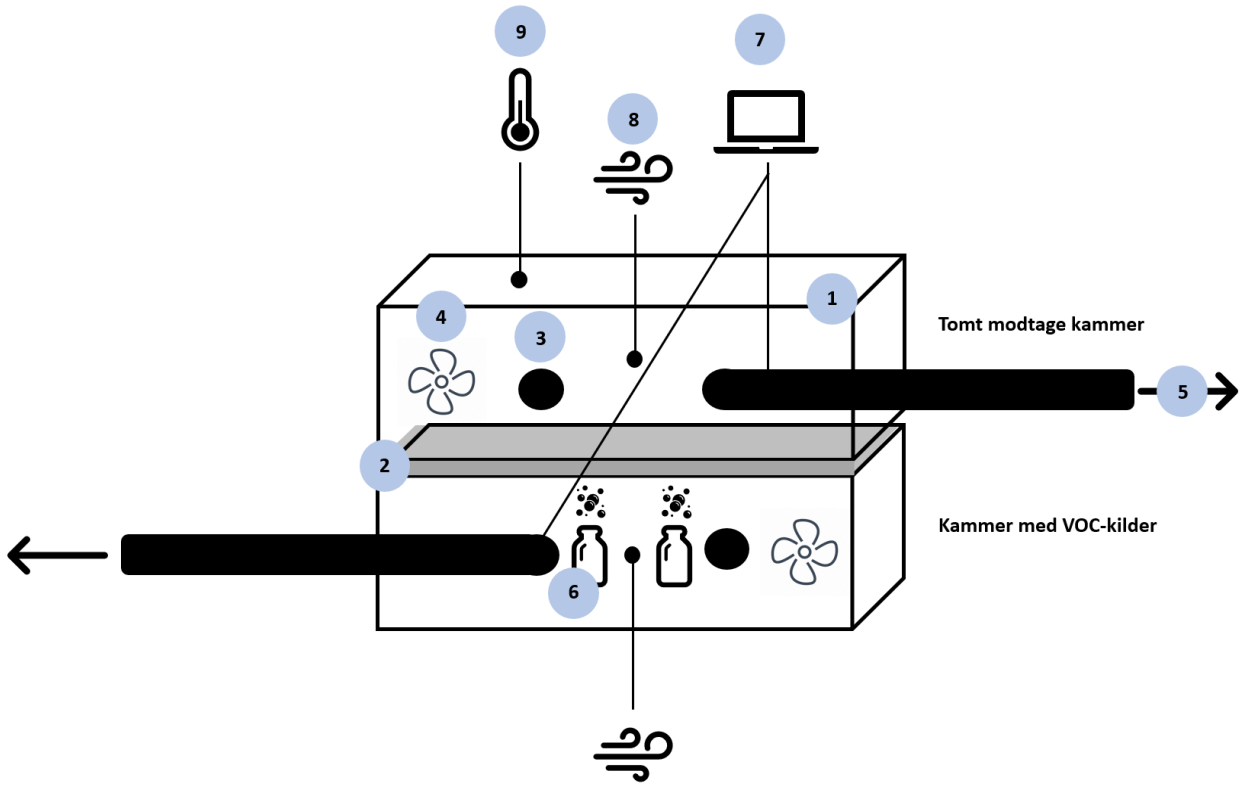
3.5 Materiale-diffusionsanalyser

3.5.1 Prøveforberedelse

Byggematerialerne blev skåret til plader på 30 cm x 104 cm og konditioneret i laboratoriet i minimum seks uger før hvert forsøg.

3.5.2 Forsøgsopstilling

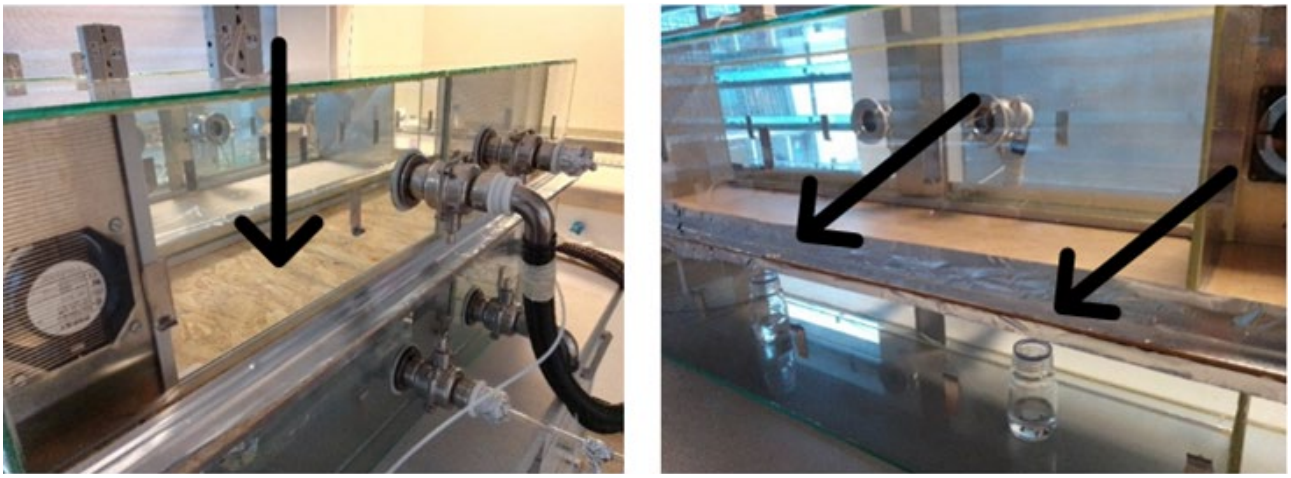
Diffusionen af ethanol gennem de fem byggematerialer og effekten af de tre forseglingsprodukter blev målt i et dobbelt CLIMPAQ kammer. Metoden er beskrevet af Meininghaus et al. (2000). Under forsøgene anbringes en plade mellem to kamre. Overfladearealet af byggematerialet i kontakt med luften i hvert kammer er 0,25 m^2. Forsøgsopstillingen er vist i Fig. 8 og billeder af forsøgsopstillingen er vist i Fig. 9.



FIGUR 8. Forsøgsopstillingen af to CLIMPAQ kamre adskilt af byggematerialet i midten. (1) To kamre blev samlet til et dobbeltkammer, hvor åbningerne i kamrene vender mod byggematerialet, (2) det byggemateriale der undersøges, (3) passivt luftindtag (VI), (4) elektrisk blæser, (5) passivt luftafkast (VO), (6) beholder med ethanol (VOC-kilde), (7) målepunkt for luftprøveopsamling, (8) lufthastighedsmåling og (9) temperatur og relativ fugtighed RF-registrering. (Tegning: Signe H. Smedemark)

Alle komponenter i forsøgsopstillingen er fremstillet i stål, glas eller teflon for at minimere adsorption på overflader i forsøgsopstillingen. For at undgå utætheder blev byggematerialerne skåret så de er 2 cm større end kamrene. Deres kanter blev forseglet med aluminiumstape for at forhindre lækage under forsøgene.

To 250 ml Blue Cap flasker med ethanol blev anvendt som VOC-kilder. De åbne flasker blev placeret i det nederste kammer med 40 ml ethanol i hver (Fig. 9).



FIGUR 9. Dobbeltkammer bestående af to CLIMPAQ kamre med luftindtag og -udtag adskilt af en OSB-plade (tv). Blue Cap flasker med ethanol (VOC-kilder) i det nederste kammer (th). (Foto: Helle V. Andersen).

Fordampet ethanol vil dels bortventileres med luften gennem afkastet, dels diffundere gennem byggematerialet op til det øverste 'tomme' modtagekammer. I det øverste kammer bortventileres ethanolen i luften også med afkastet. Koncentrationen af ethanol i luften i modtagekammeret er bestemt af diffusionen gennem byggematerialet (masseoverførslen) og luftskiftet i kammeret (se afsnit 3.5.6).

3.5.3 Måling af lufthastigheden i CLIMPAQ kamrene

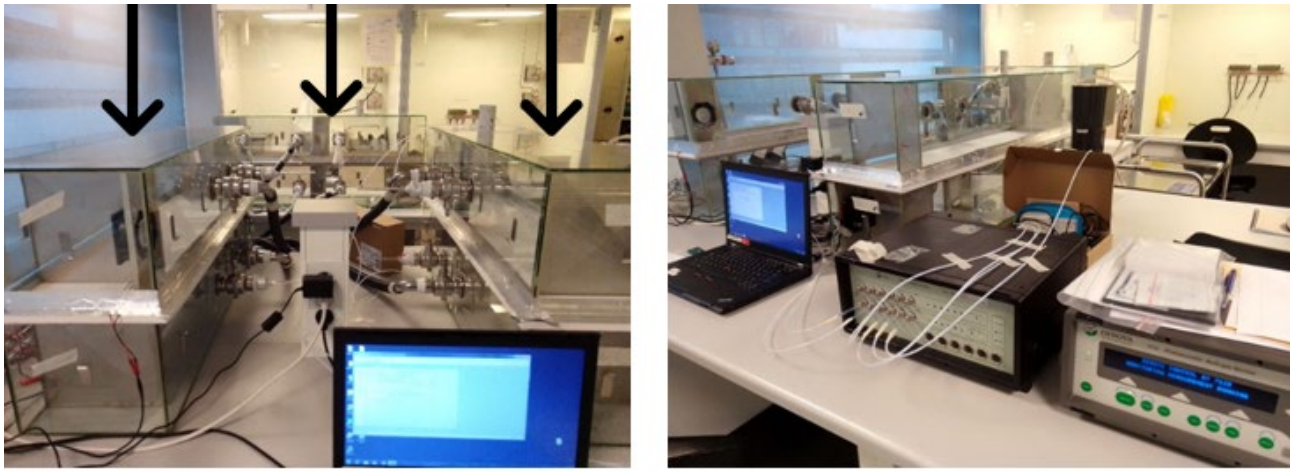
Lufthastigheden blev målt i hvert kammer separat. Kamrene blev lukket med et tætsluttende glaslåg og lufthastigheden målt igennem åbningerne M3 og M7 i låget (Fig 5). Målingerne blev udført med en Flow Master 54N60, Dantec, sensor 54R20 no. 440. Lufthastigheden i midten af hvert kammer blev sat til 0,2 ±0,1 m/s ved at regulere et spjæld ved luftindtaget. Efter målingen blev glaslåget fjernet og de to kamre samlet med byggematerialet i midten.

3.5.4 Temperatur og lufthastighed

Rumtemperatur og relativ fugtighed (RF) blev målt hvert 10. minut med en HOBO-U12 data logger (Onset, Bourne, MA, US). Data loggerne blev placeret oven på dobbeltkamrene.

3.5.5 TVOC-måling og CO_2 måling

Koncentrationen af TVOC blev målt i hvert kammer med en Innova 1312 fotoakustisk gasmonitor fra LumaSense Technologies. Monitoren er koblet til en Innova 1303 multi sampler med seks kanaler, dvs. der skiftes mellem seks målepunkter (Fig. 10). Koncentrationen blev målt hvert 30. minut i minimum 72 timer. Parallelle målinger viste en relativ lille variation (≤ 10%), dog højere ved lave niveauer (under 5 ppm TVOC). Omregningen af den målte koncentration af TVOC til ethanol er bestemt (se afsnit 3.5.6).



Figur 10. Opstillingen af tre dobbeltkamre samt måleudstyr med Innova 1312 fotoakustisk gasmonitor og Innova 1303 multi gas sampler. (Foto Helle V. Andersen).

Ved bestemmelse af luftskifter i kamrene er der målt karbondioxid (CO_2) med samme opstilling, men med opsamling hvert 5. minut. Parallelle målinger viste en relativ lille variation (≤ 10%). Innova 1312 gasmonitoren bruger 20 °C som reference temperatur og 1013 hPa (1 atm.) som reference tryk. TVOC-koncentrationerne angives i ækvivalenter toluen (enhed ppm). Molekylvægten for toluen er sat 92,14 g/mol og for CO_2 44,01 g/mol. Gasmonitoren var indstillet til at kompensere for vanddamp.

3.5.6 Måling ad luftskiftet i CLIMPAQ kamrene

Kamrene har et luftindtag (VI) med passiv indsugning af rumluft og et luftafkast (VO) (se Fig. 5 og punkt 3 og 5 på Fig. 8). For at reducere luftskiftet blev et 15 cm langt glasrør med en

indvendig diameter på 3 mm monteret med prop i luftindtaget (VI). Afkastet blev forsynet med slange til et stinkskab. Teflonslanger til luftprøveopsamling blev monteret i afkastet (VO) og forbundet til sampleren. En elektrisk blæser sikrede en ensartet luftopblanding i hvert kammer.

Luftskiftet i kamrene blev beregnet under hvert forsøg på baggrund af henfaldet i koncentration af CO_2 over tid. CO_2 blev doseret med en gasflaske gennem glasrøret til hvert kammer. Ved beregningen korrigeredes for baggrundsniveauet af CO_2 i lokalet. Der blev doseret CO_2 og målt minimum to gange under hvert forsøg.

3.5.7 Sammenhæng mellem ethanol og TVOC

Innova 1312 gasmonitoren måler koncentrationen af TVOC. For at omregne koncentrationen af TVOC til ethanol blev supplerende målinger af ethanol udført. Blue Cap flasker med ethanol blev anvendt til at genere tre forskellige koncentrationsniveauer i to kamre. Hvert kammer blev lukket med et tætsluttende låg. Koncentrationen af TVOC blev målt hvert 5. minut med Innova 1303 gasmonitoren.

Parallelt med TVOC-målingerne blev luftprøver opsamlet ved alle tre koncentrationsniveauer i begge kamre. Herudover blev opsamlet en prøve af rumluften i lokalet. Luftprøverne blev opsamlet ved at suge luften med 100 ml/min gennem et opsamlingsrør med en GilAir pumpe (Gilair Plus, 2017, Sensidyne, LP, USA). Opsamlingsrørene indeholder kokostrækul som adsorberende materiale (type SKC 226-29, SKC Inc., Eighty Four, PA, USA). Opsamlingsrørene blev eksponeret i 30 minutter og efterfølgende analyseret af Eurofins Miljø Luft A/S. Analyserne blev foretaget efter den internationale standard ISO 16200-1:2001 og detektion med gaskromatografi med flammeioniseringsdetektor (GC-FID).

3.5.8 Diffusionskoefficient

Den effektive diffusionskoefficient D_{eff} (m^2/h) ved *steady-state* af VOC gennem materialet blev beregnet ud fra nedenstående formel (1) (Meininghaus et al. 2000):

$$D_{eff} = \frac{m}{A}\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}c} = -\frac{q\,\Delta x}{A}\frac{c_B}{c_B - c_A} \qquad (1)$$

Hvor m er masseoverførslen (mg/h) gennem materialet og A er byggematerialets overfladeareal (m^2). dx approksimeres med materialetykkelsen Δx (m), mens dc approksimeres til koncentrationsforskellen mellem de to kamre $\Delta c = c_B - c_A$, hvor c_A er koncentrationen i kammeret med VOC-kilden og c_B er koncentrationen i det tomme modtagekammer (mg/m^3). q er ventilationshastigheden i modtagekammeret (m^3/h). Ventilationshastigheden kan beregnes ud fra luftskiftet (n) multipliceret med volumen (V) i kammeret.

Beregningerne forudsætter, at koncentrationsgradienten i materialet er lineær og endimensional samt at luften i kamrene er perfekt opblandet. Beregningen forudsætter, at byggematerialet er den dominerende barriere for stoftransport. Dermed ignoreres stoftransport i grænselaget (luften meget tæt på overfladen af byggematerialet) og dette kan medføre en underestimering af diffusionskoefficienten. Det forudsættes endvidere, at diffusionskoefficienten ikke er koncentrationsafhængig.

3.5.9 Materialer uden behandling

Diffusionen gennem hver af de 5 ubehandlede byggematerialer (gips, krydsfiner, masonit, OSB og spånplader) blev målt ved brug af tre dobbeltkammer opstillinger, der kørte parallelt (Fig. 9). Der blev lavet dobbeltbestemmelser, hvor nogle materialer er testet i samme

forsøgsgang, mens andre er testet i forskellige. Dvs. nogle dobbeltbestemmelser er testet under samme forhold mht. temperatur og luftfugtighed i rummet og baggrund i rumluft, mens andre er testet under forskellige forhold.

3.5.10 Materialer med overfladebehandling

Diffusionen gennem tre forseglingsprodukter (Flügger, Luxi og Protox, Tabel 2) blev efterfølgende undersøgt. På baggrund af målinger på ubehandlede plader blev gips udvalgt til forsegling, da gipsen havde den største diffusionskoefficient. To gipsplader blev malet to gange med den hvide Flügger akrylmaling, to gipsplader blev sprayet én gang med Luxi spraymaling og to gipsplader blev behandlet én gang med Protox Forsegler. En oversigt over forsøgsrækken er vist i Tabel 3.

3.6 Fejlkilder for TVOC-målinger

Fejlkilder i forsøgsopstillingen kan have påvirket målingerne. De potentielle fejlkilder er gennemgået herunder.

3.6.1 Temperatur og RF

Temperaturen påvirker damptrykket af ethanol, jo højere temperatur, jo højere damptryk. Variationen i rumtemperatur under forsøgene kan dermed have påvirket koncentrationen af ethanol målt i kammeret med VOC-kilden. Ifølge ISO 16000-9:2006 bør temperaturen i testkammeret fastholdes på 23 °C ±2 °C og den relative fugtighed (RF) på 50 % ±5 %. Dette var desværre ikke muligt under de givne laboratorieforhold. Ændringer i relativ luftfugtighed kan have en indflydelse på materialerne.

3.6.2 Baggrundsniveau af TVOC

Som beskrevet ovenfor ventileres kamrene passivt med rumluft gennem luftindtaget. Denne luft har en baggrund af TVOC fra udeluften. Derudover var der periodisk andre aktiviteter i laboratoriet, som fx afspritning af udstyr og hænder, omhældning af kemikalieaffald og brug af muffelovn, der alle afgav VOCer til rumluften, hvilket også har påvirket den målte koncentration af TVOC i kamrene.

3.6.3 Afsmitning

Undervejs i forsøget afslørede baggrundsmålinger en afsmitning af TVOC fra målekanaler med høj koncentration af ethanol til målekanaler med lav koncentration. For at bestemme graden af afsmitning blev en målekanal placeret ved en høj koncentration og efterfulgt af to kanaler, der målte baggrund. Dermed kunne de to baggrundsmålinger sammenlignes og afsmitningen fra den høje koncentration bestemmes. Dette blev gjort for flere sæt målinger og visse af TVOC-målingerne er efterfølgende korrigeret for afsmitning.

4

RESULTATER

4 RESULTATER

4.1 Identifikation af skimmelsvampearter og deres sporestørrelser

De skimmelsvampearter, der blev analyseret for i forsøgene, var dem, der naturligt voksede frem, da de ubehandlede materialeprøver blev opfugtet (Fig. 11). Identifikationerne af arterne er givet i Tabel 5. Alle 3 skimmelsvampearter, som er almindelige på våd gips og OSB, producerer deres sporer i slimede/klistrede dråber på overfladen af materialerne. Som det ses af Tabel 5 ligger de aerodynamiske sporestørrelser mellem 2,5 og 9 µm.

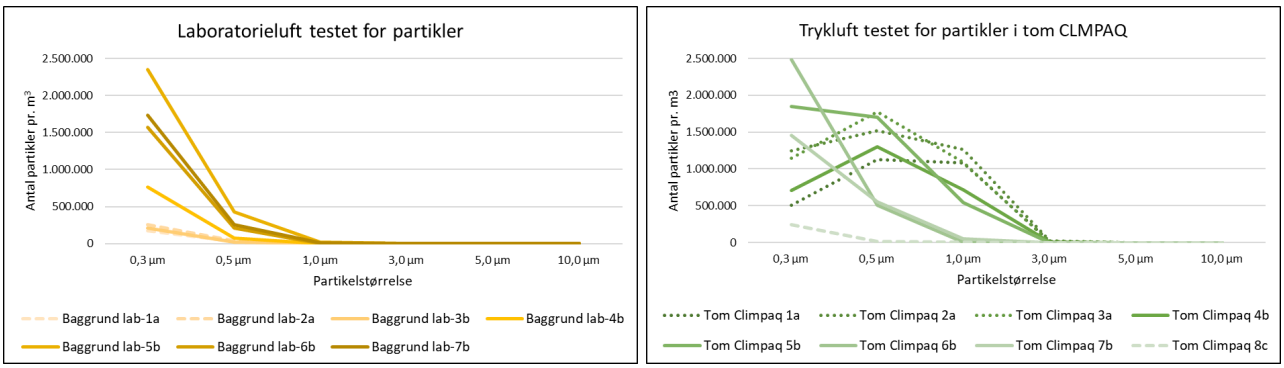
Figur 11. Naturligt forekommende *Stachybotrys chartarum* på gips (tv) og *Chaetomium globosum* på OSB (th). (Foto: Birgitte Andersen).

TABEL 5. Identificerede skimmelsvampearter og deres sporestørrelser på forsøgsmaterialerne.

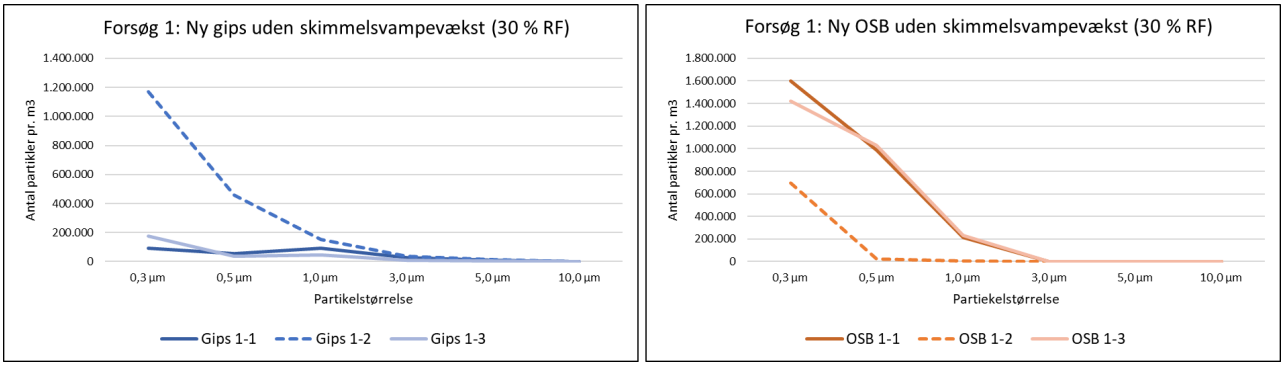
	Gips		OSB	
	Skimmelsvampeart	**Størrelse (µm)**	**Skimmelsvampeart**	**Størrelse (µm)**
Prøve A	*Stachybotrys chartarum*	4-5 x 8-12	*Chaetomium globosum*	7-9 x 8-12
	Chaetomium globosum	7-9 x 8-12	*Trichoderma harzianum*	2,5-2,8 x 2,8-3,2
Prøve B	*Stachybotrys chartarum*	4-5 x 8-12	*Chaetomium globosum*	7-9 x 8-12
	Uidentificeret mycelium	-	-	-

4.2 Partikler og sporer fra materialer

Den anvendte partikelmåler (Lasair II) detekterer antal partikler i 6 størrelseskategorier fra 0,3 µm til 10 µm. De fleste partikelmålinger i disse forsøg viste meget høje tælletal for de små partikler (0,3-1,0 µm); ofte mellem 10^6 til 10^7 flere partikler sammenlignet med tælletallene for de store partikler (3-10 µm). Dette gjaldt for både baggrundsmålingerne (Fig. 12) og for materialeprøver uden skimmelsvampevækst (Fig. 13).

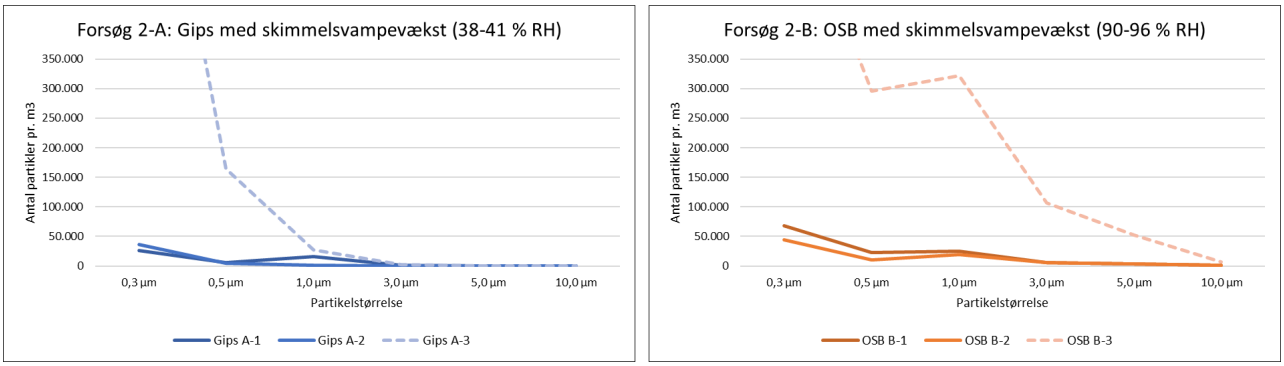


Figur 12. Baggrundspartikler i laboratorieluften (tv) og i det tomme CLIMPAQ kammer med trykluft (th). Laboratorieluften er analyseret over flere uger i november (stiplede linjer) og december 2021, mens det tomme kammer er analyseret over 2 dage, hvor de punkterede linjer er målt på den første dag. Måling 8 er ikke tilsat trykluft (stiplet linje). Temperatur- og relativ fugtighed (RF) i analyseperioden: 18-22 °C og 28-40 % RF.



Figur 13. Forsøg 1 med nye, tørre og konditionerede plader af gips (tv) og OSB (th) uden skimmelsvampevækst. Alle gentagelser er lavet samme dag, men i begge forsøgsserier skiller 2. gentagelse (benævnt -2 og vist med stiplede linjer) sig ud.

Som det ses af Fig. 14, er afvigelserne mellem de 3 partikelmålinger for hvert materiale afhængig af om målingerne er foretaget samme dag eller over to dage. Antal partikler er højere i de sidste målinger, da prøverne har haft mulighed for at tørre lidt ud og skimmelsvampevæksten på prøverne har haft mulighed for at danne nye sporer mellem de to prøvetagningsdage. Både udtørring og nydannelse giver højere partikeltal.



Figur 14. Forsøg 2 med skimmelsvampevækst på gips (tv) og OSB (th). Den sidste måling (benævnt -3 og vist med stiplede linjer) på hvert materiale er målt på dag 2.

De efterfølgende resultater i Tabel 6. er derfor vist for de enkelte måleserier (triplikat) og kun for partikelstørrelserne 3, 5 og 10 µm.

Resultaterne af partikel- og mycometer-målingerne er givet i Tabel 5. En Mycometer-værdi under 350 (grøn markering i Tabel 6) regnes for lav og svarer til baggrundsniveauet, mens en værdi over 450 (rød markering i Tabel 6) indikerer et højt antal skimmelsvampe-partikler pr. m^3 luft.

TABEL 6. Partikel- og Mycometer målinger for materialeprøver med skimmelsvampevækst (Forsøg 2) og efterfølgende overfladebehandling (Forsøg 3) med enten spraymaling eller Protox. Forsøgsserier markeret i gråt (partikelmålinger) og fed (Mycometermålinger) er fortaget på dag 2. Rød markering indikerer højt antal skimmelsvampesporer.

	Gips				OSB			
Forsøg #	**3,0 µm**	**5,0 µm**	**10,0 µm**	**MM**	**3,0 µm**	**5,0 µm**	**10,0 µm**	**MM**
Forsøg 2-A1	1.741	175	18	715	8.333	2.712	537	-
Forsøg 2-A2	139	48	23	0	3.992	1.361	235	-
Forsøg 2-A3	2.330	551	61	**165**	82.075	38.577	2.753	**19.245**
Forsøg 2-B1	366	146	33	1	5.607	3.205	731	224
Forsøg 2-B2	237	89	19	45	5.540	3.085	664	6.772
Forsøg 2-B3	712	515	54	**0**	106.553	52.277	6.686	**7.506**
Forsøg 3-Mal-1a	2.515	881	139	510	3.324	1.509	607	0
Forsøg 3-Mal-1b	1.676	287	46	**0**	1.603	733	236	359
Forsøg 3-Mal-1c	1.330	67	13	**0**	5.347	1.579	194	**247**
Forsøg 3-Mal-2a	612	162	22	28	6.179	1.750	367	238
Forsøg 3-Mal-2b	789	232	27	3	923	257	82	**107**
Forsøg 3-Mal-2c	963	243	39	238	476	90	35	**65**
Forsøg 3-Pro-1a	279	114	23	478	705	283	48	0
Forsøg 3-Pro-1b	798	564	105	**0**	278	93	17	29
Forsøg 3-Pro-1c	9.046	91	19	**17**	5.371	268	56	**10**
Forsøg 3-Pro-2a	391	44	11	0	216	96	21	209
Forsøg 3-Pro-2b	375	33	6	0	1.833	679	238	**145**
Forsøg 3-Pro-2c	475	23	6	9	1.202	326	89	**112**

MM: Mycometermåling. Mal: spraymaling. Pro: Protox. "-" Mycometermåling mangler

Resultaterne i Tabel 6 viser, at der ingen sammenhæng er mellem de målte antal store partikler (3,0-10,0 µm) og Mycometer-værdien – hverken sammenlagt eller individuelt. Der kan være et relativt stort antal partikler og en lav Mycometer-værdi (fx for Gips i Forsøg 2-A3). To måleserier kan også have næsten samme partikel-profil, men have meget forskelligt Mycometer-værdier (fx OSB i Forsøg 2-B1 og Forsøg 2-B2).

For OSB-forsøgene ser det ud til, at en overfladebehandling har en mulig virkning på både spore- og partikelniveauet. Der er ikke muligt at vurdere om der er signifikant forskel på resultaterne for Protox Forsegler og Luxi spraymaling, da de begge ligger på eller under baggrundsniveauet på 350 i Tabel 6. For gips-forsøgene er resultaterne utilstrækkelige til at vurdere om overfladebehandling er effektiv, da de ubehandlede prøver ikke afgav tilstrækkeligt med hverken sporer eller partikler i forsøg 2.

4.3 Kontrol- og enkeltmålinger

Kontrolmålinger af laboratorieluften viste, at baggrundsluften i laboratoriet over tid (uger) indeholdt relativt få større partikler (1,0-10,0 µm). De korresponderende Mycometermålinger af laboratorieluften viste meget lave værdier; mellem 0 og 37, hvilket er langt fra baggrundsværdi-grænsen, som er på 350.

Kontrolmålinger af den trykluft, der blev brugt til at få skimmelsvampesporerne luftbårne, viste at der ikke skete en ophobning af større partikler (3,0-10,0 µm) fra trykluften. Antallet af mindre partikler (0,3-1,0 µm) faldt hurtigt i det lukkede kammer (Tom CLIMPAQ 6b-7b i Fig. 12) over tid (minutter).

Antallet af små partikler (0,3-1,0 µm) varierede også meget mellem målingerne i Forsøg 1 på trods af, at alle 3 målinger for hvert materiale er lavet samme dag. I begge måleserier var det 2. måling, der varierede og viste enten faldende eller stigende partikeltal. Til gengæld sås et lavt antal store partikler (3,0-10,0 µm) for alle materialeprøver uden skimmelsvampevækst (Forsøg 1, Fig. 13).

4.4 Diffusion af ethanol gennem materialerne

Resultaterne fra målingerne af diffusion af ethanol gennem ubehandlede byggematerialer viser, at diffusionen var størst gennem ubehandlede gipsplader og mindst gennem ubehandlet krydsfiner. Behandling af gipsplader resulterede i en markant reduktion af diffusionen gennem materialet. Tabel 7 viser de estimerede effektive diffusionskoefficienter som gennemsnit af to bestemmelser på hver af de 5 materialer og de behandlede gipsplader. Resultaterne er uddybet i de efterfølgende afsnit. Først kommer en gennemgang af koncentrationsmålinger af TVOC, der ligger til grund for de videre beregninger. Dernæst følger analyse af resultater på de estimerede effektive diffusionskoefficienter for de forskellige materialer og behandlinger.

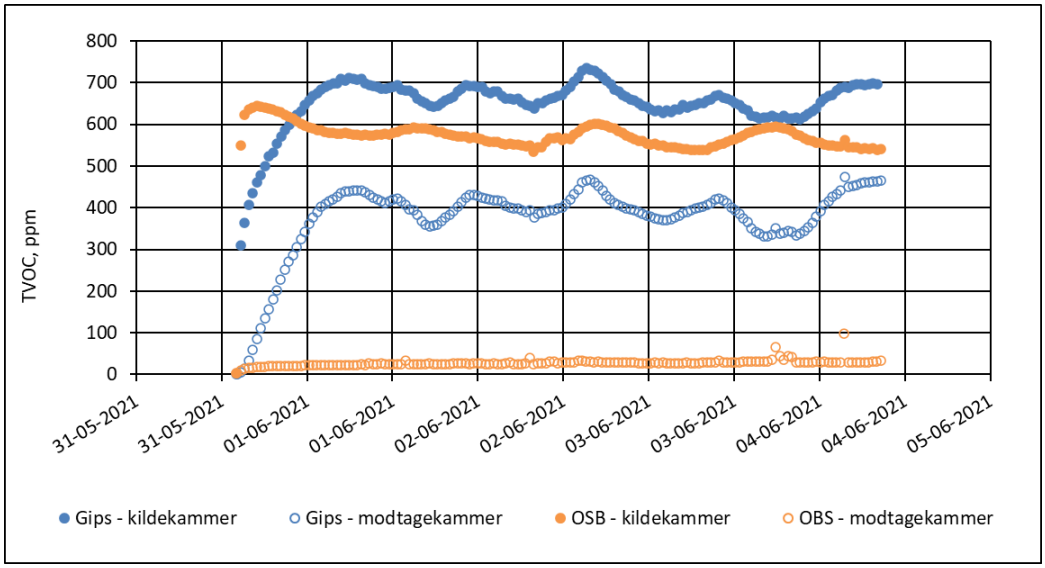
TABEL 7. Diffusionskoefficienter (D_{eff} (m^2/h)) som gennemsnit af dobbeltbestemmelser for de 5 forskellige byggematerialer uden overfladebehandling samt for gips med overfladebehandling.

Overfladebehandling	Gips*	Krydsfiner	Masonit	OSB	Spånplade
Ubehandlet	$9{,}0 \times 10^{-3}$	$0{,}1 \times 10^{-3}$	$0{,}4 \times 10^{-3}$	$1{,}0 \times 10^{-3}$	$1{,}0 \times 10^{-3}$
Protox Forsegler	$0{,}1 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
Flügger maling	$0{,}6 \times 10^{-3}$	-	-	-	-
Luxi spraymaling	$1{,}0 \times 10^{-3}$	-	-	-	-

* Stor forskel på dobbeltbestemmelserne for både ubehandlet gips og spraymalet gips, se Bilag 4.

4.4.1 TVOC-målinger

Fig. 15 herunder viser et eksempel på koncentrationen af TVOC i kammer med VOC-kilde og i det tomme modtagekammer for hhv. ubehandlede gips- og OSB-plader. Figurer med koncentrationen af TVOC i kildekammer og modtagekammer er samlet i Bilag 1.



FIGUR 15. Koncentrationen af TVOC (ppm) målt i kilde- og modtagekammeret for en ubehandlede gips- og OSB-plader.

Koncentrationsmålingerne viste de højeste koncentrationer i modtagekamre over ubehandlede gipsplader. De laveste koncentrationer blev målt i modtagekamre over krydsfiner. Efter korrektion for afsmitning var den målte koncentration i modtagekammeret for krydsfiner tæt på baggrundsniveauet og diffusionen gennem krydsfiner formentlig ubetydelig (se Afsnit 4.4.1.3 og 4.4.1.4). TVOC-målingerne er påvirket af en række faktorer, der er gennemgået nedenfor.

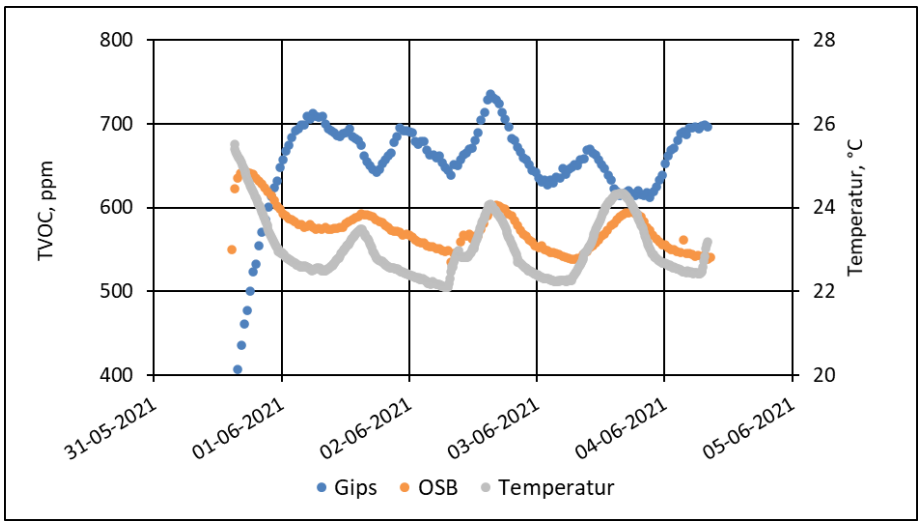
4.4.1.1 Luftskifte

Der var generelt en relativ lille variation (≤ 10%) i luftskiftet i de enkelte kamre indenfor de enkelte forsøg. Mellem kamre og mellem forsøg var der en forholdsvis stor variation i luftskiftet (fra 3 til 9 per time). Bilag 2 viser luftskiftet målt under hvert forsøg.

4.4.1.2 Temperatur og relativ luftfugtighed (RF)

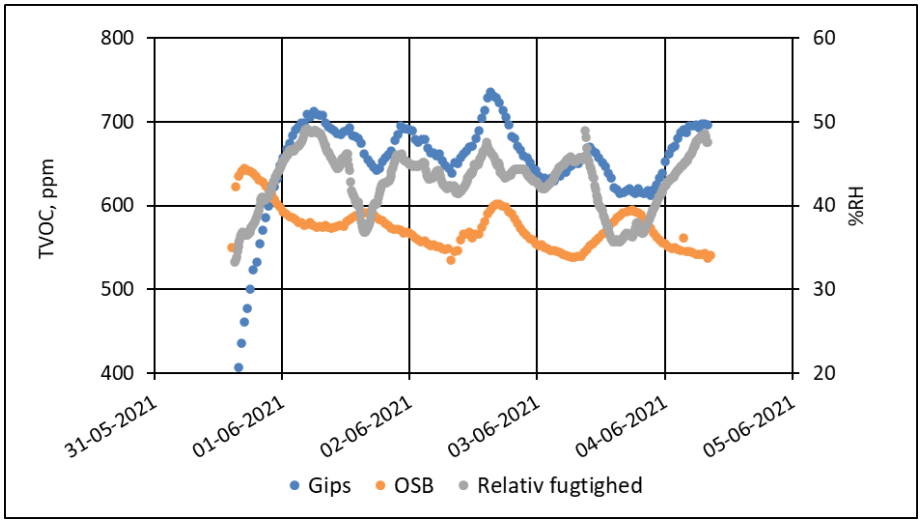
Det var ikke muligt at kontrollere temperatur og RF under forsøgene, hvilket har resulteret i en vis variation i specielt RF. Der er en tydelig kovariation mellem koncentrationen af ethanol i kamrene med VOC-kilder og temperaturen for alle materialer undtagen gipspladerne. Gipspladerne ser modsat ud til at kovariere mere med den RF i rumluften, dog undtaget gipsplader med maling, hvor 'baggrundsstøj' gør det svært at afgøre om der er en sammenhæng (se afsnit 4.4.1.3).

Fig. 16. viser et eksempel på en vis kovariation mellem temperatur og koncentrationen af TVOC i kammeret med VOC-kilden og OSB-pladen, mens sammenhængen ikke ses for kammer med gipsplade.



FIGUR 16. Koncentrationen af TVOC i kamrene med VOC-kilder under ubehandlet gips- og OSB-plade samt temperaturen i rumluften.

Fig. 17. viser koncentrationen af TVOC og den RF for det samme forsøg som afbildet i Fig. 16. Figuren viser, at der er en større kovariation mellem gipspladen og den RF i rumluften sammenlignet med OSB-pladen. Der er ikke en entydig sammenhæng mellem stigende temperatur og faldende RF (se Bilag 3).



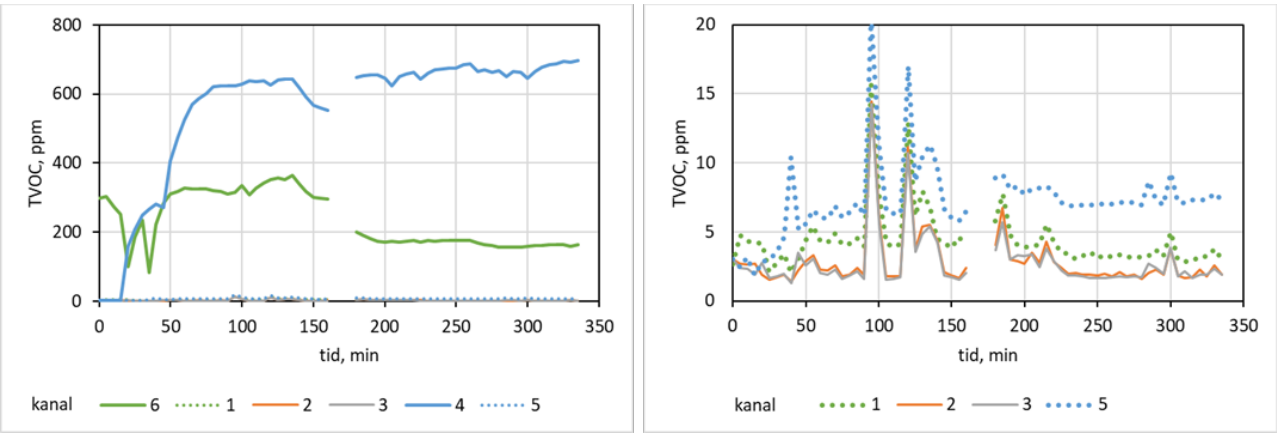
FIGUR 17. Koncentrationen af TVOC i kamrene med VOC-kilder under ubehandlet gips- og OSB-plade samt RF i rumluften.

4.4.1.3 Baggrundsniveau af TVOC

Der er kortvarige høje koncentrationer af TVOC i alle tre parallelle modtagekamre, især under forsøg 3 (spånplader og krydsfiner) og forsøg 4 (masonit og gipsplader med maling) (Bilag 1). De er formentlig et udtryk for en påvirkning af ventilationsluften fra andre periodiske aktiviteter i laboratoriet. Baggrundskoncentrationen kan udgøre en væsentlig del af den målte koncentration i modtagekammeret, hvis denne generelt er meget lav. Det ses fx ved bestemmelse af diffusionen gennem krydsfiner. Efter korrektion for afsmitning (se Afsnit 4.4.1.4) var den målte koncentration i modtagekammeret for krydsfiner tæt på baggrundsniveauet og diffusionen gennem krydsfiner formentlig ubetydelig.

4.4.1.4 Afsmitning

Forsøg viste en afsmitning fra målinger af høje koncentrationer efterfulgt af lave koncentrationer. Resultaterne er vist i Fig. 18, hvor afsmitning fra målekanaler med høje koncentrationer af TVOC (kanal 4 og 6, tv.) forårsager forhøjede niveauer på efterfølgende kanaler (kanal 5 hhv. 1, th.), der måler baggrund, mens den reelle baggrund er målt på kanal 2 og 3 (5 minutters måleinterval). Der ses en afsmitning på ca. 0,7 - 0,8% af koncentrationsniveauet fra de høje kanaler.

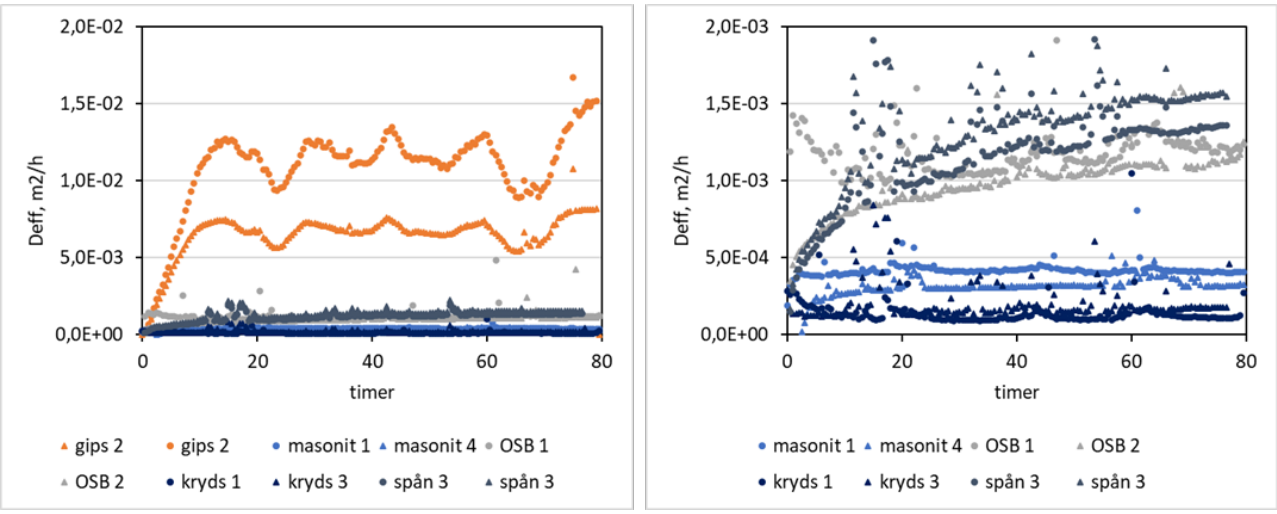


Figur 18. Afsmitning fra målekanal 4 og 6 med høje koncentrationer af TVOC (tv) til kanal 5 og 1, der måler baggrund (th), der igen viser forhøjede niveauer ift. baggrund målt på kanal 2 og 3.

Det er valgt at korrigere for denne afsmitningseffekt, da lave koncentrationer er væsentligt påvirket og dermed overestimeres den effektive diffusionskoefficient. Målinger i modtagekamrene er korrigeret ned med 0,8 % af målingen på foregående kanal. Forsøg 5 og 6 er ikke korrigeret, da ingen modtagekamre efterfulgte kanaler med høje koncentrationsniveauer.

4.4.2 D_{eff} og ubehandlede materialer

Figur 19 viser estimater af den effektive diffusionskoefficient over tid for de ubehandlede plader. Diffusionen gennem gips er markant større end de andre fire byggematerialer. For de øvrige materialer var diffusionen gennem spånplader og OSB på niveau og større end masonit, mens krydsfiner ligger lavest (Fig. 19 th.). Nogle plader er testet i samme forsøg (gips og spånplade), mens andre er testet i forskellige forsøg (masonit, OSB og krydsfiner). På figuren er forsøgsnummer angivet efter materialebetegnelsen. Der ses en del variation i D_{eff} over tid for de enkelte måleserier. De kortvarige afvigelser er en konsekvens af kortvarige forhøjelser af koncentrationen i modtagekamrene, formentlig pga. forhøjede koncentrationsniveauer i ventilationsluften.

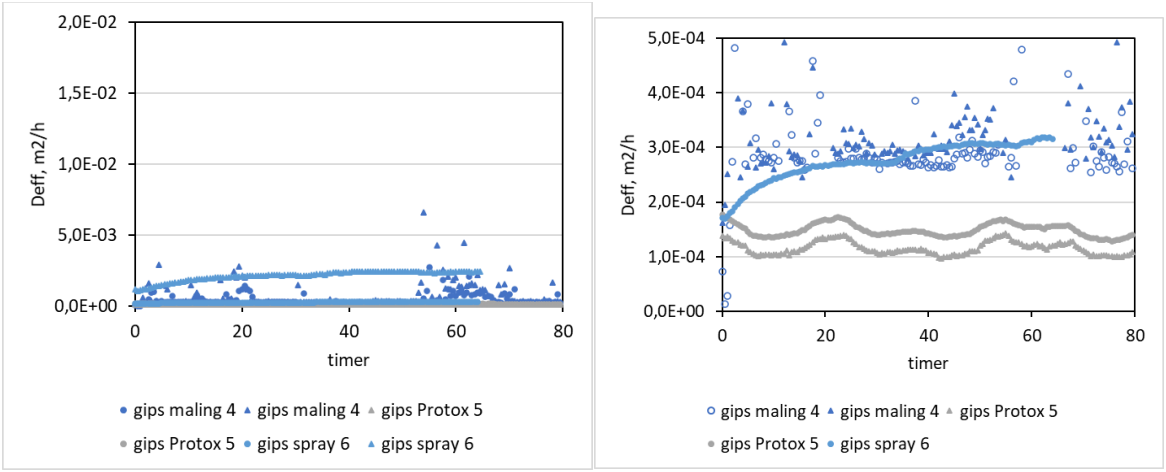


Figur 19. De effektive diffusionskoefficienter for ethanol gennem ubehandlede plader. På figuren til højre er gipspladerne udeladt og y-aksens skala ændret. Tallet bagved materialeangivelsen indikerer forsøgsnummer.

Niedermayer et al. (2013) har angivet den effektive diffusionskoefficient af VOCer gennem forskellige byggematerialer på baggrund af målinger 72 timer efter forsøgsstart. I nærværende projekt er der taget en middelværdi af den effektive diffusionskoefficient bestemt i tidsperioden 65 til 75 timer efter start af forsøg, da værdierne i visse forsøg er påvirket af korttidsvariationer. Standardafvigelse (SD) og den relative standardafvigelse (RSD) er udregnet for middelværdien i tidsperioden. Generelt er bestemmelsen rimeligt ensartet (RSD < 20%) i perioden (Tabel B4, Bilag 4). Ses på dobbeltbestemmelserne af D_{eff} for de forskellige materialer, er der stor afvigelse på gips (46%) og krydsfiner (39%) (Tabel B4, Bilag 4). Middelværdierne er angivet ovenfor i Tabel 7.

4.4.3 D_{eff} og behandlede gipsplader

Resultaterne viser, at de tre forseglingsmetoder formindsker diffusionen gennem gipspladerne Fig. 20. Den ene gipsplade med spraymaling viser markant højere gennemtrængelighed end den anden prøve, mens de andre overfladebehandlinger viser lave og mere sammenlignelige resultater.



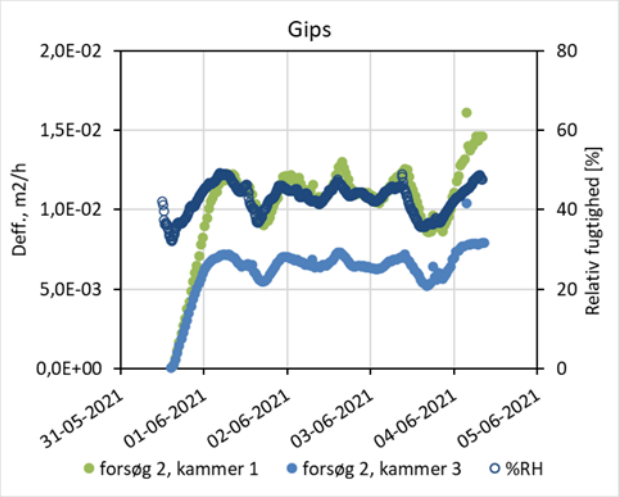
Figur 20. De effektive diffusionskoefficienter for ethanol gennem behandlede gipsplader. Figuren til venstre viser alle resultater, mens den ene gipsplade med spraymaling er udeladt på figuren til højre og skalaen er ændret. Tallet efter materialeangivelsen indikerer forsøgsnummer.

Som beskrevet ovenfor for ubehandlede materialer, er der udregnet et groft mål for D_{eff} bestemt i tidsperioden 65 til 75 timer efter start af forsøg. Dog er der for gips med spraymaling udregnet en værdi i en efterfølgende periode (se Bilag 4). Bestemmelsen er rimeligt ensartet (RSD < 20%) for gips med Protox og spraymaling, men der er stor spredning på bestemmelserne af gips med maling (Tabel B4, Bilag 4). Sidstnævnte er en konsekvens af den megen baggrundsstøj målt under forsøget.

Sammenlignes dobbeltbestemmelserne af D_{eff}, er der rimelig overensstemmelse mellem gips behandlet med maling og Protox, mens de to prøver behandlet med spraymaling afviger en del (152 %).

4.4.4 Temperatur og RFs indflydelse på den effektive diffusionskoefficient

Afhængigt af materiale og overfladebehandling viste koncentrationsmålingerne af TVOC sig til en vis grad påvirket af hhv. temperatur og RF. Den effektive diffusionskoefficient for ubehandlede gipsplader synes tillige at variere med den RF (Fig. 21). Det samme er tilfældet for gipsplader forseglet med Protox Forsegler og til dels for spraymaling, mens det er vanskeligt at afgøre, hvorvidt det samme er tilfældet for gipsplader forseglet med maling, hvor der er meget 'baggrundsstøj' (se Bilag 6).



FIGUR 21. Den effektive diffusionskoefficient for ubehandlede gipsplader samt den relative luftfugtighed (RF).

4.5 Omregning af TVOC-koncentrationen til ethanol

Sammenhørende værdier for koncentrationen af TVOC (ppm), målt med Innova 1312 gasmonitoren, og koncentrationen af ethanol (mg/m^3), opsamlet på et kulrør og efterfølgende analyseret af Eurofins, er vist i Bilag 5. Den lineære regressionsanalyse (Excel 2016) viser en god overensstemmelse mellem de to målemetoder (R^2 = 0.999). Skæringen er ikke signifikant forskellig fra nul og hældningen er knap 1 (y = 0,91x – 2,01 og 95% konfidensinterval for hældning er 0,89-0,94).

5

DISKUSSION

5 DISKUSSION

5.1 Forsegling af skimmelsvampevækst

Resultaterne fra forsøgene viser ikke noget entydigt billede. OSB-forsøgene indikerer, at det er muligt at reducere mængden af både partikler og skimmelsvampesporer med både almindelig spraymaling og Protox Forsegler. Derimod var der ikke tilstrækkelig sporefrigivelse fra gipsmaterialerne med skimmelvækst til at vurdere om forsegling havde den ønskede effekt. I hver af måleserierne for gips i forsøg 3 blev der detekteret skimmelsvampesporer i den første måling (-1a, Tabel 6). Det kan skyldes, at der lå "løse" sporer i kanten af lågene, som prøverne var blevet sprayet i. Det kan også skyldes "helligdage", hvor spraymaling eller Protox ikke har dækket ordentligt.

En mulig årsag til den ringe detektion af partikler og sporer gips kan være, at luftfugtigheden i CLIMPAQ kammeret har været så høj at partikler og sporer derfor har klæbet til både prøverne og glasvæggene. En anden mulig årsag kan være, at alle *Stachybotrys chartarum* sporer på gipsprøverne fjernes allerede i 1. måleserie og at svampen ikke kan nå at danne flere sporer til 2. måleserie.

5.1.1 CLIMPAQ kamrene

CLIMPAQ kamrene lader til at være en god løsning, når større materialeprøver skal testes for deres frigivelse af skimmelsvampesporer og -fragmenter, da der på intet tidspunkt under forsøgene blev målt et forhøjet antal skimmelsvampesporer i laboratorieluften. Forsøgene viste derimod at den lufthastighed, et CLIMPAQ kammer højest kan præstere med de anvendte blæsere og strømforsyning, ikke er nok til at frigive sporer fra skimmelsvampe, der danner deres sporer i klæbrige aggregater.

Fremtidige forsøg kunne forbedres ved at hæve prøvematerialet 11 cm højere op i kammeret, hvor lufthastigheden er maximal og samtidig give et eller flere pust med trykluft under prøvetagningen eller anvende en kraftigere blæser.

5.1.2 Skimmelsvampevækst på byggematerialer

I forsøgene har det kun været muligt at undersøge de svampe, der naturligt voksede ud fra gips og OSB-materialerne, da det ikke var muligt at arbejde med renkulturer på grund af laboratorieombygninger. Forskningen (Andersen et al. 2011) har vist, at også andre skimmelsvampearter ofte inficerer træbaserede byggematerialer, som fx *Penicillium chrysogenum* og *Aspergillus versicolor.* Disse to arter er de mest almindelige i det fugtige indeklima og producerer meget store mængder af små, tørre sporer (Samson et al. 2019). De 3 undersøgte arter, *Chaetomium globosum*, *Stachybotrys chartarum* og *Trichoderma harzianum*, er dog meget relevante. De er meget almindelige på gips og OSB og kan producere både flygtige og semi-flygtige organiske forbindelser, som har negative helbredseffekter på mennesker (Samson et al. 2019; SBi Anvisning 274).

Fremtidige forsøg kunne forbedres ved at bruge strålesteriliseret prøvemateriale, der efterfølgende sprayes med en sporesuspension af den ønskede skimmelsvamp. På den måde kan man få et jævnt lag af skimmelsvampebiomasse og man kan producere store mængder

ens prøvemateriale. Metoden tillader også at teste flere forskellige skimmelsvampearter, inklusive *P. chrysogenum* og *A. versicolor*.

5.1.3 Mycometermåling

Bestemmelse af mængden af biomasse (skimmelsvampesporer og -fragmenter), enten i luft, på overflader eller i materialer, er en veletableret metode, der har været brugt kommercielt i Danmark i mere 15 år (Reeslev et al. 2003) og er den eneste kvantitative målemetode i anvendelse.

Fremtidige forsøg kunne forbedres ved at tage en overflademåling (Mycometer Surface) af indersiderne af CLIMPAQ kamrene i tillæg til luftmålingen (Mycometer Air). Derved kunne det afgøres om skimmelsvampebiomasse klæber til overfladen eller om der ikke er flere sporer og fragmenter tilbage.

5.1.4 Partikelmåling

Resultaterne i disse forsøg viser, at måling af partikler ikke er en effektiv metode til at bestemme, om der er et forhøjet antal skimmelsvampesporer i luften, da der ikke kan skelnes mellem skimmelsvampesporer og -fragmenter og andre typer af partikler, som fx pollen, gipsstøv og træfibre. Partikelmålinger kan dog være relevante i andre sammenhænge, da der er andre partikeltyper, som kan have en negativ indvirkning på bygningsbrugernes helbred. Der kan fx være partikler fra stearinlys og mados eller bilos fra udeluften.

5.2 Forsegling af flygtige stoffer

I dette projekt blev den effektive diffusionskoefficient for ethanol gennem ubehandlede gipsplader målt til at være i størrelsesordenen 0,7-1 x 10^{-2} m^2/h, hvilket er højere end værdier rapporteret for oktan (Meininghaus et al. 2000) og lavere end værdier rapporteret for formaldehyd (Xu et al. 2012). Den effektive diffusionskoefficient for ethanol, bestemt i dette projekt, skal betragtes som et groft mål og udelukkende bruges til at sammenligne diffusionen mellem de fem ubehandlede byggematerialer samt effektiviteten af de udvalgte forseglingsprodukter. Diffusionen af andre flygtige stoffer vil afhænge af forbindelsernes fysiske og kemiske egenskaber.

5.2.1 Byggematerialerne

Resultaterne viste, at diffusionen afhænger af materialetype og behandling. Diffusionen af ethanol var størst gennem ubehandlede gipsplader og mindst gennem krydsfiner. Niedermayer et al. (2013) fandt ligeledes en større diffusion af VOCer gennem gipsplader sammenlignet med OSB- og spånplader. Forskellen i den effektive diffusionskoefficient gennem materialerne følger samme mønster som forskellen i vanddampsdiffusionsmodstand. Vanddampsdiffusionsmodstanden er 10-12 for gips, 30-50 for spånplader 50-280 for OSB og 150-220 for krydsfiner (Ojanen & Ahonen 2005; Nicolai et al. 2007). Afskærmningen mod VOCer der afgives fra skimmelsvampe i skjulte konstruktioner afhænger således i stor udstrækning af de valgte byggematerialer.

5.2.2 Forseglingsprodukterne

De tre forseglingsmetoder reducerer diffusionen gennem gipspladerne væsentligt. Reduktionen i den effektive diffusionskoefficient var generelt i en størrelsesorden faktor 10. Diffusionen gennem de behandlede gipsplader kom dermed ned på samme niveau som de øvrige ubehandlede byggematerialer.

Som nævnt ovenfor har en del af de VOCer, der afgives fra skimmelsvampe, en ekstremt lav lugtgrænse. Den flygtige forbindelse geosmin er større end ethanol (se Fig. 4), men kan detekteres af vores næse ved ekstremt lave koncentrationer (Korpi et al. 2009). Forbindelser med en ekstremt lav lugtgrænse kan derfor sandsynligvis fortsat give anledning til lugtgener i boligerne.

5.2.3 Fejlkilder til diffusionsbestemmelsen

Der kan være forskelle i fremstillingen af materialerne, der kan påvirke diffusionen (Meininghaus et al. 2000). Derved kan også test af tilsyneladende ens materialer falde forskelligt ud pga. inhomogenitet. Fejlkilder i forsøgsopstillingen kan også have påvirket målingerne. De potentielle fejlkilder er diskuteret herunder.

5.2.3.1. Luftskiftet

Luftskiftet varierede fra 3 til 9 per time mellem forsøgene. Luftskiftet anvendes til at beregne ventilationshastigheden og dermed den effektive diffusionskoefficient. Hvis de varierende niveauer af luftskifter har haft indflydelse på lufthastighed, turbulens og grænselagstykkelser, kan det skabe usikkerhed om antagelsen om ubetydelig grænselagsmodstand og dermed føre til underestimering af den effektive diffusionskoefficient (se afsnit 3.5). Under hvert enkelt forsøg var variationen i luftskiftet imidlertid mindre end 10%. Dette betragtes som acceptabelt, men ifølge den internationale standard ISO 16000-9: 2006 bør variationen i luftskiftet ikke overstige ±3%.

5.2.3.2. Temperatur og RF

Temperaturen påvirker damptrykket af ethanol og variationen i rumtemperatur under visse forsøg har påvirket koncentrationen i kammeret med VOC-kilden. Det har tilsyneladende ikke haft stor indflydelse på estimeringen af diffusionskoefficienterne. Farajollahi et al. (2009) bestemte diffusionskoefficienten for udvalgte VOCer gennem byggematerialer ved varierende temperatur. Målingerne viste at en variation i temperatur fra 15 °C til 39 °C kun havde en mindre effekt på diffusionskoefficienten.

For gipspladerne og beregning af effektiv diffusionskoefficient ses en variation, der relaterer til RF. Xu et al. (2012) undersøgte diffusionskoefficienten for formaldehyd gennem gipsplader ved varierende RF i et dobbeltkammer. Målingerne viste tilsvarende at den effektive diffusionskoefficient stiger med stigende RF.

5.2.3.3. Baggrundsniveau af TVOC

Ventilering af kamrene med rumluft og en antagelse om, at rumluftens baggrundsniveau var ubetydeligt, har vist sig forkert. Dels viste det sig, at baggrundskoncentrationen over korte tidsrum kunne variere en del, særlig under forsøg med gips og maling. Samtidig viste forsøgene med især krydsfiner, at afsmitningskorrigerede koncentrationer i modtagekamrene var meget tæt på baggrundsniveauet. Derfor er de estimerede effektive diffusionskoefficienter for krydsfiner formentlig overestimeret.

5.2.3.4. Den effektive diffusionskoefficient

Visse af dobbeltbestemmelserne af D_{eff} viste store afvigelser. Beregningen af den effektive diffusionskoefficient ud fra dobbeltkammermetoden ser bort fra modstanden mod masseoverførsel i grænselaget over materialet. Ifølge Meininghaus et al. (2000) vil diffusionsmodstanden i grænselaget over materialet være lille sammenlignet med diffusionsmodstanden i selve materialet. Liu et al. (2013) mener tilsvarende, at man kan se bort fra masseoverførselsmodstanden i grænselaget, når man ser på emission, der kontrolleres af diffusionen af VOCer internt i materialet. Modelberegninger udført af Lee et al. (2000) viser imidlertid, at

man kun kan se bort fra konvektion i grænselaget over ikke-porøse materialer ved diffusionskoefficienter mindre end 10-11 m^2/s. Beregninger udført af Haghighat et al. (2002) viser i tråd med Lee et al. (2000), at ser man bort fra masseoverførslen i grænselaget kan det resultere i en undervurdering af diffusionskoefficienten (Haghighat et al. 2002). I denne sammenhæng kunne det betyde, at antagelsen ikke er gyldig for andet end forsøgene med ubehandlet gips. Med de givne forsøgsopstillinger kan der have været uens grænselagstykkelser i kamrene. Hvis transport over grænselaget er en væsentlig faktor i den effektive diffusionskoefficient, kan uens forhold være noget af forklaringen på afvigelser mellem dobbeltbestemmelserne af gips med spraymaling.

En anden faktor til afvigelse mellem dobbeltbestemmelser kan være inhomogenitet i materialerne som nævnt ovenfor. Det spekuleres om dette kan være årsag til den forholdsvis store forskel mellem de to bestemmelser på ubehandlet gips.

Afvigelsen på bestemmelserne af den effektive diffusionskoefficient for krydsfiner kan skyldes, at værdierne i forskellig grad er overestimeret, da det generelle baggrundsniveau har udgjort en væsentlig del af målingen. Forsøgene er udført i forskellige tidsrum, dvs. baggrundsniveauet har ikke været ens for de to bestemmelser.

Formålet med dette projekt var ikke at bestemme den præcise effektive diffusionskoefficient for ethanol, men at undersøge forskellen i diffusion mellem forskellige materialer og effekten af forseglingsprodukterne. Beregningen af den effektive diffusionskoefficient ud fra dobbeltkammermetoden blev derfor anvendt som en simplificeret, men i dette tilfælde acceptabel beregningsmetode.

6

KONKLUSION

6 KONKLUSION

Dette projekt viser, at det **teoretisk** er muligt at forsegle udtørret og inaktiv skimmelsvampevækst, så sporer, mikro-partikler og flygtige organiske forbindelser (VOCer) holdes væk fra indeklimaet, men at det ikke kan anbefales før der er foretaget yderligere forsøg. Forsegling af skimmelsvampevækst er anvendt af håndværkere i Danmark, men der er meget lidt videnskabelig forskning på området, nationalt såvel som internationalt og der har derfor ikke været mange erfaringer at trække på med hensyn til forsøgsopstillinger, detektionsmetoder og lignende. Grundet ydre omstændigheder (Coronaepidemi og laboratorieombygninger) har det ikke været muligt at foretage alle nødvendige forsøg, men metoder og analyser er blevet testet og værdifulde erfaringer er blevet erhvervet.

Resultaterne indikerer, at Protox Forsegler, det deciderede forseglingsprodukt, virker bedre end almindelig Luxi spraymaling på dåse og/eller Flügger vægmaling i forhold til at tilbageholde både biomasse og VOCer, men også at alle 3 produkter kan reducere frigivelsen af VOCer i et rimeligt omfang.

Før det enten kan anbefales eller frarådes at forsegle udtørret og inaktiv skimmelsvampevækst, er det dog vigtigt også at undersøge hvad der sker, hvis en forseglet konstruktion genopfugtes. Udtørret og inaktiv skimmelsvampevækst er ikke nødvendigvis død biomasse, men kan ved dårlig renovering eller ny vandskade blusse op igen med efterfølgende spore- og VOC-produktion. Almindelig maling er diffusionsåben, mens Protox Forsegler, ifølge databladet, kan fungere som dampspærre. Dette betyder at der kan ophobes ny fugt i materialet og det vides ikke, hvilken effekt dette vil have på den forseglede skimmelsvampevækst. Man ved derimod, at almindelig maling ikke er nogen hindring for gennemvækst, hvis materialerne, der indeholder skimmelsvampesporer, opfugtes.

7

LITTERATURLISTE

7 LITTERATURLISTE

Andersen, B., Frisvad, J. C., Søndergaard, I., Rasmussen, I. S., & Larsen, L. S. (2011). Associations between fungal species and water-damaged building materials. Applied and environmental microbiology, 77(12), 4180-4188.

Bjørnsson, K. (2018). Stadig mangelfuld viden om skimmel og helbredsproblemer. Svampe, 78, 22-25.

Bodalal, A., Zhang, J. S., Plett, E. G., & Shaw, C. Y. (2001). Correlations between the internal diffusion and equilibrium partition coefficients of volatile organic compounds (VOCs) in building materials and the VOC properties. Transactions-American Society of Heating Refrigerating and Air Conditioning Engineers, 107(1), 789-800.

Došen, I., Andersen, B., Phippen, C. B., Clausen, G., & Nielsen, K. F. (2016). *Stachybotrys* mycotoxins: From culture extracts to dust samples. Analytical and bioanalytical chemistry, 408(20), 5513-5526.

Farajollahi, Y., Chen, Z., & Haghighat, F. (2009). An experimental study for examining the effects of environmental conditions on diffusion coefficient of VOCs in building materials. CLEAN–Soil, Air, Water, 37(6), 436-443

Haghighat, F., Lee, C. S., & Ghaly, W. S. (2002). Measurement of diffusion coefficients of VOCs for building materials: review and development of a calculation procedure. Indoor air, 12(2), 81-91.

ISO 16000-9:2006 Indoor air — Part 9: Determination of the emission of volatile organic compounds from building products and furnishing — Emission test chamber method.

ISO 16200-1:2001 Workplace air quality — Sampling and analysis of volatile organic compounds by solvent desorption/gas chromatography — Part 1: Pumped sampling method.

Kendrick, B. (2017). The fifth kingdom. Hackett Publishing.

Kildesø, J., Würtz, H., Nielsen, K. F., Kruse, P., Wilkins, K., Thrane, U., Gravesen, S., Nielsen, P. A. & Schneider, T. (2003). Determination of fungal spore release from wet building materials. Indoor Air, 13, 148-155.

Korpi, A., Järnberg, J., & Pasanen, A. L. (2009). Microbial volatile organic compounds. Critical reviews in toxicology, 39(2), 139-193.

Lappalainen, V., Sohlberg, E., Järnström, H., Laamanen, J., Viitanen, H., & Pasanen, P. (2015). IAQ simulator tests: VOC emissions from hidden mould growth. Energy Procedia, 78, 1212-1217.

Lee, C.S., Ghaly, W. and Haghighat, F. (2000) VOC emissions from diffusion controlled building materials: analogy of conjugate heat transfer. Proceedings of Healthy Building 2000, Espoo, Finland, 4, 163–168.

Liu, Z., Ye, W., & Little, J. C. (2013). Predicting emissions of volatile and semivolatile organic compounds from building materials: a review. Building and Environment, 64, 7-25.

Meininghaus, R., Gunnarsen, L., & Knudsen, H. N. (2000). Diffusion and sorption of volatile organic compounds in building materials− Impact on indoor air quality. Environmental Science & Technology, 34(15), 3101-3108.

Meininghaus, R., & Uhde, E. (2002). Diffusion studies of VOC mixtures in a building material. Indoor air, 12(4), 215-222.

Menetrez, M. Y., Foarde, K. K., Webber, T. D., Dean, T. R., & Betancourt, D. A. (2007a). Testing antimicrobial cleaner efficacy on gypsum wallboard contaminated with

Stachybotrys chartarum. Environmental Science and Pollution Research-International, 14(7), 523-528.

Menetrez, M. Y., Foarde, K. K., Webber, T. D., Dean, T. R., & Betancourt, D. A. (2007b). Testing antimicrobial paint efficacy on gypsum wallboard contaminated with Stachybotrys chartarum. Journal of Occupational and Environmental Hygiene, 5(2), 63-66.

Micheluz, A., Manente, S., Rovea, M., Slanzi, D., Varese, G. C., Ravagnan, G., & Formenton, G. (2016). Detection of volatile metabolites of moulds isolated from a contaminated library. Journal of microbiological methods, 128, 34-41.

Nicolai, A., Grunewald, J., & Zhang, J. S. (2007). Recent improvements in HAM simulation tools: Delphin 5/CHAMPS-BES. In Proceedings of the 12. Symposium for Building Physics, Dresden, Germany.

Niedermayer, S., Fürhapper, C., Nagl, S., Polleres, S., & Schober, K. P. (2013). VOC sorption and diffusion behavior of building materials. European Journal of Wood and Wood Products, 71(5), 563-571.

Nordtest (1998). Building materials: Emissions testing using the Climpaq. NT BUILD 482. Nordtest, Finland.

Ojanen, T., & Ahonen, J. (2005). Moisture performance properties of exterior sheathing products made of spruce plywood or OSB. VTT Working Papers 1459 7683 (http://www. vtt. fi/inf/pdf/) 2005.

Palaty, C. (2011). *Mould Remediation in Indoor Environments: Review of Guidelines and Evidence.* National Collaborating Centre for Environmental Health. https://www.ncceh.ca/sites/default/files/Mould_Remediation_May_2010.pdf

Peitzsch, M., Bloom, E., Haase, R., Must, A., & Larsson, L. (2012). Remediation of mould damaged building materials—efficiency of a broad spectrum of treatments. Journal of Environmental Monitoring, 14(3), 908-915.

Reeslev, M., Miller, M., & Nielsen, K. F. (2003). Quantifying mold biomass on gypsum board: comparison of ergosterol and beta-N-acetylhexosaminidase as mold biomass parameters. Applied and environmental microbiology, 69(7), 3996-3998.

Salthammer, T., & Uhde, E. (2009). *Organic indoor air pollutants. Occurrence, measurement, evaluation*. Weinheim: Wiley-VCH; ISBN: 3527296220

Samson, R. A., Houbraken, J., Thrane, U., Frisvad, J. C., & Andersen, B. (2019). *Food and indoor fungi*. Westerdijk Fungal Biodiversity Institute.

SBi Anvisning 205. Koch, A. P., & Nielsen, P. A. (2003). Renovering af bygninger med skimmelsvampevækst. SBi forlag.

SBi Anvisning 274. Thrane, U., Olsen, K. C., Brandt, E., Ebbehøj, N. E., & Gunnarsen, L. (2020). Skimmelsvampe i bygninger–undersøgelse og vurdering. SBi forlag.

Thrane, U., & Andersen, B. (2018). Skimmelsvampe i danske bygninger. Svampe, 78, 26-35.

Thrane, A. U., Andersen, B., & Nielsen, K. F. (2001). Skimmelsvampe og indeklimakvalitet. Dansk Kemi, 82(2), 33-35.

Xu, J., Zhang, J. S., Liu, X., & Gao, Z. (2012). Determination of partition and diffusion coefficients of formaldehyde in selected building materials and impact of relative humidity. Journal of the Air & Waste Management Association, 62(6), 671-679.

Wang, X. W., Houbraken, J., Groenewald, J. Z., Meijer, M., Andersen, B., Nielsen, K. F., Crous, P. W. & Samson, R. A. (2016). Diversity and taxonomy of *Chaetomium* and chaetomium-like fungi from indoor environments. Studies in Mycology, 84, 145-224.

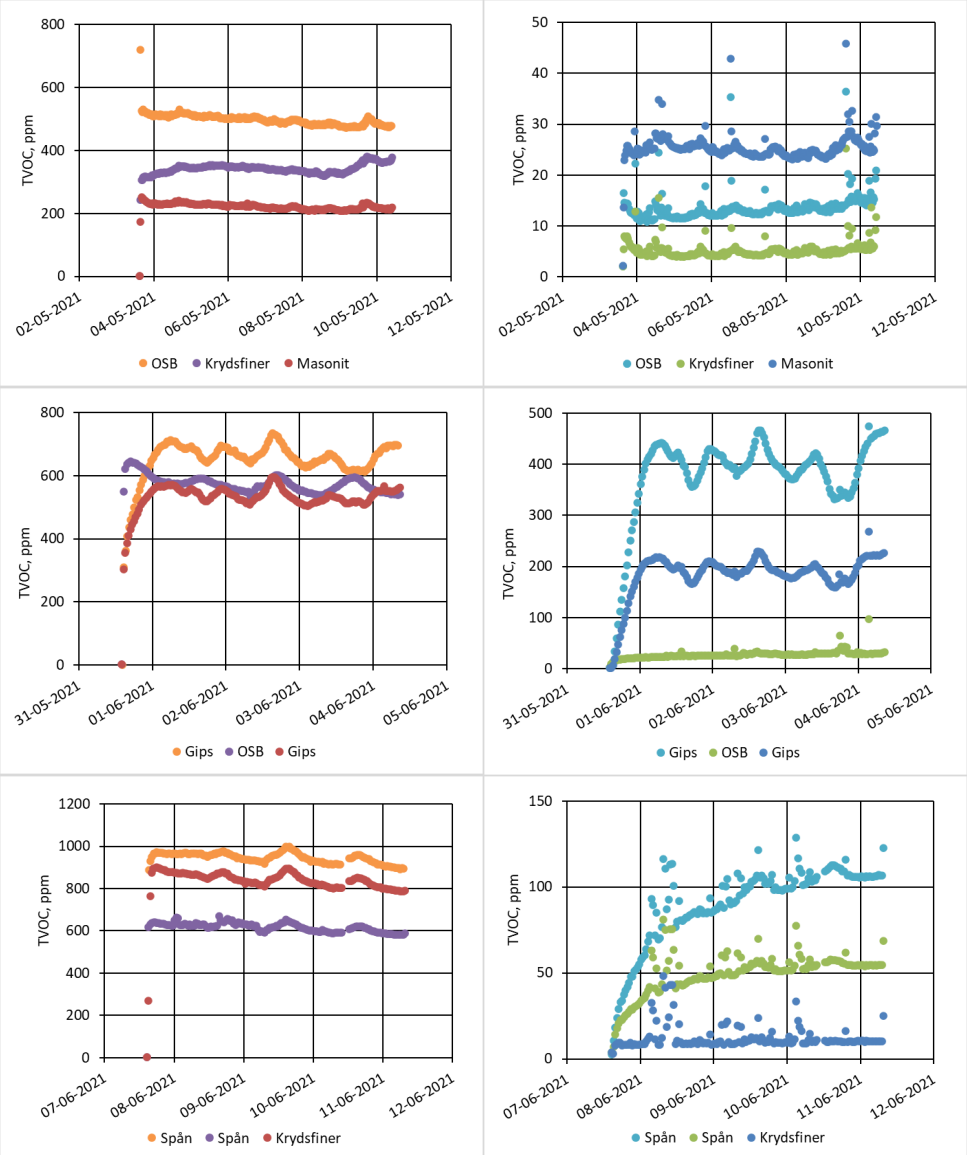
8

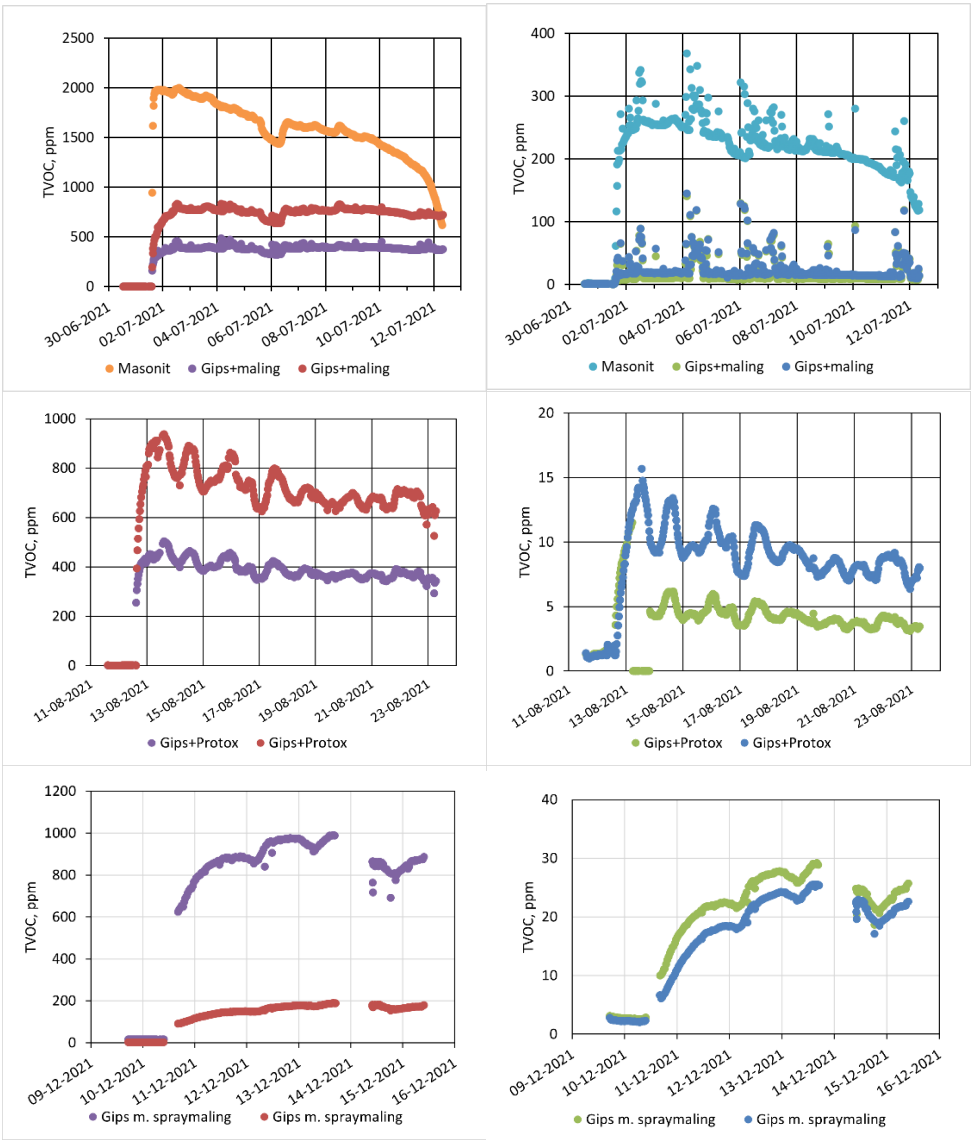
BILAG

BILAG 1

Koncentrationen af TVOC

Koncentrationen af TVOC målt i kildekammeret til venstre og modtage kammeret til højre for forsøgsopstillinger i de seks forsøg. Nedenstående afbildninger er ikke korrigeret for afsmitning.





Figur B1. Koncentrationer af TVOC målt i hhv. kildekammer (tv.) og modtagekammer (th.)

BILAG 2

Luftskifte

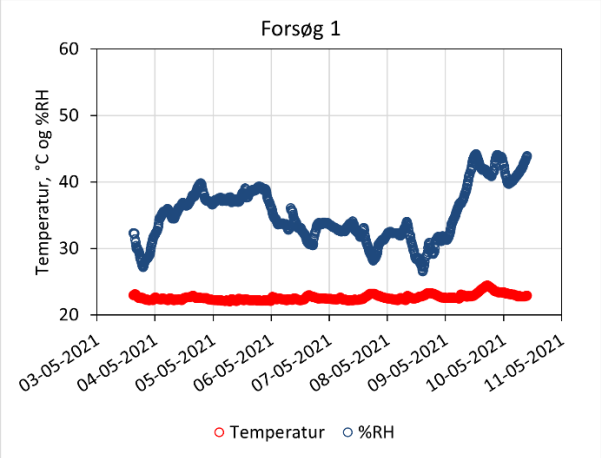
Tabel B2. Luftskiftet blev målt to gange under hvert forsøg. *I tre forsøg blev luftskiftet målt fire gange. Tabellen viser luftskiftet samt middelværdien og den relative differens.

Materiale	Måling nr.	Luftskifte (h^{-1})				Kammer	Middel-værdi (h^{-1})	Relativ differens (%)
		I	II	III	IV			
Masonit	I	6,4	6,9			Tom	6,7	8
		8,3	8,6			VOC-kilde	8,5	4
	II	3,3	3,2	3,3	3,4	Tom	3,3	2
		3	2,9	2,6	2,8	VOC-kilde	2,8	6
Krydsfiner	I	6,1	6			Tom	6,1	2
		6,9	5,7			VOC-kilde	6,3	19
	II	5,8	6,2			Tom	6	6
		4,2	4,2			VOC-kilde	4,2	1
OSB	I	6,9	6,8			Tom	6,9	1
		5,7	5,3			VOC-kilde	5,5	7
	II	6,2	7,2			Tom	6,7	15
		5	5,6			VOC-kilde	5,3	10
Gips	I	4,6	4,6			Tom	4,6	1
		4,6	4,7			VOC-kilde	4,6	4
	II	2,9	2,9			Tom	2,9	2
		3	2,9			VOC-kilde	3	1
Spånplade	I	4,5	4,4			Tom	4,4	1
		4,4	4,5			VOC-kilde	4,4	1
	II	3,8	3,9			Tom	3,8	1
		3,7	3,7			VOC-kilde	3,7	1
Gipsplade med maling	I	4,5	4,5	4,4	4,5	Tom	4,5	1
		4	4	3,4	3,4	VOC-kilde	3,7	9
	II	4,6	4,4	4,1	4,1	Tom	4,3	6
		6,2	5,9	6	6	VOC-kilde	6	2
Gipsplade med Protox	I	3,9	3,7			Tom	3,8	5
		5,6	5,4			VOC-kilde	5,5	4
	II	4,3	4,1			Tom	4,2	5
		3,2	3			VOC-kilde	3,1	6
Gipsplade med spraymaling	I	5,6	6,3			Tom	5,9	8
		3,9	4,2			VOC-kilde	4,0	5
	II	3,6	4,7			Tom	4,0	14
		4,4	4,5			VOC-kilde	4,6	2

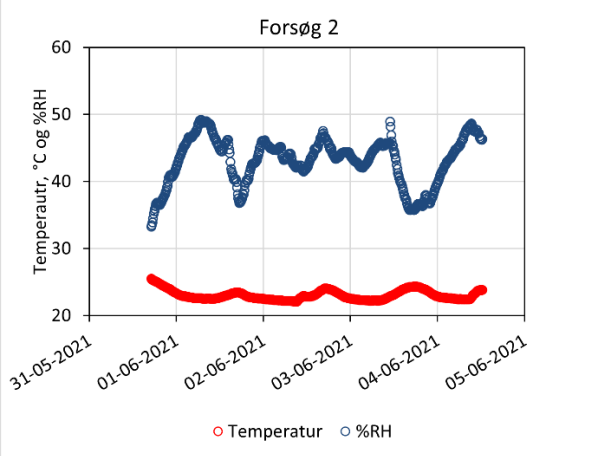
BILAG 3

Temperatur og RF

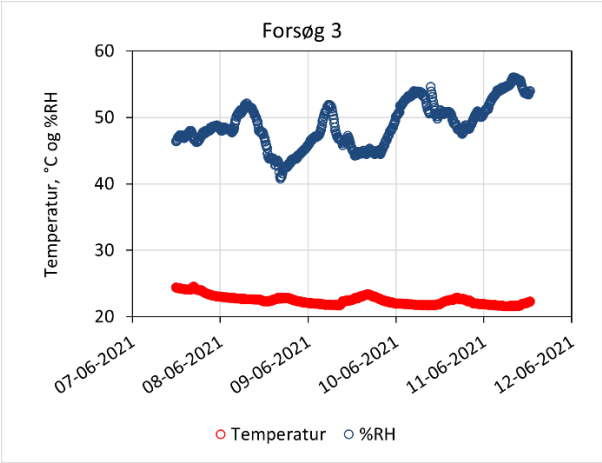
Der ser ikke ud til at være en entydig sammenhæng mellem temperatur og RF i rumluften. Den målte temperatur og RF under forsøgene er vist herunder. *I og II angiver hver af de to dobbeltbestemmelser.



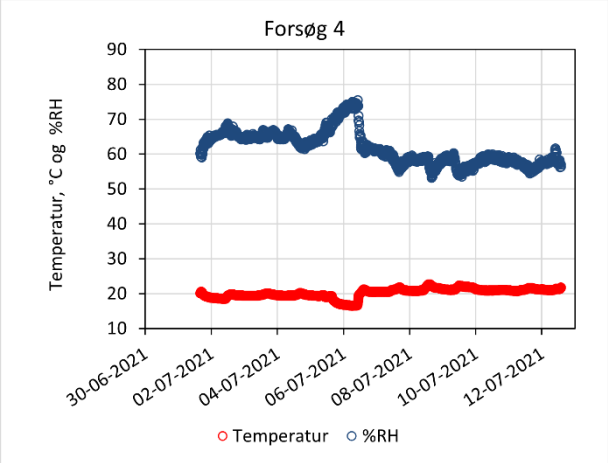
Figur B3.1. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem masonit I, krydsfiner I og OSB I.



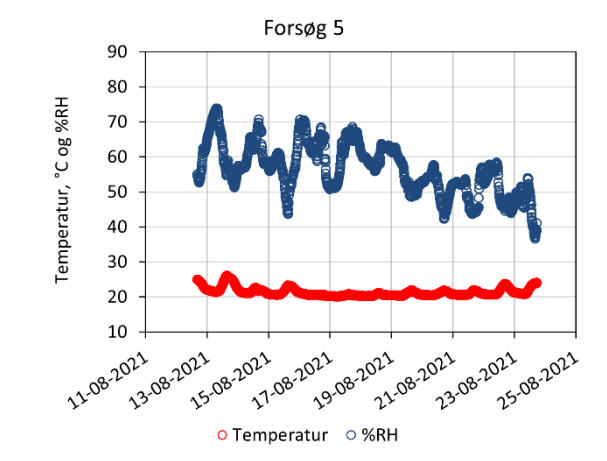
Figur B3.2. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem OSB II, gipsplader I og II.



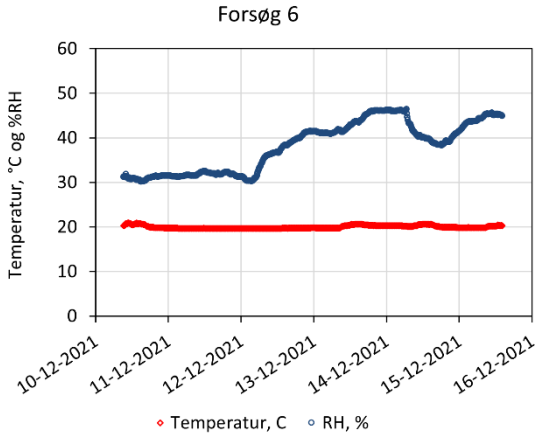
Figur B3.3. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem krydsfiner II, spånplade I og II.



Figur B3.4. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem gipsplade med maling I og gipsplade med Protox Forsegler I.



Figur B3.5. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem gipsplade med maling II og gipsplade med Protox Forsegler II.



Figur B3.6. Temperatur og RF under måling af VOC-diffusionen gennem gisplade med spraymaling I og II.

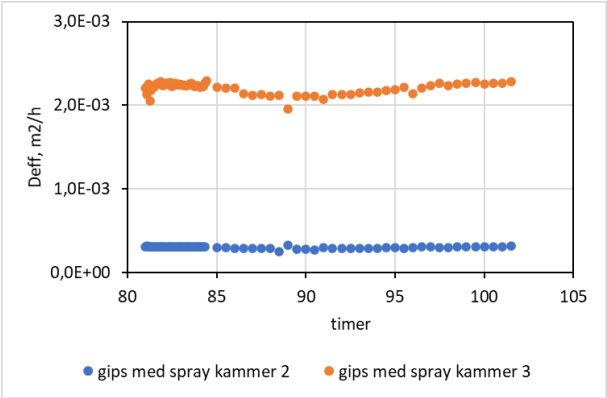
BILAG 4

Den effektive diffusionskoefficient

Der er en del variation over tid for de estimerede effektive diffusionskoefficienter, men også mellem bestemmelserne på samme materiale eller overfladebehandling. Der er taget en middelværdi af den effektive diffusionskoefficient bestemt i perioden mellem 65 og 75 timer efter begyndelse af forsøgene. Standardafvigelse (SD) og relativ standardafvigelse (RSD) er udregnet for middelværdien i den tidsperiode. For gips med spraymaling er middelværdien taget i perioden 85 til 95 timer efter begyndelse pga. apparat nedbrud (data ses nedenfor på Figur B4.1.). Den relative differens på middelværdien for to samhørende prøver udregnet, dvs. afvigelsen på dobbeltbestemmelsen. Tallene er angivet i Tabel B4.

Tabel B4. Middelværdi af den effektive diffusionskoefficient i periode 65 til 75 timer efter begyndelse af forsøget. Standardafvigelse (SD) og relativ standardafvigelse (RSD) er udregnet for middelværdien i den tidsperiode. Den relative differens på middelværdien for to samhørende prøver er angivet. Forsøgsnummer er angivet efter materialeangivelsen.

D_{eff}, m^2/h i perioden 65-75 timer				
Materiale	Middelværdi (m^2/h)	SD (m^2/h)	RSD (%)	Differens på prøver (%)
Masonit 1	$0{,}4 \times 10^{-3}$	$5{,}3 \times 10^{-6}$	1,3	17
Masonit 4	$0{,}4 \times 10^{-3}$	$3{,}4 \times 10^{-5}$	9,6	
OSB 1	1×10^{-3}	$4{,}0 \times 10^{-5}$	3,2	2
OSB 2	1×10^{-3}	$3{,}2 \times 10^{-4}$	26	
Gips 2	7×10^{-3}	$1{,}3 \times 10^{-3}$	18	46
Gips 2	11×10^{-3}	$2{,}1 \times 10^{-3}$	19	
Krydsfiner 1	$0{,}1 \times 10^{-3}$	$9{,}5 \times 10^{-6}$	7,9	39
Krydsfiner 3	$0{,}2 \times 10^{-3}$	$2{,}5 \times 10^{-5}$	14	
Spånplade 3	1×10^{-3}	$3{,}8 \times 10^{-5}$	2,7	15
Spånplade 3	2×10^{-3}	$4{,}5 \times 10^{-5}$	2,9	
Gips med maling 4	$0{,}5 \times 10^{-3}$	$2{,}9 \times 10^{-4}$	60	32
Gips med maling 4	$0{,}7 \times 10^{-3}$	$6{,}2 \times 10^{-4}$	92	
Gips med Protox 5	$0{,}1 \times 10^{-3}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	9,4	23
Gips med Protox 5	$0{,}1 \times 10^{-3}$	$1{,}1 \times 10^{-5}$	7,5	
Gips med spraymaling*	$0{,}3 \times 10^{-3}$	$1{,}5 \times 10^{-5}$	5,1	152
Gips med spraymaling*	2×10^{-3}	$5{,}6 \times 10^{-5}$	2,6	

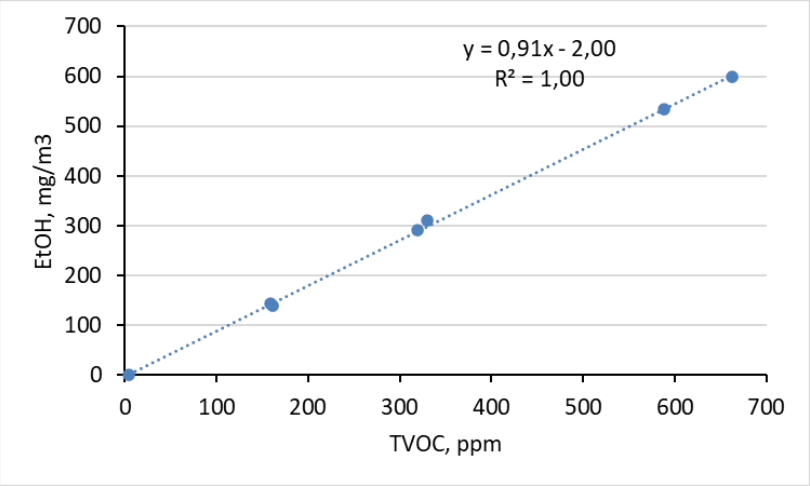


Figur B4.1. Effektiv diffusionskoefficient for gips med spraymaling i forsøg 6 i perioden 80-100 timer efter start af forsøget.

BILAG 5

Omregning af TVOC til ethanol

Koncentrationen af ethanol (mg m^{-3}) målt i luften (30 min. middel) plottet mod middelkoncentrationen af TVOC (ppm) (midlet fra 5 min.'s værdier). Den lineære regressionslinje er angivet.

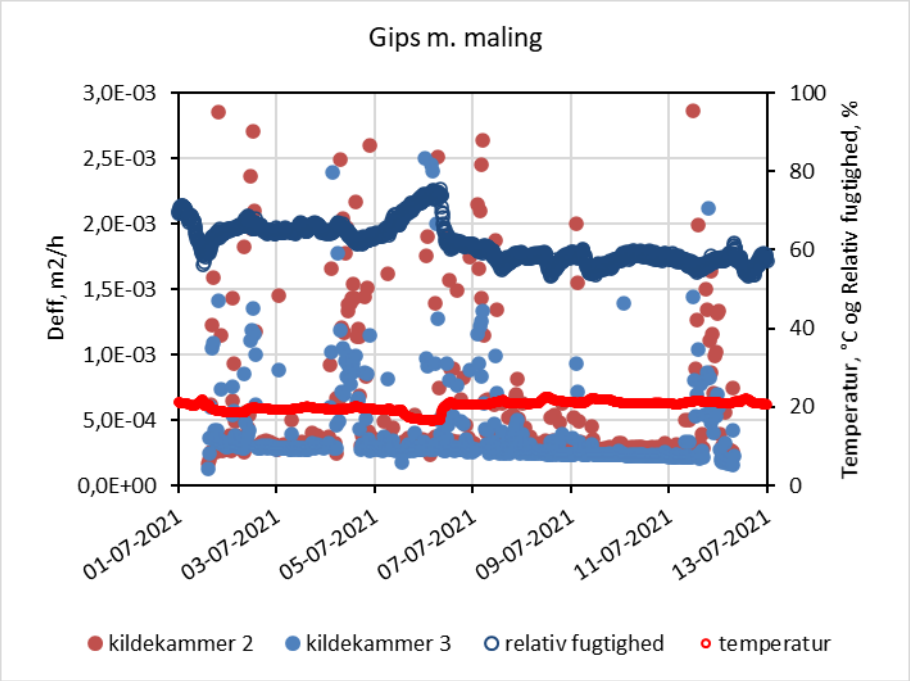


Figur B5.1. Koncentrationen af ethanol målt ved aktiv sampling med pumpe på et kulrør og efterfølgende analyseret af Eurofins (mg/m^3) plottet mod koncentrationen af TVOC målt med Innova 1312 photo akustisk gas monitor (ppm).

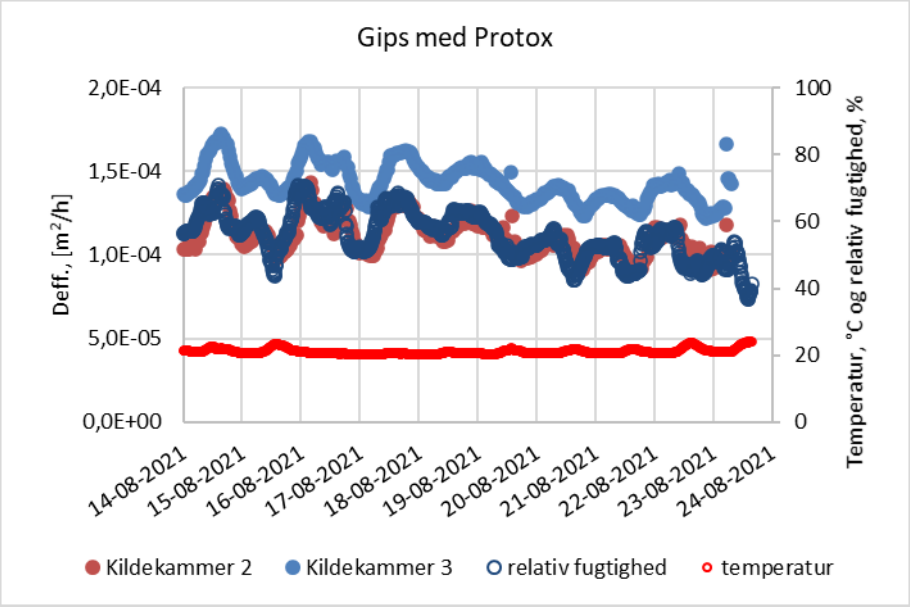
BILAG 6

Den effektive diffusionskoefficient og temperatur og RF

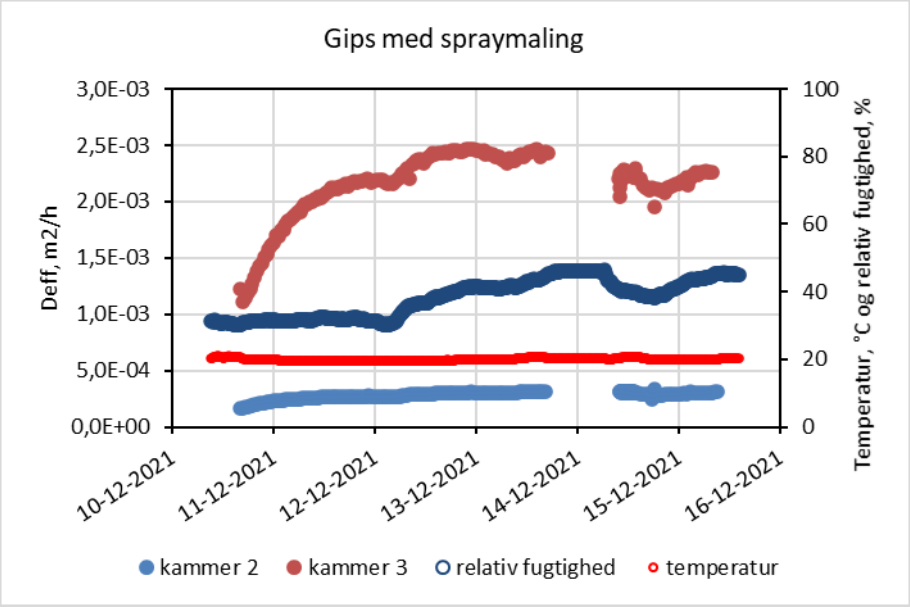
Der ser ud til at være en kovariation mellem RF og den effektive diffusionskoefficient for ethanol gennem gipsplader forseglet med ProtoxForsegler. Ifølge producenten forsegler ProtoxForsegler mod diffusion af fugt og denne sammenhæng er derfor bemærkelsesværdig. Den samme sammenhæng er svær at fastsætte for gipsplader malet med hvid akrylmaling på grund af 'baggrundsstøj' i målingerne.



Figur B6.1. Den effektive diffusionskoefficient for gipsplader forseglet med maling er vist sammen med temperatur og RF under forsøget.



Figur B6.2. Den effektive diffusionskoefficient for gipsplader forseglet med ProtoxForsegler samt temperatur og RF under forsøget.



Figur B6.3. Den effektive diffusionskoefficient for gipsplader behandlet med spraymaling er vist sammen med temperatur og RF under forsøget.

Forsegling af skjult skimmelsvampevækst

Skimmelsvampe danner under deres vækst i bygninger både sporer og flygtige stoffer, der er mistænkt for at give helbredsgener for bygningsbrugere. Ved renovering af skimmelsvampe-ramte bygninger anbefales det, at al inficeret materiale fjernes eller afrenses. Men somme tider er dette ikke fysisk eller økonomisk muligt. Forsegling eller indkapsling anvendes ved nogle renoveringer, men metoden har aldrig været testet videnskabeligt. Formålet med projektet var at undersøge om det er muligt at forsegle/indkapsle skimmelsvampevækst i bygningens svært tilgængelige dele af klimaskærmen, således at sporer og flygtige stoffer forbliver på og i de materialer, de er dannet på og ikke trænger ud i indeklimaet, hvor mennesker opholder sig.

Gips- og OSB-plader blev opfugtet og de skimmelsvampesporer, der naturligt var i materia-lerne, fik lov til at gro ud. Frigivelse af sporer, partikler og flygtige organiske stoffer (TVOCer) blev undersøgt under laboratorieforhold i CLIMPAQ opstillinger. Mycometer Air blev anvendt til sporedetektion og en Lasair II til partikelbestemmelse. Ethanol blev brugt som modelstof for TVOCerne og detekteret med en Innova 1312 gasmonitor. Almindelig Flügger akrylvægmaling, Luxi maling på spraydåse og Protox Forsegler blev testet for deres evner til at indkapsle sporer, partikler og ethanol.