



Dynamiske fugtsimuleringers korrelation til stationære hotbox-forsøg med biobaserede vægkonstruktioner

Master i Bygningsfysik

BUILD Institut for Byggeri, By og Miljø
Aalborg Universitet, København

Masterspeciale af Christian Bøggild-Ugelvig og Mads Beck Møller, 20. december 2024



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Aalborg Universitet København
A. C. Meyers Vænge 15
2450 København SV
Danmark

Sekretær: Lene Wenstrøm Jørgensen
Telefon: 99 40 97 34
Lene Wenstrøm Jørgensen

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

04

Titel på projekt:

Dynamiske fugtsimuleringers korrelation til stationære hotbox-forsøg med biobaserede vægkonstruktioner

Projektperiode:

September – december 2024

Vejleder:

Torben V. Rasmussen
Nickolaj F. Jensen

Studerende:

Christian Bøggild-Ugelvig

Mads Beck Møller

Antal normalsider:

Ca. 73 sider af 2400 anslag

Afleveringsdato:

20. december 2024

Resumé:

Denne rapport dokumenterer undersøgelser af korrelationerne mellem teoretiske fugtsimuleringer og eksperimentelle måledata fra klimakammerforsøg. Undersøgelserne er foretaget med henblik på at simulere den fugttekniske robusthed af udvalgte, biobaserede ydervægskonstruktioner under fremtidige klimaforhold. Det danske klima kan iht. ny forskning forventes at ændre sig markant i løbet af de kommende 25-50 år. Forudsigelser om enten et koldere eller varmere og mere fugtigt klima betyder, at en ny, biobaseret byggeskik foranlediget af byggeriets klimapåvirkning nødvendiggør større sikkerhed for klimaskærmens fugttekniske robusthed. Undersøgelserne viser, at vidensniveauet endnu ikke er tilstrækkeligt til at garantere fugtteknisk forsvarlige biobaserede ydervægskonstruktioner i et endnu ukendt, fremtidigt klima. Robustheden afhænger i høj grad af tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand, der i samspil med vindspærren skal forhindre skadelig fugtophobning fra indeklimaet i fugtfølsomme materialelag. Resultaterne indikerer, at biobaserede dampbremsere som alternativ til plastbaserede dampspærresystemer med potentielt begrænsede levetider kan være anvendelige under specifikke vilkår. Rapporten konkluderer, at OSB4-plader ikke vurderes at være egnede som tæthedsplan i fugtbelastningsklasse 3, mens papirbaserede dampbremsere med højere Z-værdier kan være tilstrækkelige i kombination med ventilerede luftspalter i begge fremtidsscenerier.

Usikkerheder i de eksperimentelle måledata understreger imidlertid behovet for nye, forbedrede klimakammerforsøg. Undersøgelserne peger også på, at materialeegenskaberne af biogene byggevarer kan variere i en grad, der nødvendiggør større sikkerhedsmarginer i udvælgelsen af de materialer, der indgår i klimaskærmens Z-værdi-forhold. Rapportens resultater kan derfor ikke direkte implementeres i praksis, men fungerer som grundlag for fremtidig forskning og bidrager med indsigt om nødvendige tilpasninger af Bygningsreglementet til biobaseret byggeri.

Sammenfatning

Denne rapport dokumenterer undersøgelser af korrelationerne mellem teoretiske fugtsimuleringer og eksperimentelle måledata fra klimakammerforsøg. Undersøgelserne er foretaget med henblik på at simulere den fugttekniske robusthed af udvalgte, biobaserede ydervægskonstruktioner under fremtidige klimaforhold. Det danske klima kan iht. ny forskning forventes at ændre sig markant i løbet af de kommende 25-50 år. Forudsigelser om enten et koldere eller varmere og mere fugtigt klima betyder, at en ny, biobaseret byggeskik foranlediget af byggeriets klimapåvirkning nødvendiggør større sikkerhed for klimaskærmens fugttekniske robusthed. Undersøgelserne viser, at vidensniveauet endnu ikke er tilstrækkeligt til at garantere fugtteknisk forsvarlige biobaserede ydervægskonstruktioner i et endnu ukendt, fremtidigt klima. Robustheden afhænger i høj grad af tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand, der i samspil med vindspærren skal forhindre skadelig fugtophobning fra indeklimaet i fugtfølsomme materialelag. Resultaterne indikerer, at biobaserede dampbremsere som alternativ til plastbaserede dampspærresystemer med potentielt begrænsede levetider kan være anvendelige under specifikke vilkår. Rapporten konkluderer, at OSB4-plader ikke vurderes at være egnede som tæthedsplan i fugtbelastningsklasse 3, mens papirbaserede dampbremsere med højere Z-værdier kan være tilstrækkelige i kombination med ventilerede luftspalter i begge fremtidsscenarier.

Usikkerheder i de eksperimentelle måledata understreger imidlertid behovet for nye, forbedrede klimakammerforsøg. Undersøgelserne peger også på, at materialeegenskaberne af biogene byggevarer kan variere i en grad, der nødvendiggør større sikkerhedsmarginer i udvælgelsen af de materialer, der indgår i klimaskærmens Z-værdi-forhold. Rapportens resultater kan derfor ikke direkte implementeres i praksis, men fungerer som grundlag for fremtidig forskning og bidrager med indsigt om nødvendige tilpasninger af Bygningsreglementet til biobaseret byggeri.

Summary

This report documents investigations into the correlations between theoretical moisture simulations and experimental measurement data from climate chamber tests. The studies were conducted to simulate the hygrothermal robustness of selected bio-based external wall assemblies under future climatic conditions. According to recent research, the Danish climate is expected to undergo significant changes over the next 25–50 years. Predictions of either colder or warmer and more humid conditions emphasize the need for a new bio-based construction approach that minimizes the environmental impact of the building sector while ensuring the hygrothermal resilience of the building envelope.

The investigations reveal that the current level of knowledge is insufficient to guarantee hygrothermally sound bio-based external wall constructions in a still-unknown future climate. Robustness is highly dependent on the vapor diffusion resistance of the airtight layer, which, in coordination with the wind barrier, must prevent harmful moisture accumulation from indoor humidity in moisture-sensitive material layers. The results suggest that bio-based vapor retarders, as alternatives to plastic-based vapor barriers with potentially limited lifespans, may be viable under specific conditions. The report concludes that OSB4 panels are not deemed suitable as a vapor retarder in internal humidity class 3, whereas paper-based vapor retarders with higher Z-values can be sufficient when combined with ventilated air cavities in both future climate scenarios.

However, uncertainties in the experimental measurement data underscore the need for new, improved climate chamber tests. The investigations also indicate that the material properties of bio-based building materials may vary to an extent that necessitates larger safety margins when selecting materials for the building envelope. Consequently, the report's results cannot be directly implemented in practice but serve as a foundation for future research and contribute insights into necessary adaptations of building regulations for bio-based construction.

1 Indholdsfortegnelse

1	Indholdsfortegnelse	1
2	Indledning	2
2.1	Læsevejledning	3
3	Baggrund	4
3.1	Opgaveformulering	4
3.2	Afgrænsning	4
4	Teori	5
4.1	Fugtbelastningsklasser	5
4.2	Ydervæggens funktioner	6
4.3	Fugtteknisk robusthed af biogene konstruktioner	8
4.4	Isoleringsmaterialers påvirkninger på varmeledningsevnen	15
5	Materialer og metode	19
5.1	Vægkonstruktioner	19
5.2	Hotbox og måleudstyr	24
5.3	Testopstilling i hotbox	25
5.4	Håndtering af hotbox-data	30
5.5	Modelkalibrering på baggrund af stationære hotbox-forsøg	35
5.6	Skimmelmodeller	49
5.7	Simuleringsmetode for dynamiske beregninger	52
6	Resultater og analyse	62
6.1	Hotbox-forsøg	62
6.2	Modelkalibrering	66
6.3	Dynamiske fugtsimuleringer for robusthedsanalyse	76
7	Diskussion	82
7.1	Skimmelevaluering: alt eller intet?	85
7.2	Simulere biobaseret - korrelationer til måledata	85
7.3	Biobaserede konstruktioner i fremtidige klimascenarier	86
8	Perspektivering	87
9	Konklusion	89
10	Kildehenvisninger	90
11	Bilagsfortegnelse	96

2 Indledning

Byggeriet i Danmark står over for et presserende behov for grøn omstilling. Branchen bidrager i dag i betydelig grad til landets samlede CO₂-udledninger og ressourceforbrug. Beregninger fra det branchebårede initiativ *Reduction Roadmap* viser, at for at indfri Paris-aftalens målsætning om at begrænse verdens temperaturstigning til 1,5 grader, bør nybyggeri i Danmark i gennemsnit maksimalt udlede 5,8 kg CO₂-ækvivalenter pr. m² pr. år i 2025. Det svarer til en reduktion på omkring en tredjedel af det nuværende gennemsnit på 9,5 kg CO₂-ækv./m²/år (Realdania, 2023). Det danske bygningsreglement (BR 18) opererer med en differentieret, trinvis stramning af kravene til udledning og vil i løbet af de kommende fem år foreløbigt have reduceret grænseværdierne til bl.a. enfamiliehuse og etageboliger til hhv. 5,4 og 6,1 kg CO₂-ækv./m²/år (Social- og Boligministeriet, 2024). Det stiller store krav til byggeriet. Produktionen af byggematerialer er i dag stærkt afhængig af fossile brændsler og knappe, ikke-fornybare ressourcer som sand og grus. For at reducere byggeriets klimaaftryk er det derfor nødvendigt at undersøge og dokumentere nye materialer og konstruktioner, der kan bidrage til både lavere CO₂-udledninger og et mere ressourceeffektivt byggeri.

Projektet *Veje til biobaseret byggeri* har undersøgt potentialet for at dyrke biogene afgrøder som halm, græs og hamp i Danmark med henblik på anvendelse som byggematerialer. Resultaterne viser, at Danmark har betydelige muligheder for at producere disse afgrøder i tilstrækkelige mængder til at understøtte en øget anvendelse af biobaserede materialer i byggeriet (Realdania, 2024). Byggebranchens succesfulde bevægelse hen imod brugen af biobaserede og fornybare ressourcer som alternativer til ikke-fornybare, knappe mineralske materialer er imidlertid betinget af den rette tekniske dokumentation. For bygningsdele i klimaskærmen gælder dette særligt for konstruktionernes robusthed over for fugt. Biobaseret byggeri er endnu ikke en udbredt del af det Alment Tekniske Fælleseje, og ultimo 2024 foreligger der fortsat ikke fyldestgørende evidens for fugtteknisk robusthed af konstruktioner bestående af overvejende fornybare materialer som f.eks. halm, hamp og træfiberisolering. Disse og andre biogene materialer er grundet deres høje indhold af suktermolekyler følsomme over for fugt, og er ved øvre-middel til høje fugtniveauer i særlig risiko for vækst af skimmelsvamp.

Mens det EU-finansierede forskningsprojekt *Climate for Culture* har forudsagt et varmere og fugtigere klima i Danmark i løbet af de næste 50 år, peger ny forskning fra 2024 på, at Golfstrømmen er i sandsynlig risiko for at kollapse inden år 2050 (Smolders et al., 2024). Uden Golfstrømmens varmebidrag forventes Danmark at overgå til et klima, der minder om det østlige Canada eller Alaska, med markant koldere vintre til følge.

Begge scenarier ligger tidsmæssigt inden for den forventede levetid af det byggeri, der opføres i dag. Det understreger behovet for at kunne validere den fugttekniske robusthed af de biobaserede konstruktioner, der skal opføres i morgen. Denne rapport undersøger den fugttekniske ydeevne af biobaserede ydervægskonstruktioner under fremtidige klimascenarier. Undersøgelserne er foretaget på baggrund af eksperimentelle data fra VIGOT-projektet, der i samarbejde med landets tømreruddannelser har testet en række biobaserede vægkonstruktioner i klimakammer. Gennem kalibrering af hygrotermiske simuleringsmodeller er der skabt modeller, som er anvendt til at analysere konstruktionernes fugttekniske robusthed i de to fremtidsscenarier.

2.1 Læsevejledning

Denne rapport er struktureret i syv kapitler, som tilsammen giver en grundig gennemgang af projektets baggrund, den anvendte teori, forudsætningerne, simuleringerne og resultaterne heraf. Rapporten er skrevet, så kapitlerne kan læses både sammenhængende og hver for sig. Nedenfor beskrives kapitlernes indhold og anbefalinger til læsningen:

3. Baggrund

Rapportens første del præsenterer baggrunden, formålet og afgrænsningen af projektet. Det anbefales at læse denne del for at forstå rapportens kontekst og fokus.

4. Teori

Kapitlet præsenterer grundlæggende viden om fugtbelastningsklasserne, ydervæggens funktioner og beskriver den bygningsfysiske viden, der er anvendt i forbindelse med modelkalibreringen og analyse af testresultaterne. Teori-afsnittet er særligt relevant for læsere, der ønsker at forstå det faglige grundlag for resultaterne.

5. Materialer og metoder

Kapitlet beskriver forudsætningerne for de eksperimentelle måledata fra VIGOT-projektet, som ligger til grund for undersøgelserne i dette projekt. Derudover beskrives de anvendte metoder for datahåndtering, modelkalibrering, skimmeevaluering og dynamiske simuleringer i kronologisk rækkefølge. Dette kapitel er særligt relevant for læsere, der ønsker indsigt i fremgangsmåden eller vil reproducere forsøgene.

6. Resultater og analyse

Dette kapitel præsenterer og analyserer de eksperimentelle data og resultaterne af hhv. modelkalibrering og dynamiske simuleringer. Undersøgelserne i rapporten er foretaget iterativt og er sammenfattet i delkonklusioner.

7. Diskussion

Diskussionen vurderer resultaterne i forhold til eksisterende forskning, praksis og deres betydning. Kapitlet diskuterer projektets styrker og begrænsninger og giver en kritisk vurdering af undersøgelsens perspektiv.

8. Perspektivering

Dette kapitel kommer med anbefalinger til, hvordan projektets resultater kan bruges til at kvalificere og forbedre fremtidige undersøgelser. Det er særligt relevant for læsere med interesse i rapportens bredere anvendelsesmuligheder.

9. Konklusion

Konklusionen sammenfatter de væsentligste pointer og resultater fra rapporten. Det anbefales at læse dette kapitel, hvis man ønsker et kort og overordnet overblik over rapportens hovedbidrag.

Forkortelser og referencer

I rapporten refereres til danske (DS), europæiske (EN) og internationale (ISO) standarder. For at øge læsevenligheden anvendes forkortede betegnelser for standarderne. Forkortelserne består af standardens seriebetegnelse og nummer, uden angivelse af årstal eller tillæg. Eksempelvis refereres:

- DS/EN ISO 10456:2008 som **DS/EN ISO 10456**
- DS/EN 13171:2012 + A1:2015 som **DS/EN 13171**

Dette princip gælder for alle standarder nævnt i rapporten, medmindre andet er specificeret. De fulde betegnelser, inklusive årstal og tilføjelser, er angivet i litteraturlisten.

3 Baggrund

3.1 Opgaveformulering

Projektets sigte er todelte: dels skal det undersøge korrelationen mellem teoretiske fugtsimuleringer og de eksperimentelle måledata, der er fremkommet af VIGOT-projektets hotbox-forsøg med biobaserede ydervægskonstruktioner under stationære forhold. Dels skal det på baggrund af denne viden undersøge konstruktionernes fugttekniske robusthed under dynamiske forhold i simuleringer. Dette gøres med henblik på at fastslå, under hvilke forudsætninger de testede biobaserede vægopbygninger kan betragtes som værende fugtteknisk robuste i anvendelse inden for fugtbelastningsklasse 3.

3.2 Afgrænsning

Denne rapport tager udgangspunkt i hotbox-forsøg, der blev udført som en del af VIGOT-projektet i første halvår af 2024. I forsøget blev seks vægkonstruktioner testet, hvoraf tre af væggene - 1, 3 og 5 - viste lovende målinger i klimakammeret. Undersøgelserne i dette projekt er afgrænset til væg 1 og 3, som har beslægtede opbygninger, hvilket giver mulighed for validering af modelkalibreringerne på tværs af konstruktionerne. Samtidig dækker de afgrænsede vægge de to typer dampbremsere, der er anvendt i forsøget, og repræsenterer såvel det laveste og det højeste Z-værdi-forhold mellem vindspærre og tæthedsplan i de testede vægge. I teori-afsnittet og den indledende del af metode-afsnittet, der beskriver vægkonstruktionerne, måleudstyr og testopstilling, er alle forsøgets seks vægge indeholdt. Fra kapitel 5.5, der beskriver metoden for modelkalibreringen, er det udelukkende de afgrænsede vægge 1 og 3, der er bearbejdet.

I forsøget blev væggene påvirket til fugtbelastningsklasse 3 på den indvendige side. Resultaterne dækker således også FBK 1-2 og rummer dermed alle boligsituationer. Projektets dynamiske simuleringer er som udgangspunkt også afgrænset til FBK 3. Hvor der er fundet anledning til det, er der udført enkelte repræsentative simuleringer for FBK 2.

4 Teori

4.1 Fugtbelastningsklasser

Fugtbelastningsklasser er et udtryk for den fugtpåvirkning af indeklimaet, der kan forventes som følge af en given anvendelse og udetemperatur. Opvarmede bygninger eller bygningsafsnit indplaceres i fugtbelastningsklasserne (FBK) 1-5, der anvendes ifm. fugtteknisk dimensionering af bygningsdele, hvor der ikke foreligger konkrete måledata. Klasserne er defineret i DS/EN ISO 13788 og angiver det fugttilskud, der skal tillægges udeluftens vandindhold afhængigt af månedsmiddeltemperaturen. Fugttilskuddet afhænger af aktiviteterne inde døre - menneskelig tilstedeværelse, madlavning, tøjvask, badning o.lign. producerer fugt, der øger både vanddampindholdet og damptrykket i luften. Damptrykket er afgørende for kravene til klimaskærmens opbygning og fugttekniske robusthed - se kap. 4.2. *Ydervæggens funktioner*.

I tabel 1 ses fugtbelastningsklasserne oplistet med eksempler på bygningstypologier og -afsnit på baggrund af danske erfaringer iht. SBI-anvisning 277 (Brandt et al., 2023a). Sammenhængen mellem fugtbelastningsklasserne og luftens vanddampindhold er også beskrevet under kap. 5.3.3 *Randbetingelser*.

Tabel 1. Fugtbelastningsklasserne 1-5 iht. DS/EN ISO 13788 og med eksempler på anvendelser i overensstemmelse med danske erfaringer. Alle boligtypologier er dækket af FBK 2 og 3. Lejeboliger anses normalt at være tilhørende FBK 3. Efter Brandt et al. (2023a).

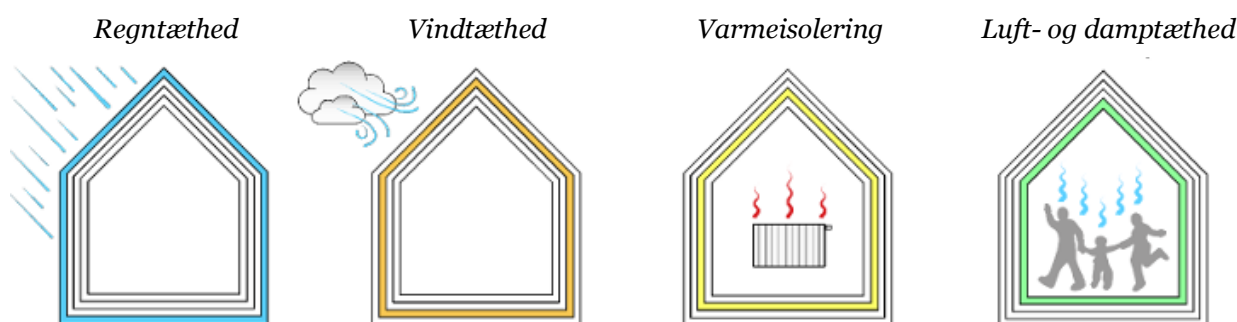
FBK	Eksempler på bygningstypologier og -afsnit
1	Ubenyttede bygninger, tørre lagerhaller, idrætshaller u. tilskuere, industribygninger u. fugtproduktion
2	Kontorer, forretninger, boliger med normal beboelsestæthed og ventilation ¹
3	Boliger med ukendt beboelsestæthed ² , idrætshaller med mange tilskuere ³
4	Storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum
5	Specielle bygninger, fx vaskerier, bryggerier, svømmehaller

Noter:

- 1) I Danmark anses en bolig for at have normal ventilation, hvis bygningsreglementets krav om ventilation er opfyldt.
- 2) Boliger uden mekanisk ventilation og mere end 2 personer pr. beboelsesrum.
- 3) I Danmark henregnes idrætshaller med mange tilskuere til fugtbelastningsklasse 3.

4.2 Ydervæggens funktioner

Ydervæggen skal som del af klimaskærmen opfylde en lang række funktionelle og tekniske krav mhp. at sikre både bygningens holdbarhed, energieffektivitet og indeklima. Kravene omfatter bygningsfysiske egenskaber samt krav til bæreevne, brandmodstandsevne, lydisolering, holdbarhed og levetid, miljø og bæredygtighed samt æstetik og arkitektur. Denne rapport beskæftiger sig med de bygningsfysiske forhold. I det følgende er ydervæggens funktioner beskrevet efter betydningen for den fugttekniske robusthed: regntæthed, vindtæthed, varmeisolering samt luft- og damptæthed.



Figur 1. Ydervæggens funktioner som del af klimaskærmen. Klimaskærmen er udsat for forskelligartede påvirkninger fra ude- og indeklimaet, der kan bidrage til opfugtning og nedbrydning af konstruktionerne. Ydervæggen som del af klimaskærmen skal sikre mod nedbør, vind, varmetab og påvirkning af vanddamp. Efter Møller et al. (2016).

Regntæthed

Ydervæggens regntæthed er afgørende for at beskytte de bagvedliggende funktioner mod direkte vandpåvirkning fra vejrliget. En regntæt ydervæg forhindrer vand i at trænge ind i de fugtfølsomme dele af konstruktionen og nedbryde eller forringe materialer og funktioner. Regntætheden skal sikres af regnskærmen, der har til opgave at afvise hovedparten af alle nedbør i form af regn, sne og slud. Belastningen er afhængig af konstruktionens højde og orientering, der har indflydelse på vind- og solpåvirkning. Vindpåvirkningen er afgørende for påvirkningen af slagregn, mens solpåvirkningen udgør en stor del af konstruktionens udtørningspotentiale.

Regntætheden kan tilvejebringes gennem både et- og to-trinstætningsprincippet, der har væsentlig betydning for tætningsfunktionens effektivitet og sikkerhed. Principperne beskriver, hvorvidt der sker trykudligning over regnskærmen. Trykforskellen mellem ude- og indeklimaet er den primære årsag til regngennemgang i en ydervæg (Zachariassen et al., 1993). Når der udføres et ventileret hulrum (to-trinstætning) bag beklædningen, fjernes trykforskellen mellem ydersiden og luftspalten, hvilket reducerer vandets drivkraft og beskytter vindspærren mod det vand, der fortsat, men i reduceret grad vil presses igennem regnskærmen. Samtidig bortventileres indefrakommende vanddamp gennem luftspalten. En luftspalte skal være min. 20 mm og med et tilstrækkeligt åbningsareal i bund og top for at være ventileret (Brandt et al., 2023b). Ifølge anvisningerne i TRÆ 55 bør lette træbeklædninger altid udføres med ventileret luftspalte, når der ikke er indbygget en tæt dampspærre (Z-værdi min. 50 GPa s m²/kg) i væggen damp-tætte lag (Johansen, 2021); ligeså hvis bræddebeklædninger udføres tætte med fer og not.

Ved et-trinsløsninger som massivt murværk og uventilerede, pudsede facader, ligger regn- og vindtætheden i samme lag. Vand afvises udelukkende af det yderste lag, der i disse tilfælde

også vil bidrage til lagets dampdiffusionsmodstand. Træbeklædninger bør iht. Træinformation kun udføres uden ventileret, trykudlignende luftspalte i særlige tilfælde, hvor der er sikkerhed for, at fugt og kondens ikke skader træet. I TRÆ 55 er dette eksemplificeret ved en trykimprægneret 1-på-2 beklædning opsat på en vindspærre af asfaltimprægneret træfiberplade (Johansen, 2021). Det skyldes at materialerne er imprægneret og at bræddebeklædninger uden fer og not regnes som værende delvist åbne for luftgennemgang.

Vindtæthed

Ydervæggens vindtæthed er afgørende for at beskytte varmeisoleringen mod luftstrømning og konvektion, der kan opfugte isoleringsmaterialet og nedsætte isoleringsevnen. Luftstrømning medfører energitab og potentielle trækgener i det termiske indeklima. Vindtætheden er således afgørende for ydervæggens ydeevne og skal i lige grad sikres i såvel et- og to-trinsløsninger som beskrevet ovenfor. I lette, trykudlignende to-trinskonstruktioner opretholdes vindtætheden af en vindspærreplade, der fungerer som den bagerste barriere i tætningsprincippet.



Det vindtætte lag har en gensidig afhængighed med tæthedsplanet, da lagenes dampdiffusionsmodstande skal afstemmes med hinanden. For at sikre at fugt, der transporteres ud i ydervæggen ved diffusion, ikke ophobes i konstruktionen, skal væggens vindtætte lag have en passende lavere dampdiffusionsmodstand i forhold til materialerne i det indvendige tæthedsplan. Dette forhold er nærmere beskrevet i kap. 4.3.3 *Forholdet mellem tæthedsplan og vindspærre*.

Varmeisolering

Ydervæggens varmeisolering er afgørende for at reducere varmetabet gennem facaden og sikre overholdelse af bygningsreglementets krav til energieffektivitet. Reglementet stiller specifikke krav til bygningsdelenes maksimale U-værdier, der udtrykker det tilladelige varmetab og indgår i reguleringen af bygningers samlede energibehov. Reducering af varmetabet sikrer samtidig det termiske indeklima i form af lave og stabile luft- og overfladetemperaturer, strålingstemperatur og luftbevægelser. Følgelig er varmeisoleringen bestemmende for konsekvenserne af fugtbelastningen i indeklimaet, da den relative fugtighed (RF) i luften og vandaktiviteten (a_w) på overflader er en funktion af temperaturer og vandindholdet i luften. En velisoleret ydervæg vil således kræve en mindre fugtbelastning (se også kap. 4.1 *Fugtbelastningsklasser*), førend betingelserne for skimmelvækst er til stede. Varmeisoleringen påvirker dermed også det atmosfæriske indeklima i form af luftens kvalitet og fugtindhold.



Luft- og damptæthed

Ydervæggens luft- og damptæthed er afgørende for at sikre, at fugtig luft fra indeklimaet ikke bliver transporteret ud i varmeisoleringen i større omfang, end konstruktionen er dimensioneret til. Lufttætheden sikrer mod varmetab og fugttransport gennem konvektion, mens damptætheden sikrer mod fugttransport gennem diffusion. Funktionerne er som oftest samlet i konstruktionens tæthedsplan, der udgøres af et enkelt lag bestående af en membran eller et plademateriale. Kravet til tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand afhænger af dets forhold til vindspærrens dampdiffusionsmodstand, isoleringsmaterialet, konstruktionens isoleringsevne, fugtbelastningsklassen og det udvendige klima. Forholdet mellem tæthedsplan og vindspærre er beskrevet dybdegående i kap. 4.3.3.



4.3 Fugtteknisk robusthed af biogene konstruktioner

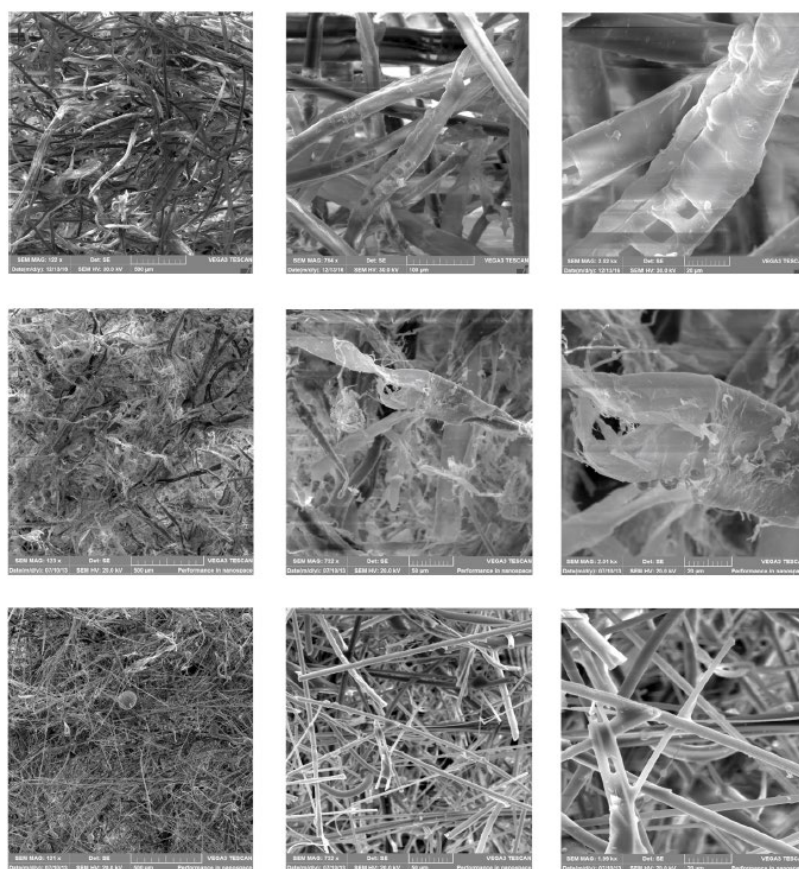
4.3.1 Karakteristika af biogene materialer

Biogene materialer er en samlebetegnelse for organiske materialer, som stammer fra biologiske processer eller organismer. Begrebet omfatter såvel plantebaserede materialer samt marine biomasser, der er karakteriseret ved at være fornybare, dyrkbare og bionedbrydelige. Når biogene materialer forarbejdes industrielt til specifikke produkter, betegnes de som biobaserede materialer. Som led i planternes tilblivelse og vækst gennem fotosyntese, omdannes CO₂ fra atmosfæren og vand (H₂O) fra vækstmediet til sukkermolekyler, der binder kulstoffet (C) og lagrer det i biomassen. Ilten (O₂) frigives tilbage til atmosfæren. Sukkermolekylerne omdannes til bl.a. cellulose, hemicellulose og lignin, som er nogle af planternes primære byggesten (Rasmussen et al., 2022a).

Denne proces gør de plantebaserede materialer (herefter kaldet de biobaserede materialer) sårbare over for vækst af skimmel og nedbrydende svampe. Svampe lever af sukkerstoffer og danner for de trænedbrydende svampes vedkommende enzymer, der nedbryder de døde træ- og plantedele i materialerne for at frigøre plantesukre. Sukkerstofferne frigives også gennem mekanisk bearbejdning, og jo mere findelt og processeret et plantemateriale bliver, desto flere sukkermolekyler frigives. Mange biobaserede materialer har indlejrede svampesporer fra de marker og skove, råvarerne er høstet fra. Således har både træfibre og halm, som udgør isoleringsmaterialerne i forsøgets konstruktioner, typisk indlejrede sporer af bl.a. skimmelslægten *Penicillium* samt arterne *Alternaria alternata* og *Fusarium sp.*, der alle er kendetegnet ved at være sundhedsskadelige og bionedbrydende svampe (Volf et al., 2015, s. 1603). I en endnu ikke udgivet artikel (*submitted*) af Andersen & Rasmussen beskriver forfatterne et studie fra 2024, hvori udvalgte biobaserede materials fugtmodstandsevne og risiko for skimmelvækst er blevet stress-testet under *worst-case* fugtscenarier. Forsøgene dokumenterer tilstedeværelsen af levedygtige svampesporer i alle testede materialer, herunder plade- og isoleringsmaterialer af træ, halm, hamp og græs. Blandt de mest forekommende svampe var de varmeresistente arter *Aspergillus* og *Paecilomyces*. Alle materialeprøver var nye og ubrugte, og om end artiklen endnu ikke er fagfællebedømt, underbygger studiets resultater, at biobaserede materialer er podet for nedbrydning og i risiko for svampeangreb, når alle vækstbetingelser er opfyldt: tilpas høj relativ luftfugtighed, tilgængelige næringsstoffer, den rette temperatur og fornødne tid.

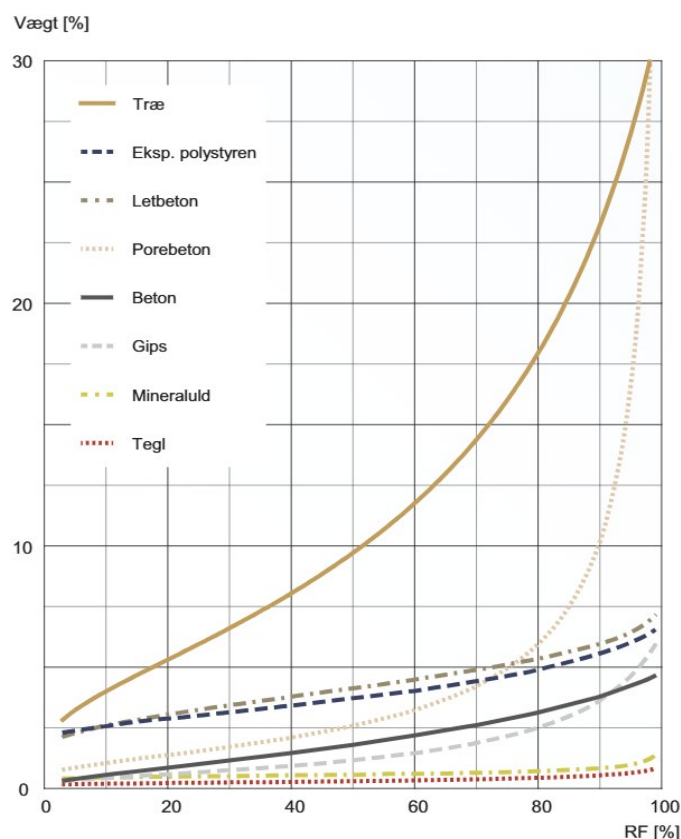
For de cellulosebaserede materialer såsom træ og halm, der anvendes i VIGOT-projektet, gælder, at råvarerne har porøse cellestrukturer og generelt kendetegnes ved at have lav varmeledningsevne. I forarbejdet form indgår de cellulosebaserede materialer i gruppen af kontinuerte materialer med kanalsystemer af åbne porer. Det betyder, at materialerne er hygroskopiske og kan udveksle fugt med luften og gennem direkte vandpåvirkning.

Fibrene i cellulosebaserede isoleringsmaterialer er som udgangspunkt hule og har ru og ujævne overflader. Det adskiller dem fra fibrene i uorganiske materialer som mineraluld, der er glatte med et kompakt tværsnit (uden hulrum). Det betyder, at fugtakkumulering og -transport udelukkende foregår i porerne mellem sten- eller glasfibrene. I de naturlige materialer sker dette både i porerne og inde i de hule fibre. Samtidig betyder fibrenes overflade karakteristika, at de i højere grad kan binde fugt til overfladerne (Kosiński, 2023). Denne egenskab udtrykkes gennem et materiales fugtkapacitet og kan aflæses af dets sorptionskurve(r), hvilket beskrives nærmere efter figur 2 herunder. Figuren viser billeder af træfiberisolering, celluloseisolering og mineraluld taget med scanning-elektronmikroskop (SEM). Af billederne fremgår materialernes fiberstrukturer, overflader og indbyrdes størrelsesforhold. Det ses særligt af billederne med 732-754x forstørrelse, at de naturlige fibre er større og indgår i en finere porestruktur end de syntetiske fibre i mineralulden.



Figur 2. SEM-billeder af forskellige isoleringsmaterialer. Efter Kosiński (2023).
 Øverste række: træfiberisolering forstørret 122x, 754x og 2520x.
 Midterste række: celluloseisolering forstørret 123x, 732x og 2010x.
 Nederste række: mineraluld forstørret 122x, 732x og 1990x.

Hygroskopiske materialer vil optage og afgive fugt, indtil de kommer i fugtlige vægt med omgivelserne. Sammenhængen mellem et materials fugtindhold og den relative fugtighed (RF) i luften er specifik for hvert materiale og aflæses af et materials sorptionskurve (fugtlige vægtskurve) for en specifik temperatur. Sorptionskurven afhænger af bl.a. densitet og porestruktur og udtrykker samtidig et materials fugtkapacitet gennem kurvens hældning. Fugtkapaciteten angiver materialets evne til at optage, lagre og frigive fugt ved forskellige relative luftfugtigheder. En stejl kurve indikerer, at en ændring i RF i omgivelserne medfører en relativt større ændring i materialets fugtindhold. Fugtkapaciteten er således også et udtryk for et materials egenskab som fugtbuffer. Træ og øvrige biogene materialer har generelt stejlere og højere kurver end mineralske materialer (Brandt et al., 2023a, s. 33-40), hvilket gør dem bedre til at optage fugt fra omgivelserne. Sorptionskurver er en idealisering af de underliggende kurver for hhv. adsorption og desorption, som kan afvige fra hinanden. Forskellen skyldes hysteresese og udtrykker, at særligt porøse materialer reagerer forskelligt på voksende og aftagende fugtpåvirkning. Typisk vil adsorptionskurven ligge lavere end desorptionskurven, da overfladespændingen i porerne betyder, at det kræver mere energi at frigøre fugt (desorption) end at optage den (adsorption).



Figur 3. Eksempler på sorptionskurver (fugtlige vægtskurver) for en række gængse byggematerialer. Sorptionskurver udtrykker et materials fugtindhold som funktion af den relative fugtighed (RF) i omgivelserne og angives for en specifik temperatur. Af figuren fremgår, at træ som biogent materiale har en højere og generelt stejlere kurve end de mineralske byggevarer vist på grafen. Således vil træ ved en given relativ luftfugtighed indeholde mere vand end eksempelvis tegl. Alle kurver stiger i varierende grad eksponentielt ved de højeste RF-værdier. Det skyldes kapillarkondensation, som betyder, at fugt kondenserer i porerne og øger fugttransporten i materialet. Kapillarkondensation er afhængigt af porernes størrelse. (Brandt et al., 2023a, figur 12).

For gruppen af biobaserede byggevarer betyder det, at fugtpåvirkningen under produktion, transport, oplagring, indbygning og drift er særlig vigtig. Det kritiske fugtindhold for træ ansættes normalt til 20 vægt-%, svarende til ligevægtfugtindholdet ved ca. 87 % RF i luften (Brandt et al., 2023a, s. 86). Fugtindholdet kan særligt for cellulosebaserede materialer medføre dimensionsændringer, da binding af vandmolekyler får fibrene til at udvide sig. Således vil eksempelvis træ kunne udvide sig med 10 % på tværs af fiberretningen fra tør til våd tilstand (Rasmussen et al., 2022a).

For hovedparten af materialer, både organiske og uorganiske, gælder, at materialet eller materialeoverfladen kan blive angrebet af forskelligartet svampevækst, når de nødvendige vækstbetingelser er til stede. Det kræver både den rette relative fugtighed eller vandaktivitet, tilstedeværelsen af næringsstoffer og det rette temperaturinterval i den fornødne tid afhængigt af svampeart. Såvel biogene og biobaserede materialer er som følge af deres naturligt høje indhold af næringsstoffer, indlejrede svampesporer og porøse cellestrukturer dermed særligt modtagelige for svampeangreb.

4.3.2 Fugttransport

Fugt kan transporteres gennem hygroskopiske, porøse materialer i både damp- og væskeform afhængigt af den dominerende potentialeforskel. Potentialeforskellen angiver drivkraften bag fugttransporten og udtrykker typisk en forskel i vanddamptryk (Pa), lufttryk (Pa) eller kapillært potentiale i materialet. Vanddampindhold (g/m^3) kan bruges som en indikator for fugtniveauet, men udgør ikke en drivkraft i sig selv.

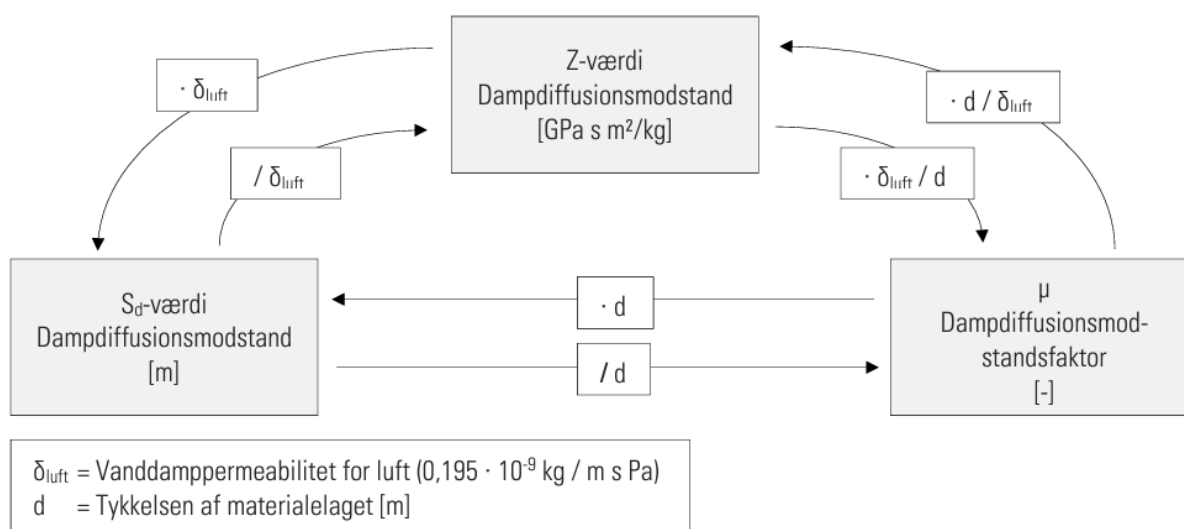
Fra et opvarmet indeklima mod et koldere udeklima vil fugttransport kunne forekomme i dampform som diffusion (drevet af forskelle i vanddamptryk) og konvektion (drevet af en luftstrømning som følge af forskelle i lufttryk eller termisk opdrift). I praksis udgør fugttransport og -påvirkning ved konvektion et væsentligt større problem end diffusion, da en luftstrøm typisk vil bære mere fugtig luft ind i den adskillende bygningsdel (Brandt et al., 2023a, 2023b).

Fugttransport i væskeform kan ske som følge af kapillarkræfter, der er styret af en potentialeforskel i materialet uden eksternt tryk, eller som følge af hydraulisk tryk fra en vandsøjle, der driver væsken gennem materialets porer. Eksempelvis suges vand op i murværk via kapillære kræfter, uafhængigt af et ydre vandtryk. Fra en vandpåvirket del af et materiale vil fugttransport foregå i væskeform som kapillartransport og som følge af kapillarsugning. Sugningen igangsættes uden eksternt tryk og sker som resultat af kapillarkræfterne i materialets små porer; gennem samspil af adhæsiionskræfter mellem vand og porevægge samt kohæsiionskræfterne mellem vandmolekylerne trækkes vandet ind i materialet. Afhængigt af materialets porestruktur og porernes størrelse, kan stigningen/vandringen være længere og langsommere eller kortere og hurtigere (Brandt et al., 2023a). Dette adskiller sig fra transport forårsaget af f.eks. grundvand, vandsøjletryk eller lækager, hvor væsketransporten drives af forskelle i hydraulisk tryk på materialets ydersider. I begge tilfælde gælder, at jo højere vandindholdet er, desto hurtigere går væsketransporten.

Biobaserede materialer kan, alt efter planteart og forarbejdningsgrad, have cellestrukturer, der accelererer væsketransporten ind i materialet. Således har eksempelvis massivtræ langsgående cellestrukturer i vækstretningen, der fungerer som sugerør og i vækstfasen har

transporteret vand fra rødder til krone, men som byggemateriale gør endetræet særligt sårbart for fugtoptag og -transport ind i materialet. Generelt betyder de biobaserede materialers hygroskopiske egenskaber, at materialegruppen som hele er kapillaraktiv og har en højere evne til at akkumulere og omfordele fugt end det er tilfældet for uorganiske materialer som eksempelvis mineraluld. Dette skyldes mineraluldens lave fugtkapacitet, grovere porestruktur og materialekemi, der ikke egner sig til kapillartransport (Brandt et al., 2023a).

For både mineralske og biobaserede materialer gælder, at fugttransport ved diffusion er afhængig af materialets vanddampdiffusionsmodstand. Dampdiffusionsmodstanden udtrykkes gennem den i Danmark anvendte Z-værdi [$\text{GPa s m}^2/\text{kg}$] eller internationalt udbredte Sd-værdi [m], som også benyttes i hygrotermiske beregningsprogrammer som WUFI. Sd-værdien står for det tyske "Stromdichte", tæthed for gennemstrømning, og angiver den ækvivalente luftlagstykkelse i meter, et stillestående luftlag ville have for at svare til materialets dampdiffusionsmodstand. Værdien er et produkt af materialets tykkelse, d [m], og vanddampdiffusionsmodstandsfaktor μ (my), der er dimensionsløs og angiver, hvor mange gange langsommere vanddamp diffunderer gennem materialet sammenlignet med luft. Sammenhænge og omregningsmetoder mellem Z-værdier, Sd-værdier samt vanddampdiffusionsmodstandsfaktor er beskrevet i DS/EN ISO 12572 og illustreret i figur 4 herunder;



Figur 4. Omregning mellem Z-værdi, Sd-værdi og vanddampdiffusionsmodstandsfaktor μ . Vanddamppermeabiliteten for luft er $0,195 \cdot 10^{-9} \text{ kg / m s Pa}$, når lufttemperaturen er 23°C (Gottfredsen & Nielsen, 2006).

4.3.3 Forholdet mellem tæthedsplan og vindspærre

For at sikre at fugt, der transporteres ud i ydervæggen ved diffusion, ikke ophobes i konstruktionen, skal væggen vindtætte lag have en passende lavere dampdiffusionsmodstand i forhold til materialerne i det indvendige tæthedsplan. Kravet til tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand afhænger af vindspærrens dampdiffusionsmodstand, isoleringsmaterialet, konstruktionens isoleringsevne, fugtbelastningsklassen og det udvendige klima. I byggerier, hvor der knytter sig f.eks. brandkrav til vindspærrepladen, er det vindspærren, der bestemmer tæthedsplanets

dampdiffusionsmodstand. Dermed bliver tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand en funktion af vindspærren. I Danmark anbefaler litteraturen i det gældende Alment Tekniske Fælleseje (ATF) i 2024 et dampdiffusionsmodstandsforhold på min. 1:10 som håndregel upåagtet materialesammensætning og vindspærrens dampdiffusionsmodstand (Brandt et al., 2023b). Det betyder, at væggens damptætte plan skal være mindst 10 gange så tæt for vanddamp som vindspærrepladen for at undgå skadelig fugtakkumulering i væggen. Det damptætte plan defineres i den forbindelse som materialelaget med den højeste dampdiffusionsmodstand på den varme side af isoleringen. I faktorberegningen indgår som udgangspunkt ikke indvendige vægbeklædninger, når der er et tættere lag længere inde i konstruktionen. For at sikre mod opfugtning som følge af diffusion, anbefaler ATF brugen af en regulær dampspærre med dampdiffusionsmodstand (Z-værdi) på min. 50 GPa s m²/kg.

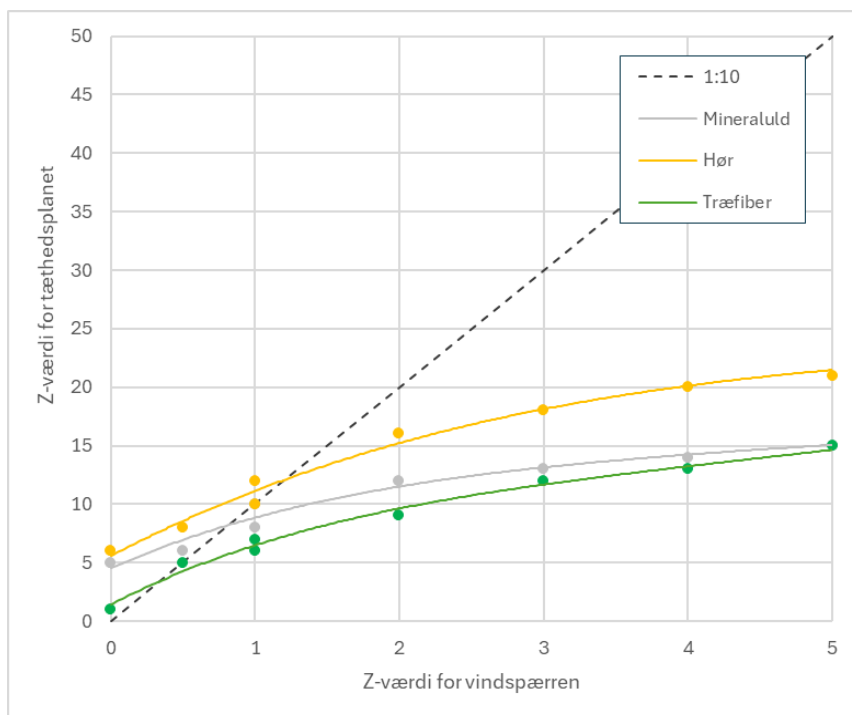
I praksis vil gængse vindspærrepladeprodukter baseret på gips, cement eller træfiber have en Z-værdi på ml. 1-8 GPa s m²/kg (de Place Hansen et al., 2024) og dermed ligge komfortabelt indenfor dampdiffusionsmodstandsforholdet når anvendt i kombination med f.eks. en plastbaseret dampspærremembran af polyethylen (PE-folie). Folierne vil typisk have en Z-værdi på over 300 GPa s m²/kg (Gottfredsen & Nielsen, 2006). Undersøgelser af polyethylen-baserede dampspærresystemers holdbarhed indikerer imidlertid, at systemernes funktionelle levetid kan være kortere end bygningens eller bygningsdelens samlede levetid (Rasmussen et al., 2022b). Således dokumenterer BUILD rapport 2020:06 tests af ni polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret ældning. Forsøgene viste, at foliernes dampdiffusionsmodstand ikke faldt over hvad der svarede til 15 års ældning i en almindelig anvendelsestemperatur på 20 °C. Dog viste forsøgene også, at alle tapede samlinger mistede klæbestyrke. Der var ingen svækkelse ved brug af butylbånd (Rasmussen et al., 2020). Dette bliver ligeledes konkluderet i BUILD rapport 2020:10, der beskriver relaterede forsøg af dampspærresamlingernes holdbarhed. Heri dokumenterer Møller (2020), at det efter accelereret ældning var tapen i samlingerne, der var dampspærresystemernes svageste led. Ved prøvning af forskydningsstyrken i membran/membran-samlinger skete bruddet mellem tapens klæber og bærelag. Forsøgene viste også, at lufttætheden i samlingerne blev betydeligt forringet som følge af accelereret ældning.

Rapporternes forfattere beskriver dermed samstemmende, at PE-baserede dampspærresystemer trods tegn på funktionsnedsættende svækkelser af tapede samlinger kan forventes at have en levetid på mere end ca. 15 år. I livscyklusvurderinger (LCA) af bygninger arbejder man iht. bygningsreglementet med levetidstabellerne i BUILD rapport 2021:32. Heraf fremgår, at boligbyggeri forventes at have en middellevetid på 120 år. For ydervægge specifikt samt varmeisoleringen i ydervægge forventes middellevetider på hhv. 100 og 60 år (Haugbølle et al., 2021).

Hvor tæthedsplanet ønskes udført uden dampspærrende plastmembran, og erstattes med pladematerialer eller organisk banevare, bliver fugtbelastningen i indeklimaet, dampdiffusionsmodstandsforholdet og materialeegenskaber afgørende. Ifølge SBI-anvisning 279 kan forholdet mellem tæthedsplan og vindspærre i byggeri i fugtbelastningsklasserne (FBK) 1-2 reduceres fra 1:10 til 1:5 efter en fugtteknisk vurdering (Brandt et al., 2023b, s. 45). Disse hovedregler nuanceres af nyere forskning; Morelli et al. (2021) konkluderer på baggrund af hygrotermiske simuleringer, at dampdiffusionsmodstandsforholdet i FBK 1-3, der inkluderer alle boligformer, kan ansættes til 1:5, mens det for specialbyggeri i FBK 4-5

fortsat bør udføres 1:10. Tallene er baseret på brugen af traditionel mineraluldsisolering; undersøgelser af Therkelsen (2020) viser imidlertid, at valget af isoleringsmateriale har stor indflydelse på dampdiffusionsmodstandsforholdet. Gennem hygrotermiske simuleringer blev påvist, at brugen af celluloseisolering mindsker fugtigheden bag vindspærrepladen for alle fugtbelastningsklasser, hvilket tillader at anvende et lavere forhold. Dette bliver tilskrevet materialets højere fugtkapacitet, som er karakteristisk for såvel biogene og biobaserede isoleringsmaterialer som hhv. halm og celluloseisolering. Leszmann (2022) underbygger gennem litteraturstudier og hygrotermiske simuleringer fugtkapacitetens betydning, men konkluderede, at det er isoleringsmaterialet og dets dampdiffusionsmodstand, der er det afgørende parameter i konstruktioner uden egentlig dampspærre.

Også Hansen et al. (2024) har påvist, at dampdiffusionsmodstandsforholdet mellem vindspærre og tæthedspåen afhænger af fugtbelastningsklassen, isoleringsmaterialet samt konstruktions U-værdi. Hvor håndreglerne (1:10, 1:5) udtrykker en lineær sammenhæng mellem Z-værdierne, viser undersøgelsens resultater, at forholdet snarere er en algoritme baseret på en række parametre - se figur 5.



Figur 5. Tæthedspåens dampdiffusionsmodstand som funktion af vindspærrens dampdiffusionsmodstand ved brug af udvalgte isoleringsmaterialer og en ventileret regnskærm. Kurverne er angivet for en væg med en U-værdi på $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ i fugtbelastningsklasse 3. Z-værdier er angivet som $\text{GPa s m}^2/\text{kg}$. Det ses, at håndreglen i Alment Teknisk Fælleseje om et dampdiffusionsmodstandsforhold på 1:10 i FBK 3 kun er tilstrækkeligt ved Z-værdier for vindspærren på ca. $1,5 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ eller derover. Ved højere værdier kan forholdet sænkes. Efter Hansen et al. (2024) og Hofmann (2024).

Jo lavere vindspærrens dampdiffusionsmodstand bliver, desto højere skal forholdet være, afhængigt af konstruktionen. Denne tendens er også påpeget af Therkelsen (2020). Af undersøgelserne fremgår, at det nødvendige dampdiffusionsmodstandsforhold øges markant, når vindspærrens Z-værdi kommer under $2 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$. Om end håndreglerne er

konserverne ved brug af traditionelle vindspærreplader med høje Z-værdier, ses det i flere af de beregnede tilfælde, at forholdet skal være højere end 1:5 og 1:10 for hhv. FBK 1-2 og FBK 3 uanset isoleringsmaterialet. Biobaserede vindspærreplader vil som oftest have Z-værdier under 1 GPa s m²/kg - således er flere af væggene i nærværende projekt udført med træfiberbaserede vindspærreplader deklareret til 0,5 GPa s m²/kg. I disse tilfælde viser Hansen et al. (2024), at dampdiffusionsmodstandsforholdet bør være højere end 1:10.

Studiet har dokumenteret, at også U-værdien spiller en vigtig rolle. Når varmetabet falder, stiger kravet til dampdiffusionsmodstandsforholdet. Det skyldes dels, at varmetabet driver fugten gennem påvirkning af damptrykket (*the driving force*), og dels, at der som følge af en øget isoleringsevne bliver koldere i større dele af varmeisoleringens ydre lag. Dermed kræves der mindre tilført fugt, førend den relative fugtighed når et kritisk punkt længere inde i den yderste del af isoleringen.

Alle citerede undersøgelser viser grundlæggende, at jo større dampdiffusionsmodstandsforholdet er, jo mere fremmes udtørringen af materialerne mellem tæthedsplan og vindspærre. Den nedre grænse er imidlertid afhængig af vindspærrens dampdiffusionsmodstand, fugtbelastningsklasse og U-værdi. Forholdet afhænger imidlertid også af de regionale hygrotermiske forhold og er således klimaspecifikt (Morelli et al., 2021). Om end tendenser baseret på bygningsfysiske materialeegenskaber er universelle, kan de konkrete tal dermed ikke overføres til andre klimazoner eller fremtidsscenarioer.

4.4 Isoleringsmaterialers påvirkninger på varmeledningsevnen

4.4.1 Generelt

Et isoleringsmateriales varmeledningsevne udtrykkes gennem dets lambda-værdi λ og angives iht. DS/EN ISO 10456 som en deklareret værdi (λ, D) under standardiserede forhold ved 10 °C. Den deklarerede værdi dækker over den *tilsyneladende varmeledningsevne*, som betegner den samlede, effektive værdi af varmeoverførsel gennem både ledning, konvektion og stråling (Hansen, 2024). Varmeoverførslen gennem faststoffet sker udelukkende gennem ledning, mens den for det øvrige volumen sker gennem alle tre mekanismer. Den varmeisolerende egenskab af porøse materialer skyldes hovedsageligt stillestående luft i materialets porer og er dermed også afhængig af mængden, strukturen og størrelsen af porerne (Veitmans & Grinfelds, 2016). Dette forhold beskrives gennem et materiales porøsitet (m³/m³), der udtrykker, hvor stor en del af et materiales volumen består af porer. Vakuumsforsøg har vist, at luftens andel af et biobaseret, fiberbaseret materiales samlede varmeledningsevne udgør i omegnen af 0,025 W/mK, svarende til lambda-værdien for luft og afhængigt af materialets art og densitet (Krishpersad & Gurmohan, 2011). Således spiller de atmosfæriske forhold samt densitet, luft- og vandindhold i materialet en afgørende rolle for dets varmeisolerende egenskab (Anh & Pásztor, 2021). Fiberbaserede isoleringsmaterialer påvirkes særligt af disse faktorer - det gælder såvel mineralske materialer som mineraluld og biobaserede materialer som træfibre og halmstrå, der er anvendt i VIGOT-projektet. I de følgende afsnit gennemgås et litteraturstudie vedrørende de individuelle påvirkninger og deres samvirken.

4.4.2 Temperaturen indflydelse på varmeledningsevnen

Temperaturens indflydelse på varmeledningsevnen defineres i DS/EN ISO 10456 som konverteringskoefficienten f_T , der udtrykker, hvor meget materialets varmeledningsevne ændrer sig som funktion af temperaturen. I et studie fra 2023 dokumenterer Kosiński et al. (2023) en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem temperatur og varmeledningsevne, der viser, at lambda-værdien stiger med gennemsnitligt 0,0002 W/mK pr. grad celcius for de undersøgte biobaserede isoleringsmaterialer. For mineraluld er tallet 0,0001 W/mK. I DS/EN-standardens angives normative standardværdier på baggrund af materialetype og varierende parametre som beskaffenhed, densitet og deklareret varmeledningsevne. For løsfyldsisolering af cellulose angives tallet afhængigt af den indblæste densitet (<40 kg/m³: 0,004 W/mK, ≥40 kg/m³: 0,0003 W/mK). Standardens konverteringskoefficienter ligger generelt højere end studiets resultater (Kosiński et al., 2023).

Mod et varmere indeklima vil isoleringsevnen således mindskes, mens den omvendt øges mod et koldere udeklima ift. standardens referencetemperatur. Det skyldes, at varmeledning i luft og andre gasser primært sker gennem kollisioner mellem gasmolekyler. Ved stigende temperaturer får molekylerne mere kinetisk energi, hvilket betyder, at molekylerne bevæger sig hurtigere og med flere kollisioner til følge (Vej-Hansen & Rode, 2010). Det betyder, at luften i isoleringsmaterialet overfører varme mere effektivt ved højere temperaturer end ved lavere temperaturer. Således viser studiet af Kosiński et al. (2023) en forskel på op mod 18 % i varmeledningsevnen ved en temperaturforskel på 20 °C over den testede konstruktion. Dette underbygges af en lang række tidligere studier og litteratur af bl.a. Troppová et al. (2015) og Rahim et al. (2016), der ligeledes dokumenterer en lineær sammenhæng mellem temperatur og varmeledningsevne for biobaserede isoleringsmaterialer. Anh & Pásztor (2021) og Abdou & Budaiwi (2013) beskriver derudover, at temperaturafhængigheden er størst ved lavere densiteter, hvor luftandelen i materialet er størst. Temperaturen har ligeledes indflydelse på materialets vandindhold, hvilket beskrives i de følgende afsnit.

Material	Mineral wool		Cellulose		Hemp fibers		Flax shives	
Temperature difference	15°C	20°C	15°C	20°C	15°C	20°C	15°C	20°C
Slope of linear function (×E-05)	13	14	10	18	21	22	12	19
Determination coefficient	0.999	0.999	0.859	0.988	0.992	0.997	0.975	0.997

Figur 6. Sammenhænge mellem temperatur og varmeledningsevne udtryk som lineære hældninger for forskellige isoleringsmaterialer. Hældningen angiver, hvor meget varmeledningsevnen ændrer sig for hver grad temperaturstigning. I praksis betyder det, at når temperaturen stiger, bliver isoleringen en smule mindre effektiv. *Determination coefficient* (R-værdien) udtrykker styrken af den lineære sammenhæng mellem variablerne. En R-værdi tæt på 1 indikerer en stærk sammenhæng, hvor dataene passer meget godt til den lineære model. (Kosiński, 2023)

4.4.3 Vandindholdets indflydelse på varmeledningsevnen

Vandindholdet i porøse, luftfyldte materialer har ifølge nyere litteratur betydning for et materiales isoleringsevne. Det skyldes, at varmeledningen for vand er ca. 20 gange højere end for luft. Særligt udpræget er dette for biobaserede isoleringsmaterialer med hule fibre som træfibre og halm, der som beskrevet under 4.3.2 *Fugttransport* har en stærk kapillær absorptionsevne. Med stigende fugtpåvirkning mættes både fibre og porerne imellem gennem adsorption, og isolerende luft erstattes af ledende vand, hvilket reducerer materialets termiske modstand (Anh & Pásztor, 2021) (Troppová et al., 2015) (Costes et al.,

2017). I litteraturen findes talrige kilder på dette, om end kun et lille mindretal af den beskrevne forskning er foretaget for løsfyldsisolering. Kosiński har i 2023 kortlagt den tilgængelige litteratur og konkluderer pba. egen forskning, at forholdet i samme grad er gældende for træfiberisolering o.lign. indblæste løsfyldsmaterialer, der som oftest vil have lavere densitet end pladematerialer og formstykker. Af forsøgene fremgår, at forholdet imidlertid også er afhængigt af densiteten. Abdou & Budaiwi (2013) har beskrevet, at porøse isoleringsmaterialer med høj densitet kan binde mere vand inden for det hygroskopiske område, da komprimeringen øger overfladearealet af adsorberende porevægge. Dermed øges også materialets fugtkapacitet. Den samme mekanisme gør sig principielt gældende for mineraluld, dog med større effekt, da materialet ikke er hygroskopisk og dermed ikke kan absorbere og omfordele vand. Densitetens indflydelse er beskrevet nærmere i det følgende kapitel.

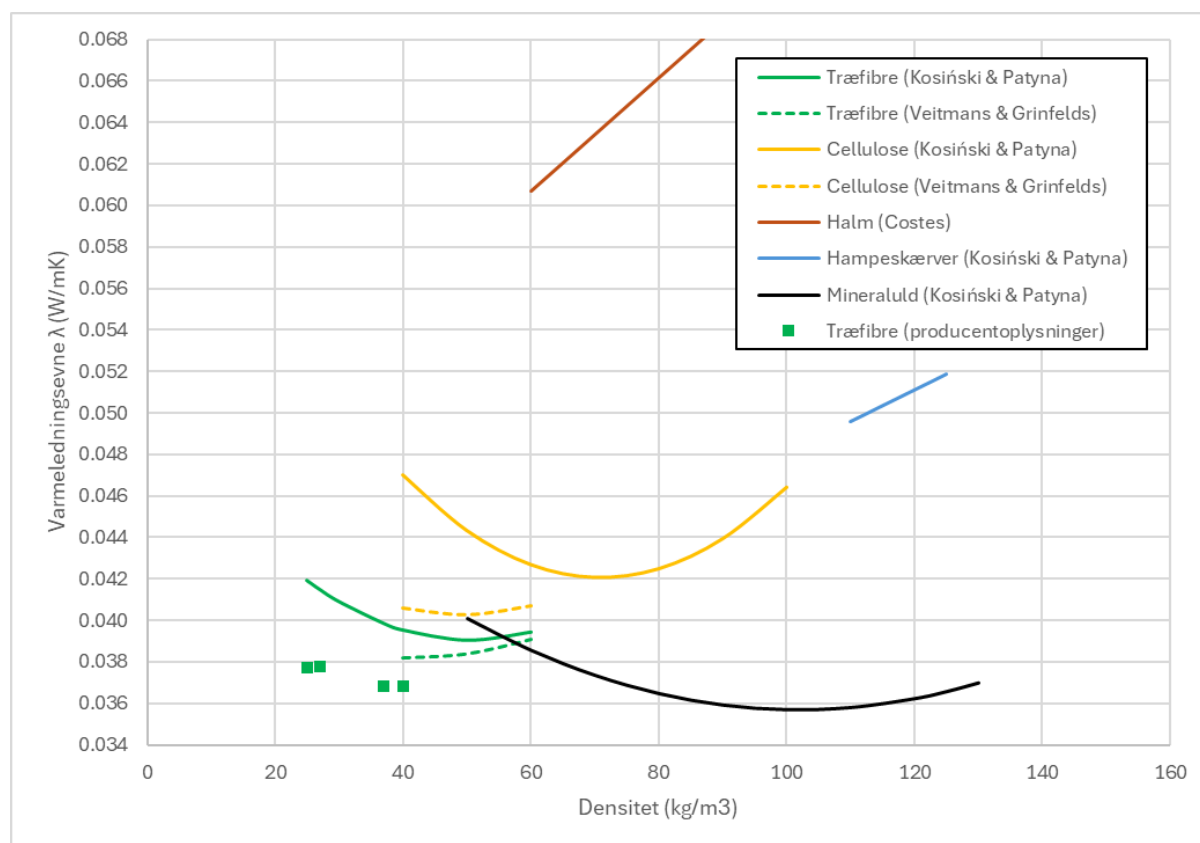
Mens alle citerede studier har påvist en entydig sammenhæng mellem vandindhold og varmeledningsevne under kontrollerede laboratorieforhold, har Nicolajsen (2004) undersøgt vandindholdets betydning i rammerne af fuldskalaforsøg hen over halvandet år. Forsøget monitorerede vandindhold samt transmissionskoefficient (U-værdi) for en ydervæg med hhv. celluloseisolering og mineraluld i dansk klima. Vandindholdet i den yderste del af isoleringsmaterialerne bag vindspærren steg gennemsnitligt fra 10 vægt-% om sommeren til 18 vægt-% om vinteren ved en gennemsnitlig U-værdi på 0,14 W/m²K. Nicolajsen konkluderer, at vandindholdets indflydelse på varmeledningsevnen var ubetydelig. Målingerne under realistiske forhold hen over et år har imidlertid også været påvirket af andre faktorer, herunder bl.a. temperaturer. Resultaterne er derfor ikke direkte sammenlignelige med isolerede undersøgelser af relationen mellem vandindhold og varmeledningsevne. Ikke desto mindre fremgår det også af SBI-anvisning 280 de Place Hansen et al. (2024), at fugt under normale forhold ikke vil have praktisk betydning for varmeledningsevnen, hvilket der dog ikke er nærmere redegjort for.

4.4.4 Densitetens indflydelse på varmeledningsevnen

Et isoleringsmateriales densitet har en betydelig indflydelse på dets varmeledningsevne. Afhængigheden er imidlertid forskelligartet og varierer med materialet og balancen mellem varmeoverførselsmekanismerne. Med øget densitet mindskes andelen af isolerende luft, hvilket også mindsker temperaturens indflydelse på varmeledningsevnen beskrevet ovenfor (Abdou & Budaiwi, 2013). Samtidig øges varmeledningen også gennem faststoffet, da et mere kompakt volumen medfører flere varmebroer i materialets porestruktur. Når porerne tættes, reduceres omvendt både stråling- og konvektionsbidraget, som er dominerende ved lavere densiteter. I praksis anses betydningen af den naturlige konvektion i de små porer dog som værende minimal (Anh & Pásztor, 2021) (Hansen, 2024). Balancen mellem mekanismerne er afhængig af materialet og vil have forskellig betydning og effekt ved forskellige densiteter. Således redegør flere studier for en reduceret varmeledning som følge af let øgede densiteter i lejet mellem 20 og 40-50 kg/m³. Veitmans & Grinfelds (2016) har beskrevet dette for hhv. cellulose- og træfiberisolering og indikerer, at den faldende tendens aftager og skifter i området omkring 40-50 kg/m³. Kosiński & Patyna (2024) har redegjort for denne afhængighed som en parabellignende kurve, der viser, at varmeledningsevnen når sit minimum ved omkring 70 kg/m³ for celluloseisolering, 50 kg/m³ for træfiberisolering og 100 kg/m³ for mineraluld som løsfyld. Den nedadgående tendens i området mellem 20-40 kg/m³ ses bekræftet i materialedata fra den i VIGOT-projektet anvendte træfiberisolering, se figur 7. Derefter øges varmeledningsevnen igen med stigende densitet. Tupciauskas et al.

(2023) har dokumenteret en tilsvarende afhængighed for isoleringsmaterialer af årlige afgrøder såsom halm og tagrør. For halm er forholdet lineært stigende. Dette er også tilfældet for presset halm (Costes et al., 2017).

Ved valget af densiteten af løsfyldsisolering er det vigtigt også at tage højde for eventuel sætning i materialet i forhold til anvendelsen. Rasmussen (2001a) og Rasmussen (2001b) har beskrevet et formeludtryk til beregning af den nødvendige densitet som funktion af vægtykkelse, friktion og materialeegenskaber for at undgå sætning.



Figur 7. Varmeledningsevnen som funktion af densitet for en række løsfyldsmaterialer pba. litteratur og producentoplysninger. Det ses, at træfiber- og celluloseisolering følger en konveks form, mens halm og hampeskærver har en lineær afhængighed. Forskellene i kurveforløbene skyldes kompleksiteten af materialernes porestrukturer. Efter Kosiński & Patyna (2004), Veitmans & Grinfelds (2016) og Costes et al. (2017).

4.4.5 Egenskabernes samvirken

Temperatur, vandindhold og densitet påvirker hinanden i komplekse samspil, som kan forværre eller forbedre varmeledningsevnen afhængigt af forholdene. Et isoleringsmateriales deklarerede lambda-værdi vil således kun være retvisende det sted i isoleringsvolumenet, hvor temperaturen er 10 °C med et fugtindhold svarende til materialets fugtligevægt ved 23 °C og 50 % RF (DS/EN ISO 10456). Kosiński (2023) har vist, at denne tilstand typisk kun kan forventes at være til stede i 1/3 af isoleringen.

Jo varmere, desto højere bliver varmeledningen grundet de øgede molekulære bevægelser i porernes luftindhold. Mod den kolde side trækker forskellige faktorer i forskellige retninger: jo koldere, desto mere falder varmeledningen grundet lavere molekulær aktivitet. Samtidig øges vandindholdet grundet luftens lavere fugtkapacitet ved lave temperaturer, hvorved

varmeledningen stiger grundet den højere varmeledningsevne i vand end i luft. Af fuldskalaforsøget beskrevet i kap. 4.4.3 kan udledes, at faktorerne under operative forhold tilnærmelsesvis opvejer hinanden. I forsøget blev der registreret en minimal stigning i varmeledningsevnen (Nicolajsen, 2004).

På den varme side af et isoleringslag forringes materialets isoleringsevne, fordi indetemperaturen i de fleste anvendelser kan forventes at være over 10 °C. På den kolde side af et isoleringslag forringes materialets isoleringsevne i mindre grad, fordi luften i materialets porer bliver mere fugtig, hvorved varmeledningen stiger. Med øget densitet mindskes andelen af isolerende luft, hvilket imidlertid mindsker temperaturens indflydelse på varmeledningsevnen. Om end litteraturstudiet har vist, at vandindholdets betydning ikke er entydigt, kan isoleringens design-værdi i de fleste anvendelser forventes at afvige negativt fra det deklarerede. Design-værdien repræsenterer varmeledningsevnen under praktiske forhold, som materialet forventes at opleve i virkelige anvendelser.

5 Materialer og metode

5.1 Vægkonstruktioner

Vægkonstruktionerne undersøgt i denne rapport i rammerne af VIGOT-projektet er træskeletvægge og består hovedsageligt af biobaserede materialer, der kan nedbrydes, regenereres eller indgå som råmaterialer i produktionen af nye byggevarer. Alle vægge er udført med dampbremse af enten OSB4-plader eller kraftpapir. Væggene har U-værdier mellem 0,09 og 0,13 W/m²K og Z-værdiforhold mellem 0,5:8 (1:16) og 0,5:33 (1:66) - se kap. 5.1.1 *Oversigt* inkl. tabel 2 herefter.

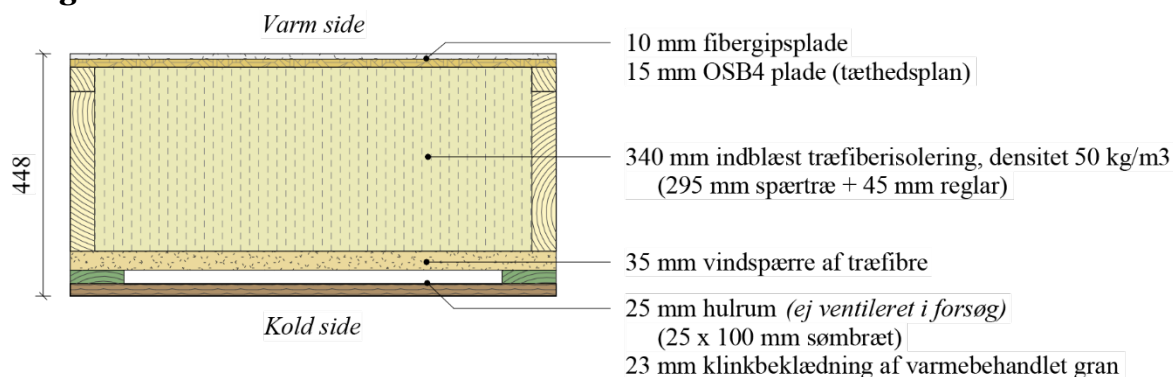
Konstruktionerne er udført som selvstændige vægelementer på 900 x 1775 mm og udført af hele plader og samlinger med fer og not for at opnå lufttæthed.

Alle vægge blev udført af tømrerlærlinge som led i VIGOT-projektets samarbejde med landets tømreruddannelser. Der blev ikke udarbejdet kvalitetsdokumentation af udførelsen.

I de følgende afsnit og kapitler gennemgås væggenes opbygning, deklarerede materialeegenskaber og testopstilling i hotboxen som oplyst af VIGOT.

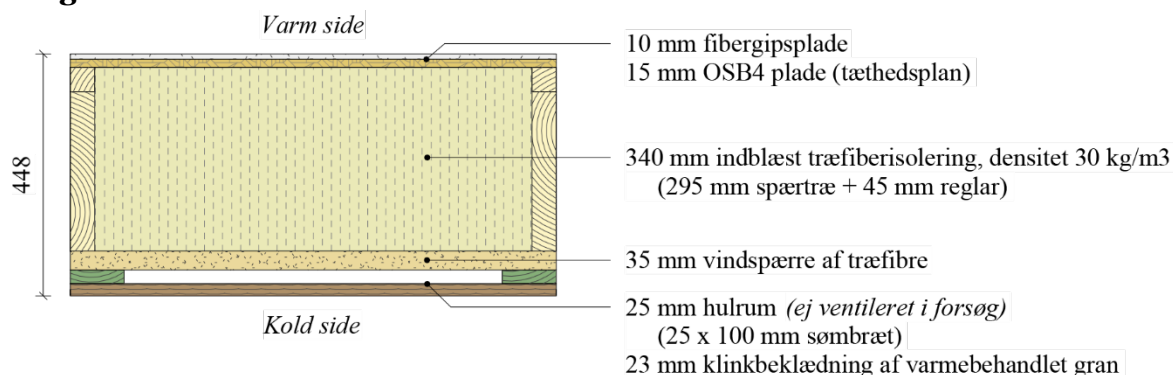
5.1.1 Oversigt

Væg 1



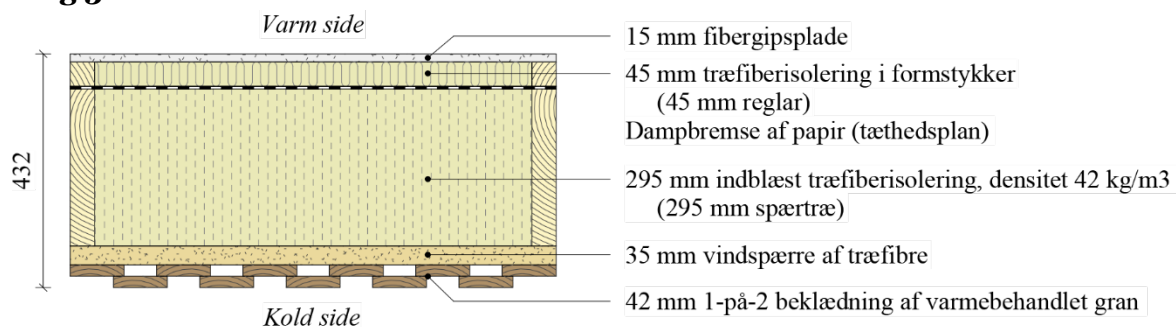
Figur 8. Karakteristika: dampbremse af OSB4-plade, varmeisolering af træfiber indblæst til sætningsfri densitet og med 2-trinstætnet regnskærm med fer og not.

Væg 2



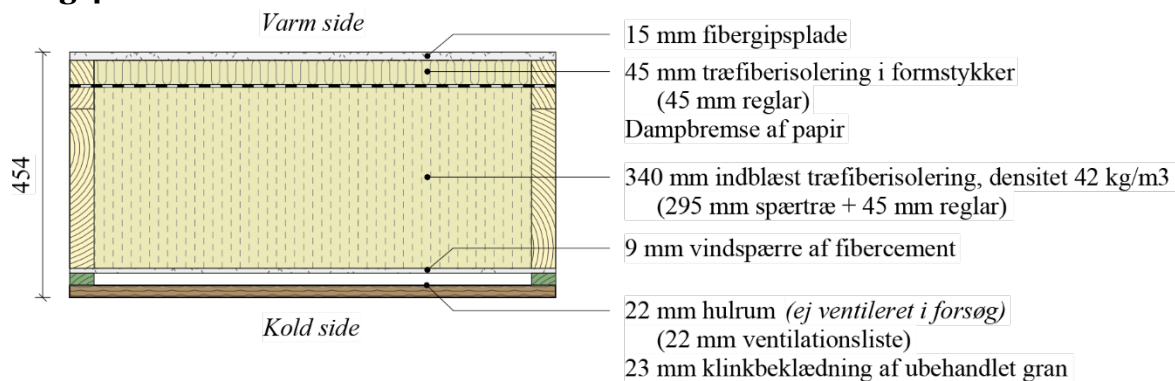
Figur 9. Karakteristika: dampbremse af OSB4-plade, varmeisolering af træfiber indblæst til meget lav densitet og med 2-trinstætnet regnskærm med fer og not.

Væg 3



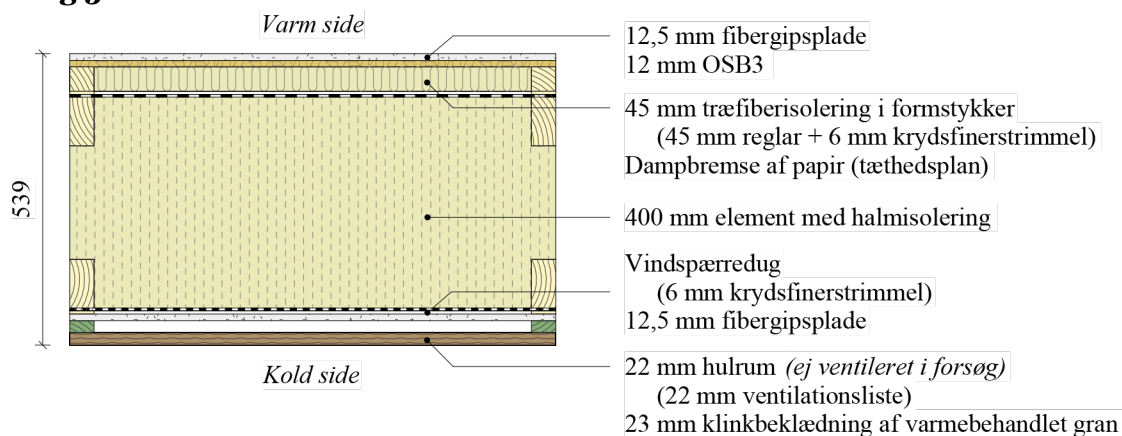
Figur 10. Karakteristika: dampbremse af papir, varmeisolering af træfiber indblæst til almindelig densitet og med varmebehandlet bræddebeklædning opsat direkte på organisk vindspærreplade.

Væg 4



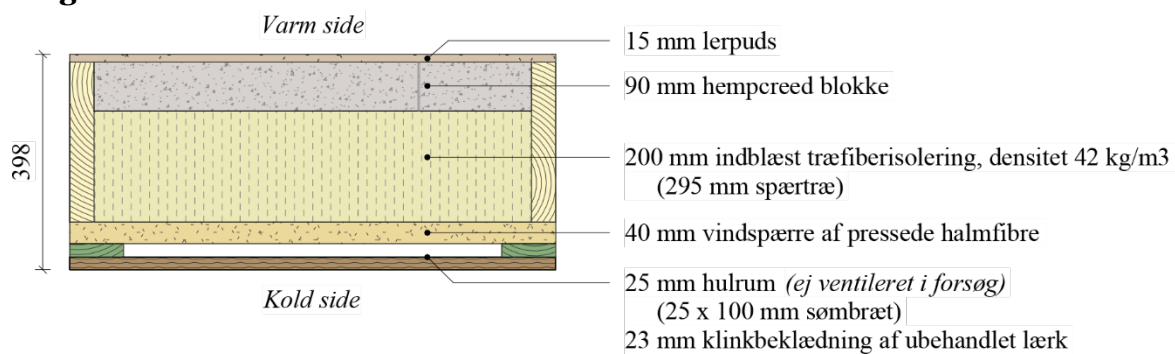
Figur 11. Karakteristika: dampbremse af papir, varmeisolering af træfiber indblæst til almindelig densitet, uorganisk vindspærreplade og med 2-trinstætnet regnskærm af klinkbeklædning.

Væg 5



Figur 12. Karakteristika: dampbremse af papir, varmeisolering af halm og træfiber, vindspærre af dug og uorganisk plade og med 2-trinstætnet regnskærm af klinkbeklædning.

Væg 6



Figur 13. Karakteristika: diffusionsåben, lufttæt konstruktion uden tæthedsplan.

Tabel 2. Egenskabsbaseret vægoversigt. Farvegrupper indikerer materialetyper på tværs af vægkonstruktioner. Lambda λ ,D er angivet som W/(m K). Z-værdier er angivet som GPa s m²/kg. Konstruktionstræ, reglar og klemlister er udeladt - se kap. 5.1 for komplette vægopbygninger.

Lag i væg	Vægopbygning					
	Nr. 1	Nr. 2	Nr. 3	Nr. 4	Nr. 5	Nr. 6
Regnskærm	23 mm træbeklædning m. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$	23 mm træbeklædning m. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$	21 mm træbeklædning u. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$	23 mm træbeklædning m. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$	21 mm træbeklædning m. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$	23 mm træbeklædning m. luftspalte $\lambda = 0,120$, $Z = 5,90$
Vindspærre	35 mm træfiberplade $\lambda = 0,044$, $Z = 0,54$	35 mm træfiberplade $\lambda = 0,044$, $Z = 0,54$	35 mm træfiberplade $\lambda = 0,044$, $Z = 0,54$	9 mm fibercementplade $\lambda, D = 0,34$, $Z = 1,7$	12,5 mm fibergipsplade $\lambda = 0,32$, $Z = 0,92$ Vindspærredug $Z = 0,114$	40 mm presset halmfiberplade $\lambda, D = 0,049$, $Z = 1,03$
Varmeisolering	340 mm indblæst træfiberiso. $\lambda = 0,037$, $\rho = 50$ kg/m ³	340 mm indblæst træfiberiso. $\lambda = 0,037$, $\rho = 30$ kg/m ³	245 mm indblæst træfiberiso. $\lambda = 0,037$, $\rho = 43$ kg/m ³	340 mm indblæst træfiberiso. $\lambda = 0,037$, $\rho = 43$ kg/m ³	400 mm element m. halmiso.	200 mm indblæst træfiberiso. $\lambda, D = 0,037$, $\rho = 43$ kg/m ³ 90 mm hempcrete blok $\lambda, D = 0,071$
Tæthedsplan	15 mm OSB4 plade m. fer/not $\lambda, D = 0,13$, $Z = 7,7$	15 mm OSB4 plade m. fer/not $\lambda, D = 0,13$, $Z = 7,7$	Dampbremse af papir $Z = 33$	Dampbremse af papir $Z = 33$	Dampbremse af papir $Z = 33$	-
Evt. påføring	-	-	45 mm træfiberiso. formstykker $\lambda, D = 0,038$	45 mm træfiberiso. formstykker $\lambda, D = 0,038$	45 mm træfiberiso. formstykker $\lambda, D = 0,038$	-
Indv. beklædning	10 mm fibergipsplade $\lambda, D = 0,32$	10 mm fibergipsplade $\lambda, D = 0,32$	15 mm fibergipsplade $\lambda, D = 0,32$	15 mm fibergipsplade $\lambda, D = 0,32$	12 mm OSB3 TG2 plade m. fer/not $\lambda = 0,13$, $Z = 7,5$ 12,5 mm fibergipsplade $\lambda = 0,32$	15 mm lerpuds $Z = 0,426-0,85$
Z-værdi-forhold	0,5:8 (1:16)	0,5:8 (1:16)	0,5:33 (1:66)	1,6:33 (1:21)	0,9:33 (1:36)	-
U-værdi	0,10	0,10	0,10	0,09	0,12	0,13

5.1.2 Deklarerede materialedata

Producenter angiver byggevarers materialeegenskaber i henhold til harmoniserede DS/EN-standarder eller en produktspecifik ETA (Europæisk Teknisk Vurdering). I tabel 3 nedenfor er deklarerede materialeegenskaber oplistet for vægge 1 og 3 på baggrund af producenternes datablade, ydeevnedeklarationer (DoP) og referenceværdier.

Tabel 3. Deklarerede materialeegenskaber for byggevarer anvendt i vægge 1 og 3. Værdier for dampdiffusionsmodstande angivet med kursiv er beregnet på baggrund af den deklarerede værdi (μ eller S_d). Deklarerede værdier for varmeledningsevne er angivet ved 10 °C iht. DS/EN ISO 10456.

Materialeegenskab		Regnskærm	Vindspærre	Varmeisolering		Tæthedsplan			Indv. beklædning
		Varmebeh. gran	TF plade	TF indblæst	TF formstykker	OSB4	Dampbremse af papir		Fibergipsplade
		<i>Væg 1 og 3</i>	<i>Væg 1 og 3</i>	<i>Væg 1 og 3</i>	<i>Væg 3</i>	<i>Væg 1</i>	<i>Væg 3</i>		<i>Væg 1 og 3</i>
							Dekl.	WUFI ³⁾	
Tykkelse	m	0,021 / 0,023	0,035	0,295 / 0,340	0,045	0,015	0,00025	0,001	0,010 / 0,015
Densitet	kg/m3	450	200	42-50	50	660	700	175	1125
Porøsitet	m3/m3	0,73 ¹⁾	0,98 ¹⁾	0,97 ¹⁾	0,97 ¹⁾	0,57 ¹⁾	-	0,6 ¹⁾	0,52 ¹⁾
Specifik varmekapacitet	J/kg K	1400 ¹⁾	2100	1400 ¹⁾	2000 ¹⁾	1400 ¹⁾	-	1500 ¹⁾	1200 ¹⁾
Varmeledningsevne λ,D	W/mK	0,11 / 0,13 ²⁾	0,044	0,037	0,038	0,12	-	-	0,32
Diff.modstandsfaktor μ	-	20 (våd) ²⁾	3	1,85	5 (tør)	100	25800	6450	13
Diffusionsmodstand, Sd	m	0,44	0,11	0,54 / 0,63	0,23	1,50	6,45	-	0,13 / 0,15
Diffusionsmodstand, Z	GPa s m²/kg	2,3	0,5	2,8-3,2	1,2	7,7	33,1	-	0,7-1

Noter

- 1) Værdier er ikke deklareret af producenten. I stedet er anvendt værdier fra tilsvarende produkter og/eller WUFI materialedatabasen.
- 2) Værdier er deklareret af producenten som værende standardværdier fra DS/EN 14915.
- 3) Værdier er omregnet el. angivet til anvendelse i WUFI og svarende til en lagtykkelse på 1 mm.

5.2 Hotbox og måleudstyr

Vægkonstruktionerne blev testet i Aalborg Universitets *Guarded Hot Box* hos BUILD - Institut for Byggeri, By og Miljø i Aalborg. Hotboxen er en todelt enhed, der består af to separate, varmeisolerede klimakamre og simulerer forskellige klimatiske forhold i hvert kammer. Det varme kammers vægge er konstrueret med isolerede og ventilerede hulrum, der opvarmes til samme temperatur som selve klimakammeret for at undgå varmestrøm mellem kammer og omgivelser (Veit & Johra, 2022). Typisk simuleres et inde- og udeklima i hhv. den varme og kolde side af hotboxen. I begge kamre styres temperatur og relativ luftfugtighed. På den kolde side kan også solstråling simuleres, hvilket imidlertid ikke var relevant i denne testopstilling.

Testemnet opbygges mod eller i hotboxens varme side, hvorefter det mobile, kolde kammer stødes op til emnet eller det varme kammer. Afhængigt af testopstilling og emnets beskaffenhed vil der kunne forekomme randeffekter som følge af varmepåvirkning fra omgivelserne - se figur 15. Hotboxen har et indvendigt mål på 3,6 x 3,6 m og kan simulere temperaturer mellem -30 °C til +80 °C (Johra, 2024).

I det kolde kammer omrøres luften vha. to loftmonterede ventilatorer, der er placeret bag en skærm, som retter luftstrømmen nedad ca. 1 m fra testemnet. Luften tilføres fugt vha. en befugter bag ventilatorerne, hvormed luften fortyndes.

Under forsøget var den ene ventilator ude af drift.



Figur 14. Aalborg Universitets *Guarded Hot Box* hos BUILD i Aalborg.

Til venstre: hotboxens to klimakamre. I midten ses testopstillingen mod det varme kammer.

Til højre: foto af det kolde kammer. I toppen ses ventilatorer og befugter. Under forsøget var den ene ventilator ude af drift.

5.2.1 Sensorer

Til måling af temperaturer (°C) og relative fugtigheder (% RF) i vægkonstruktionerne blev anvendt sensorer af mærket Sonoff SNZB-02, som måler temperaturer ml. -10 °C til +40 °C med en nøjagtighed på $\pm 0,5$ °C og RF mellem 10 % til 90 % med en nøjagtighed på ± 3 % RF. Målenøjagtigheden over 90 % RF er ukendt.

Til målinger på væggenes overflader blev ligeledes anvendt Sonoff SNZB-02 sensorer samt den nyere model SNZB-02P, der har en større målenøjagtighed. Denne måler med en nøjagtighed på $\pm 0,2$ °C mellem -10 °C til +60 °C og ± 2 % RF mellem 10 % til 95 % RF. Målenøjagtigheden over 95 % RF er ukendt.

Forud for forsøget blev sensorerne gruppekalibreret af BUILD.

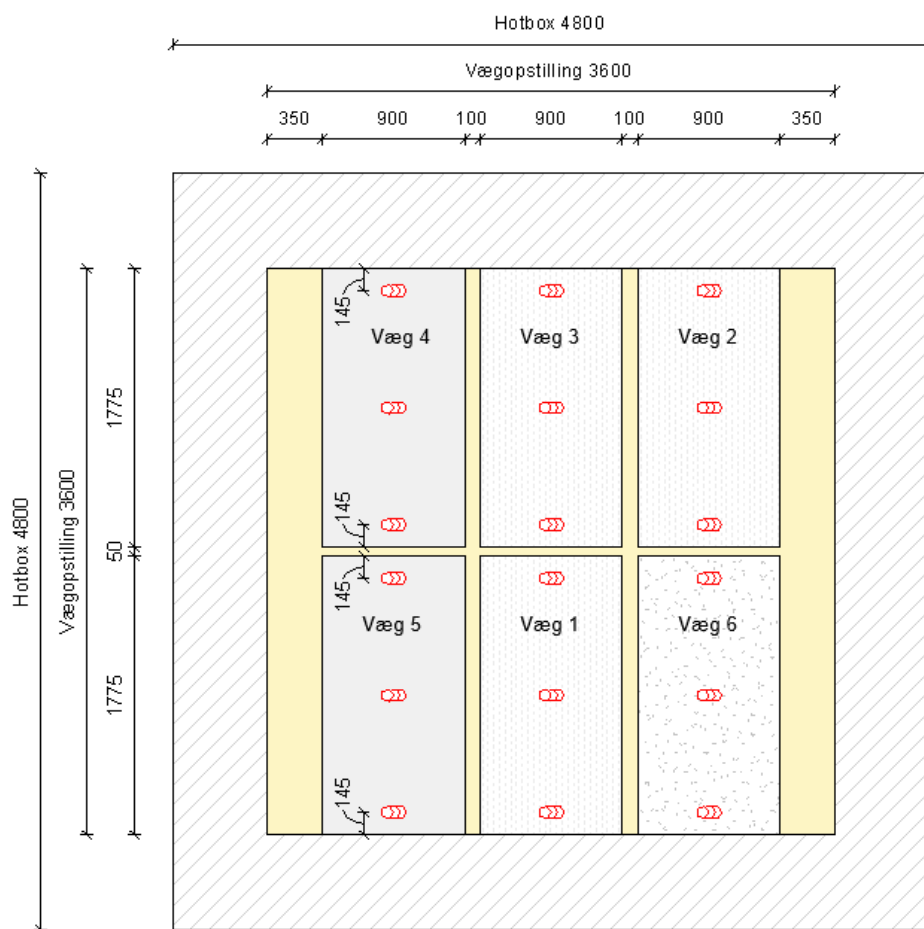
5.3 Testopstilling i hotbox

5.3.1 Væg- og sensorplaceringer

Vægelementerne blev i forbindelse med hotbox-forsøget opstillet og sammenbygget som sammenhængende, tæt klimaskærm på 3,6 x 3,6 m mellem hotboxens to kamre.

Vægelementerne blev adskilt og på siderne isoleret med ekstruderet polystyren (EPS) i varierende tykkelser. Opstillingens over- og underside blev ikke isoleret og var dermed udsat for randeffekter i form af varmepåvirkning fra laboratoriets indeklima. Hele opstillingen blev indrammet af fuget krydsfiner på både de eksponerede sider, som ikke var dækket af hotboxen, samt for- og bagside, der var i kontakt med hotboxens to klimakamre. Opstillingen er illustreret i figur 15 og vist i figur 14.

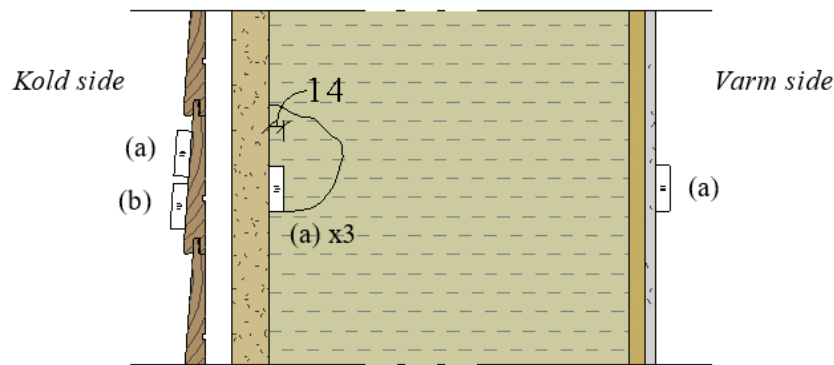
På den kolde side blev regnskærmenes sider (venstre/højre) fuget mod EPS for at sikre konstruktionerne mod et utilsigtet højt luftskifte i luftspalterne. På den varme side blev overgange mellem vægge og EPS ikke forseglet yderligere.



Figur 15. Opstalt af testopstillingen, der blev udført mellem hotboxens to klimakamre. Væggene er vist fra udvendig side. De gule felter angiver EPS-isolering mellem og omkring vægelementerne. Det ses, at den samlede vægkonstruktion ikke var isoleret mod bund og top. De røde symboler angiver placeringer og antal af målesensorer bag vindspærrepladerne. For hver væg blev der placeret tre sensorer i hhv. toppen, midten og bunden af konstruktionen. De sammenfaldende placeringer var valgt for at kunne validere måledata. Sensorerne i vægelementernes bund og top blev placeret ca. 10 cm fra remmenes inderside.

Indbyggede sensorer blev placeret bag vindspærrepladerne for at måle de hygrotermiske forhold i skillelaget på isoleringsmaterialernes forside. Se figur 16. Denne placering blev valgt af hensyn til den efterfølgende modelkalibrering, da målinger på vindspærrepladernes forsider ikke ville have været kvantificerbare på grund af luftspalterne. Under realistiske betingelser og ved brug af biobaserede vindspærreplader vil det mest udsatte punkt være på pladens forside, mens det ved brug af f.eks. cementbaserede vindspærreplader vil være på forsiden af isoleringsmaterialet bag vindspærrepladen. Her vil fugt under de rette betingelser kunne medføre skimmelvækst. Indbygningen af sensorerne blev foretaget umiddelbart inden opsætning af testopstillingen og er dokumenteret i bilag A. Indbygningen skete ved at bore kophuller i spærtræsrammerne og midlertidigt fjerne isoleringsmateriale. Sensorerne blev derefter anbragt i bundter af tre bag vindspærrepladerne. Al isolering blev genplaceret, inden hullerne blev lukket og forseglet med akrylfuge. Ligeledes blev alle materialeovergange og revner fuget for at undgå fugttransport ind i konstruktionerne. Under anbringelsen af sensorerne blev det konstateret, at indblæst isolering med densitet på 30 kg/m^3 i væg 2 havde sat sig. Sensorerne blev ikke mekanisk fastgjort eller klæbet til vindspærrepladerne, men fastholdt af det stoppede isoleringsmateriale. Sensorernes faktiske placering var derfor behæftet med en mindre usikkerhed.

Overfladesensorer blev placeret på hhv. regnskærme og indvendige vægoverflader for at måle de hygrotermiske forhold omkring de enkelte vægelementer - se figur 16. På væggenes indvendige overflader blev placeret en sensor per væg. På væggenes udvendige overflader blev placeret to sensorer per væg med undtagelse af væg 1, der kun havde placeret én. Sensorerne blev monteret i midten af vægelementerne for at generere det mest retvisende datagrundlag. Afhængigt af elementernes specifikke placeringer i forhold til varmelegeme og ventilator kan forholdene variere på tværs af hotboxen. Dette er nærmere beskrevet i 5.3.3 *Randbetingelser*. Data fra vægelementernes overfladesensorer blev brugt til at fastsætte de faktiske randbetingelser for hver konstruktion og generere klimafilere til de efterfølgende modelkalibreringer.



Figur 16. Principskitse af sensorplaceringerne. Mærkerne (a) og (b) angiver sensortyperne SNZB-02 og SNZB-02P beskrevet under kap. 5.2 *Hotbox og måleudstyr*. Væg 1 havde kun placeret en enkelt sensor (a) på regnskærmen. De indbyggede sensorer blev placeret løst op ad vindspærrepladerne, inden isoleringsmaterialerne blev genplaceret og stoppet. Sensorernes nøjagtige placeringer var dermed ikke kvalificerbare og derfor behæftet med en mindre usikkerhed. Målangivelsen fra vindspærren til sensorernes bagside er således idealiseret.

Rumfølere blev placeret i de to kamre til brug for styring af temperaturer og relative luftfugtigheder i hotboxen. Styringsdata fra hotboxen viste generelt overensstemmelse med de målte data på væggenes forsider og er ikke yderligere behandlet.



Figur 17. Foto af testopstillingen. Billedet viser de sammenbyggede vægge opbygget mod hotboxens varme side. Det kolde kammer blev derefter placeret op imod den fugede krydsfinerramme.

5.3.2 Tæthedsplan og fugttransport

Vægelementernes opbygning af hele plader med lufttætte samlinger og forseglede revner og materialeovergange betød, at konstruktionerne under forudsætning af korrekt udførelse udelukkende blev udsat for en ensidig fugtpåvirkning ved diffusion gennem tæthedsplanet. Fugttransport ved konvektion, der som beskrevet i kap. 4.3.2 spiller en afgørende rolle i praksis, var således ikke at regne som en faktor i dette testregime.

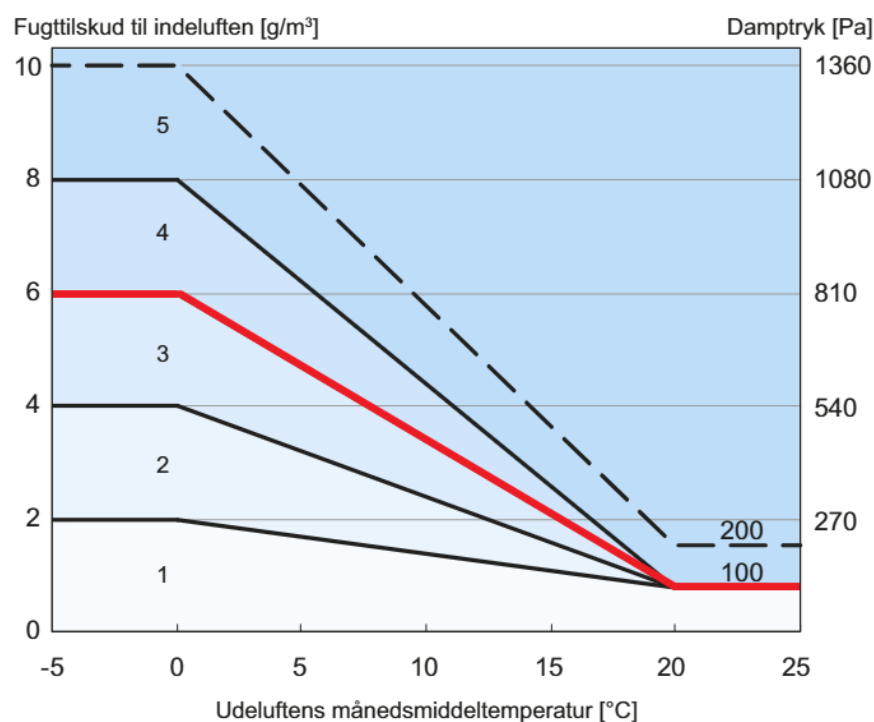
Luftspalter mellem vindspærreplader og regnskærm var ligeledes tættnede i siderne og var minimale i bund og top, hvilket betød, at der ikke kunne regnes med omrøring i hulrummene. Ved nedtagning af forsøget blev det konstateret, at klink- samt fer og not-beklædninger i regnskærmene var deformeret og sammenklemt som følge af opfugtning. Det betød, at heller ikke naturligt forekommende sprækker og samlinger i regnskærmene har bidraget til luftskifte i hulrummet mellem beklædning og vindspærre. Hulrum, der i praksis vil kunne forventes at være ventilerede som følge af en luftstrøm, bidrog i dette forsøg således ikke til at fjerne indefrakommende vanddamp. Dermed var det i altovervejende grad kun væggenes materialeegenskaber samt materialernes indbyrdes samvirken, der under påvirkning af forsøgets randbetingelser forventes at have betydning for fugtforholdene bag vindspærrepladerne. På denne måde blev der opnået kvalificerbare forudsætninger for at benytte forsøgets måledata som grundlag for den efterfølgende modelkalibrering.

5.3.3 Randbetingelser

Klimaet på væggenes indvendige side blev påvirket med 20 °C og 58 % RF, svarende til den øvre grænse for fugtbelastningsklasse (FBK) 3 og et fugttilskud til indeklimaet på 6 g/m³ (Brandt et al., 2013, tabel 4) - se figur 18. Fugtbelastningsklassen dækker således også FBK 1 og 2 og rummer dermed alle boligsituationer.

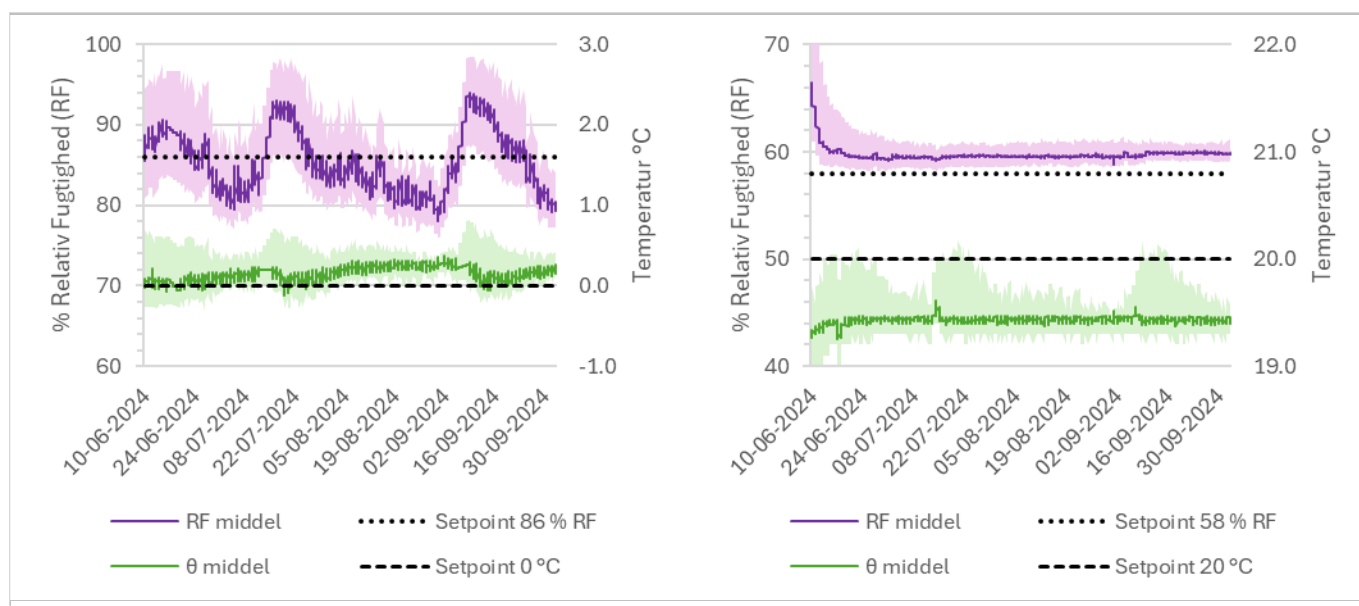
Klimaet på væggenes udvendige side blev styret efter en påvirkning på 0 °C og 86 % RF, svarende til den maksimale teoretiske damptryksforskel mellem ude og inde ved FBK 3 i de kolde måneder. Den relative fugtighed fremkommer som produkt af luftens vandindhold, når fugttilskuddet fratrækkes det maksimale vanddampindhold i indeklimaet.

Væggene blev påvirket med randbetingelserne i fire måneder, svarende til omtrent et års vinter.



Figur 18. Forventede fugttilskud til indeluften som funktion af fugtbelastningsklasse og udetemperatur. Den røde streg markerer den øvre grænse for FBK 3 og angiver fugttilskuddet på 6 g/m³, der blev benyttet i VIGOT-forsøgene og modelkalibrering samt dynamiske simuleringer i denne rapport. Jo højere udetemperaturen bliver, jo mere forventes den naturlige ventilation at stige, og jo mere falder fugttilskuddet grundet tiltagende luftskifte (Brandt et al., 2023a, figur 33).

Måledata fra overfladesensorerne viser, at de faktiske randbetingelser i de to kamre lå inden for gennemsnitligt 0,1 °C og 0,5 % RF af middelværdierne i det kolde kammer og gennemsnitligt 0,6 °C og 1,7 % RF af middelværdierne i det varme kammer.



Figur 19. Gennemsnitlige overfladetemperaturer og setpoints i det kolde og det varme kammer. Fladerne angiver intervallerne af målingerne.

5.4 Håndtering af hotbox-data

5.4.1 Anvendelse af data

Måledata fra forsøgets sensorer anvendes til forskellige formål;

- Data fra overfladesensorerne benyttes til at generere udvendige og indvendige klimafilere til modelkalibreringen i WUFI.
 - Data fra de indbyggede sensorer anvendes som referenceværdi for kalibreringen af de hygrotermiske simuleringer. Dette er nærmere beskrevet i det følgende kap. 5.5.
- Modelkalibrering på baggrund af stationære hotbox-forsøg.*

5.4.2 Datagrundlag (rådata)

Forsøgets måledata er genereret af de sensorer, der er beskrevet i kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer* og indeholder målinger bag væggenes vindspærreplader samt på ind- og udvendige vægoverflader. Målingerne af temperaturer og relative fugtigheder er foretaget og angivet i timeskridt med én decimal.

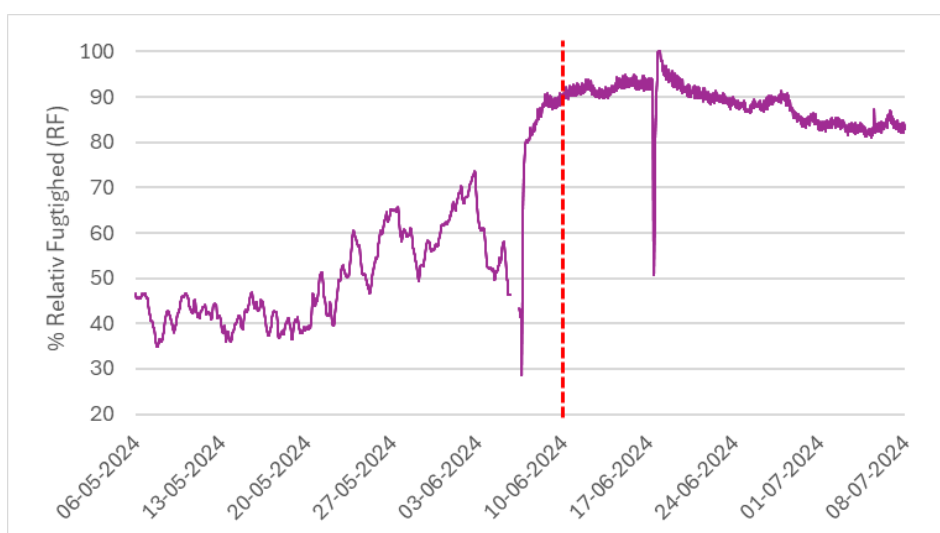
Dataudtrækket til brug i modelkalibreringen er foretaget d. 3. okt. 2024 og indeholder sensordata fra perioden 8. feb.-3. okt. 2024. Påvirkningen til randbetingelserne beskrevet blev startet d. 6. juni 2024. I tidsrummet fra d. 8. feb., hvor væggene blev anbragt i testopstillingen, til forsøgsstart d. 6. juni, var væggene påvirket med gennemsnitlig 21 °C og 38 % RF på begge sider. Forsøgets start blev ifølge VIGOT forsinket af tekniske udfordringer. Hotbox-forsøget er kørt t.o.m. 11. okt. 2024.

5.4.3 Datahåndtering og -udvælgelse

Datagrundlaget beskrevet i det ovenstående er blevet tilpasset mhp. at definere det mest retvisende datasæt til den efterfølgende modelkalibrering. Data er fjernet og tilpasset for at begrænse usikkerheder, der måtte ligge ud over materialelagenes hygrotermiske egenskaber samt kammerforholdene i forsøgsopstillingen. Alle tilpasninger er beskrevet i de følgende punkter;

Måleperiode

Datasættet er blevet reduceret til den tidsperiode, hvor randbetingelserne var aktive, og sensordata havde stabiliseret sig efter den indledende påvirkning, se figur 20. Alle data frem til d. 10. juni er således kasseret. Perioden fra tidspunktet for dataudtrækket d. 3. okt. indtil forsøgets afslutning d. 11. okt. er ikke indeholdt i de data, der er anvendt til modelkalibreringen. De forhåndenværende data blev vurderet som værende tilstrækkeligt repræsentative.

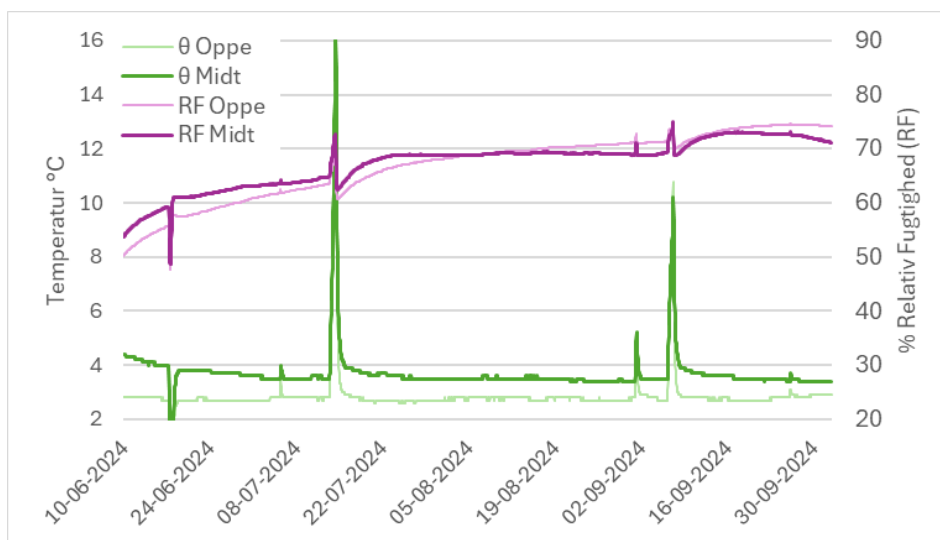


Figur 20. Målinger af relativ fugtighed i det kolde kammer på overfladen af væg 1, før og efter væggene blev påvirket til randbetingelserne d. 6. juni. Den røde streg markerer den 10. juni, hvor alle målinger havde stabiliseret sig. Måledata op til da er blevet kasseret og ikke anvendt i den efterfølgende modelkalibrering. Håndteringen af udsving i datasættet er beskrevet i det efterfølgende under *Fluktuationer*.

Målepunkter bag vindspærreplader (indbyggede sensorer)

Datasættet indeholder samtlige målepunkter bag vindspærreplader (Oppe, Midt, Nede) beskrevet under kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*. Målepunkterne og tilhørende måledata er forskelligartet, idet de kan være påvirket af randeffekter og kuldebroer som følge af løsfyldsisolering, der har sat sig - se figur 21. I rammerne af denne rapport og dens afgrænsning er det anvendte datasæt begrænset til målinger foretaget i midten af væggene. Denne placering er valgt for at benytte de måledata med den mindste risiko for uønskede påvirkninger.

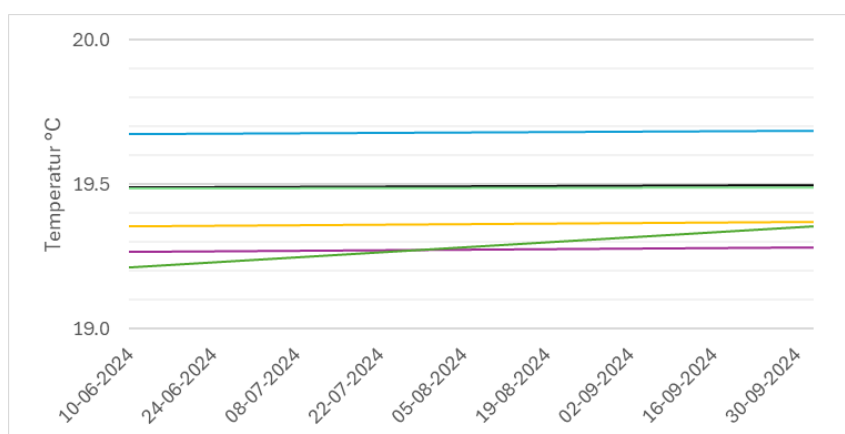
Bemærk: De fravalgte målepunkter indeholder data med temperatursæt, som afspejler divergerende omstændigheder afhængigt af konstruktionernes beskaffenhed og placering i testopstillingen. Målepunkterne kan dermed indgå i modelkalibreringen som en valideringsmetode. Dette er der ikke fundet incitament til i nærværende rapport.



Figur 21. Målinger af temperatur og relativ fugtighed bag vindspærrepladen hhv. Oppe og Midt i væg 3. Det ses, at temperaturgradienten ligger omtrent 1 °C højere i toppen end i midten af væggen. Det skyldes randeffekter som følge af væggens placering mod den uisolerede kant. Se vægplaceringerne i testopstillingen under kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*. Håndteringen af udsving i datasættet er beskrevet i det efterfølgende under *Fluktuationer*.

Målepunkter på vægoverflader (overfladesensorer)

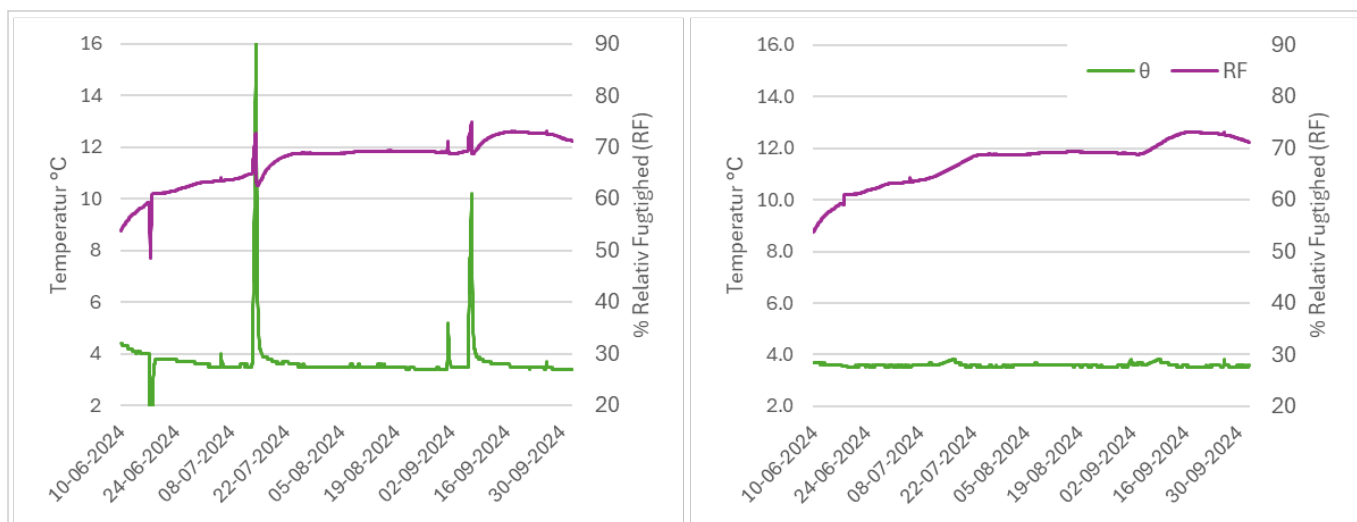
Datasættet indeholder alle måledata fra overfladesensorerne. Målingerne bruges som grundlag for både de udvendige og indvendige klimafilere til simuleringerne i WUFI og genereres individuelt for hver væg. På vægge 2-6 er respektivt anvendt to sensorer med forskellig målenøjagtighed på regnskærmen på den kolde side, se kap. 5.3.1. For disse beregnes det vægtede gennemsnit mhp. at give en bedre repræsentation af den sande værdi og mindske effekten af måleusikkerheden fra den mindst præcise sensor. På væg 1 er anvendt en enkelt sensor på regnskærmen. På alle vægge er anvendt en enkelt sensor på vægoverfladerne på den varme side. Data fra målepunkter bestående af en enkelt sensor er valideret ved at kontrollere, at måledata lå indenfor 0,5 °C af hinanden, svarende til sensorens målenøjagtighed - se figur 22.



Figur 22. Målinger af temperaturer på væggenes overflader i det varme kammer, vist som lineære tendenslinjer. Det ses, at tendenslinjernes hældning lå inden for 0,5 °C af hinanden, svarende til de anvendte sensorers målenøjagtighed. Alle seks målinger er derfor vurderet egnede som grundlag for indvendige klimafilere til modelkalibreringen.

Fluktuationer

Datasættet indeholder udsving, der kan tilbageføres til forstyrrelser i hotbox-styringen eller eksterne påvirkninger, som kortvarigt har påvirket de hygrotermiske forhold (f.eks. at døren til et kammer er blevet åbnet). Hvor dette er blevet identificeret, er stærkt afvigende måledata blevet erstattet med interpolerede værdier mellem datapunkterne omkring fluktuationerne. Datasæt med og uden interpolerede værdier er anvendt som separate klimafilere til kontrol af fluktuationernes påvirkning af de efterfølgende kurveforløb. Dette er beskrevet nærmere i det følgende kapitel.



Figur 23. Til venstre: ukorrigeret datasæt med fluktuationer. Til højre: korrigeret datasæt.

Håndtering af måledata uden for sensorers måleområde

Hvor måledata ligger uden for sensorernes måleområder, er der taget særskilt stilling til datakvalitet og vægtning. Producenten af sensorerne oplyser målenøjagtigheden indenfor et defineret måleområde, men oplyser ikke nøjagtigheden uden for dette. Data, der overskrider i de kap. 5.2 oplistede måleområder, også kaldet *outliers*, kan derfor i ukendt grad være fejlbehæftet.

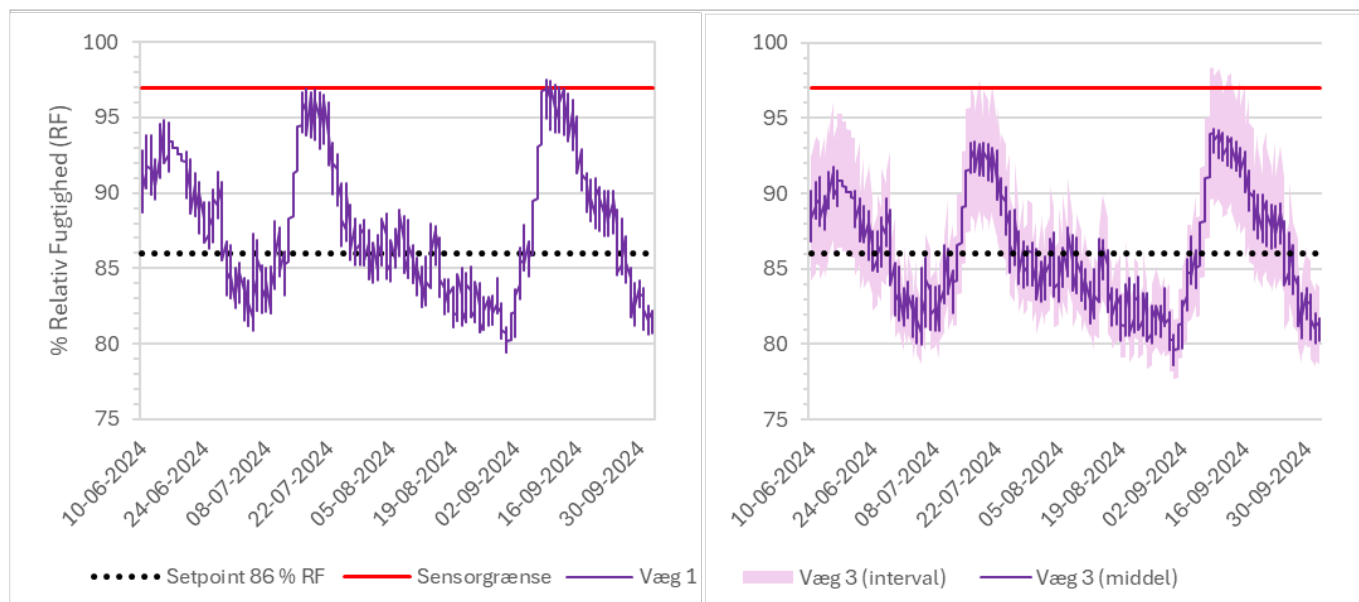
Outliers kan ifølge statistisk teori håndteres ved enten at inkludere data (når overskridelserne kan sandsynliggøres), kassere data (når overskridelserne er tydeligt fejlbehæftede) eller windsorisere data, hvor målinger uden for måleområdet eller uden for et pålideligt el. defineret område justeres til nærmeste grænse for dette område (når overskridelser ønskes bevaret med lavere vægtning).

Eksempel på windsorisering: En måling på 98,8 % RF nedskrives til 97 % RF, fordi sensorens oplyste målenøjagtighed kun gælder op til 95 % RF (± 2 % RF). Denne tilgang kan anvendes for at sikre, at de indsamlede data holder sig inden for et område med kendt målenøjagtighed.

Valget afhænger af konteksten, datamængden og hvad analysen skal bruges til. I rammerne af dette forsøg vil målinger af relativ fugtighed, der bevæger sig over for det hygroskopiske område (>98 % RF), kunne have væsentlig indflydelse på materialernes hygroskopiske egenskaber. Det hygroskopiske område betegner det interval, hvor fugt vil være bundet i porestrukturen og materialet kan udveksle vanddamp med omgivelserne, uden at der sker

kapillarkondensation i form af frit vand (Brandt et al., 2023a, s. 36). Dette er også udtrykt i et materiales sorptionskurve, se kap. 4.3.1 *Karakteristika af biogene materialer*.

Af figur 24 fremgår, at de målte *outliers* over 97 % RF (måleområdet på 95 % $\pm$ 2 % RF målenøjagtighed) er få og følger kurvernes overordnede tendenser. Af denne årsag, samt den potentielle betydning af målinger i udkanten af det hygroskopiske område, inkluderes målte *outliers* i datasættet.



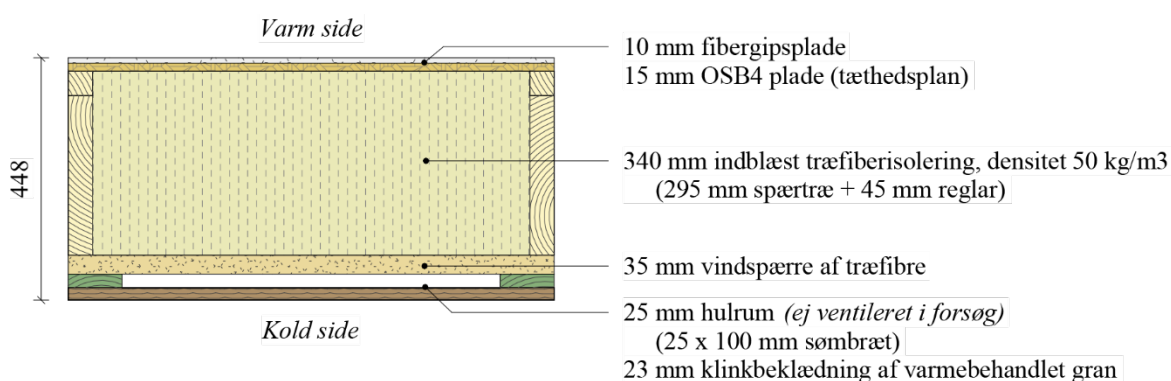
Figur 24. Målinger af relativ fugtighed (RF) på overfladerne af væg 1 og 3. RF blev målt af hhv. en og to sensorer som beskrevet i kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*. Det ses, at der på overfladen af begge vægge blev målt relative fugtigheder, der overstiger det måleområde, som producenten oplyser målenøjagtigheden for.

5.5 Modelkalibrering på baggrund af stationære hotbox-forsøg

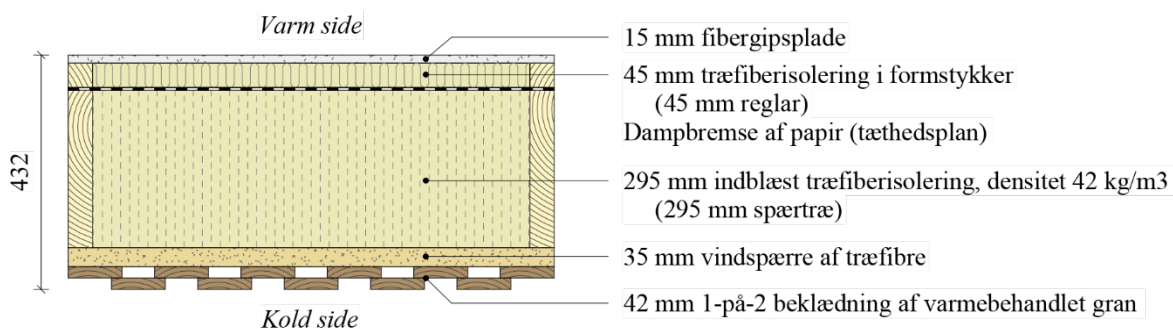
De eksperimentelle data fra VIGOT-projektets stationære hotbox-forsøg anvendes til at kalibrere hygrotermiske simuleringsmodeller i nærværende projekt. Formålet med modelkalibreringen er at opsætte modeller, der simulerer kurveforløb for temperatur og relativ fugtighed svarende til de målte data, og dermed identificere korrelationerne mellem forsøg og simuleringer. Denne viden bruges efterfølgende til at simulere væggenes performance under dynamiske betingelser.

Iht. projektets afgrænsning beregnes væggene 1 og 3, der er vist i plansnit herunder;

Opbygning af væg 1

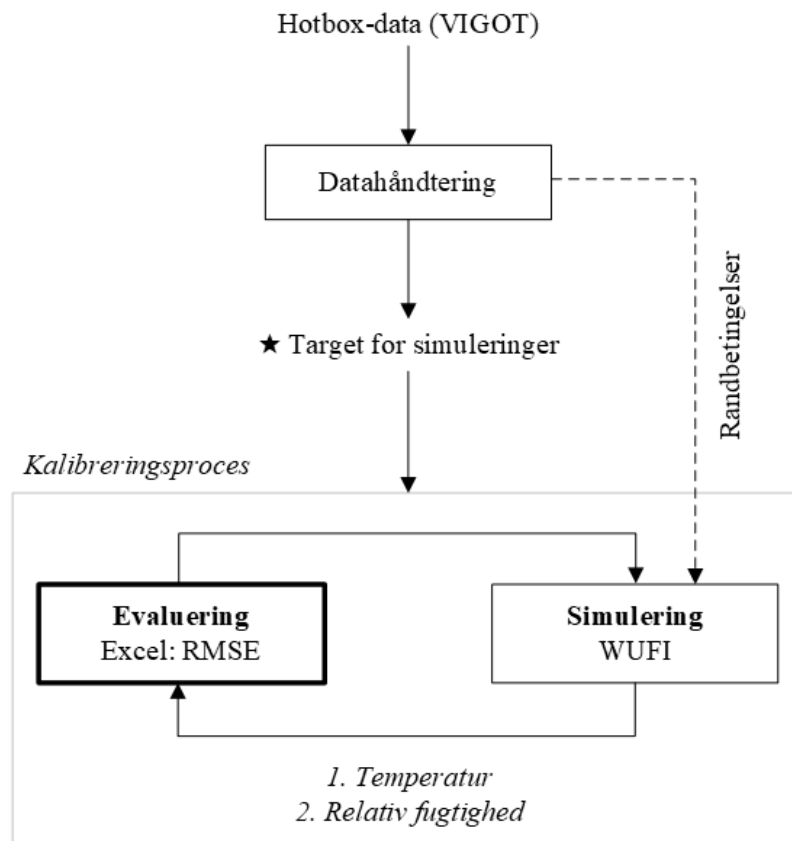


Opbygning af væg 3



5.5.1 Fremgangsmåde

Den overordnede fremgangsmåde er illustreret herunder og består af datahåndtering, simuleringer og evaluering af de stationære beregninger;



Figur 25. Fremgangsmåde for modelkalibrering. Diagrammet viser den overordnede procedure og sammenhænge mellem måledata og simuleringer.

Datahåndtering

Rådata fra VIGOT-forsøgene tilpasses i forhold til måleperiode, målepunkter, fluktuationer og outliers som beskrevet under kap. 5.4.3 *Datahåndtering og -udvælgelse*. De korrigerede datasæt overføres til regneark i Excel som referenceværdier for hver væg, der undersøges. Måledata fra overfladesensorerne eksporteres til brug som randbetingelser i form af klimafilere til den efterfølgende simulering i WUFI.

Simulering

Væggene opsættes i WUFI med de deklarerede materialeegenskaber beskrevet under kap. 5.1.1 *Deklarerede materialeegenskaber*. Dernæst følger en iterationsproces, hvor modellerne kalibreres i definerede skridt og parametervariationer mhp. at få de simulerede og målte kurveprofiler til at stemme overens. Modellerne kalibreres først mod temperaturen. Det skyldes, at temperaturen har en væsentligt større indflydelse på den relative fugtighed, end relativ fugtighed har på temperaturen (Brandt et al., 2023a). I andet skridt itereres efter kohærens mellem kurverne for relativ fugtighed. Iterationerne evalueres løbende op imod de målte data. Simuleringsmetoden og parametervariationerne er særskilt beskrevet i de følgende kapitler.

Evaluering

Simuleringerne eksporteres og evalueres ved hjælp af regneark i Excel. Evalueringen foretages primært kvantitativt med evalueringsmålet RMSE og sekundært visuelt gennem sammenligning af kurveprofilerne inden for rammerne af måleusikkerheden. Dette er nærmere beskrevet under 5.5.7 *Evalueringsmetode*.

5.5.2 Simuleringsmetode

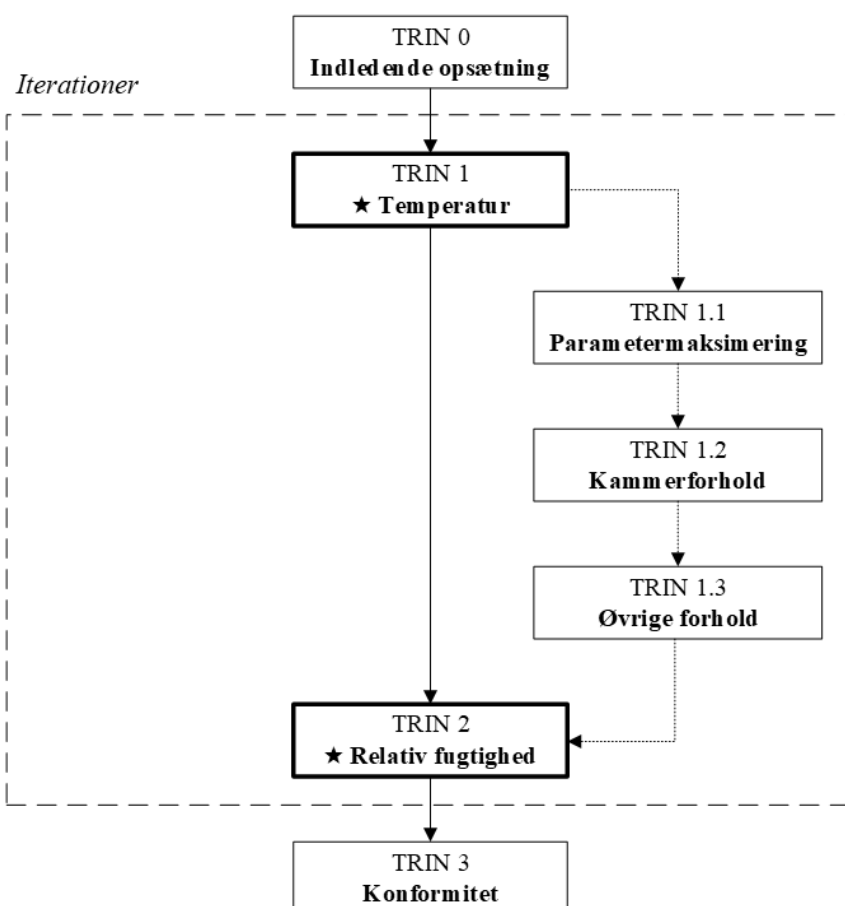
Simuleringerne udføres iht. DS/EN ISO 13788 under hensyntagen til de forsøgsspecifikke forhold i hotboxen.

Software

Simuleringerne er foretaget med WUFI Pro, version 6.8.

Kalibreringsproces

Kalibreringsprocessen foretages iterativt og er illustreret i figur 26 herunder. Processen er beskrevet i det efterfølgende.



Figur 26. Kalibreringsprocessen i WUFI. Diagrammet viser processen opdelt i trin, der gentages for hver væg. Det ses, at der først itereres efter overensstemmelse mellem temperaturkurverne, derefter relativ fugtighed.

TRIN 0: Indledende opsætning og variantanalyser

Opsætning af konstruktion (*assembly*)

- Variantanalyse for bedst egnede materialer i WUFIs materialedatabase.
- Tilpasning af WUFI-materialer iht. deklarerede materialedata.

Opsætning af randbetingelser vha. klimafilere genereret af måledata

Opsætning af basisindstillinger (beregningstæthed, overgangsisolanser mv.)

Test af klimafilere med og uden fluktuationer

TRIN 1: Temperatur

- ★ Parametervariationer - se kap. 5.5.5

(Hvis referenceværdierne ikke kan rammes inden for rammerne af parametervariationerne:)

TRIN 1.1: Parametermaksimering "hvad skal der til"

Midlertidige ændringer af isoleringsmaterialernes lambda-værdier for at undersøge, hvad varmeledningen teoretisk skal ændres til for at opnå tilstrækkelig kohærens med måledata. Dette foretages udelukkende for løsfyldsisoleringer grundet større marginer som følge af indblæst densitet.

TRIN 1.2: Kammerforhold (overgangsisolanser)

Kræver parametermaksimeringen urealistisk høje/lave lambda-værdier, er der belæg for at vurdere kammerforholdene og potentielle påvirkninger af overgangsisolanserne. Se kap. 5.5.6.

TRIN 1.3: Øvrige forhold i testopstillingen

Vurderes kammerforholdene at være korrekte uden el. efter justering, er der grundlag for at overveje *sandsynlige afvigelser* i testopstillingen (f.eks. sensorplaceringer), som ikke kan kvantificeres gennem beregninger eller analyser.

TRIN 2: Relativ fugtighed

- ★ Parametervariationer - se kap. 5.5.5

TRIN 3: Konformitet mellem simulerede vægge

Når alle simulerede vægge har opnået de korrekte kurveprofiler, foretages der iterationer mhp. at ensrette relevante materialeegenskaber på tværs af væggene.

5.5.3 Modelopsætning

Modelopsætningerne for de beregnede vægge er dokumenteret i bilag B.

Bemærk, at modelopsætningen for væg 3 er foretaget med udgangspunkt i den kalibrerede væg 1. Det betyder, at itererede design-værdier for materialer, der går igen imellem væggene, har dannet udgangspunkt for modelkalibreringen af væg 3.

Udvalgte indstillinger

Overgangsisolanser (fane *Surface Transfer Coeff.*) er indstillet iht. DS 418 (0,04 og 0,13 m²K/W for hhv. den kolde og varme side).

Startbetingelserne (fane *Initial Conditions*) i form af temperatur (°C) og relativ fugtighed [-] er for hver simulering indstillet svarende til værdierne af de første målinger bag vindspærrepladerne i de tilpassede datasæt.

Kamerapunktet (fane *Assembly*) er placeret yderst i et separat, 1 mm lag af isoleringen.

5.5.4 Materialer i beregningerne

Modellerne er sat op med udgangspunkt i standardmaterialerne i WUFIs materialedatabase. Materialerne er udvalgt gennem variantanalyser efter bedst mulige overensstemmelse med de deklarerede materialeegenskaber oplistet i tabel 2 under kap. 5.1.1. Udvælgelsen er foretaget efter materialets struktur (f.eks. løsfyld eller formstykker) og med følgende prioritering;

Varmeisolerende materialer * (herunder isolerende vindspærreplader):

- ★ Varmeledningsevne [W/mK]
- 2. Densitet [kg/m³]
- 3. Dampdiffusionsmodstandsfaktor μ [-]
- 4. Porøsitet [m³/m³]
- 5. Specifik varmekapacitet [J/kg K]

Øvrige materialer:

- ★ Dampdiffusionsmodstandsfaktor m_v [-]
- 2. Densitet [kg/m³]
- 3. Varmeledningsevne [W/mK]
- 4. Porøsitet [m³/m³]
- 5. Specifik varmekapacitet [J/kg K]

hvor stjernemarkerede egenskaber er de dominerende markører.

** Note: Materialernes sorptionskurver er ikke indgået i udvælgelsen. Det skyldes, at kun få eller ingen af producenterne af de anvendte byggevarer oplyser disse. Sorptionskurver udtrykker materialernes fugtkapacitet ved forskellige relative luftfugtigheder og har dermed indirekte indflydelse på materialets varmeisolerende egenskab. Materialeegenskaber som densitet og porøsitet har imidlertid betydning for sorptionskurverne; på den baggrund vurderes de foroven oplistede parametre at være tilstrækkelige for udvælgelsen. Sorptionskurver er beskrevet nærmere under kap. 4.3.1 Karakteristika af biogene materialer.*

På baggrund af variantanalyserne er de valgte WUFI-standardmaterialer kopieret og designværdierne modificeret efter de deklarerede værdier. Værdierne er editeret efter nedenstående, prioriterede grundlag. Hvor specifikke materialeegenskaber ikke er oplyst af producenten, er værdier fra tilsvarende byggevarer - og successivt fra litteraturen - blevet anvendt. Materialer og værdier er oplistet i bilag D.

1. Producentens datablade og/eller ydeevnedeklarationer (DoP)
2. Tilsvarende byggevarer
3. Standarder (eksempel: DS/EN 14915 vedr. massive træbeklædninger)
4. Alment Teknisk Fælleseje og anden faglitteratur
5. Øvrige materialer i WUFIs materialedatabase

Randbetingelser (temperatur, relativ fugtighed)

Randbetingelserne i simuleringerne er baseret på forholdene i hotboxens to kamre. Randbetingelserne er indstillet ved brug af klimafilere, som er genereret på baggrund af måledata fra væggenes respektive overfladesensorer. I kap. 5.4 *Håndtering af hotbox-data* er beskrevet, at måledata bl.a. er blevet justeret for fluktuationer. Datasæt med og uden interpolerede værdier er anvendt som separate klimafilere til indledende kontrol af fluktuationernes påvirkning af simuleringerne. Klimafilerne er genereret iht. Fraunhofers anvisninger (WUFI, u.å.).



Figur 27. Udklip fra opsætning af væg 1 i WUFI. Graferne angiver hhv. temperatur og relativ fugtighed i det kolde kammer - i WUFI svarende til *Outdoor Climate*. De mørke kurver modsvarer de tilpassede måledata fra væggenes overfladesensorer. Kurvernes tidsstempel er identisk med den justerede måleperiode fra d. 10. juni til d. 3. oktober beskrevet under kap. 5.4.3 *Datahåndtering og -udvælgelse*.

5.5.5 Parametervariationer: materialedata

Parametervariationerne af materialernes deklarerede egenskaber foretages for primære og sekundære værdier oplistet i tabel 4 herunder.

Tabel 4. Primære og sekundære materialeegenskaber i WUFI. Egenskaberne er oplistet som de optræder i programmets brugerflade. I parametervariationerne indgår de med gråt markerede egenskaber. Sekundære værdier, der udtrykker påvirkninger af varmeledningsevnen som funktion af temperatur eller vandindhold, kaldes konverteringskoefficienter.

Primære værdier	Sekundære værdier
Densitet [kg/m ³]	-
Porøsitet [m ³ /m ³]	-
Specifik varmekapacitet [J/kg K]	-
Varmeledningsevne λ_D [W/mK]	Påvirkning af vandindhold [%/vægt-%]
	Påvirkning af temperatur [W/mK pr. °C]
Dampdiff.modstandsfaktor μ [-]	-

Af tabel 5 fremgår det, hvilke parametervariationer der foretages for de respektive materialer. For gruppen af varmeisolerende materialer er hovedfokus på varmeledningsevnen, mens det for de øvrige materialer ligger på vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren. For væg 3 foretages der derudover parametervariationer for skillefladen mellem vindspærreplade og træbeklædning. I det følgende er parametervariationerne beskrevet og begrundet. Bemærk, at de beskrevne principper kan finde anvendelse på tværs af materialegrupperne.

Tabel 5. Parametervariationer fordelt på materialer. De grå markeringer angiver den prioriterede parametervariation for materialegrupperne. For væg 3 itereres der også over luftspaltens betydning. Dette er ikke indeholdt i tabellen.

Materiale	Væg	Parametervariation	
		λ, D	μ
Varmeisolerende materialer			
Træfiberisolering, indblæst	1+3	✓	✓
Træfiberisolering, formstykker	3	✓	✓
Træfiberbaseret vindspærreplade	1+3	✓	✓
Øvrige materialer			
Regnskærm: varmebehandlet gran	1+3	✓	✓
Tæthedsplan: OSB 4-plade	1		✓
Tæthedsplan: Dampbremse af papir	3		✓
Indvendig beklædning: fibergipsplade	1+3		✓

Varmeisolerende materialer

Inden for gruppen af varmeisolerende materialer foretages parametervariationerne med hovedfokus på materialernes varmeledningsevne, der har betydning for temperaturen og dermed den relative fugtighed i målepunkterne. Varmeledningsevnen er en af de egenskaber, som producenter af termisk isolering skal dokumentere for CE-mærkning, der kræves i henhold til EU's Byggevareforordning. Andre egenskaber som vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren kan angives som tabelopslag i de relevante standarder.

Såvel formstykker og vindspærreplader hører under den harmoniserede produktstandard DS/EN 13171, som normativt refererer til beregnings- og deklarationsstandard DS/EN ISO 10456. Løsfyldsisoleringen hører ikke under en harmoniseret standard og opnår i stedet CE-mærkningen gennem en Europæisk Teknisk Vurdering (ETA). ETA-godkendelsen henviser til DS/EN 13172, som er en standard for vurdering af overensstemmelse, der sikrer, at producenter opfylder kravene i teststandarder som DS/EN 12667, der gælder i dette tilfælde.

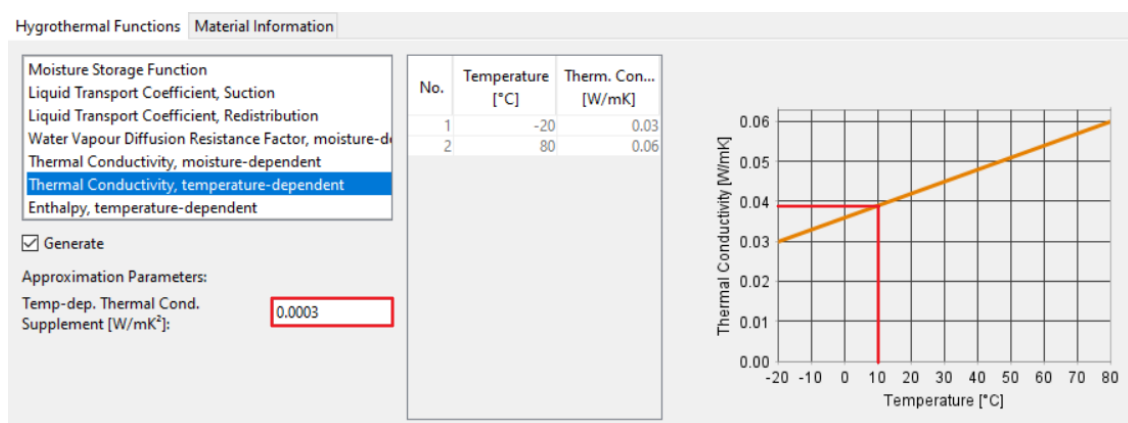
Teststandarden beskriver kravene til nøjagtigheden for de to målemetoder *Guarded Hot Plate (GHP)* og *Heat Flow Meter (HFM)*, der har forskellige fordele og ulemper. Således er GHP den mest præcise, men også mest tidskrævende metode at teste et materiales isolans med. Alle varmeisoleringsmaterialer i de testede vægge, hvor prøvningsmetoden er oplyst, er testet vha. HFM.

Parametervariationerne af materialernes varmeledningsevne udføres primært på baggrund af krav til målenøjagtighed og nøjagtighed af målerkalibrering i teststandarden DS/EN 12667, som alle anvendte varmeisolerende materialer hører under. De accepterede afvigelser er anvendt til at beregne minimum- og maksimum-værdier på baggrund af de deklarerede lambda-værdier - se tabel 6.

Tabel 6. Deklarerede lambda-værdier og beregnede marginer for usikkerheder pba. prøvningsmetode og DS/EN-standards krav til målenøjagtigheder for de anvendte varmeisolerende materialer i forsøgets vægkonstruktioner. Prøvning af materialernes varmeledningsevne (lambda) kan være foretaget vha. metoderne Guarded Hot Plate (GHP) eller Heat Flow Meter (HFM) iht. DS/EN 12667. Hvor prøvningsmetoden for de indbyggede materialer er ukendt, er valgt den højest mulige usikkerhed til beregning af minimum- og maksimum-værdier. De beregnede krav til målenøjagtigheder er fremkommet ved kvadratisk summation (RSS-metoden) af standardens krav til hhv. måling og målerkalibrering ved brug af HFM-metoden. Kravet ved GHP-metoden er angivet for målinger foretaget ved rumtemperatur.

Produkt	λ,D	Prøvnings- metode	Krav til nøjagtighed iht. DS/EN 12667				Beregnet nøjagtighed	λ,d Min.	λ,d Maks.
			Måling		Kalibrering				
			HFM	GHP	HFM	GHP			
	W/mK							W/mK	W/mK
Træfiber, vindspærreplade	0,044	HFM/GHP	± 3%	± 2%	± 2%	-	3,6%	0,042	0,046
Træfiber, indblæst	0,037	HFM	± 3%	-	± 2%	-	3,6%	0,036	0,038
Træfiber, formstykker	0,038	HFM/GHP	± 3%	± 2%	± 2%	-	3,6%	0,037	0,040
Halmisolering	0.065	HFM	± 3%	± 2%	± 2%	-	3.6%	0.062	0.067

Sekundært udføres parametervariationen også med brug af konverteringskoefficienter, der udtrykker ændringer af varmeledningsevnen som funktion af temperatur og vandindhold i materialet. Se eksempel i figur 28 herunder. Til dette anvendes værdierne fra DS/EN ISO 10456 som øvre grænse. For løsfyldsisolering tages også densitetens betydning i betragtning. De nævnte påvirkninger er beskrevet under kap. 4.4 *Isoleringsmaterialers påvirkninger på varmeledningsevnen*.



Figur 28. Eksempel på indstilling af konverteringskoefficienten for et isoleringsmateriale i WUFI, her kaldet *Thermal Conductivity, temperature-dependent*. På grafen til højre er markeret den anvendte design-værdi på 0,039 W/mK, der iht. DS/EN ISO 10456 er deklareret ved 10 °C. Konverteringskoefficienten på 0,0003 angivet til venstre, betyder, at materialets varmeledningsevne hhv. falder eller stiger med 0,0003 W/mK pr. grad celsius, når temperaturen er under eller over 10 °C. I det viste tilfælde vil den korrigerede varmeledningsevne ved 20 °C således være 0,042 W/mK.

Øvrige materialer

Inden for gruppen af øvrige materialer foretages parametervariationerne, med undtagelse af varmebehandlet træ i regnskærmen, udelukkende for materialernes dampdiffusionsmodstand. Dampdiffusionsmodstanden angives i WUFI som den dimensionsløse vanddampdiffusionsmodstandsfaktor μ . Da der som følge af testopstillingen ikke kan forventes at have fundet omrøring sted i luftspalten mellem vindspærreplader og regnskærm, har regnskærmens varmeledningsevne relevans for temperaturen i målepunktet bag væggenes vindspærreplader. Se kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*. Dette forhold er forsøgsspecifikt og vil under realistiske driftsbetingelser ikke forventes at være relevant. Forhold der vedrører varmebehandlet træ i regnskærmen er beskrevet særskilt sidst i dette kapitel.

Dampbremsens vanddampdiffusionsmodstandsfaktor μ er deklareret på baggrund af testmetode-standarden DS/EN 1931, der definerer prøvninger af membraner vha. kop-metoden. Tilsvarende er pladematerialernes værdier deklareret på baggrund af prøvninger defineret af testmetode-standarden DS/EN ISO 12572. Denne standard beskriver generelle testmetoder til måling af vanddampdiffusionsegenskaber i byggematerialer og har dermed et bredere fokus. Fælles for standarderne er, at krav til målenøjagtigheder er angivet for enkelte måleparametre såsom vægt (mg), tykkelse (mm) og klimakontrol (hPa). De i standarderne definerede krav kan dermed ikke direkte oversættes til et tilladeligt spænd i μ -værdier, som det er gjort for materialernes varmeledningsevne i tabel 6.

I en *round robin*-undersøgelse fra 2018 blev overensstemmelsen mellem måleresultater af μ -værdier på tværs af ni forskellige testinstitutter i syv lande undersøgt. Målingerne blev udført med bl.a. kop-metoden og på baggrund af prøver af det samme materiale (keramisk tegl). Undersøgelsen viste, at de målte μ -værdier varierede med en relativ standardafvigelse (RSD) på ca. 44 % i mellem institutterne (Feng et al., 2019). RSD er en statistik, der måler variationen i et datasæt som en procentdel af gennemsnittet, hvilket gør det muligt at sammenligne variationen på tværs af datasæt. Forfatterne beskriver, at forskellene mellem laboratorierne ikke skyldtes usikkerheder i metoderne, men bl.a. kunne henføres til mangelfulde prøveforseglinger som følge af divergerende testprocedurer. I undersøgelsens anden runde blev institutterne underlagt en fælles testprotokol, der byggede på bl.a. ISO 12572 beskrevet ovenfor. Det reducerede den relative standardafvigelse til 14 % for μ -værdier testet med kop-metoden (Feng et al., 2020). Der itereres som udgangspunkt uden øvre eller nedre grænseværdier.

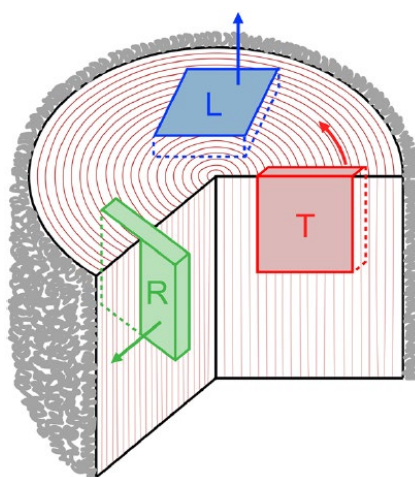
Særligt for regnskærme af varmebehandlet træ:

Producentens deklARATIONER for varmeledningsevne og dampdiffusionsmodstand er standardværdier fra den harmoniserede produktstandard DS/EN 14915, som refererer normativt til tabelværdier fra DS/EN ISO 10456. Produktstandarden dækker egenskaber og krav til massive træprodukter til beklædning udvendigt og indvendigt, og kan bruges som grundlag for CE-mærkning iht. Byggevareforordningen. Standardværdierne fra DS/EN ISO 10456 er af producenten valgt på baggrund af materialets densitet. Værdierne tager imidlertid ikke højde for varmebehandlingens effekt på træets isolans, der under realistiske driftsbetingelser ikke vil være relevante

Både densitet og varmeledningsevne reduceres ved varmebehandling afhængigt af graderne, træet udsættes for. Således falder varmeledningsevnen for gran iht. Kol & Sefil (2011) med

gennemsnitligt 6 % ved varmebehandling med temperaturer mellem 170-212 °C. Ifølge brancheorganisationen *International ThermoWood Association* reduceres varmeledningsevnen med op til 25 % som følge af varmebehandling (International ThermoWood Association, 2023). Varmeledningsevnen påvirkes fortsat af vandindholdet som beskrevet under kap. 4.4.3, men træets hygroskopiske egenskaber ændres imidlertid af behandlingen. Det resulterer i lavere fugtoptag og en lavere ligevægtsfugtighed. Det betyder, at varmeledningen for varmebehandlet træ bliver mindre påvirket af vandindholdet end ubehandlet træ. Dette forhold itereres gennem indstillingen *Thermal Conductivity, moisture-dependent* i WUFI.

Dampdiffusionsmodstandsfaktoren μ er ligeledes deklareret pba. tabelværdier fra DS/EN 14915. Hverken standarden eller den underliggende DS/EN ISO 12572 oplyser imidlertid damptrykkets retning i forhold til fiberretningen i træet, som μ -værdierne er angivet for. Det er afgørende for dampdiffusionen gennem materialet, om vanddamp bevæger sig langs fibrene (longitudinalt) eller på tværs af fibrene (tangentialt eller radiale) - se figur 29 herunder;



Figur 29. Illustration af træets anatomiske orienteringer. Figuren viser de tre primære retninger i forhold til træets struktur: radial, tangential og longitudinal. Træ til facadebeklædninger som klink- eller 1-på-2-beklædninger, der er anvendt i forsøgets vægkonstruktioner, vil almindeligvis være planskåret. Det betyder, at brædderne saves tangentialt i forhold til træets årringe. Damptrykkets retning vil således være vinkelret (radiale eller tangentialt) på fiberretningen, svarende til den grønne markering på figuren (Murr, 2022).

Dampdiffusionsmodstanden er størst på tværs af fibrene, og de deklarerede værdier fra DS/EN 14915 (20-50 my) tyder således på at repræsentere et afvejet spektrum af værdier, der ikke er entydige hvad angår fiberretningen. Værdierne svarer således ikke til den byggevare, de er deklareret for. Materialedatabasen i WUFI indeholder materialer fra hhv. Fraunhofer Institut for Bygningsfysik og Lund Universitet (LTH), der tilsammen angiver μ -værdier for alle tre scenarier, se tabel 7 herunder;

Tabel 7. Referenceværdier for vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren μ i træ. Intervallet oplyst i DS/EN ISO 12572 er angivet for træ i hhv. våd og tør tilstand. Det ses, at der er stor forskel på vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren afhængigt af damptrykkets retning.

Damptrykkets retning	Træart	Densitet [kg/m ³]	μ [-]	Kilde
<i>Ej oplyst</i>	<i>Ej oplyst</i>	450	20-50	DS/EN ISO 12572
Longitudinalt	Gran	<i>Ej oplyst</i>	4	Fraunhofer (WUFI)
Tangentialt	Gran	<i>Ej oplyst</i>	83	LTH Lund (WUFI)
Radialt	Gran	<i>Ej oplyst</i>	130	Fraunhofer (WUFI)

Træet anvendt i forsøgets vægkonstruktioner er planskåret. Det betyder, at damptrykkets retning overvejende vil være enten tangentialt eller radialt, afhængigt af hvor på stammen brædderne er skåret. Der itereres derfor med μ -værdier mellem 83-130.

Luftspalte bag regnskærm (relevant for væg 3)

Væg 3 er udført med en todelt regnskærm bestående af en klinkbeklædning nederst og en 1-på-2 beklædning øverst - se figur. De indbyggede sensorer er placeret bag den øvre del af regnskærmen, der iht. figur 10 på s. 20 er opsat uden ventileret luftspalte. Det betyder, at bræddelaget i størstedelen af tværsnittet vil være enkelt og hhv. med og uden luftlag bagved brædderne, andre steder - ved overlap - dobbelt. I WUFI simuleres regnskærmen som et homogent materialelag med to parallelle sider. I rammerne af modelkalibreringen, hvor der grundet testopstillingens udførelse ikke kan regnes med omrøring i luftlag mellem vindspærreplader og regnskærm, vil luftlaget bag hver andet bræt bidrage med en mindre isolans til konstruktionen. Det betyder, at forholdet forventes at have betydning for modelkalibreringen. Betydningen undersøges ved at iterere med forskellige gennemgående luftlag mhp. at simulere en tilnærmelse af den samlede effekt af det punktvis luftlag, der kendetegner 1-på-2 beklædningen i hotbox-forsøget.



Figur 30. Foto af væg 3, taget under installationen af sensorerne i væggene. På baggrund af kophullets placering forventes sensorerne at være placeret i højden bag 1-på-2 beklædningen på væggen øvre del. Efterfølgende blev hullet lukket og forseglet med akrylfugemasse. Sensorplaceringerne og -installation er beskrevet under kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*.

5.5.6 Parametervariationer: kammerforhold

Parametervariationer af kammerforholdene foretages ved at justere overgangsisolanserne. Overgangsisolanserne udtrykker den termiske modstand mellem de yderste materialeoverflader og den fri luft og er under modelopsætningen sat op iht. DS 418. Værdierne består af bidrag fra konvektion og stråling og afhænger dermed delvist af luftbevægelserne. Standardværdierne (R_{se} 0,04 udvendigt og R_{si} 0,13 indvendigt) afspejler, at varme fjernes hurtigere fra overfladen på udvendig side end på indvendig side. I hotbox-forsøg simuleres vinden kunstigt og vil kunne være højere eller lavere afhængigt af testopstillingen. Under kap. 5.2 *Hotbox og måleudstyr* er det beskrevet, at den ene ud af to ventilatorer i det kolde kammer var ude af drift under forsøget. VIGOT-forsøgets teknikere på stedet vurderede på den baggrund, at luftbevægelserne på overfladerne kunne antages at være 1 m/s eller lavere (T. Valdbjørn Rasmussen, e-mail, 29. oktober 2024). Selvom overgangsisolanserne kun udgør en lille del af konstruktionernes samlede termiske modstand, vil der ved behov for yderligere parametervariationer være belæg for at iterere overgangsisolansen i det kolde kammer med varierende luftbevægelser.

Beregningerne foretages iht. DS/EN ISO 6946 med følgende formelværk og er vist i tabel 8:

$$R_s = \frac{1}{h_c + h_r} \quad (1)$$

hvor

R_s er overgangsisolansen i $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$

h_c er bidraget fra konvektion (konvektionskoefficienten), angivet i $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

h_r er bidraget fra stråling (strålingskoefficienten), angivet i $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$

(De underliggende formler for bidragene kan findes i standardens Anneks C.)

Konvektionskoefficienten beskriver varmetransporten gennem konvektion, hvilket er varmeoverførsel som følge af bevægelser i luften. Værdien er afhængig af luftens hastighed og temperaturgradienterne omkring overfladen.

Strålingskoefficienten beskriver den varmeoverførsel, der sker via stråling mellem overflader. Dette bidrag afhænger primært af temperaturforskellen mellem overfladerne samt deres emissivitet.

Tabel 8. Beregnede iterationer over den udvendige overgangsisolans Rse som funktion af luftbevægelser på vægoverfladerne i det kolde kammer. Beregningerne er foretaget iht. formlerne angivet i DS/EN ISO 6946, Anneks C. Det ses, at standardværdien på 0,04 m²K/W iht. DS 418 svarer til luftbevægelser på anslået 5 m/s i testopstillingen.

Parameter	Enhed	Værdi						Noter
		Iteration						
		#1	#2	#3	#4	#5	#6	
v	m/s	0,1	0,2	0,5	1,0	2,0	5,0	Antaget luftbevægelse
h _{ce}	m2K/W	4,4	4,8	6,0	8,0	12,0	24,0	Overgangskoeff., bidrag fra konvektion iht. DS/EN ISO 6946
h _c	W/m2K	4,4	4,8	6,0	8,0	12,0	24,0	Overgangskoeff., bidrag fra konvektion iht. DS/EN ISO 6946
α _k	W/m2K	4	5	6	8	12	24	Overgangskoeff., bidrag fra konvektion (konvektionskoeff.)
ε	-			0,9				Emissionstal
θ _{overflade}	°C			0,02				Temp. på overfladen (vægtet middelværdi af væggens målere)
θ _{omgivelser}	°C			0,10				Temp. i omgivelser (middelværdi af alle udv. målere)
T _{mn}	K			273				Gennemsnit af temperaturer
σ	W/(m2K4)			5,67E-08				Stefan-Boltzmann konstanten 5.67 * 10 ⁻⁸
h _{r0}		5	5	5	5	5	5	Overgangskoeff., bidrag fra stråling iht. DS/EN ISO 6946
h _r		4	4	4	4	4	4	Overgangskoeff., bidrag fra stråling iht. DS/EN ISO 6946
α _r	W/m2K	4	4	4	4	4	4	Overgangskoeff., bidrag fra stråling (strålingskoefficient)
α _{tot}	W/m2K	9	9	10	12	16	28	Samlet varmeovergangstal (1/R)
R _{se}	m2K/W	0,12	0,11	0,10	0,08	0,06	0,04	Beregnet værdi for overgangsisolans

5.5.7 Evalueringsmetode

For hver simuleret iteration behandles resultaterne i følgende trin og vurderes ud fra de kriterier, der er opstillet i tabel 9 nedenfor.

- 1) WUFI: Kontrol af beregningens balance og konvergensfejl
- 2) Eksport af beregninger til tabulatorseparerede filer.
- 3) Excel:
 - a) Kvantitativ evaluering med evalueringsmålet RMSE
 - b) Visuel evaluering gennem sammenligning af kurveprofilerne

Tabel 9. Evalueringsmetoder og kriterier for vurdering af parametervariationerne. Antallet af konvergensfejl er beregnet pba. anvisninger fra Fraunhofer, der angiver det maksimalt tilladelige antal konvergensfejl for et års simulering som værende 50 (Fraunhofer IBP., 2024a). Kriteriet er beregnet for fire måneder, svarende til forsøgets testperiode.

Evaluering		Kriterie
<i>WUFI</i>		
Konvergensfejl		Maks. 15
Balance		Identiske værdier ±0,1
<i>Excel</i>		
RMSE (numerisk)		Temperatur < 1 °C RF < 5 % RF
Kurveforløb (visuelt)		Simulerede kurver skal være indenfor måleusikkerheden af de målte kurveprofiler

RMSE (Root Mean Square Error) er et statistisk evalueringsmål, der bruges til at beregne overensstemmelsen mellem målte og beregnede værdier. RMSE giver en kvantitativ vurdering af, hvor godt en model passer til data, og er dermed velegnet til evaluering af modelkalibreringerne (Panico et al., 2023). De målte data er repræsenteret som middelværdier af målingerne fra tre sensorer per målepunkt - se også kap. 5.3.1 *Væg- og sensorplaceringer*. Forud for evalueringen er det blevet kontrolleret, at de enkelte sensorers middelværdier ligger inden for måleusikkerheden på $\pm 0,5$ °C af middelværdien af alle tre sensorer.

De følgende figurer 31 og 32 illustrerer de beregningsark, der er anvendt i forbindelse med modelkalibreringen.

	Væg 3, midt					
	Sensordata			Beregnet data		
	Væg 3 Middle Left n a 3 ml temperatur 2	Væg 3 Middle Middle n a 3 mm temperatur	Væg 3 Middle Right n a 3 mr temperatur	Alle sensorer	Målenøjagtighed	
	θ	θ	θ	θ, middel	θ, afvigelse til middel	
				Væg 3	Min.	Maks.
	°C	°C	°C	°C	°C	°C
Middelværdi	3.5	3.6	3.4	3.5	0.05	0.09
Min.	3.4	3.5	3.4	3.4	0.10	
Maks.	3.7	3.8	3.7	3.7		0.13
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10
	3.6	3.7	3.6	3.6	0.03	0.07
	3.6	3.7	3.6	3.6	0.03	0.07
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10
	3.6	3.7	3.6	3.6	0.03	0.07
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10
	3.5	3.7	3.6	3.6	0.10	0.10

Figur 31. Udklip fra beregningsark, der benyttes til at samle og beregne måledata fra sensorerne i de valgte målepunkter. Temperaturer og relative fugtigheder håndteres i separate ark. Af rækkerne fremgår de målte temperaturer per tidsskridt. I de sidste tre kolonner beregnes middelværdier samt afvigelser til middelværdierne. Dette bruges til at kontrollere, om afvigelserne målingerne imellem ligger indenfor sensorernes målenøjagtighed. I de første tre datarækker med grønne tal vises hhv. middelværdier, minimum- og maksimum-værdier. Af tallene fremgår, at den største gennemsnitlige afvigelse til sensorernes middelværdier var 0,13 °C.

	Iteration 1 (basisopsætning)				Iteration 2				
WUFI fil, case:	Case 1				Case 2				
Ændringer:	Materiale variation vindspærreplade Alt 1				Materiale variation vindspærreplade Alt 3				Materiale varia
	Simuleret		Nøjagtighed		Simuleret		Nøjagtighed		Simuleret
	θ [°C]	RF [%]	RMSE θ	RMSE RF	θ [°C]	RF [%]	RMSE θ	RMSE RF	θ [°C]
Middelværdi	2.3		4		2.3		4		2.3
Maks.									
	3.6		0		3.6		0		3.6
	3.4		0		3.4		0		3.4
	3.0		1		3.0		1		3.0
	2.6		3		2.6		3		2.6
	2.3		6		2.3		6		2.3
	2.1		9		2.1		9		2.1
	1.9		11		1.9		11		1.9
	1.8		13		1.8		13		1.8
	1.7		14		1.7		14		1.7

Figur 32. Udklip fra beregningsark, der benyttes til at evaluere simulerede data fra WUFI op imod måledata fra hotbox-forsøgene (uden for billedet). I rækkerne vises beregnede temperaturer (θ) og relative fugtigheder (RF) per tidsskridt. I kolonnerne indsættes det fortløbende antal iterationer. Udklipet viser de indledende variantanalyser af vindspærrepladematerialer i WUFI. Først itereres efter overensstemmelse mellem temperaturkurverne, dernæst RF. RMSE for temperaturen skal iht. tabel 9 være under 1.

5.6 Skimmelmodeller

Risikoen for skimmelvækst kan vurderes ved hjælp af en række forskellige metoder og skimmelmodeller. Modellernes egnethed er imidlertid betinget af kontekst og forudsætninger; heraf vil nogle være knyttet til hygrotermiske simuleringer og det specifikke software, der er anvendt. I det følgende beskrives Sedlbauers LIM-model og begrundelsen for valget af denne metode. I bilag B er de to alternative, software-betingede modeller WUFI Bio og VTT beskrevet.

5.6.1 Relativ fugtighed: en tommelfingerregel

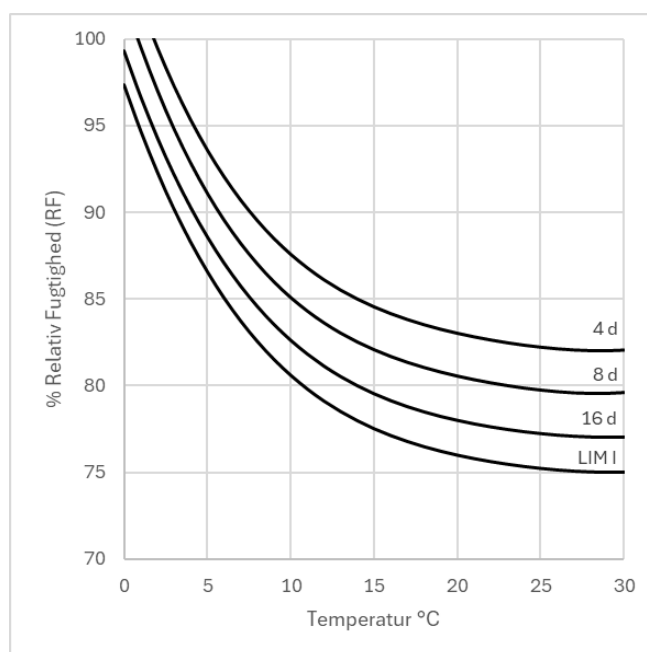
Udviklingen af skimmelsvampe er afhængig af både relativ fugtighed, temperatur, tilgængelige næringsstoffer på underlaget og tid. Generelt skal den relative fugtighed (RF) i form af vandaktiviteten (aw) på underlaget overstige 0,75 (svarende til 75 % RF) for at muliggøre vækst (Brandt et al., 2023a, tabel 8). Om end tærskelværdien er afhængig af materialetype, kan 75 % RF i luften benyttes som en tommelfingerregel til at vurdere risikoen for skimmelsvampevækst og behovet for yderligere undersøgelser.

5.6.2 Isoplet grafer: Sedlbauer/LIM

Sedlbauer-modellen anvender isoplet-grafer til at udtrykke potentialet for skimmeldannelse som funktion af temperatur og relativ fugtighed. Det beregnede skimmelpotentiale vises i diagramform som prikker (isopletter) per tidsskridt afhængigt af, hvordan modellen bruges. I anvendelse med LIM-grænsekurver evalueres det langsigtede vækstpotentiale (over 30 dage) afhængigt af materialet. LIM står for *Lowest Isopleths for Mold* og udtrykker tærskelværdier for vækst på følgende underlag: organiske materialer (LIM I), uorganiske, porøse materialer (LIM II) og optimale vækstbetingelser (LIM o). Ligger isopletterne over den relevante kurve, er der iht. modellen betingelser for begyndende skimmelvækst. Modellen er ifølge (Vereecken, 2011) kun anvendelig ved stationære forhold.

Inden for rammerne af LIM I (organiske materialer) kan skimmelpotentialet også indplaceres efter dagskurver, der viser, hvor hurtigt vækst kan forekomme under forskellige randbetingelser. Kurverne er baseret på eksperimentelle data og vises typisk som grænsekurver på 4, 8 og 16 dage samt en LIM I-kurve, der svarer til 30 dage (Sedlbauer, 2001) - se figur 33. Alle kurver er ligeværdige, hvilket vil sige, at der kan forventes skimmelvækst i alle situationer, hvor en kurve overskrides. Dermed er dagskurverne relevante at bruge ved dynamiske simuleringer med skiftende påvirkninger som følge af skiftende randbetingelser.

Sedlbauer-modellen kan benyttes manuelt ved at indplacere måledata i isopleth-grafer, eller i forlængelse af hygrotermiske simuleringer, der gør brug af modellen. Se graf og formler på side 50. I rammerne af WUFI Pro genereres prikkerne som produkt af fugtsimuleringer og vises med forskellige farver afhængigt af tidspunktet i simuleringen. Lyse prikker angiver skimmelrisici tidligt i simuleringen, mørke pletter sent i simuleringen; farveskiftet udtrykker dermed tendensen og vises i rammerne af LIM-kurver (LIM I og II). Det betyder, at det er tyngdepunktet i prikkernes placering, der er væsentligt. I programmets isopleth-grafer vises LIM-kurverne dog kun for konstruktionens indvendige overflade og således ikke for andre skilleflader, der ønskes evalueret vha. isopleth (WUFI TV, 2021). I WUFI skal isopleth-graferne dermed benyttes afhængigt af simuleringsmetoden: ved stationære simuleringer er LIM-graferne egnede som en konservativ evalueringsmetode. I dynamiske simuleringer med skiftende randbetingelser vil graferne hovedsageligt tjene som indikatorer for behovet for mere detaljerede skimmelundersøgelser. I WUFI kan disse udføres gennem skimmelmodulerne VTT og WUFI Bio.



Figur 33. Sedlbauers dagsgrænsekurver udtrykt i en isopleth-graf. Af grafen kan det aflæses, at hvis der på en organisk overflade (LIM I) er f.eks. 15 °C og 85 % RF i over 4 dage, vil der iht. Sedlbauer-modellen forekomme skimmelvækst. Evalueringen kan også udtrykkes matematisk vha. polynomier, se formlerne (2)-(5).

For Sedlbauer-modellen findes definerede formler, der udtrykker grænseværdierne for relativ fugtighed (RF) som funktion af temperaturen og afhængigt af dagsgrænsen (VIGOT, 2024). Nedenstående polynomier beregner grænseværdier udtrykt som % RF, der ikke må overskrides i hhv. 30, 16, 8 og 4 dage, førend der kan forventes skimmelvækst på den undersøgte overflade. Dagsgrænseformlerne er angivet i formlerne (2)-(5) herunder;

30 dage:

$$RF = 0,0000375209104619412 \times \theta^4 - 0,0036713012477847 \times \theta^3 + 0,144648258603979 \times \theta^2 - 2,79360678536204 \times \theta + 97,3773149644012 \quad (2)$$

16 dage:

$$RF = 0,0000372494172494742 \times \theta^4 - 0,00363613053613676 \times \theta^3 + 0,143330128205093 \times \theta^2 - 2,77505515317171 \times \theta + 99,3090659340182 \quad (3)$$

8 dage:

$$RF = 0,0000487675570655099 \times \theta^4 - 0,00445155023002286 \times \theta^3 + 0,163087171587449 \times \theta^2 - 2,96137876546891 \times \theta + 102,34640528192 \quad (4)$$

4 dage:

$$RF = 0,0000459995574773053 \times \theta^4 - 0,00426314132693051 \times \theta^3 + 0,158718934526178 \times \theta^2 - 2,92292045387694 \times \theta + 104,726757291497 \quad (5)$$

hvor θ udtrykker temperaturen (°C).

5.6.3 Valg af metode

Risikoen for vækst af skimmelsvampe kan vurderes på forskellige måder afhængigt af kontekst og forudsætninger. I rammerne af WUFI og ved brug af dynamiske randbetingelser er både 75 %-reglen og isopleth-graferne hovedsageligt anvendelige som indikatorer for, om der skal foretages detaljerede analyser. Til dette formål er WUFI Bio og VTT de relevante værktøjer at beskæftige sig med (se bilag B). Selvom de bagvedliggende beregningsmodeller er fundamentalt forskellige, er det især deres håndtering af skimmeludvikling under perioder uden vækstbetingelser, der adskiller dem; Viitanen-modellen arbejder med reduktioner i aktive skimmelsporer, mens skimmeludviklingen i IBP-modellen går i dvale og kan genaktiveres fra samme stade, når vækstbetingelserne igen måtte være til stede (Vereecken, 2011) (Viitanen, 2015). I rammerne af WUFI gør dette forhold Fraunhofers egen IBP-model, i form af WUFI Bio, til en mere konservativ evalueringsmetode, der regner på 'den sikre side'.

I dette projekt vurderes potentialet for skimmelvækst imidlertid både på baggrund af eksperimentelle data og dynamiske simuleringer. Behovet for at kunne sammenligne resultaterne på tværs af datakilder nødvendiggør en ensartet analysemodel og -metode. For Sedlbauer-modellen findes definerede formler, der bruges til beregne grænseværdier for relativ fugtighed afhængigt af temperatur og dagsgrænser. Modellen kan således bruges til at vurdere skimmelrisici upåagtet datakilden, men under forudsætning af, at målte eller simulerede data kan udtrækkes i samme format og tidsskridt. Det er tilfældet for både de anvendte sensorer beskrevet samt WUFI Pro. Dermed er Sedlbauer-modellen teknisk velegnet til opgaven. Johansson et al. (2021) har undersøgt forskellige skimmelmodellers

evne til at forudse skimmelvækst under dynamiske forhold. Forfatterne konkluderer, at de fleste dynamiske modeller undervurderer risikoen for skimmel, særligt når relativ fugtighed og temperaturer varierer betydeligt over tid. Statistiske modeller som Sedlbauers LIM-kurver vurderes generelt at være mere pålidelige, om end konservative. På denne baggrund vurderes modellen også at være funktionelt velegnet til opgaven. Også i VIGOT-forsøgene, som nærværende projekt er udført på baggrund af, anvendes modellens LIM-kurver i form af dagsgrænsekurver.

Skimmelanalyserne afrapporteres således i rammerne af Sedlbauers LIM-model.

5.7 Simuleringsmetode for dynamiske beregninger

Nye forskningsresultater fra 2024 viser, at AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation), også kaldet Golfstrømmen, med omtrent 60 % sikkerhed vil kollapse inden år 2050 (Smolders et al., 2024). Et sådant scenarie vil betyde, at de havstrømme, som i dag transporterer varmere vand fra tropiske områder mod Nordatlanten, i fremtiden vil stoppe. Golfstrømmen påvirker det danske klima ved at holde temperaturen mildere, end hvad man kunne forvente på den geografiske breddegrad. Det medfører mildere vintre og et blødere klima generelt. Et kollaps vil således føre til et koldere klima, hvilket indtil for nylig ikke blev regnet som et sandsynligt scenarie. Det står i modsætning til tidligere forskning, der forudsiger at den årlige middeltemperatur i Danmark frem mod år 2100 vil stige med ca. 2,1 °C (Klimatilpasning, 2024). Forskningen og forudsigelserne om det fremtidige klima, der præsenterer en 50/50-chance for hhv. et varmere eller et koldere klima allerede fra år 2050, betyder, at der simuleres med to forskellige fremtidsscenarier, hvoraf det ene scenarie går mod et varmere og fugtigere klima (Fremtidsscenarie 1), mens det andet går mod et koldere klima svarende til det canadiske i Quebec (Fremtidsscenarie 2). Begge scenarier vurderes på baggrund af litteraturen som værende realistiske, hvorfor begge benyttes til simuleringer af væggenes fugttekniske robusthed i et fremtidigt klima.

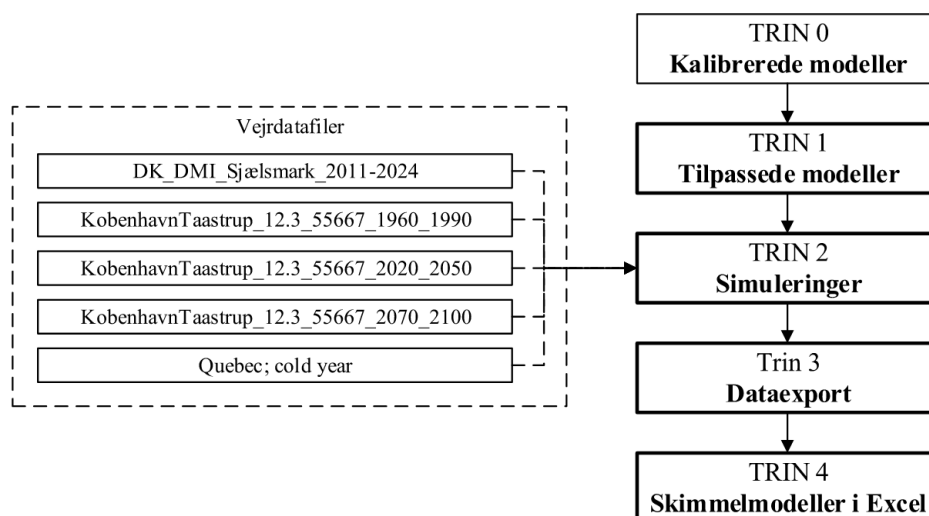
Bemærk, at simuleringsmetoden beskrevet i dette kapitel er baseret på resultaterne fra modelkalibreringen, som er afrapporteret i kap. 6.2 *Modelkalibrering*.

5.7.1 Fremgangsmåde

I de dynamiske simuleringer for væg 1 og væg 3 tages der udgangspunkt i de kalibrerede modeller beskrevet i det foregående. Modellerne tilpasses og simuleres herefter med brug af klimafilere, som er baseret på hhv. målte og fremskrevne klimadata fra det EU-finansierede forskningsprojekt *Climate for Culture* (Climate for Culture, 2024). Ud over klimafilere justeres flere parametre for at simulere fremtidsscenarierne så præcist som muligt. I de dynamiske simuleringer beregnes skimmelrisici på forsiderne af de biobaserede vindspærreplader.

5.7.2 Modelopsætning

Konstruktionerne simuleres med fem forskellige klimafilere, som repræsenterer nutidige og historiske måledata samt fremskrevne klimadata for både koldere og varmere fremtidsscenarier.



Figur 34. Fremgangsmåde for dynamiske simuleringer. Diagrammet viser den overordnede procedure for simuleringer og efterfølgende dataeksport.

TRIN 0: Kalibrerede modeller

Kalibrerede modeller fra de stationære simuleringer benyttes som grundlag for den videre proces i de dynamiske simuleringer.

TRIN 1: Tilpassede modeller

De stationære modeller tilpasses til brug i de dynamiske simuleringer. I væg 1 tilføjes et luftskifte til luftspalten bag regnskærmen. I væg 3 tilpasses tæthedsplanets Z-værdi med den deklarerede dampdiffusionsmodstand for dampbremsen. Det skyldes mistanke om et utilsigtet fugttilskud i hotbox-forsøget.

TRIN 2: Simuleringer

Hver af væggene simuleres med fem forskellige klimafilere og med forskellige indstillinger ift. ventileret hulrum, orientering m.m. Dette resulterer i en række simuleringer, som er opsummeret i tabel 10 og tabel 11 herunder. Tabellerne angiver også rækkefølgen for de forskellige simuleringer.

Tabel 10. Tabeloversigt over dynamiske WUFI-simuleringer for væg 1 oplistet i beregningsrækkefølgen. Kolonnen *Klimafil* angiver, hvilke filer der er benyttet til hvilke simuleringer. Markerede tal angiver, hvor der er lavet specielle indstillinger til simuleringerne. h-1 angiver luftskiftet bag regnskærmen.

#	Model #	Klimafil	Orientering	FBK	h ⁻¹	År	Specifikke parametre
1	1	DK_DMI_Sjælsmark_2011-2024	Nord	3	10	13	Ændret luftskifte bag regnskærm
2			Nord	3	100	13	Ændret luftskifte bag regnskærm
3			Nord	3	30	13	
4			Sydvest	3	30	13	
5			Nord	2	30	13	Fugtbelastningsklasse ændret
6			Nord	3	30	13	OSB udskiftet til en dampspærre
7			Nord	3	30	13	OSB: Z-værdi iht. datablad
8	2	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_1960_1990	Nord	3	30	30	
9			Sydvest	3	30	30	
10	3	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_2020_2050	Nord	3	30	30	
11			Sydvest	3	30	30	
12	4	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_2070_2100	Nord	3	30	30	
13			Sydvest	3	30	30	
14	5	Quebec; cold year	Nord	3	30	10	
15			Nordøst	3	30	10	

Tabel 11. Tabeloversigt over dynamiske WUFI-simuleringer for væg 3 oplistet i beregningsrækkefølgen. Kolonnen *Klimafil* angiver, hvilke filer der er benyttet til hvilke simuleringer. Markerede tal angiver, hvor der er lavet specielle indstillinger til simuleringerne. h-1 angiver luftskiftet bag regnskærmen.

#	Model #	Klimafil	Orientering	FBK	h ⁻¹	År	Specifikke parametre
1	1	DK_DMI_Sjælsmark_2011-2024	Nord	3		13	
2			Sydvest	3		13	
3			Nord	3	30 h-1	13	Ventilleret hulrum bag regnskærm
4	2	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_1960_1990	Nord	3		30	
5			Sydvest	3		30	
6	3	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_2020_2050	Nord	3		30	
7			Sydvest	3		30	
8	4	KobenhavnTaastrup_12.3_55667_2070_2100	Nord	3		30	
9			Sydvest	3		30	
10	5	Quebec; cold year	Nord	3		10	
11			Nordøst	3		10	

TRIN 3: Dataeksport

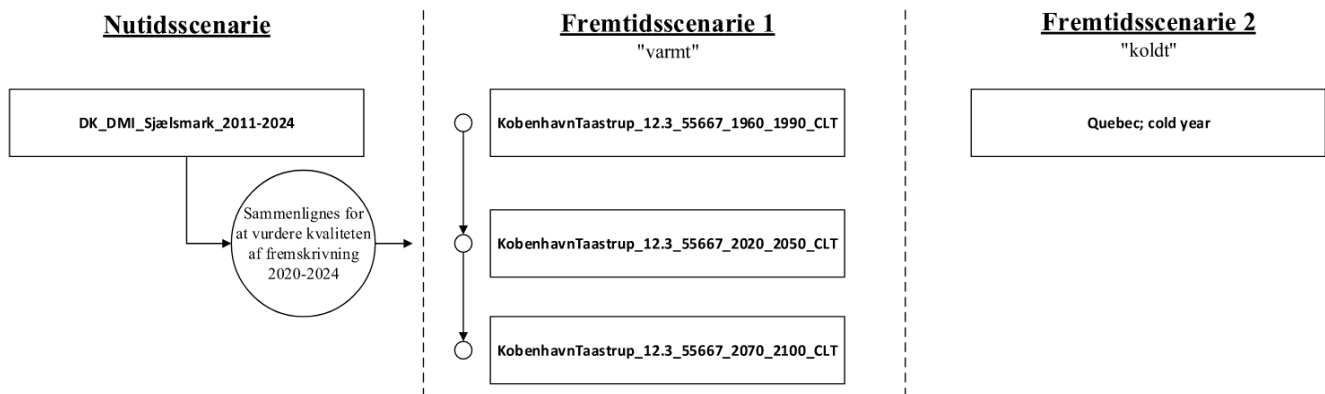
Resultaterne fra WUFI-simuleringerne eksporteres som tabulatorseparerede filer indeholdende relative fugtigheder og temperaturer til videre analyse af konstruktionernes robusthed.

TRIN 4: Skimmelevuering i Excel

De beregnede data importeres herefter til Excel-ark, hvor de evalueres for skimmelvækst. For hver simulering opstilles beregninger, der sammenholder de simulerede værdier med grænseværdierne beregnet gennem Sedlbauer-modellen. Beregningerne har til hensigt at identificere risikoen for skimmelvækst i henhold til *LIM I* (30 dage) samt dagsgrænserne for henholdsvis 16, 8 og 4 dage. Resultaterne præsenteres og analyseres i det følgende kapitel 6.

5.7.3 Klimascenarier

Klimascenarierne simuleres i tre spor med henblik på at beregne væggenes fugttekniske robusthed i det nutidige klima (Nutidsscenarie), et fremtidigt varmt og fugtigt klima (Fremtidsscenarie 1) samt et fremtidigt koldt og fugtigt klima (Fremtidsscenarie 2) - se figur 35 herunder.



Figur 35. Opdelingen af de dynamiske simuleringer med forskellige klimafilere. Diagrammet viser den overordnede fremgangsmåde for simuleringerne inddelt i tre spor: *Nutidsscenariet* med nutidige målinger, *Fremtidsscenarie 1* med fremskrevne data baseret på historiske målinger, og *Fremtidsscenarie 2* med data fra et referenceår i Quebec i Canada som grundlag for et fremtidigt koldt dansk klima.

Nutidsscenarie

Det nutidige klimadatasæt indeholder målte vejrdata fra DMI's målestation ved Sjælsmark i perioden fra 2011 til 2024. Med dette klimasæt er det muligt at analysere væggenes fugttekniske robusthed i et dansk nutidsklima. De målte vejrdata fra perioden 2020-2024 benyttes derudover til at vurdere kvaliteten af de fremskrevne vejrdata 2020-2050 (Fremtidsscenarie 1), der har et overlap på fire år.

Fremtidsscenarie 1

Fremtidsscenarie 1 med periodefremskrivninger for hhv. 2020-2050 og 2070-2100 fra *Climate for Culture* indeholder også simuleringer med historiske måledata fra 1960-1990 fra en målestation ved Taastrup, der har dannet grundlag for CfC-prognosen. Klimafilene med de historiske måledata indeholder klimadata for en trediveårs periode og repræsenterer dermed udviklingen i temperatur og relative fugtigheder i den nærmeste fortid. Disse data er relevante i simuleringerne som baggrund for, hvordan vægkonstruktionernes fugttekniske ydeevne har ændret sig i et historisk perspektiv. De to klimafilere for perioden 2020-2050 og 2070-2100 er fremskrevne klimafilere, der udtrykker et fremtidsscenarie, hvor klimaet forventes at blive varmere og fugtigere. Denne fremskrivning er i overensstemmelse med Klimatilpasning (2024), hvor klimaet forventes at gå i denne retning. Dette spor har dermed til hensigt at simulere, hvordan væggene vil præstere i et fremtidsscenarie, der af *Climate to Culture* vurderes til at blive både varmere og mere fugtigt.

Fremtidsscenarie 2

Fremtidsscenarie 2 indeholder klimadata fra et referenceår i Quebec i Canada, der adskiller sig fra både det nutidige danske klima og forudsigelserne fra *Climate for Culture*. Dette klimasæt repræsenterer et scenarie, hvor klimaet som følge af Golfstrømmens mulige kollaps

forventes at blive koldere. Quebec er valgt ud fra regionens breddegrad, der tilsvarende Danmark med et klima der er koldt om vinteren og tilsvarende varmt om sommeren.

5.7.4 Modelgrundlag

Vægopbygningerne i de dynamiske simuleringer for henholdsvis væg 1 og væg 3 er baseret på de kalibrerede modeller fra de stationære beregninger beskrevet i kap. 5.5. Hvor modellerne ifm. modelkalibreringen var sat op med henblik på at afspejle forsøgets testopstilling, er der i de dynamiske simuleringer en række parametre, der tilpasses.

En væsentlig forskel mellem de stationære og dynamiske simuleringer er placeringen af kamerapunktet i WUFI, der i rammerne af modelkalibreringen svarede til forsøgets sensorplaceringer. I de dynamiske simuleringer er kamerapunktet således flyttet til det yderste lag af den organiske vindspærreplade. Formålet med denne ændring er at simulere og analysere det punkt i konstruktionen, der forventes at være i størst risiko for skimmelvækst. For uddybende information vedr. modelopsætninger henvises der til bilag E.

Luftspalter bag regnskærmen

Ved simulering af vægkonstruktioner med hulrum bag regnskærmen er det afgørende, om hulrummet er ventileret. Et ventileret hulrum påvirker udtørningspotentialer og temperaturen i luftlaget, idet luftstrømme kan fjerne fugt og dermed sænke den relative fugtighed på vindspærrens overflade, hvilket reducerer risikoen for skimmelvækst. De kalibrerede modeller er som følge af VIGOT-forsøgets testopstilling simuleret uden luftskifte bag regnskærmen - se kap. 5.3 *Testopstilling i hotbox*. I de dynamiske beregninger simuleres luftspalterne som værende ventileret, svarende til forholdene under realistiske betingelser.

For væg 1 udføres tre indledende simuleringer for at afprøve effekten af forskellige luftskifter bag regnskærmen: 10 h^{-1} , 30 h^{-1} og 100 h^{-1} , hvor h^{-1} angiver luftskiftet i hulrummet pr. time. Disse simuleringer baseres på Sjælsmark 2011-2024. I de efterfølgende beregninger anvendes der et luftskifte på 30 h^{-1} , der i litteraturen defineres som et godt ventileret hulrum (Morelli et al., 2017). Dette valg er baseret på studier, som på tværs af skiftende betingelser anbefaler luftskifter i hulrum for lette vægge og tage mellem $20\text{-}30 \text{ h}^{-1}$ (Morelli et al., 2017) (Møller et al., 2019). Gullbrekken et al. (2017) anbefaler luftskifter mellem $11\text{-}84 \text{ h}^{-1}$.

I væg 3 er der kun delvist hulrum bag regnskærmen, da konstruktionen med en 1-på-2 beklædning er testet uden ventileret luftspalte i hotbox-forsøget. Hovedparten af regnskærmen består af en 21 mm træbeklædning, mens kun bræddernes overlæg svarer til to lag med et mindre hulrum bag de udenpåliggende brædder. Som følge af modelkalibreringen repræsenteres overlægget samt de punktvisse hulrum bag hvert andet bræt som et 10 mm luftlag uden ventileret, hvilket giver en middelbetragtning for beklædningens samlede isolans.

Damp-tæthedetsplanet

I væg 3 blev tæthedetsplanets dampdiffusionsmodstand kalibreret til en tredjedel af dampbremsens deklarerede værdi. I de dynamiske simuleringer er dampbremsens vanddampdiffusionsmodstandsfaktor imidlertid ændret til den deklarerede værdi. Det skyldes, at den kalibrerede dampdiffusionsmodstand ikke blev vurderet som værende realistisk. Dette er nærmere beskrevet under kap. 6.2.3 i analysen af de kalibrerede modeller, der ligger til grund for de dynamiske simuleringer. Dampbremsen i væg 3 simuleres derfor

med en vanddampdiffusionsmodstandsfaktor på 25.800, svarende til den deklarerede Z-værdi på 33.

5.7.5 Modelopsætning

I det følgende beskrives udvalgte modelopsætninger i de dynamiske simuleringer. De komplette opsætninger af WUFI-modellerne er dokumenteret i bilag E

Randbetingelser

De dynamiske beregninger udføres i WUFI med et sæt randbetingelser, der fastlægger de forhold, under hvilke vægkonstruktionerne simuleres. Nedenfor præsenteres en detaljeret definition og beskrivelse af de anvendte randbetingelser.

Ude- og indeklima

I de dynamiske simuleringer er udeklimaet repræsenteret af følgende klimafil, som dækker forskellige regioner og tidsperioder. For begge vægkonstruktioner udføres simuleringerne med samtlige fem klimafil for at analysere, hvordan konstruktionernes fugttekniske ydeevne kan forventes at blive påvirket under forskellige klimatiske betingelser;

Klimafil "København Taastrup_1960-1990" indeholder historiske vejrdata for perioden 1960-1990 og omfatter målte værdier for temperatur, relativ fugtighed, stråling, vind, nedbør og skydække. Dette datasæt er anvendt som grundlag for de fremskrevne klimafil for perioderne 2020-2050 og 2070-2100.

Klimafil "Sjælsmark_2011-2024" indeholder nyere historiske vejrdata for perioden 2011-2024, herunder målte værdier for temperatur, relativ fugtighed, stråling, vind, nedbør og skydække. Dette datasæt anvendes til simuleringer, der skal vurdere vægkonstruktionernes fugttekniske ydeevne i det aktuelle danske klima.

Klimafil "København Taastrup_2020-2050" indeholder fremskrevne vejrdata baseret på historiske data (1960-1990) for perioden 2020-2050. Datasættet indeholder beregnede værdier for temperatur, relativ fugtighed, stråling, vind, nedbør og skydække og anvendes til simuleringer af, hvordan væggene reagerer på klimaforholdene i en nært forestående dansk klimaudvikling.

Klimafil "København Taastrup_2070-2100" indeholder fremskrevne vejrdata baseret på historiske data fra 1960-1990 for perioden 2070-2100. Dette datasæt indeholder beregnede værdier for temperatur, relativ fugtighed, stråling, vind, nedbør og skydække og anvendes til simuleringer af vægkonstruktionernes fugttekniske ydeevne i et varmere og mere fugtigt fremtidigt dansk klima.

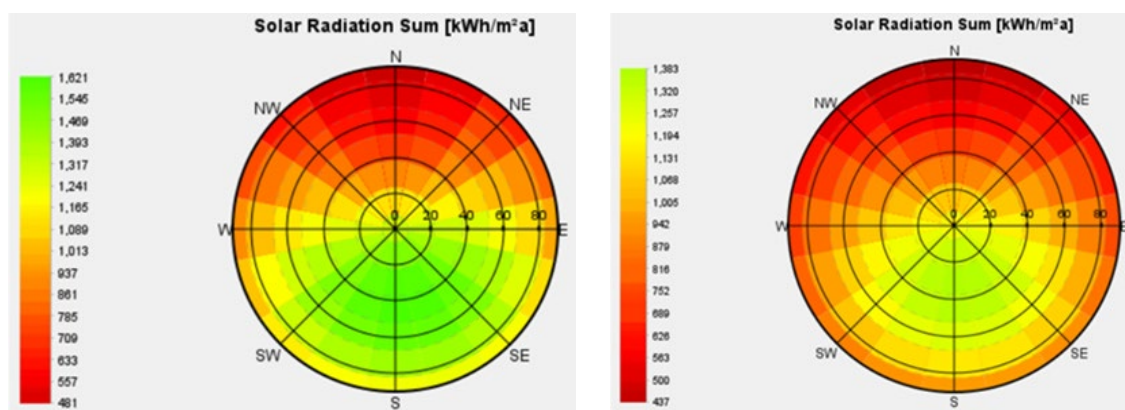
Klimafil "Quebec; Cold year" indeholder nyere historiske vejrdata for et referenceår i Quebec i Canada og indeholder målte værdier for temperatur, relativ fugtighed, stråling, vind, nedbør og skydække. Dette datasæt anvendes til simuleringer af vægkonstruktionernes fugttekniske ydeevne under fremtidige klimaforhold med koldere vintre og varme somre. Indeklimaet simuleres fortsat som fugtbelastningsklasse 3, som er beskrevet under kap. 4.1 *Fugtbelastningsklasser*. I tilfælde af ugunstige simuleringsresultater i denne fugtbelastningsklasse, foretages der enkelte repræsentative simuleringer med FBK 2 for at undersøge påvirkningen fra et mindre fugtbelastet indeklima.

Udvalgte indstillinger

Orienteringen er af betydning for konstruktionernes udtørningspotentialer gennem solpåvirkning, samt i hvilket omfang konstruktionerne belastes af vind og regn. Når orienteringen vælges, er det altså af betydning for konstruktionernes forudsætninger for at performe godt ift. de påvirkninger, de udsættes for ved skygge/sol og vind/regn. En sydlig orientering giver for simuleringer foretaget på den nordlige halvkugle en større solpåvirkning med et større udtørningspotentialer til følge. Omvendt vil en nordlig orientering give mere skygge og koldere temperaturer på den udvendige side af konstruktionen og være et relevant *worst-case* scenarie. Vindretningen er relevant ift. den belastning, vægkonstruktioner kan forventes at blive udsat for i form af vind og slagregn. Således vil en sydvestlig orientering være den orientering, hvor vind- og regnpåvirkningen vil være størst.

Simuleringer foretages for hhv. to orienteringer afhængigt af geografi:

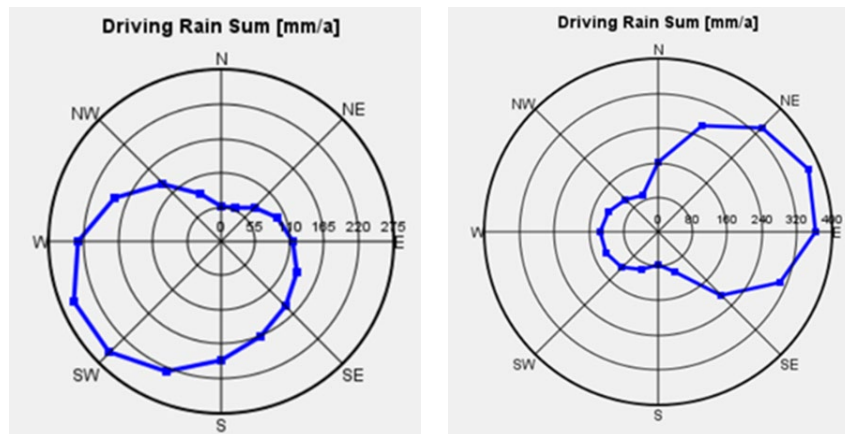
Orienteringen mod nord vælges for at undersøge konstruktionens ydeevne under minimal solpåvirkning, som er karakteristisk for den nordlige halvkugle og som giver øget risiko for skimmelvækst (Morelli et al., 2017).



Figur 36 (venstre). Solstråling iht. orientering for klimafilen *DMI Sjælsmark*. Farverne indikerer mængden af solpåvirkning fra de forskellige orienteringer. Rødlige farver indikerer lavere solpåvirkning, mens grønne farver illustrerer højere solpåvirkning. I dette tilfælde ses det tydeligt, at der er mest skygge fra en nordlig retning.

Figur 37 (højre). Solstråling iht. orientering for klimafilen *Oak Ridge National Laboratory Quebec*. Farverne indikerer mængden af solpåvirkning fra de forskellige orienteringer. Rødlige farver indikerer lavere solpåvirkning, mens grønne farver illustrerer højere solpåvirkning. I dette tilfælde ses det tydeligt, at der er mest skygge fra en nordlig retning.

Orienteringen mod sydvest simuleres på under de danske randbetingelser grundet vindforhold, som har betydning for slagregn. Det samme gør sig gældende for orienteringen mod nordøst, som i Quebec vil være den dominerende vindretning. Dette er visualiseret på figurerne 38 og 39 herunder. Også disse orienteringer medfører øget risiko for skimmelvækst grundet den øgede fugtpåvirkning fra slagregn (Morelli et al., 2017).



Figur 38 (venstre). Regnbelastning iht. orientering for klimafilen *DMI Sjælsmark*. De blå markeringer/streger indikerer fra hvilken retning der er registreret mest slagregnspåvirkning. I dette tilfælde er der registreret den største påvirkning fra en sydvestlig retning.

Figur 39 (højre) Regnbelastning iht. orientering for klimafilen *Oak Ridge National Laboratory Quebec*. De blå markeringer/streger indikerer fra hvilken retning der er registreret mest slagregnspåvirkning. I dette tilfælde er der registreret den største påvirkning fra en nordøstlig retning.

Explicit Radiation Balance anvendes, hvis der er et behov for at beregne en overfladetemperatur med en højere nøjagtighed eller dugaflejring fra afkøling af en overflade med temperaturer fra omgivelserne. Denne indstilling er som udgangspunkt ikke relevant for vægopbygninger (Fraunhofer IBP, 2024b). Indstillingen benyttes hovedsageligt hvor der er behov for at simulere strålingsudveksling med atmosfæren f.eks. på tagkonstruktioner. Det anbefales derfor ikke at benytte ved simuleringer på vægge (WUFI Forum, 2023). Indstillingen benyttes derfor ikke i disse simuleringer.

Lufttæthed. I WUFI-simuleringer tages der stilling til kvaliteten af tæthedsplanet i form af eksfiltration fra indeklimaet. Afhængig af hvor stor en grad af utætheder der forventes, vil eksfiltrationen fra indeklimaet variere. Utætheder kan simuleres ved brug af en *Moisture Source* i det materialelag, der forventes hårdest belastet. De dynamiske simuleringer i denne rapport simulerer en idealsituation uden utætheder. Det betyder, at der simuleres uden fugtbidrag fra konvektion, hvilket reducerer variablerne og i højere grad gør det muligt at drage paralleller mellem dette og tidligere studier, der har undersøgt forholdet mellem tæthedsplan og vindspærreplader (Hansen et al., 2024).

5.7.6 Evalueringsmetode

For hver simuleret iteration behandles resultaterne i følgende trin:

1. WUFI: kontrol af beregningens balance og konvergensfejl
2. Eksport af beregninger
3. Excel for skimmeevaluering vha. dagsgrænseberegninger og isoplet-grafer

Efter hver simulering foretages der en vurdering af simuleringernes egnethed ift. konvergensfejl og balance. Simuleringerne bør have så få konvergensfejl som muligt for at sikre, at simuleringen er kørt korrekt. Mere end 50 konvergensfejl pr. simuleret år indikerer således, at simuleringen er fejlbehæftet (Fraunhofer IBP., 2024a). Ved et større antal af konvergensfejl vurderes simuleringernes egnethed ligeledes pga. *Balance 1* og *Balance 2*, som skal have værdier så tæt på hinanden som muligt.

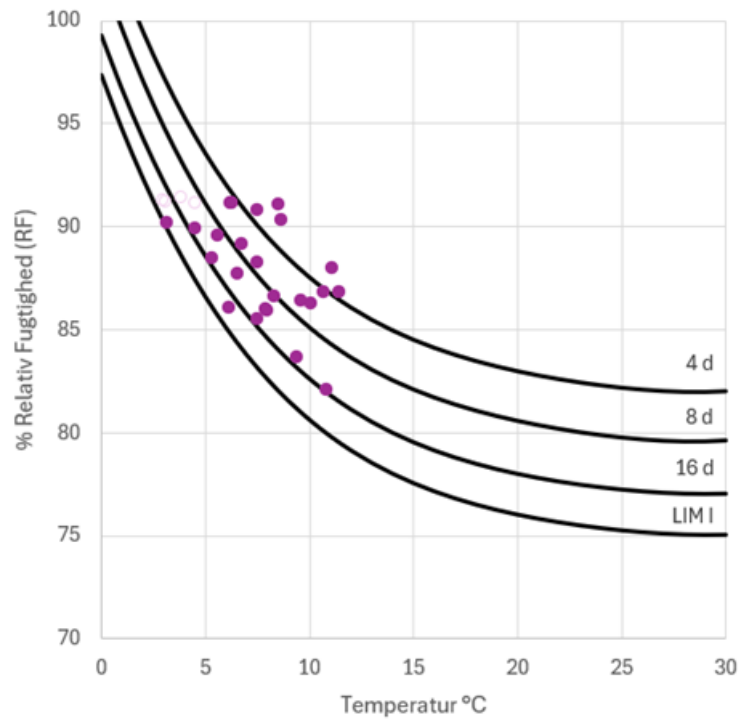
Resultaterne af de dynamiske simuleringer eksporteres og evalueres gennem brug af Sedlbauer-modellen beskrevet under kap. 5.6 *Skimmelmodeller*.

Modellen bygger på de beskrevne formler og beregner grænseværdier for relativ fugtighed afhængig af det specifikke dagsinterval på hhv. 30, 16, 8 og 4 dage. I Excel evalueres, om grænseværdierne bliver overskredet. Forekommer en overskridelse, returneres værdien 1 som indikation herpå. Regnearket beregner dernæst længden af sammenhængende overskridelser i antal dage og angiver, hvis dagsgrænserne på 30, 16, 8 eller 4 dage overskrides. Et eksempel på denne beregning er vist i figur 40 herunder.

8 d fugtgrænse						
GV	Overskridelse af grænseværdi (GV)					
RF	Ja/Nej [1/0]		Antal dage [d]		>8 dage [1/0]	
	Alle	>2023	Alle	>2023	Alle	>2023
95	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
96	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
99	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
95	1	#I/T	1	#I/T	0	#I/T
93	1	#I/T	2	#I/T	0	#I/T
96	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
100	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
98	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
96	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
97	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
92	1	#I/T	1	#I/T	0	#I/T
91	1	#I/T	2	#I/T	0	#I/T
90	1	#I/T	3	#I/T	0	#I/T
92	1	#I/T	4	#I/T	0	#I/T
93	1	#I/T	5	#I/T	0	#I/T
92	1	#I/T	6	#I/T	0	#I/T
95	1	#I/T	7	#I/T	0	#I/T
94	1	#I/T	8	#I/T	1	#I/T
89	1	#I/T	9	#I/T	1	#I/T
95	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
96	0	#I/T	0	#I/T	0	#I/T
93	1	#I/T	1	#I/T	0	#I/T
95	1	#I/T	2	#I/T	0	#I/T

Figur 40. Periodiske overskridelser af 8 dagesgrænsen. Figuren viser et eksempel på, hvordan evalueringarket beregner og registrerer overskridelser - i dette tilfælde en 8 dages fugtgrænse iht. Sedlbauer-modellen. Først registreres i 2. kolonne fra venstre et 1-tal eller 0, som udtrykker, om der sker en døgnoverskridelse. Antallet af overskridelser summeres i fjerde kolonne og nulstilles kun i tilfælde af, at overskridelserne i anden kolonne ophører. Hvis der registreres 8 sammenhængende overskridelser, angives dette med et 1-tal i sjette kolonne, der udtrykker antallet af periodeoverskridelser. Det betyder, at der iht. Sedlbauer-modellen kan forventes skimmelvækst.

Antallet af periodeoverskridelser illustreres gennem isoplet-grafer. Graferne visualiserer samtlige overskridelser for henholdsvis 30, 16, 8 og 4 dage - se figur 41 herunder.



Figur 41. Eksempel på isoplet-graf med angivelse af periodeoverskridelser. Udfyldte prikker definerer overskridelser af periodegrænserne efter simuleringen har opnået periodestabilitet. De tomme cirkler definerer overskridelser af periodegrænserne før simuleringen har opnået periodestabilitet.

6 Resultater og analyse

6.1 Hotbox-forsøg

Væggene i hotbox-forsøget blev påvirket til randbetingelserne i fire måneder. Målingerne foretaget bag væggenes vindspærreplader benyttedes til modelkalibrering i WUFI med henblik på at simulere væggenes fugttekniske robusthed under dynamiske forhold. De eksperimentelle data til brug i modelkalibreringen er blevet udvalgt pba. sensorplaceringer og tilpasset ift. måleperiode og fluktuationer, som beskrevet under kap. 5.4.3

Datahåndtering.

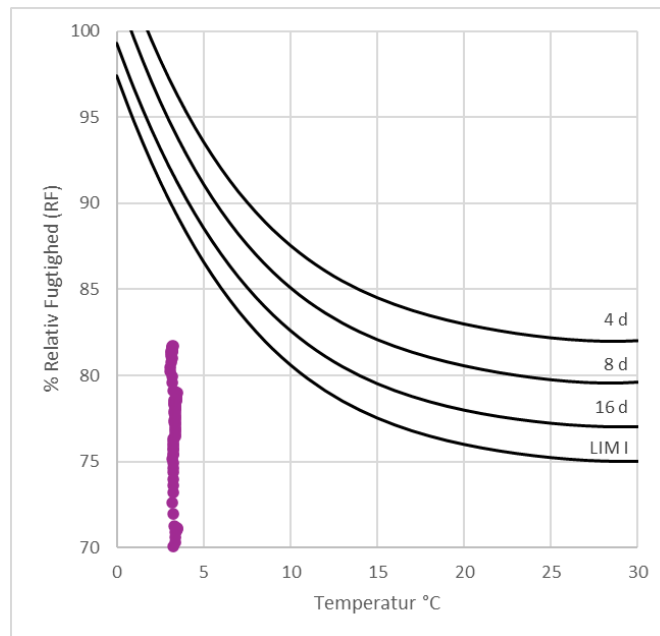
6.1.1 Måledata

Figurene 42-44 herunder viser midlede måledata for temperaturer og relative fugtigheder i væg 1 og væg 3 for perioden 10. juni til 3. oktober. I væg 1 overstiger den relative fugtighed 75 % efter halvanden måned og forbliver over dette niveau i resten af måleperioden. I væg 3 forbliver den relative fugtighed under 75 % gennem hele måleperioden.

Væg 1

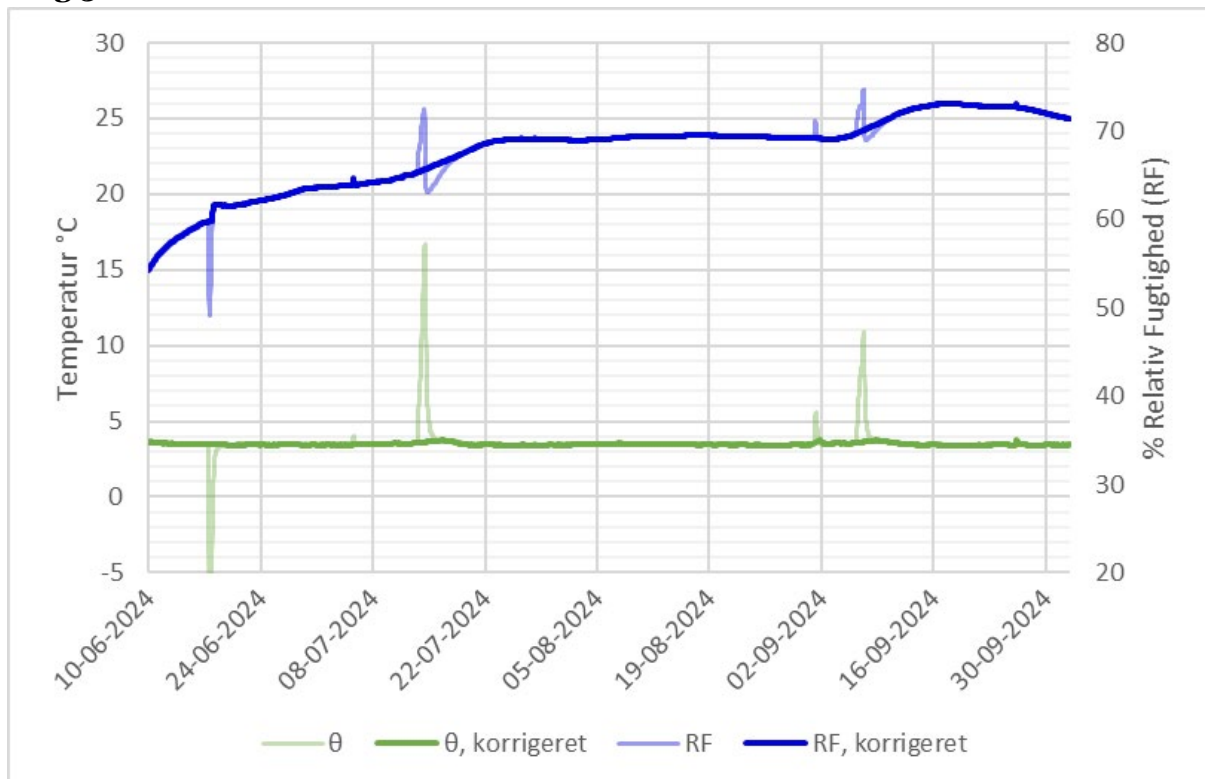


Figur 42. Målte temperaturer (grønne kurver) og relative fugtigheder (blå kurver) i målepunktet bag vindspærrepladen i væg 1. Kurverne udtrykker middelværdierne af måledata fra tre sensorer i midten af væggen. Grafen viser både måledata med fluktuationer samt korrigerede kurver, som er beregnet ved interpolering. Det ses, at den midlede relative fugtighed overskrider 75 % efter omtrent halvanden måned. Temperaturkurven uden for skalaen nåede -10 °C.



Figur 43. Midlede måledata pr. døgn udtrykt med prikker i en isoplet-graf. Grafen indeholder dagsgrænsekurver, der repræsenterer grænseværdier for skimmelvækst iht. Sedlbauer-modellen. På grafen er vist de korrigerede måledata uden fluktuationer for væg 1.

Væg 3

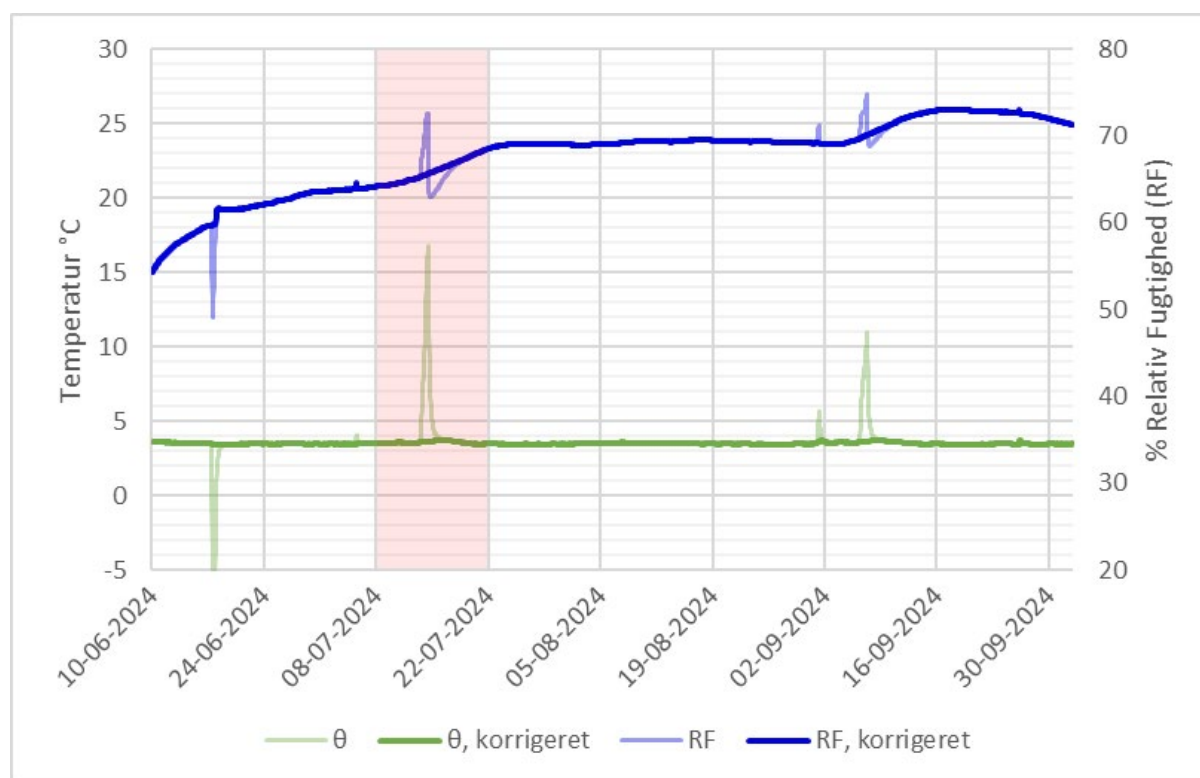


Figur 44. Målte temperaturer og relative fugtigheder i målepunktet bag vindspærrepladen i væg 3. Kurverne udtrykker middelværdierne af måledata fra tre sensorer i midten af væggen. Grafen viser både måledata med fluktuationer samt korrigerede kurver, som er beregnet ved interpolering. Det ses, at den midlede relative fugtighed (RF) ikke overskrider 75 % i løbet af måleperioden. Temperaturkurven uden for skalaen nåede -10 °C.

6.1.2 Analyse og tendenser

Forsøgets varighed på fire måneder svarer til omtrent et års vinter. Om end tommelfingerreglen beskrevet i kap. 5.6.1 om en grænseværdi på 75 % relativ fugtighed (RF) blev overskredet allerede efter kort tid i væg 1, viser isoplet-grafen i figur 43, at der ifølge Sedlbauer-modellen ikke kunne forventes skimmelvækst i skillelaget mellem isolering og vindspærrepladen. I væg 3 blev målt lavere værdier for RF end i væg 1, hvorfor der ikke er præsenteret en isoplet-graf for denne væg. Det peger på, at væggenes fugtkapacitet ikke var blevet overskredet ved forsøgets afslutning. De målte kurveforløb for RF ses imidlertid at være tendentielt opadgående i begge vægge, selvom der forekommer flere dyk undervejs - se figur 45 nedenfor. Det betyder, at der ikke kan drages en entydig konklusion om væggenes fugttekniske præstation i efterfølgende år. Således vil den fugttekniske robusthed under realistiske forhold bl.a. være betinget af, om væggene når at tørre ud inden næste vinterperiode, eller om fugten i væggene akkumuleres og kapaciteten dermed overskrides.

Udsving i målekurverne - fluktuationerne - udtrykker kortvarige anormaliteter i randbetingelserne. Fluktuationerne spænder over ændringer i temperaturen på op til 13 °C og ændringer i de målte relative fugtigheder på op til 6 % RF inden for et døgn. Udsvingene er dermed af en sådan karakter, der ikke kan begrundes i den kontinuerte påvirkning til randbetingelserne. Fluktuationerne kan derfor tilbageføres til forstyrrelser i hotbox-styringen eller eksterne påvirkninger, f.eks. at døren til det kolde kammer er blevet åbnet, og som kortvarigt har påvirket de hygrotermiske forhold på væggenes udvendige side. Det største udsving ses i væg 3 i perioden mellem d. 8.7 og 22.7. - her stiger begge kurver markant. Se figur 45 herunder.



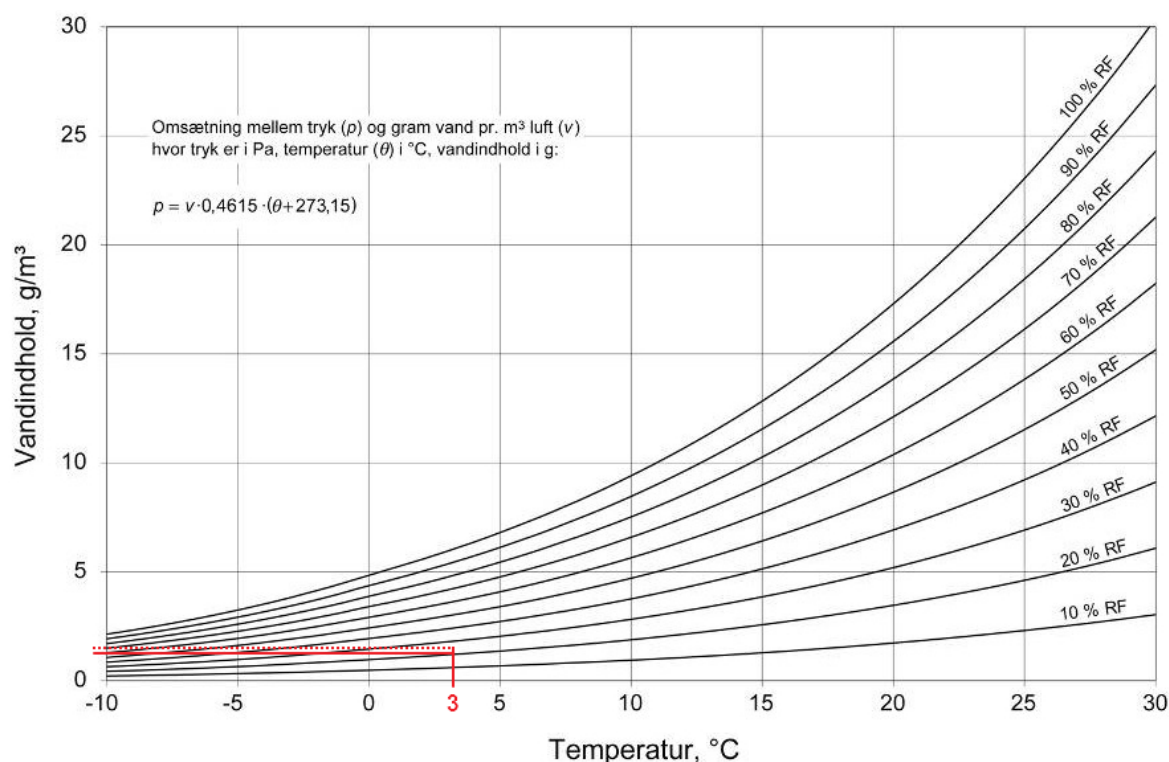
Figur 45. Fluktuationer i måledata for væg 3, hvori de største udsving blev registreret. I perioden mellem d. 8.7. og 22.7. steg temperaturen kortvarigt med 13 °C. Af den lyseblå kurve (RF, ej korregeret) fremgår, at den relative fugtighed indledningsvist steg, inden den faldt som følge af den

højere temperatur. Den indledende stigning skyldtes med overvejende sandsynlighed eksterne påvirkninger.

Relativ fugtighed er en funktion af både temperatur og det absolutte vanddampindhold i luften. Jo varmere luften er, desto mere fugt kan den indeholde. Det betyder, at den relative fugtighed ved en konstant fugtpåvirkning vil falde. Omvendt ses det i grafen, hvor både temperaturen og RF kortvarigt stiger kraftigt. Tilfælde som dette vil med overvejende sandsynlighed skyldes, at døren til det kolde kammer er blevet åbnet og kammeret muligvis er blevet betrådt. Varmere og potentielt fugtigere luft fra omgivelserne vil påvirke kammerforholdene, hvilket afspejles i måledata fra sensorerne bag vindspærrepladerne. Således kan det aflæses i et vanddampdiagram, at der ved en temperatur på ca. 3 °C skal under 1 g vanddamp/m³ til for at øge den relative fugtighed med 5 % - se figur 46 herunder. Efter den indledende stigning ses, at RF hurtigt falder under udgangspunktet som følge af den øgede temperatur.

Af kurveforløbene omkring fluktuationerne ses også, at den målte relative fugtighed stiger langsommere end temperaturen falder, når udsvingene atter retter sig. Trægheden skyldes bl.a. materialernes hygroskopiske egenskaber, der betyder, at vindspærrepladen vil fungere som "buffer", indtil materialet kommer i fornyet ligevægt med omgivelserne.

De målte data blev således fundet troværdige og korrigeret til brug i den efterfølgende modelkalibrering af væg 1 og 3.



Figur 46. Vanddampdiagram fra SBI-anvisning 224 (Brandt et al., 2013). Diagrammet illustrerer vandindholdets betydning for den relative fugtighed (RF) ved forskellige temperaturer. Det fremgår, at der ved temperaturer omkring frysepunktet skal mindre end 1 g/m³ til at hæve RF med 5-10 %.

6.2 Modelkalibrering

Modelkalibreringen er foretaget op imod de korrigerede måledata afrapporteret i det forudgående kap. 6.1 *Hotbox-forsøg*. Modeller af væg 1 og 3 er kalibreret med henblik på efterfølgende dynamiske simuleringer af væggenes fugttekniske robusthed under dynamiske forhold.

6.2.1 Nøgletal

Tabel 12 herunder viser start- og slutværdierne for RMSE-evalueringerne.

Evalueringsmetoden er beskrevet under 5.5.7 *Evalueringsmetode*.

Tabel 12. RMSE for simuleringerne ved start af modelkalibreringerne med deklarerede værdier og RMSE for de kalibrerede modeller.

	RMSE			
	<i>Deklareret</i>		<i>Kalibreret</i>	
	$\theta < 1$	RF < 5	$\theta < 1$	RF < 5
Væg 1	4,10	3,32 (It. 32) *	0,01	0,22
Væg 3	2,18	1,60 (It. 12) *	0,06	0,26

Note: stjernemarkerede RMSE-værdier er angivet for de første iterationer efter RF, hvor modellerne allerede er kalibreret for temperatur.

Tabellerne 13 og 14 på de følgende sider viser væggenes deklarerede materialeegenskaber og de kalibrerede design-værdier, der er fremkommet som følge af parametervariationerne beskrevet under kap. 5.5 *Modelkalibrering på baggrund af stationære hotbox-forsøg*.

Væg 1

Tabel 13. Deklarerede materialeegenskaber og kalibrerede design-værdier for væg 1. Densitet ρ er angivet som kg/m³. Deklarerede værdier i kursiv er standardværdier fra EN-standarder, hvor producenten har oplyst dette. De viste design-værdier er resultatet af modelkalibreringens trin 1-4 i WUFI, som er beskrevet under kap. 5.5.1 *Fremgangsmåde*. Værdierne f_T og f_U angiver de anvendte konverteringskoefficienter for hhv. temperatur og vandindhold som masse.

Lag	Tykkelse [m]	Byggevare	Værdier				
			Deklareret, D			Design, d	
Regnskærm	0,023	Varmebehandlet gran, $\rho = 450$	λ	0,12	↓	0,10	f_T 0,0003
			μ	20 (våd) ¹⁾	↑	130	f_U 0,5
Vindspærre	0,035	Træfiberplade, $\rho = 200$	λ	0,044	↓	0,042	f_T 0,0003
			μ	3	↓	4	f_U 0,5
Varmeisolering	0,340	Indblæst træfiberisolering, $\rho = 50$	λ	0,037	↑	0,038	f_T 0,0003
			μ	1,85 ²⁾	↓	1,2	f_U målt kurve
Tæthedsplan	0,015	OSB4 plade, $\rho = 660$	λ	0,12		0,12	f_T -
			μ	100 (Z 8)	↓	80 (Z 6)	f_U 1,5
Indv. beklædning	0,010	Fibergipsplade, $\rho = 1150$	λ	0,32		0,32	f_T 0,0002
			μ	13	↓	10	f_U -

Noter

- 1) μ -værdien på 20 er anført for materialet i våd tilstand iht. DS/EN ISO 10456.
- 2) μ -værdien på 1,85 er en referenceværdi fra et tilsvarende produkt. Værdien var ej oplyst af producenten.

Væg 3

Tabel 14. Deklarerede materialeegenskaber og kalibrerede design-værdier for væg 3. Densitet ρ er angivet som kg/m³. Deklarerede værdier i kursiv er standardværdier fra EN-standarder, hvor producenten har oplyst dette. De viste design-værdier er resultatet af modelkalibreringens trin 1-4 i WUFI, som er beskrevet under kap. 5.5.1 *Fremgangsmåde*. Værdierne f_T og f_U angiver de anvendte konverteringskoefficienter for hhv. temperatur og vandindhold som masse.

Lag	Tykkelse [m]	Byggevarer	Værdier				
			Deklareret, D			Design, d	
Regnskærm	0,021	Varmebehandlet gran, $\rho = 450$	λ	0,12	↓	0,1	f_T 0,0003
			μ	20 (våd) ¹⁾	↑	130	f_U 0,5
Vindspærre	0,035	Træfiberplade, $\rho = 200$	λ	0,044	↓	0,042	f_T 0,0003
			μ	3	↓	4	f_U 0,5
Varmeisolering	0,295	Indblæst træfiberisolering, $\rho = 42$	λ	0,037	↑	0,038	f_T 0,0003
			μ	1,85 ¹⁾	↓	1,2	f_U målt kurve
Tæthedsplan	0,00025	Kraftpapir	λ	-		-	f_T -
			μ	25800 (Z 33)	↓	8000 (Z 10)	f_U -
Varmeisolering	0,045	Træfiberiso. i formstykker, $\rho = 50$	λ	0,038	↑	0,04	f_T 0,0003
			μ	5 (tør) ²⁾	↓	2	f_U 0,5
Indv. beklædning	0,010	Fibergipsplade, $\rho = 1150$	λ	0,32		0,32	f_T 0,0002
			μ	13	↓	10	f_U -

Noter

- 1) μ -værdien på 1,85 er en referenceværdi fra et tilsvarende produkt. Værdien var ej oplyst af producenten.
- 2) μ -værdien på 5 er anført for materialet i tør tilstand iht. DS/EN ISO 10456.

Begge vægge

Af tabel 15 herunder fremgår væggenes nøgleegenskaber (deklarerede og design-værdier) opdelt efter parametervariationernes trin 1-3.

Tabel 15. Deklarerede materialeegenskaber og kalibrerede design-værdier for væg 1 og 3, opdelt på parametervariationernes trin 1-3. Lambda λ er angivet som W/(m K). μ -værdier er dimensionsløse.

Væg	R _{se}	Regnskærm				Vindspærre				Isolering (indblæst)				Dampbremse		Isolering (batts)			
		Væg 1 + Væg 3 Varmebehandlet træ				Væg 1 + Væg 3 Træfiberbaseret vindspærre				Væg 1 + Væg 3 Løsfyld af træfibre p = 50/42 kg/m3						Væg 3 Træfiber			
	m² K/W	λ,D	λ,d	μ,D	μ,d	λ,D	λ,d	μ,D	μ,d	λ,D	λ,d	μ,D	μ,d	μ,D	μ,d	λ,D	λ,d	μ	
Trin 1-2: kalibrering af temperatur og relativ fugtighed per væg																			
Væg 1	0,08	0,12	0,10	20-50 ¹⁾	130	0,044	0,042	3	4	0,037	0,039	1.85 ²⁾	1,2	OSB4	100	80			
Væg 3	0,11	0,12	0,10	20-50 ¹⁾	130	0,044	0,042	3	5	0,037	0,038	1.85 ²⁾	1,2	Papir	25800	8400	0,038	0,040	2
Trin 3: konformitet mellem væggene																			
Væg 1	0,10	0,12	0,10	20-50 ¹⁾	130	0,044	0,042	3	4	0,037	0,038	1.85 ²⁾	1,2	OSB4	100	80			
Væg 3	0,11	0,12	0,10	20-50 ¹⁾	130	0,044	0,042	3	4	0,037	0,038	1.85 ²⁾	1,2	Papir	25800	8000	0,038	0,040	2

Noter

- 1) Værdien er deklareret af producenten, men stammer fra DS/EN ISO 10456, tabel 4.
- 2) Producenten har ikke deklareret værdien. Tallet er taget fra et tilsvarende produkt.

Af tabellerne 16 og 17 herunder fremgår udviklingen af hhv. Z-værdi-forholdet (mellem vindspærre og tæthedsplan) samt beregnede transmissionskoefficienter (U-værdier) fra deklarerede værdier til kalibrerede design-værdier.

Tabel 16. Dampdiffusionsmodstande for vindspærre og tæthedsplan angivet som Z-værdier. Tabellen viser udviklingen fra deklarerede værdier til kalibrerede design-værdier samt Z-værdi-forholdet. Z-værdier er omregnet fra μ -værdierne anvendt i WUFI.

	Z-værdier [$\text{GPa s m}^2/\text{kg}$]				Z-værdi-forhold	
	Vindspærre		Tæthedsplan			
	Deklareret	Design	Deklareret	Design	Deklareret	Design
Væg 1	0,5	0,7	8	6	1 : 16	1 : 9
Væg 3	0,5	0,7	33	10	1 : 66	1 : 14

Tabel 17. Ukorrigerede U-værdier beregnet på baggrund af hhv. de deklarerede materialeegenskaber og kalibrerede design-værdier. U'-værdierne repræsenterer de simulerede udsnit af konstruktionerne og indeholder således heller ikke konstruktionstræ, reglar mv. Beregningerne forudsætter ventilerede luftspalter bag regnskærmen og er iht. DS 418 udført med udvendige overgangsisolanser (R_{se}) svarende til de indvendige (R_{si}).

	U'-værdi [$\text{W/m}^2\text{K}$]	
	Deklarerede værdier	Design-værdier
Væg 1	0,10 (0,096)	0,10 (0,098)
Væg 3	0,10 (0,097)	0,10 (0,099)

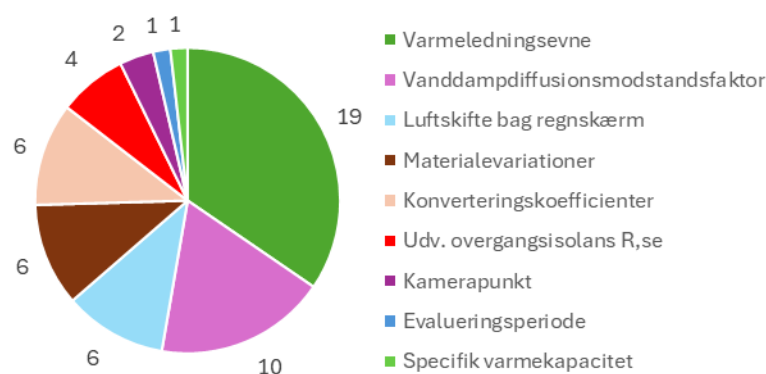
Note: værdier med tre decimaler i parenteser udtrykker udviklingen ml. beregningerne.

Af tabel 18 herunder fremgår overgangsisolanserne iht. DS 418 samt overgangsisolanserne i de kalibrerede modeller. Værdierne er fremkommet som følge af parametervariationerne beskrevet i kap. 5.5.6 *Parametervariationer: kammerforhold*.

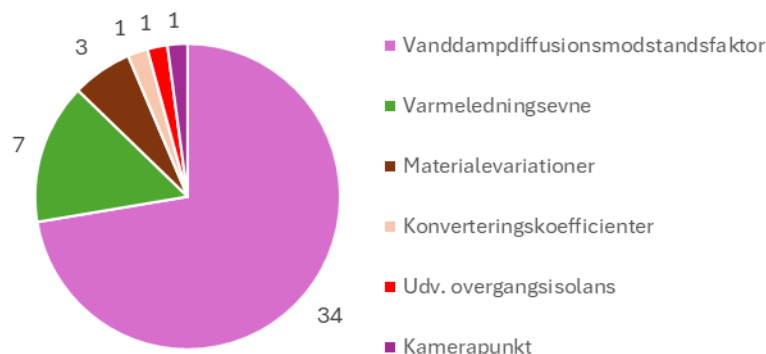
Tabel 18. Overgangsisolanser iht. DS 418 og i de kalibrerede modeller.

	Overgangsisolanser [$\text{m}^2\text{K/W}$]			
	Standard iht. DS 418		Kalibreret	
	R_{se}	R_{si}	R_{se}	R_{si}
Væg 1	0,04	0,13	0,10	0,13
Væg 3	0,04	0,13	0,11	0,13

Figureerne 47 og 48 herunder viser fordelingen af parametervariationerne per kalibreret væg.



Figur 47. Parametervariationer for væg 1. Tallene angiver antallet.

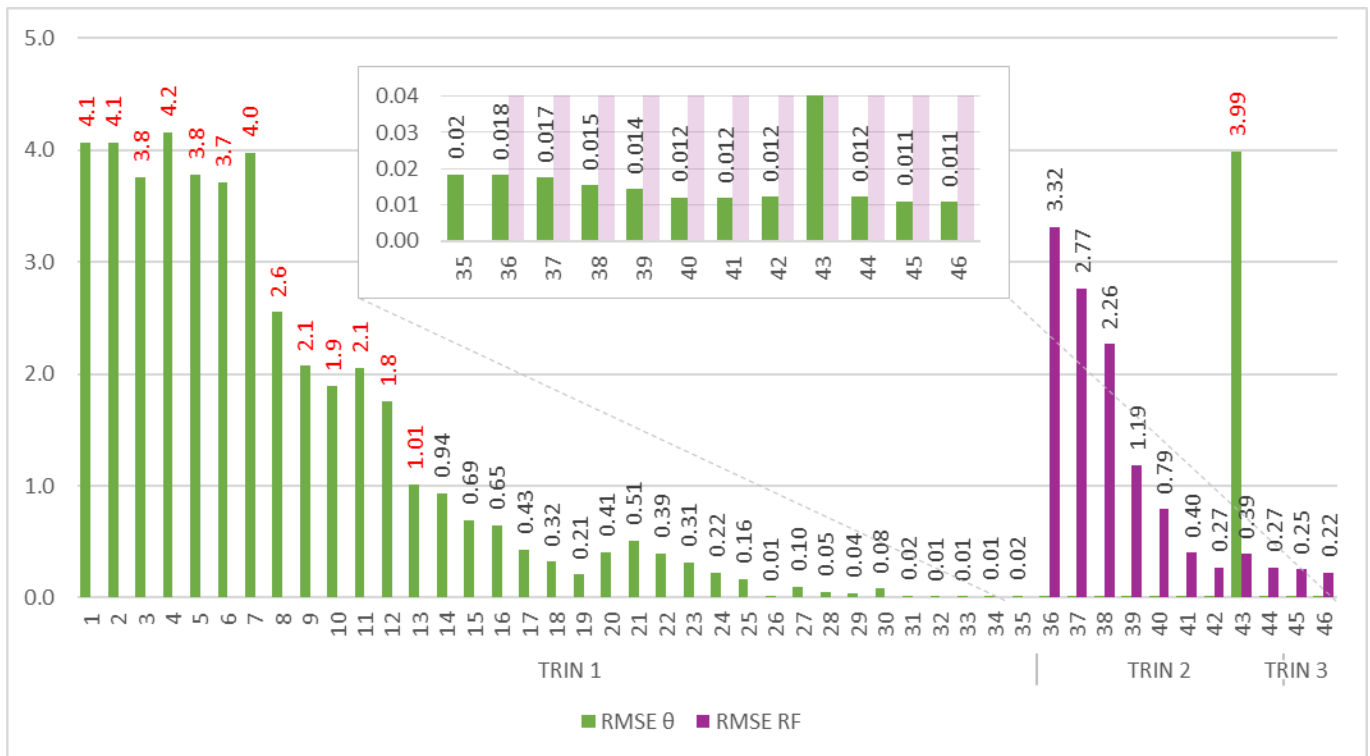


Figur 48. Parametervariationer for væg 3. Tallene angiver antallet.

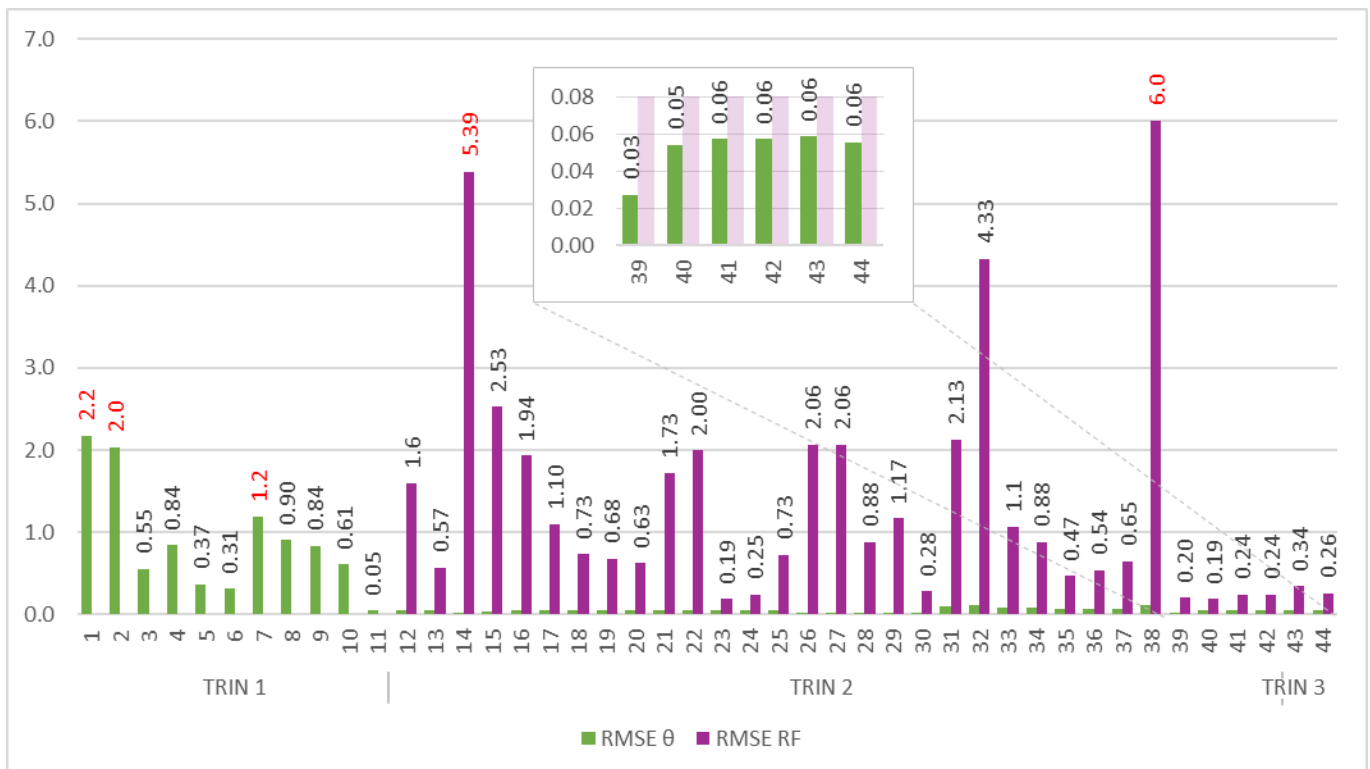
6.2.2 Iterationer

Figureerne 49 og 50 herunder viser udviklingen i iterationerne udtrykt gennem RMSE for temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF), henholdsvis for væg 1 og væg 3.

Samtlige iterationer er dokumenteret i bilag F.

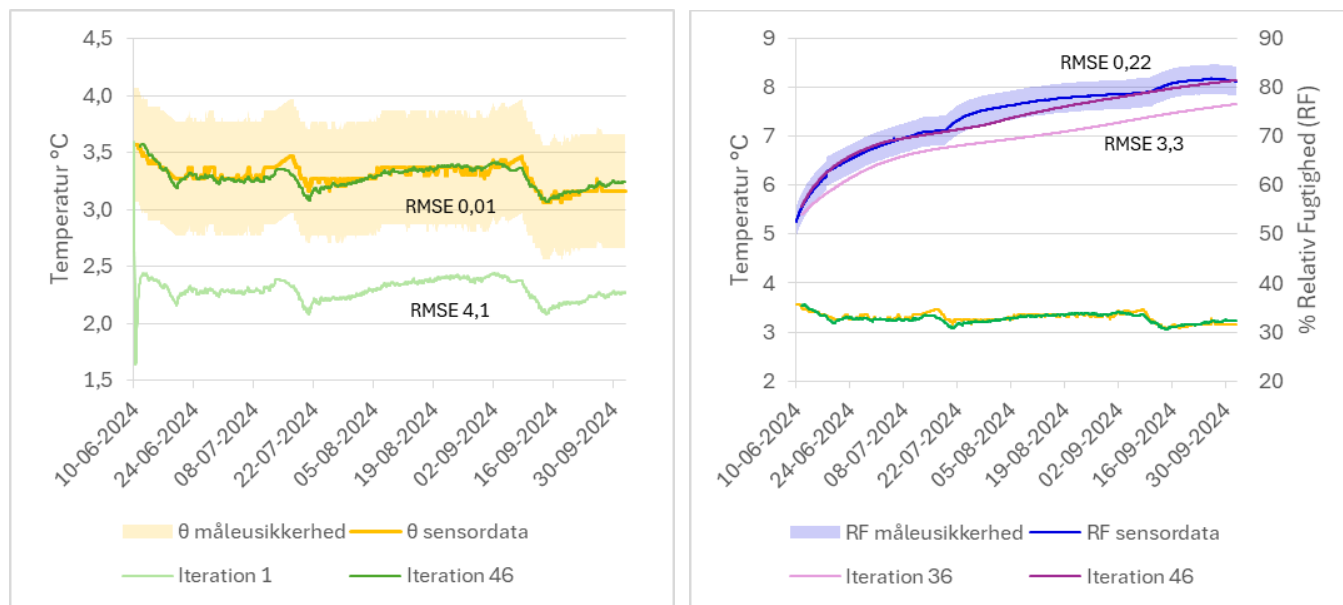


Figur 49. RMSE-værdier for temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF) for samtlige iterationer for væg 1. Røde tal markerer værdier for iterationer med $RMSE \geq 1$ for temperatur og ≥ 5 for RF. Relativ fugtighed er itereret fra it. 36.

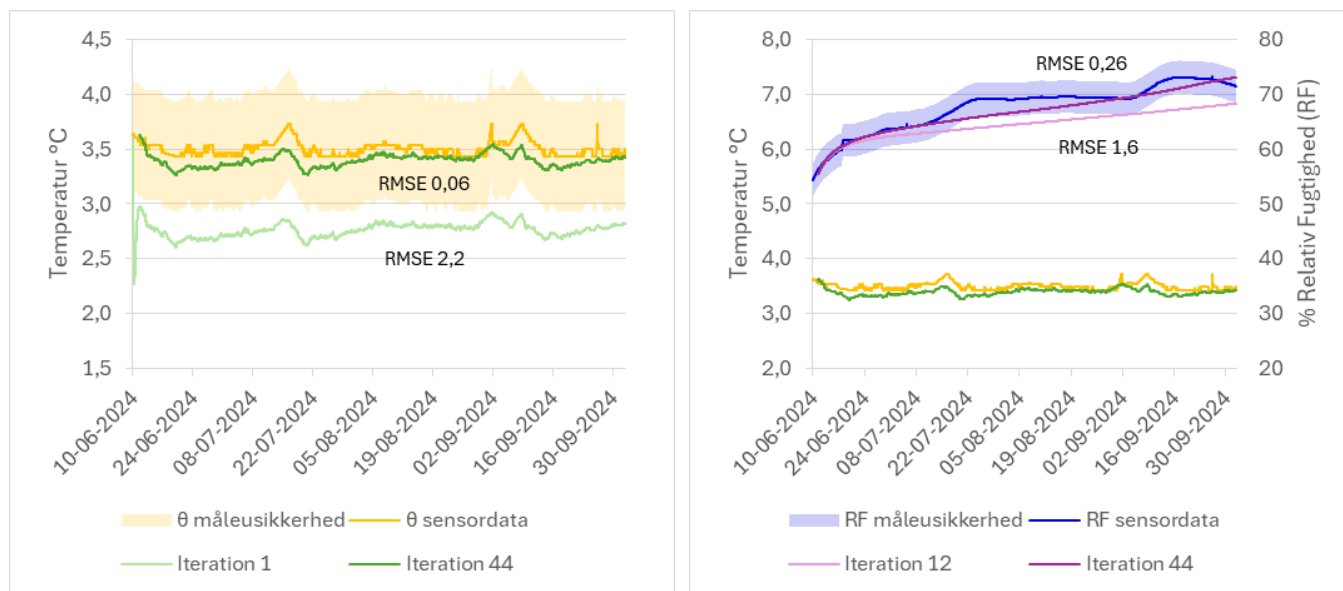


Figur 50. RMSE-værdier for temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF) for samtlige iterationer for væg 3. Røde tal markerer værdier for iterationer med $RMSE \geq 1$ for temperatur og ≥ 5 for RF. Relativ fugtighed er itereret fra it. 12.

Figureerne 51 og 52 herunder viser udviklingen i iterationerne udtrykt gennem kurveforløbene for temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF), henholdsvis for væg 1 og væg 3. De viste iterationer er hhv. den første og den sidste iteration.



Figur 51. Måledata og beregnede værdier for væg 1. Graferne viser kurveforløbene for den første og sidste iteration for hhv. temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF).



Figur 52. Måledata og beregnede værdier for væg 3. Graferne viser kurveforløbene for den første og sidste iteration for hhv. temperatur (θ) og relativ fugtighed (RF).

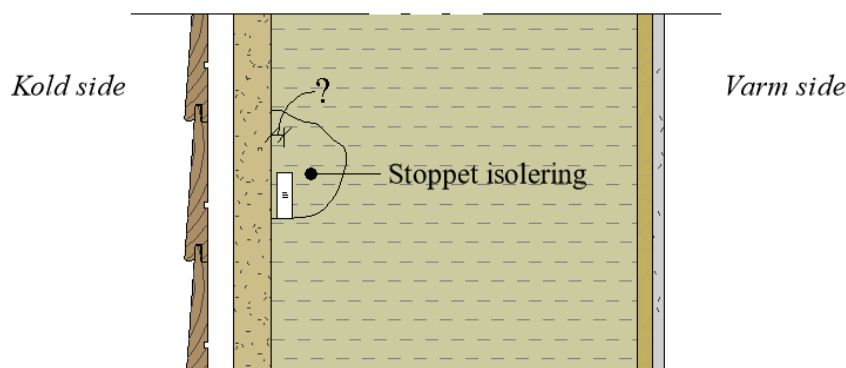
6.2.3 Analyse

Modelkalibreringen er foretaget gennem parametervariationer, der omfatter både materialeegenskaber, kammerforhold og sensorplaceringer - i alt blev ni forskellige parametre itereret. De dominerende faktorer var isoleringsmaterialernes varmeledningsevne inkl. konverteringskoefficienter samt tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand. For begge vægge var de målte temperaturgradienter bag vindspærrepladerne omtrent 1 °C højere end de indledende simuleringer. For at udligne forskellene blev såvel løsfyldsisoleringernes og formstykkernes lambda-værdier øget til de grænseværdier, der er blevet defineret for modelkalibreringen på baggrund af kravene til målenøjagtighed i DS/EN 12667. For de isolerende vindspærreplader blev varmeledningsevnen tilsvarende reduceret til den definerede grænseværdi - se tabel 19 herunder. Løsfyldsisoleringernes varmeledningsevne blev ikke vurderet at være nævneværdigt påvirket af den indblæste densitet. Væggens U-værdier blev kun marginalt påvirket af kalibreringen og forblev på 0,10 W/m²K.

Tabel 19. Deklarerede lambda-værdier og kalibrerede design-værdier for forsøgets isoleringsmaterialer. Det ses, at de kalibrerede lambda-værdier ligger i udkanten af de beregnede grænseværdier. Lambda-værdier er angivet som W/mK. Grænseværdierne er beskrevet nærmere under kap. 5.5.5 *Parametervariationer: materialedata*.

Materiale	λ_D	λ_d		
		Min.	Maks.	Kalibreret
Træfiberisolering, indblæst	0,037	0,036	0,038	↑ 0,038
Træfiberisolering, formstykker	0,038	0,037	0,040	↑ 0,040
Træfiberbaseret vindspærreplade	0,044	0,042	0,046	↓ 0,042

Ligeledes havde forsøgsspecifikke forhold i form af sensorplaceringer og luftspalter en væsentlig betydning. I kalibreringen af væg 1 blev simuleringens kamerapunkt, der modsvarer forsøgets sensorplacering, flyttet fra forsiden af isoleringslaget til 7 mm og endeligt 10 mm ind i isoleringen (iterationer #12 og #17). Det skyldtes måleudstyrets beskaffenhed og det forhold, at sensorerne ikke var fastgjort til vindspærrepladerne. Det blev derfor fundet sandsynligt, at sensorernes reelle placering i nogen grad kunne afvige fra den tiltænkte som følge af installationen - se figur 53.



Figur 53. Illustration af målerplacering. De indbyggede sensorer blev placeret løst op ad vindspærrepladerne, inden isoleringsmaterialerne blev genplaceret og stoppet. Sensorernes nøjagtige placeringer var dermed ikke kvalificerbare og derfor behæftet med en mindre usikkerhed.

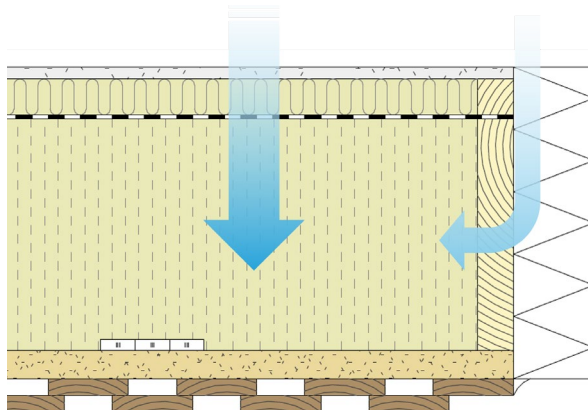
Luftspalten bag regnskærmen i væg 1 var grundet de fugede kanter i testopstillingen ikke ventileret. Den manglende omrøring betød, at indefrakommende vanddamp ikke blev fjernet fra vindspærrens overflade som følge af et luftskifte. Ligeledes fik det stillestående luftlag (iteration #12) og den varmebehandlede klinkbeklædning (iteration #19) dermed en isolerende effekt. Træets deklarerede værdier for såvel varmeledningsevne og dampdiffusionsmodstand er tabelværdier, der ikke tager højde for varmebehandlingens effekt eller fiberretningen i træet. Regnskærmen blev således kalibreret fra en Z-værdi på 2,2 til en Z-værdi på 14 GPa s m²/kg (μ 130), hvilket gjorde klinkbeklædningen til konstruktionens mest damptætte lag. Materialernes Z-værdier skal falde udadtil for at sikre, at fugt, der transporteres ud i ydervæggen ved diffusion, ikke ophobes i konstruktionen. Under realistiske betingelser, hvor luftspalten kan forventes at være ventileret, vil regnskærmen således ikke spille nogen rolle i den henseende. Tilsvarende betød den manglende luftspalte i væg 3, at regnskærmen også her bidrog med en dampdiffusionsmodstand til den simulerede konstruktion. Alle deklarerede og kalibrerede materialeegenskaber er oplistet i tabellerne 13 og 14 på s. 67.

Af søjlediagrammerne i figurerne 49 og 50 fremgår, at iterationerne fordeler sig forskelligt mellem væggene. Hvor kalibreringen af væg 1 skete med et kontinuerligt fald i RMSE-værdien og en overvægt af iterationer af temperaturen, var kalibreringen af væg 3 fokuseret omkring RF med stærkt svingende RMSE. Det skyldtes dels, at kalibreringen af væg 3 blev foretaget med udgangspunkt i den kalibrerede væg 1, hvilket betød, at temperaturkurven jf. figur 52 startede på et højere udgangspunkt. Dels at den relative fugtighed viste sig vanskelig at kalibrere imod. Søjlediagrammets mange udsving udtrykker parametervariationer af dampbremsens, isoleringsmaterialernes og vindspærrens dampdiffusionsmodstand i forskellige kombinationer (se bilag F). Dampbremsen af kraftpapir blev kalibreret til en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg, svarende til ca. 1/3 af den deklarerede værdi på 33 GPa s m²/kg. Denne afvigelse blev ikke fundet sandsynlig. Det formodes derfor, at den målte relative fugtighed bag vindspærrepladen var påvirket af et utilsigtet fugttilskud, der kunne opstå af følgende årsager:

1. Perforeret tæthedsplan
2. Konvektion som følge af manglende lufttæthed
3. Diffusion gennem vægelementets sider

Om end der ikke foreligger fotodokumentation af væggenes udførelse, vurderes det som usandsynligt, at tæthedsplanet var blevet perforeret. Ligeledes betød vægelementernes opbygning af hele plader med forseglede revner og materialeovergange (se bilag A), at der med stor sandsynlighed heller ikke blev tilført fugt gennem konvektion. I testopstillingen var der hverken fuget eller tapet indvendigt mellem vægelementerne og den adskillende EPS-isolering. Fugtig luft har således kunnet trænge gennem revnerne og ud på siderne af væggene. Idet der var fuget på udvendig side, har der imidlertid kun været en begrænset drivende potentialeforskel til stede mellem elementerne. Konstruktionstræ uden gennemgående knasthuller og vindridser anses som værende lufttæt og anvendeligt i tæthedsplanet, når tæthedsplanet samles til træet (Rasmussen & Nicolajsen, 2013). Ikke desto mindre har træ iflg. SBi-anvisning 277 en damppermeabilitet på 0,002 μ g/m s Pa, svarende til en Z-værdi på 23 GPa s m²/kg for rammernes dimension på 45 mm. Det betyder, at dampdiffusionsmodstanden kan have været lavere i væggenes rammer end i dampbremsen i tæthedsplanet, der har en deklareret Z-værdi på 33 GPa s m²/kg. Om end

revnerne mellem vægelementer og EPS var minimale, er det dermed sandsynligt, at der ad den vej har fundet et mindre fugttilskud sted. Dermed kan den målte relative fugtighed bag vindspærren have været påvirket af et utilsigtet og flersidet damptryk, hvilket bryder med forsøgets forudsætning om en ensidig fugtpåvirkning. Den kalibrerede vanddampdiffusionsmodstandsfaktor for tæthedsplanet i væg 3 vurderes på denne baggrund ikke at være troværdig. For væg 1 blev μ -værdien af tæthedsplanet kalibreret fra 100 til 80, svarende til en nedjustering af Z-værdien fra 8 til 6 GPa s m²/kg. Mens dette resultat lå inden for en margin, der i henhold til de citerede *round robin*-undersøgelser kan betragtes som sandsynlig, kan også væg 1 have været påvirket af et fugttilskud gennem elementernes sider. Hvor elementernes rammer i væg 3 *de facto* forventes at have haft en lavere dampdiffusionsmodstand end tæthedsplanet, forholder det sig omvendt i væg 1: her har Z-værdien for tæthedsplanet været lavere end rammernes, hvilket betyder, at relativt mere fugt har taget den 'nemme vej' igennem tæthedsplanet. Om end den absolutte fugtpåvirkning bag vindspærrepladen har været højere i væg 1, kan et utilsigtet fugttilskud derfor antages at have været forholdsmæssigt højere i væg 3.



Figur 54. Damptrykkets forventede påvirkning af sensorerne bag vindspærrepladen. På illustrationen ses, at overgangen mellem vægelementet og EPS-isoleringen var fuget på udvendig side. Alle materialeovergange på siderne var ligeledes forsegled med akrylfugemasse.

De forsøgsspecifikke betingelser i hotbox'en påvirkede ligeledes væggenes udvendige overgangsisolanser, der grundet en defekt ventilator blev vurderet højere end DS 418 anviser. Overgangsisolanserne bidrager kun i beskeden grad til konstruktionernes samlede isolans og temperaturerne bag vindspærrepladerne, men blev som led i kalibreringsprocessen beregnet og itereret (it. #28 og #45 i væg 1, it. #10 i væg 3) ud fra de anslåede luftbevægelser øverst og nederst i det kolde kammer. Overgangsisolanserne blev kalibreret fra standarden på 0,04 til 0,10 og 0,11 m²K/W for hhv. væg 1 og væg 3. Forskellen skyldtes, at væg 3 var placeret øverst i testopstillingen bag den skærm, der afbøjede luftbevægelserne fra ventilatoren. Det betyder, at luftbevægelserne kan forventes at have været højere for den nederste væg 1 med en lavere overgangsisolans til følge. De kalibrerede værdier fremgår af tabel 18. Beregningerne er dokumenteret i bilag C.

6.2.4 Delkonklusion - modelkalibrering

Modelkalibreringers kvalitet og anvendelighed er afhængig af forudsætningerne for de eksperimentelle data, der kalibreres imod. Mens kalibreringen af materialeegenskaber, der påvirkede temperaturerne i målepunkterne, lå inden for et troværdigt spektrum, var kalibreringen mod relativ fugtighed med stor sandsynlighed påvirket af utilsigtede fugttilskud i hotbox-forsøgets måledata.

WUFI Pro simulerer endimensionelt, og det har i modeldannelsen derfor ikke været muligt at regne med eventuelle fugttilskud fra siderne. For kalibreringsprocessen har det betydet, at der, i tilfælde af mangelfuld forsegling af elementernes sider, er blevet tilladt en højere grad af dampdiffusion igennem tæthedsplanet, end materialerne tilsiger. Det betyder, at en eller flere af de kalibrerede μ -værdier vurderes at være lavere, end de anvendte byggevarers faktiske egenskaber. Dette forhold har indflydelse på modellernes egnethed til brug i dynamiske simuleringer, der i dette projekt har til formål at simulere konstruktionernes fugttekniske robusthed under dynamiske betingelser. Kalibreringen har reduceret væggenes Z-værdi-forhold fra 0,5:8 (1:16) til 0,7:6 (1:9) for væg 1 og fra 0,5:33 (1:66) til 0,7:10 (1:14) for væg 3. Ved brug af dampbremsens deklarerede værdi er forholdet 0,7:33 (1:47) for væg 3. Dampdiffusionsmodstandsforholdet er således blevet lavere for begge vægge, hvilket betyder, at væggene iht. litteraturen beskrevet i denne rapport vil være mindre modstandsdygtige over for skadelig fugtpåvirkning. Om end det afhængigt af konteksten vil være god skik at simulere efter et *worst-case* scenarie, er der i dette tilfælde tale om ubekendte, der ikke kan kvantificeres. For væg 3 betyder det, at der i de dynamiske simuleringer ikke er taget udgangspunkt i den kalibrerede μ -værdi for tæthedsplanet. Der er ikke fundet belæg for at se bort fra de kalibrerede værdier i væg 1.

6.3 Dynamiske fugtsimuleringer for robusthedsanalyse

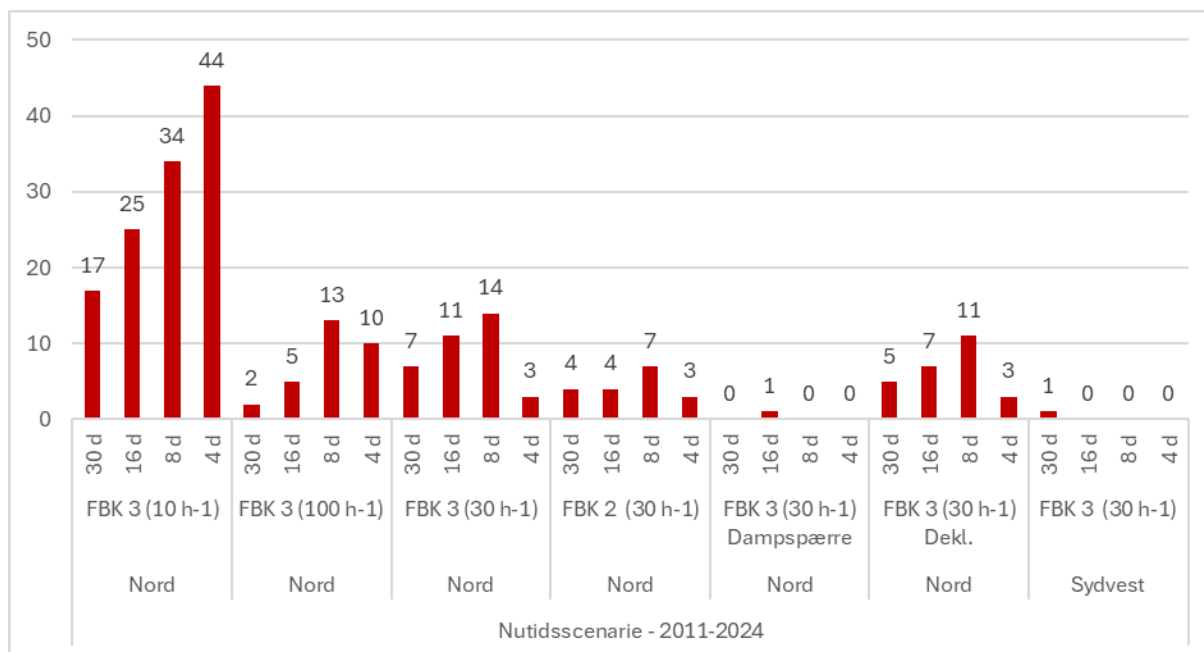
Simuleringer af væg 1 og væg 3 er foretaget med henblik på at analysere væggenes fugttekniske robusthed under dynamiske forhold. Resultaterne er vist som periodeoverskridelser i det danske nutidsklima og i fremtidsscenerierne 1 og 2.

6.3.1 Resultater

Nutidsklima

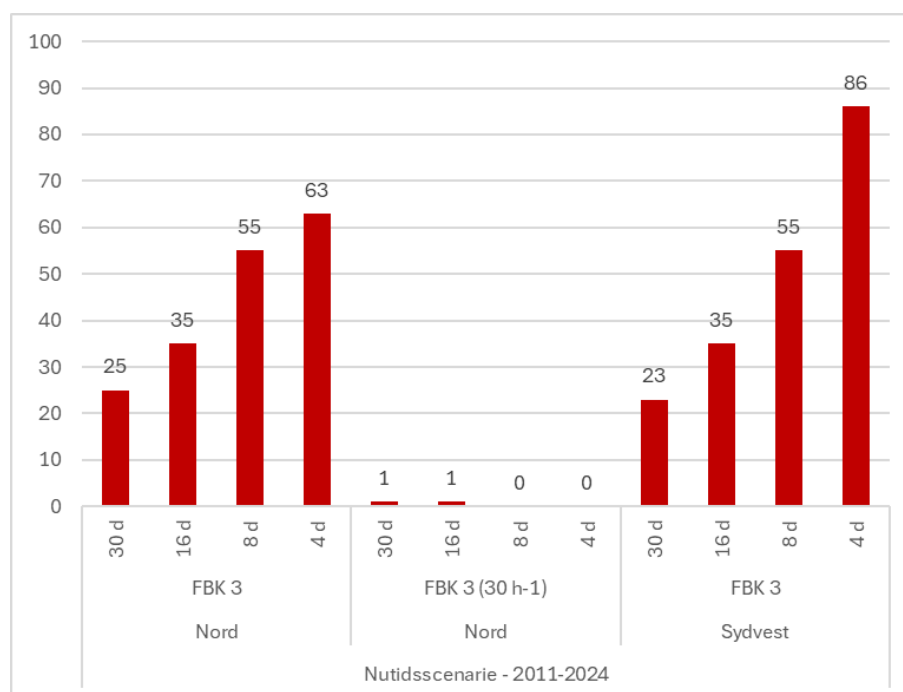
Af de følgende figurer 55 og 56 fremgår resultaterne for periodeoverskridelserne for hhv. væg 1 og 3 i det simulerede nutidsklima. Af diagrammerne fremgår også simuleringer med specifikke parametervariationer.

Væg 1



Figur 55. Periodeoverskridelser for væg 1. Søjlediagrammet viser antallet af periodeoverskridelser for dynamiske simuleringer foretaget med klimafilere i et dansk nutidsklima. Søjlerne viser overskridelser efter opnået periodestabilitet. Resultaterne er vist for hhv. 30, 16, 8 og 4 dagesoverskridelser.

Væg 3

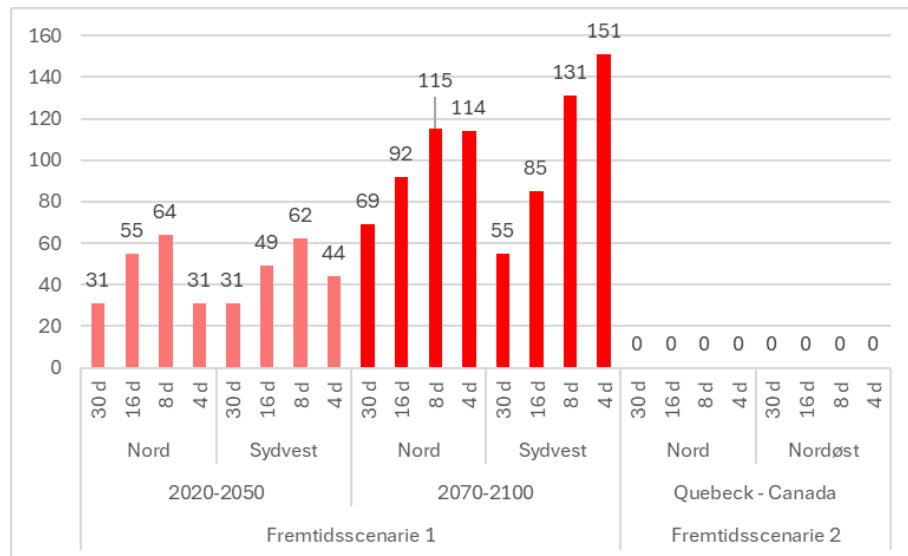


Figur 56. Periodeoverskridelser for væg 3. Søjlediagrammet viser antallet af periodeoverskridelser for dynamiske simuleringer foretaget med klimafilere i et dansk nutidsklima. Søjlerne viser overskridelser efter opnået periodestabilitet. Resultaterne er vist for hhv. 30, 16, 8 og 4 dagesoverskridelser. Hvor der er angivet et luftskifte betyder det, at simuleringen er foretaget med ventileret luftspalte mellem regnskærm og vindspærreplade.

Fremtidsscenarier

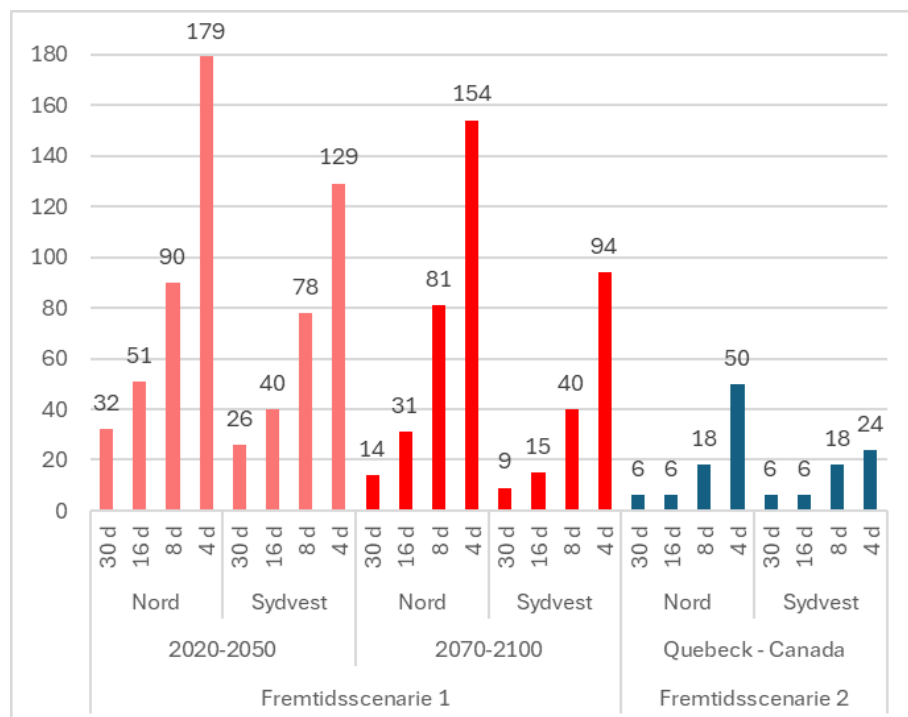
Af de følgende figurer 57 og 58 fremgår resultaterne for periodeoverskridelserne for hhv. væg 1 og 3 de to simulerede fremtidsscenarier.

Væg 1



Figur 57. Periodeoverskridelser for væg 1. Søjlerne viser overskridelser efter opnået periodestabilitet. Resultaterne er vist for hhv. 30, 16, 8 og 4 dagesoverskridelser.

Væg 3



Figur 58. Periodeoverskridelser for væg 3. Søjlerne viser overskridelser efter opnået periodestabilitet. Resultaterne er vist for hhv. 30, 16, 8 og 4 dagesoverskridelser.

6.3.2 Analyse

Nutidsscenarie

Indledningsvis variationer af væg 1 viser effekten af luftskiftet bag regnskærmen, hvor en lav rate på 10 h^{-1} giver over dobbelt så mange periodeoverskridelser i de forskellige dagsgrænser, sammenlignet med rater på 100 h^{-1} og 30 h^{-1} . Et lavt luftskifte viser sig altså at give grobund for mere fugt og dermed flere periodeoverskridelser. Samme tendens ses for simuleringerne af væg 3, hvor periodeoverskridelserne falder fra værdier mellem 25-63 helt ned til værdier mellem 0-1, når der implementeres en ventileret luftspalte.

Alle simuleringer foretaget for væg 1 i nutidsklima, undtaget simuleringerne med en dampspærre og orientering mod sydvest, viser periodeoverskridelser i større eller mindre grad. Således overskrides grænserne for både 30, 16, 8 og 4 dage, inklusiv for simuleringerne hvor fugtbelastningsklassen er ændret til FBK 2 og hvor damptæthedsplanets OSB4-plade er tilrettet efter de deklarerede værdier. Samme billede ses for simuleringerne mod nord og sydvest i væg 3, hvor der forekommer periodeoverskridelser for samtlige dagsgrænser på 30, 16, 8 og 4 dage.

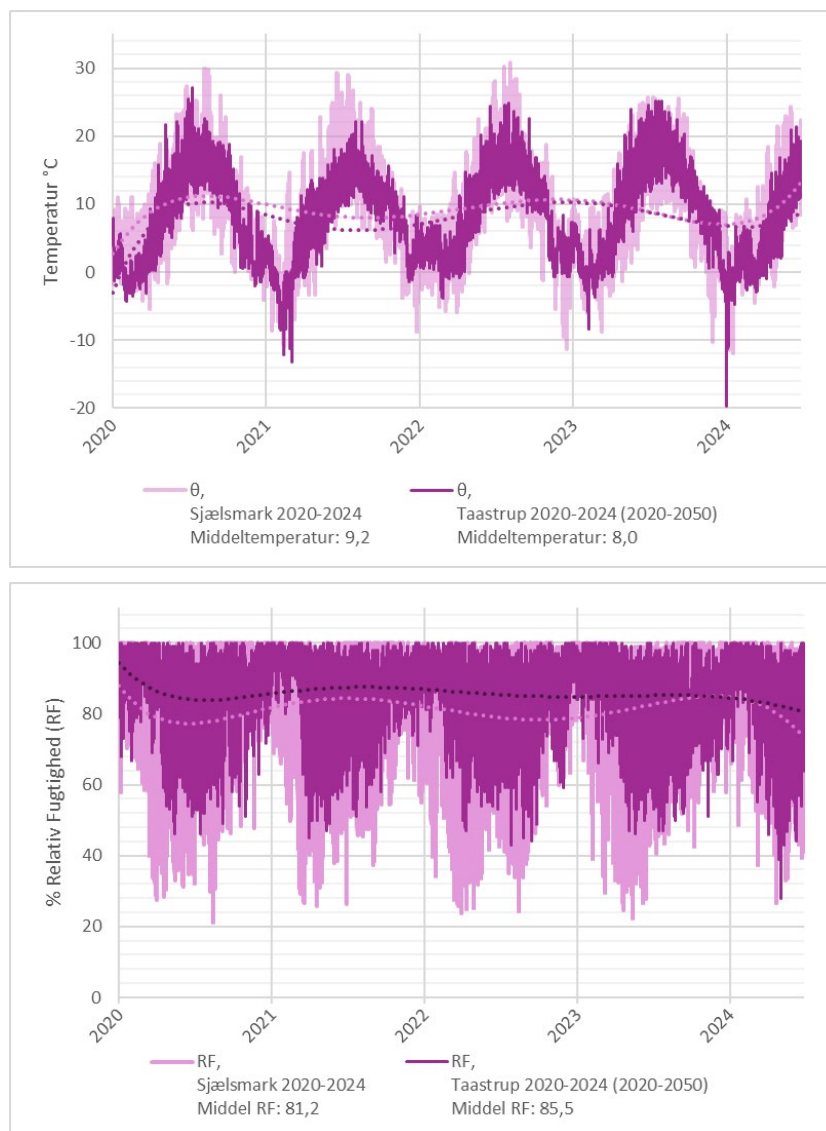
Hvor luftskiftets rate har en mindre, om end positiv betydning for den fugttekniske ydeevne, viser resultaterne, at implementeringen af en ventileret luftspalte i væg 3 har en afgørende betydning. Således falder periodeoverskridelserne til 0 eller 1 hen over en 13-årig periode for den hårdest belastede nordlige orientering, hvilket betyder, at man i praksis kan se bort overskridelsen.

En lignende indvirkning ses ved at ændre tæthedsplanet til en dampspærre med en dampdiffusionsmodstand på $450 \text{ GPa S m}^2/\text{kg}$, som ligeledes reducerer antallet af overskridelser til et ubetydeligt minimum. Dette giver anledning til at antage, at forholdet mellem tæthedsplan og vindspærre ikke har været tilstrækkeligt i alle simuleringer, og at et endnu tættere tæthedsplan kan afhjælpe de simulerede skimmelrisici. For komplet overblik over skimmeloverskridelser henvises der til bilag I og bilag J.

Fremtidsscenarie 1

Klimafilene for 2020-2050 og 2070-2100, der ligger til grund for simuleringerne i det varme fremtidsscenarie, er udarbejdet af *Climate for Culture* på baggrund af historiske måledata fra Taastrup. De fremskrevne klimadata overlapper således fire år med de målte klimadata fra Sjælsmark 2011-2024. Det giver mulighed for at sammenligne temperaturer og relative fugtigheder mellem de to datasæt og dermed få en indikation af kvaliteten af de fremskrevne klimadata.

Figur 59 herunder viser overlejlrede værdier for henholdsvis temperatur og relativ fugtighed i de to klimafler.



Figur 59. Målte og fremskrevne temperaturer og relative fugtigheder.

Trods divergerende udsving ses det, at tendenserne overordnet set følges ad hen over den 4-årige periode. Mens perioden er for kort til at kunne udlede egentlige konklusioner om fremskrivningernes kvalitet, fremgår det af de stiplede tendenskurver, at udviklingen mellem de sammenlignede data tendentielt følges ad. På grafen for relativ fugtighed ses, at de fremskrevne klimadata generelt ligger højere end de målte værdier. Det betyder, at simuleringer indenfor denne periode generelt vil ligge på den sikre side. Det er imidlertid ikke muligt at vurdere, om det også vil være tilfældet for de efterfølgende år, der i sagens natur endnu ikke kan valideres op imod målte klimadata. Sammenligningen giver dermed ikke anledning til at sætte spørgsmålstejn ved kvaliteten og brugbarheden af de fremskrevne klimaforhold.

Simuleringerne af væg 1 og væg 3 viser generelt periodeoverskridelser i alle klimasæt, orienteringer og dagsgrænser. For væg 1 ses tendensen værende stigende i antallet af

periodeoverskridelser med de fremskrevne klimafile. For væg 3 ses tendensen en anelse aftagende med de fremskrevne klimafile, om end der stadig er overskridelser. Ingen af konstruktionerne er dermed at betragte som fugtteknisk robuste i Fremtidsscenarie 1. Der er ikke udført simuleringer for væg 3 med ventileret luftspalte, som det er tilfældet i Nutidsscenariet. Resultatet fra denne simulering peger dog på, at implementeringen af et ventileret hulrum også i det varme fremtidsscenarie vil have en væsentlig positiv indflydelse, der vil sænke periodeoverskridelserne yderligt.

Fremtidsscenarie 2

I fremtidsscenarie 2 er klimadatafilerne udskiftet til referenceåret fra Quebec i Canada med et koldere klima. Denne ændring i randbetingelserne har en synlig effekt i antallet af periodeoverskridelser for begge vægge, hvilket fremgår af figurene 57 og 58.

For væg 1 er der ingen periodeoverskridelser med dette klimasæt. Væg 3 reduceres også betydeligt i antallet af periodeoverskridelser sammenlignet med Fremtidsscenarie 1, men ses stadig have overskridelser for alle simuleringer og dagsgrænser.

Effekten af den ventilerede luftspalte ses tydeligt: om end væg 1 har et væsentligt lavere Z-værdi-forhold end væg 3 og dermed tillader mere vanddamp at trænge ud i konstruktionen, er der ikke beregnet skimmelvækst i det kolde klima. Modsat væg 3, der trods et højere tæthedsplan har et stort antal periodeoverskridelser.

6.3.3 Delkonklusion - fugtteknisk robusthed under dynamiske forhold

De dynamiske simuleringer har vist, at de kalibrerede vægkonstruktioner kun i begrænset omfang kan regnes som fugtteknisk robuste i såvel det danske nutidsklima og i hhv. et varmere og koldere fremtidsscenarie. Således forudsiger Sedlbauers skimmelmodel, at der for både væg 1 og 3 kan forventes skimmelvækst på vindspærrepladerne i alle simulerede scenarier i fugtbelastningsklasse 3, der tager afsæt i det danske klima. I det kolde fremtidsscenarie, der i dette projekt er simuleret på baggrund af klimaet i Quebec i Canada, kan der ikke forventes skimmelvækst på de organiske vindspærreplader, når regnskærmen er ventileret. Det kan sandsynligvis begrundes med det kolde klima, der på trods af meget fugtige vintre ikke tillader vækst på vindspærren, da svampe generelt har behov for varmere vækstbetingelser (Brandt et al., 2023a). Parametervariationerne har vist, at der i alle scenarier vil være behov for at udføre væggene med ventilerede luftspalter i overensstemmelse med anbefalingerne i det Alment Tekniske Fælleseje. Iterationer af luftskiftet underbygger, at såvel høje og lave værdier er gavnlige, mens højere luftskifterater generelt resulterer i færre simulerede skimmelforekomster. Ligeledes ses orientering værende af væsentlig betydning for vægkonstruktionernes fugttekniske robusthed. De nordvendte konstruktioner opfugtes generelt mere, grundet manglende udtørningspotentialer fra solen, end det ses fra de sydvendte orienteringer.

7 Diskussion

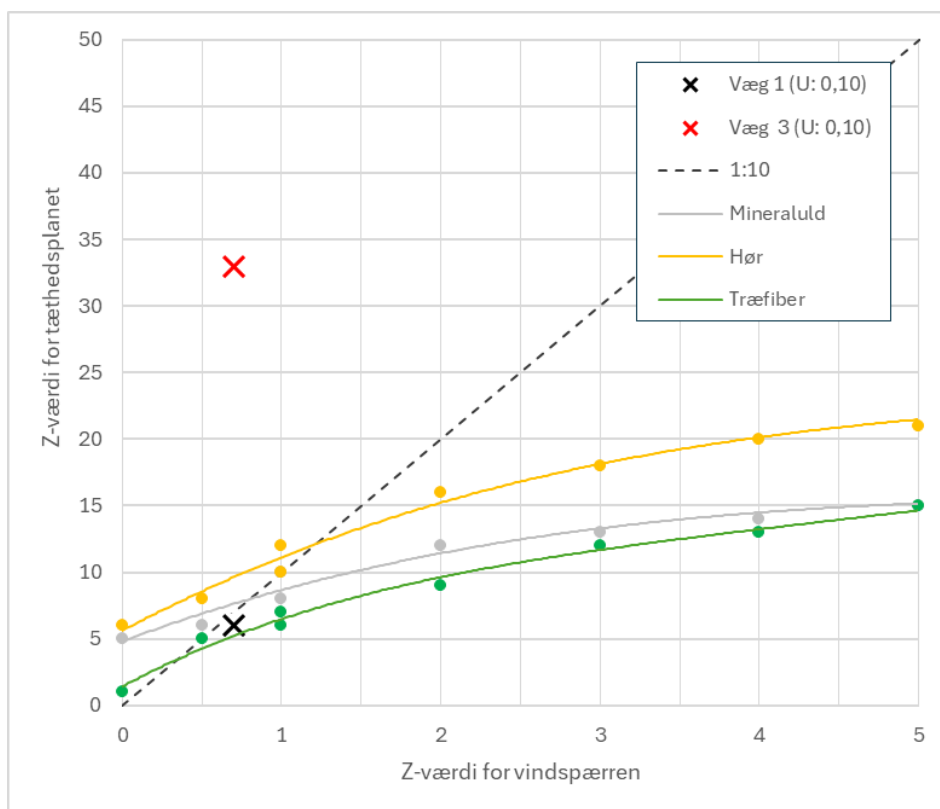
Undersøgelserne af væggenes fugttekniske robusthed i denne rapport beror på modeller, som er kalibreret mod eksperimentelle data fra VIGOT-projektets hotbox-forsøg. Som følge af den iterative kalibrering blev væggenes dampdiffusionsmodstandsforhold nedjusteret svarende til de kalibrerede design-værdier - se tabel 20 nedenfor. Af tabellen fremgår, at den kalibrerede Z-værdi for dampbremsen i væg 3 blev erstattet med produktets deklarerede værdi i de dynamiske simuleringer. Det skyldtes, at den kalibrerede værdi iht. analysen i kap. 6.2.3 blev vurderet som værende fejlbehæftet og sandsynligvis påvirket af et utilsigtet fugttilskud igennem elementets sider.

Tabel 20. Oversigt over væggenes dampdiffusionsmodstandsforhold.

	<i>Deklareret</i>	Z-værdi-forhold	
		<i>Design</i>	
		Kalibreret	Anvendt
Væg 1	0,5:8 (1:16)	0,7:6 (1:9)	0,7:6 (1:9)
Væg 3	0,5:33 (1:66)	0,7:10 (1:14)	0,7:33 (1:47)

Note: værdier i parenteser angiver det skalerede Z-værdi-forhold.

Modellernes Z-værdi-forhold lå med hhv. 0,7:6 og 0,7:33 på eller over de nedre grænseværdier, som Hansen et al. (2024) og Hofmann (2024) har beregnet for vægge med træfiberisolering og ventileret regnskærm - se figur 60 herunder. Grænsekurverne i grafen er beregnet for konstruktioner med U-værdi på 0,15 W/m²K.

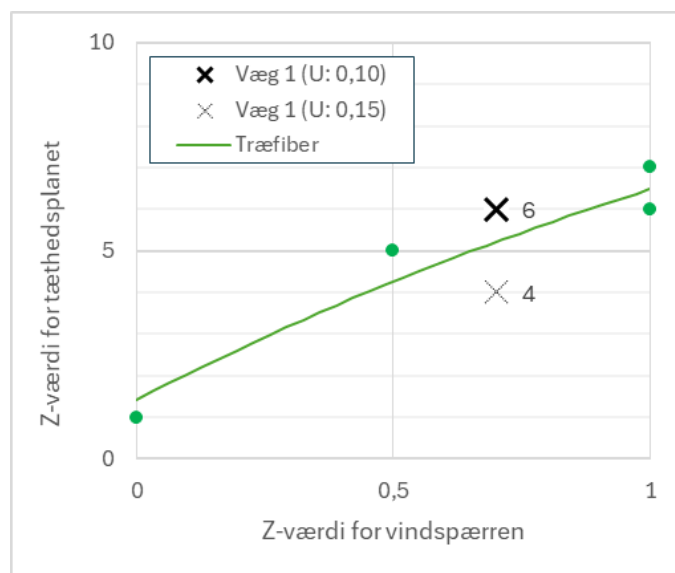


Figur 60. Tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand som funktion af vindspærrens dampdiffusionsmodstand ved brug af udvalgte isoleringsmaterialer og ventileret regnskærm. De anvendte design-værdier for væg 1 og 3 er indplaceret på grafen og viser, at væggenes Z-værdi-forhold ligger på eller over grænsekurverne beregnet af Hansen et al. (2024) og Hofmann (2024). Kurverne er angivet for en væg med en U-værdi på $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ i fugtbelastningsklasse 3. De simulerede vægge har U-værdier på $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. De indplacerede kryds er derfor indikative. Z-værdier er angivet som $\text{GPa s m}^2/\text{kg}$.

Hansen & Thomsen (2023) har i de bagvedliggende beregninger dokumenteret, at det nødvendige dampdiffusionsmodstandsforhold øges, når U-værdien falder, og konstruktionen dermed isolerer bedre. Det skyldes dels, at varmetabet driver fugten gennem påvirkning af damptrykket (*the driving force*), og dels, at der som følge af et reduceret varmetab bliver koldere i større dele af klimaskærmens ydre lag. Dermed kræves der mindre tilført fugt, førend den relative fugtighed når et kritisk punkt afhængigt af det undersøgte lag.

For konstruktioner med træfiberisolering i FBK 3 øges kravet til tæthedsplanets Z-værdi med ca. $2 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ (ved brug af vindspærre på $1 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$), når U-værdien reduceres fra $0,15$ til $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. De kalibrerede vægge har en U-værdi på $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvilket betyder, at væggenes Z-værdier skal justeres for at harmonisere med de forudsætninger, som figurens grænsekurver bygger på. Regnes der i hele tal, kræver det for væg 1, at vindspærrens kalibrerede Z-værdi på $6 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ nedskaleres til $4 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$ for at kunne vurdere Z-værdi-forholdet i forhold til de beregnede kurver - se figur 61.

Ved at foretage denne teoretiske normalisering fremgår det, at væggen vil ligge i underkanten af kurven. Anvendes i stedet tæthedsplanets deklarerede værdi, vil den skalerede Z-værdi gå fra 8 til $6 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$, som betyder, at væggen vil ligge over grænsekurven - dette er ikke vist på figuren. Det betyder, at væg 1 ligger i grænselandet af de teoretiske tærskelværdier, der er beskrevet i litteraturen.



Figur 61. Udsnit af figur 60, der viser den anvendte design-værdi for tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand i væg 1 justeret for U-værdien. Det ses, at den kalibrerede væg ligger på kanten af det tilladelige Z-værdi-forhold, når den vurderes efter grænsekurven beregnet af Hansen et al. (2024) og Hofmann (2024). U-værdier er angivet som W/m^2K .

Simuleringerne af væggenes fugttekniske ydeevne i det danske nutidsklima synes at validere grænseværdierne. Således viser resultaterne i figur 55, at om end der iht. Sedlbauers skimmelmodel kan forventes gentagende skimmelvækst på vindspærrepladen hen over en 13-årig periode, er antallet af periodeoverskridelser begrænset (ml. 3-14 periodeoverskridelser fordelt på dagsgrænserne mellem 2011-2024). Anvendes den deklarerede Z-værdi for OSB4-pladerne i tæthedsplanet, falder overskridelserne kun marginalt. Det indikerer, at det formodede fugttilskud kun har spillet en begrænset rolle. Tallene er beregnet for en nordvendt orientering, der grundet det lavere udtørningspotentialer er hårdest belastet. Simuleringen mod sydvest viste blot en enkelt overskridelse. Erstattes dampbremsen (OSB4) med en dampspærre med Z-værdi på $450 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$, er dette også tilfældet mod nord. Simuleringerne af væg 1 underbygger dermed grænsekurverne, der er fremkommet som polynomier - tendenslinjer - gennem de beregnede, hele tal. Det betyder, at kurverne bør benyttes med en vis margin.

Simuleringerne af væg 3 underbygger princippet om faldende Z-værdier indefra og ud, og bekræfter anbefalingerne i det Alment Tekniske Fælleseje vedrørende brugen af ventilerede luftspalter. Således ligger væg 3 med et forhold på 0,7:33 mellem vindspærre og tæthedsplan langt over den nedre grænsekurve i figur 60 og vil - vurderet ud fra væggenes Z-værdi-forhold alene - kunne betragtes som fugtteknisk robust. Væggen har imidlertid ikke en ventileret luftspalte, hvilket er forudsat i diagrammet. Resultaterne understreger betydningen af dette: således blev der i alle klimascenarier beregnet høje skimmelforekomster for væg 3. Med en ventileret luftspalte mellem vindspærre og regnskærm blev forekomsterne imidlertid reduceret til et ubetydeligt minimum i det danske nutidsklima. Også parametervariationerne over luftskiftets rate i væg 1 (figur 55) bekræftede luftspaltens funktion i konstruktioner, hvor regnskærmens dampdiffusionsmodstand er højere end vindspærrens. Jo højere luftskifte, desto bedre klarede væggen sig i simuleringerne. Luftskiftet kan imidlertid også blive for højt; ifølge litteraturen kan en meget høj rate således forårsage nedkøling af vindspærrepladen med marginalt højere skimmelrisici til følge (Morelli et al., 2017).

Resultaterne viser imidlertid, at de simulerede rater op til 100 h⁻¹ fortsat gav positive resultater.

7.1 Skimmelevaluering: alt eller intet?

Johansson et al. (2021) beskriver, at Sedlbauers LIM-model fra 2002 arbejder med en sikkerhedsmargin i en størrelse, der iht. forfatterens undersøgelser betyder, at modellen som oftest vil forudsige skimmelvækst i dynamiske simuleringer. VTT-modellen, der er en alternativ skimmel-model og beskrevet i bilag B, differentierer skimmelevalueringer ud fra placeringen af det undersøgte materiale. Således vil skimmelvækst på ventilerede vindspærreplader tillægges mindre betydning end på materialer tættere på indeklimaet (Viitanen, 2015). Modellen taler dermed for, at det kan være fugtteknisk forsvarligt at acceptere enkelte overskridelser.

Bygningsreglementet (BR 18) anviser i dets paragraffer 334-336, at bygninger skal projekteres og udføres, så der hverken opstår skimmelvækst eller skader på bygningen - se uddrag fra reglementet i figur 62. Reglementet differentierer imidlertid ikke mellem bygningsdele eller områder i konstruktionerne. Skimmelsvampe er ikke materialenedbrydende (Møller, 2013), og i tilfælde, hvor der måtte forekomme vækst på ventilerede vindspærreplader, ikke sundhedsskadelige for personer inden døre. En sådan tolkning af BR 18 bekræfter VTT-modellens evalueringskriterie, der for de simulerede vægge vil betyde, at der kan tillades en mindre, om end udefineret grad af skimmel.

§ 334	Bygninger skal projekteres, udføres og vedligeholdes, så vand og fugt ikke medfører risiko for personers sundhed eller skader på bygningen.
§ 335	Bygninger skal sikres mod skadelig akkumulering af fugt som følge af fugttransport fra indeluften. Kuldebroer i klimaskærmen må ikke medføre problemer med f.eks. kondensdannelse og skimmelvækst.
§ 336	Bygningskonstruktioner og -materialer må ikke have et fugtindhold, der ved indflytning medfører risiko for vækst af skimmelsvamp.

Figur 62. Uddrag af bygningsreglementets paragraffer vedrørende fugt. (Social- og Boligstyrelsen, 2024, § 334-338).

7.2 Simulere biobaseret - korrelationer til måledata

Hvor håndreglen i det Alment Tekniske Fælleseje anbefaler en universel grænseværdi på 1:10 i fugtbelastningsklasse 3, viser kurverne i figur 60, at det nødvendige dampdiffusionsmodstandsforhold stiger eksponentielt, når vindspærren bliver mere åben og kommer under en Z-værdi på ca. 1,5 GPa s m²/kg. Af diagrammet fremgår det, at det nødvendige Z-værdi-forhold ikke kun er en funktion af vindspærren og tæthedsplanet; studier af såvel Leszmann (2022), Hansen & Thomsen (2023) og Hofmann (2024) har beskrevet, at også isoleringsmaterialet er afgørende for et robust dampdiffusionsmodstandsforhold. Afhængigt af det anvendte materiale vil grænsekurverne dermed ligge højere eller lavere. I løbet af modeldannelsen blev alle isoleringsmaterialer kalibreret til lambda-værdier, der lå i udkanten af de definerede intervaller for

parametervariationerne - se tabel 19 på s. 73. Om end flertallet af de indbyggede isoleringsmaterialer var deklareret på baggrund af den mindre nøjagtige *Heat Flow Meter*-målemetode (HFM), var tendensen imidlertid påfaldende.

I en endnu ikke udgivet artikel (*submitted*) fra Andersen og Rasmussen (2024) dokumenteres det, at både fugtoptagelse, tørretider og svampevækst varierede markant i forsøg med sammenlignelige produkter inden for samme materialegruppe. Blandt de formodede årsager nævner forfatterne materialernes porøsitet og sorption. I dette projekt er de biobaserede materialer simuleret med udgangspunkt i WUFI-standardmaterialer, som blev tilrettet med byggevarernes deklarerede værdier for varmeledningsevne, dampdiffusionsmodstand, densitet, porøsitet og specifik varmekapacitet. I tilpasningen indgik imidlertid ikke materialernes sorptionskurver, som i de fleste tilfælde ikke var kendt. Modelkalibreringen blev således foretaget på et grundlag, der iht. litteraturen potentielt ikke har været tilstrækkeligt retvisende. Selvom simuleringerne grundlæggende validerer grænsekurverne i figur 60, er det dermed usikkert, hvilke værdier i deres deklaration ikke afspejler de anvendte materialer i hotbox-forsøget. Resultaterne af modelkalibreringen og de dynamiske simuleringer understreger, at kendskab og brug af de eksakte materialedata er afgørende, når man simulerer biobaserede ydervægskonstruktioner. I konteksten af klimakammerforsøg er det dermed også væsentligt at begrænse antallet af ubekendte i forsøgsopstillingen, som i dette projekt har besværliggjort en troværdig modelkalibrering.

7.3 Biobaserede konstruktioner i fremtidige klimascenarier

Undersøgelserne i dette projekt peger på, at de simulerede vægkonstruktioner befinder sig i et fugtteknisk grænseland. Under forudsætning af de usikkerheder, der knytter sig til både hotbox-forsøg og modelkalibrering, tyder væggenes tæthedsplan ikke på at være tilstrækkeligt robust, når de simuleres som udført i hotbox-forsøget. Resultaterne viser, at både væg 1 og væg 3 dog kan forventes at være fugtteknisk forsvarlige at bygge i et koldt og fugtigt fremtidsscenarie svarende til klimaet i Quebec, når de udføres med en ventileret luftspalte. Det skyldes, at svampe generelt ikke trives i kolde omgivelser. Modsat forholder det sig i et varmt og fugtigt fremtidsscenarie. Biobaserede materialer er grundet deres høje indhold af suktermolekyler følsomme over for fugt, og simuleringerne bekræfter, at de ved øvre-middel til høje fugtniveauer er i særlig risiko for vækst af skimmelsvampe. De fleste svampearter har optimale vækstbetingelser ved temperaturer mellem 25-30 °C (Brandt et al., 2023a), hvilket er markant højere end middelværdien for den foreløbige klimanormal 1991-2020 på 8,7 °C, der svinger fra 2 °C om vinteren til 16,1 °C om sommeren (DMI, u.d.). Jo højere temperaturerne bliver, desto mere gunstige bliver betingelserne for svampevækst. Det bekræftes af resultaterne i figurerne 55-58, der viser, at skimmelforekomsterne på vindspærrepladen øges markant mellem simuleringerne i det målte nutidsklima og det varme fremtidsscenarie, der er fremskrevet og forudsagt af det EU-finansierede forskningsprojekt *Climate for Culture*.

Måtte randbetingelserne bevæge sig i en ugunstig retning, bliver det dermed endnu vigtigere at bygge robuste konstruktioner, der tillader mindst muligt vanddamp at trænge ud i fugtfølsomme materialelag. De dynamiske simuleringer i denne rapport er udført under forudsætning af lufttæthed. Dette idealforhold inddrager dermed ikke fugttransport ved konvektion, der iht. fugtanvisningerne i det Alment Tekniske Fælleseje udgør et væsentligt større problem end diffusion. Det skyldes, at en luftstrøm typisk vil bære mere fugtig luft ind i den adskillende bygningsdel (Brandt et al., 2023a, 2023b). Det vil med den nuværende

danske byggeskik og byggelovgivning sjældent være tilfældet i virkeligheden. Således tillader Bygningsreglementet (BR 18) utætheder i klimaskærmen svarende til en volumenstrøm op til 1,0 l/s pr. m² opvarmet etageareal ved trykprøvning med 50 Pa (Social- og Boligstyrelsen, 2024, § 263). For et hus på ca. 150 m² svarer det til et areal på ca. 17 x 17 cm (Due & Brandt, 2020). Mens de tilladte utætheder også kan ligge i mangelfulde tætninger af døre og vinduer, vil det kunne blive et fugtteknisk problem, hvis de uforvarende udføres i konstruktionerne. Dermed bliver grænseværdierne i reglementets energikapitel særligt kontraproduktive i forhold til § 335 om skadelig fugtakkumulering, når de anvendes i rammerne af biobaseret byggeri.

Også dette forhold peger dermed på, at der skal indbygges yderligere robusthed i klimaskærmen. I praksis vil det betyde, at biobaseret byggeri både skal udføres lufttæt og at Z-værdi-forholdet skal være højere, end hvad de teoretiske grænsekurver i figur 60 tilsiger. Det betyder, at OSB4-plader i en tykkelse af 15 mm og en deklareret Z-værdi på 7,7 GPa s m²/kg *ikke* tyder på at være tilstrækkelige som tæthedsplan i fugtbelastningsklasse 3. Anvendes andre biobaserede isoleringsmaterialer end træfibre, vil tærskelværdien kunne stige yderligere. En dampbremse af kraftpapir med en deklareret Z-værdi på 33 GPa s m²/kg lader derimod til at være tilstrækkelig tæt under forudsætning af en ventileret regnskærm.

8 Perspektivering

Undersøgelserne i denne rapport har tydeliggjort vigtigheden af pålidelige data; det gælder såvel for de eksperimentelle måledata og deklarerede materialeegenskaber. Begge dele har vist sig at have stor betydning for såvel modelkalibrering og dynamiske simuleringer af biobaserede ydervægskonstruktioner, hvor Z-værdien af vindspærrepladerne er under 1,5 GPa s m²/kg. Måledata fra VIGOT-projektets hotbox-forsøg har med overvejende sandsynlighed været påvirket af et utilsigtet fugttilskud gennem elementernes rammer, der gør, at kurverne for den relative fugtighed bag vindspærrepladerne ikke er repræsentative for væggenes ydeevne. Dette forhold har sandsynligvis indbygget en margin i modeldannelsen, der også har påvirket resultater og skimmeevalueringer til 'den sikre side'. Hvor meget der er tale om, er imidlertid uvist.

Resultaterne viser, at de eksperimentelle kurveprofiler fra hotbox-forsøget ikke kan anvendes som en validering af fremtidige forsøg i klimakammer. De simulerede vægge har således ikke en fugtteknisk robusthed, der under hensyntagen til forsøgets forudsætninger og byggelovgivningen i øvrigt kan siges at være tilstrækkelig i begge fremtidsscenarioer. Resultaterne fra de dynamiske simuleringer ligger dog i et fugtteknisk grænseland, der tyder på, at de kalibrerede vægge med ventilerede luftspalter kan være tæt på en ydeevne, der er tilstrækkelig robust. Det gælder særligt for væg 3 med en dampbremse med en Z-værdi på 33 GPa s m²/kg. Tallene demonstrerer, at jo højere tæthedplanets dampdiffusionsmodstand er, desto højere bliver konstruktionernes robusthed. Det kan derfor være fristende at ty til en dampspærre af PE-folie med en Z-værdi på 300 GPa s m²/kg eller højere. Ældningsforsøg af plastmembraners holdbarhed viser imidlertid, at det vil være risikofyldt at indbygge regulære dampspærre, hvis systemernes holdbarhed ikke kan garanteres gennem byggeriets levetid. Lignende ældningsforsøg bør imidlertid gennemføres for papirbaserede dampbremsere som den, der er anvendt i forsøget.

Under forudsætning af tæthedsplanets holdbarhed viser resultaterne, at man i fremtidige forsøg med dampbremse skal opnå endnu bedre statiske forsøg med endnu lavere fugtniveauer bag vindspærren, før man kan forvente at have konstruktioner, der har en tilstrækkelig robusthed. De eksperimentelle kurveprofiler viser således, hvad måledata i fremtidige forsøg skal ligge under - men ikke, hvor meget bedre de skal være. For at få tilstrækkelig vished om konstruktionernes ydeevne kræves det, at de eksperimentelle data, der kalibreres imod, ikke er påvirket af utilsigtede fugttilskud. Fremtidige forsøg bør derfor udføres, så konstruktionerne med sikkerhed kun udsættes for en ensidig fugtpåvirkning. Det kan eksempelvis gøres ved at forsegle elementernes sider med en smøremembran med en Z-værdi over 200 GPa s m²/kg. Ligeledes vil det have stor værdi at teste materialeegenskaberne af de specifikke byggevarer, der indbygges i nye forsøg. Dels for at undersøge variationer i forhold til de deklarerede værdier, dels for at minimere variablerne i modelkalibreringen.

Resultaterne peger desuden på, at man fremover ikke behøver at simulere et koldt fremtidsscenario svarende til klimaet i Quebec. Det skyldes, at de simulerede vægge med ventileret luftspalte generelt viser gode resultater med få eller ingen periodeoverskridelser iht. Sedlbauers skimmelmodel. Det er derimod et varmt og fugtigt fremtidsscenario, konstruktionerne bør dimensioneres efter. I fremtidige undersøgelser vil det ligeledes være værdifuldt også at simulere skimmelvækst med VTT-modellen, der tager højde for materialernes placering ift. indeklimaet. Det bør i den forbindelse undersøges, hvorvidt skimmelmodellerne rummer den nyeste viden om biobaserede materialer i forhold til indbyggede skimmelsporer og varmetolerante svampearter.

Slutteligt understreger rapportens undersøgelser behovet for en præcisering af bygningsreglementets anvisninger om såvel skimmelvækst og lufttæthed. Begge kapitler er i deres nuværende form begrænsende for en omstilling til biobaseret byggeri og er ikke afstemt i kravet om at garantere fugtsikre, lufttætte konstruktioner. Således bør reglementets § 334-336 præciseres i forhold til konsekvenserne af potentiel skimmelvækst. Skimmelsvampe er i sig selv ikke materialenedbrydende og som udgangspunkt ikke skadelige for bygningskonstruktioner. Mere væsentligt synes det at være, om skimmel vokser i bygningsdele og på overflader, der udgør en sundhedsrisiko for beboerne. Også energikapitlets anvisninger om den tilladte volumenstrøm gennem klimaskærmen bør revurderes under hensyntagen til fugtfølsomme, biobaserede konstruktioner. Indtil en eventuel ændring træder i kraft, bør dynamiske fugtsimuleringer suppleres med beregninger, der tager hensyn til eksfiltration fra indeklimaet.

9 Konklusion

Denne rapport dokumenterer undersøgelser af korrelationerne mellem teoretiske fugtsimuleringer og eksperimentelle måledata fra klimakammerforsøg. Undersøgelserne er foretaget med henblik på at simulere den fugttekniske robusthed af udvalgte, biobaserede ydervægskonstruktioner under fremtidige klimaforhold. Mens videnskaben har sandsynliggjort både varmere og koldere fremtidsscenarier, synes det uomgængeligt, at det danske klima vil ændre sig markant. Det kan have store konsekvenser for bygningsmassen.

Som følge af Paris-aftalen, lovgivning om bygningers miljøpåvirkning og en stigende bevidsthed om klimaforandringer er det nødvendigt, at byggeriet begrænser dets klimapåvirkning ved at bevæge sig hen imod en ny, biobaseret byggeskik. Fremtiden ligger ifølge ny forskning kun 25 år frem i tiden, og der er derfor et presserende behov for at kvalificere biobaserede materialer, der kan bidrage til både lavere CO₂-udledninger og et mere ressourceeffektivt byggeri i Danmark.

Undersøgelserne viser, at vidensniveauet endnu ikke er tilstrækkeligt til at kunne bygge biobaserede ydervægskonstruktioner, der er tilstrækkelig robuste til med sikkerhed at være fugtteknisk forsvarlige i de sandsynlige fremtidsscenarier. Det afhænger i særlig grad af tæthedsplanet, der skal kunne opretholde den nødvendige dampdiffusionsmodstand gennem hele byggeriets levetid. Mens plastbaserede dampspærresystemer har været gængs byggeskik i mange år, viser ældningsforsøg, at holdbarheden kan være begrænset. Denne rapport undersøger forholdet mellem vindspærre og tæthedsplan ved brug af biobaserede alternativer i form af dampbremsere bestående af OSB4-plader og kraftpapir. Resultaterne tyder på, at OSB4-plader med en deklareret Z-værdi på 7,7 GPa s m²/kg ikke fungerer som tæthedsplan i fugtbelastningsklasse 3. En papirdampbremse med deklareret Z-værdi på 33 GPa s m²/kg kan derimod forventes at være tilstrækkelig i alle fremtidsscenarier, når konstruktionen udføres med en ventileret luftspalte. Resultaterne er imidlertid behæftet med usikkerhed som følge af mangler i klimakammerforsøgene. Det betyder, at resultaterne endnu ikke kan anvendes direkte i byggeriet, men vil tjene som udgangspunkt for fremtidige undersøgelser med bedre forsøg.

10 Kildehenvisninger

Abdou, A. & Budaiwi, I. (2013). *The variation of thermal conductivity of fibrous insulation materials under different levels of moisture content*. *Construction & Building Materials*, 43, 33–544. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.02.058>

Anh, L. D. & Pásztor, Z. (2021). *An overview of factors influencing thermal conductivity of building insulation materials*. *Journal of Building Engineering*, 44, 102604. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102604>

Brandt, E. et al. (2023a). *Fugt i bygninger : teori, beregning og undersøgelse* (SBI-anvisning 277, 1. udgave). København: BUILD.

Brandt, E. et al. (2023b). *Fugt i bygninger : bygningsdele* (SBI-anvisning 279, 1. udgave). København: BUILD.

Brandt, E. et al. (2013). *Fugt i bygninger* (SBI-anvisning 224, 2. udgave). København: Statens Byggeforskningsinstitut.

Climate for Culture (2024). *Climate for Culture*. Lokaliseret d. 26/9-2024 på <https://www.climateforculture.eu/>

Costes, J.-P., Evrard, A., Biot, B., Keutgen, G., Daras, A., Dubois, S., Lebeau, F., Courard, L. (2017). *Thermal Conductivity of Straw Bales: Full Size Measurements Considering the Direction of the Heat Flow*. *Buildings* (Basel), 7(4), 11. <https://doi.org/10.3390/buildings7010011>

de Place Hansen, E. J., Munch-Andersen, J., Rasmussen, B., Rasmussen, F. N., Du, G., Andersen, H. V., Rose, J., Morelli, M., Jensen, N. F., Hansen, T. K., Frederiksen, M., & Hadrup, N. (2024). *Varmeisoleringsmaterialer og deres anvendelse*. (SBI-anvisning 280, 1 udgave). København: BUILD.

DMI (u.å.). *Klimanormaler for Danmark*. Lokaliseret d. 16/12-2024 på <https://www.dmi.dk/vejrkalkyler/normaler-danmark>

DS 418:2011 + Till.1:2020. *Beregning af bygningers varmetab*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN 12667:2001 (1. udgav). *Byggematerialers termiske ydeevne – Bestemmelse af isolans ved hjælp af beskyttet varmeplade og varmestrømsmåler – Produkter med høj og middel isolans*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN 13171:2012+A1:2015 (1. udgave). *Termisk isolering i byggeriet – Fabriksfremstillede produkter af træfibre (WF) – Specifikation*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN 14915:2013+A2:2020 (1. udgave). *Massiv træbeklædning til indvendig og udvendig brug – Egenskaber, krav og mærkning*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN ISO 10456:2008 (2. udgave). *Byggematerialer og -produkter – Hygrotermiske egenskaber – tabelværdier og procedurer til bestemmelse af termiske deklarerede værdier og termiske designværdier*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN ISO 12572:2016 (2. udgave). *Byggematerialers og -produkters hygrotermiske ydeevne – Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber – Kopmetoden*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN ISO 13788:2013 (2. udgave). *Byggekomponenters og -elementers hygrotermiske ydeevne - Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overfladefugtighed og kondensdannelse i hulrum - Beregningsmetoder*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN ISO 6946:2017 (1. udgave). *Bygningskomponenter og bygningsdele – Termisk modstand og termisk transmission – Beregningsmetoder*. København: Fonden Dansk Standard.

DS/EN ISO 8990:1997 (1. udgave). *Termisk isolering. Bestemmelse af isolans ved brug af kalibreret og beskyttet varmekasse (hot box)*. København: Fonden Dansk Standard.

Due, L. & Brandt, E. (2020). *Bygningers lufttæthed* (BYG-ERFA (99) 20 04 24). Ny Kongensgade 13, 1472 København K: Fonden BYGERFA

Feng, C., Guimarães, A. S., Ramos, N., Sun, L., Gawin, D., Konca, P., Zhao, J., Grunewald, J., Kielsgaard Hansen, K., Hall, C., Fredriksson, M., Pavlík, Z., Janssen, H., Kočí, V., Kočí, J., & Černý, R. (2019). *A round robin campaign on the hygric properties of porous building materials*. MATEC Web of Conferences, 282, 2011.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202011>

Feng, C., Guimarães, A. S., Ramos, N., Sun, L., Gawin, D., Konca, P., Hall, C., Zhao, J., Hirsch, H., Grunewald, J., Fredriksson, M., Hansen, K. K., Pavlík, Z., Hamilton, A., & Janssen, H. (2020). *Hygric properties of porous building materials (VI): A round robin campaign*. Building and Environment, 185, 107242.
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107242>

Fraunhofer IBP. (2019). *WUFI Mould Index VTT Help*.

Fraunhofer IBP. (2024a). *WUFI Pro 6.8 online help*.

Fraunhofer IBP. (2024b). *Guideline for the Calculation and Evaluation of an ETICS with Wood Fibre Insulation*.

Gottfredsen, F. R. & Nielsen, A. (2006). *Bygningsmaterialer: grundlæggende egenskaber*. Polyteknisk Forlag.

Gullbrekken, L., Kvande, T., & Time, B. (2017). *Ventilated wooden roofs: Influence of local weather conditions-measurements*. Energy Procedia, 132, 777–782.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.029>

Hansen, S. S., Thomsen, M. A., Morelli, M., & Rasmussen, T. V. (2024). *Requirements of the Vapour Barrier in Wood-Frame Walls*. *Buildings* 2024, 14, 3186. <https://doi.org/10.3390/buildings14103186>

Hansen, S., & Thomsen, M. A. (2023). *Anvendelse af biogene isoleringsmaterialer i ydervægskonstruktioner: Fugtteknisk robust ydervægskonstruktion - Z-værdibetragtninger mellem tæthedsplanet, på den varme side af ydervægskonstruktioner og vindspærren* [Speciale]. Aalborg Universitet. https://kdbk-aub.primo.exlibrisgroup.com/permalink/45KBDK_AUB/a7meof/alma9921565428205762

Haugbølle, K., Mahdi, V., Morelli, M., & Wahedi, H. (2021). *BUILD levetidstabel: Version 2021* (BUILD rapport 2021:32, 2. udgave). Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.

Hofmann, L. (2024). *Krav til z-værdi i tæthedsplanet i lette ydervægge med biogene materialer ved forskellige fugtbelastningsklasser: Materialeparametres betydning for anvendelse i fugttekniske robuste konstruktioner* [Speciale]. Aalborg Universitet. https://kdbk-aub.primo.exlibrisgroup.com/permalink/45KBDK_AUB/a7meof/alma9921779511305762

International ThermoWood Association (2023). *ThermoWood Handbook*. Lokaliseret d. 10/11-2024 på <https://www.thermowood.fi/thermowood-handbook-published>

Johansen, B. L. (2021). *Træfacader* (TRÆ 55, 2. udgave). Lyngby: Træinformation.

Johansson, P., Lång, L., & Capener, C.-M. (2021). *How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective?* *Journal of Building Engineering*, 40, 102301. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102301>

Johra, H. (2024). *Measurement Capabilities and Equipment at the Building Material Characterization Laboratory of Aalborg University (2025)*. Department of the Built Environment, Aalborg University.

Klimatilpasning (2024). *Vejret i Danmark bliver varmere, vådere og vildere*. Lokaliseret d. 15/12-2024 på <https://klimatilpasning.dk/fremtidens-klima>

Kosiński, P. (2023). *Moisture Transport in Loose Fibrous Insulations under Steady-State Boundary Conditions*. *Materials*, 16(24), 7656. <https://doi.org/10.3390/ma16247656>

Kosiński, P., Wojcik, R., & Rosinski, A. (2023). *An influence of temperature on thermal conductivity of loose fill insulations of natural origin*. *Journal of Physics: Conference Series*, 2654(1), 12076. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2654/1/012076>

Kosiński, P. & Patyna, K. (2024). *Practical Use of Materials of Natural Origin as Loose-Fill Insulations in Open-Diffusion Constructions—Observation and Numerical Simulation*. *Sustainability*, 16(11), 4593. <https://doi.org/10.3390/su16114593>

- Kol, H. Ş., & Sefil, Y. (2011). *The thermal conductivity of fir and beech wood heat treated at 170, 180, 190, 200, and 212°C*. Journal of Applied Polymer Science, 121(4), 2473–2480. <https://doi.org/10.1002/app.33885>
- Krishpersad, M. & Gurmohan, SK. (2011). *Experimental investigation of the influence of air conduction on heat transfer across fibrous materials*. Journal of Mechanical Engineering Research, Vol. 3(9), 319-324.
- Leszmann, A. E. (2022). *Fugttekniske krav til isoleringslag i lette ydervægge uden dampspærre: Parameterstudier af sorptionskurver og dampdiffusionsmodstande i WUFI*. Aalborg Universitet.
- Morelli, M., Nielsen, A., & Vanhoutteghem, L. (2017). *Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner* (SBI rapport 2017:20, 1. udgave). København: BUILD.
- Morelli, M., Rasmussen, T. V., & Therkelsen, M. (2021). *Exterior Wood-Frame Walls—Wind–Vapour Barrier Ratio in Denmark*. Buildings (Basel), 11(10), p. 428.
- Murr, A. (2022). *Water vapour sorption and moisture transport in and across fibre direction of wood*. Cellulose (London), 29(7), 4135–4152. <https://doi.org/10.1007/s10570-022-04520-x>
- Møller, E. (2013). *Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse* (SBI-anvisning, 1. udgave). København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Møller, E. B., Brandt, E., & Pedersen, E. S. (2016). *Småhuse - Klimaskærmen* (SBI-anvisning 267, 1. udgave). København: SBI Forlag.
- Møller, E. B., Morelli, M., & Hansen, T. (2019). Air change rate in ventilated attics – reality and input for simulations. *MATEC Web of Conferences*, 282, 2073. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201928202073>
- Møller, E. B. (2020). *Afprøvning af dampspærresamlinger: før og efter ældning* (SBI rapport 2020:10). Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.
- Panico, S., Larcher, M., Marincioni, V., Troi, A., Baglivo, C., & Congedo, P. M. (2023). *Identifying key parameters through a sensitivity analysis for realistic hygrothermal simulations at wall level supported by monitored data*. Building and Environment, 229, 109969. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109969>
- Rahim, M., Douzane, O., Tran Le, A. D. & Langlet, T. (2016). *Effect of moisture and temperature on thermal properties of three bio-based materials*. Construction & Building Materials, 111, 119–127. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.061>
- Rasmussen, T. V. (2001a). *Sætningsfri indblæsning af løsfyldsisolering i vægge*. By og Byg Dokumentation 011, Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.

Rasmussen, T. V. (2001b). *Modelling settling of loose-fill insulation in walls, Part I*. Journal of Thermal Envelope & Building Science, 25 (October), 129–141.

Rasmussen, T. V. & Nicolajsen, A. (2013). *Klimaskærmens lufttæthed* (SBI-anvisning 214, 2. udgave). København: Statens Byggeforskningsinstitut.

Rasmussen, T. V., Hansen, T. K., Nielsen, J. K., Steenstrup, F. R., Ottosen, L. M., Petersen, L. G., Hansen, M. H., & Shashoua, Y. (2020). *Materialeegenskaber: test af polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret ældning* (SBI rapport 2020:06). Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.

Rasmussen, T. V., Thybring, E. E., Munch-Andersen, J., Nord-Larsen, T., Jørgensen, U., Gottlieb, S. C., Bruhn, A., Rasmussen, B., Beim, A., Ramsgaard Thomsen, M., Munch-Petersen, P., Primdahl, M. B., Bentsen, N. S., Frederiksen, N., Koch, M., Auken Beck, S., Bretner, M.-L., & Wittchen, A. (2022a). *Biogene materialers anvendelse i byggeriet* (BUILD rapport 2022:09). Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.

Rasmussen, T. V., Hansen, T. K., Shashoua, Y., Ottosen, L. M., Pedersen, L. G., Nielsen, J. K., & Steenstrup, F. R. (2022b). *Performance of Polyethylene Vapor Barrier Systems in Temperate Climates*. Buildings 2022, 12, 1768. <https://doi.org/10.3390/buildings12101768>

Realdania (2023, 16. november). Reduction Roadmap inkluderer nu stort set alt nybyggeri. Lokaliseret d. 15/12-2024 på <https://realdania.dk/nyheder/2023/11/reduction-roadmap-inkluderer-nu-stort-set-alt-nybyggeri>

Realdania (2024). *Veje til biobaseret byggeri*. Lokaliseret d. 15/12-2024 på <https://realdania.dk/projekter/veje-til-biobaseret-byggeri>

Sedlbauer, K. (2001). *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation*. Holzkirchen: Fraunhofer-Institute for Building Physics.

Smolders, E. J. V., van Westen, R. M., & Dijkstra, H. A. (2024). *Probability Estimates of a 21st Century AMOC Collapse*. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2406.11738>

Social- og Boligministeriet (2024, 30. maj). *Ny aftale stiller ambitiøse klimakrav til nyt byggeri*. Lokaliseret d. 15/12-2024 på <https://www.sm.dk/nyheder/nyhedsarkiv/2024/maj/ny-aftale-stiller-ambitioese-klimakrav-til-nyt-byggeri>

Social- og Boligstyrelsen (2024). Bygningsreglementet (BR18). Lokaliseret på <http://byggningsreglementet.dk>.

Therkelsen, M. (2020). *Dampspærre i lette ydervægge - en nødvendighed eller ej?* Aalborg Universitet.

Tupciauskas, R. et al. (2023). *Optimization of Thermal Conductivity vs. Bulk Density of Steam-Exploded Loose-Fill Annual Lignocellulosics*. Materials, 16(10), 3654. <https://doi.org/10.3390/ma16103654>

- Troppová, E., Švehlík, M., Tippner, J., & Wimmer, R. (2015). *Influence of temperature and moisture content on the thermal conductivity of wood-based fibreboards*. Materials and Structures, 48(12), 4077-4083. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0467-4>
- Veitmans, K. & Grinfelds U. (2016). *Wood Fiber Insulation Material*. Annual 22nd ISC Research for Rural Development 2016, Vol. 2. Latvia University of Agriculture
- Veit, M. & Johra, H. (2022). *Experimental Investigations of a Full-Scale Wall Element in a Large Guarded Hot Box Setup: Methodology Description*. Department of the Built
- Vej-Hansen, C., & Rode, C. (2010). *Varmetransmission ved ledning, konvektion og stråling*. Forelæsningsnotat, DTU Byg
- Volf, M., Diviš, J., & Havlík, F. (2015). *Thermal, Moisture and Biological Behaviour of Natural Insulating Materials*. Energy Procedia, 78, 1599–1604. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.219>
- Vereecken, E., Saelens, D., & Roels, S. (2011). *A Comparison Of Different Mould Prediction Models*. Proceedings Building Simulation 2011.
- Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., Zirkelbach, D. (2015). *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models*. Energy Procedia 78, 2015. s. 1425-1430
- VIGOT (u.å.). *Matematikken*. Lokaliseret d. 30/10-2024 på <https://vigot.dk/matematikken>
- WUFI (u.å.). *Creating of your own climate files for WUFI*. Lokaliseret d. 1/11-2024 på <https://wufi.de/en/service/downloads/creation-of-your-own-climate-files-for-wufi/>
- WUFI TV (2021). *WUFI Pro 6 Program Tour* [YouTube]. Lokaliseret på https://www.youtube.com/watch?v=IERK-a_HsEg
- WUFI Forum (2023). *Explicit radiation balance - solid wall IWI*. Lokaliseret d. 3/11-2024 på [Explicit radiation balance - solid wall IWI - WUFI](#)
- Zachariassen, H., Brandt, A., & Kjær, A. (1993). *Facadefuger* (SBI-anvisning 177). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut

11 Bilagsfortegnelse

- Bilag A. Dokumentation af testopstilling
- Bilag B. Metode - Alternative skimmelmodeller
- Bilag C. Metode - Beregning af overgangsisolanser
- Bilag D. Modelopsætning - Modelkalibrering
- Bilag E. Modelopsætning - Dynamiske simuleringer
- Bilag F. Resultater - Modelkalibrering
- Bilag G. Analyse - Fluktuationers betydning
- Bilag H. Analyse - Beregning af U-værdier
- Bilag I. Resultater - Skimmevalueringer væg 1
- Bilag J. Resultater - Skimmevalueringer væg 3