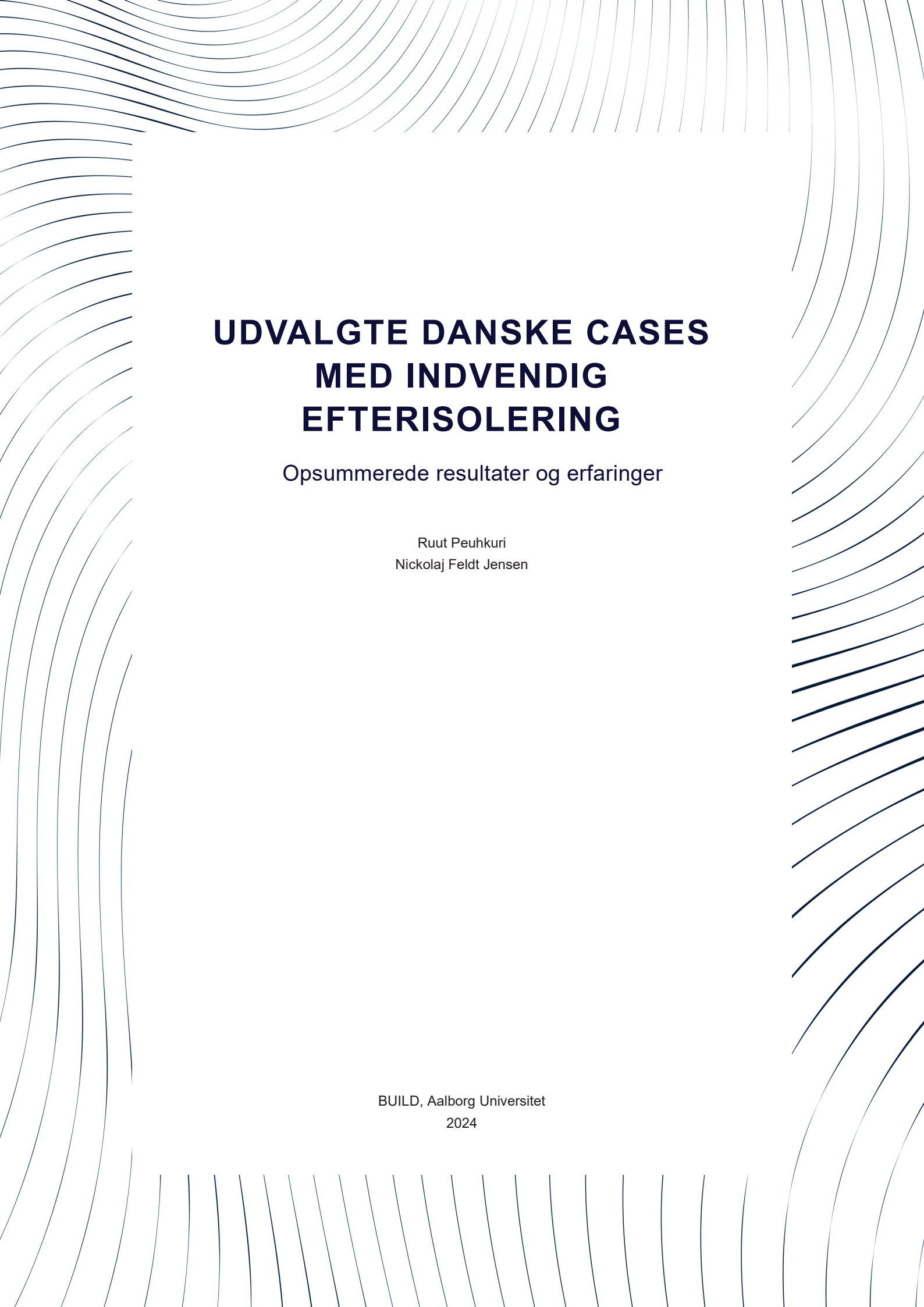


BUILD RAPPORT

2024:15

Udvalgte danske cases med indvendig efterisolering

Opsummerede resultater og erfaringer



UDVALGTE DANSKE CASES MED INDVENDIG EFTERISOLERING

Opsummerede resultater og erfaringer

Ruut Peuhkuri
Nickolaj Feldt Jensen

BUILD, Aalborg Universitet
2024

TITEL	Udvalgte danske cases med indvendig efterisolering
UNDERTITEL	Opsummerede resultater og erfaringer
SERIETITEL	Build rapport 2024:15
FORMAT	Digital
UDGIVELSEÅR	2024
UDGIVET DIGITALT	December 2024
FORFATTER	Ruut Peuhkuri, Nickolaj Feldt Jensen
SPROG	Dansk
SIDETAL	71
EMNEORD	Indvendig efterisolering, målinger, renovering, simulering, skimmelvækst, risiko, murværk, bevaringsværdigt, fuldskala, laboratorieforsøg, fugt, indeklima
ISBN	978-87-94561-28-0
LAYOUT	BUILD
FOTO	Angivet ved de enkelte foto
OMSLAGSILLUSTRATION	Ruut Peuhkuri
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.

INDHOLD

OM PROJEKTET	4
1 INDLEDNING	6
1.1 Indholdet i denne rapport	6
1.2 Definitioner	6
1.3 Isoleringssystemer	7
2 DANSKE CASES MED MONITORERING	10
2.1 Bispebjerg, København	10
2.2 Christiania, København	13
2.3 Druehaven, Valby	19
2.4 Folehaven, Valby	23
2.5 Klitgaarden, Hundested	27
2.6 Meinungsgade, København	30
2.7 Kildevældsgade, København	33
2.8 Thomas Laubs Gade, København	35
2.9 Ny Allégade, Haderslev	37
2.10 Borchs kollegium, København	39
2.11 Ryesgade (B), København	42
2.12 Ryesgade (A), København	45
3 DANSKE LABORATORIE-UNDERSØGELSER OG MOCK-UP FORSØG	50
3.1 Laboratorieforsøg med imprægnering	50
3.2 Laboratorieforsøg med historiske mursten	52
3.3 Laboratorieforsøg med indvendig maling	55
3.4 Laboratorieforsøg med fysisk robusthed af isoleringssystemer	56
3.5 Forsøg med indvendig isolering og mikroklima	59
3.6 DTU containere, Lyngby	61
3.7 Aktivt isoleringssystem RetroWall	68

OM PROJEKTET

Denne videns- og erfaringsopsamling er en del af resultatet fra forskningsprojektet "Fugtsikker energirenovring af bevaringsværdige murede ydervægge" som forløb i 2017 – 2024 og var støttet af Realdania, Landsbyggefonden og Grundejernes Investeringsfond.

Projektet var ledet af BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø ved Aalborg Universitet (AAU) og DTU Construct og ERIK Arkitekter som partnere. PSXM Consulting var involveret i projektet som underleverandør.

Projektets formål var at fremskaffe det nødvendige, men endnu manglende erfaringsgrundlag med danske bevaringsværdige murede ydervægge, og samle erfaringerne fra internationale og andre nationale projekter til en samlet viden, som gør det muligt at beskrive i bl.a. anvisninger og i branchevejledninger, hvordan bevaringsværdige murede ydervægge energirenoveres på en fugtteknisk forsvarlig måde. I projektet er der gennemført en omfattende videns- og erfaringsopsamling såvel fra allerede afsluttede forsknings- og demonstrationsprojekter som fra målinger, simuleringer og analyse af data samt andre observationer udført i dette projekt.

Konklusionerne fra disse videnskabelige undersøgelser og analyser er udformet som praktiske og simple retningslinjer som branchen kan bruge når der overvejes om indvendig efterisolering er en fugtsikker måde at efterisolere bevaringsværdigt murværk. Retningslinjerne sammen med relevante opmærksomhedspunkter og viden er samlet på en hjemmeside <http://indvendigefterisolering.dk/>

Læs mere om projektet og find alle videnskabelige publikationer her:

<https://vbn.aau.dk/da/projects/fugtsikker-energirenovring-af-bevaringsv%C3%A6rdige-murede-yderv%C3%A6gge>



1

INDLEDNING

1 INDLEDNING

Efterisolering indefra er ofte den eneste mulighed for at forbedre varmeisoleringen af ældre bygninger med massivt murværk, da man ønsker at bevare udseendet af disse bygninger. En betydelig del af den danske bygningsmasse består af bygninger af denne type. Murede facader tegner sig for en meget stor del af det facadeareal, der er opført før 1950. Bevaring af disse bygninger, der giver karakter til bymiljøerne, kræver at murværket vedligeholdes og at bygningernes energi-, indeklimate og komfortmæssige ydeevne bliver forbedret til at passe ind i fremtidens krav.

Indvendig efterisolering kan i nogle tilfælde føre til fugtrelaterede skader, fordi isoleringen ændrer temperatur- og fugtforholdene i den oprindelige ydervæg: Denne bliver koldere og mere sårbar for indtrængende fugt fx fra slagregn eller opstigende grundfugt, eller fugt fra indeklimaet. Derfor skal ønsket om at spare energi og øge komforten ses i sammenhæng med denne risiko samt hvilke andre faktorer der spiller ind.

1.1 Indholdet i denne rapport

Siden midten af 2010'erne er der gennemført en række forsknings- og demonstrationsprojekter i eksisterende bygninger med henblik på at opnå bedre viden om hvordan de forskellige indvendige isoleringssystemer fungerer i Danmark.

De fleste projekter – herunder resultaterne fra disse – er udførligt dokumenteret i videnskabelige publikationer. Men eftersom disse er på engelsk, og ikke helt nemme at læse for ikke-forskere – er hovedresultaterne fra disse samlet her på dansk.

I denne rapport er der kun medtaget beskrivelser og resultater fra de cases og undersøgelser, hvor der findes videnskabeligt publicerede resultater. Under hvert case eller undersøgelse er der listet de videnskabelige udgivelser hvor de samlede beskrivelser og resultater findes.

Derudover er der medtaget en række laboratorieundersøgelser udført i regi af projektet "Fugtsikker energirenovring af bevaringsværdige murede ydervægge" samt opsummerede resultater fra et meget omfattende mock-up forsøg "DTU Containere", hvis resultater sammen med resultaterne fra cases i eksisterende bygninger har dannet grundlaget for projektets samlede konklusioner i form af de praktiske retningslinjer. Derudover er medtaget resultater for et aktivt isoleringssystem, som adskiller sig fra de andre indvendige isoleringsløsninger.

Resultaterne har givet indsigt i, hvornår der kan være risiko for fugtrelaterede problemer såsom risiko for skimmelsvampevækst ved indvendig efterisolering, og hvornår det er fugtsikkert at isolere indvendigt. Risikoen er afhængig af murtypen, orientering af facaden, fugtbelastningsklassen og isoleringssystemet.

1.2 Definitioner

1.2.1 Definition af fugtsikkerhed

Indvendig efterisolering betragtes i denne sammenhæng fugtsikker *når der er lav risiko for skimmelvækst bag den indvendige efterisolering.*

Til vurdering af denne risiko bruges så kaldt *skimmelindeks (Mould Index)*, som er et værktøj til at omsætte de målte temperatur- og fugtforhold til en risiko for skimmelvækst. Skimmelindeks ligger mellem 0 og 6 hvor skimmelindeks < 2 betyder lav risiko og skimmelindeks > 3 giver en høj risiko. Risikoen ved skimmelindeks mellem 2 og 3 udtrykker en risiko som kræver opmærksomhed og yderligere vurdering.

Skimmelindeks er stærkt afhængig af materialets sensitivitet for skimmelsvampevækst. Biobaserede materialer er mest sensitive mens mineralske materialer ofte er mest modstandsdygtige overfor skimmelvækst.

Skimmelindeks er beregnet og teoretisk, og skal ikke forveksles med observeret skimmelvækst. Dog er den på nuværende den bedste måde at vurdere ydeevne af konstruktioner i forhold til risiko for skimmelvækst. Modellen er beskrevet bl.a.i (Ojanen et al, 2010) <https://vbn.aau.dk/da/publications/mold-growth-modeling-of-building-structures-using-sensitivity-cla>

Indvendig efterisolering kan også medføre at temperatur- og fugtforhold ændres negativt ved de indlejrede bjælkeender i den oprindelige væg og medfører at disse nedbrydes. Omfanget af denne risiko er vurderet i udvalgte casestudier.

Endelig kan der også opstå fugtrelaterede problemer på den udvendige side af facaden, så som risiko for frostsprængninger og forøget algevækst, men disse problemer er blevet vurderet sekundære i sammenligning med risiko for skimmelvækst bag isoleringen, som i værste fald kan forringe indeklimaet. De udvendige problemer bliver ikke yderligere omtalt i denne sammenhæng.

1.3 Isoleringssystemer

I nedenstående tabel er der samlet de isoleringssystemer, som er blevet brugt i cases omtalt i denne rapport. I tabellen er medtaget enkelte centrale materialeleværdier samt angivet de forkortelser som er brugt i forbindelse med præsentation af resultater. Mere info om isoleringssystemer relevant for indvendig efterisolering og deres egenskaber findes på <http://indvendigeafterisolering.dk/>

For uddybende beskrivelse og information henvises der til SBI-anvisning 280 "Varmeisoleringsmaterialer og deres anvendelse", som findes på <https://www.anvisninger.dk/>

TABEL 1. Isoleringssystemer brugt i de monitorerede cases omtalt i denne rapport sammen med enkelte typiske materialeparametre.

Forkortelse	Isoleringssystem / Materiale	Varmeledningsevne λ [W/mK]	Diffusionsmodstand μ [-]	Kapillær vandoptagelse A_w [kg/m ² s ^{0.5}]
GF	Celleglas	0.036	40.000	0
PF	Fenolskum	0.02	35	0.08
PUR-CS	Polyurethanskum med kanaler af kalci- ciumsilikat	0.033	27	0.0001
CS	Kalciumsilikat	0.05	15	1.29
HL	Hampebeton	0.071	5	0.1
AG	Aerogel	0.015	5	0.0004
AAC	Mineralske isoleringsplader af porebeton	0.040	2	0.0034

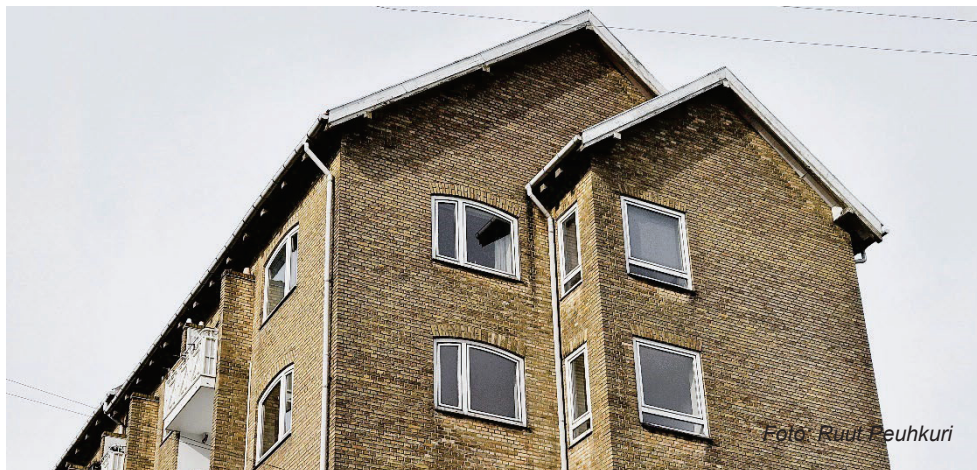


2

DANSKE CASES MED MONITORERING

2 DANSKE CASES MED MONITORERING

2.1 Bispebjerg, København



2.1.1 Konstruktionen

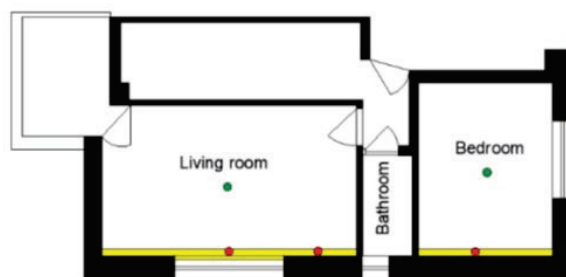
Etageejendommen på Bispebjerg i København er fra 1940. Ydervæggene består af massivt gult murværk, som er 1½ sten (350 mm) tyk. Muren i brystninger er 1 stens mur (230 mm). Indvendigt var der oprindeligt 10mm puds. Etageadskillelserne består af træbjælker indlejret i ydervæggene. Disse bjælker er understøttet af trælægter.

2.1.2 Renoveringen

Gavlene i 4 lejligheder blev indvendig isoleret med 100 mm mineralske isoleringsplader af porebeton (AAC). Brystningspartierne blev isoleret med 220 mm. Den diffusionsåbne isolering blev afsluttet med puds og diffusionsåben maling. Alle de 4 gavle ligger i forskellige bygninger, med enten syd- eller nordorientering, og på forskellige etager. Samtidigt med isoleringen blev der påført facadeimprægnering på én syd- og én nordvendt gavl.

2.1.3 Målinger

I forbindelse med isoleringen blev der installeret måleudstyr bag den indvendige isolering som måler relative fugtighed og temperatur. Derudover blev der målt indeklima i hver lejlighed samt i en referencelejlighed uden isolering. Gavlenes orientering var hhv. syd og nord (referencegavlen vendte mod syd). Der måles i et stuerum og et soveværelse i hver lejlighed, og måleperioden strækker sig over godt 2½ år (fra oktober 2018 til omkring april/maj 2021).



FIGUR 1. Placering af temperatur- og relativ fugtighedssensorer bag den indvendige efterisolering i stue og i soveværelse, samt for måling af indeklima.



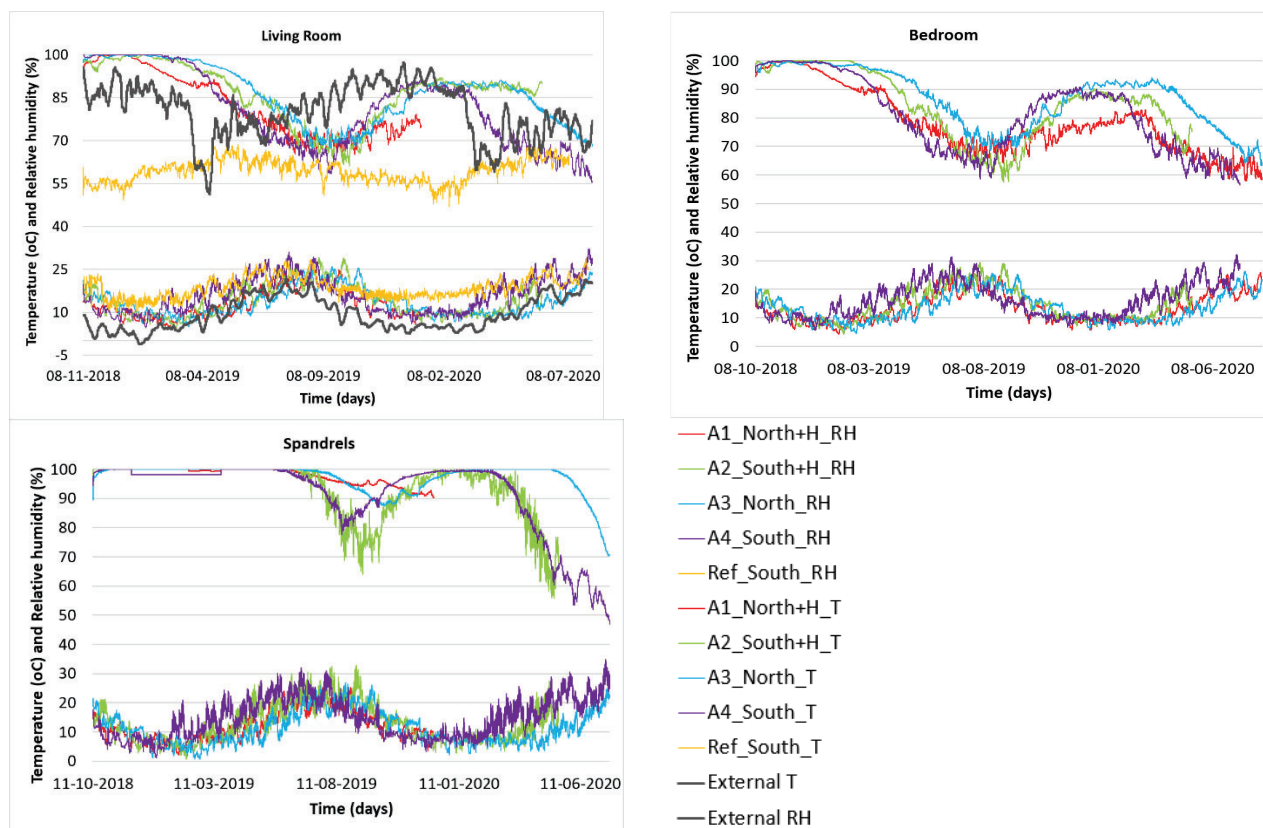
FIGUR 2. De indvendigt efterisolerede lejligheder, der ligger i hver sin bygning, og vender enten mod syd eller nord. En gavl i hver orientering er imprægneret (Apartment 1 og 2) Foto: Google Street View.

2.1.4 Resultater

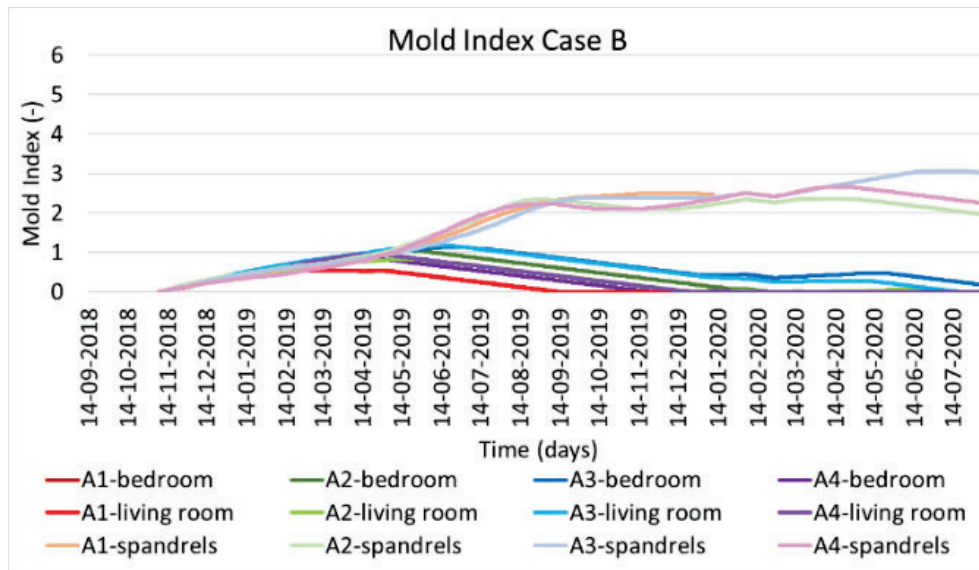
Måleresultaterne viser at byggefugten i vægkonstruktionerne udtørrede hen over det første år og lå lidt lavere i det efterfølgende år. Men i brystningspartierne, hvor den eksisterende mur er tyndere og efterisolering mere en dobbelt så tyk som i væggene, blev der observeret at den relative fugtighed også i det efterfølgende år var meget høj. Der kan derfor være en risiko for skimmelvækst hvis der findes noget organisk materiale i konstruktionen.

Den korte måleperiode gør det besværligt at drage konklusioner omkring effekten af facadeimprægnering, og resultaterne peger både i en positiv og negativ effekt på den relative fugtighed i skillelaget mellem isolering og eksisterende væg.

Indeklimamålingerne fra den første vinterperiode viste fugttilskud mellem 7 og 11 g/m³ for de 5 lejligheder, hvilket svarede til fugtbelastningsklasse 2 og 3.



FIGUR 3. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen i hhv. stuen, soveværelset og brystningen i de 4 lejligheder. +H indikerer at facaden er imprægneret.



FIGUR 4. Beregnet skimmelindeks for alle sensorer. Ved skimmelindex >3 er der en høj risiko for skimmelvækst. Ved skimmelindex <1 er risikoen lille. Det er kun målingerne i brystninger der angiver en tydelig risiko for skimmelvækst.

2.1.5 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., & Peuhkuri, R. (2024) Decisive parameters for moisture safe internal insulation of masonry - long time monitoring in inhabited dwellings. Energy and Buildings, 312, Artikel 114180. <https://vbn.aau.dk/da/publications/decisive-parameters-for-moisture-safe-internal-insulation-of-maso>

Pagoni, P., Møller, E. B., & Hansen, T. K. (2022). Internal Insulation of Masonry with and without Hydrophobization in Inhabited Dwellings. In Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XV International Conference (pp. 493-501). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). <https://vbn.aau.dk/en/publications/internal-insulation-of-masonry-with-and-without-hydrophobization->

2.2 Christiania, København



2.2.1 Konstruktionen

Bygningen på Christiania er fra 1837 og repræsenterer en typisk fuldmuret etageejendom fra den tid. Ydermuren er massivt murværk, som på 3. sal har en tykkelse på $1\frac{1}{2}$ sten. I brystninger er murtykkelsen 1 sten. Facaderne vender hhv. mod nordvest og sydøst.

2.2.2 Renoveringen

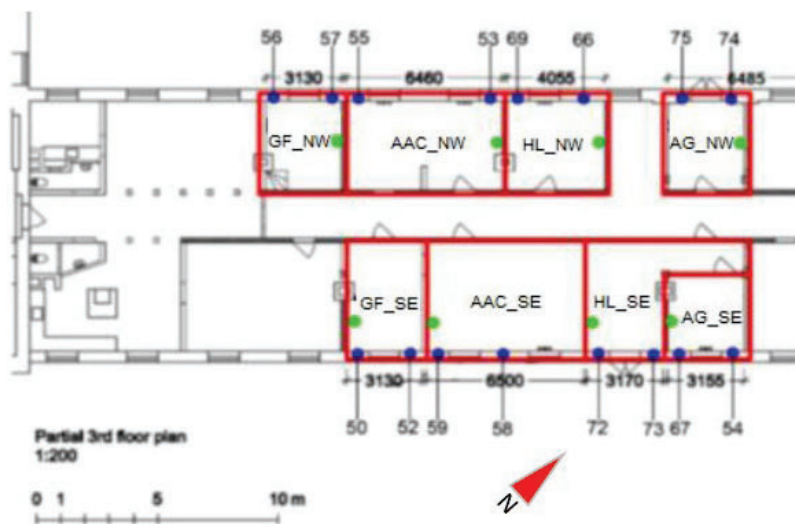
I alt 8 værelser på 3. sal blev indvendigt efterisoleret med 4 forskellige indvendige efterisoleringssystemer i sommeren 2021. 4 af værelserne vender mod sydøst og 4 i nordvest, hvilket muliggjorde at hvert system er blevet installeret både i facade med orientering mod sydøst og i facade med orientering mod nordvest. Isoleringssystemerne (med forkortelse) og -tykkelserne er:

- Diffusionstæt celleglas (GF): 100 mm
- Diffusionsåbne mineralske isoleringsplader af porebeton (AAC): 100 mm
- Diffusionsåben og kapillaraktiv hampebeton (HL): 150 mm
- Diffusionsåbne måtter af aerogel (AG): 10 mm

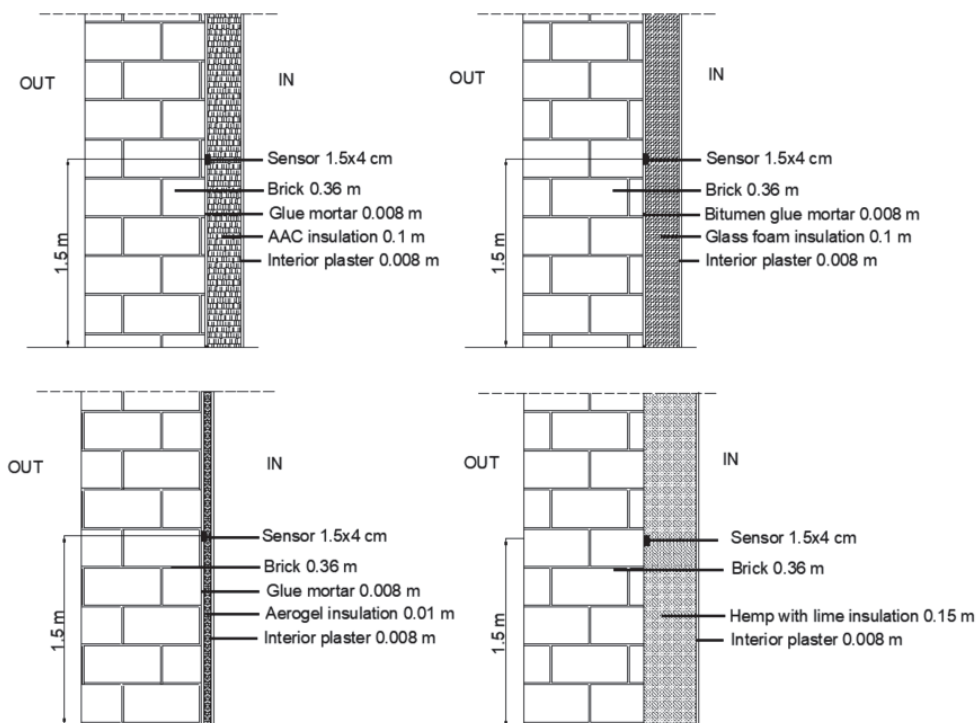
Samtidigt med isolering foregik der en omfattende tagrenovering, og facaden var derfor dækket af et stillads indtil forår 2023.

2.2.3 Målinger

Mellem isoleringen og den oprindelige mur blev der monteret 2 temperatur- og relativfugtighedssensor for hver vægvariant. Sensorerne blev monteret ca. 1,5 m fra gulvet. Også indeklimaforhold blev monitoreret. Målingerne startede i efterår 2022 og fortsætter foreløbigt. Nogle mursten fra facaden blev nedtaget og brugt til at bestemme af en række materialeparametre i laboratoriet, se afsnit 3.2.



FIGUR 5. Plantegning af etagen, samt angivelse af med hvilke isoleringssystemer der er isoleret med.



FIGUR 6. Lodret snit af de 4 forskellige isoleringssystemer og placering af temperatur- og relativfugtighedssensorer.

2.2.4 Resultater

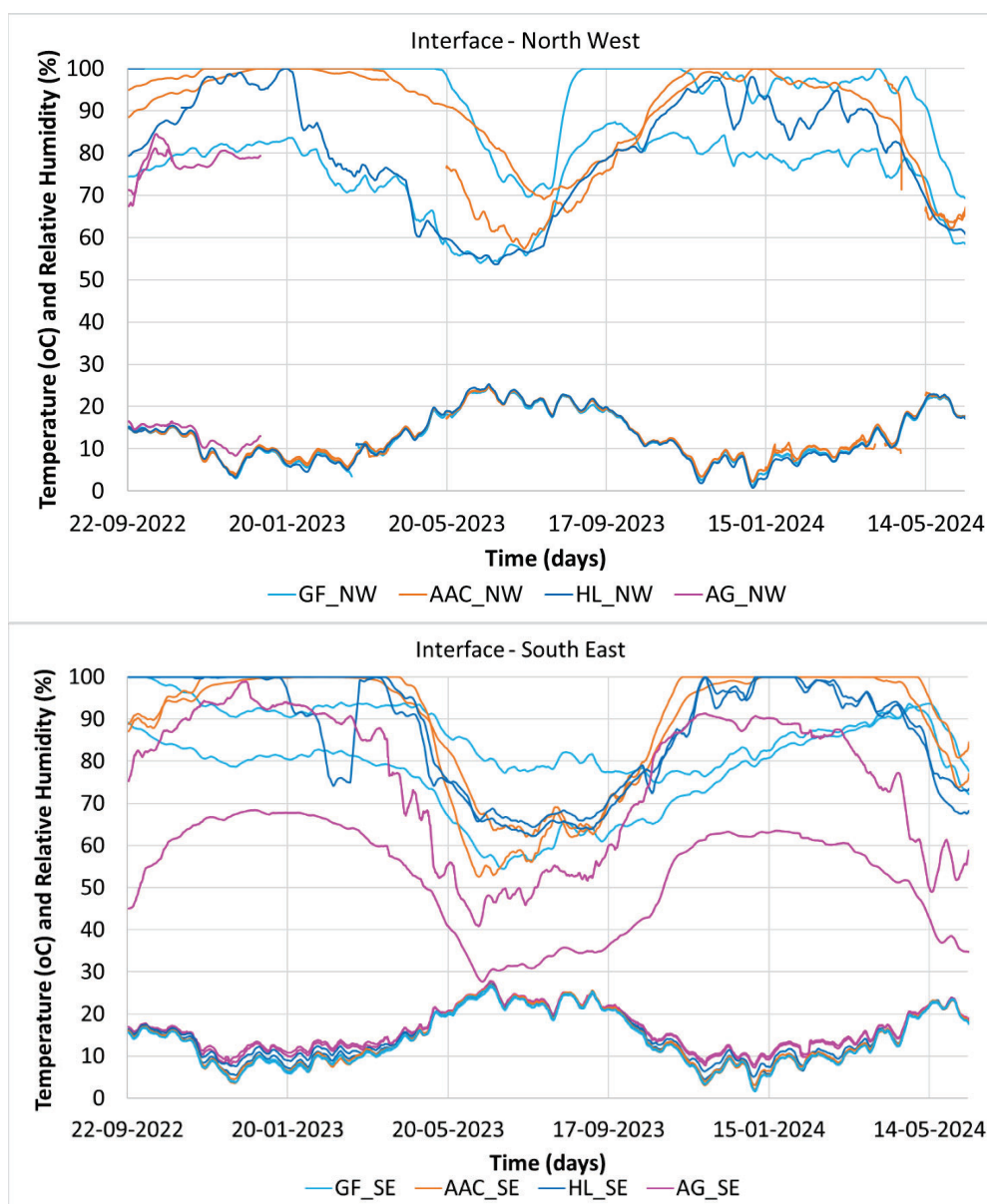
Måleresultaterne fra de første 2 vintre (2022-23 og 2023-24) er vist i FIGUR 7 for de to orienteringer og illustrerer en stor variation mellem systemerne samt at opfugtningen og udtørringen følger en forventet sæsonvariation. Da isoleringssystemerne har ret forskellige isolanser, hvilket resulterer i forskellige temperaturforhold, kan systemerne bedst sammenlignes og vurderes vha skimmelindekset som kombinerer måleresultaterne for temperatur og fugt.

Resultaterne er yderligere påvirket af at nogle sensorer gav urealistiske målinger mens nogle sensorer helt stoppede med at virke. Specifikt for én af sensorerne i rum GF_NW var årsagen til det meget høje relativ fugtighed, at der var sket en vandskade i forbindelse med tagrenoveringen og målingen derfor ikke er repræsentativ for systemet. I FIGUR 8 og FIGUR 9 er

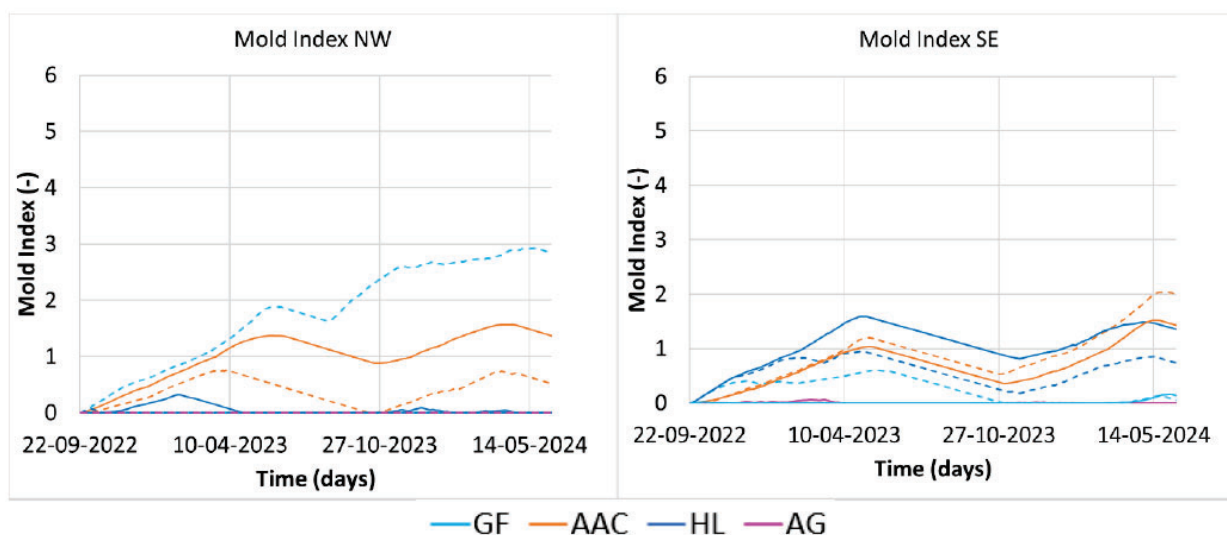
disse usandsynlige resultater vist med stiplet linje mens de fuldt udtrukne kurver er baseret på måleresultater, der blev vurderet pålidelige og sandsynlige.

FIGUR 8 viser den beregnede skimmelindeks, hvis det formodes at der ikke er noget organisk materiale i isoleringssystemet eller i væggen bag isoleringen. De fleste systemer viser lav risiko for skimmelvækst og kun AAC i begge retninger og HL mod SE viser let forhøjet risiko. Ses der i stedet for på et tilfælde hvor der findes noget organisk materiale enten i isoleringssystemet eller i væggen, forværres situationen, se FIGUR 9: Der er nu høj risiko for skimmelvækst for AAC i begge retninger samt for HL mod SE.

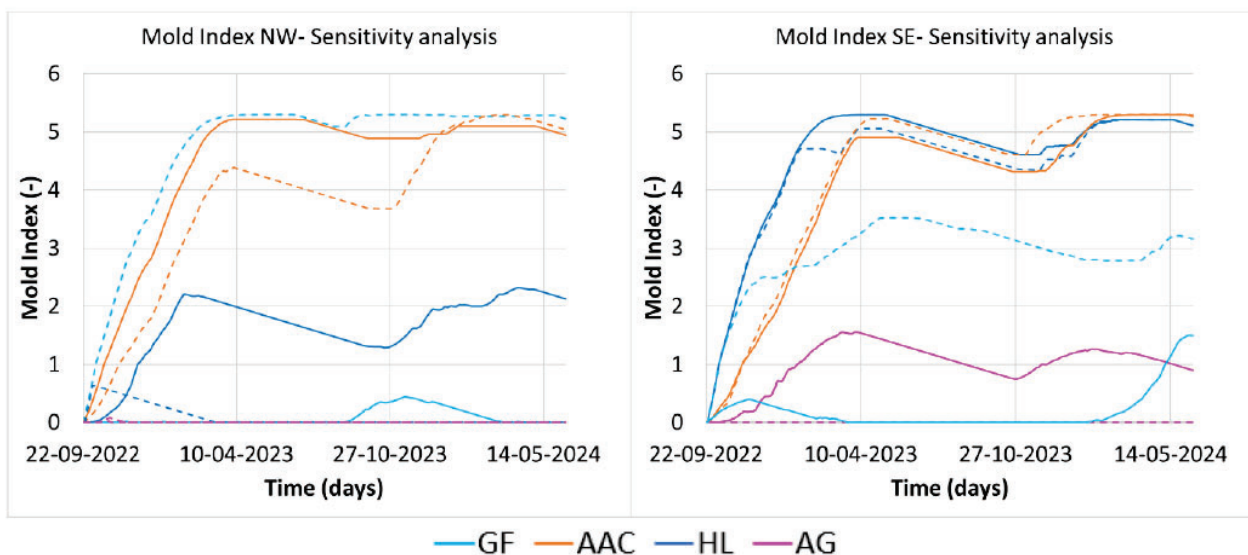
Fortolkningen af resultater hænger således i høj grad sammen med om der er noget i væggen som skimmelsvampe kan leve af.



FIGUR 7. Relativ fugtighed og temperatur bag isoleringen. GF: Celleglas, AAC: Mineralisk plader af porebeton, HL: Hampebeton, AG: Aerogel. NW: Nordvest, SE: Sydøst. Mod NW, een af HL og begge AG sensorer svigtede undervejs.



FIGUR 8. Beregnet skimmelindeks baseret på de enkelte temperatur- og relativ fugtighedsmålinger. Ved skimmelindeks >3 er der en høj risiko for skimmelvækst. Ved skimmelindeks <1 er risikoen lille. Materialesensitivitetsklasse "medium resistant", dvs uden organisk materiale. Fuldt udtrukne kurver er baseret på måleresultater, der blev vurderet pålidelige, mens de stiplede vurderes mindre sandsynlige.

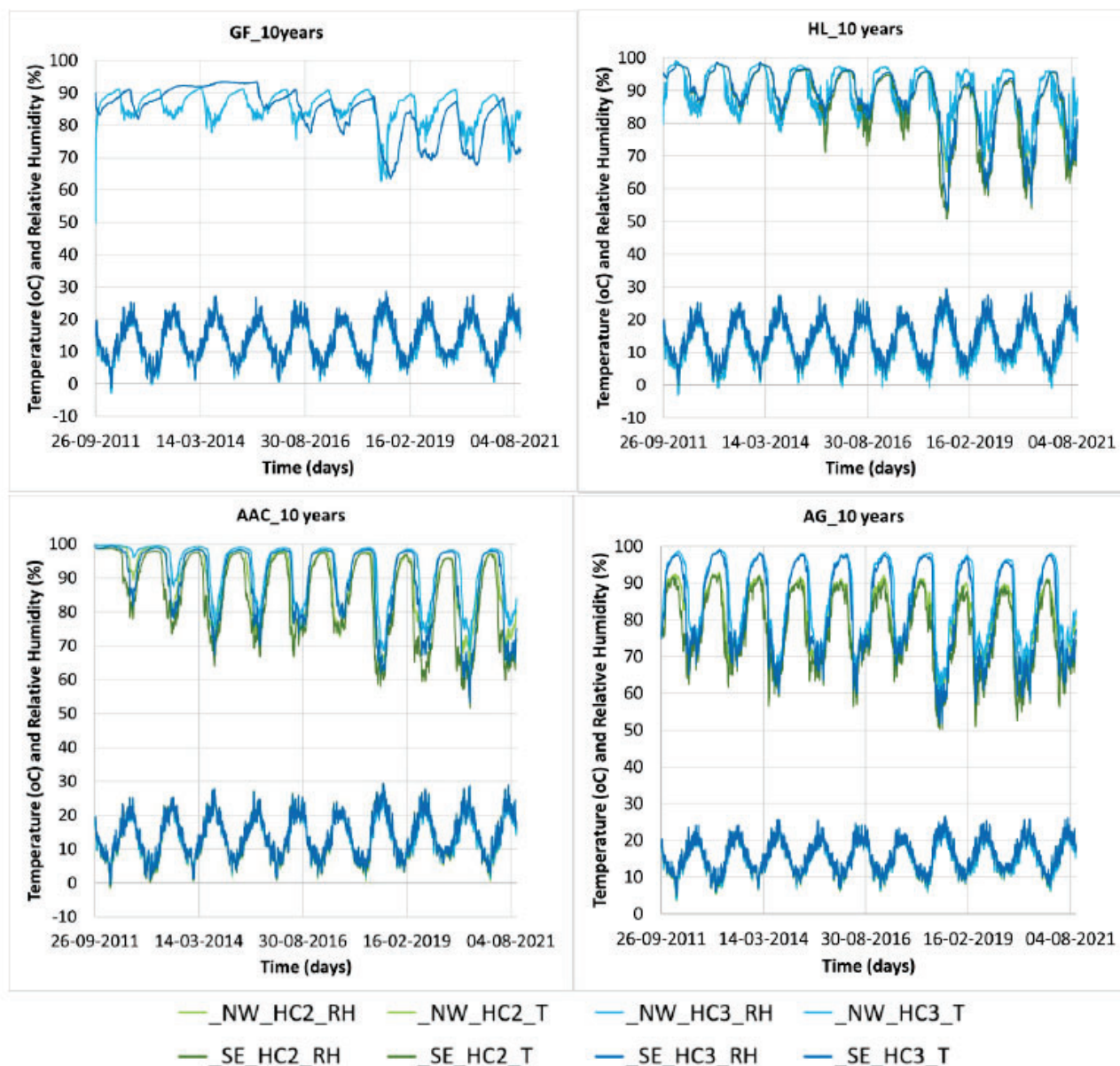


FIGUR 9. Beregnet skimmelindeks baseret på de enkelte temperatur- og relativ fugtighedsmålinger. Ved skimmelindeks >3 er der en høj risiko for skimmelvækst. Ved skimmelindeks <1 er risikoen lille. Materialesensitivitetsklasse "sensitiv", dvs med organisk materiale. Fuldt udtrukne kurver er baseret på måleresultater, der blev vurderet pålidelige, mens de stiplede vurderes mindre sandsynlige.

2.2.5 Simuleringsresultater

For at undersøge om parametre som isoleringstykkelse (resultaterne er ikke vist i figur her) væggenes orientering eller indeklimaets fugtbelastningsklasse spiller en rolle for fugtforhold bag isoleringssystemet, og hvordan fugtforhold bliver påvirket af den naturlige variation i udeklimaet over en længere række år, blev der udført 10 års simuleringer. Resultaterne er samlet i FIGUR 10.

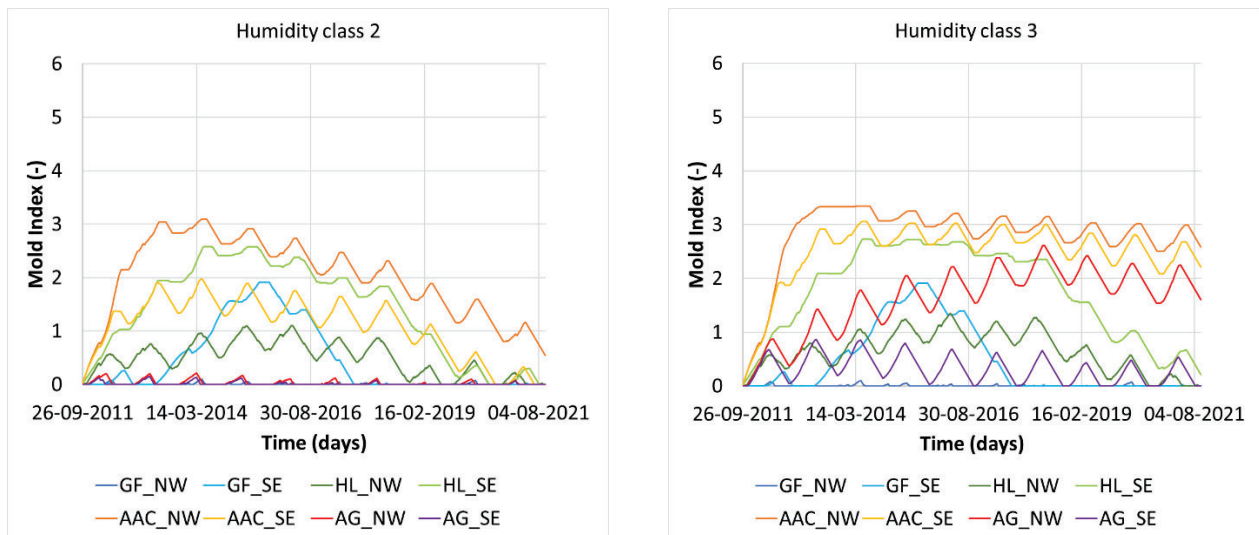
Orientering spiller tilsyneladende kun rolle for det diffusionstætte system GF, og det afhænger af det aktuelle vejr, om systemet fungerer bedst mod SE eller NW. Indeklimaets fugtbelastningsklasse spiller en rolle for de diffusionsåbne systemer, og systemets ydeevne forringes for højere fugtbelastningsklasse. Større isoleringstykkelse (ikke vist) forringes også ydeevne.



FIGUR 10. Temperatur (T) og relativ fugtighed (RH) for en 10-års simulering med faktiske vejrdato for 2011-2021. Der er simuleret alle 4 systemer i begge orienteringer (NW og SE) og med indeklimate både i fugtbelastningsklasse 2 (HC2) og 3 (HC3).

Simuleringsresultaterne blev ligeledes omregnet til skimmelindeks, se FIGUR 11. Hvis det formodes at der ikke er noget organisk materiale i isoleringssystemet eller i væggen bag isoleringen, fungerer alle systemer tilfredsstillende i fugtbelastningsklasse 2, dog er risiko for skimmelvækst størst for AAC i begge retninger samt for HL mod SE, lige som også målingerne viser. I fugtbelastningsklasse 3 er risikoen yderligere forhøjet for disse systemer, især for AAC mod SE, samt for AG mod NW.

Overordnet fungerer GF bedst og især mod NW, hvilket også gælder for HL, mens AAC viser det største risiko for skimmelvækst, men fungerer lidt bedre mod SE.



FIGUR 11. Beregnet skimmelindeks baseret på de simulerede temperatur- og fugtforhold (10-års simulering med faktiske vejrdato for 2011-2021). Ved skimmelindeks >3 er der en høj risiko for skimmelvækst. Ved skimmelindeks <1 er risikoen lille. Materialesensitivitetsklasse "medium resistant", dvs uden organisk materiale.

2.2.6 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Evaluation of the performance of different internal insulation systems in real-life conditions - A case study. Journal of Building and Environment, Volume 267 (Part C), Artikel 112319.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/evaluation-of-the-performance-of-different-internal-insulation-sy>

Pagoni, P., Møller, E. B., & Hansen, T. K. (2023). Internal Insulation – four systems in one historic residential building. *J. Phys.: Conf. Ser.* 2654, 012006. Proceedings of 13th Nordic Symposium on Building Physics (NSB2023) <https://vbn.aau.dk/da/publications/internal-insulation-four-systems-in-one-historic-residential-buil>

2.3 Druehaven, Valby



2.3.1 Konstruktionen

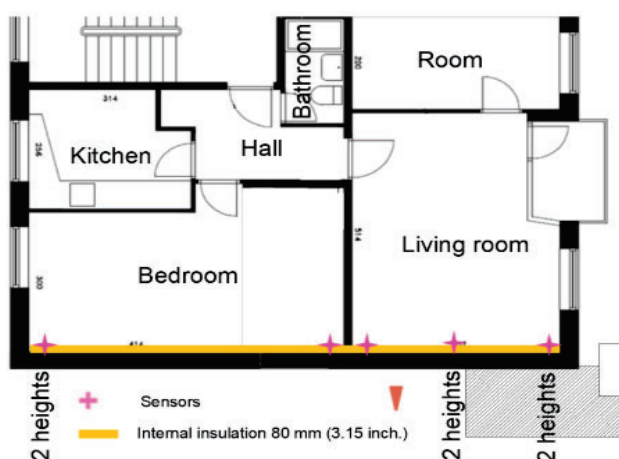
Ydervæggene er massivt murværk med en tykkelse på 1½ mursten (360 mm). Muren er opbygget af gule mangelhulsten som formur og bagmur af letklinkerbeton. På 2. sal er muren hulmur med faste bindere.

2.3.2 Renoveringen

Der blev opsat indvendig isolering i tre lejligheder (en i stueetagen, en på 1. salen og en på 2. salen) på den nordvendte gavlvæg. Gavlvæggen er efterisoleret med 80 mm mineralske isoleringsplader af porebeton (AAC) i 2015, bestående af isoleringsplader, klæber, puds, armeringsvæv, spartelmasse og maling. Der blev opsat trælister til ophængning af billeder mm. Isoleringssystemet er diffusionsåbent.

2.3.3 Målinger

I forbindelse med opsætningen af den indvendige efterisolering blev der opsat måleudstyr i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering samt for indeklimaet i lejlighederne, 8 stk. per lejlighed i forskellige højder. Bemærk at nogle følere i stuen er i en væg som ikke er en ydervæg.

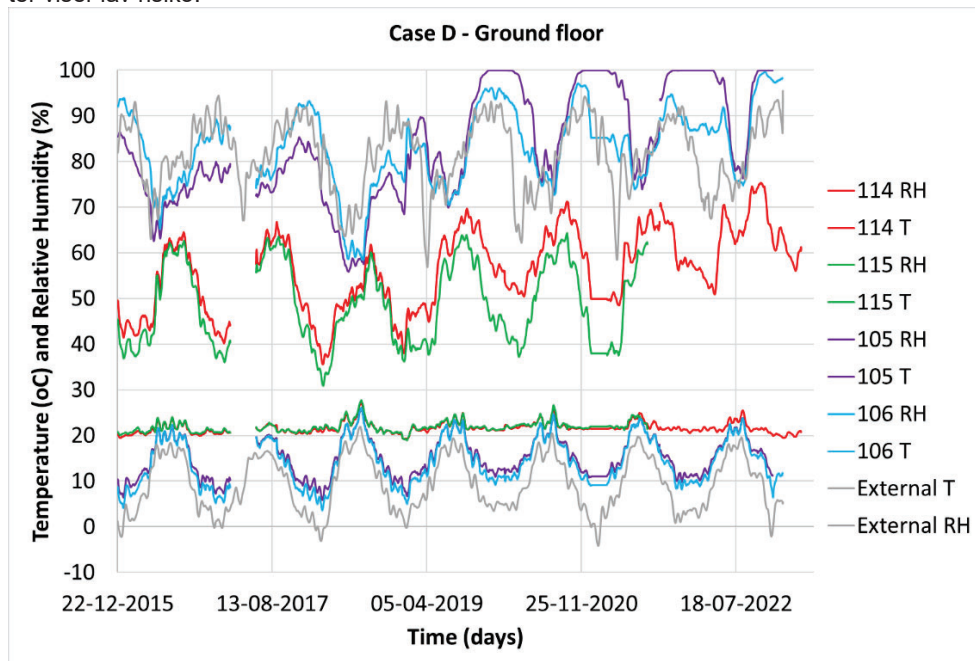


FIGUR 12. Placering af indvendig efterisolering (den nordvendte gavlvæg) og temperatur- og relativ fugtighedssensorer. Bemærk at nogle følere i stuen er i en væg som ikke er en ydervæg.

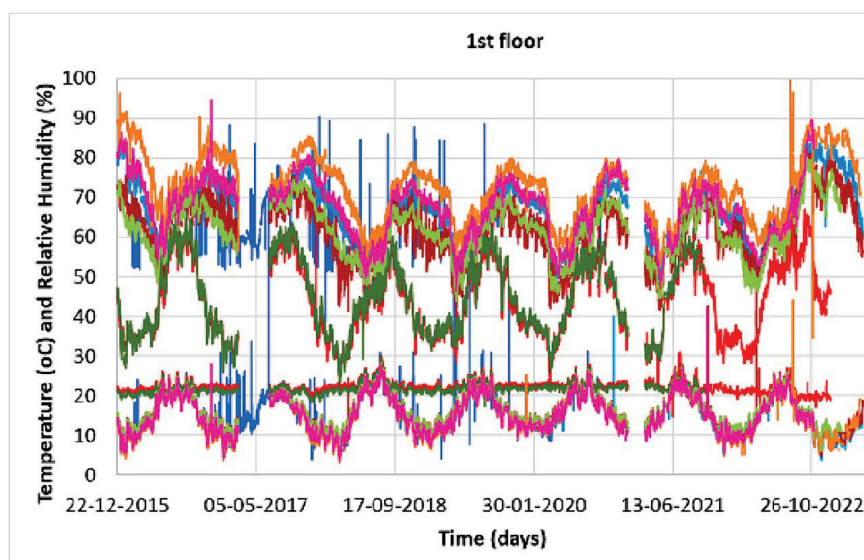
2.3.4 Resultater

Målingerne viser, at den relative fugtighed i skillefalden mellem væg og den indvendige isolering i langt de fleste tilfælde svinger mellem 55-60% i sommerperioden op til 75-80% i vinterperioden og kan betegnes som typiske sæsonvariationer. Der ses generelt et lille fald i den relative fugtighed mellem den første og den anden vinterperiode som fortolkes som udtørring af byggefugt.

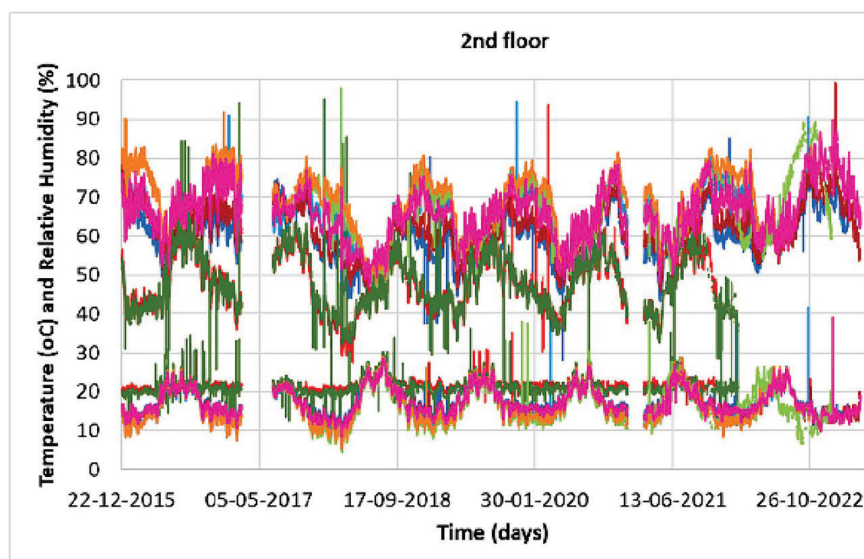
Fra 2019 og frem er der enkelte sensorer i stuelejligheden, hvor den relative fugtighed kommer op på hhv. 95% og 100% i perioder i vinterhalvåret. Den eneste forklaring på disse høje fugtforhold bag isoleringen er indeklimaets høje fugtbelastning. Desværre findes der ikke målinger af indeklimaet i denne periode. Den beregnede skimmelindeks for disse målepunkter med høj fugt viser høj risiko for skimmelvækst bag isoleringen. De øvrige målepunkter viser lav risiko.



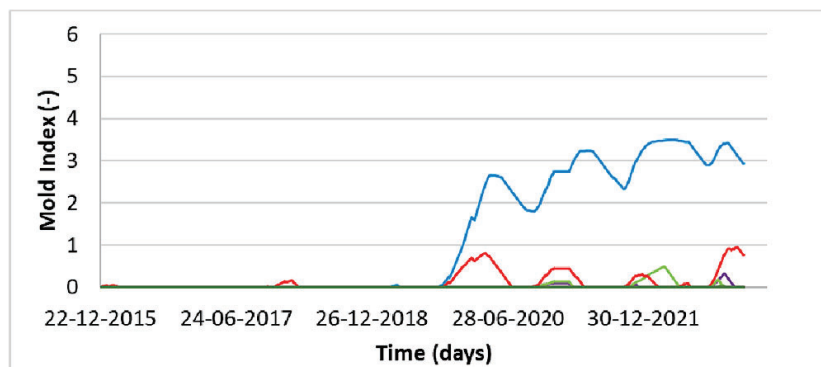
FIGUR 13. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen i stuelejlighed. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighed. Nogle følere i stuen er i en væg som ikke er en ydervæg, hvilket giver den konstante temperatur på omkring 20°C. Den relativ fugtighed er tilsvarende også tydeligt lavere.



FIGUR 14. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen på 1. sal. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighed. Nogle følere i stuen er i en væg som ikke er en ydervæg, hvilket giver den konstante temperatur på omkring 20°C. Den relativ fugtighed er tilsvarende også tydeligt lavere.



FIGUR 15. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen på 2. sal. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighed. Nogle følere i stuen er i en væg som ikke er en ydervæg, hvilket giver den konstante temperatur på omkring 20°C. Den relativ fugtighed er tilsvarende også tydeligt lavere.



FIGUR 16. Beregnet skimmelindeks for alle sensorer. Ved Skimmel Index >3 er der høj risiko for skimmelvækst. Ved Skimmel Index <1 er risikoen forsvindende. Det er kun en sensor fra stuelejligheden der angiver en tydelig risiko for skimmelvækst.

2.3.5 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., & Peuhkuri, R. (2024) Decisive parameters for moisture safe internal insulation of masonry - long time monitoring in inhabited dwellings. Energy and Buildings, 312, Artikel 114180

<https://vbn.aau.dk/da/publications/decisive-parameters-for-moisture-safe-internal-insulation-of-maso>

Pagoni, P., Møller, E. B., & Hansen, T. K. (2022). Internal Insulation of Masonry with and without Hydrophobization in Inhabited Dwellings. In Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XV International Conference (pp. 493-501). American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE).
<https://vbn.aau.dk/en/publications/internal-insulation-of-masonry-with-and-without-hydrophobization->

Hansen, T. K., & Peuhkuri, R. H. (2023). Slutrapport – Vurdering af fugtforhold bag indvendig efterisolering efter flere års målinger: Demonstrationsprojekt om indvendig efterisolering i 3B's afdelinger Druehaven 5 og Folehaven 75. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Bind 2023 Nr. 19

<https://vbn.aau.dk/da/publications/slutrapport-vurdering-af-fugtforhold-bag-indvendig-efterisolering>

Morelli, M., & Møller, E. B. (2019). Energy savings and risk of mold growth in apartments renovated with internal insulation. Science and Technology for the Built Environment, 25(9), 1199-1211.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/energy-savings-and-risk-of-mold-growth-in-apartments-renovated-wi>

2.4 Folehaven, Valby



2.4.1 Konstruktionen

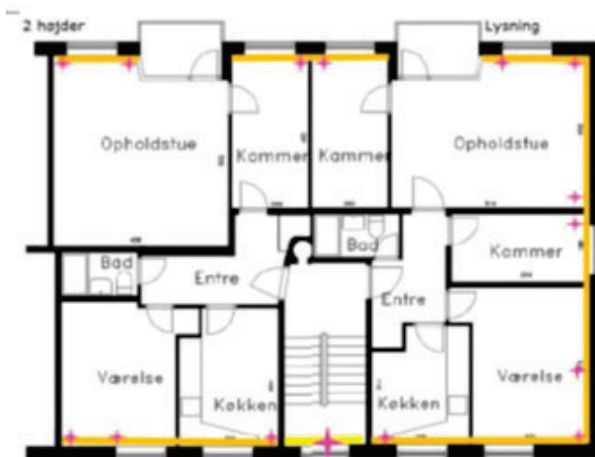
Ydervæggene er massivt murværk med en tykkelse på 1½ mursten (360 mm). Muren er opbygget af gule mangelhulsten som formur og bagmur af letklinkerbeton. På 2. sal er muren hulmur med faste bindere.

2.4.2 Renoveringen

Der blev opsat indvendig isolering i seks lejligheder (to i stueetagen, to på 1. salen og to på 2. salen) på nord- og sydvendte facader samt på den vestvendte gavlvæg. Facaderne og gavlvæggen er blevet efterisoleret med hhv. 50 mm og 80 mm PUR skum med indbyggede kanaler af kalciumsilikat (PUR-CS), bestående af isoleringsplader, klæber, puds, armeringsvæv, spartelmasse og maling. Isoleringssystemet er relativt diffusionstæt. Efter ca. 2 år blev isoleringen i to af lejlighederne taget ned for at teste for skimmelvækst bag isoleringen. Bagefter blev ny isolering opsat på tilsvarende vis.

I trappeopgangen blev der opsat 50mm kalciumsilikat isolering (CS). Isoleringssystemet i trappeopgangen er både diffusionsåbent og kapillaraktivt.

I disse prøvelejligheder blev der også etableret mekanisk ventilation med varmegenvinding. Derudover har vinduerne mod nord – som åbner mod en meget trafikeret vej – fået en støjreducerende konstruktion, som tillader udluftning uden støjgener.



FIGUR 17. Placering af indvendig efterisolering og temperatur- og relativ fugtighedssensorer.

2.4.3 Målinger

I forbindelse med opsætningen af den indvendige efterisolering blev der opsat måleudstyr i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering samt for indeklimaet i lejlighederne, 8-10 stk. per lejlighed i forskellige højder og orienteringer: vest, nord og øst. Desuden er der placeret enkelte målere bag isoleringen i trappeopgangen.

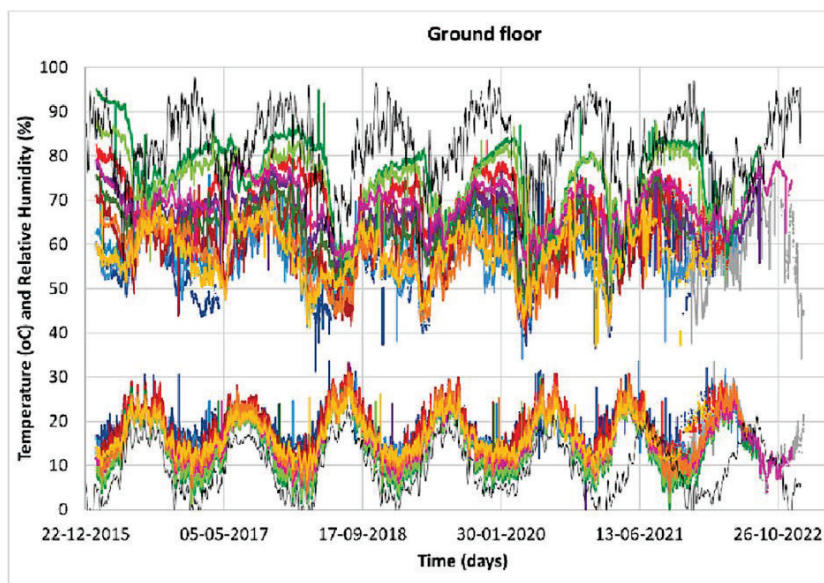
2.4.4 Resultater

Efter udtørringen af byggefugten i løbet af det første år kommer den relative fugtighed i skillefalden mellem væg og den indvendige isolering kun kortvarigt over 80% i enkelte målepunkter bag den diffusionstætte isolering i lejlighederne. I trappeopgangen med den kapillaraktive isolering ligger den relative fugtighed noget lavere.

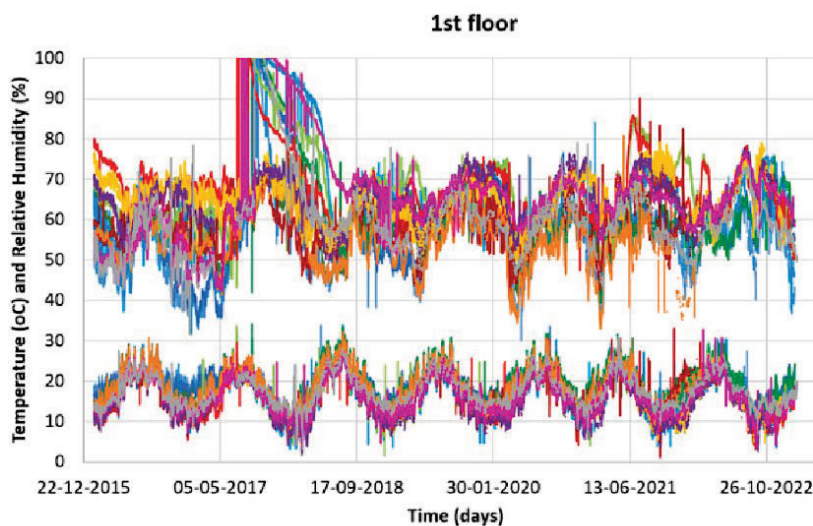
Den relative fugtighed og temperatur udviser typiske årstidsvariationer hvor den relative fugtighed stiger og er højest om vinteren når temperaturen tilsvarende er lavest, og falder igen om foråret samtidigt med at temperaturen stiger. Den beregnede risiko for skimmelvækst, skimmelindekset, bliver derfor minimal. I forbindelse med udskiftning og opsætning af ny isolering i de to lejligheder, opstår der korte perioder med meget høj relativ fugtighed i skillefladen pga. byggefugt. I denne periode stiger skimmelrisiko men den falder i takt med at byggefugten udtørres.

I forbindelse med nedtagningen af isoleringen blev der udført visuelle observationer, samt taget Mycometer og agar aftryksprøver. Der blev ikke konstateret tegn på skimmelvækst, dog blev der på en enkel aftryksplade observeret flere end 50 koloniformende enheder som kan indikere at der er mange levedygtige skimmelsporer til stede bag isoleringen.

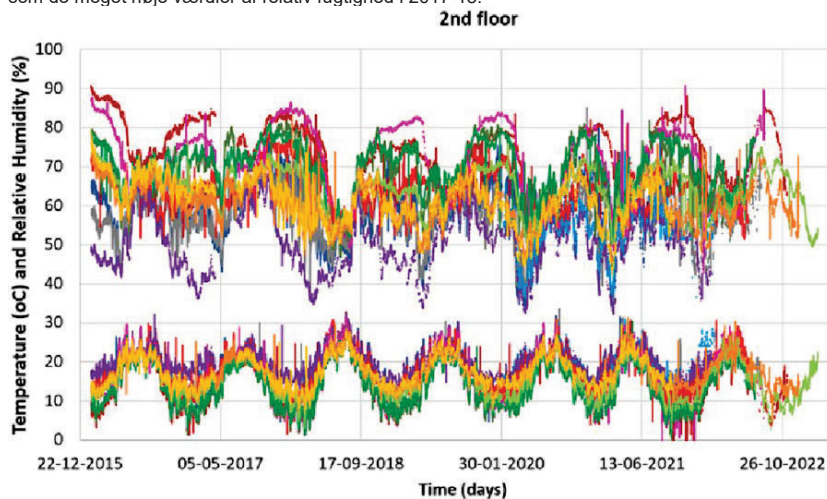
Det formodes at indeklimaet spiller kun en lille rolle for fugtforhold bag den diffusions-tætte isolering, men den mekaniske ventilation er sandsynligvis med til at holde fugten nede i både indeklimaet og bag isoleringen.



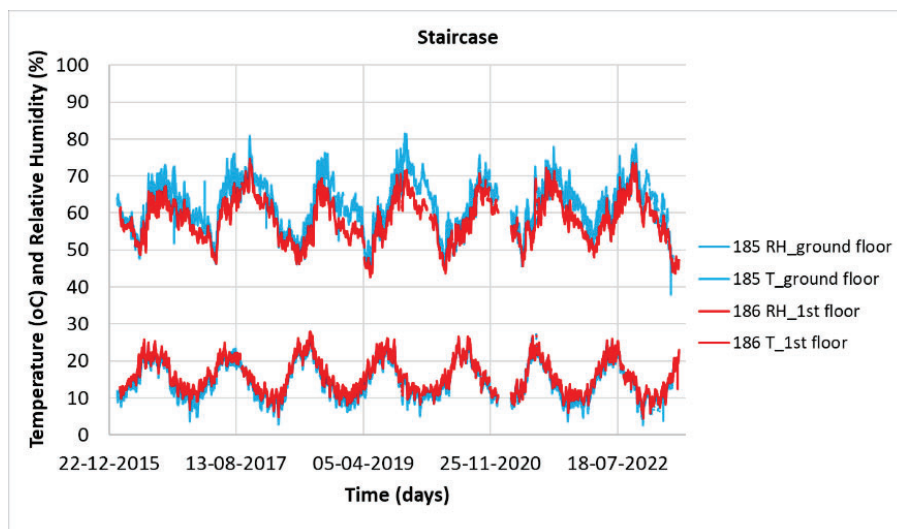
FIGUR 18. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen i stueetagen. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighedsmålinger. Den sorte kurve er udeklima.



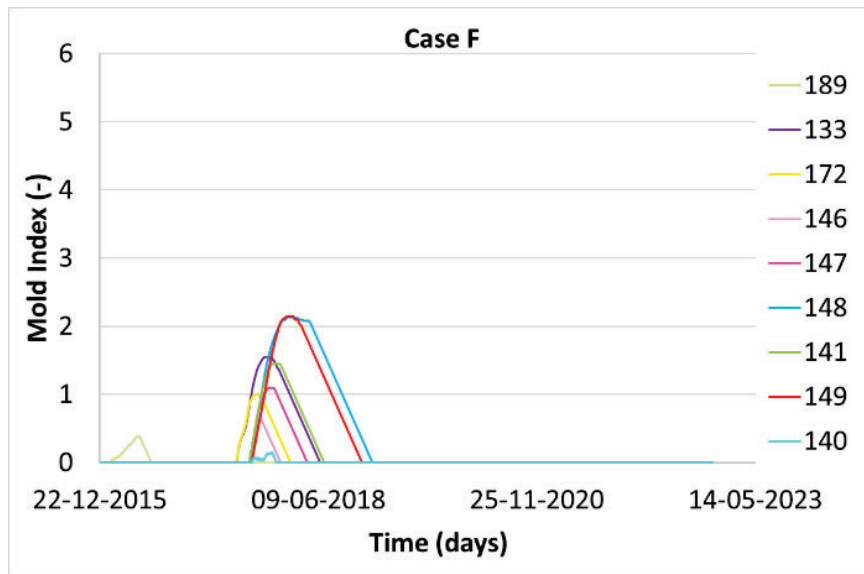
FIGUR 19. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen på 1. sal. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighedsmålinger. I 2017 blev isoleringen i den ene lejlighed nedtaget og retableret, hvor byggefugten ses som de meget høje værdier af relativ fugtighed i 2017-18.



FIGUR 20. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen på 2. sal. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighedsmålinger.



FIGUR 21. Temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen i opgangen. Farven indikerer sammenhængende temperatur- og relativ fugtighedsmålinger.



FIGUR 22. Beregnet skimmelindeks for sensorer der målte højeste relativ fugtighed. Ved Skimmel Index >3 er der høj risiko for skimmelvækst. Ved Skimmel Index <1 er risikoen forsvindende. Det er kun en sensor fra stuelejligheden der angiver en tydelig risiko for skimmelvækst.

2.4.5 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., & Peuhkuri, R. (2024) Decisive parameters for moisture safe internal insulation of masonry - long time monitoring in inhabited dwellings. Energy and Buildings, 312, Artikel 114180

<https://vbn.aau.dk/da/publications/decisive-parameters-for-moisture-safe-internal-insulation-of-masonry>

Hansen, T. K., & Peuhkuri, R. H. (2023). Slutrapport – Vurdering af fugtforhold bag indvendig efterisolering efter flere års målinger: Demonstrationsprojekt om indvendig efterisolering i 3B's afdelinger Druehaven 5 og Folehaven 75. Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet. BUILD Rapport Bind 2023 Nr. 19

<https://vbn.aau.dk/da/publications/slutrapport-vurdering-af-fugtforhold-bag-indvendig-efterisolering>

Hansen, T. K., M ller, E. B., & Morelli, M. (2022). Case Study: 6 years of monitoring of hygrothermal conditions behind internal insulation on masonry walls. Proceedings of Thermal Performance of the Exterior Envelopes of Whole Buildings XV International Conference (s. 276-284). American Society of Heating, Refrigeration, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)

<https://vbn.aau.dk/da/publications/case-study-6-years-of-monitoring-of-hygrothermal-conditions-behind-internal-insulation-on-masonry-walls>

Morelli, M., & M ller, E. B. (2019). Energy savings and risk of mold growth in apartments renovated with internal insulation. Science and Technology for the Built Environment, 25(9), 1199-1211.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/energy-savings-and-risk-of-mold-growth-in-apartments-renovated-with-internal-insulation>

2.5 Klitgaarden, Hundested

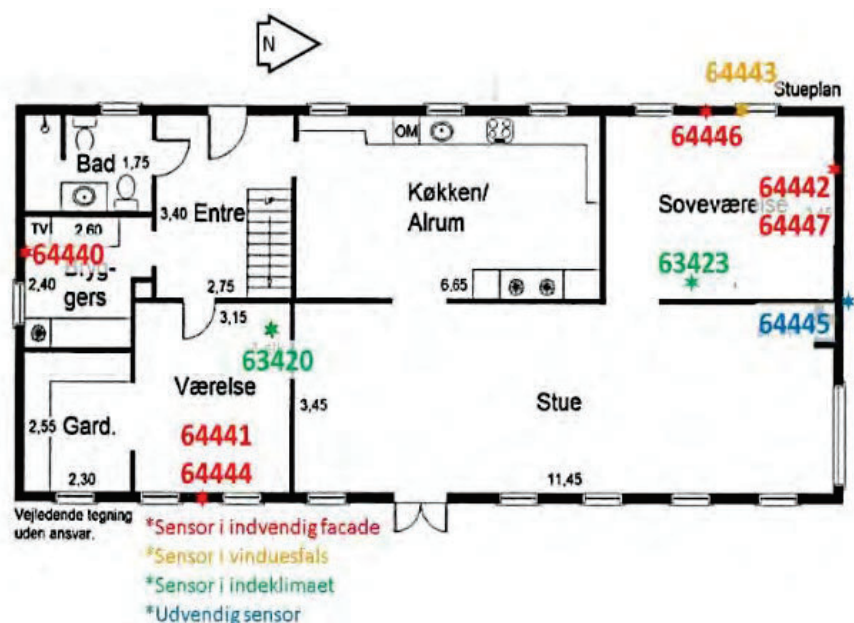


2.5.1 Konstruktionen

Landejendommen Klitgaarden i Hundested er fra 1875. Ydervæggene består af massivt murværk med en tykkelse på 230 mm i gavle og 350 mm i facader. Huset er bygget med granitblokke på toppen af et stenfundament.

2.5.2 Renoveringen

I 2016 blev både de øst- og vestvendte facader samt de nord- og sydvendte gavle isoleret indvendigt. Der blev opsat 80mm fuldklæbet diffusionstæt isolering af PUR skum med kanaler af calciumciliat (PUR-CS) i vægge og 15-30 mm i lysningerne. Bygningens udvendige overflader blev sandblæst under renovering og pudset med et tyndt lag med sandmørtel. I 2018 blev alle ydervægge imprægneret udvendigt.



FIGUR 23. Placering af temperatur- og relativ fugtighedssensorer bag den indvendige efterisolering samt for måling af inde- og udeklima. Nogle følere i væggen blev placeret i forskellige højder.

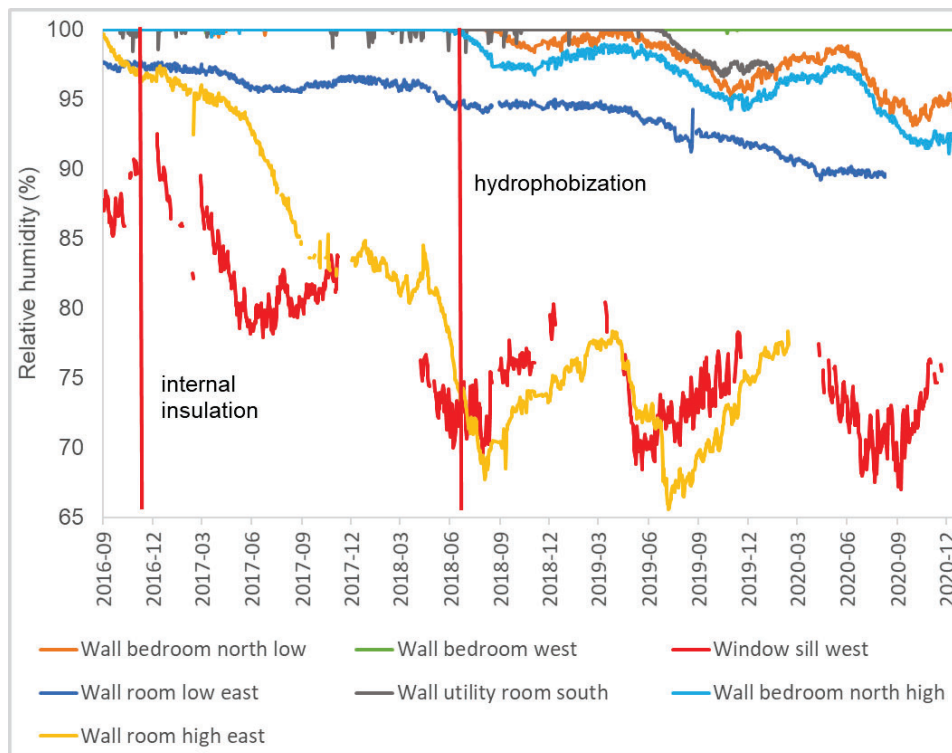
2.5.3 Målinger

I forbindelse med opsætningen af den indvendige efterisolering blev der opsat måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering i stueetagen. I forhold til opsætning af målere bag isolering var der mest fokus på de nordvestlige dele af bygningen. Derudover måles indeklimaets temperatur og relativ fugtighed. Målingerne startede i juni 2016 og løb til ultimo 2020.

2.5.4 Resultater

Ud fra målingerne ses det at fire af de seks sensorer i væggene viser en relativ fugtighed på over 98% i de første to måle-år. Omkring september 2018 begynder den relative fugtighed at falde, sandsynligvis på grund af udvendig imprægnering. Kun den østvendte væg ser ud til at tørre over den første 2-årige periode uden udvendig imprægnering. Resultaterne fra målingerne resulterer i et meget højt skimmelindeks, hvilket indikerer at der er stor risiko for udvikling af skimmelsvamp bag den indvendige efterisolering hvis der findes noget organisk materiale her.

Den indendørs temperatur og relativ fugtighed ligger på normale niveau med en relativ fugtighed på mellem 35-65%.



FIGUR 24. Målt relativ fugtighed i 2016-2020. "Low" og "High" angiver vertikal sensorplacering. Tidspunktet for isolering samt imprægnering er angivet med lodrette linjer.

2.5.5 Publikationer

Soulios, V. (2021). Hygrothermal Performance of Hydrophobized Brick and Mortar: Energy Renovation Through Internal Insulation - Can Hydrophobization Improve the Moisture Safety? PhD Thesis. Aalborg Universitetsforlag. <https://doi.org/10.54337/aau459966346>

de Place Hansen, E. J., Hansen T.K. & Soulios, V.(2021) Deep renovation of an old single-family house including application of an water repellent agent a case story. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 863(1), Artikel 012034.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/deep-renovation-of-an-old-single-family-house-including-applicati-2>

2.6 Meinungsgade, København



2.6.1 Konstruktionen

Ejendommen er fra 1877 med pudset facade i stueetagen og blankt murværk på øvrige etager. Murene er massivt murværk, som bliver tyndere jo højere etage der er tale om. Murtykkelsen på 4. sal er $1\frac{1}{2}$ sten (360 mm), dog kun 1 sten (230 mm) i brystninger afsluttet med 10 mm puds indvendigt. Etageadskillelser er med træbjælkelag.

2.6.2 Renoveringen

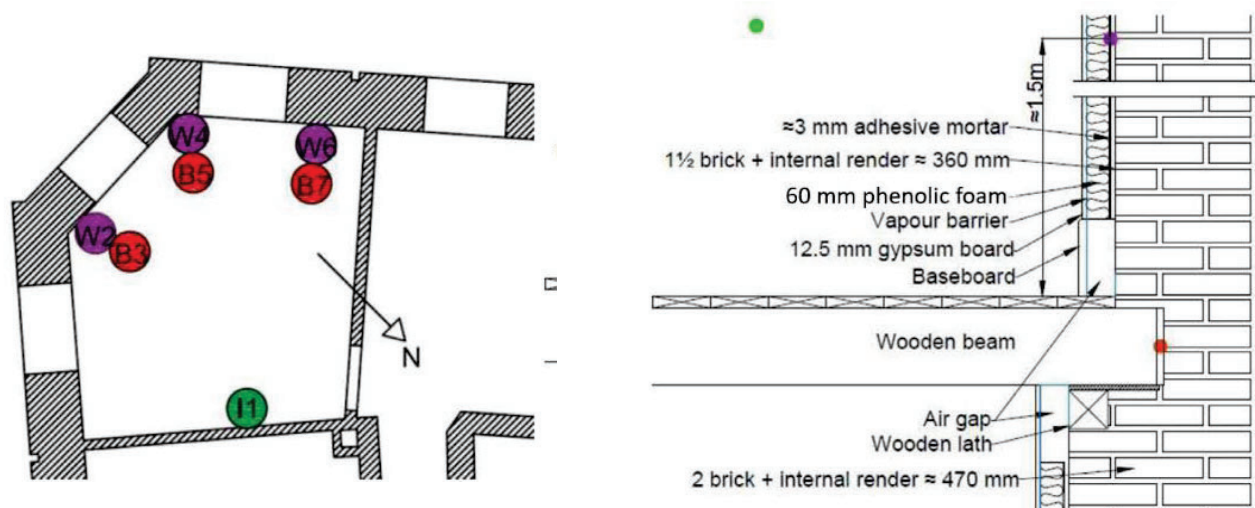
En lejlighed på 4. sal (øverste etage) gennemgik en renovering i 2014, hvor der i den forbindelse er opsat indvendig isolering på den sydlige og sydvestlige facade. Her er murværket tyndest og dermed mest udsat. Der er opsat 60mm fuldklæbet fenolskum (PF). Isoleringen er afsluttet med en gipsplade med indbygget dampspærre, hvilket giver væggen en teoretisk U-værdi på $U=0,27 \text{ W/m}^2\text{K}$. På brystningspartierne blev der installeret 20 mm fenolskum. Isoleringssystemet er diffusionstæt. Derudover blev der konstrueret en tilsigtet kuldebro omkring de indlejrede træbjælkeender og rem ved at udelade isolering omkring 20 cm over og under gulvkonstruktionen. Dette tiltag skulle holde temperaturen højere og dermed nedsætte risikoen for skimmel og råd angreb.

6 år senere, i efteråret 2020 blev facaden renoveret; vinduerne blev skiftet, fugerne blev udkrattet i 2 centimeters dybde og genfuget med en hydraulisk kalkmørtel, og facaden blev imprægneret med vandbaseret 40 % silan creme.

2.6.3 Målinger

I forbindelse med renoveringen blev der opsat måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed hhv. i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering, og i bjælkeenderne i lejligheden på 4. sal. Derudover blev indeklimaets temperatur og relativ fugtighed målt, og der blev installeret en slagregnsmåler. Målingerne startede i slutningen af 2014 og løb i første omgang til foråret 2018.

Måleudstyret blev genaktiveret i 2020 for at kunne vurdere effekten af imprægnering. Det bemærkes at det ikke har været muligt at gen-kalibrere måleudstyret der er indbygget i konstruktionen.

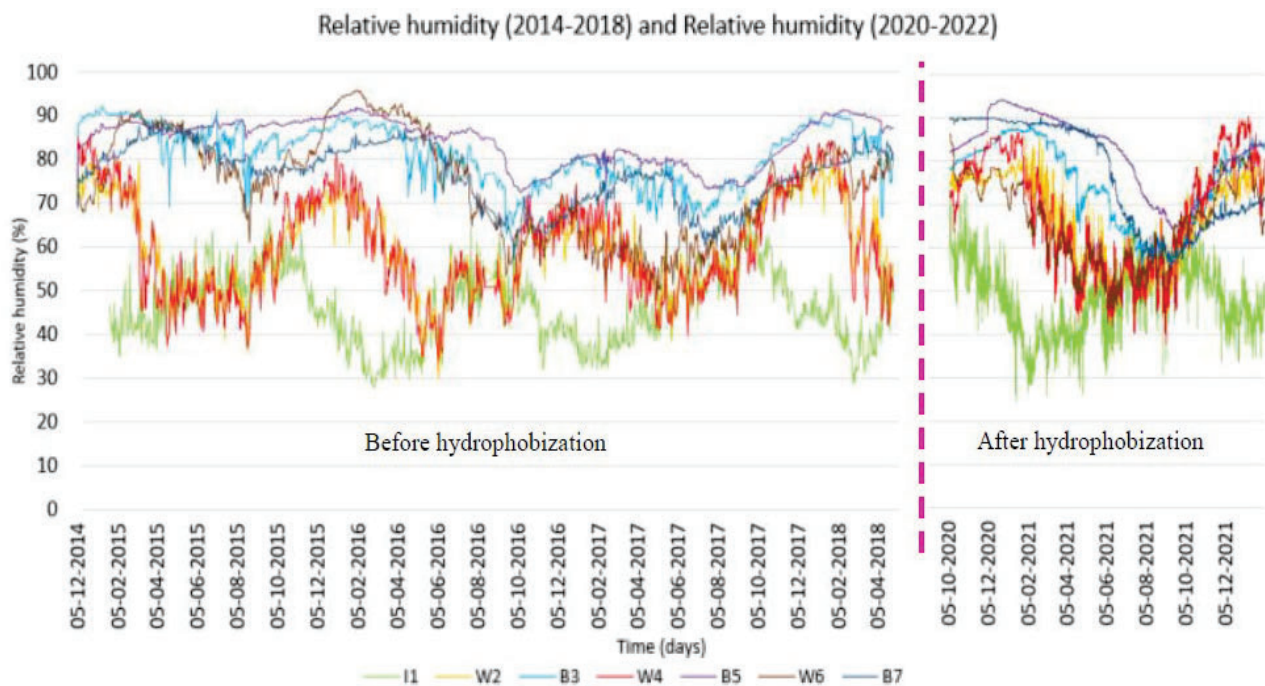


FIGUR 25. a) Placering og navngivning af målepunkter. W = skilleflade bag isoleringen, B = bjælkeende, I = Indeklima..
b) Snit ved etageadskillelse med angivelse af målepunkter.

2.6.4 Resultater

Generelt anbefales det at imprægnerer murværket først, og lade det tørre ud, inden opsætning af indvendig isolering, men i dette tilfælde var rækkefølgen omvendt – og først 6 år efter isoleringen, blev der imprægneret. Efter imprægneringen ses stort set de samme tendenser som før imprægneringen; den relative fugtighed i skillefladen ligger generelt under 80% og kun en enkelt sensor målte op til 90% i vinterperioden. Bjælkeenderne viste højere fugtighed end skillefladen, og her varierede den relative fugtighed mellem 55-95%. Den relative fugtighed er høj kun i kortere perioder om vinteren, og den beregnede skimmelindeks hverken i skilleflade eller bjælkeender viser tegn på risiko for skimmelsvampevækst.

Til sammenligning med Ny Allégade, Kildevældsgade og Thomas Laubs Gade 5 case-studierne, blev det i casen Meinungsgade observeret at udtørningsperioden efter opsætningen af isoleringssystemet var længere. Dette kan muligvis skyldes at lejligheden er mere udsat for slagregn pga orienteringen mod syd og sydvest.



FIGUR 26. Målt relativ fugtighed i bjælkeenderne (B3, B5, B7), i skilleflade bag isoleringen (W2, W4, W6) og i indeklima (I1).

2.6.5 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., & Peuhkuri, R. (2024) Decisive parameters for moisture safe internal insulation of masonry - long time monitoring in inhabited dwellings. Energy and Buildings, 312, Artikel 114180

<https://vbn.aau.dk/da/publications/decisive-parameters-for-moisture-safe-internal-insulation-of-maso>

Pagoni, P., Møller, E. B., & Hansen, T. K. (2023). Hygrothermal measurements in internally insulated solid masonry wall before and after hydrophobization. AIP Conf. Proc. 2918, vol. 020047. 5th Central European Symposium of Building Physics 2022 (CESBP 2022)

<https://vbn.aau.dk/da/publications/hygrothermal-measurements-in-internally-insulated-solid-masonry-w>

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., & Peuhkuri, R. H. (2019). The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing solid masonry. Energy and Buildings, 196, 255-268.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/the-effects-of-wind-driven-rain-on-the-hygrothermal-conditions-be>

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H., & Harrestrup, M. (2018). Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. Energy and Buildings, 172, 235-248.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/long-term-in-situ-measurements-of-hygrothermal-conditions-at-crit>

2.7 Kildevældsgade, København

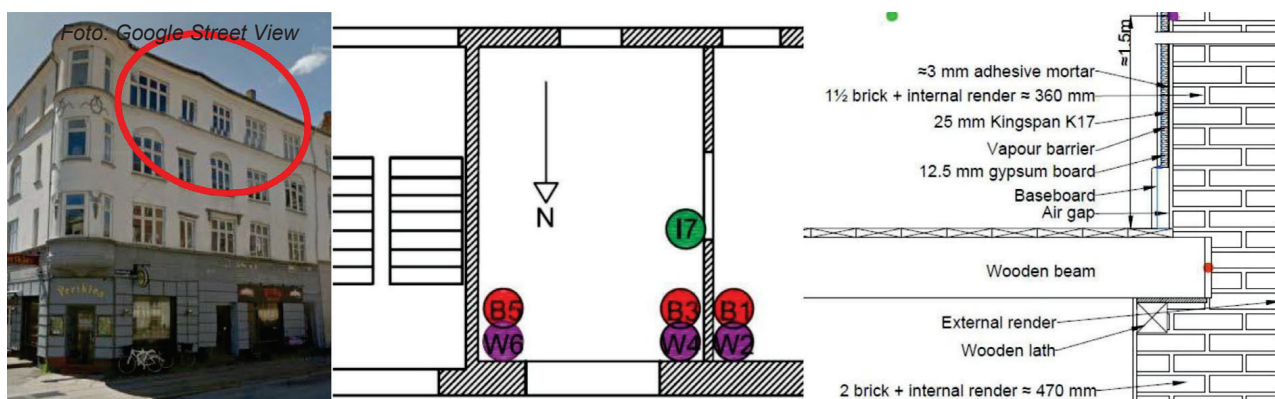


2.7.1 Konstruktionen

Bygningen er fra 1905 og bygget i traditionel dansk byggestil fra opførselsperioden med massivt murværk og indlejrede træbjælker som etageadskillelse. Ydervæggene på 3. sal består af $1\frac{1}{2}$ mursten (350 mm) samt en pudset og malet facade. Indvendigt er der 10 mm puds.

2.7.2 Renoveringen

Bygningen gennemgik en renovering i 2015, hvor der blev opsat indvendig isolering på den nordlige facade på 3. sal. Der er opsat et diffusionstæt system med 25 mm fuldklæbet fenolskum (PF) afsluttet med gipsplade med indbygget dampspærre, hvilket giver en teoretisk gennemsnitlig U-værdi for væggen på $U=0,5 \text{ W/m}^2\text{K}$. På brystningspartierne er isoleringstykkelsen 20 mm. Derudover blev der konstrueret en tilsigtet kuldebro omkring de indlejrede træbjælkeender og rem ved at udelade isolering omkring 20 cm over gulvkonstruktionen. Dette tiltag skulle holde temperaturen i bjælkeenden højere og dermed nedsætte risikoen for skimmel og råd.



FIGUR 27. Placering af temperatur- og relativ fugtighedssensorer bag den indvendige efterisolering og i bjælkeenden, samt for måling af indeklima.

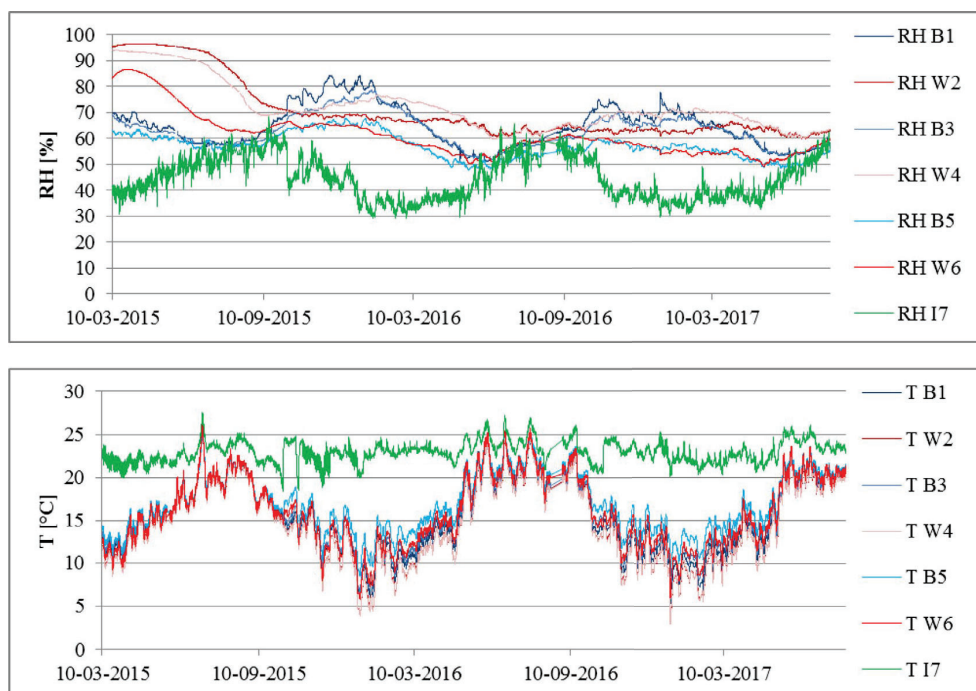
2.7.3 Målinger

I forbindelse med renoveringen blev der opsat måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed hhv. i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering, og i bjælkeenderne i en lejlighed på 3. sal. Derudover måles indeklimaets temperatur og relativ fugtighed. Måleperioden i analysen løber over godt 2½ år fra midt marts 2015 til sommeren 2017.

2.7.4 Resultater

Ud fra målingerne ses det at byggefugten bag isoleringen reduceres til under 80% relativ fugtighed inden for de første 6 måneder efter opsætning af systemet. Bortset fra de forventelige sæsonvariationer – hvor den relative fugtighed stiger om vinteren samtidigt med at temperaturen falder, og tilsvarende falder om sommeren – bliver den relative fugtighed i væggene under ca. 75%. Den relative fugtighed i bjælkeenderne er lidt højere men ligger under den kritiske grænse på 80%.

Det ses fra temperaturmålingerne at forholdene i én af bjælkeenderne (B5) ligger lidt højere end de andre, og relativ fugtighed tilsvarende lavere, hvilket muligvis skyldes et indbygget varmtvandsrør. Den beregnede skimmelindeks viser ingen risiko for skimmelvækst eller råd problemer.



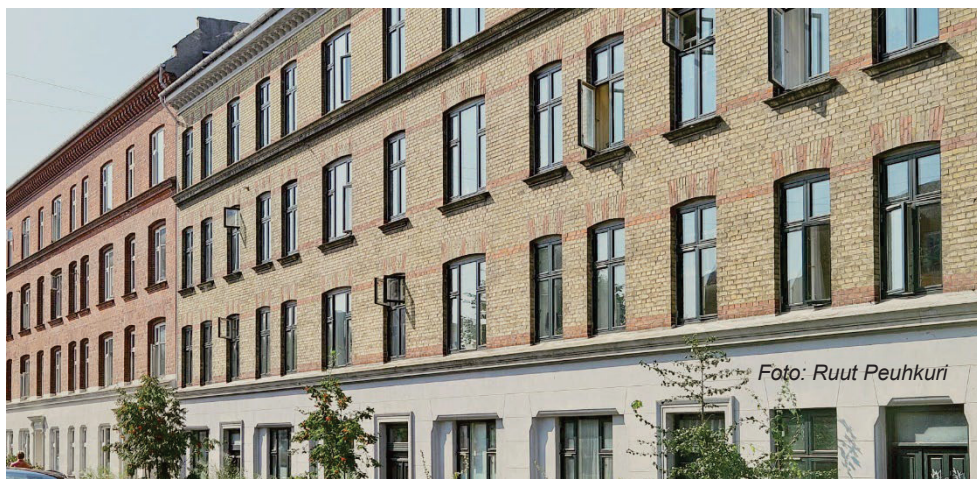
FIGUR 28. Målt relativ fugtighed og temperatur på nordfacaden i Kildevældsgade. Røde nuancer viser forhold i væggen mellem isoleringen og den oprindelige væg (W2, W4, W6). Blå nuancer viser forhold i bjælkeenderne (B1, B3, B5). Grøn kurve viser indeklimamålingen (I7)

2.7.5 Publikationer

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H., & Harrestrup, M. (2018). Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. *Energy and Buildings*, 172, 235-248.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/long-term-in-situ-measurements-of-hygrothermal-conditions-at-crit>

2.8 Thomas Laubs Gade, København



2.8.1 Konstruktionen

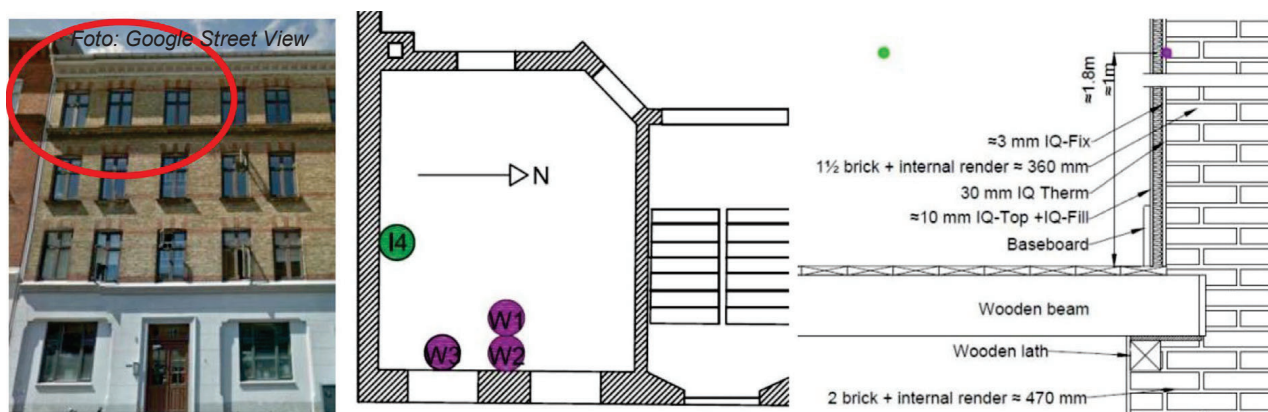
Bygningen er en etageejendom fra 1899, hvor ydervæggene består af en $1\frac{1}{2}$ stens mur med indvendigt pudslag (ca. 360 mm). Brystningspartierne består af 1 stens mur (240 mm). Eta-geadskillelserne består af træbjælker indlejret i ydervæggene. Disse bjælker er understøttet af trælægter.

2.8.2 Renoveringen

I 2015 blev opsat indvendig isolering på den østlige facade i en lejlighed på 3. sal. På væggene blev der opsat et diffusionstæt system med 30mm fuldklæbet PUR skum med kanaler af kalciumsilikat (PUR-CS), hvilket giver en teoretisk U-værdi på $U=0,55 \text{ W/m}^2\text{K}$. På brystningspartierne blev der installeret kapillaraktivt system bestående af 50 mm kalciumsilikat (CS).

2.8.3 Målinger

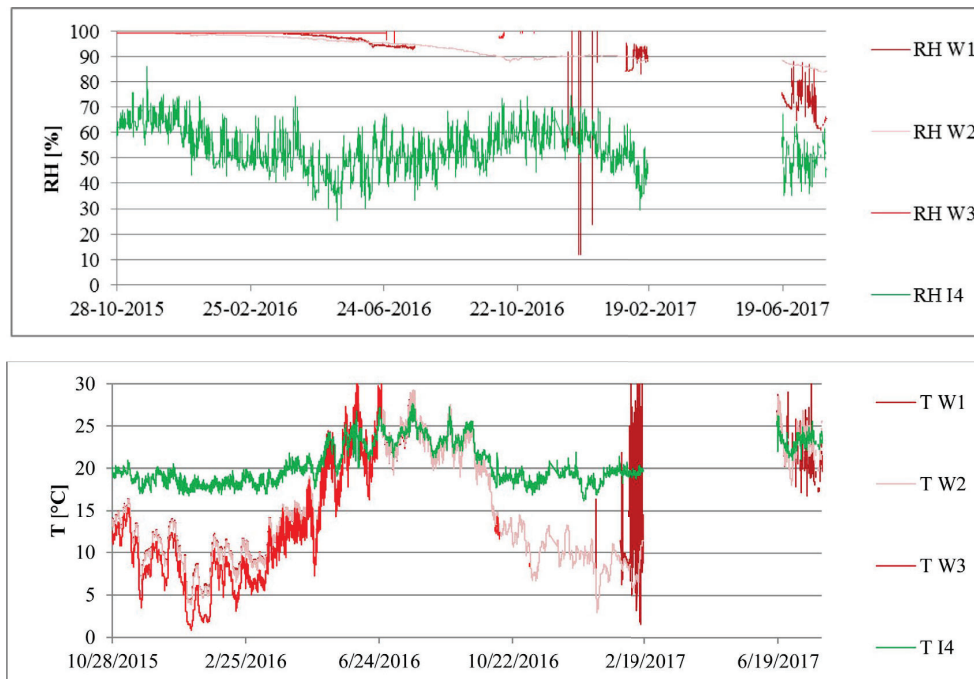
I forbindelse med renoveringen blev der opsat måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering i lejligheden på 3. sal. Derudover måles indeklimaets temperatur og relativ fugtighed. To af de tre målere er opsat bag PUR-CS isoleringen og den sidste måler bag kalciumsilikat isoleringen på det ene brystningsparti. Måleperioden i analysen løber over godt $2\frac{1}{2}$ år fra midt marts 2015 til sommeren 2017.



FIGUR 29. Placering af temperatur- og relativ fugtighedssensorer bag den indvendige efterisolering, samt for måling af indeklima.

2.8.4 Resultater

Ud fra målingerne ses det at den relative fugtighed er meget høj det første år af måleperioden (nær 100%). Den ene af de tre målere gik i stykker i løbet af det første år, men på trods af dette samt problemer med udfald af målesignal undervejs og større måleusikkerhed ved de høje relative fugtigheder, blev der observeret faldende relative fugtighed i løbet af måleperioden. Den relative fugtighed falder til under 85% i begge målepunkter hen mod slutningen af måleperioden, den ene måler til under 80%. Måleren med højest relative fugtighed (W3) er den der blev installeret på det 240 mm tynde brystningsparti bag kalciumsilikatisoleringen. Der kan ikke siges meget om risikoen for skimmelvækst pga den relativt korte og afbrudt måleperiode, men det formodes at eventuelt skimmelvækst hæmmes i den første periode som følge af høj pH-værdi i den limmørtel som anvendes for kalciumsilikatisoleringen.



FIGUR 30. Målt relativ fugtighed og temperatur på østfacaden i Thomas Laubs Gade 5. Forhold i væggen mellem isoleringen og den oprindelige væg (W2, W4, W6) er vist med røde kurver. Grøn kurve viser indeklimamålingen (I4)

2.8.5 Publikationer

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H., & Harrestrup, M. (2018). Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. *Energy and Buildings*, 172, 235-248.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/long-term-in-situ-measurements-of-hygrothermal-conditions-at-crit>

2.9 Ny Allégade, Haderslev



2.9.1 Konstruktionen

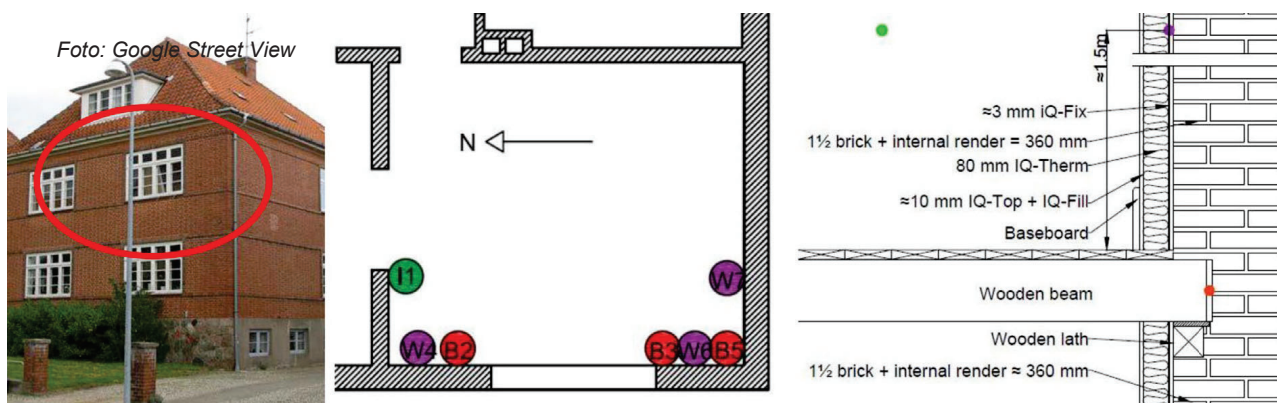
Enfamilieshuset i 2 etager og med kælder og tagetage er fra 1932. Det er bygget i typisk dansk stil med massivt murværk og træbjælker som etageadskillelse. Ydervæggene består af $1\frac{1}{2}$ stens mur (350 mm). Indvendigt er der 10 mm puds. Etageadskillelserne består af træbjælker indlejret i ydervæggene og understøttet af rem.

2.9.2 Renoveringen

Huset gennemgik en renovering i 2015, hvor der blev opsat indvendig isolering på den sydlige og østlige facade i et enkelt rum på 1. sal. Isoleringssystemet er diffusionstæt og består af 80 mm fuldklæbet PUR isolering med kanaler af kalciumsilikat (PUR-CS) afsluttet med puds og maling, hvilket giver en teoretisk U-værdi for den isolerede væg på $U=0,35 \text{ W/m}^2\text{K}$. På brystningspartierne er isoleringstykkelsen 30 mm.

2.9.3 Målinger

I forbindelse med renoveringen blev der opsat måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed hhv. i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering, og i bjælkeenderne. Derudover måles indeklimaets temperatur og relativ fugtighed, og der blev installeret en slagregnsmåler. Måleperioden i analysen løber over godt $2\frac{1}{2}$ år fra slut februar 2015 til sommeren 2017.

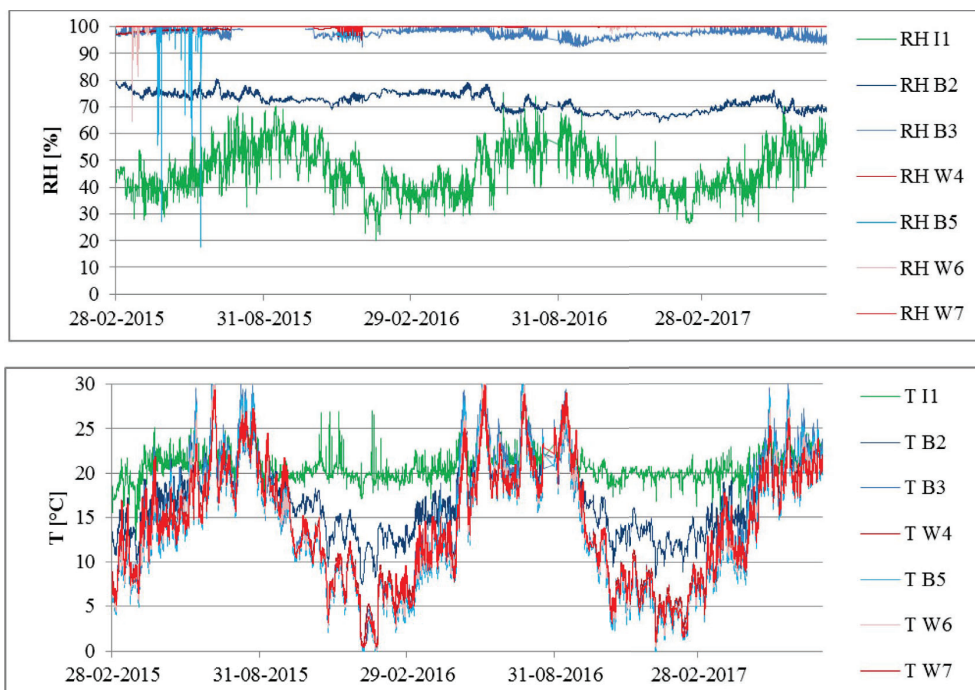


FIGUR 31. Placering af temperatur- og relativ fugtighedssensorer bag den indvendige efterisolering og i bjælkeenden, samt for måling af indeklima.

2.9.4 Resultater

Ud fra målingerne ses det at den relative fugtighed i væggene bag isoleringen ligger på over 98% i hele måleperioden (mere end 2 år). I to af de tre bjælkeender ligger den relative fugtighed også meget højt, på over 95% i næsten hele måleperioden (mere end 1½ år), hvorimod den tredje bjælkeende ligger mellem 65 og 80% hvor der ses en tendens til faldende relative fugtighed. Det ses fra temperaturmålingerne at temperaturen i den ene bjælkeende ligger højere end de to andre bjælkeender, hvilket nok har resulteret i den lavere relative fugtighed. Det antages at denne bjælkeende nok ligger tæt ved et indbygget varmtvandsrør. Det konkluderes derfor at resultaterne for denne bjælkeende ikke er retvisende for systemets ydeevne. Med undtagelse af den ene af målerne i bjælkeenderne blev der ikke observeret noget faldt i den relative fugtighed i løbet af måleperioden.

Resultaterne fra målingerne giver et meget højt skimmelindeks, hvilket indikerer at der er stor risiko for udvikling af skimmelsvamp bag på isoleringen samt råd i bjælkeender.



FIGUR 32. Målt relativ fugtighed og temperatur på nordfacaden i Ny Allegade. Røde nuancer viser forhold i væggen mellem isoleringen og den oprindelige væg (W4, W6, W7). Blå nuancer viser forhold i bjælkeenderne (B2, B3, B5). Grøn kurve viser indeklimamålingen (I1)

2.9.5 Publikationer

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., & Peuhkuri, R. H. (2019). The effects of wind-driven rain on the hygrothermal conditions behind wooden beam ends and at the interfaces between internal insulation and existing solid masonry. *Energy and Buildings*, 196, 255-268.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/the-effects-of-wind-driven-rain-on-the-hygrothermal-conditions-be>

Hansen, T. K., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H., & Harrestrup, M. (2018). Long term in situ measurements of hygrothermal conditions at critical points in four cases of internally insulated historic solid masonry walls. *Energy and Buildings*, 172, 235-248.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/long-term-in-situ-measurements-of-hygrothermal-conditions-at-crit>

2.10 Borchs kollegium, København



2.10.1 Konstruktionen

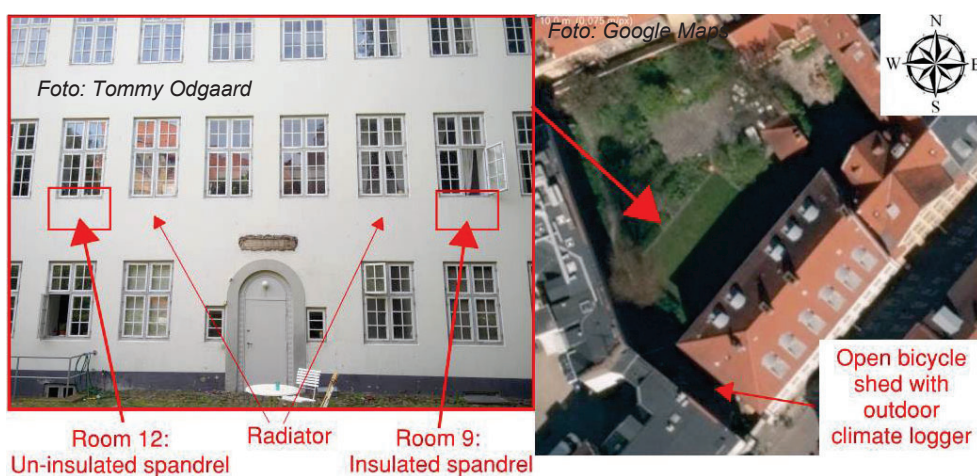
Bygningen er fra 1823, fungerer som kollegium og er konstrueret i massivt murværk i 5 etager. Facaden er pudset, oprindeligt med kalkmørtel, og malet. Brystningerne har en tykkelse på 1 sten (280 mm). Den indvendige overflade er også pudset.

2.10.2 Renoveringen

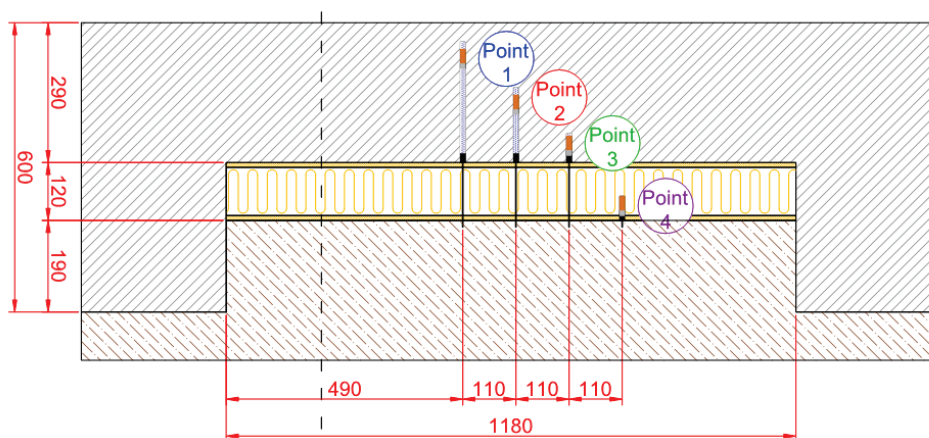
Casen omfatter kun opsætning af indvendig isolering på 2 brystninger på den nordvest-vendte facade på 1. sal. Radiatoren i rummet står ikke foran den isolerede brystning. Isoleringssystemet er diffusionsåbent og består af 100mm mineralsk plade af porebeton (AAC) afsluttet med puds og maling.

2.10.3 Målinger

Der var installeret tre målere i forskellige dybder af murværket i hver af de to lejligheder og en bag slutpudsens til den indvendige isolering. Følerne målte temperatur og træfugt. Træfugten blev omregnet til relativ fugtighed. Derudover blev der målt temperatur og relativ fugtighed af både inde- og udeklimaerne. Måleperioden strækker sig lidt over 2½ år, fra december 2013 til juli 2016.



FIGUR 33. Placering af de undersøgte brystninger samt orientering af facaden.

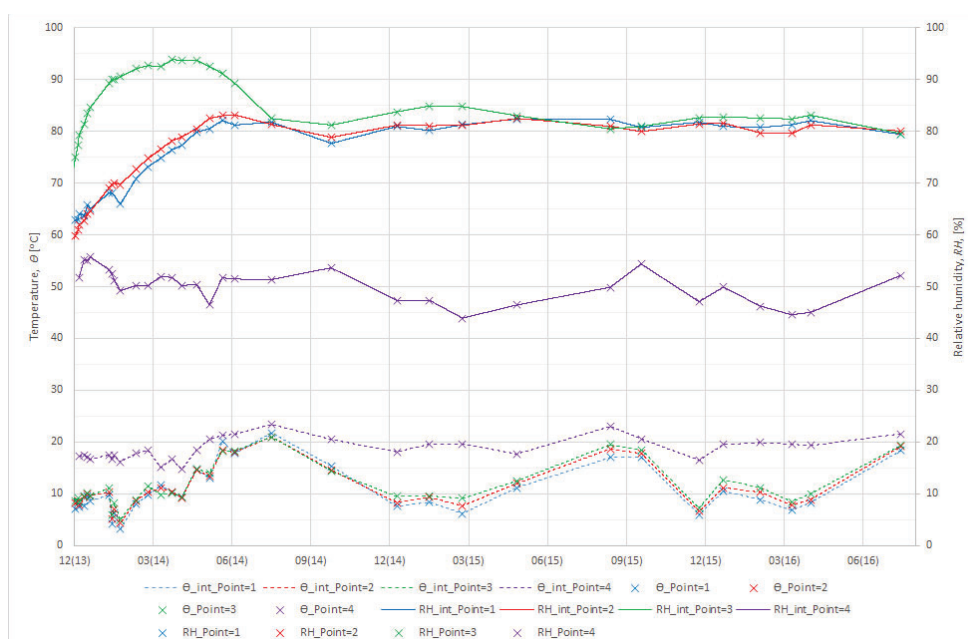


FIGUR 34. Vandret snit af vinduesbrystning med angivelse af målepunkterne i de forskellige dybder i konstruktionen.

2.10.4 Resultater

Ud fra målingerne ses det at den indvendige isolering reducerer temperaturen i det eksisterende murværk og forøger fugtigheden. Den relative fugtighed i de tre målepunkter i den ikke-isolerede væg ligger mellem 50 og 60%, mens de tre ydre målepunkter i væggen med indvendig isolering ligger omkring 80%. Der blev generelt kun observeret små forskelle i den relative fugtighed på de indre og ydre følere i murværket.

Måleresultaterne viser ingen anledning for risiko for skimmelvækst eller råd, eller for frostskaader. Der blev også udført visuelt eftersyn og målinger for tilstedeværelsen af skimmel. Disse viser heller ikke nogen risiko for fugtrelaterede skader. Det vurderes at den isolerede brystning havde gavnlige randbetingelser dvs. at indeklimaet har lav fugtbelastning og at facaden havde en lav påvirkning fra slagregnsbelastning grundet facadens orientering og at den var pudset og malet udvendigt.



FIGUR 35. Målt temperatur og relativ fugtighed (beregnet fra fugtmålingerne) i én af brystningerne. Bemærk at hver målepunkt er i forskellig dybde i væggen.

2.10.5 Publikationer

Odgaard, T., Bjarløv, S. P., & Rode, C. (2018). Interior insulation – Experimental investigation of hygrothermal conditions and damage evaluation of solid masonry façades in a listed building. *Building and Environment*, 129, 1-14. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/interior-insulation-experimental-investigation-of-hygrothermal-co>

Finken, G. R., Bjarløv, S. P., & Peuhkuri, R. H. (2016). Effect of façade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory - A hygrothermal simulation study. *Construction and Building Materials*, 113, 202-214. <https://vbn.aau.dk/en/publications/effect-of-fa%C3%A7ade-impregnation-on-feasibility-of-capillary-active->

2.11 Ryesgade (B), København



2.11.1 Konstruktionen

Etageejendommen er fra 1896 og havde oprindeligt 6 etager. Konstruktionen er massivt murværk og etagedæk er af træ.

2.11.2 Renoveringen

Hele bygningen gennemgik en gennemgribende energirenovering i 2012-13 og opnåede en beregnet energibesparelse på 73%. Facaden mod gaden, inklusiv brystninger, blev efterisoleret indvendigt med 40 mm med et produkt som er en blanding af mineraluld og aerogel men som ikke markedsføres mere. Vindueslysninger blev også indvendigt efterisoleret med samme produkt, men kun med 20 mm. Varmeledningsevnen for produktet er ca. 0,019 W/mK og isoleringen blev afsluttet med dampspærre og gipsplade, hvilket gør systemet diffusionstæt.

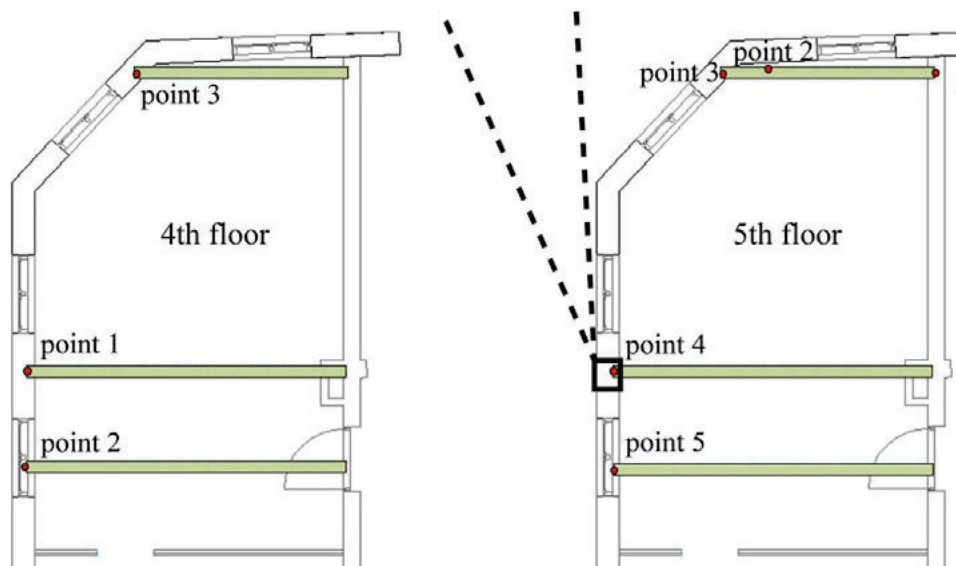
For at kunne vælge de bedste energibesparende løsninger til ejendommen til den bedste pris, blev de forskellige tiltag først afprøvet, målt og evalueret i en "prøveejlighed". På baggrund af erfaringer herfra blev der valgt en række løsninger, herunder den indvendige efterisolering. Derudover omfattede renoveringen nye vinduer, udvendig isolering, mekaniske ventilationsanlæg, etablering af nye tagboliger, solceller og isolering mod kældere.

Under den senere totalrenovering blev facaden gennemgået og renoveret således at den var i god stand inden der blev opsat indvendig isolering, hvilket er i tråd med de anbefalinger som forefindes i dag.

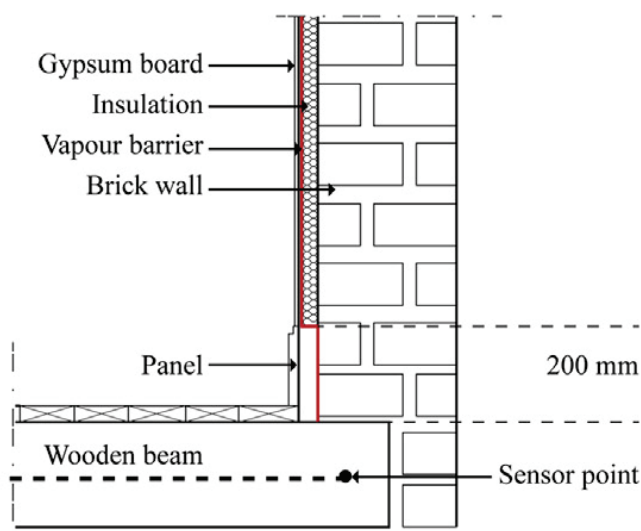
2.11.3 Målinger

I forbindelse med renoveringen blev der installeret temperatur- og relativfugtighedssensorer i udvalgte bjælkeender. Følerne blev placeret i de mest udsatte bjælkeender på 4. og 5. sal på facaden mod sydvest-vest. Måleperiode fra maj 2013 til juli 2014.

På tidspunkt for renoveringen var der stor fokus på sårbarheden af bjælkeender ved indvendig efterisolering og derfor blev der kun installeret måleudstyr i bjælkeender. Forholdene i bjælkeenderne blev forsøgt optimeret ved at der blev skabt en kuldebro med vilje, ved at udelade at isolere de nederste 20 cm over gulvet.



FIGUR 36. Placering af målepunkter i bjælkeender på hhv 4. og 5. sal. Facaden vender mod sydvest-vest.

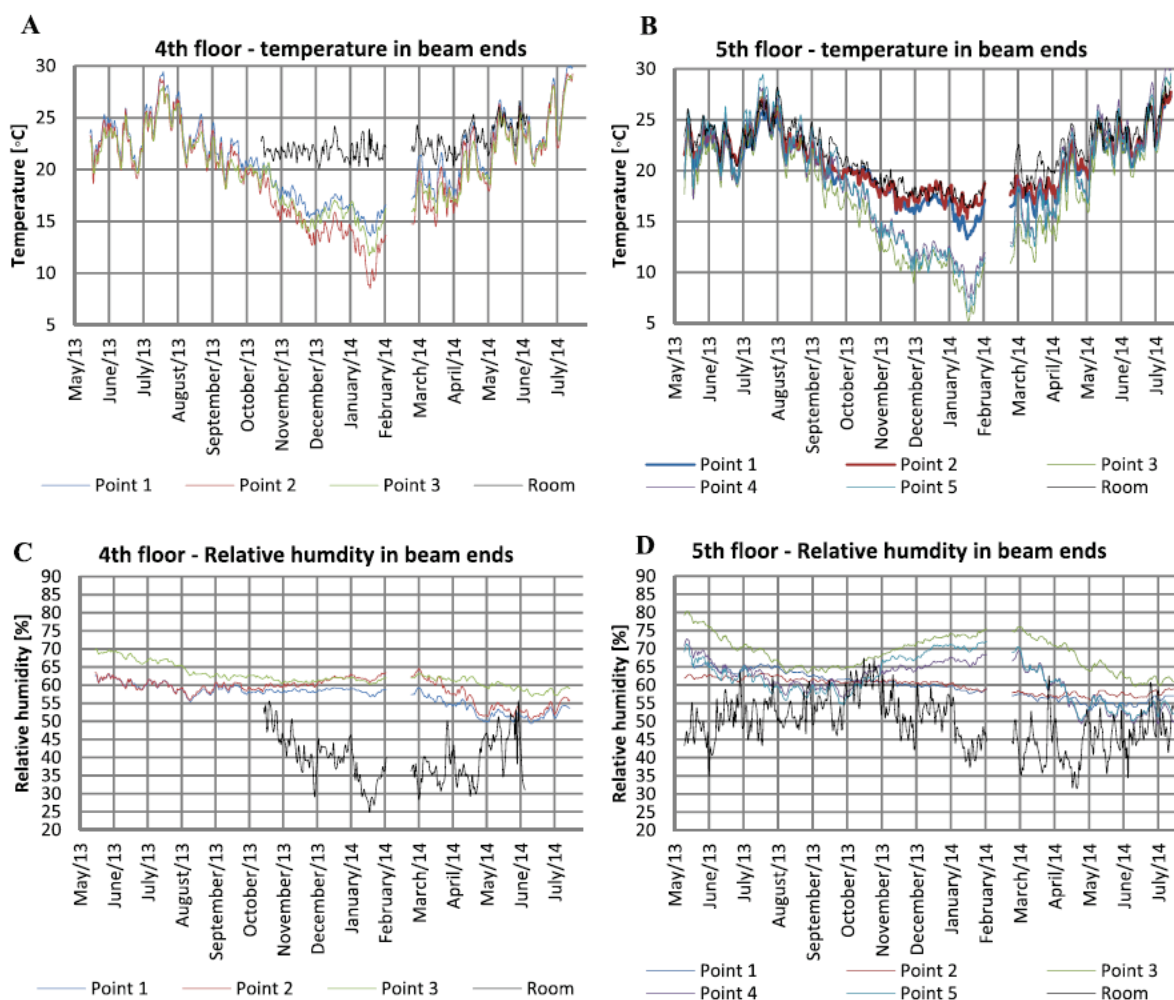


FIGUR 37. Opsætning af den indvendige efterisolering samt lodret snit af den efterisolerede facade samt placering af målepunktet i bjælkeenden. Isoleringstykkelser er 40 mm. Der er ingen isolering på de nederste 20 cm. Foto: Leif Rønby.

2.11.4 Resultater

De udførte målinger af temperatur og relativ fugtighed i bjælkeenderne viste ingen tegn på kritiske forhold. Byggefugten tørrede ud i løbet af den første sæson og lå efterfølgende godt under de kritiske 80% relativ fugtighed.

De udførte simuleringer og parametervariationer (bl.a. orientering, isolerings- og murtykkelse samt regnintensitet) pegede på at løsningen ville være mest fugtsikker i sydvest-vestvendte facader med begrænset regnintensitet. Mod nord samt for større isoleringstykkelser steg risikoen for skimmelvækst, bl.a. på grund af den begrænsede solpåvirkning som medvirker til udtørringen. En tykkere mur samt den tilsigtede kuldebro havde en positiv effekt for fugtsikkerhed, dog er der en stor risiko for at der bag den tilsigtede kuldebro opstår for høj relativ fugtighed eller kondens hvis den fugtige indeluft har adgang til bag fodpanelet.



FIGUR 38. Måleresultater (temperatur og relativ fugtighed) i bjælkeender på 4. og 5. sal samt fra indeklima.

2.11.5 Publikationer

Harrestrup, M. & Svendsen, S. (2016). Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with wooden beams embedded in solid masonry brick façades. *Building and Environment* 99: 59-72. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/internal-insulation-applied-in-heritage-multi-storey-buildings-wi>

Harrestrup, M. & Svendsen S. (2015). Full-scale test of an old heritage multi-storey building undergoing energy retrofitting with focus on internal insulation and moisture. *Building and Environment*, 85, 123-133. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/full-scale-test-of-an-old-heritage-multi-storey-building-undergoi>

Morelli, M., Rønby, L., Mikkelsen, S. E., Christensen, M. G., Kildemoes, T., & Tommerup, H. M. (2012). Energy retrofitting of a typical old Danish multi-family building to a “nearly-zero” energy building based on experiences from a test apartment. *Energy and Buildings*. Volume 54, pp. 395-406. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/energy-retrofitting-of-a-typical-old-danish-multi-family-building>

2.12 Ryesgade (A), København



2.12.1 Konstruktionen

Bygningen er fra 1906 og har 5 etager. Ydervægskonstruktionen er massivt murværk med en tykkelse på 2 sten (480 mm) op til 2. sal og på 1½ sten (360 mm) på 3. og 4. sal.

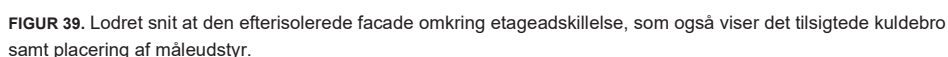
2.12.2 Renoveringen

Bygningen er blevet gennemgående renoveret, hvor der i den forbindelse er opsat indvendig isolering på ydervægge. Der er opsat 50 mm fuldklæbet fenolskum (PF) med indbygget dampspærre og gipsplade, hvilket giver en gennemsnitlig U-værdi på $U=0,3 \text{ W/m}^2\text{K}$. Isoleringssystemet er diffusionstæt.

Forholdene i bjælkeenderne blev forsøgt optimeret ved at der blev skabt en kuldebro med vilje ved at udelade at isolere de nederste 20 cm over gulvet. Murværket i facaden blev rensat og mørtelfugerene repareret i forbindelse med renovering med tre forskellige måder for at se eventuel forskel mellem disse. Derudover blev lejlighedsenhederne omstruktureret og der blev etableret mekanisk ventilation i alle lejligheder.

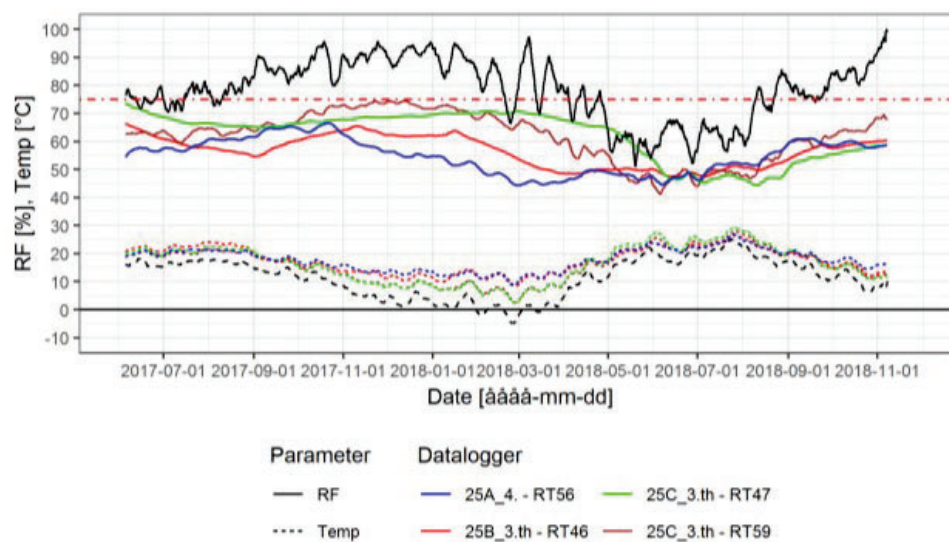
2.12.3 Målinger

Der blev installeret måleudstyr der måler temperatur og relativ fugtighed hhv. i skillefladen mellem væg og den indvendige isolering og bag fodpanelet i den tilsigtede kuldebro over bjælkeenderne i udvalgte lejligheder på 3. og 4. sal (hvor murværket er tyndest og dermed mest udsat). Der blev målt i facader med 3 forskellige orienteringer: Uden væsentlig solpåvirkning (mod nordøst) og med solpåvirkning (mod sydøst og sydvest). Derudover måltes indeklimaets temperatur og relativ fugtighed. Måleperioden løber over 1½ år fra d. 5. juni 2017 til d. 6. november 2018.



Generel viste målingerne at der ikke var risiko for skimmelvækst på murværket bag ved facaden da den relative fugtighed i måleperioden lå under 75%. Der blev i undersøgelsen fundet stor forskel på orienteringen af facaden. De solrige sydvendte væg var udsat for højere relativ fugtighed i forhold til den nordvendte facade. Dette skyldes sandsynligvis "sommerkondens" hvor varmen fra solen presser fugten ind i murværket.

46



FIGUR 41. Målt temperatur og relativ fugtighed bag isoleringen 1,1 m over fodpanelet. Facaden mod nordøst.

2.12.5 Publikationer

Vanhoutteghem, L., Haker Høegh, B. and Hansen, T. (2020), Measurements behind Internal Insulation on Solid Masonry Walls with Different Orientations and Degrees of Repair in a Danish Multi-story Building. E3S Web of Conferences, 172, Article 01008. NSB 2020 - 12th Nordic Symposium on Building Physics, September 6-9 2020, Tallinn, Estonia.

https://www.e3s-conferences.org/articles/e3sconf/abs/2020/32/e3sconf_nsb2020_01008/e3sconf_nsb2020_01008.html

DANSKE LABORATORIE- UNDERSØGELSER OG MOCK-UP FORSØG

3 DANSKE LABORATORIE- UNDERSØGELSER OG MOCK-UP FORSØG

3.1 Laboratorieforsøg med imprægnering

Imprægnering af murværk kan være med til at reducere fugtrelaterede problemer ved indvendig efterisolering, da den nedsætter vandoptagelsen fra slagregn. Men for at kunne vurdere om imprægnering kan anbefales i forbindelse med indvendig efterisolering, var der en række aspekter der skulle undersøges, herunder hvor stor er effekten af reduktion af vandoptagelse. Og hvor meget påvirker imprægneringen transport af vanddamp og dermed udtørringen? Hvor langt trænger imprægneringen ind og hvor holdbar er imprægneringen?

3.1.1 Målinger

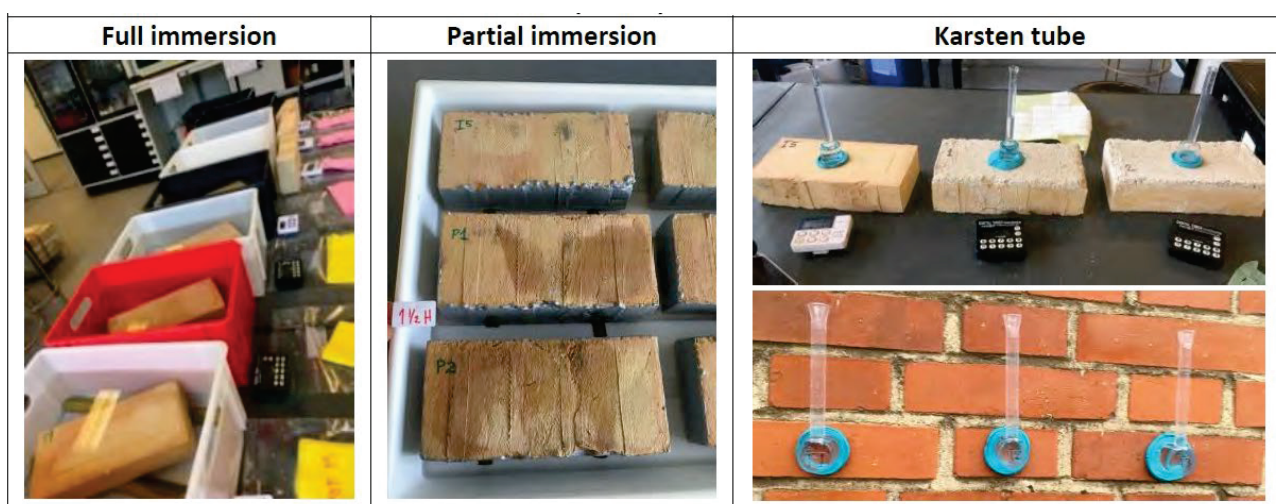
Der er blevet udført følgende laboratorieforsøg med imprægnering:

2 forskellige typer mursten og en kalkmørtel samt en cementmørtel blev undersøgt for effekten af 2 forskellige imprægnering. Én af mursten – en gul blødstrogne sten – var ny men har egenskaber som ligger meget tæt på typiske mursten i ældre bygninger. Den anden sten – den røde – er nedtaget fra en bygning fra 1944

I et forprojekt var en lang række forskellige imprægneringsmidler blevet testet og de valgte var dels typiske og dels velegnede efter de indledende undersøgelser.

Prøverne – både ubehandlede og imprægnerede – blev bl.a. testet for:

- Hvor meget prøverne optager vand ved fuldstændig nedsænkning i vand
- Hvor meget og hvor hurtigt prøverne optager vand ved delvis nedsænkning i vand, dvs deres kapillarsugningsevne
- Hvor meget og hvor hurtigt prøverne optager vand ved bestemt vandtryk (Karsten tube)
- Vanddampdiffusion
- Hvor langt trænger imprægneringen ind i prøverne
- Acceleret ældning af prøverne og efterfølgende gentagelse af vandoptagelse



FIGUR 42. Forsøgsopstillinger a) med fuldstændig nedsænkning i vand, b) med delvis nedsænkning i vand og c) med bestemt vandtryk (Karsten tube).
Foto: Vasilis Soulios.



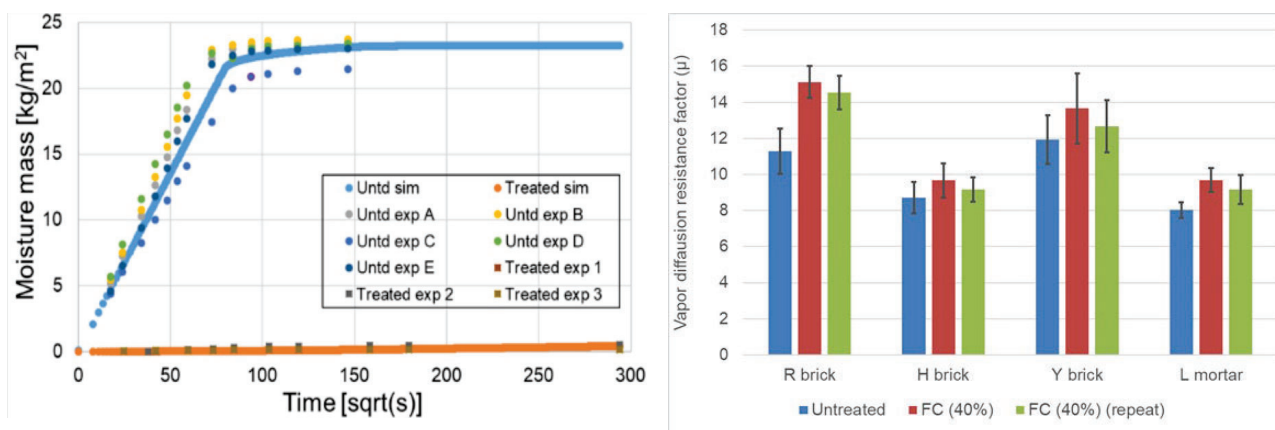
FIGUR 43. Forsøgsopstilling med acceleret ældning, hvor prøverne blev udsat for 635 gentagelser af vandpåvirkning og UV-stråling. Foto: Vasilis Soulios.

3.1.2 Resultater

Resultaterne viste at imprægneringen reducerer vandoptagelsen i et meget stort omfang, i størrelsesorden 1000 gange. Derimod påvirker imprægnering næsten ikke fugttransport ved diffusion og forøger dermed kun marginalt vanddampmodstanden i murværket.

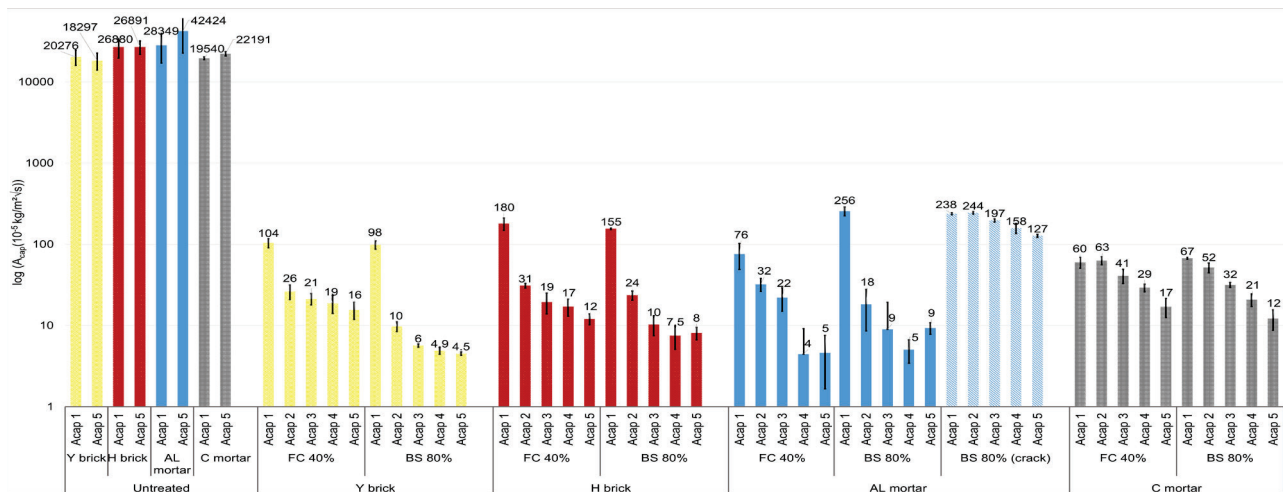
Imprægneringen trænger langt ind i mursten og beholder sin effekt trods acceleret ældning. Dermed viser disse laboratorieundersøgelser at imprægneringen har en meget gavnlig effekt på de undersøgte mursten og mørtel ved at reducere vandoptagelsen i disse.

Forsøg med mock-up og casestudier, hvor udvendig imprægnering kombineres med indvendig efterisolering, har derimod vist lidt blandede resultater, som peger på at der stadig er begrænsninger og en mangel på sammenhæng. Dog tyder det på at imprægnering har en gavnlig effekt på murværk som bliver isoleret med diffusionstætte isoleringssystemer. Se disse cases og resultater i afsnit 2.1, 2.5, 2.6 og 3.6.



FIGUR 44. a) Vandoptagelse ved delvis nedsænkning – kapillær fugttransport – som funktion af kvadratrods af tiden. Alle imprægnerede prøver udviser en meget reduceret vandoptagelse.

b) Vanddampmodstand af prøverne. Blå = ubehandlet, rød = imprægneret, grøn = gentagelse af forsøg med imprægnering.



FIGUR 45. Resultater for kapillær vandoptagelse (Acap) hhv før (Acap 1) og efter (Acap 2-5) en række ældningscykler.

3.1.3 Publikationer

Soulis, V. (2021). Hygrothermal Performance of Hydrophobized Brick and Mortar: Energy Renovation Through Internal Insulation - Can Hydrophobization Improve the Moisture Safety? PhD Thesis. Aalborg Universitetsforlag. <https://doi.org/10.54337/aau459966346>

Soulis, V., de Place Hansen, E. J., & Peuhkuri, R. H. (2021). Hygrothermal performance of hydrophobized and internally insulated masonry walls - Simulating the impact of hydrophobization based on experimental results. Building and Environment, 187, 1-13. Artikel 107410.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/hygrothermal-performance-of-hydrophobized-and-internally-insulate>

Soulis, V., de Place Hansen, E. J., Peuhkuri, R. H., Møller, E. B., & Ghanbari-Siahkali, A. (2021). Durability of the hydrophobic treatment on brick and mortar. Building and Environment, 201, Artikel 107994.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/durability-of-the-hydrophobic-treatment-on-brick-and-mortar>

Soulis, V., de Place Hansen, E. J., Feng, C., & Janssen, H. (2020). Hygric behavior of hydrophobized brick and mortar samples. Building and Environment, 176, Artikel 106843.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/hygric-behavior-of-hydrophobized-brick-and-mortar-samples>

Soulis, V., de Place Hansen, E. J., & Janssen, H. (2019). Hygric properties of hydrophobized building materials. I R. Černý, J. Kočí, & V. Kočí (red.), 4th Central European Symposium on Building Physics (CESBP 2019): Prague, Czech Republic, September 2-5, 2019. Artikel 02048.

<https://vbn.aau.dk/en/publications/hygric-properties-of-hydrophobized-building-materials>

3.2 Laboratorieforsøg med historiske mursten

Tidligere eksisterede der tusindvis af lokale teglværker i Danmark, som producerede mursten af den lokale ler og derfor kan mursten have ret forskellige egenskaber. Disse egenskaber kan bl.a. have betydning for hvor meget stenen opsuger vand fra slagregn. For at finde ud af en række egenskaber om mursten i én af de undersøgte cases – Christiania, og for at kunne opbygge en simuleringsmodel af casen, blev sten fra denne case testet i laboratoriet.

3.2.1 Målinger

10 originale mursten fra casen Christiania, som er en bygning fra 1837, blev nedtaget i forbindelse med etablering af et nyt vindueshul. Stenene stammer fra både for- og bagmur. Stenene blev skåret i mindre prøveemner, så de passede til laboratorieundersøgelserne, som foregik på Tekniske Universitet i Dresden. Nogle undersøgelser, herunder kapillær op-sugning, blev udført for to slags prøveemner: oprindelige overflade af mursten og en skåret overflade. Der blev udført følgende forsøg:

- Tørdensitet
- Porøsitet
- Varmeledningsevne
- Kapillær opsugning
- Kapillær mætningsvandindhold
- Vanddampdiffusionsmodstand (udført som vådkop: 50 ± 5 % RH & 93 ± 5 % RH)
- Ligeveægtsfugtindhold (sorptionsisoterm)



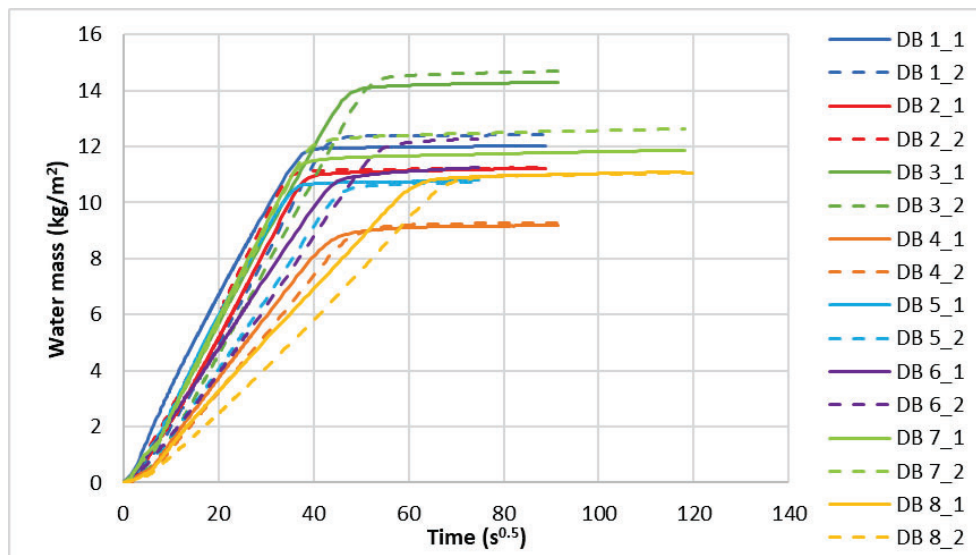
FIGUR 46. a) Forsøgsopstilling for bestemmelse af kapillær opsugning og mætningsvandindhold. b) Forsøgsopstilling for bestemmelse af ligeveægtsfugtindhold. Foto: Panagiota Pagoni

3.2.2 Resultater

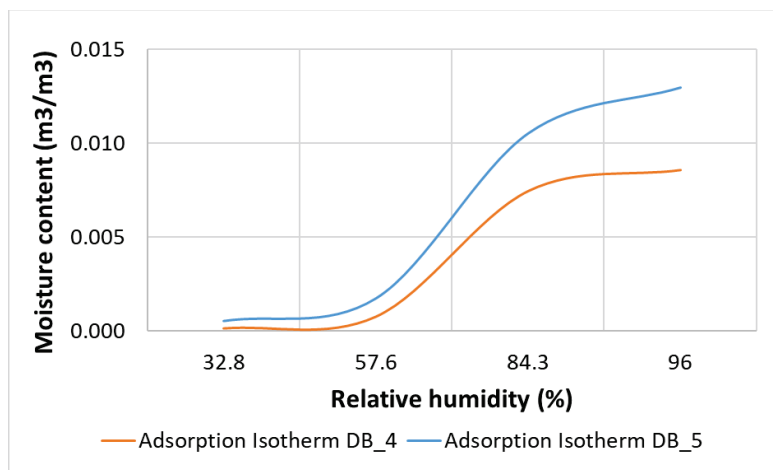
Måleresultaterne viste at de testede mursten er meget typiske fra den tid – om end med en forholdsvis stor spredning i de målte materialeleværdier, og dermed repræsentative for dansk muret byggeri fra 1800-tallet. Resultaterne fra kapillær vandopsugning viste at opsugningen foregår marginalt langsommere gennem den oprindelige overflade sammenlignet med den skårede overflade.

TABEL 2. Resultater for materialeparametre givet som gennemsnit for en hhv. tungere, lette og alle sten. 2 af stenene var væsentligt tungere og blev ikke medtaget i tabellen eller i yderligere analyser.

Parameter	Gennemsnit i kategori		Gennemsnit Alle sten
	Tungere sten 1, 2, 4, 8	Lette sten 3, 5, 6, 7	
Tørdensitet ρ [kg/m ³]	1638	1471	1554
Porøsitet ϕ [m ³ /m ³]	0.38	0.45	0.41
Kapillær opsugning A_w [kg/m ² s ^{0.5}]	0.248	0.282	0.265
Kapillær mætning θ_{cap} [m ³ /m ³]	0.270	0.297	0.283
Varmeledningsevne λ [W/m*K]	0.82	0.53	0.67
Vanddampdiffusionsmodstand μ [-]	11.47	7.45	9.46



FIGUR 47. Målekurver for bestemmelse af kapillær op sugning. Prøverne indikeret med _1 er med en skåret overflade.



FIGUR 48. Lige vægts fugtindhold (sorptionsisoterm) for to af murstenene

3.2.3 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Evaluation of the performance of different internal insulation systems in real-life conditions - A case study. Journal of Building and Environment, Volume 267 (Part C), Artikel 112319.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/evaluation-of-the-performance-of-different-internal-insulation-sy>

3.3 Laboratorieforsøg med indvendig maling

Effekten af malingsstype og antallet af de påførte malingslag blev undersøgt for at kunne bestemme betydningen for diffusionsmodstanden af den indvendige overflade. Nogle indvendige efterisoleringstyper med kapillaraktive egenskaber fungerer bedst ved at den indvendige overflade ikke er for diffusionstæt, så evt ophobet fugt kan tørre ud mod indeklimaet.

3.3.1 Målinger

Diffusionsmodstanden blev undersøgt med en vådkop test, hvor den relative fugtighed er hhv på 50% og 93% på hver sin side af prøven. Diffusionsmodstanden bestemmes ved at følge vægttab af koppen over tid. Der blev testet følgende systemer, alle på almindelige gipsplader:

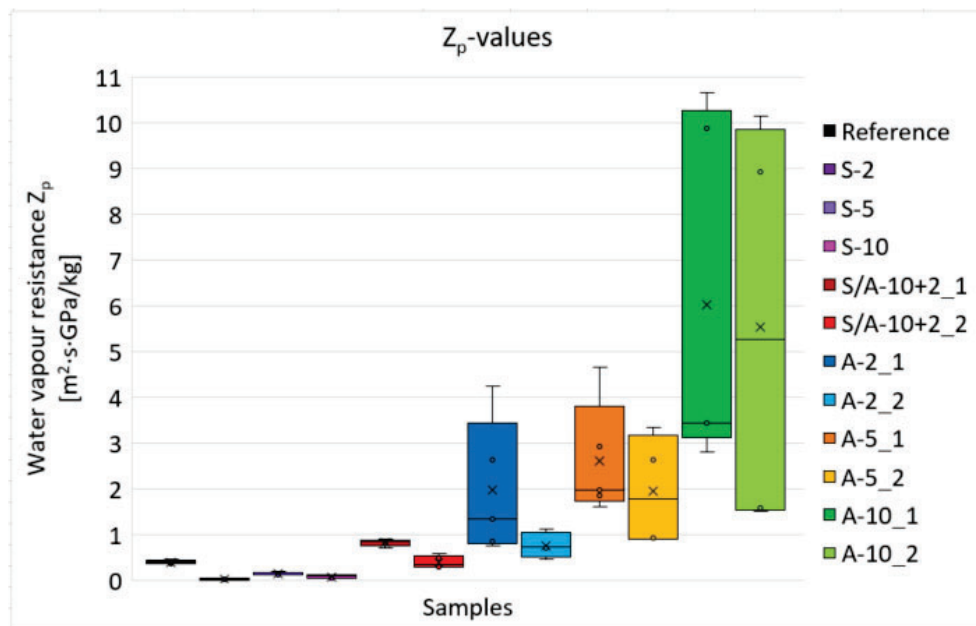
- Akrylmaling: 2-lags (A-2), 5-lags (A-5), 10-lags (A-10)
- Silikatmaling: 2-lags (S-2), 5-lags (S-5), 10-lags (S-10), 10-lags + 2-lags akrylmaling (S/A - 10+2)
- Umalede referenceprøver



FIGUR 49. Maling af forsøgsemner, monteringen af prøverne i "kopperne" og opstilling af kopper i klimakammeret. Foto: Nickolaj Feldt Jensen og Panagiota Pagoni (billedet i midten)

3.3.2 Resultater

Resultaterne viste at prøverne med silikatmaling er meget diffusionsåbne, også efter adskillige lag maling. Diffusionsmodstanden er større, når der males med akrylmaling og stiger for antal lag maling, men ingen af de afprøvede malingskombinationer kan betragtes som diffusionstæt.



FIGUR 50. Måleresultater angivet som Z-værdi (vanddampdiffusionsmodstand)

3.3.3 Publikationer

Pagoni, P. (2024) Internal insulation of masonry - Hygrothermal performance and robustness in practice. PhD Thesis. Technical University of Denmark

Pagoni, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Robustness of internal insulation – Installation, craftsmanship and user behavior. Journal of Building Engineering, Volume 98, Artikel 111177.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/robustness-of-internal-insulation-installation-craftsmanship-and->

Jensen, N.F., Peuhkuri, R.H., de Place Hansen, E. J., Pagoni, P. & Møller, E. B. (2024) The effect of interior paint treatments on the hygrothermal conditions in internally insulated solid masonry walls. 9th International Building Physics Conference (IBPC2024) 25-27 July 2024, Toronto, Canada <https://vbn.aau.dk/da/publications/the-effect-of-interior-paint-treatments-on-the-hygrothermal-condi>

3.4 Laboratorieforsøg med fysisk robusthed af isoleringssystemer

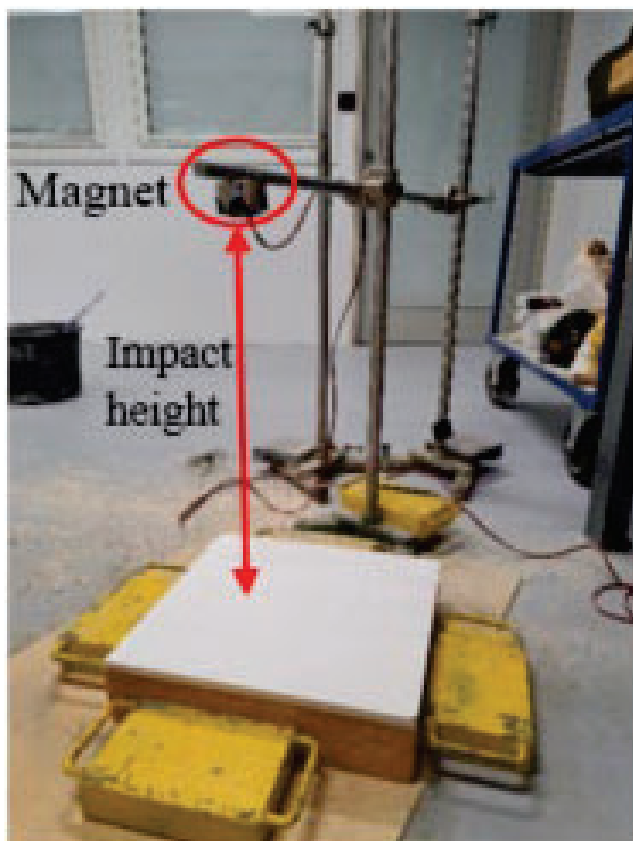
En vis fysisk robusthed af indvendig efterisolering er vigtigt for at løsningen kan fungere fx i en bolig. Isoleringen skal kunne modstå stød fra møbler og personer. Denne modstand kan kvantificeres ved standardiserede forsøg.

3.4.1 Målinger

Fysisk robusthed af en række isoleringssystemer blev testet med en standardiseret kugle-test, hvor isoleringssystemet blev udsat for en ensartet stød fra en kugle på hhv. 1 kg og 3 kg. Faldhøjden for 1 kg kugle var 1,67 m mens den for 3 kg kugle var 0,54 m for at opnå en energi på hhv. 10 J og 30 J. Samme sted skulle rammes 3 gange. Omfanget af skaden – bredde og dybde – blev registreret.

Isoleringssystemerne fenolskum (PF), mineralsk isoleringsplade af porebeton (AAC), hampebeton (HL), celleglas (FG) og aerogel (AG) blev testet.

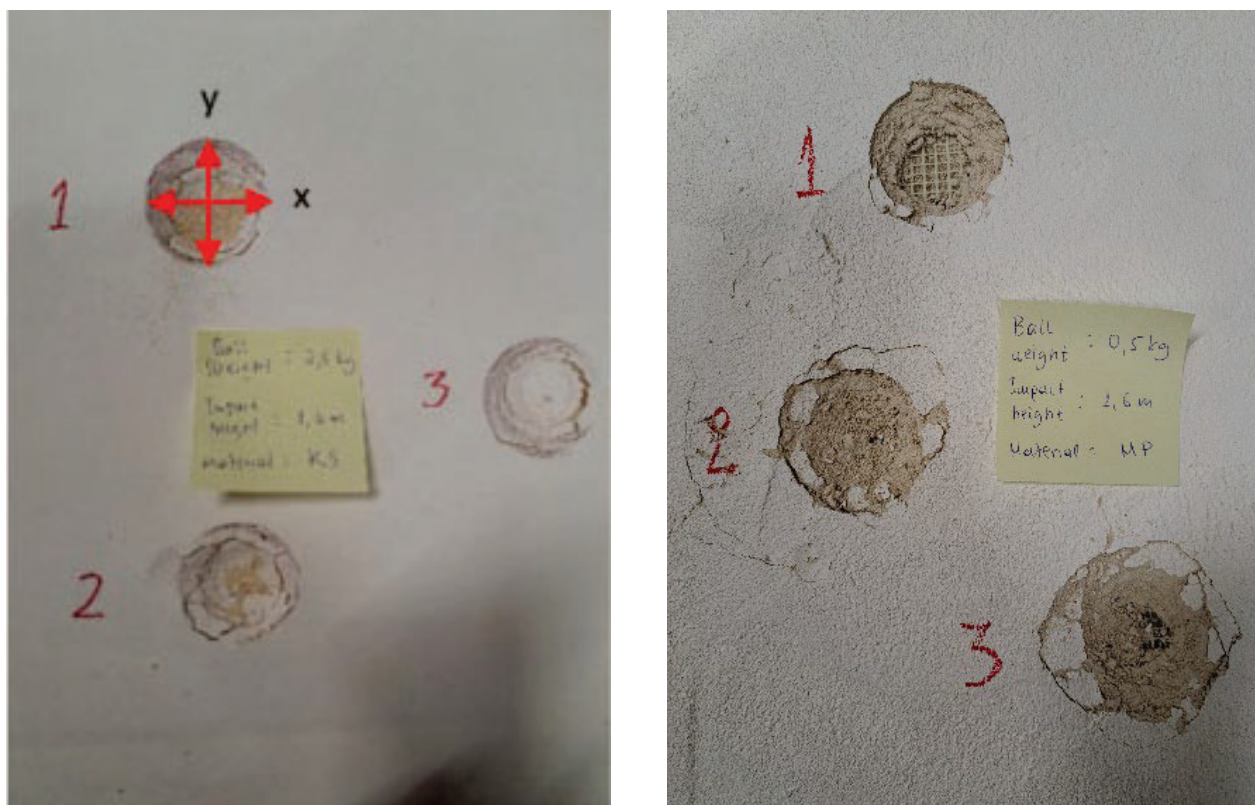
Systemerne var afsluttet enten med en gipsplade (fenolskum) eller armeret puds (øvrige systemer).



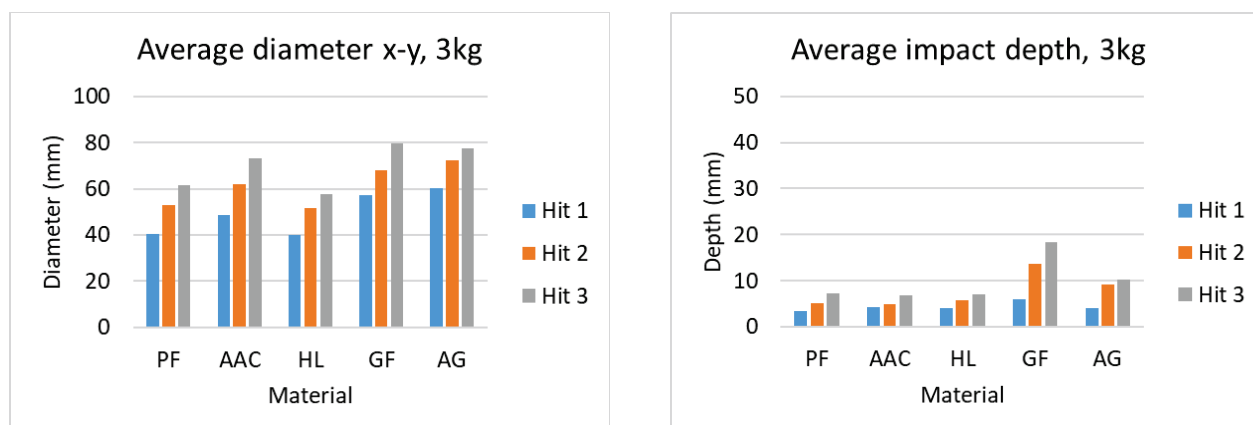
FIGUR 51. Forsøgsopstillingen med elektomagnetisk holder for bolden, som dermed kunne frigøres præcist, Foto: Panagiota Pagoni

3.4.2 Resultater

Resultaterne viste at overfladen i alle systemer mere eller mindre blev beskadiget, og at skaderne var større fra stødet med 1 kg kugle, som også har en mindre diameter. Skaderne var generelt mindst for hampebeton mens skaderne i celleglas var dybest. Resultaterne kan kun bruges til sammenligning, da standarden ikke angiver nogen grænseværdier. I øvrigt ses denne type skader sjældent i virkeligheden.



FIGUR 52. Eksempler på effekten af 1 kg kugle på to forskellige isoleringssystemer. Foto: Panagiota Pagoni



FIGUR 53. Resultater som viser omfanget af aftryk fra kuglefaldet med 3 kg kugle på de undersøgte systemer. PF=Fenolskum, AAC=mineralsk isoleringsplade af porebeton, HL=hampebeton, GF=celleglas og AG=aerogel

3.4.3 Publikationer

Pagani, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Robustness of internal insulation – Installation, craftsmanship and user behavior. Journal of Building Engineering, Volume 98, Artikel 111177.

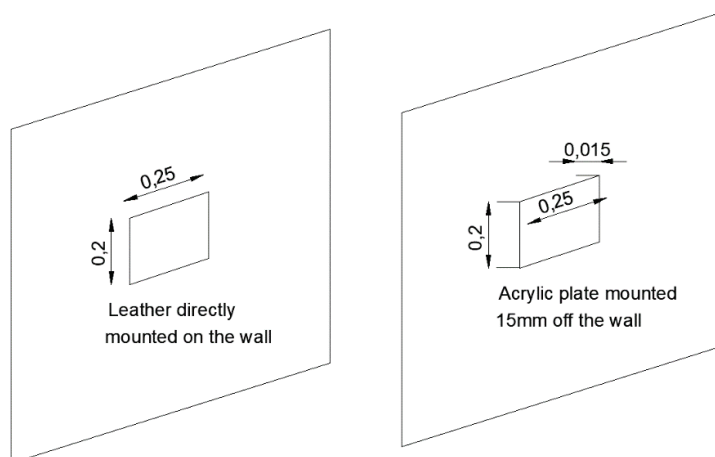
<https://vbn.aau.dk/da/publications/robustness-of-internal-insulation-installation-craftsmanship-and->

3.5 Forsøg med indvendig isolering og mikroklima

Som udgangspunkt bør man ikke placere møbler eller lignende helt tæt op ad kolde ydervægge, heller ikke op ad vægge, der er blevet indvendigt efterisoleret. Der er risiko for at fugtforhold bag møbler mm bliver kritisk høj pga den lave temperatur som skyldes enten manglende isolering eller reduceret luftbevægelse pga møblerne.

3.5.1 Målinger

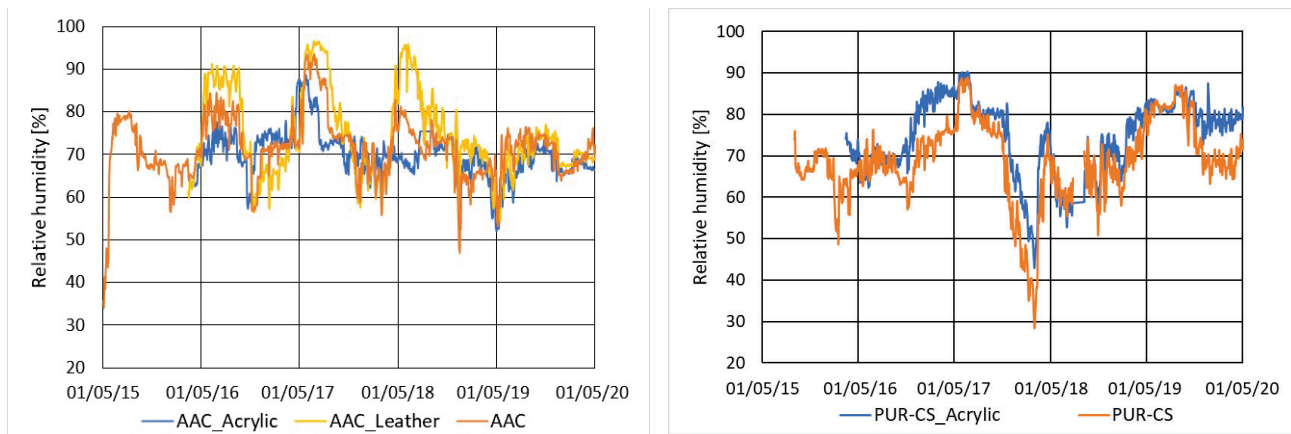
For at kunne vurdere omfanget af risikoen for fugtproblemer bag møbler mm, blev der udført følgende forsøg: På den indvendige side af 8 ydervægge af massive mursten isoleret indvendigt med forskellige efterisoleringssystemer blev monteret hhv. en acrylplade og et stykke læder for at simulere et billedramme der er hængt på væggen og en sofa eller lænestol der står helt op ad væggen. Acrylpladen havde en afstand på 15 mm til vægoverfladen mens læderet var monteret på væggen. Fugtforhold blev monitoreret mellem disse objekter og den indvendige overflade samt i de øvrige målepunkter bag den indvendige efterisolering. Målingerne varede ca. 4 år og indgår forsøgsrækken i "DTU Containere", se også afsnit 3.6. Ydervæggene vender mod sydvest og er 1½ sten tykke.



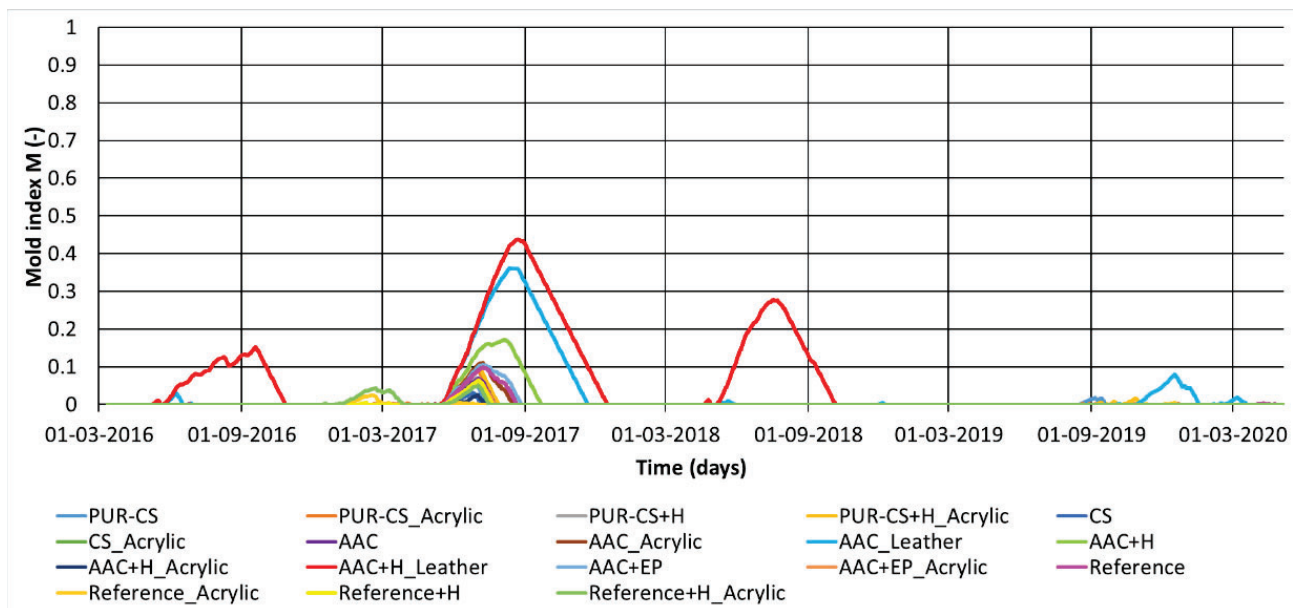
FIGUR 54. Forsøgsopstilling, hvor et stykke læder hhv. en acrylplade er monteret på den indvendige side af den efterisolerede – eller referencekonstruktion.

3.5.2 Resultater

Resultaterne viste at der kun var en meget begrænset risiko for skimmelvækst bag de undersøgte acrylplader, mens risikoen var lidt højere for læderstykkerne. Derfor bør tunge møbler med tæt polstring ikke placeres direkte op imod den indvendige vægoverflade, da det kan medføre øget relativ fugtighed mellem væggen og møblet. Billedrammer, som var ophængt 1,5 cm fra væggens indvendige overflade, førte ikke til øget relativ fugtighed mellem væg og billedramme. Indeklimaet i containere var relativt højt, hvilket kan spille en rolle for resultaterne.



FIGUR 55. Eksempel på de målte fugtforhold bag de undersøgte objekter (acrylplade hhv læderstykke).



FIGUR 56. De samlede resultater af de fireårige målinger af fugtforhold bag de undersøgte objekter angivet som skimmelindeks, som er beregnet ud fra de målte temperatur- og fugtforhold.

3.5.3 Publikationer

Pagoni, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Robustness of internal insulation – Installation, craftsmanship and user behavior. Journal of Building Engineering, Volume 98, Artikel 111177.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/robustness-of-internal-insulation-installation-craftsmanship-and->

3.6 DTU containere, Lyngby



FIGUR 57. Sydvest facade af de 2 containere på DTU. Foto: Tommy Odgaard

3.6.1 Prøveopstillingen

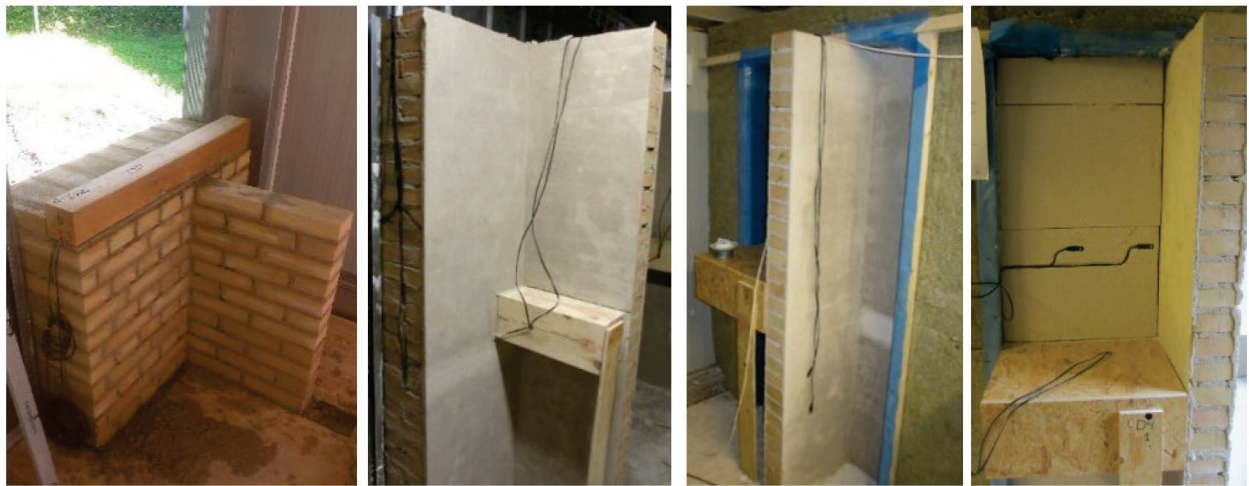
I 2013-2022 blev der gennemført flere omfattende måleserier med indvendig efterisolering i fuld skala i to 40 fods containere med kontrolleret indeklima på DTUs forsøgsareal i Lyngby. I de to containere var der bygget 24 stk. 1x2 meter halvanden-sten-mure ind i siderne. Betydningen af slagregn og solopvarmning blev undersøgt ved at 16 mure vendte mod sydvest mens 8 mod nordøst.

Indeklimaet blev holdt konstant og skulle simulere hhv fugtbelastningsklasse 2 og 3.

Murene blev konstrueret som en kopi af typisk ældre muret ejendom omkring etageadskillelse bestående af træbjælker med indbygget rem og en tilstødende indvendig halvsten skille væg. Murstenene var nye men med egenskaber tæt på typiske gamle danske mursten. Mørtlen var kalkmørtel. Murtykkelsen svarer til 1½ stens mur.

Murene var forsynet med forskellige indvendige isoleringssystemer med forskellige egenskaber:

Skumbeton, mineralske isoleringsplader af porebeton (AAC), kalciumsilikat (CS), PUR skum med kanaler af kalciumsilikatmørtel (PUR-CS), kalkholdig isoleringspuds, fenolskum (PF) med gipsplade og dampspærre, samt kork-kalk isoleringspuds. Til sammenligning blev også en traditionel løsning med mineraluld, gipsplader og dampspærre bygget. I en senere fase blev også nogle organiske isoleringsmaterialer undersøgt: to slags papiruld samt hampefiberisolering. Også effekten af imprægnering blev undersøgt.



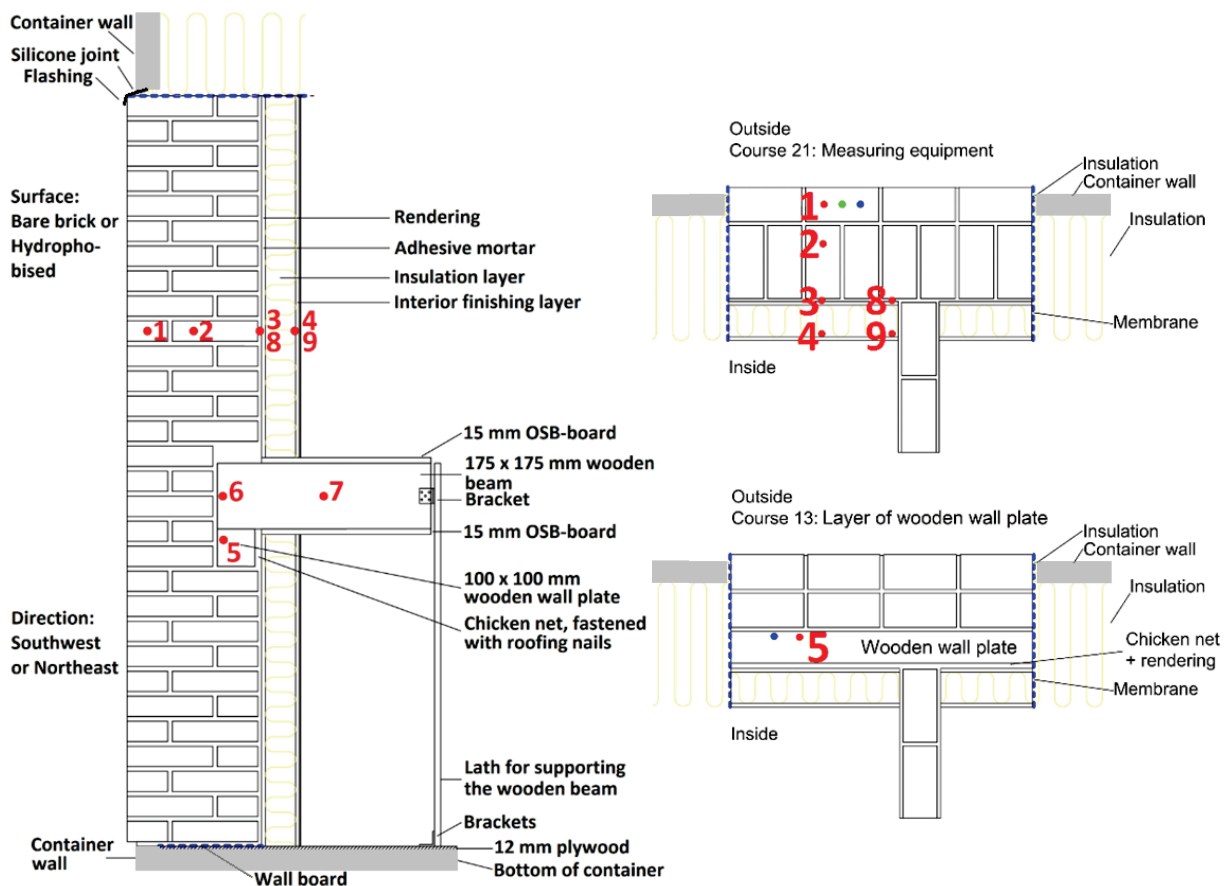
FIGUR 58. Forsøgsopstilling indefra under opbygningen. Billedet til venstre viser den indbyggede rem af træ samt skillevæggen. De øvrige billeder viser etageadskillelse af træ samt det indvendige pudslag og montering af monitoreringsudstyr. Foto: Tommy Odgaard

3.6.2 Målinger

Hvert af de 24 vægelementer blev forsynet med måleudstyr til monitorering af temperatur og relativ fugtighed i 9 forskellige punkter. Derudover blev der målt fugtindhold i udvalgte steder samt slagregn udvendigt.

Der blev også bygget simuleringsmodeller af de vægelementerne i programmet Delphin for at yderligere parametre kunne simuleres og vurderes.

Efterfølgende blev konstruktionerne undersøgt destruktivt for eventuel skimmelvækst.



FIGUR 59. Lodret og vandret snit af én af de 24 mure med indlejret etageadskillelse med indbygget rem og bjælkeende samt en skillevæg. Numre henviser til målepunkterne.

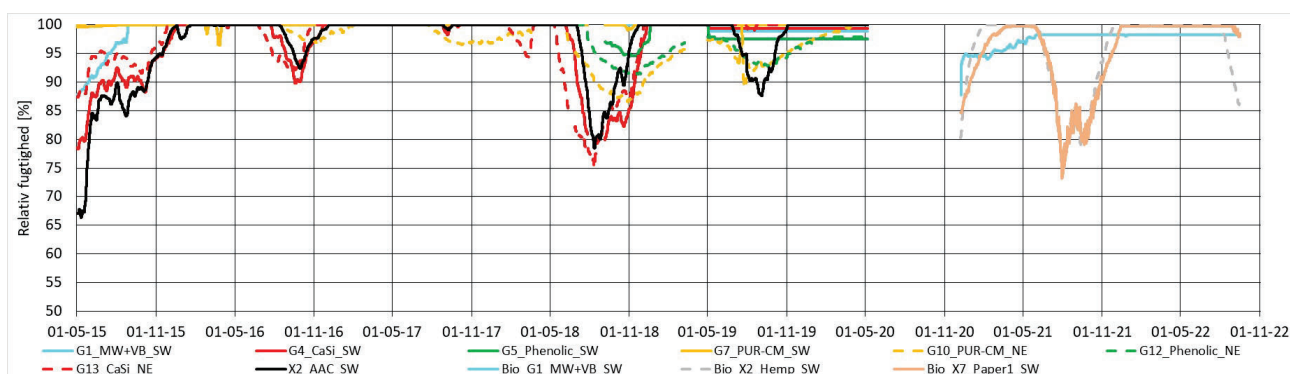
3.6.3 Udvalgte resultater

Resultaterne fra denne forsøgsopstilling er relativt omfattende og summeres i det følgende meget kortfattet. Der henvises til de videnskabelige publikationer for detaljer.

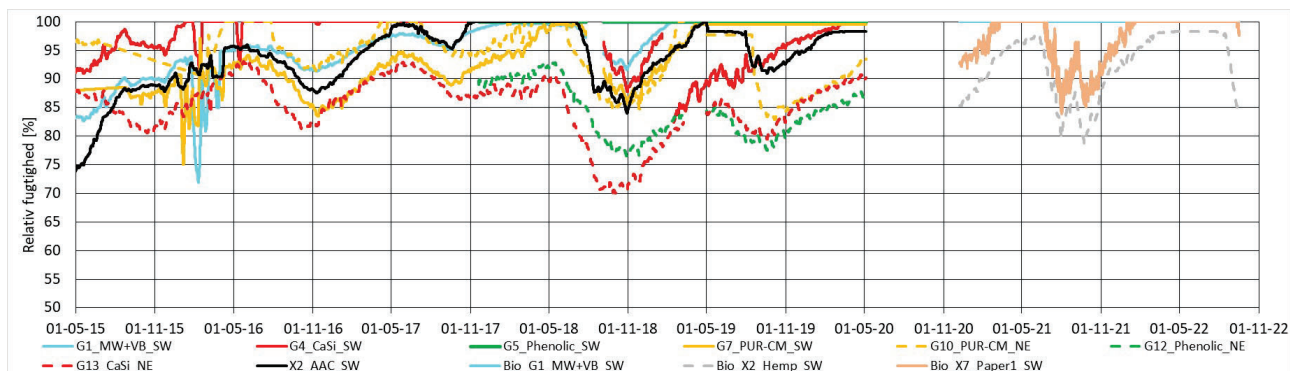
OBS: Disse resultater tager ikke højde for forhold i en eksisterende bygning. Der bør derfor altid foretages en konkret vurdering i det enkelte tilfælde, før man anvender disse resultater i praksis.

Resultaterne viser nogle klare indikationer på, hvordan indvendig facadeisolering i bygninger med relativt højt indvendigt fugtniveau fungerer på facader med massivt murværk:

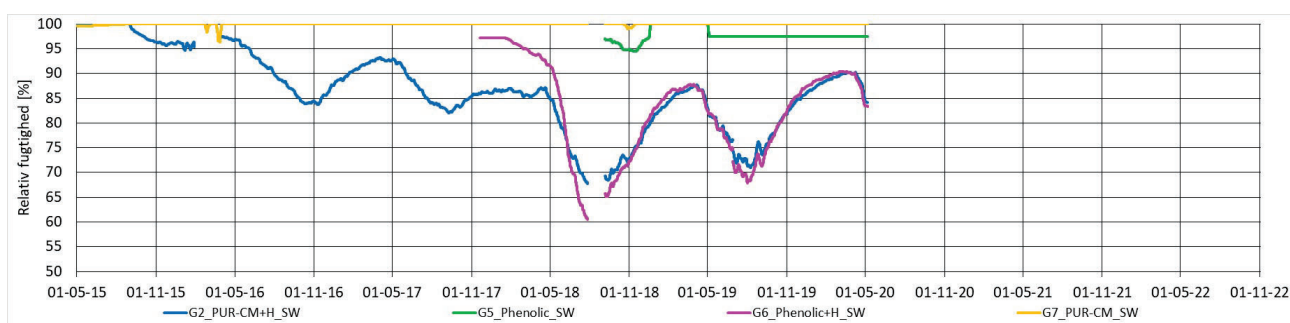
- For mere diffusionstætte isoleringssystemer som f.eks. polyuretanplader med kanaler af kalciumsilikatmørtel og fenol-skum viser forsøgene, at imprægneringen har en positiv effekt både sommer og vinter. Ved diffusionsåbne materialer har imprægnering af ydermuren en positiv effekt om sommeren og en negativ effekt om vinteren. I begge tilfælde gælder dette både for skillelaget, mens der i de indlejrede træelementer generelt blev observeret en positiv effekt ved imprægnering.
- For imprægnering af facaderne viser resultaterne at den positive effekt varierede med orientering, med en meget begrænset effekt for de nordøst vendte vægge. Derudover varierede effekten af imprægneringen mellem skillelaget og for indlejrede træelementer.
- Det anbefales at yvendige overflader skal være uden revner og sprækker, da den udefra kommende vandpåvirkning har stor indflydelse på funktionen af den indvendige isolering.
- Det anbefales at indvendige overflader skal afrenses omhyggeligt for organisk materiale før man installerer den indvendige efterisolering. Det er også sikrest at undgå at bruge organiske isoleringsmaterialer som fx træfiber, kork og papir.
- Forsøgene viser også, at den relative fugt i imprægnerede vægge reduceres mere end i ikke-imprægnerede vægge. Det gælder både i skillelag og i indlejrede træelementer.
- Der er en positiv effekt ved at installere en tilsigtet kuldebro bestående af et materiale med en lavere isoleringsevne foran indlejrede træelementer som fx træemme og bjælkeender. Det gør, at fugtindholdet i træelementerne bliver reduceret betydeligt.
- Skimmelundersøgelser viste at høj pH værdi og begrænset eller ingen tilgængelige næringsstoffer skabte ugunstige vækstbetingelser og forhindrede skimmelvækst i en længere periode. Vækst blev dog fundet i isoleringssystemer med lav pH værdi og tilgængelige næringsstoffer f.eks. i den anvendte porebeton isolering og den traditionelle mineralulds løsning.



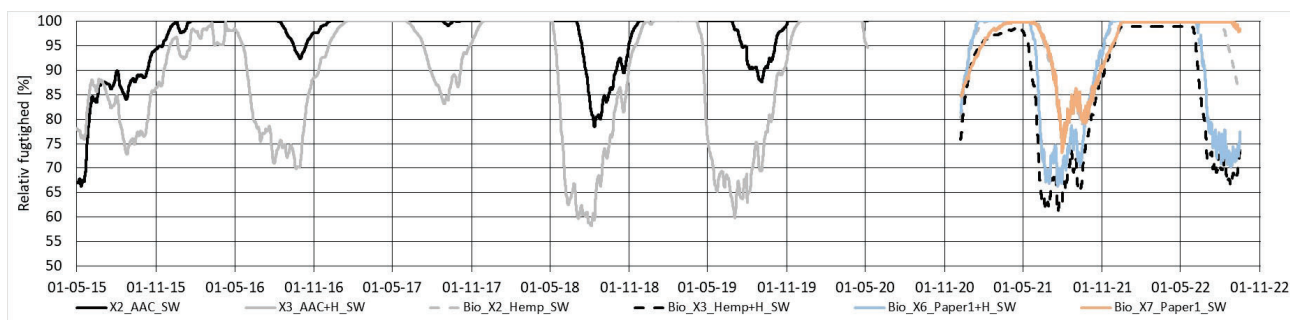
FIGUR 60. Relativ fugtighed bag isolering. MW: mineraluld, PUR-CM: PUR skum med kalcium silikat, CaSi: Kalcium silikat, AAC: Porebeton isolering, Phenolic: Fenolskum, Hemp: Hamp fibre, Paper1: Papiruld. Bio: forsøg med biogene materialer i 2021-2022.



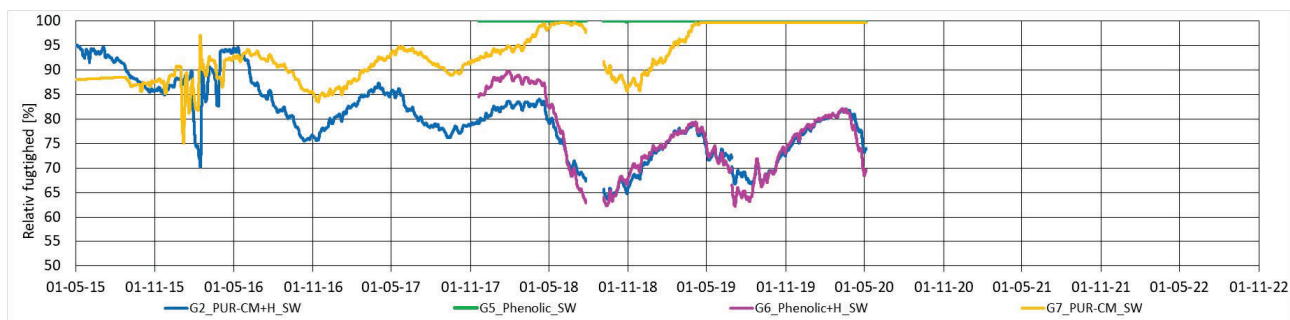
FIGUR 61. Relativ fugtighed bag indlejret rem. MW: mineraluld, PUR-CM: PUR skum med calcium silikat, CaSi: Calcium silikat, AAC: Porebeton isolering, Phenolic: Fenolskum, Hemp: Hamp fibre, Paper1: Papiruld. Bio: forsøg med biogene materialer i 2021-2022.



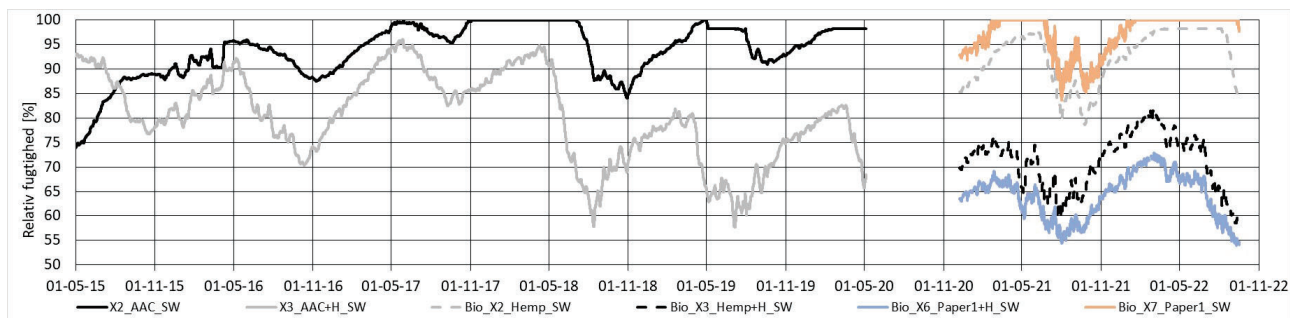
FIGUR 62. Relativ fugtighed bag isoleringen. Effekten af imprægnering (+H) for diffusionstætte systemer. PUR-CM: PUR skum med calcium silikat, Phenolic: Fenolskum. Potentiel kritisk fugt i vægge uden imprægnering. Ingen betydelige forskelle mellem vægge med diffusionsåbne eller mere tætte systemer.



FIGUR 63. Relativ fugtighed bag isoleringen. Effekten af imprægnering (+H) for diffusionsåbne systemer. AAC: Porebeton isolering, Hemp: Hamp fibre, Paper1: Papiruld. Imprægnering holder vægge med diffusionsåbne systemer mere tørre i sommerhalvåret men fugtniveauet er meget højt om vinteren uanset imprægnering.



FIGUR 64. Relativ fugtighed bag indlejret rem. Effekten af imprægnering (+H) for diffusionstætte systemer. PUR-CM: PUR skum med kalcium silikat, Phenolic: Fenolskum. Høj fugt i vægge uden imprægnering. Positiv effekt fra imprægnering for især disse diffusionstætte systemer.



FIGUR 65. Relativ fugtighed bag indlejret rem. Effekten af imprægnering (+H) for diffusionsåbne systemer. AAC: Porebeton isolering, Hemp: Hamp fibre, Paper1: Papiruld. Høj fugt i vægge uden imprægnering. Positiv effekt fra imprægnering også for disse diffusionsåbne systemer

Udvalgte resultater fra de dynamiske simuleringer kan opsummeres følgende:

- Dynamiske simuleringer indikerer at når den relative indvendige fugt holdes på et normalt niveau (indeklima kl. 2), har imprægnering en positiv effekt ved diffusionsåbne isoleringssystemer, både sommer og vinter. Effekten er dog mindre for de diffusionsåbne isoleringssystemer i forhold til de mere diffusionstætte isoleringssystemer som f.eks. polyuretanplader med kanaler af kalciumsilikatmørtel.
- Simuleringer viser, at det har en positiv effekt på den relative luftfugtighed i det kritiske skillelag mellem murværk og isoleringssystemet, hvis man kombinerer imprægnering af de udvendige overflader med metoder til at nedsætte fugtpåvirkningen fra indeklimaet. F.eks i form af balanceret ventilation.
- Simuleringer med forskellige isoleringstykkelser indikerer, at tyndere isolering fører til lavere risiko for høj fugt og skimmelvækst.
- Simuleringer med forskellige tykkelser af murværket indikerer, at tykkere murværk fører til lavere risiko for høj fugt og skimmelvækst.
- Simuleringer indikerer, at polyuretanplader med kanaler af kalciumsilikatmørtel og kalciumsilikat plader i kombination med facadeimprægnering vil være robuste løsninger for de fremtidige klimaforhold estimerede for perioden 2020-2050. Simuleringerne indikerer også at de simulerende løsninger med mineralske plader af porebeton og fenolskums isoleringer i kombination med facadeimprægnering ikke vil være robuste løsninger.

3.6.4 Publikationer

Pagoni, P., Møller, E. B., Peuhkuri, R.H. & Jensen, N.F. (2024) Robustness of internal insulation – Installation, craftsmanship and user behavior. Journal of Building Engineering, Volume 98, Artikel 111177.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/robustness-of-internal-insulation-installation-craftsmanship-and->

Jensen, N.F., Peuhkuri, R.H., de Place Hansen, E. J., Pagoni, P. & Møller, E. B. (2024) The effect of interior paint treatments on the hygrothermal conditions in internally insulated solid masonry walls. 9th International Building Physics Conference (IBPC2024) 25-27 July 2024, Toronto, Canada

<https://vbn.aau.dk/da/publications/the-effect-of-interior-paint-treatments-on-the-hygrothermal-condi>

Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., Andersen, B., & Møller, E. B. (2021). Laboratory-based investigation of the materials' water activity and pH relative to fungal growth in internally insulated solid masonry walls. Indoor Air, 31(4), 1252-1266.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/laboratory-based-investigation-of-the-materials-water-activity-an>

Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., Andersen, B., & Møller, E. B. (2021). Hygrothermal performance of six insulation systems for internal retrofitting solid masonry walls. Journal of Building Physics, 44(6), 539-573.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/hygrothermal-performance-of-six-insulation-systems-for-internal-r>

Jensen, N. F., Odgaard, T. R., Bjarløv, S. P., Andersen, B., Rode, C., & Møller, E. B. (2020). Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls. Building and Environment, 182, Article 107011

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/hygrothermal-assessment-of-diffusion-open-insulation-systems-for->

Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., & Møller, E. B. (2020). Hygrothermal assessment of four insulation systems for interior retrofitting of solid masonry walls through calibrated numerical simulations. Building and Environment, 180, Article 107031. <https://orbit.dtu.dk/en/publications/hygrothermal-assessment-of-four-insulation-systems-for-interior-r>

Jensen, N. F., Rode, C., Andersen, B., Bjarløv, S. P., & Møller, E. B. (2020). Internal insulation of solid masonry walls - Field experiment with Phenolic foam and lime-cork based insulating plaster. E3S Web of Conferences, 172, Article 01003. NSB 2020 - 12th Nordic Symposium on Building Physics, September 6-9 2020, Tallinn, Estonia.

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/internal-insulation-of-solid-masonry-walls-field-experiment-with->

Rode, C., Friis, N. K., Pedersen, C., & Jensen, N. F. (2020). Moisture performance of a new thermal insulation composite for interior application. E3S Web of Conferences, 172, Article 01001. NSB 2020 - 12th Nordic Symposium on Building Physics, September 6-9 2020, Tallinn, Estonia.

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/moisture-performance-of-a-new-thermal-insulation-composite-for-in>

Kvist Hansen, T., Feldt Jensen, N., Møller, E., De Place Hansen, E. J., & Peuhkuri, R. (2020). Monitored conditions in wooden wall plates in relation to mold and wood decaying fungi. E3S Web of Conferences, 172, Article 20004. NSB 2020 - 12th Nordic Symposium on Building Physics, September 6-9 2020, Tallinn, Estonia.

<https://vbn.aau.dk/da/publications/monitored-conditions-in-wooden-wall-plates-in-relation-to-mold-an>

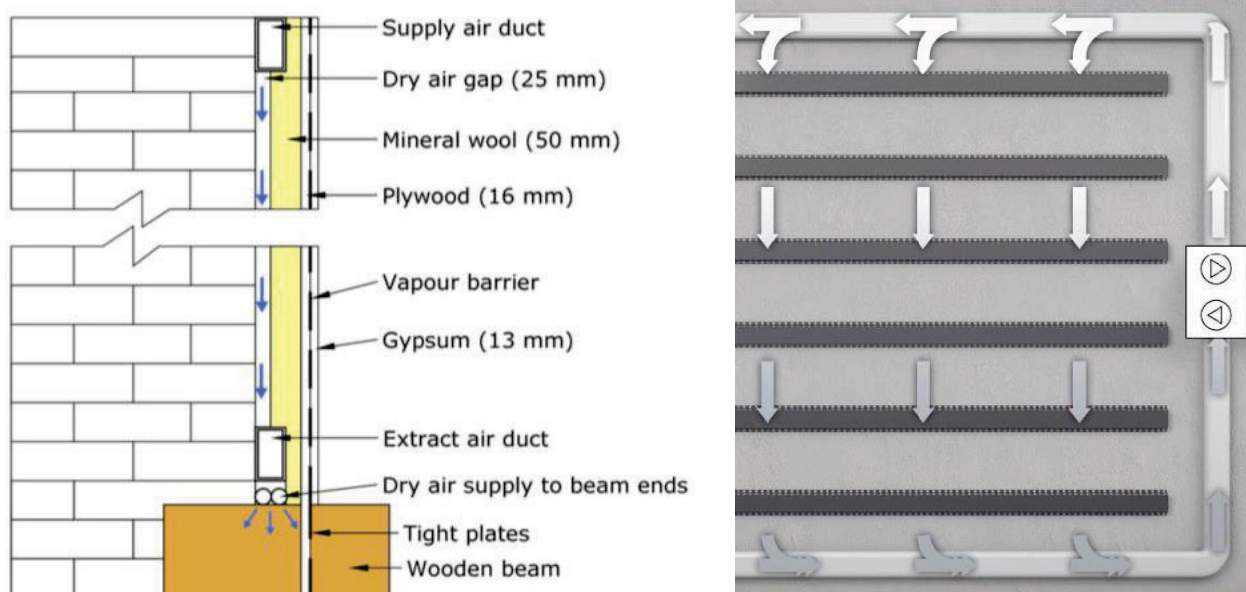
Jensen, N. F., Bjarløv, S. P., Rode, C., & Odgaard, T. R. (2018). Hygrothermal assessment of internally insulated solid masonry walls fitted with exterior hydrophobization and deliberate thermal bridge. *Ce/papers*, 2(4), 79-87. 6th International Conference on Autoclaved Aerated Concrete, September 4-6, 2018

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/hygrothermal-assessment-of-internally-insulated-solid-masonry-wall>

Odgaard, T. R., Bjarløv, S. P., & Rode, C. (2018). Influence of hydrophobation and deliberate thermal bridge on hygrothermal conditions of internally insulated historic solid masonry walls with built-in wood. *Energy and Buildings*, 173, 530-546.

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/influence-of-hydrophobation-and-deliberate-thermal-bridge-on-hygrothermal-conditions-of-internally-insulated-historic-solid-masonry-walls-with-built-in-wood>

3.7 Aktivt isoleringssystem RetroWall



FIGUR 66. RetroWall koncept: a) Lodret snit og b) layout af luftcirkulation i luftkanaler og i hulrummet.

3.7.1 Beskrivelse af konceptet

RetroWall fra Saint-Gobain ISOVER er en aktiv isoleringsløsning med mekanisk affugtning af facaden og træbjælkelag i etageadskillelsen. Den adskiller sig dermed fra de andre indvendige isoleringsløsninger.

Systemet består af en forsatsvæg med mineraluld og dampspærre samt et kanalsystem med en affugterenhed. Affugtningen sker ved at cirkulere varm tør luft i den øvre del af ventilationsspalte mellem murværk og isolering via et kanalsystem. Den cirkulerende luft vil blive kølet ned ved kontakt med det kolde murværk og vil da falde ned over den indvendige overflade af murværket, for så at blive ført tilbage til systemets affugterenhed.

Systemet leveres som færdig pakkeløsning, hvor hver bestilt kasse indeholder alt hvad installatøren skal bruge. Dette gøres for at lette håndteringen af komponenter og minimere tidsforbrug ved installation.

I forbindelse med installation af RetroWall systemet installeres der også en sensor, som giver data for systemets ydeevne (temperatur og relativ luftfugtighed), som slutbrugere vil have mulighed for at tilgå. Systemet har desuden en række alarmfunktioner for at sikre optimal drift og modvirke at fugtskader og råd skal opstå grundet eventuelle driftsfejl. For eksempel giver systemet alarm hvis fugten overstiger 85%, hvis affugter enheden ikke kører, hvis strømmen går i bygningen eller hvis der sker misligholdelse af affugter enheden. Alarmens notifikationer går direkte til boligens slutbrugere.

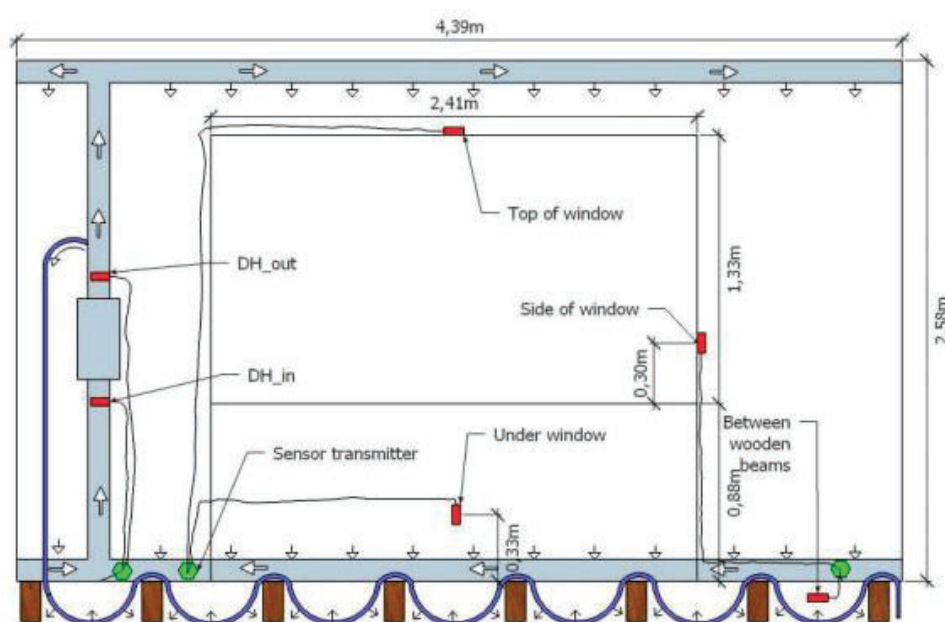
3.7.2 Målinger

Systemet er blevet testet med simuleringer, i laboratorie-mockups og i casebygninger. Fokus har været at undersøge den hygrotermiske ydeevne af systemet med mekanisk affugtning i ventilationsspalten mellem murværk og isoleringssystem samt optimering af luftbevægelserne i spalten samt reduktion af støjniveauet.

Systemet er bl.a. blevet installeret i tre casebygninger: to lejligheder og et kontor i en kommunal bygning. Der blev installeret fugt- og temperaturmålere en række forskellige steder i luftspalten mellem væg og isoleringssystem, samt i udvalgte bjælkeender i de to lejligheder. Målingerne er registreret over en 4-årige periode 2017-2021.

Building, year, orientation	Floor Structure	Interior Finishing of the Wall	Wall Material	Wall thickness and Under window
Ordrupvej, 1933 - West	Wooden Beam	Plaster with sawdust wallpaper	Red Brick	470 mm 360 mm
Thomas Laubs Gade, 1899 - East	Wooden Beam	Painted plaster	Yellow brick	280 mm 110 mm
Vejen Kommune, 1962 - North East	Concrete slab	Painted plaster	Yellow brick	360 mm 360 mm

FIGUR 67. Beskrivelse af de 3 casebygninger



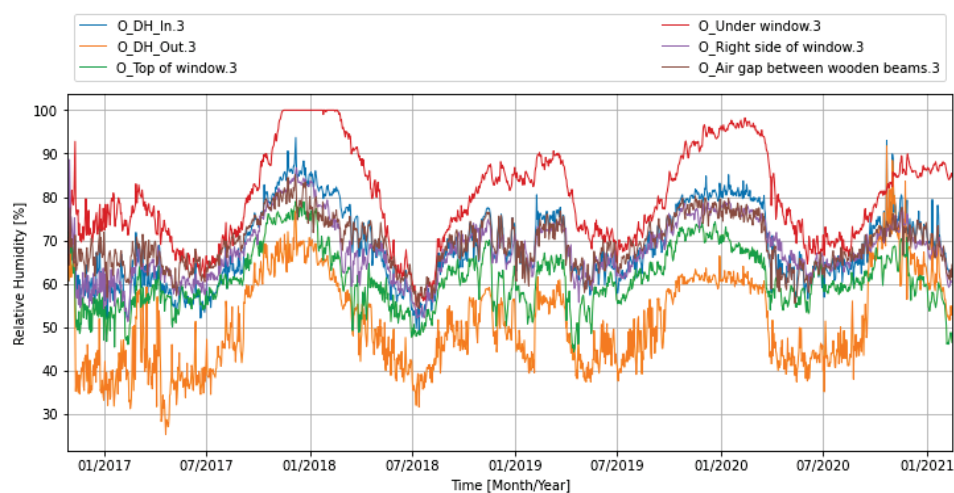
FIGUR 68. Principiel beskrivelse af måleopstilling i de 3 casebygninger. Temperatur- og relativ fugtighedssensorer er angivet med rødt.

3.7.3 Udvalgte resultater

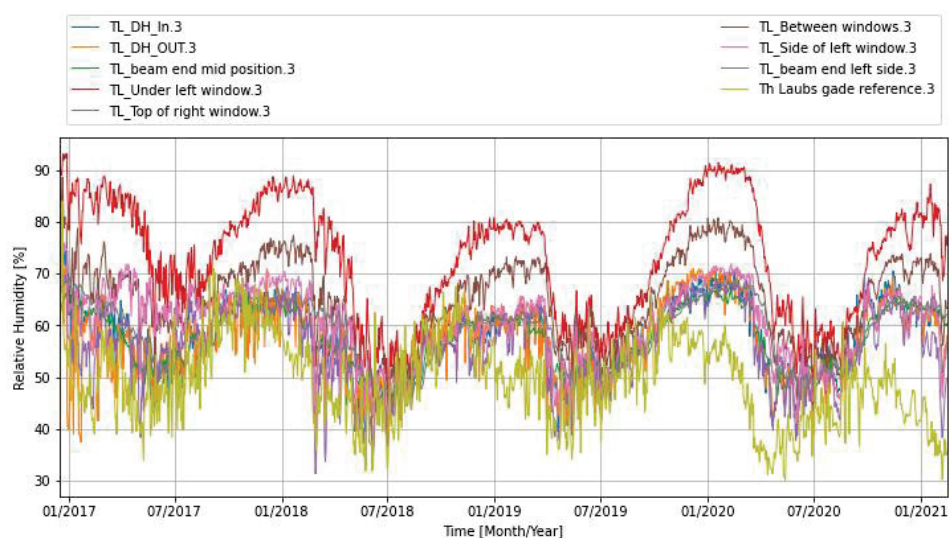
Resultaterne viser at RetroWall systemet generelt var i stand til at holde den relative luftfugtighed i luftspalten under 80% og under 75% i bjælkeenderne ved brug af de fleksible rør til forsyning af tør luft mellem bjælkerne.

I et enkelt tilfælde blev der observeret perioder hvor den relative luftfugtighed var over 80% i et kun 110 mm tynde brystningsparti under vinduet, hvor systemet ikke kunne holde fugten nede med den valgte affugtningsindstilling. Resultaterne, også fra simuleringerne, viste at det mest kritiske sted for systemet var under vinduerne, hvor luftstrømningerne var reduceret og den relative luftfugtighed derfor var højere end mange andre sensorlokationer. Denne problematik er der senere hen arbejdet videre med at løse.

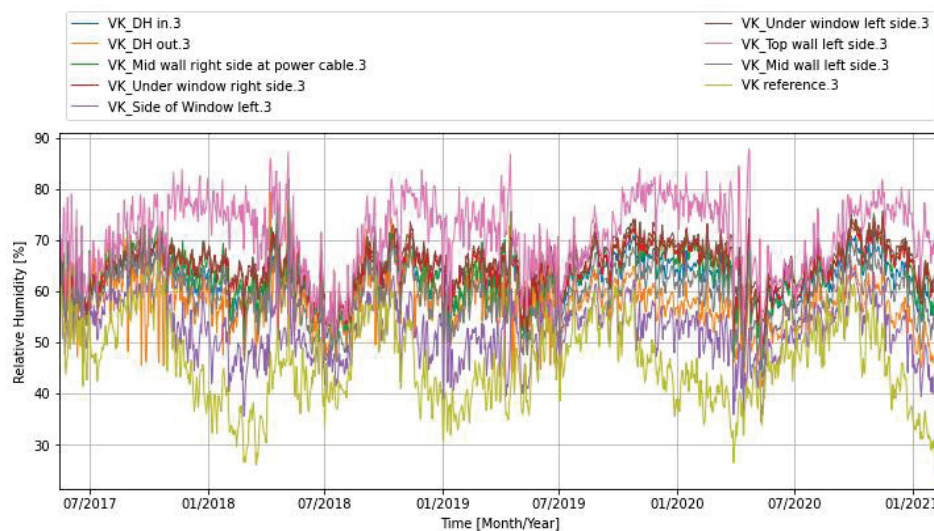
For at reducere støjgener fra affugtningsenheden blev luftstrømning i ventilationsspalten optimeret og reduceret. Resultaterne viser at det var muligt at reducere luftstrømning i ventilationsspalten med omkring 30%, uden at dette ville føre til potentielt kritiske fugtforhold. For disse resultater, se nedenstående publikationer.



FIGUR 69. Case Ordrupvej. Målt relativ fugtighed bag isoleringen forskellige steder i væggen, samt i luftkanalen.



FIGUR 70. Case Thomas Laubs Gade. Målt relativ fugtighed bag isoleringen forskellige steder i væggen, samt i luftkanalen.



FIGUR 71. Case Vejen Kommune. Målt relativ fugtighed bag isoleringen forskellige steder i væggen, samt i luftkanalen.

3.7.4 Publikationer

Lucchesi, F., Svendsen, S., & Koldtoft, K. (2021). Internal Insulation of Preservation Worthy Facades. *Journal of Physics: Conference Series*, 2069(1), Article 012084.

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/internal-insulation-of-preservation-worthy-facades>

Hviid, C. A., Harjani, D. W., & Lucchesi, F. (2019). Internal insulation retrofit with ventilated wall and circulation of dry air - Focus on airflow distribution and mitigation of noise. *E3S Web of Conferences*, 111, Article 06066.

<https://orbit.dtu.dk/en/publications/internal-insulation-retrofit-with-ventilated-wall-and-circulation>

Udvalgte danske cases med indvendig efterisolering

Denne videns- og erfaringsopsamling er en del af resultatet fra forskningsprojektet "Fugtsikker energirenovering af bevaringsværdige murede ydervægge". Projektets formål var at fremskaffe erfaringsgrundlag med danske bevaringsværdige murede ydervægge, og hvordan bevaringsværdige murede ydervægge energirenoveres på en fugtteknisk forsvarlig måde. Denne rapport opsummerer den omfattende videns- og erfaringsopsamling såvel fra allerede afsluttede forsknings- og demonstrationsprojekter som fra målinger, simuleringer og analyse af data samt andre observationer udført i dette projekt.