DTU Byg
Institut for Byggeri og Anlæg

BYG R-440
September 2020

Kontrol og forebyggelse af skimmelsvampevækst ved indvendig efterisolering

Laboratoriebaserede undersøgelser af materialers vandaktivitet og pH i forhold til skimmelsvampevækst

Birgitte Andersen, Nickolaj F. Jensen, Eva B. Møller, Søren P. Bjarløv og Carsten Rode



DTU Byg

Kontrol og forebyggelse af skimmelsvampevækst ved indvendig efterisolering

Laboratoriebaserede undersøgelser af materialers vandaktivitet og pH i forhold til skimmelsvampevækst

Forfattere: Birgitte Andersen[1]*, Nickolaj F. Jensen[2], Eva B. Møller[2], Søren P. Bjarløv[2] og Carsten Rode[2]

Serietitel BYG-R 440
Udgivelsesår 2020
Fotos: Alle fotos af Nickolaj F. Jensen, undtagen figur 7 og 9 af Birgitte Andersen
ISBN: 87-7877-541-8
Udgivet af: Institut for Byggeri og Anlæg, DTU
Brovej, Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby

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

[1]DTU Bioengineering, Søltofts Plads, Bygning 221, Danmarks Tekniske Universitet, 2800 Kgs. Lyngby, Danmark
[2]DTU Byg, Bygning 118, Danmarks Tekniske Universitet, 2800 Kgs. Lyngby, Danmark
*Nuværende arbejdsplads:
Sektionen for Bygningers Energieffektivitet, Indeklima og Bæredygtighed (EIB), BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV

Indhold

1. Baggrund 3
1.1 Projektets formål 4
1.2 Projektets målgrupper 4

2. Materialer og Metoder 4
2.1 Arbejdspakke 1 4
2.2 Arbejdspakke 2 6
2.3 Arbejdspakke 3 8

3. Resultater 8
3.1 Test af isolerings- og limmørtelsystemer 8
3.2 Test af afrensningsmetoder 11
3.3 Test af isoleringssystemerne på testvæggene 11
3.3.1 Fugt- og pH forhold i testvæggene 12
3.3.2 Skimmelsvampevækst i testvæggene 14

4. Samlede konklusioner 15

5. Formidling 16

6. Referencer 17

1. Baggrund

Efterisolering af boliger giver ikke kun en bedre varmeøkonomi, men også et bedre indeklima. Indblæsning af isoleringsmateriale i hulmure og opsætning af udvendig isolering er nogle af de foretrukne tiltag, som dog ikke altid er mulige. Ældre huse er måske ikke hulmurede eller også er facaderne bevaringsværdige, og så er indvendig efterisolering den eneste mulighed. Indvendig isolering indebærer dog nogle potentielle udfordringer. Da indvendig isolering altid sænker temperaturen af den oprindelige væg, er der risiko for kondens og skimmelsvampevækst i skillefladen, hvor væg og isolering mødes, idet der kan forventes en relativ luftfugtighed (RF), der er på grænsen til den kritiske vandaktivitet (a_W) i materialet for skimmelsvampevækst. Vandaktiviteten (a_W) i et materiale svarer til den relative luftfugtighed (RF) i ligevægt lige over materialet. Den kritiske a_W for skimmelsvampevækst er >0,75 svarende til en RF på >75 % i materialeoverfladen ved rumtemperatur og neutral pH.

Skimmelsvampevækst i boligen kan give forskellige problemer alt efter omfanget og arten. Nogle skimmelsvampearter producerer mykotoksiner og mikro-partikler under væksten, som kan give irriterede slimhinder og næseblod (fx *Stachybotrys* og *Chaetomium*), mens andre producerer flygtige organiske forbindelser (VOC'er), der kan give hovedpine og eksem (fx *Penicillium* og *Cladosporium*). Årsagen til skimmelsvampevækst i boligen er altid fugt. Enten efter vandskader eller på grund af længere tids forhøjet luftfugtighed kombineret med kuldebroer. Desuden viser ny forskning, at nogle indeklimaskimmelsvampe er i stand til at vokse ned til a_W-værdier på 0,63, hvilket svarer til en RF værdi på 63 % (Stevenson et al. 2015).

Der findes flere forskellige isoleringssystemer til indvendig isolering på markedet. I modsætning til den traditionelle mineraluld kombineret med en dampspærre, består en del nye systemer af et fast isoleringsmateriale og en tilhørende limmørtel. I følge producenterne er det faste isoleringsmateriale uorganisk, og limmørtlen har så høj pH-værdi, at skimmelsvampe ikke kan overleve. Forsøg på DTU har dog vist, at der kan opstå skimmelsvampevækst i forsøgsopsætningerne for nogle isoleringssystemer.

Da DTU-forsøgene også tyder på, at man ikke altid kan holde fugtniveauet nede i nogle konstruktioner med indvendig isolering, må man sikre dem mod skimmelsvampevækst på andre måder. Det kan ske ved at sikre at alt skimmelsvampevækst og organisk materiale (fx oprindelige klister- og tapetrester), som skimmelsvampene kan leve af, er fjernet inden opsætningen. Desuden er det vigtigt at sikre sig, at der ikke er luftlommer i skillefladen mellem den oprindelige væg og isoleringen, så eventuel tilbageværende skimmelsvampevækst kan brede sig uhæmmet. I nogle tilfælde, hvor skimmelsvampevæksten ikke fjernes, enten på grund af uvidenhed eller af økonomiske årsager, påføres væggene skimmelsvampe-hæmmende midler inden opsætningen, hvilket dog er uønsket ud fra et sundhedsperspektiv.

Uanset udgangspunkt, er der interesse for at vide, om et basisk miljø i limmørtellaget kan være med til at forhindre eksisterende skimmelsvampe i at brede sig, og i hvilket omfang det basiske miljø kan opretholdes i limmørtlen.

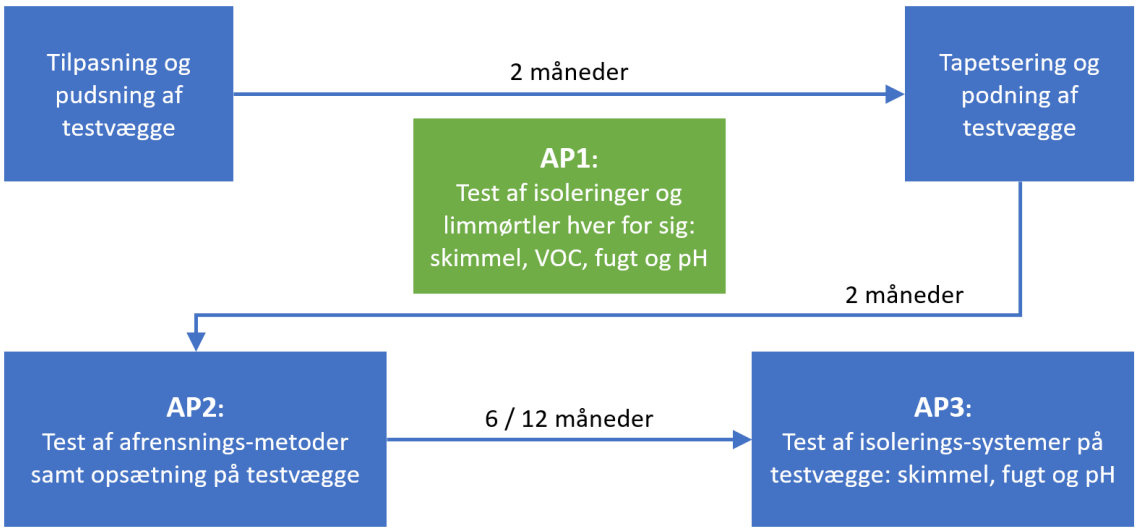
1.1 Projektets formål

Formålet med projektet er at undersøge, om *worst case* betingelser i skillefladen mellem den oprindelige væg og det opsatte isoleringsmateriale fører til vækst af skimmelsvampe. Det skal undersøges, om det basiske miljø (pH > 11), der kan være i limmørtlen, er tilstrækkeligt til at forhindre skimmelsvampevækst, selv hvis fugtigheden (vandaktiviteten, a_w) i skillefladen kommer over de niveauer (a_w > 0,75), der almindeligvis betragtes som kritisk for skimmelsvampevækst. Endvidere vil de skimmelsvampearter, der findes i isoleringssystemerne, blive kortlagt med henblik på at bestemme deres toksiske potentiale.

1.2 Projektets målgrupper

Den primære målgruppe er rådgivere og forskere, der udvikler praktiske løsninger for indvendig isolering, idet projektet vil tilvejebringe ny erkendelse om de biologiske og fysiske faktorer, der fører til skimmelsvampeproblemer samt hvilke fugt- og pH niveauer, der kan betragtes som sikre. Desuden målretter projektet sig mod boligejere og -foreninger med bygninger, der er opført før 1940 og hvor udvendig isolering ikke er en mulighed.

2. Materialer og Metoder



Figur 1. Flowdiagram over projektets forskellige faser og arbejdspakker.

2.1 Arbejdspakke 1

Test af isolerings- og limmørtelsystemer separat

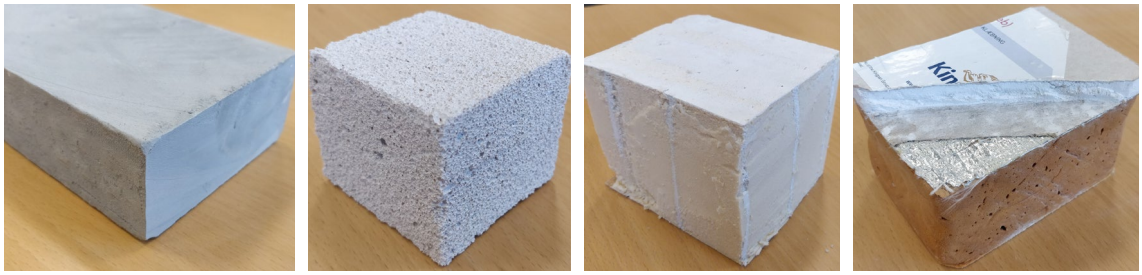
Forsøg på DTU har vist, at nogle byggematerialer (fx gipsplader) allerede under produktionen indlejrer skimmelsvampesporer, som så vokser ud, når fugtforholdene tillader det (Andersen et al., 2016). Forsøgene viste også, at mange skimmelsvampe, der er almindelige i indeklimaet, er i stand til at vokse ved pH-værdier omkring 9,0. AP1 skal vise om de forskellige isoleringsmaterialer er fri for skimmelsvampesporer, om de i sig selv kan understøtte skimmelsvampevækst og

om de forskellige limmørtelprodukter, der bruges, har så høj pH at de kan hæmme skimmelsvampevækst eller ligefrem dræbe skimmelsvampesporer.

Fire forskellige systemer til indvendig efterisolering blev undersøgt (Tabel 1 og Figur 2): Calsitherm, Multipor, IQ Therm og Kingspan og deres tilhørende limmørtelprodukter blev undersøgt separat. Hver test blev gennemført med tre ens prøveemner. Hvert materiale blev tilsat sterilt vand (25 vægt %) og inkuberet ved stuetemperatur (20 °C) i plastkasser med meget høj relativ fugtighed (> 96 % RF).

Tabel 1. Isoleringssystemer anvendt i projektet (benævnelser brugt i publikation).

Type	**Benævnelse**	**Materiale**	**Karakteristika**
Calsitherm	CaSi	Kalciumsilikat	Diffusionsåben/kapillaraktiv
Multipor	AAC	Let porebeton	Diffusionsåben
IQ Therm	PUR-CM	Polyuretanskum med kapillarsugende kanaler	Semi-diffusionsåben
Kingspan	Phenolic	Fenolskum med aluminium folie og gipsplade	Diffusionstæt



Figur 2. Isoleringsmaterialer: fra venstre mod højre Calsitherm, Multipor, IQ therm og Kingspan.

Hvert materiale blev også podet med en suspension af sporer af fire kendte skimmelsvampearter (Tabel 2) og behandlet som ovennævnt. Alle materialer blev undersøgt hver 14. dag i 3 måneder for skimmelsvampevækst ved hjælp af direkte mikroskopi og tape-præparater i lysmikroskop.

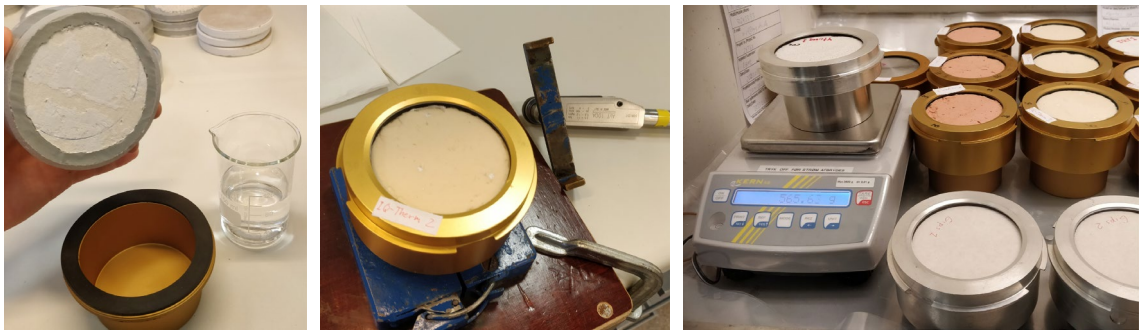
Tabel 2. Skimmelsvampearter anvendt i projekter.

Skimmelsvampeart	**IBT nummer**	**Karakteristika og præferencer** (Andersen et al., 2011)
Acremonium murorum	42592	Almindelig på puds, kræver høj vandaktivitet
Aspergillus versicolor	33558	Almindelig på alle materialer, middel til høj vandaktivitet
Penicillium chrysogenum	34061	Almindelig på alle materialer, lav til middel vandaktivitet
Wallemia sebi	32220	Almindelig på puds, lav vandaktivitet

Desuden blev isoleringssystemerne (isoleringsmaterialer, limmørtler og indvendig puds) testet for gasgennemtrængelighed med acetone, ethanol og 2-heptanon og sammenlignet med tilsvarende data for vand.

Forsøget blev udført for at efterligne diffusion af flygtige organiske forbindelser (VOC'er) produceret af almindelige indendørs skimmelsvampe. Tre prøver på Ø80 mm af hvert

isoleringssystem blev testet og forsøgene blev udført med aluminium- og stålkopper, som vist i Figur 3, hvor 100 ml opløsningsmiddel blev hældt i koppen og isoleringsprøven forseglet med en gummiring for at eliminere utætheder, så fordampning kun kan ske genne materialeprøven. Periodisk vejning af prøverne blev udført og resultaterne blev evalueret ved lineær korrelation mellem tid og vægttab. Temperatur og relativ luftfugtighed (RF) blev målt hen over forsøgs-perioderne og varierede henholdsvis fra 20 til 22 °C og fra 30 til 45%. Der blev antaget mætningsdamptryk for VOC'en nede i koppen, og ingen VOC i luften over koppen pga. ventilation af testkammeret. Forskellen i damptryk henover materialeprøverne blev bestemt ud fra temperaturmålingerne til senere beregning af damppermeabiliteten af isoleringssystemerne.

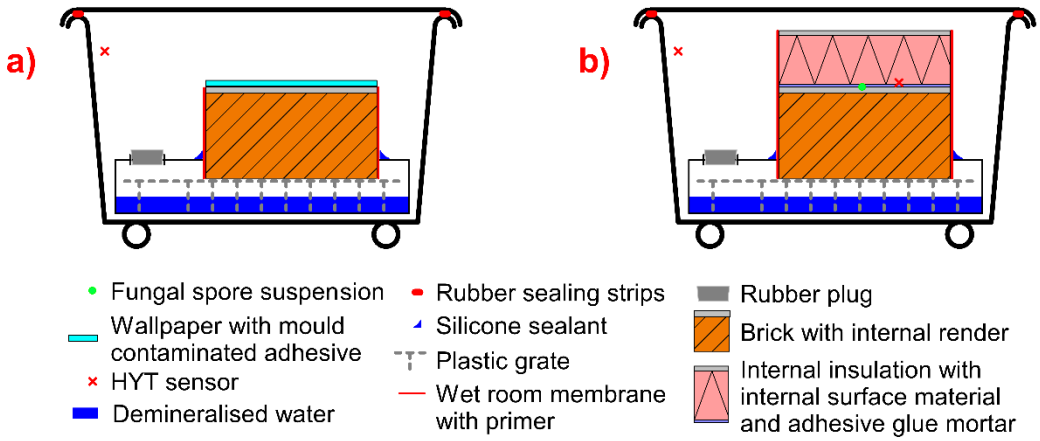


Figur 3. Klargøring isoleringssystemerne til VOC-test og periodisk vejning af kopperne.

2.2 Arbejdspakke 2

Test af afrensningsmetoder

Afrensning af testvægge for organisk materiale og eventuel skimmelsvampevækst inden opsætning af indvendig efterisolering er vigtig, så det skimmelsvampemycelium og -sporer, der måtte være tilbage på de rå testvægge, ikke har nogle næringskilder. Hvis der både er næring nok i form af tapet- og klisterrester og levedygtigt mycelium og/eller sporer, vil skimmelsvampene fortsætte deres vækst igen, når forholdene tillader det. Hvis afrensningsmetoderne er effektive, vil der ikke ses ny vækst.



Figur 4. Forsøgsopsætning af testvægge uden (A) og med (B) isolering. (Jensen et al. 2020a),

Tolv ens eksisterende murede testvægge (330 x 350 x 180 mm) blev først pudset op med luftkalk (7,7 %) og dernæst tapetseret med savsmuldstapet og almindelig stivelsesklister. Inden tapetseringen blev tapetklisteren oprørt med svampesporer fra de fire indeklimaskimmel-svampe, der også blev brugt i AP 1. Derefter blev hver testvæg anbragt i en kasse med vand (ingen berøring), som igen blev anbragt i en større kasse (Figur 4), hvor den relative fugtighed blev holdt på mellem 96 og 98 % RF for at simulere *worst case* som fx slagregn.

De 12 store kasser blev opbevaret i et rum med en luftfugtighed på 50 % og en temperatur på 18-20 °C på DTU Byg. Efter 2 måneders inkubering blev de 12 testvægge taget op og afrenset på forskellige måder, som angivet i Tabel 3 og vist i Figur 5.

Tabel 3. Afrensningsmetoder for de enkelte testvægge, tallene angiver testvægnummeret.

		Afrensningsmetode (testvægnummer)		
Materiale	**Benævnelse**	Håndkraft	Mekanisk	Dampafrensning
Calsitherm	CaSi	1	5	9
Multipor	AAC	2	6	10
IQ Therm	PUR-CM	3	7	11
Kingspan	Phenolic	4	8	12

Tre forskellige metoder blev afprøvet: 1) Håndkraft: fjernelse af gammelt tapet og synlige klisterrester fra pudsoverflader med spatel, 2) Mekanisk: pudsen fjernes indtil den rå mur og 3) Damprensning: metode 1 efterfulgt af afrensning med tørdamp, der dræber og fjerner skimmelsvampevækst.



Figur 5. Afrensning ved håndkraft og spatel, mekanisk afbankning af pudslag og dampafrensning.

Testvæggene blev testet for tilbageværende skimmelsvampevækst med Mycometer-metoden. Efter afrensning og test blev testvæggene sat tilbage i kasserne indtil påsætning af isolering. Pudslaget på de mekanisk afrensede testvægge blev genetableret før Mycometer prøvetagning.

2.3 Arbejdspakke 3

Test af isoleringssystemerne på testvæggene
De 12 afrensede testvægge fra AP2 blev podet igen med de ovennævnte skimmelsvampe. Derefter blev de 4 forskellige isoleringssystemer sat op efter producenternes anvisninger, herunder med disses tilhørende limmørtler. Der blev også indsat fugtmålere (HYT221 følere fra Innovative Sensor Technology IST AG (IST, 2017)) mellem pudslag og limmørtlen. Testvæggene blev holdt fugtige i lufttætte kamre med >96 % RF. Efter 6 og 12 måneder blev der testet for skimmelsporeudslip ved hjælp af en Eco Mas-100 air sampler på V8 og DG18 (Samson et al., 2019).



Figur 6. Udboring og test af isoleringskerner.

Efter 6 og 12 måneders inkubering ved 18-20 °C blev der boret kerner ud af isolerings-materialerne, for at bestemme fugtindholdet og pH-værdien. Skimmelsvampevæksten blev bestemt ved brug af både Mycometer metoden og dyrkning på V8 og DG18 som vist i Figur 6.

3. Resultater

Alle resultater er publiceret i artiklen: Jensen, N.F., Bjarløv, S.P., Rode, C., Andersen, B., Møller, E.B. (2020), Laboratory based investigation of the materials' water activity and pH relative to fungal growth in internally insulated solid masonry walls, indsendt til *Indoor Air*. I nærværende rapport gives kun et resume af de opnående resultater og konklusioner.

3.1 Test af isolerings- og limmørtelsystemer

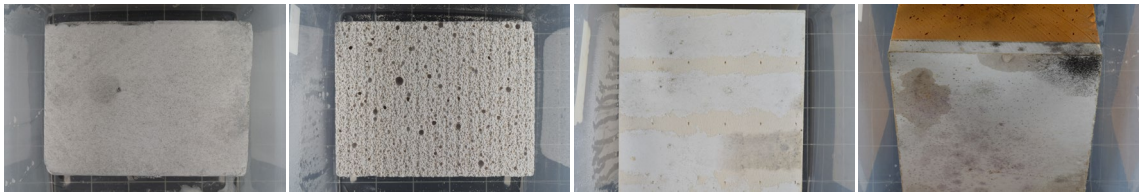
3.1.1 Skimmelsvampevækst i isoleringsmaterialerne

Resultaterne i Tabel 4 og Figur 7 viste, at isoleringsmaterialerne, med Kingspan som den eneste undtagelse, var fri for indbyggede skimmelsvampesporer, men at skimmelsvampesporer kunne vokse ud, hvis der var lidt næring (i form af tapetklister) og fugtighed tilstede. På gipspladerne, der er en integreret del af Kingspan systemet, blev der også fundet andre skimmelsvampearter end dem, der var podet i forvejen. Især *Stachybotrys chartarum*, der er kendt for at producere VOC'er, var dominerende i forhold til de tilsatte skimmelsvampe.

Tabel 4. Laboratorietest af individuelle isoleringsmaterialer uden (-) og med (+) kunstig podning med sporer af de fire skimmelsvampearter i Tabel 2.

Materiale	Skimmelsvampevækst: - podning	Skimmelsvampevækst: + podning
Calsitherm	Ingen vækst	Ikke testet
Multipor	Ingen vækst	Ringe vækst *Acremonium murorum*
IQ Therm	Ingen vækst	Massiv vækst af *Aspergillus versicolor*
Kingspan	Vækst på af *Stachybotrys*, *Cladosporium* og *Ulocladium* spp.	Massiv vækst af *Asp. versicolor* samt *Stachybotrys, Cladosporium* og *Ulocladium* spp.

Konklusion: Alle 3 testede isoleringsmaterialer kan understøtte skimmelsvampevækst, hvis den rette fugtighed og de rette skimmelsvampe er til stede ved for eksempel manglende afrensning af eksisterende skimmelsvampevækst. Den fjerde isolering blev ikke testet pga. for sen levering. Kun Kingspan, der har integreret gipsplade indeholder allerede skimmelsvampe-sporer, der kan vokse frem, hvis fugtigheden stiger i indeklimaet.



Figur 7. Calsitherm (til venstre), Multipor, IQ Therm og Kingspan efter 3 måneders inkubering uden kunstig podning. Der ses kun vækst på Kingspan (til højre).

3.1.2 Skimmelsvampevækst i limmørtler og puds

Måling af pH på det yderste pudslag (luftkalk) og de forskellige limmørtelsystemer blev foretaget på DTU, mens bestemmelse af kritiske værdier for relativ luftfugtighed i forhold til skimmel-svampevækst blev udført af RISE i Sverige (Tabel 5). Målingerne af pH i ny-blandede puds og limmørtler viste, at pH var 12,7 for pudsen og 12,0 eller derover for limmørtlerne. Pudsblandin-gen med 25 % vandindhold blev testet separat for skimmelsvampevækst på DTU ved kunstig podning med de fire udvalgte skimmelsvampe, men ingen af dem kunne spire frem og vokse ved den høje pH. I en pudsblanding, hvor pH blev sænket med koncentreret saltsyre til pH 9,5 kunne tre ud af de fire testsvampe, med undtagelse af *Wallemia sebi*, vokse.

Tabel 5. Robustheden af de forskellige limmørtler i forhold til skimmelsvampevækst, værdier for kritisk luftfugtighed (RF) (Johansson et al., 2020) og pH ændringer efter 1 år.

Limmørtler	Koder *	Skimmelvækst**			Kritisk RF (%)	Klasse*	pH start	pH slut
Calsitherm	M5 = # 1	+	-	-	95 % > RH > 90 %	D	12,0	12,0 - 12,7
Multipor	M4 = # 6	-	-	-	> 95 %	E	12,0	11,9 - 12,7
IQ Therm	M2 = # 7	-	-	-	> 95 %	E	12,0	11,9 - 12,8
Kingspan	M1 = # 3	-	-	-	> 95 %	E	12,4	12,2 - 12,6

*Koder og klasserne går fra A til E, hvor E er den mest robuste klasse (Johansson et al., 2020). Koderne i denne tabel er de anvendte benævnelser i førnævnte publikation af Johansson et al.

**Der blev undersøgt 3 prøver af hver limmørtel.

Konklusion: Alle fire limmørtler holder den høje pH efter et års test. Der bør derfor ikke kunne forekomme skimmelsvampevækst, hvis pH-værdien er højere end 9,5 og den relative fugtighed

(RF %) under 95 % (90 % for Calsitherm systemet), men hvis pH falder under 9,5 og fugten stiger over 95 % (90 %), er der stor risiko for skimmelsvampevækst i skillefladen, hvis væggene ikke er afrenset for eksisterende skimmelsvampesporer eller -mycelium.

3.1.3 Isoleringssystemernes gennemtrængelighed for flygtige stoffer (VOC'er)

Skimmelsvampevækst ledsages ofte af en produktion af flygtige organiske forbindelser (VOC'er), der kan lugte grimt og give helbredsgener. Tre forskellige organiske forbindelser, acetone, ethanol og 2-heptanon, som alle kan produceres af skimmelsvampe, blev testet på de forskellige bestanddele, systemerne består af. Acetone fordamper meget hurtigt ved stuetemperatur, mens 2-heptanon er mindre flygtig end ethanol og vand. Tabel 6 viser hvor hurtigt hver VOC kommer igennem de enkelte komponenter i isoleringssystemerne. Jo højere tallet er, jo hurtigere gennemstrømning.

Tabel 6. Målte VOC gennemstrømningsrater (g [g/(m^2/h)]) for isoleringsmateriale, intern limmørtel og andre komponenter i de enkelte isoleringssystemer (minimumsværdier).

Isoleringssystem	Type	Acetone	Ethanol	2-Heptanon	Vand*
Calsitherm	Limmørtel	185,9	32,5	3,7	7,6
Diffusionsåben/kapillaraktiv	Isolering	308,0	55,5	5,6	-
Multipor	Limmørtel	302,0	52,9	5,4	11,2
Diffusionsåben	Isolering	229,5	40,5	4,4	-
IQ Therm	Limmørtel	245,6	43,3	4,3	9,3
Semi-diffusionsåben	Isolering	24,5	1,4	0,1	-
	Top-lag	251,3	45,5	4,5	-
Kingspan	Limmørtel	72,3	11,6	1,9	2,7
Diffusionstæt	Isolering	7,4	1,3	0,1	-
	Alu membran åben	191,0	30,4	3,2	-
	Alu membran lukket	0,0	0,0	0,0	-
	Gipsplade	250,7	44,8	4,4	9,1

* Værdier fra litteraturen (Jensen et al. 2020a). Information omkring testbetingelser kan findes i afsnit 2.1.

Tabel 7 viser hvor stor modstand de enkelte komponenter yder over for hver VOC. Jo større værdien er, jo større modstand. Modstanden afhænger ikke kun af materialet, men også af hvilken kemisk struktur og egenskaber den enkelte VOC har.

Tabel 7. Beregnede VOC diffusionmodstandsfaktorer (μ_{voc} [-]) for isoleringsmateriale, intern limmørtel og andre komponenter i de enkelte isoleringssystemer.

Isoleringssystem	Type	Acetone	Ethanol	2-Heptanon	Vand*
Calsitherm	Limmørtel	15	15	4	12
Diffusionsåben/kapillaraktiv	Isolering	3	3	1	-
Multipor	Limmørtel	9	9	3	8
Diffusionsåben	Isolering	4	4	1	-
IQ Therm	Limmørtel	11	11	4	9
Semi-diffusionsåben	Isolering	36	111	36	-
	Top-lag	9	9	3	-

Isoleringssystem	Type	Acetone	Ethanol	2-Heptanon	Vand*
Kingspan Diffusionstæt	Limmørtel	45	50	10	37
	Isolering	121	126	104	-
	Alu membran åben	1445	1617	503	-
	Alu membran lukket	17999305	5229706	62733	-
	Gipsplade	9	9	3	8

* Værdier fra litteraturen (Jensen et al. 2020a).

Konklusion: Kingspan systemet er det tætteste system i forhold til VOC gennemtrængelighed efterfulgt af IQ Therm. Calsitherm og Multipor er meget ens og de mest åbne. Det betyder, at **hvis** der kommer vækst i skillefladen mellem oprindelig væg og isolering, vil Multipor- og Calsitherm-systemerne være de mest problematiske med hensyn til frigivelse af VOC'er fra skimmelsvampene, mens Kingspan vil være meget tæt.

3.2 Test af afrensningsmetoder

Efter 2 måneders inkubering var der synlig skimmelsvampevækst på tapetet på alle 12 testvægge. Resultaterne i Tabel 8 viser, den tilbageværende skimmelsvampebiomasse på pudslaget eller murstensoverfladen efter afrensningen. Jo højere tallene er, jo mere svampebiomasse blev der fundet. Tallene viser også, at skimmelsvampevæksten er meget ujævnt fordelt under tapetet.

Tabel 8. Mycometer-resultater efter afrensningsmetoder. To separate områder (A og B) er analyseret på samme tidspunkt efter 2 måneders inkubering med skimmelsvampevækst.

	Afrensningsmetode (testvægnummer)											
	Håndkraft				Mekanisk				Dampafrensning			
Mycometer test	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**
Test A	2388	4117	3644	**UD**	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	**69**
Test B	4353	2653	5794	4212	UD	UD	UD	UD	UD	UD	UD	**66**

Grøn: under normalt baggrundsniveau (< 25). Gul: højere end normalt (25-450). Rød: meget højere end det normale baggrundsniveau (>450). UD: under detektionsniveau (< 0).

Konklusion: Afrensning, hvor kun tapet fjernes med spatel kan efterlade massive mængder skimmelsvampemycelium og -sporer, hvorimod mekanisk fjernelse af tapet og underliggende pudslag fjerner skimmelsvampemycelium og -sporer til under detektionsniveauet (UD). Afrensning, hvor tapet fjernes og pudslaget efterfølges af dampafrensning, kan efterlade skimmelsvampemycelium, da områder kan overses ("helligdage") eller underbehandles.

3.3 Test af isoleringssystemerne på testvæggene

Der blev løbende taget luftprøver til dyrkning i hver enkelt kasse for at se om testvæggene frigav skimmelsvampesporer. Resultaterne viste, at der var mere end 100 *Aspergillus versicolor* sporer per 100 L luft gennem hele forsøgsperioden og omtrent samme mængde i alle kasser. Antallet af *A. versicolor* sporer hverken aftog eller øgedes i perioden. Dette tyder på, at der var vækst og sporedannelse i kasserne, men at det sandsynligvis stammer fra de store kassers

sider og bund, da der var synlig vækst på indersiderne af kasserne. Det var ikke muligt at sterilisere kasserne inden isoleringsmaterialerne blev påmonteret. Kontrolprøver af luften i rummet viste, at der var omkring 20 *Cladosporium* sporer per 100 L luft i rumluften, hvilket er almindeligt og at *Aspergillus* sporerne ikke blev frigivet fra kasserne.

3.3.1 Fugt- og pH forhold i testvæggene

Resultaterne i Tabel 9 viser at pH forbliver høj gennem hele testperioden. Andre forsøg har dog vist at hvis pH-værdien kan falde til 9,1-9,7 er det potentielt kritisk for skimmelsvampevækst i både Calsitherm og Multipor systemerne inden for 3-3½ år (Jensen et al., 2020b). Der er dog mange andre faktorer, der også spiller ind på risikoen for skimmelsvampevækst: fx arten af skimmelsvamp, næringssammensætning og fugtighed.

Resultaterne i Tabel 10 viser, at de målte fugtniveauer svinger en del indbyrdes, men at limmørtlerne ligger i det samme niveau (1,8 – 15,2 vægt %), mens de enkelte isolerings-materialer varierer meget (3,0 – 82,8 vægt %), hvor Kingspan materialet er mest fugtigt (50,2 vægt % i snit efter 1 år), mens Calsitherm og IQ Therm (12,3 vægt % og 13,5 vægt % i snit efter et år) har det laveste fugtindhold målt i vægt %. Resultaterne i Tabel 11 viser ligeledes at Calsitherm og IQ Therm har lavest fugtindhold målt i kg fugt pr. kg materiale. Kigger man derimod på fugtindhold målt i kg fugt pr. m^3 materiale, så viser resultaterne at Calsitherm og Multipor isoleringerne har højere fugtindhold set i forhold til IQ Therm og Kingspan. Resultaterne viser også at alle isoleringsmaterialer bliver mere fugtige med tiden, når der er konstant fugtigt i testvæggene, hvilket er vist i Tabel 11 og Figur 8.

Tabel 9. pH værdi i pudslaget (luft-kalk, ens for alle testvægge) og limmørtel (forskellig afhængig af system), der hører til isoleringssystemet, ½ og 1 år.

	Håndkraft				**Mekanisk**				**Dampafrensning**			
	Luftkalkpuds		Limmørtel		Luftkalkpuds		Limmørtel		Luftkalkpuds		Limmørtel	
pH-værdi	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**
Calsitherm	11,8	12,5	12,6	12,6	11,9	12,6	12,7	12,6	12,3	12,5	12,7	12,5
Multipor	11,9	12,3	12,2	12,6	11,8	12,6	12,7	12,7	12,4	12,5	12,7	12,5
IQ therm	12,7	12,5	12,8	12,6	12,2	12,6	12,6	12,6	11,7	12,5	12,5	12,6
Kingspan	11,9	12,4	12,5	12,5	12,2	12,6	12,5	12,5	12,5	12,2	12,6	12,6

Konklusion: Alle limmørtler har pH-værdier mellem 12,2 og 12,7. Det basiske miljø i både pudslaget og de forskellige limmørtler forbliver stort set det samme gennem testperioden på ca. 1 år.

Tabel 10. Fugtindholdet (vægt %) i isolering og limmørtel efter ½ og 1 år.

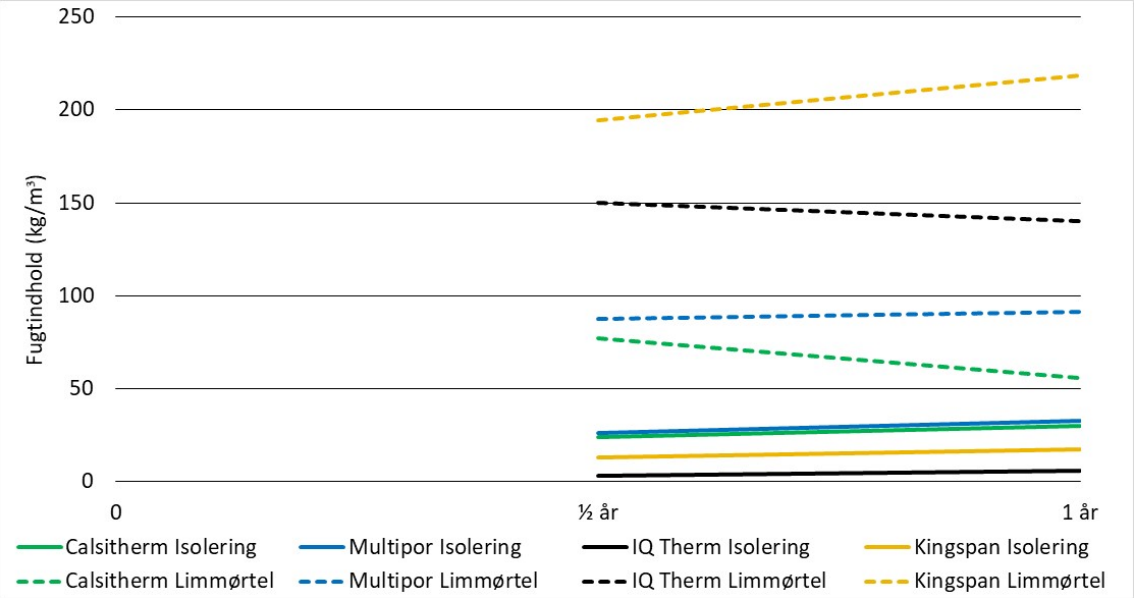
	Håndkraft				**Mekanisk**				**Dampafrensning**			
	Isolering		Limmørtel		Isolering		Limmørtel		Isolering		Limmørtel	
Fugtindhold*	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**	**½ år**	**1 år**
Calsitherm	8,4	11,3	5,4	5,9	13,2	12,5	5,1	4,0	10,2	16,6	5,6	1,8

	Håndkraft				Mekanisk				Dampafrensning			
	Isolering		Limmørtel		Isolering		Limmørtel		Isolering		Limmørtel	
Multipor	25,5	31,6	11,2	12,8	22,6	39,6	11,4	10,3	31,7	27,8	9,2	9,9
IQ Therm	9,9	12,6	12,2	13,2	3,0	18,0	10,8	9,2	5,3	6,3	11,2	9,7
Kingspan	32,6	35,6	12,4	14,2	54,3	82,8	13,6	15,2	27,3	32,1	12,5	13,6

* Afrensningsmetoderne ikke har nævneværdig betydning for fugtindholdet i materialeprøverne, men benævnelserne bruges i denne tabel til sammenligning med andre resultater.

Tabel 11. Gennemsnitlig fugtindholdet (i kg) i isolering og limmørtel efter ½ og 1 år.

Gennemsnitlig fugtindhold (kg)	pr. kg materiale				pr. m^3 materiale			
	Isolering		Limmørtel		Isolering		Limmørtel	
	½ år	1 år	½ år	1 år	½ år	1 år	½ år	1 år
Calsitherm	0.11	0.13	0.05	0.04	23.8	30.3	77.1	55.7
Multipor	0.27	0.33	0.11	0.11	26.3	32.7	87.8	91.5
IQ Therm	0.06	0.12	0.11	0.11	2.96	6.04	150.0	140.4
Kingspan	0.38	0.50	0.12	0.14	13.3	17.6	194.2	218.4



Figur 8. Udviklingen i det gennemsnitlige fugtindhold fra ½ til 1 år for hvert materiale

Konklusion: Målt pr. volumen ser Calsitherm og Multipor isoleringerne ud til at optage og holde mere på fugten mellem de to prøvetagninger i forhold til IQ Therm og Kingspan, mens fugten synes at være højere i limmørtlen i IQ Therm og Kingspan. Dette skyldes muligvis den større diffusionstæthed af PUR/fenolskumsprodukterne, der udgør kernen af de to isoleringsmaterialer, som bremser fugttransporten og derved fører til større fugtophobning i limmørtlen.

3.3.2 Skimmelsvampevækst i testvæggene

Resultaterne i Tabel 12 viser, hvor meget skimmelsvampebiomasse, der er dannet i løbet af forsøgsperioden. Mycometer-metoden måler på både døde og levende skimmelsvampe. Værdierne er meget lave, hvilket viser, at skimmelsvampesporerne ikke har spiret, og at der ikke er vokset noget mycelium ud efter forsøget blev sat i gang.

Tabel 12. Skimmelsvampevækst i skillefladen (dobbeltbestemmelse A og B)) mellem testvæg og limmørtel efter 6 og 12 måneder.

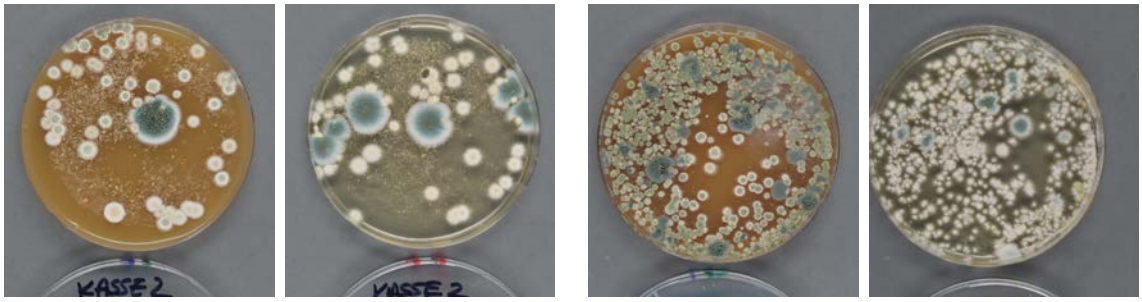
	Håndkraft				Mekanisk				Dampafrensning			
	½ år		1 år		½ år		1 år		½ år		1 år	
Mycometer test	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**	**A**	**B**
Calsitherm	7	12	10	9	4	9	7	11	20	7	3	13
Multipor	7	7	10	8	**UD**	0	5	5	**32**	14	8	15
IQ Therm	**47**	11	11	15	17	5	13	12	14	14	15	16
Kingspan	5	8	11	12	1	3	**34**	**41**	**26**	6	9	18

Grøn: under normalt baggrundsniveau (< 25). Gul: højere end normalt (25-450). **UD**: under detektionsniveau.

Resultaterne i Tabel 13 og Figur 9 viser hvilke skimmelsvampesporer, der har overlevet forsøgsperioden. Dykningerne viser, at skimmelsvampesporer af især *Aspergillus versicolor* overlever forholdene i skillefladen, mens *Penicillium chrysogenum* sporerne kun i ringe grad har overlevet. Både *Acremonium* og *Wallemia* sporerne ser ud til at være gået til grunde i perioden.

Tabel 13. Skimmelsvampevækst (totalt CFU på både V8 og DG18) i skillefladen fordelt på *Aspergillus versicolor* (Asp) og *Penicillium chrysogenum* (Pen) taget som aftryk af borekernerne efter Mycometer-testen.

	Håndkraft				Mekanisk				Dampafrensning			
	½ år		1 år		½ år		1 år		½ år		1 år	
Dyrkning	**Asp**	**Pen**	**Asp**	**Pen**	**Asp**	**Pen**	**Asp**	**Pen**	**Asp**	**Pen**	**Asp**	**Pen**
Calsitherm	0	0	99	0	2	0	25	0	224	4	5	1
Multipor	58	0	475	0	7	0	1	1	0	0	0	1
IQ Therm	3	0	122	0	0	0	0	0	2	0	301	0
Kingspan	2	0	1200	0	600	34	600	8	104	7	1200	14



Figur 9. Dyrkningsaftryk af borekerner på agar efter ½ og 1 år fra Kingspan/dampafrensning efter Mycometer-testen er taget. *Aspergillus versicolor* ses som små grålige/hvide kolonier, mens *Penicillium chrysogenum* kolonierne er større og blålige.

Konklusion: Mycometer-metoden viser, at biomassen af skimmelsvampe er under baggrundsniveauet (ingen tilvækst), mens dyrkningsmetoderne viser, at især *Aspergillus versicolor* sporer kan overleve på alle materialer og efter alle behandlinger (intet sporedrab). Dette indikerer, at nogle typer skimmelsvampesporerne kan overleve de alkaliske betingelser, der er i skillefladen, men at de ikke er i stand til at vokse og går i en slags dvale. Derimod kan de vokse frem, hvis pH forholdene ændrer sig i skillefladen mellem væggen og isoleringen.

4. Samlede konklusioner

Mekanisk afrensning er den metode, der vil give det bedste udgangspunkt for en succesfuld indvendig isolering, idet alle skimmelsvampesporer og mycelium, selv det der er vokset ind i pudsen, vil blive fjernet. Gen-oppudsning af væggene giver yderlige den fordel, at skæve og ujævne vægge bliver rettet op, hvorved der undgås hulrum, hvor eventuel tilstødende skimmelsvampesporer kan overleve og senere vokse, hvis pH skulle falde. Limmørtlen kan til et vist mål have samme oprettende effekt.

De limmørtler, der bruges til at klæbe den indvendige efterisolering til den oprindelige mur, er i mange tilfælde cementbaseret og har en pH-værdi på 11,7 eller derover. Projektets resultater danner grundlag for en antagelse om, at skimmelvækst kan hæmmes så længe pH-værdien er over 9,5. Det skal bemærkes at limmørtlernes pH-værdi forventeligt vil reduceres over tid, efterhånden som mørtlen karbonatiseres, således at denne beskyttende virkning forsvinder.

I Tabel 14 ses en forenklet vurdering baseret på resultaterne i tabellerne 4-7 og 10-13 med hensyn til skimmelsvampevækst i isoleringsmaterialerne (uden og med podninger, Mycometer-test og dyrkning på agarplader), robusthed forhold til svampevækst og fugtophobning i isoleringsmaterialerne (iso) og limmørtlerne (lim) og VOC gennemtrængeligheden i hele isoleringssystemet. Ingen af isoleringssystemerne er perfekte og valg af system afhænger af beskaffenheden – fx skimmelvækst eller højt fugtniveau i væggene – af den bygning, hvor den indvendige isolering skal sættes op.

Tabel 14. Den samlede vurdering af de fire isoleringssystemer i forholdt til hinanden
Scoresystem: 0 er bedst og 3 er ringest.

	Skimmelvækst i isolering*				Robusthed**		Fugtophobning*		
System	**- sporer**	**+ sporer**	**Myco**	**Dyrk**	**Iso**	**Lim**	**Iso**	**Lim**	**VOC**
Calsitherm	0	-	0	1	1	1	1	1	3
Multipor	0	1	0	1	1	0	3	2	3
IQ Therm	0	3	0	1	1	0	1	2	1
Kingspan	3	3	1	3	0	0	3	2	0

* Jensen et al., 2020a; **Johansson et al., 2020

5. Formidling

Projektets resultater er samlet i en datasamling, der ligger offentligt under https://data.dtu.dk med den digitale objektidentifikationskode, DOI: https://doi.org/10.11583/DTU.12071280. Samlingen omfatter:

- Måleresultater og bearbejdede analyser fra de gennemførte undersøgelser på testvægge i laboratoriet. Resultater fra temperatur, fugt og skimmelmålinger samt fra beregningsmæssige skimmelmodeller. Desuden data fra diffusionsforøg med flygtige organiske gasser (VOC). Disse sæt af kildedata er til rådighed for forskere, studerende og andre, der vil tilgå disse.
- Billedsamlinger fra de udførte forsøg.
- Præsentationer (PowerPoint) med sammenfatninger af projektets formål og hovedresultater.
- Korte populære artikler til fagpressen.
- Nærværende rapport.

Dette materiale udgør en grundkilde til de medvirkende forskeres fortsatte formidling om projektet ved branchearrangementer, i tekniske fagblade, videnskabelige og andre konferencer og i forhold til undervisning.

Følgende artikel er fremsendt til publicering i det videnskabelige tidsskrift Indoor Air: Nickolaj F. Jensen, Søren Peter Bjarløv, Carsten Rode, Birgitte Andersen, Eva B. Møller, 2020, "Laboratory based investigation of the materials' water activity and pH relative to fungal growth in internally insulation solid masonry walls".

Projektets er gennemført i tæt sammenhæng med det Europæiske RIBuild projekt om indvendig efterisolering af historiske bygninger, https://www.ribuild.eu/, som bl.a. sammen med nærværende projekt har været grundlag for Nikolaj Feldt Jensens ansættelse som PhD-studerende ved DTU Byg. Resultater fra projektet har derfor en fremtrædende rolle i Nickolajs PhD-afhandling, hvis forsvar udestår ved afslutningen af nærværende projekt.

6. Referencer

Andersen B, Dosen I, Lewinska AM, Nielsen KF. (2016). Pre-contamination of new gypsum wallboard with potentially harmful fungal species. Indoor Air DOI: 10.1111/ina.12298.

Andersen B, Frisvad JC, Søndergaard I, Rasmussen IS & Larsen LS. (2011). Associations between fungal species and water damaged building materials. Applied and Environmental Microbiology. 77: 4180-4188.

IST, "HYT 221 Module," 2017. [Online]. Tilgængelig: https://www.ist-ag.com/sites/default/files/DHHYT221_E.pdf.

Jensen NF, Bjarløv SP, Rode C, Andersen B & Møller EB. (2020a) Laboratory based investigation of the materials' water activity and pH relative to fungal growth in internally insulated solid masonry walls. Submitted to Indoor Air.

Jensen NF, Bjarløv SP, Odgaard TR, Rode C, Andersen B & Møller EB. (2020b) 'Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls', Building and Environment, 182, p. 107011. doi: https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107011.

Johansson P, Lång L, Capener CM, Møller E, Quagliarini E, D'Orazio M, Gianangeli A, Janssen H, Feng C, Langmans J, Jensen NF, de Place Hansen EJ, Peuhkuri R, Hansen TK. (2019). "Threshold values for failure, linked to types of building structures and failure modes". https://www.ribuild.eu/s/RIBuild_D22_v10_1.pdf

Johansson P, Lång L, Bok G, & Capener CM. (2020). Threshold values for mould growth: Critical moisture level of 21 different building materials. In E3S Web of Conferences (Vol. 172, p. 20002). EDP Sciences. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202017220002

Samson RA, Houbraken J, Thrane U, Frisvad JC & Andersen B. (2019). Food and Indoor Fungi. Second edition. CBS-KNAW-Fungal Biodiversity Centre, Utrecht, the Netherlands. pp. 1-398.

Stevenson A, Cray JA, Williams JP, Santos R, Sahay R, Neuenkirchen N, Timson DJ (2015). Is there a common water-activity limit for the three domains of life?. The ISME journal, 9: 1333-1351.

BYG R-440
September 2020

ISBN: 87-7877-541-8

Institut for Byggeri og Anlæg, DTU
Brovej, Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby

www.byg.dtu.dk
Tlf: 4525 1700