FUGTTEKNISKE KRAV TIL ISOLERINGSLAG I LETTE YDERVÆGGE UDEN DAMPSPÆRRE

Parameterstudier af sorptionskurver og diffusionsmodstande i WUFI



MASTER I BYGNINGSFYSIK AAU – Aalborg Universitet, København Juni 2022

Anna Leszmann



AALBORG UNIVERSITY



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:

Fugttekniske krav til isoleringslag i lette ydervægge uden dampspærre-Parameterstudier af sorptionskurver og diffusionsmodstande i WUFI

Projektperiode:

Februar – juni 2022

Vejledere:

Martin Morelli Torben V. Rasmussen

Studerende:

ea

Anna Leszmann

Antal normalsider: 54 sider a 2400 anslag

Afleveringsdato: 9. juni 2022

Resumé:

Der observeres i byggesektoren en forøget interesse for biogene materialer, da deres anvendelse kan mindske udledning af drivhusgasser. Samtidig er der interesse, især blandt arkitekter, for at kunne bygge uden anvendelse af plast– udelukkende med organiske materialer.

Der kan være forskellige grunde til at udføre en diffusionsåben let ydervæg uden traditionel plastbaseret dampspærre fx: dyr og vanskelig arbejdsproces ved udførelse af tætte samlinger i dampspærren. Diffusionsåben konstruktion har også et potentiale i at forbedre indeklimaet. Imidlertid bør risikoen for kondens og skimmel vurderes, da de biogene materialer er meget fugtfølsomme.

Formålet med dette speciale er at vurdere den fugttekniske robusthed af ydervægskonstruktioner opført uden brug af traditionel dampspærre som ofte er PE-folie. Gennem litteraturstudiet undersøges hvilke materialeparametre og lag i konstruktionen, der har størst betydning for fugtforholdene i en let ydervæg. Der fokuseres på isoleringsmaterialet og dets egenskaber.

Der er i denne rapport udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge opført uden brug af dampspærre for at undersøge betydningen af variationer af materialeegenskaber, fx sorptionskurver og dampdiffusionsmodstand, samt for at undersøge hvilke krav eller anbefalinger der skal stilles til isoleringslag i disse konstruktioner i de forskellige fugtbelastningsklasser 1-3. Konstruktionens fugttekniske robusthed vurderes ud fra risikoen for skimmelvækst.

Rapporten konkluderer at fugtkapacitet af de kommercielle biogene isoleringsmaterialer ikke har en stor betydning for den fugttekniske ydeevne af væggen, i modsætning til det der er påstået i litteraturen. Simuleringer viste, at ift. isoleringslag skal mindst 1 af de følgende forudsætninger være opfyldt, for at sikre fugttekniske robuste lette ydervægge uden dampspærre med PE-folie:

- Høj diffusionsmodstand af isoleringslag (forekommer i kommercielle biogene isoleringsmaterialer fx kork, hampcrete, træfiberisolering med høj densitet)
- Høj fugtkapacitet i RF-intervaller mellem 60 og 90% (fiktive materialer som evt. kan udvikles).

Indledende simuleringer af vindspærrelag på baggrund af litteraturstudier konkluderer også, at høj fugtkapacitet af isoleringslag i kombination med høj isolans og høj permeabilitet af vindspærren, kan have en positiv effekt for fugtforholdene i en let ydervæg, hvis der samtidig anvendes en form for dampspærre / dampbremse.

Copyright © 2012. This report and/or appended material may not be partly or completely published or copied without prior written approval from the authors. Neither may the contents be used for commercial purposes without this written approval.

Resumé

Der observeres i byggesektoren en forøget interesse for biogene materialer, da deres anvendelse kan mindske udledning af drivhusgasser. Samtidig er der interesse, især blandt arkitekter, for at kunne bygge uden anvendelse af plast– udelukkende med organiske materialer.

Der kan være forskellige grunde til at udføre en diffusionsåben let ydervæg uden traditionel plastbaseret dampspærre fx: dyr og vanskelig arbejdsproces ved udførelse af tætte samlinger i dampspærren. Diffusionsåben konstruktion har også et potentiale i at forbedre indeklimaet. Imidlertid bør risikoen for kondens og skimmel vurderes, da de biogene materialer er meget fugtfølsomme.

Formålet med dette speciale er at vurdere den fugttekniske robusthed af ydervægskonstruktioner opført uden brug af traditionel dampspærre som ofte er PEfolie. Gennem litteraturstudiet undersøges hvilke materialeparametre og lag i konstruktionen, der har størst betydning for fugtforholdene i en let ydervæg. Der fokuseres på isoleringsmaterialet og dets egenskaber.

Der er i denne rapport udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge opført uden brug af dampspærre for at undersøge betydningen af variationer af materialeegenskaber, fx sorptionskurver og dampdiffusionsmodstand, samt for at undersøge hvilke krav eller anbefalinger der skal stilles til isoleringslag i disse konstruktioner i de forskellige fugtbelastningsklasser 1-3. Konstruktionens fugttekniske robusthed vurderes ud fra risikoen for skimmelvækst.

Rapporten konkluderer at fugtkapacitet af de kommercielle biogene isoleringsmaterialer ikke har en stor betydning for den fugttekniske ydeevne af væggen, i modsætning til det der er påstået i litteraturen. Simuleringer viste, at ift. isoleringslag skal mindst 1 af de følgende forudsætninger være opfyldt, for at sikre fugttekniske robuste lette ydervægge uden dampspærre med PE-folie:

- Høj diffusionsmodstand af isoleringslag (forekommer i kommercielle biogene isoleringsmaterialer fx kork, hampcrete, træfiberisolering med høj densitet)
- Høj fugtkapacitet i RF-intervaller mellem 60 og 90% (fiktive materialer som evt. kan udvikles).

Indledende simuleringer af vindspærrelag på baggrund af litteraturstudier konkluderer også, at høj fugtkapacitet af isoleringslag i kombination med høj isolans og høj permeabilitet af vindspærren, kan have en positiv effekt for fugtforholdene i en let ydervæg, hvis der samtidig anvendes en form for dampspærre / dampbremse.

Summary

An increased interest in organic building materials is observed in the construction industry, as their use can reduce greenhouse gas emissions. At the same time, there can be observed an increasing interest, especially among architects, for the constructions without the use of plastic - with organic materials only.

There may be various reasons for choosing a diffusion-open lightweight exterior construction without a traditional plastic-based vapor barrier, e.g.: expensive and difficult work process, including the tightening of penetrations in the vapor barrier. Diffusion-open construction also has the potential to improve the indoor climate. However, the risk of condensation and mold should be assessed as the organic materials are very sensitive to moisture.

The purpose of this report is to assess the moisture-robustness of an exterior wall constructed without the use of traditional plastic vapor barrier. The literature study examines which material parameters have the biggest impact on the moisture conditions in a light exterior wall. The focus is on the insulation material and its properties.

In this report, hygrothermal simulations of lightweight exterior walls without the use of vapor barrier have been performed to investigate the significance of variations in material properties, e.g. equilibrium moisture content and vapor diffusion resistance, and to set the requirements for insulation layer in these constructions in the internal humidity classes 1-3. The moisture-robustness of the construction is assessed based on the risk of mold growth.

The report concludes, that the moisture capacity of commercial organic insulation materials does not have a significant impact on the overall moisture performance of the wall, on the contrary to what has been suggested in the previous studies. Simulations showed that for insulation layer, at least 1 of the following requirements must be met, to ensure moisture-robust lightweight exterior walls without a traditional vapor barrier (PE foil):

• High diffusion resistance of the insulation (occurs in some commercial organic insulation materials e.g. cork, hempcrete, high density wood-fiber insulation)

• High moisture capacity of the insulation in RF intervals between 60 and 90% (materials that can be developed).

Moreover, initial simulations of wind barrier layer based on literature studies conclude, that high moisture capacity of insulation layer in combination with high thermal resistance and high permeability of the wind barrier can have a positive effect on the moisture conditions in a light exterior wall, if a vapor barrier is present.

Indholdsfortegnelse

1 Indledning og baggrund	6
1.1 Opgaveformulering	6
1.2 Afgrænsning	7
1.3 Læsevejledning	8
2 Teori	9
2.1 Fugtteknisk robusthed	9
2.2 Lette ydervægges lag	11
2.3 Materialeparametre	14
2.4 Materialeparametervariationer i de forskellige ydervægges lag litteraturgennemgang	_ 18
3 Metoder og materialer	26
3.1 Referencekonstruktioner	26
3.2 Simuleringsmodel	27
3.3 Materialeparametervariationer	
3.4 Databehandling	35
4 Resultater	
4.1 Referencekonstruktion	40
4.2 Afgørende parametre i isoleringslag	41
4.3 Test af diverse sorptionskurver	52
4.4 Fugtbelastningsklasser 4-5	56
4.5 Vindspærrelag	58
5 Diskussion	61
5.1 De afgørende parametre	61
5.2 Skimmelmodeller, vurdering af skimmelrisiko	62
5.3 Konkrete materialer, kobling til praksis	63
5.4 Perspektivering	64
6 Konklusion	67
Kilde- og litteraturliste	68
Bilagsfortegnelse	71

1 Indledning og baggrund

I lyset af stigende klimaforandringer lægger byggesektoren vægt på bæredygtighed ved at bruge byggematerialer, som kan mindske udledningen af drivhusgasser. Der er derfor forøget interesse for træbaserede og andre biogene materialer. Dampspærre, som er oftest en PE-folie (polyætylen), nedbrydes igennem flere hundrede år og bliver til mikroplast, som bidrager til miljøforurening. Der observeres samtidig en stigende interesse, især blandt arkitekter, for diffusionsåbne bygningskonstruktioner, uden anvendelse af plast fx til dampspærre– med udelukkende biogene materialer.

Der kan være andre grunde til at bygge diffusionsåbent. Fx kan det være at levetiden af PE-folien viser sig at være kortere end de øvrige materialer som bygningsdelen er opbygget af. Dette ville betyde, at dampspærre ikke kan opretholde sin funktion igennem bygningens levetid. Der er også potentiale i diffusionsåbne konstruktioner for at moderere indendørs luftfugtighedsniveauer, forbedre udtørringen, samt forbygge store udsving af relativ fugtighed. Desuden, kan der gennem litteraturgennemgang observeres, at der er en øget interesse for at kontrollere fugten, ved at udnytte fugtkapaciteten af de hygroskopiske isoleringsmaterialer i en diffusionsåben facade. Sidst men ikke mindst, er arbejdsprocessen ved installation af dampspærre dyr og ressourcekrævende.

De fleste organiske byggematerialer er dog fugtfølsomme og har risiko for at blive angrebet af skimmel, som er det første tegn på høje fugtniveauer, og som kan udvikle sig til råd. Imidlertid bør risikoen for kondens og skimmelvækst vurderes for at bl.a. undgå de negative indeklimamæssige og sundhedsmæssige konsekvenser af skimmel.

I byggebranchen findes der ikke anvisninger til diffusionsåbne bygningskonstruktioner. Der vides ikke hvilke lag og til hvilke materialeparametre, der skal stilles krav til, for at kunne bygge diffusionsåbent. Denne rapport vil prøve at svare på hvilke parametre, der har størst betydning for den fugttekniske ydeevne af en let ydervæg uden en traditionelle dampspærre af plast, og hvad der skal være fokus på, når der defineres krav til materialer i en sådan konstruktion.

Traditionelle lette ydervægge består af mange forskellige materialelag og omfatter ofte en dampspærre i form af en polyethylenfolie (PE-folie). I et koldt klima har bygninger udadgående damptryk. Dampspærren placeres derfor på den indvendige (varme) side af konstruktionen. Dampspærren forhindrer fugten fra indeluften fx fra madlavning, tøjtørring og mennesker i at trænge ud i konstruktionen og opfugte materialer til et kritisk niveau. Det er derfor vigtigt, at materialer på den udvendige side af konstruktionen er mere diffusionsåbne, så fugten kan vandre gennem konstruktionen.

1.1 Opgaveformulering

Formålet med dette speciale er at vurdere den fugttekniske robusthed af ydervægskonstruktioner opført uden brug af traditionel dampspærre, som ofte er PEfolie.

Gennem et litteraturstudie undersøges hvilke materialeparametre og lag i konstruktionen, der har størst betydning. På baggrund af litteraturstudiet fokuseres på isoleringsmaterialet og dets egenskaber ift. betydningen af kritiske fugtniveauer i en konstruktion uden dampspærre. Ved fugtsimuleringer undersøges betydningen af variationer af materialeegenskaber fx sorptionskurver og dampdiffusionsmodstand. Konstruktionens fugttekniske robusthed vurderes ud fra risikoen for skimmelvækst.

Der undersøges hvilke krav eller anbefalinger man skal stille til materialer der anvendes i en ydervægskonstruktion uden en traditionel dampspærre (PE-folie) i de forskellige fugtbelastningsklasser 1-3.

Rapporten vil forsøge at besvare følgende spørgsmål:

1. Hvilke parametre og af hvilke lag er afgørende for fugtteknisk robusthed af en diffusionsåben let ydervæg?

-Hvilken betydning har fugtkapaciteten af isoleringslaget? Kan en høj fugtkapacitet i isolering forbedre den fugttekniske ydeevne af en diffusionsåben ydervægskonstruktion?

-Er der andre parametre der kan hjælpe med at forbedre fugtteknisk ydeevne af ydervæggen?

2. Hvilke krav eller anbefalinger skal der stilles til nye isoleringsmaterialer for at sikre fugttekniske robuste lette ydervægge uden dampspærre med PE-folie?

-Findes der eksisterende materialer, som opfylder kravene i fugtbelastningsklasse 1-3?

Rapporten vil give et bud på, hvilke isoleringsmaterialer der vil være egnede til en ydervæg uden traditionel dampspærre af plast. Det kan være at det viser sig, at disse materialer ikke findes på markedet, og at de skal udvikles. Det kan også være, at dampspærre ikke kan undværes, men hvis der er forhold der gør, at den ikke behøver at have så stor diffusionsmodstand, så kan den i visse konstruktioner muligvis erstattes af dampbremse af biogent materiale, fx af papir.

1.2 Afgrænsning

I denne rapport er der fokus på de fugttekniske forhold, der er gældende for lette, primært træbaserede ydervægskonstruktioner.

Der bliver ikke berørt andre krav som stilles til ydervæggen som klimaskærm fx brand og akustik.

Rapporten fokuserer på isoleringslaget. Det betyder ikke, at undersøgelser af de øvrige lag er uden betydning. I øvrigt, er der ikke undersøgt betydningen af utætheder fra hhv. inde og ude (infiltration og vandindtrængning fra slagregn).

Der bliver ikke undersøgt diverse dampbremsematerialer (dampspærre med lav diffusionsmodstand), da udgangspunktet for dette projekt er en konstruktion uden det damptætte lag (hvor lufttæthed sikres af indvendige beklædning). Det er for at begrænse antal af parametervariationer. Da dampbremse ikke behøver at være af syntetisk materiale, er det derfor relevant for de fremtidige undersøgelser at inkludere dampbremsen i undersøgelser af fugtteknisk robusthed af konstruktionen. Der arbejdes primært med fugtbelastningsklasserne for boliger med ukendt beboelsestæthed dvs. klasse 3. Selvom boliger udgør bygninger i begge fugtbelastningsklasser 2 og 3, simuleres der med mere kritiske forhold dvs. klasse 3. Dog er nogle af resultaterne, for sammenlignelighedens skyld, også udvidet til at omfatte andre bygninger end boliger, dvs. fugtbelastningsklasse 4-5, der gælder for fx industrikøkkener, vaskerier og svømmehaller.

1.3 Læsevejledning

Rapporten er opbygget af 4 hovedafsnit, hvor der først vil være et bredt litteraturstudie af de forskellige parametre der har betydning for den fugttekniske ydeevne af den lette ydervæg med og uden dampspærre. Afsnit **3 Metoder og materialer** beskriver metoden anvendt. Afsnit **4 Resultater** er opbygget således, at der præsenteres en række simuleringer, hvorefter der kort diskuteres hovedresultater og de næste skridt. Diskussionen samler op på flere delemner og problemformuleringen diskuteres.

2 Teori

2.1 Fugtteknisk robusthed

2.1.1 Hvad er en fugtteknisk robust konstruktion, og hvordan vurderes denne?

For at vælge et benchmark, som man kan evaluere sin konstruktion op imod, er det vigtig at fastlægge rammerne for fugtteknisk robusthed.

På baggrund af en litteraturgennemgang og brancheerfaringer, er vækst af skimmelsvamp valgt som kriteriet for vægkonstruktionens fugttekniske ydeevne. Viser analyser ved anvendelse af matematiske skimmelvækstmodeller grundlag for vækst af skimmelsvamp et sted i vægkonstruktionen, antages vægkonstruktionens ydeevne overskredet fugtteknisk. Hvis væggen fungerer fugtteknisk acceptabelt i forhold til de fastsatte kriterier, vil den generelt også fungere acceptabelt i forhold til de andre ydeevnekriterier som materialedeformationer, afskalning af maling, råd, tab af lim vedhæftning og korrosion af metalliske komponenter og fastgørelser (Vinha, 2008).

Ydeevnen af en ydervæg afhænger af dens konstruktion, og hvilke materialer der er anvendt i de enkelte lag. Organiske materialer er mere modtagelige for skimmel end uorganiske. Det er derfor vigtigt at vælge en skimmel evalueringsmetode, som tager så mange kriterier som muligt i betragtning. Normalt kigges der på betingelser, som konstruktionen er udsat for: relativ fugtighed (RF), temperatur, tid (hvor læge betingelserne er til stede). I øvrigt bør der også tages i betragtning materialetype (organisk, uorganisk).

2.1.2 Kritisk fugtniveau og skimmelmodeller

Forudsætning for skimmelvækst er, at der er tilstrækkelig næring, RF og passende temperatur. For træ og træbaserede materialer er grænsen for relativ fugtighed typisk 75-80%. Træ kan blive angrebet af trænedbrydende svampe. Det kritiske fugtindhold for træ er normalt 20 vægt-% ved nye angreb (svarende til ligevægt med luft med ca. 87% RF) (Brandt, 2013).

Der findes flere modeller (Vereecken, et al., 2012), der bruges til forudsigelse af skimmel i konstruktioner. En simpel metode til hurtig vurdering af fugtforholdene på baggrund af relativ fugtighed og temperatur er fx RHT-indekset, som er udbredt i Canada. Andre, mere komplicerede metoder, tager forskellige RF-grænseværdier i betragtning, afhængig af sammenhængende temperaturforløb over tid, samt materialetype. De to mest udbredte modeller af de mere detaljerede skimmelmodeller er VTT-modellen og LIM-modellen. De nævnte metoder bliver nærmere beskrevet nedenfor.

RHT-indeks

En nem måde at foretage en hurtig indledende vurdering af fugtforholdene i en konstruktion ift. en referencekonstruktion er RHT-indeks. RHT-indeks afledes af den relative fugtighed (RH) og temperatur (T) i et punkt i konstruktionen over en bestemt tidsperiode. RHT-indekset er en indikator, der bruges til at kvantificere og sammenligne fugtforholdene mellem forskellige konstruktioner. Dette indeks inkluderer varighed af tidsperioden under hvilken, både RF og T samtidig over-skrider forud definerede grænseværdier. Generelt indikerer en højere værdi af

RHT-indekset en større risiko for vækst af skimmelsvamp (Copeland, et al., 2010; Beaulieu, et al., 2002).

RHT-indekset defineres:

Kumulativ RHT= \sum (RH-RH_X)×(T-T_X) for RH>RH_X% og T>T_X°C for hver tidsskridt af en simulering, hvor RH_X (typisk 75%) og T_X (typisk 0 °C) er grænseværdierne for hhv. relativ fugtighed og temperatur.

RHT-indekset har begrænsninger og er ment til at blive anvendt sammen med andre skimmelvurdering metoder. Forskellige vægge med lignende RHT-værdier kan have forskellige fugtteknisk ydeevne (Copeland, et al., 2010). I denne rapport kombineres RHT-indekset derfor med de mere komplicerede metoder til at vurdere risikoen for vækst af skimmelsvamp.

VTT-model

VTT-modellen er en empirisk model baseret på laboratorieundersøgelser. Den tillader en differentiering mellem to forskellige træsorter eller et mineralsk materiale (Viitanen, et al., 2015). VTT-modellen klassificerer væksten efter et skimmelindeks (mould index), på skala 0-6. Jo højere indeks, jo højere skimmelrisiko (0 betyder ingen vækst, 6 betyder tæt dækning - omkring 100% af overflade dækket med skimmel). Der findes et plug-in for WUFI som baserer på VTT-modellen.

LIM kurver (Isoplet system - SedIbauer)

LIM (Lowest Isopleth for Mould) model (SedIbauer, 2001) er en teoretisk model. Den kritiske relative fugtighed er afledt af LIM-kurver for skimmelsporespiring. Den kritiske RF er stærkt afhængig af temperaturen og materialetypen. Inputdataene for LIM modellen er temperatur og relativ luftfugtighed på overfladen, og den materialegruppe, som materialet tilhører. Der kan vælges mellem tre forskellige materialegrupper: LIM 0, LIM I og LIM II, hvor LIM 0 er under optimale vækstbetingelser, LIM I er vækst på organisk materiale og LIM II er vækst på uorganisk materiale (Viitanen, et al., 2015). LIM metode vurderes generelt at være mere enkel end VTT-metoden. VTT og LIM I kurver præsenteres på Figur 1.



Figur 1. Sammenligning af modeller for vurdering af skimmelvækst: VTT-modellen (tv) og LIM-modellen (th). Figurer fra (Viitanen, et al., 2015).

(Viitanen, et al., 2015) konkluderer, at resultaterne fra både LIM og VTT-modeller generelt set er i god overensstemmelse ift. hinanden. Undersøgelse af (Vereecken, et al., 2012) har til gengæld vist, at LIM modellen for substratkategori I er betydeligt mere konservativ end VTT-model.

I denne rapport er LIM modellen anvendt. Iht. (Johansson, et al., 2021) har denne model vist sig at være pålidelig, fordi resultaterne fra modellen stemte godt overens med resultaterne af feltundersøgelser. LIM model er i øvrigt mere enkel end VTT. LIM-kurver har desuden en bred sikkerhedsmargin. Undersøgelse af (Johansson, et al., 2021) viser, at de enklere skimmelmodeller (som Sedlbauers LIM model) kan være mere nyttige end komplekse modeller, når forudsigelser er lavet over flere år.

Ved LIM modellen kan det være svært at sammenligne resultater af mange forskellige simuleringer, hvor der ændres på 1 parameter ad gangen, fordi resultatet fås i form af RF-forløb over et år og en sammenhængende kurve for risikoen for vækst af skimmelsvamp. Derfor kan det være vanskeligt at bruge den model til en indledende sammenligning af de forskellige konstruktioner.

Ud over VTT- og LIM-modellerne findes der en række andre modeller og kriterier for, hvornår der er risiko for vækst af skimmelsvamp. DS/EN ISO 13788:2013 definerer en kritisk grænse for skimmelvækst ved RF > 80 %. Temperaturen af indeluften antages i metoden at være konstant 20 °C hele året, og som udetemperatur regnes med månedsmiddeltemperatur. Andre modeller er: Biohygrotermisk model (Viitanen, et al., 2015) som inkluderer midlertidig udtørring af skimmelsporer (WUFI Bio), TOW (Time of Wetness) (Adan, 1994) og Moons metoden (Moon, 2005).

2.1.3 Fugttransportformer

Fugt i materialer transporteres generelt ved de tre forskellige former: diffusion, konvektion og kapillarsugning.

Kapillarsugning sker når materialet har kontakt til vand i væskeform. Dette er dog ikke relevant for en regnskærmskonstruktion, hvor relativ fugtighed holdes under 95%.

Luft og dermed damptransport er generelt større ved konvektion end diffusion. Der antages, at konstruktionen er opført med intakt lufttæthedsplan og vindspærre, og dermed er den tilstrækkelig lufttæt fra hhv. inde og ude. Derfor lægges der i denne rapport ikke vægt på konvektionen.

Diffusion sker på grund af vandmolekylernes bevægelse. Diffusion drives af forskelle i damptryk / vanddampindhold, og bevægelsen sker i retning af aftagende tryk / vanddampindhold.

I dette projekt er det mest relevant at kigge på diffusionen pga. de ovenfor nævnte årsager. De øvrige transportformer bør ikke negligeres, men de bliver ikke undersøgt i nærværende rapport.

I lette ydervægge er det traditionelt dampspærren, der skal hindre fugtindtrængning i konstruktionen indefra.

2.2 Lette ydervægges lag

En let ydervæg består normalt af flere lag som hver især har sin funktion:

- Regnskærm afleder nedbør der rammer væggen
- Ventileret luftspalte udligner vindtrykket over regnskærmen, fjerner vanddamp og vand der trænger gennem regnskærmen
- Vindspærre forhindrer luftstrømning ind i isolering
- Varmeisolering reducerer varmetabet
- Tæthedsplanet sikrer lufttæthed og damptæthed

De forskellige lag beskrives nærmere i det følgende kapitel. Regnskærm og luftspalten er ikke så relevante for denne undersøgelse. Dette skyldes at parametervariationer i de lag ikke vurderes at have direkte indflydelse på de øvrige lag, så længe regnskærmens og luftspaltens hovedfunktion opretholdes.

2.2.1 Vindspærre (vindtætte lag)

Vindspærrens opgave er at forhindre luftstrømning ind i det porøse isoleringsmateriale og dermed nedsættelse af isoleringsevnen. Vindspærren skal være så diffusionsåben, at den fugt der måtte trænge ind i konstruktionen, har mindst 10 gange lettere ved at komme ud igen på den udvendige side, end den har for at trænge ind (Brandt, 2013).

2.2.2 Varmeisolering

Varmeisoleringens opgave er at reducere varmetabet gennem væggen. En velisoleret væg sikrer termisk komfort samt lavere energiforbrug og dermed lavere udgifter til opvarmning. En passende høj indvendig overfladetemperatur forhindrer ubehagelig kuldestråling og kondensdannelse på væggens indvendige overflade. Isoleringsmaterialets varmeledningsevne er udtrykt ved λ -værdien. Jo lavere varmeledningsevne et materiale har, jo bedre isolerer det. Lette ydervægge isoleres ofte med mineraluldsbaserede isoleringsprodukter med λ -værdier på omkring 0,032-0,037 W/mK.

2.2.3 Tæthedsplan (luft- og damptætte lag)

Hvis store mængder vanddamp uhindret kan trænge igennem konstruktionen (diffusion) og møde koldere områder, kan den relative luftfugtighed i området blive så høj, at der opstår kondens med fugtskader til følge, herunder skimmelsvampevækst. En dampspærre, som typisk består af PE-folie, skal ikke kun hindre diffusionen, men ofte også fungere som lufttæthedsplan og forhindre fugttransport ved luftstrømning (konvektion). Det kræver, at samlinger, gennemføringer m.m. er udført lufttætte. I øvrigt, er det vigtigt, at ydervægges indvendige plan er tilstrækkeligt lufttæt for at undgå forøget energiforbrug til opvarmning som følge af infiltration.

Diffusionsmodstand udtrykker dampspærrens evne til at modstå dampdiffusionen. Et materialelag med en Z-værdi på mindst 50 GPa s m² / kg (svarer til S_dværdi=10 m) anses normalt for at have tilstrækkelig stor dampdiffusionsmodstand til at opfylde damptætheden. Dog ift. (Morelli, et al., 2021) er det muligt at anvende dampspærre med diffusionsmodstand på 5 GPa s m² / kg (svarende til S_d-værdi=1 m i fugtbelastningsklasse 3, forudsat at andre krav er opfyldt, fx er der en forudsætning mht. indvendig beklædning.

For at beskytte dampspærremembranen mod utilsigtede gennembrydninger og mekaniske påvirkninger, og for at muliggøre føring af installationer i ydervæggen uden gennembrydninger af membranen, kan den placeres et stykke inde i konstruktionen, dog højst i 1/3 af konstruktionens samlede isolans på den varme side af membranen (Brandt, 2013).

2.2.4 Hvorfor bygge uden dampspærre?

Bygninger er designet til at have en lang levetid, og klimaskærmen og dets materialer og komponenter skal have en tilsvarende levetid. Ældningstest (Rasmussen, et al., 2020) konkluderede at det er usikkert, om PE-folie og tapede samlinger har en tilstrækkelig levetid, da en række af de testede tapede samlinger kun holdt omkring 15-20 år.

Desuden, er PE-folien et sårbart materiale for gennembrydning - både under konstruktionen og senere under brugen af bygningen. Derfor kan det være relevant at erstatte PE-folien med et andet materiale, der er mere robust (Morelli, et al., 2021; Mundt-Petersen, 2015).

Iht. undersøgelse af beskadigede lette ydervægge (Uvizlová, et al., 2016), bliver diffusionsmodstand, μ , af en folie, reduceret til 80% som resultat af fejl i udførelsen af PE-folien sammenlignet med korrekt udførelse af folien. Procentdelen af perforeringer i folien i undersøgelsen udgjorde kun 0,001327% af areal.

Undersøgelser foretaget i Danmark (Morelli, et al., 2020) viser, at til kolde, ventilerede lofter, kan dampspærre udelades så længe flere andre forudsætninger er opfyldt, ligesom lufttæthed af loft mv. Det skal dog understreges, at undersøgelsen ikke direkte kan oversættes til ydervægskonstruktion pga. parametre som er forskellige i loftkonstruktion ift. ydervægskonstruktion fx udvendig overgangsisolans.

En dansk undersøgelse (Bastien, et al., 2018) konkluderede bl.a., at der ikke er en betydelig forskel for fugtindhold i konstruktionen uanset om der er en dampspærre eller ej. Konstruktionen var dog opbygget uden et ventileret hulrum men bare med puds på træfiberpladen samt undersøgelse var udført for enfamiliehus i fugtbelastningsklasse 2.

Ud fra disse resultater er det relevant at undersøge behovet for dampspærrer til at beskytte mod fugttransport ind i klimaskærmen.

Hvis det kan eftervises, at det er fugtteknisk forsvarligt at ydervæggen bygges uden dampspærren af PE-folie, skal der stadig opretholdes lufttæthed af konstruktionen fx ved brug af pladematerialer (OSB, krydsfiner mv.) og lufttætte samlinger mellem plader. Sådan en konstruktion vil være lufttæt (konvektion) men diffusionsåben.

Der er generelt et incitament til at bruge bio-baserede materialer, men fordi de er mere fugtfølsomme, betyder utætheder i dampspærre rigtig meget. Som nævnt før, er dampspærre af plast sårbar for gennembrydninger og de største mængder af fugt transporteres ved konvektion. Fugten der er kommet ind gennem et hul i dampspærre, har svært ved at diffundere ud igen. I øvrigt, i konstruktionen uden dampspærre kan man bedre udnytte potentiale for fugtkapaciteten i isolering, fordi isolering har kontakt til indeluften (forudsat at der anvendes diffusionsåben overfladebehandling). Derfor giver det muligvis mere mening at prøve at undgå at bruge dampspærren i konstruktioner, i hvert fald dem der er sammensat af biobaserede materialer. Sidst, men ikke mindst, hvis folien kan spares væk, er det godt fra et miljømæssigt, arbejdsprocesmæssigt samt økonomisk synspunkt.

2.3 Materialeparametre

Der er mange parametre der spiller en stor rolle i hygrotermisk robusthed af konstruktionen. De mest relevante parametre der, gennem litteraturen, viser sig at spille den største rolle for fugtteknisk ydeevne af væggen er:

- Varmeledningsevne
- Diffusionsmodstand
- Sorptionskurve af isoleringsmaterialer

2.3.1 Varmeledningsevne

Varmeledningsevne (W/mK) er defineret som mængden af varme, overført per tidsenhed over afstanden, i retningen vinkelret på tværsnitsarealet. Det er en vigtig parameter pga. at væggen skal have tilstrækkelig isoleringsevne – dvs. jo lavere varmeledningsevnen, jo bedre isolerer et materiale. Varmeledningsevnen har selvfølgelig en stor betydning for konstruktioner, især når vi taler om isolering. Varmeledningsevnen har indflydelse på temperaturen (i konstruktionen og på overfladen) som til gengæld har indflydelse på fugtforholdene.

2.3.2 Diffusionsmodstand

Diffusionsmodstand udtrykker materiales evne til at modvirke diffusion af vanddamp. I Danmark er man vant til at bruge Z-værdien, men i andre lande, fx Tyskland, og i de hygrotermiske beregningsprogrammer bruges S_d-værdien og dampdiffusionsmodstandsfaktoren, μ . Sammenhængen mellem de tre værdier er vist i Figur 2. Ved de traditionelle lette ydervægsopbygninger er det diffusionsmodstand af dampspærren der er vigtigst at kigge på. Jo højere diffusionsmodstand af dampspærren, jo bedre fugtteknisk ydeevne.



Figur 2. Omregning mellem Z-værdi, S_d-værdi og dampdiffusionsmodstandsfaktor. Vanddamppermeabiliteten for luft er 0,195 · 10-9 kg / m s Pa, når lufttemperaturen er 23 °C (Gottfredsen, et al., 1997).

2.3.3 Sorptionskurver, fugtkapacitet

Hygroskopiske materialer optager og afgiver fugt indtil de opnår ligevægt med fugtindholdet i luften omkring dem. Sammenhængen mellem materialets fugtindhold og luftens relative fugtighed afhænger af materialetypen, og aflæses på sorptionskurver. Kurverne kan være meget forskellige inden for samme materialegruppe, det afhænger bl.a. af materialets densitet og porestruktur. Generelt har træ og træbaserede materialer ved en given RF, et højere fugtindhold end fx tegl og beton ved samme RF (Brandt, 2013).

Undersøgelse af (Salonvaara, et al., 2001), som har undersøgt indflydelsen af forskellige materialeegenskaber på fugtteknisk ydeevne af en let ydervæg gennem en stokastisk proces, understreger i sit resultat, at sorptionskurver har en stor betydning på fugtindholdet i konstruktion.

Der er nogle gange tale om fugtkapacitet af materialer, især ift. isoleringsmaterialer. Fugtkapacitet defineres som en fugtmasse, som et materiale kan optage og afgive under bestemte fugtforhold per enheds eksponerede overfladeareal (g/m²) (Osanyintola, et al., 2006) eller volumen (g/m³ eller kg/m³). Jo højere fugtkapacitet i et materiale, jo mere fugt kan materialet optage ved en given RF af omkringliggende luft. Man kan derfor godt sige, at fugtkapacitet defineres ved at angive hældningen på sorptionskurven for et givet materiale. Sammenlignes fx sorptionskurvene for tegl og træ, vil kurven for træ være stejlere, pga. fugtkapaciteten af træ er større end for tegl. Materiale med stejle kurver virker som en fugtbuffer, der modvirker ændringer i RF (Brandt, 2013).

Materialets sorptionskurve er vigtige at kende når man taler om fugtforhold, fordi de angiver materialets evne til at akkumulere og omfordele fugten over volumen. Det er altid relevant at undersøge, om den akkumulerede fugt kan tørre ud, før fugtmængden bliver kritisk for konstruktionen. Eksempel af sorptionskurven for hampeisolering fra WUFI Pro vises på Figur 3.



Figur 3. Sorptionskurven for hamp, WUFI Pro.

2.3.4 Væskediffusivitet

For nogle porøse materialer kan det også være vigtigt at kigge på væskediffusivitet (Liquid Transport Coefficient, Suction and Liquid Transport Coefficient, Redistribution). Væskediffusivitet beskriver hvor hurtigt materialer opfugtes og hvor hurtigt vanddamp omfordeles inde i materialet.

Væskediffusivitet for adsorption (Dw_s), m²/s, beskriver den kapillære optagelse af vand når materialets overflade er opfugtet.

Væskediffusivitet for omfordeling (Dw_w), m²/s, beskriver omfordeling af det opsugede vand, når befugtning af overfladen (Dw_s) er afsluttet.

Væskediffusivitet er stærk afhængig af fugtindhold og er derfor et sæt af værdierhver værdi tilhører en vist fugtindhold (w), kg/m³. Et sæt af værdier i afhængighed



af fugtindhold er repræsenteret af en kurve. Figur 4 og Figur 5 viser eksempler af disse kurver fra WUFI Pro.

Figur 4. Væskediffusivitet for adsorption, hamp, WUFI Pro.



Figur 5. Væskediffusivitet for omfordeling, hamp, WUFI Pro.

For mange byggematerialer kan væskediffusivitet estimeres på baggrund af vandabsorptionskoefficienten (A), kg/m² \sqrt{s} (som er en enkelt værdi) og sorptions-kurven. I WUFI er dette muligt, pga. den indbyggede formel. Det er desværre ikke nødvendigvis en sand kurve der genereres for alle materialer.

Væskediffusivitet er en relevant parameter, da den hænger sammen med sorptionskurver og angiver hvor hurtig et materiale opfugtes. I denne rapport simuleres der indflydelse af alle de nævnte parametre på fugtforholdene i ydervæggen.

2.3.5 Hvilke parametre er afgørende for fugtteknisk ydeevne?

Det kan være svært at forudse hvilke parametre, der har den største indflydelse på fugtforholdene, da parametre i de forskellige lag påvirker hinanden på forskellige måder ved forskellige randbetingelser.

Det mest oplagte at gøre er at udføre en stokastisk analyse (ved brug af fx Monte Carlo metode) af forskellige materialeparametre for at se, hvilke af dem der har størst betydning. En probabilistisk metode er bedst egnet, fordi der kan være en stor forskel mellem materialeværdier.

Stokastisk sikkerheds- og følsomhedsanalyse af forskellige hygrotermiske egenskaber (Monte Carlo metode) var udført af (Zhao, et al., 2011). De undersøgte vægge var opbygget (udefra og ind): puds, membran, OSB-plade, cellulosefiber isolering, dampspærre, gipsplade. Det skal bemærkes, at undersøgelserne er udført med udgangspunkt i klimadata fra Syracuse, New York (som dog stemmer ret godt overens med klima inkl. regnmængde i København) og at væggenes opbygning er forskellig fra referencekonstruktion idet der på den udvendig side af isolering er vægmembran og puds, og at isoleringslaget kun er 89 mm tykt. Undersøgelsen kan dog vise nogle vigtige tendenser ift. følsomhed og fordeling af parametre anvendt som input til hygrotermiske simuleringer.

I alt 38 materialeparametre og 8 randkoefficienter (boundary coefficients) blev undersøgt i følsomhedsanalysen. Der blev simuleret 400 forskellige kombinationer. Kritiske parametre blev identificeret. Der blev undersøgt effekten af hver parametervariation på den pågældende output parameter.

Resultatet af undersøgelsen viste, at fugtindholdet i pudslaget og OSB-laget i høj grad er varierende iht. den stokastiske proces. Begge lag har en variation på ±10 kg/m³ fugtindholdet sammenlignet med deres middelværdier. Celluloseisolering og gipsplade udviser kun små variationer. Imidlertid, bemærkes det i undersøgelsen, at håndværket, fx samlinger mellem OSB-plader, fejl i udfyldning af hulrum og perforeringer af dampspærren, vil påvirke den fugttekniske ydeevne og føre til meget større usikkerhed ift. fordeling af fugt i isolering og gipsplade. Indflydelsen af dårligt håndværk er ikke taget med i selve undersøgelsen.

De vigtigste parametre der påvirker vægkonstruktionens fugtteknisk ydeevne mest, er forskellige afhængigt af årstid. Resultatet viser at de følgende parametre påvirker vægkonstruktionens fugtteknisk ydeevne mest:

Om vinteren:

- Fugtkapacitet af puds og OSB
- Diffusionsmodstand af dampspærre, vindspærre og puds

Om sommeren:

- Fugtkapacitet af puds, OSB og isolering
- Diffusionsmodstand af puds

Udover de ovenfor nævnte parametre, er det ift. (Zhao, et al., 2011) også randbetingelser der spiller en vigtig rolle idet der ikke anvendes ventileret hulrum med regnskærm. I det nærværende projekt er regn ikke en afgørende parameter pga. regnskærm, som afviser hovedparten af regnvandet; og da det ventilerede hulrum udligner lufttrykket og gør, at kun små mængder vand bliver presset gennem åbningerne i regnskærmen (Brandt, 2013). Indvendigt, er det fugtbelastningsklassen der spiller en stor rolle. Væskediffusivitet ved mætningsvandindhold, af materialer, som ift. (Zhao, et al., 2011) spiller en vigtig rolle, vurderes ikke at være relevant for en konstruktion hvor RF holdes under 95% hele året rundt. Dog kan det være relevant at kigge på væskediffusiviteten generelt (ikke ved mætning men ved de lavere niveauer af vandindhold).

Det bemærkes, at konstruktion i den nævnte undersøgelse er opbygget med traditionel dampspærre, dvs. der er andre parametre der spiller en stor rolle end når der undersøges en opbygning uden dampspærre. Man kan dog se en tendens til at fugtkapacitet samt dampdiffusionsmodstand generelt spiller den største rolle mht. den fugttekniske ydeevne.

2.4 Materialeparametervariationer i de forskellige ydervægges lag – litteraturgennemgang

I dette kapitel gennemgås diverse litteraturkilder, der har undersøgt de forskellige parameters indflydelse på fugtteknisk ydeevne af den lette ydervæg uden dampspærre. Det undersøges om fugtteknisk robusthed kan forbedres gennem en modificering af de forskellige parametre.

Når der undersøges fugtteknisk robusthed af opbygninger uden dampspærre, er der ofte tale om de meget hygroskopiske isoleringsmaterialer, som ofte er bio-baserede og genanvendelige. De har højere fugtkapacitet end traditionelle isoleringsmaterialer som fx mineraluld og formodes derfor at kunne hjælpe med at opretholde lav relativ fugtighed i konstruktionen. De kan derfor potentielt være egnede til brug i opbygning uden dampspærre. Denne påstand skal be- eller afkræftes i denne rapport. Betydningen af den høje fugtkapacitet er et udgangspunkt til den følgende litteraturgennemgang, dog bliver de øvrige lag samt betydning af andre materialeegenskaber også omhandlet.

I lyset af stigende klimaforandringer lægger byggesektoren vægt på bæredygtighed ved at udvikle og anvende mindre energikrævende materialer for at mindske udledningen af drivhusgasser. I Danmark er der incitament til at bruge flere biogene materialer i bygninger. Bio-baserede byggematerialer kan mindske ressourceudtømning og affaldsgenerering. Vedrørende isolering er der ofte tale om alternative men velkendte materialer som træfiberisolering, hamp mv. Nogle af de materialer har været kendte i flere hundrede år, men for at kunne bruge dem i dagens højisolerede og lufttætte konstruktioner har vi brug for at vide hvordan deres forskellige hygrotermiske parametre spiller sammen. Specielt fordi organiske materialer er meget fugtfølsomme og nemt kan blive angrebet af skimmel, samt af andre nedbrydende mekanismer afhængig af fugtniveauer og temperatur over tid.

I den følgende litteraturgennemgang henvises der kun til studier som tager udgangspunkt i et koldt og vådt klima, som i høj grad er i overensstemmelse med det danske klima. Det skal dog understreges, at der kan være nogle forskelle ift. det danske klima fx ift. regnmængde mv. som påvirker resultaterne. Det er derfor vigtigt at betragte de beskrevne studier som orienterende, da de kan vise nogle tendenser, der evt. kan undersøges nærmere.

2.4.1 Fugtkapacitet og kapillære egenskaber af diverse isoleringsmaterialer

Hygrotermiske egenskaber af celluloseisolering og hør

Resultat af undersøgelsen af (Pihelo, et al., 2016) viser, at en let ydervæg med celluloseisolering er mere fugtsikker end samme væg med mineraluldsisolering. Det konkluderes, at dette primært skyldes den højere fugtkapacitet og kapillære fugttransport egenskaber hos celluloseisolering.

Dette bekræftes i (Morelli, et al., 2021), hvor der observeres, at der er lavere relativ fugtighed i det kritiske punkt i konstruktion med celluloseisolering, sandsynligvis pga. dens højere fugtkapacitet ift. mineraluld. Danske undersøgelser foretaget i lofter med mineraluld og cellulosebaseret isoleringsmateriale viser, at isoleringens hygroskopiske egenskaber har meget begrænset effekt på den relative luftfugtighed (Morelli, et al., 2020). Det skal dog understreges, at undersøgelser i loftkonstruktion ikke direkte kan oversættes til ydervægge, men til gengæld kan pege på nogle tendenser, som kan undersøges nærmere.

Et dansk studie (Peuhkuri, et al., 2003) konkluderer, at konstruktioner med materialerne som hør og papirisolering er bedre til at begrænse forekomsten af korte perioder med meget høje fugtigheder, end fx konstruktioner med stenuld, glasuld og perlite. Forskellen vurderes dog ikke at være af stor betydning. Papirisolering udviser den bedste fugtkapacitet blandt de undersøgte materialer, efterfulgt af fåreuld, porebeton og hør. Glasuld, stenuld og perlite har næsten ikke nogen fugtkapacitet.

Hygrotermiske egenskaber af tre forskellige isoleringsmaterialer – Mineraluld, Træfiberisolering og "Biond" isolering (cellulosefiber + hamp-kalk)

En britisk undersøgelse (Latif, et al., 2018) sammenligner hygrotermisk ydeevne af tre forskellige vægopbygninger. Der undersøges: en opbygning med træfiberisolering, en med mineraluldsisolering og den tredje er et "Biond" panel. "Biond" er et kompositpanel præfabrikeret med et lag træfiberisolering og et lag hampkalkisolering (kendt som hampeblokke eller hampcrete). Alle de tre vægopbygninger havde den samme gennemsnitlige U-værdi (0.15 W/m²K). Opbygning med mineraluld inkluderede dampspærre mens de andre to var diffusionsåbne og der dermed kunne udnyttes fugtkapacitet af de to isoleringsmaterialer. Der anvendes gipsplade på den indvendige side og OSB-plade som vindspærre. Adsorptionskurver af de tre undersøgte materialer er vist på Figur 6.



Figur 6. Adsorptionskurver af stenuld, hamp-kalk og træfiber isoleringsmaterialer (Latif, et al., 2018).

Undersøgelsen med statiske randbetingelserne viste, at fugtadsorption er højere i "Biond" og træfiberpanel end i mineraluld med hhv. ti og tolv gange. Eksperimentet viste i øvrigt, at stigning i fugtindholdet havde ubetydeligt effekt på varmeledningsevne af "Biond" og træfiberpaneler. Laboratorieundersøgelse med dynamiske randbetingelserne (vinterforhold, britisk klima) viste, at ændringer (udsving) i RF under eksperimentet var størst i mineraluld og mindst i "Biond". Der observeres en betydelig forskel. Undersøgelsen konkluderede, at hygroskopiske egenskaber kan hjælpe med at vedligeholde hygrotermisk stabilitet i konstruktionen og i indeklima, samt mindske kondensrisiko i væggen. Det viste sig, at den manglende dampspærre i "Biond" samt træfiber panel ikke havde indflydelse på det gennemsnitlige U-værdi.

Hygrotermiske egenskaber af hamp og stenuldsisolering

(Latif, et al., 2014) sammenlignende hygrotermisk ydeevne af hamp og stenuldsisolering i en diffusionsåben let ydervæg i en feltundersøgelse. Begge opbygninger havde de samme U-værdier og randbetingelser under undersøgelsen. Undersøgelsen viste, at hampeisolering havde større skimmelrisiko end stenuld.

(Latif, et al., 2015) gennemførte både eksperimentel og parametrisk studie af let ydervæg isoleret med hamp-træfiberkomposit (30% hampfiber, 60% træfiber og 10% polyester) med og uden dampspærre. Resultatet af parametrisk studie (simulering) var, at opbygning uden dampspærre havde større risiko for skimmelvækst. Feltundersøgelse viste, til gengæld, at der ikke var nogen skimmelvækst i nogen af opbygningerne. Det skal bemærkes, at fugtbelastningsforhold ikke direkte kan oversættes til de danske fugtbelastningsklasser, men de svarer til en typisk britisk bolig (kan nogenlunde sammenlignes med fugtbelastningsklasse 3).

Hygrotermiske egenskaber af 6 forskellige isoleringsmaterialer

Et anden studie (Palumbo, et al., 2016) undersøgte hygrotermiske egenskaber af nogle kommercielle isoleringsprodukter: Hampcrete (50% hampespåner, 50% kalk), hamp-fiber isolering (hampefiber, bindemiddel, tilsætningsstoffer), træuldsisolering og træfiberisolering; og eksperimentale isoleringsprodukter: byghalmstivelse og majsmarv-alginat.

Undersøgelsen viste, at vanddamppermeabilitet var højest i træuld og lavest i træfiber. Det viser, at forskellige træbaserede materialer kan have meget forskellige hygrotermiske egenskaber. Resultatet viste dog også, at stigning af vanddamppermeabilitet ved stigende RF havde den samme rate for begge materialer. Resultatet var omvendt for de to hamp-baserede materialer, som udviste en lignende dampdiffusionsmodstandsfaktor, men to forskellige stigningsrater.

Vedr. fugtkapacitet, viste undersøgelsen, at hamp-kalk og byghalm-stivelse havde de højeste værdier, og de var målt til at være højere end beskrevet i litteraturen. Alle undersøgte materialer havde relativ høj fugtkapacitet.

Undersøgelsen viste, at hamp-kompositpaneler har større følsomhed for ændringer i fugtighed end de andre materialer. De udviser fx største variation i varmeledningsevne med stigende RF.

Undersøgelsen konkluderer, at alle seks bio-baserede materialer udviste forskellig hygrotermisk adfærd. Valg af bio-baseret isolering kan derfor have konsekvenser for den overordne bygningens ydeevne. Undersøgelsen konkluderer også, at det kan være gavnligt at installere isoleringsmaterialer så de har kontakten til indeluften (fx i kombination med hygroskopisk puds som ler eller kalk) for at kunne udnytte deres fugtkapacitet.

Hygroskopiske egenskaber af ydervæg med træfiberisolering

Et studie (Bunkholt, et al., 2021) har undersøgt hygroskopiske egenskaber af træfiberisolering, som formodes at være interessante pga. den høje fugtkapacitet af materialet. Studiet konkluderer, at træfiberisolering har den samme risiko for høje fugtighedsniveauer som mineraluld. Resultaterne tyder dog også på, at træfiberisoleringen kan give en fordel ved midlertidigt at absorbere kondensvand (f.eks. for at undgå uønskede befugtning af bunden af væggen, som i undersøgelsen skete ved tilfælde af mineraluld). Hertil bidrager den højere fugtkapacitet af træfiberisolering, som kan distribuere fugten over en større volumen end mineraluld. På den anden side, kan fugtoptagelse i træfiberisoleringen forlænge tilstedeværelsen af høje fugtniveauer i andre dele af konstruktionen.

Fordi træfiberisoleringen er stivere end mineraluld, forventes der en mindre forskel mellem den praktiske og den teoretiske luftpermeabilitet. Derfor forventes fugtfordelingen i en træfiberisoleret væg i forhold til en mineraluldsisoleret væg at være mindre påvirket af f.eks. små lufthuller mellem isolering og andre materialer (Bunkholt, et al., 2021).

Generelt ses der en tendens, som bliver konkluderet af flere studier, at forskellen mellem hygroskopisk og ikke hygroskopisk isolering er, at den bliver opfugtet langsommere men også tørrer ud langsommere.

2.4.2 Forhold mellem damp- / lufttætte lag og vindtætte lag

Dansk kilde (Morelli, et al., 2021) konkluderer, at forholdet mellem det vindtætte og damptættelag i fugtbelastningsklasse 1-3 bør være omkring 1:5 i det danske klima, og muligvis kan reduceres yderligere ved anvendelse af andre isoleringsmaterialer fx cellulosefiber, som har højere fugtkapacitet end mineraluld.

2.4.3 Isoleringsevne af vindspærren Betydning af højere isoleringsevne af vindspærren for fugtniveau

Måleresultaterne i (Bunkholt, et al., 2021) indikerer, at der ved brug af en vindspærre med en højere termisk modstand (i dette tilfælde er der anvendt vindspærre med en tykkelse på 50 mm i stedet for en 12 mm), opnås en lavere RF og højere temperatur ved grænsefladen mellem vindspærre og isoleringslag. Man skal dog huske, at ved at anvende en tykkere vindspærre, hindrer man udtørring til ydersiden pga. den højere diffusionsmodstand. Det konkluderes yderligere, at vindspærren med en høj termisk isoleringsevne kan bidrage til fugtteknisk robusthed af konstruktionen, som dermed kunne være i stand til at håndtere en lavere dampdiffusionsmodstand af det lufttætte lag. Fugtteknisk robusthed ved utilsigtede luftutætheder fra den indvendige side, bliver også forbedret.

Betydning af damppermeabiliteten og isolans af vindspærre samt diffusionsmodstandsforhold mellem det lufttætte of vindtætte lag

Rapport af (Vinha, 2008) der undersøgte hygrotermisk ydeevne af en let ydervæg viste, at en lavere diffusionsmodstand af det lufttætte lag var acceptabel ved samtidig brug af et højhygroskopisk varmeisoleringsmateriale. Dette var dog kun gældende i kombination med en højisolerende og diffusionsåben vindspærre, f.eks. en træfiberplade.

(Vinha, 2008) trækker også en meget interessant konklusion ud af undersøgelsesresultat, at det mindst tilladeligt diffusionsmodstandsforhold (mellem det lufttætte og det vindtætte lag) ved brug af hygroskopiske isoleringer er mindre end for de ikke-hygroskopiske isoleringsmaterialer, på betingelse af, at der bruges meget diffusionsåben vindspærre. Det mindst tilladeligt diffusionsmodstandforhold er til gengæld større, når der bruges mindre permeable vindspærrer. Generelt, konkluderes det i undersøgelsen, at vindspærren med høj isoleringsevne og en høj vanddamppermeabilitet forbedrer fugtforholdene i en let ydervæg.

Et estisk studie (Pihelo, et al., 2016) har undersøgt, hvilke materialeegenskaber af en let træydervæg i koldt klima der bør modificeres for at mindske risiko for skimmel. Der var også undersøgt indflydelsen af isoleringstykkelsen på hygrotermisk ydeevne af væggen.

Det konkluderes, at hygrotermisk ydeevne af en let ydervæg er meget afhængig af isolans samt permeabilitet af vindspærren. Figur 7 viser, at de højisolerende vindspærrer har mindst risiko for skimmel (der anvendes dampspærre med lav diffusionsmodstand dvs. S_d=1,1 m). Det er fordi højere termisk modstand øger temperaturen mellem isoleringen og vindspærren og reducerer dermed RF. Høj permeabilitet tillader til gengæld fugten i at tørre ud hurtigere.

I øvrigt, konkluderes det, at højere isoleringstykkelse (mineraluld) forværrer problemer med fugt i konstruktionen. Dette kan ses på Figur 7. Man kan aflæse, at skimmelrisiko stiger for de højisolerende vindspærretyper i forbindelse med faldende U-værdi af væggen. Dette er dog ikke gældende ved celluloseisoleringher har isoleringstykkelsen ikke nogen betydning.



Figur 7. Skimmelindeks (Mould index) afhængig af varmetab (U-værdi) af en væg med forskellige vindspærre typer. Det lufttætte lag har den samme diffusionsmodstand (S_d =1,1 m). Isolering: mineraluld. Oprindelig RF = 80% i omgivende luft. Efter (Pihelo, et al., 2016).

Undersøgelsen konkluderede også, at dampspærrer med relativt høj permeabilitet ikke altid er acceptable ved lavere U-værdier af en væg, uden ekstra isolering på vindspærrens udvendige side. Det konkluderes generelt, at hygrotermisk ydeevne af let træydervæg viser sig at være meget afhængig af vindspærrens termiske modstand, samt vindspærrens og dampspærrens permeabilitet.

Der observeres også, at når en væg med mineraluld sammenlignes med opbygning med celluloseisolering, så er det permeabilitet og udtørringsevne af isoleringen der har den stærkeste indflydelse på fugtforholdene mellem isolering og vindspærren. I øvrigt, højere fugtkapacitet hjælper med at håndtere kortere perioder med høje fugtbelastninger. Ulempen ved høj fugtkapacitet er dog at udtørringsperioden er forlænget.

Et projekt Det Åndbare Hus (Miljøstyrelsen, 2019) har gennem en undersøgelse i et testhus vist det samme som nogle af de tidligere nævnte studier, nemlig at der ikke opstår nogle problemer med fugt i en væg uden traditionel plastdampspærre i de vægge, hvor der anvendes højisolerende og diffusionsåbne vindspærrer.

(Mundt-Petersen, 2015) konkluderer, igen, ligesom de andre studier, at udvendige isoleringsplader skal have høj diffusionspermeabilitet for at tillade fugten fra mulige lækager til at tørre ud.

2.4.4 Opsummering af litteraturgennemgang og næste trin

Litteraturen viser nogle tendenser ift. de parametre der potentielt kan muliggøre reduktion af diffusionsmodstand af det lufttætte lag eller tillade en opbygning uden dampspærre.

På baggrund af litteraturen vurderes der, at de følgende materialeparametre har den største betydning, når vi taler om fugtteknisk ydeevne: sorptionskurver (fugtkapacitet) af isolering og diffusionsmodstand af vindspærre og dampspærre. Dampspærre er dog ikke relevant hvor der undersøges opbygning uden dampspærre. Det er dog også relevant at kigge på varmeledningsevnen som har indflydelsen på den hygrotermiske ydeevne.

På baggrund af litteraturen kan der stilles de følgende hovedspørgsmål samt underspørgsmål. Hovedspørgsmål er markeret med fed skrift. Det nærværende projekt ønsker at besvare nogle af dem, mens de øvrige kan danne inspiration til et andet projekt.

1. Hvilke parametre og af hvilke lag er afgørende for fugtteknisk robusthed af en diffusionsåben let ydervæg?

Høj fugtkapacitet (kapillære egenskaber) af isolering

Kan man udnytte fugtkapaciteten af isoleringen for at forbedre fugttekniske forhold i konstruktionen uden dampspærre? Eller omvendt, bidrager høj fugtkapacitet til at forlænge perioder med uacceptabelt fugtindhold? Hvilken rolle spiller sorptionskurver af isoleringsmateriale? Kan der defineres en sorptionskurve som tillader at det vand der akkumuleres i isoleringen, kan tørre ud når forholdene tillader det? Kan sorptionskurver modificeres så der opnås bedre fugtteknisk ydeevne af den lette ydervæg uden dampspærre? Er der andre parametre af isoleringslag der spiller en rolle ift. fugtteknisk robusthed? • Høj isolans af vindspærren

Kan højere isolans af vindspærren forbedre fugttekniske forhold i konstruktionen uden dampspærre? Eller omvendt, kan højere isolans af vindspærren hindre udtørring til ydersiden?

• Høj permeabilitet af vindspærren

Kan kombination af høj isolans og høj damppermeabilitet af vindspærren forbedre fugttekniske forhold?

• Diffusionsmodstandsforhold mellem det lufttætte og det vindtætte lag

Kan diffusionsmodstandsforhold (mellem det lufttætte og det vindtætte lag) reduceres når der bruges hygroskopiske isoleringer ift. de ikke-hygroskopiske isoleringsmaterialer, hvis der samtidig bruges højisolerende og meget diffusionsåben vindspærre?

• Hvilken indflydelse har tykkelsen af isolering? Kan det forværre fugtforholdene?

Bliver det nødvendigt at fjerne dampspærren / reducere dampspærrens diffusionsmodstand ved de større tykkelser af isolering (i fremtiden) når der bruges biobaserede materialer, fordi fugten ikke kan tørre ud?

Slutspørgsmål:

• Kan dampspærre overhovedet fjernes?

Tillader hygroskopisk isolering eller hygroskopisk isolering i kombination med højisolerende, diffusionsåbne vindspærrer mindre dampdiffusionsmodstand af det lufttætte lag? Er der andre parametre der spiller en stor rolle?

• Hvilken rolle spiller problematikken med at forskellige biobaserede materialer kan have meget forskellige hygrotermiske egenskaber?

2. Hvilke krav eller anbefalinger skal der stilles til materialer der anvendes i en ydervægskonstruktion uden en traditionel dampspærre i de forskellige fugtbelastningsklasser 1-3?

Hvilke lag skal der stilles krav til? Hvilke parametre skal der stilles krav til når der ikke anvendes dampspærre? Hvilke krav er der stillet på det nuværende tidspunkt? Giver de krav mening?

Findes der materialer på markedet, der vil være egnede til diffusionsåben opbygning eller skal der udvikles nye materialer?

I denne rapport vil der kun svares på nogle af ovenfor stillede spørgsmål. De spørgsmål bør betragtes som indledende tanker til fremtidige undersøgelser, der kan baseres på nærværende rapport.

I denne rapport er der gennemgået diverse litteraturkilder, der undersøgte de forskellige lag af den lette ydervæg. Denne rapport vil yderligere have fokus på isoleringslag, da litteraturgennemgangen har vist, at fugtkapaciteten af isolering, kan have stor betydning for fugtforholdene i ydervægge uden brug af den traditionelle plast-dampspærre. Isolering udgør nemlig den største del af væggens opbygning ift. volumen og det er derfor relevant at undersøge hvor meget fugt der skal kunne akkumuleres. Bortset fra fugtkapaciteten, er fokus på væskediffusivitet (liquid transport coefficient), der hænger sammen med sorptionskurve, samt diffusionsmodstanden, da litteraturkilder viser, at disse parametre har størst betydning for fugtforholdene i en let ydervægsopbygning uden dampspærre. Jf. litteraturen bør fremtidige studier fokuseres på undersøgelsen af vindspærrelag – indflydelsen af dens isolans samt permeabilitet på fugtforholdene i den lette ydervæg uden dampspærre.

3 Metoder og materialer

3.1 Referencekonstruktioner

I dette projekt er der anvendt to referencekonstruktioner – en med mineraluld, og den anden med celluloseisolering.

Udefra er væggen opbygget (udefra og ind) iht. (Koch, 2021) med en 25 mm træbeklædning, 25 mm ventileret hulrum, 9 mm vindspærre af gips, 195 mm varmeisolering med træstolper pr. 600 mm, 0,20 mm dampspærre, 45 mm varmeisolering og 2 × 13 mm gipsplader. Det er en almindelig udvendig let ydervægskonstruktion anvendt i Danmark, opbygget efter almen teknisk fælleseje. Vandret snit i referencekonstruktionen er vist på Figur 8.



Inde



I referencekonstruktion 1 er der anvendt mineraluldsisolering. Denne ydervæg har en U-værdi på ca. 0,15 W/m²K. U-værdien er eftervist i bilag A. Referencekonstruktion 2 er oprettet ved at kopiere den første referencekonstruktion model og udskifte mineraluldsisolering med celluloseisolering. Dette gøres for at kunne kvalificere referencekonstruktionen når der fjernes dampspærre, og det er eftervist i **4 Resultater**, at konstruktionen uden dampspærre bedst kan kvalificeres i simuleringsprogram når der anvendes bio-baseret isolering. Andre materialer samt tykkelser af alle lag er uændrede ift. referencekonstruktion 1. U-værdi af referencekonstruktion 2 er højere, da varmeledningsevnen af den anvendte celluloseisolering er 0,037 W/mK. U-værdi er på ca. 0,17 W/m²K, den er eftervist i bilag B.

Opbygning af referencekonstruktionen tager udgangspunkt i Masterprojekt (Therkelsen, 2020), som undersøgte forhold mellem dampspærre og vindspærre i lette ydervægge, samt mindst tilladelige Z-værdi af dampspærre i den traditionelle opbygning. I referencekonstruktion 1 i det nærværende projekt er der anvendt samme opbygning for at kunne bygge videre på resultater af den nævnte rapport. Vindspærren er dog rettet til 9mm (13 mm i den oprindelige rapport).

I referencemodellen er materialerne udvalgt fra WUFI Pro´s materialebibliotek så de svarer til almindeligt anvendte materialer i det danske byggeri.

Materialeparametre for materialerne i referencemodellen fremgår af Tabel 1.

Materialeparametre						
Materiale	Densitet	Porøsitet	Specifik varme- kapacitet	Varmeled- ningsevne	Diffusionsmod- standsfaktor	
Enheder	[kg/m³]	[m³/m³]	[J/kgK]	[W/mK]	[-]	
Træbeklædning	420	0,75	1600	0,13	50	
Vindgipsplade	1153	0,52	1200	0,32	16	
Mineraluld	32,5	0,95	840	0,032	1	
Cellulose	50	0,95	2110	0,037	1,8	
Dampspærre	130	0,001	2300	2,3	10000	
Gipsplade	850	0,65	850	0,20	8,3	

Tabel 1. Materialeparametre for materialerne i referencemodellen.

l begge referencekonstruktioner er der anvendt dampspærre med S_d=1 m iht. (Morelli, et al., 2021). Konstruktionen vil fungere som en benchmark for alle øvrige simuleringer. Figur 9 viser, at for fugtbelastningsklasse 3, kan dampspærre med Z-værdi på 5 GPa m² s/kg (S_d=1 m) anvendes (i nærværende rapport anvendes de samme materialer som i (Morelli, et al., 2021)).

(Morelli, et al., 2021) viser i deres undersøgelse, at i konstruktion med celluloseisolering i stedet for mineraluld, kan Z-værdi sænkes yderligere, men i dette tilfælde beholdes der Z-værdi på 5 GPa m² s/kg for at være på den sikre side.



Figur 9. Risiko for skimmelvækst mellem vindspærren og varmeisoleringen, klimadata af Lund. Ydervæggen indeholder varmeisolering af mineraluld. I det grønne område, er der ingen risiko for skimmelvækst. Z_P-værdier repræsenterer diffusionsmodstand for dampspærre (Morelli, et al., 2021).

3.2 Simuleringsmodel

Der udføres dynamiske simuleringer idet der skal tages i betragtning fx sorptionskurver af materialer. Simuleringerne blev udført ved hjælp af det endimensionelle hygrotermiske simuleringsværktøj, WUFI-Pro, udviklet af (Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP)). Programmet er udviklet til at beregne varme og fugttransportprocesser i konstruktioner. WUFI som simuleringsprogram viser sig (Mundt-Petersen, 2015), at være et troværdigt værktøj som kan bruges til at forudsige fugtforhold samt risikoen for skimmelvækst i lette trækonstruktioner.

3.2.1 Målepunkterne

Figur 10 viser placering af målepunkterne i alle konstruktionsopbygninger. Målepunkterne er markeret som kamerapunkter på Figur 10 og er alle placeret i isoleringen, på den kolde side af dampspærren. Kamerapunktet på den indvendige samt udvendige overflade er automatisk placeret i WUFI.

Punkterne ligger: lige bag vindpladen i den yderste del af isoleringslaget, 50 mm fra vindpladen, 100 mm fra vindpladen, og lige bag dampspærren (på udvendig side af dampspærren). Selvom det i referencekonstruktionen er overgangen mellem isolering og vindspærre der er mest kritisk iht. fugt, er det vigtigt at kontrollere andre punkter i isoleringslag efter hver beregning, da de simulerede konstruktioner har forskellige materialer, parametre mv. Derfor kan det vise sig, at det er et andet sted i isoleringslaget der er kritisk.



Figur 10. Snit i referencekonstruktion, opbygget i WUFI Pro. Målepunkterne er placeret i isoleringen, på den kolde side af dampspærren. I referencekonstruktionen er dampspærren en 0,20 mm PE-folie (mørkt blå), isoleringen er mineraluld og vindspærren er en vindgipsplade.

3.2.2 Overgangsmodstande

Overgangsmodstande for varmetransmission og fugt fremgår af Tabel 2. Overgangsisolanserne er defineret iht. DS 418:2011. Det tages udgangspunkt i en ubehandlet træbeklædning, og derfor er der ikke indsat nogen udvendig fugtmodstand (no coating). Indvendig fugtmodstand er defineret for silikatmaling (S_d=0,01 m, hvilket svarer til en Z-værdi på 0,05 GPa s m² / kg). Strålingsabsorptans er defineret for ubehandlet træ. Tabel 2. Overgangsmodstande for varmetransmission og fugt.

Overgangsmod- stande	Værdi	Enheder	Kommentar
Udvendig over- gangsisolans, R _{se}	0,04	[m²K/W]	Vandret varmestrøm
Udvendig fugtmod- stand, Sd ude	0	[m]	Ingen overfladebe- handling
Kortbølget strålings- arbsorptans	0,4	[-]	Ubehandlet grantræ
Jordens strålingsre- flekstans	0,2	[-]	WUFI Pro standard- værdi
Indvendig over- gangsisolans, R _{si}	0,13	[m²K/W]	Vandret varmestrøm
Indvendig fugtmod- stand, Sd inde	0,01	[m]	Silikatmaling

3.2.3 Indeklima, udeklima, orientering

Indeklimaet simuleres iht. DS/EN 13788. Fugtbelastningsklasse 3 (boliger med ukendt beboelsestæthed) anvendes i alle beregninger, medmindre andet er angivet. Indetemperaturen simuleres som en middelværdi på 20 °C, hvilket er et par grader lavere end normale indendørsforhold.

Udeklimaet er sat til Lund; LTH Data, hvilket er det udeklimadatasæt der kommer tættest på danske forhold lokationsmæssigt og indeholder nedbør.

Orienteringen er valgt til nord, der har den laveste slagregnsbelastning og laveste solindstråling. Da beklædningen er ventileret efter to-trinstætningsprincippet og da målepunkterne ligger bag vindpladen (i isoleringslaget), er slagregnen af mindre betydning. Solstråling er derimod ikke uden betydning, idet mere solbeskinnede bygningsdele vil have større udtørringspotentiale end de mindre solbeskinnede. For at være på den sikre side, er den mindre solbeskinnede nordvendte orientering valgt. Der er tale om en konservativ tilgang idet udtørringspotentialet for nordsiden er mindst. Dette eftervises også i de danske kilder (Mundt-Petersen, 2015).

3.2.4 Simuleringsperiode

Simulering af referencekonstruktionen er foretaget over en 4-årig periode for at se hvornår konstruktionen vil stabilisere sig. Der foretages en visuel vurdering af grafer der præsenterer fugtindhold. Der kan ses, at referencemodellen stabiliseres allerede efter et år. De øvrige simuleringer udføres som regel også over 4årig periode, fordi de simulerede konstruktioner typisk stabiliseres efter 1-3 år. Der er enkelte tilfælde, hvor der skal simuleres over en længere periode for at opnå periode-stabilitet. Dette er specificeret ved en pågældende simulering i afsnit **4 Resultater**. Eksempel af simulering af en længere periode (10 år) er vist på Figur 11, hvor modellen stabiliseres efter 8 år.

Figurer der præsenteres i afsnit **4 Resultater** der viser simuleringer over et år er for tydelighedens skyld vist som døgnsgennemsnit af værdier, der giver et godt overblik. På alle grafer præsenteres der data fra det sidste simuleringsår.



Figur 11. Figuren viser at simuleringsmodellen stabiliseres. Her er der foretaget en simulering over 10 år.

3.3 Materialeparametervariationer

På baggrund af litteraturgennemgang udvælges parametre der modificeres i de forskellige lag af ydervæggen. Der tages udgangspunkt i referencekonstruktionen.

Der ændres en parameter ad gangen (medmindre anderledes er angivet), og efter hver parameterændring foretages en vurdering af resultat, der danner et grundlag til den næste parametervariation. Denne iterative proces beskrives trin for trin i **4 Resultater**.

Ændringer foretages først i isoleringslag. Der tages udgangspunkt i kommercielle isoleringsprodukter som er tilgængelige i WUFI's materialedatabase. Isoleringsmaterialer er udvalgt på baggrund af litteraturen. Derefter oprettes også fiktive isoleringsmaterialer, hvor der modificeres sorptionskurver, væskediffusivitet samt diffusionsmodstand. Hvert valg forklares i **4 Resultater**, da hver valg er begrundet med resultatet af en tidligere simulering.

Egenskaber af de materialer der anvendes til simulering, præsenteres i Tabel 3.

Tabel 3. Parametre for materialerne der anvendes i parametervariationer.

Materiale / egen- skab	Densitet (kg/m³)	Porøsitet (m³/m³)	Varmekapacitet (J/kgK)	Fugtkapa- citet ved 100% RF (kg/m ³)	Varmeledningsevne (W/mK)	Diffusionsmod- standsfaktor µ (-)	
	Indvendige beklædning						
Gipsplader 2 lag (26mm)	850	0,65	850		0,2	8,3	
Isolering							
Mineraluld	32,5	0,95	840	473	0,032	1	
Celluloseisolering	50	0,95	2110	614	0,037	1,8	
Træfiber, høj dens.	260	0,83	1400	650	0,048	5	
Træfiber, lav dens.	140	0,91	1400	350	0,039	3	
Hampcrete 1	440	0,73	1560	546	0,115	4,85	
Hampcrete 2	280	0,83	1400	451,1	0,0812	4,09	
Fiktivt isolerings-	50	0,95	2110	451,1	0,037	3,8	
materiale (kon- _struktion 15)							
Kork 1	150	0,9	1400	42,4	0,04	10	
Kork 2	107	0,22	1900	110	0,0397	28,3	
Vindspærre							
Vindgips	420	0,75	1600	502	0,13	50	
Spånplade (0,009m)	620	0,74	1400	520	0,111	44	
Træfiberisolerings- plade, blød (0,013m)	270	0,83	1700	107,5	0,06	6,25	

Sorptionskurver af de simulerede isoleringsmaterialer fremgår af grafer: Figur 12, Figur 13 og Figur 14.

Figur 12 viser sorptionskurver af nogle kommercielle isoleringsmaterialer anvendt i simuleringer, der findes i WUFI Pro's materialebibliotek, udvalgt bl.a. på baggrund af litteraturstudier. For tydelighedens skyld er fugtindhold over 200 kg/m3 ikke vist på grafen. Figur 13 viser sorptionskurver af forskellige materialer (ikke kun isoleringsmaterialer) der findes i WUFI Pro's materialebibliotek, udvalgt på baggrund af deres diversitet. Figur 14 viser de fiktive sorptionskurver anvendt i simuleringer. Sorptionskurver i dette tilfælde er brugerdefinerede og kan karakteriseres ved en generel stigning i fugtindhold mellem 60-90% RF (meget hurtig stigning i fugtindhold omkring 60-70% RF og mindre stigning mellem 70-90%). Numre på sorptionskurverne i Figur 13 og Figur 14 svarer til simuleringsnumre.



Figur 12. Sorptionskurver af isoleringsmaterialer anvendt i simuleringer. For tydelighedens skyld er fugtindhold over 200 kg/m3 ikke vist på grafen.



Figur 13. Sorptionskurver af forskellige materialer fra WUFI Pro´s bibliotek anvendt i simuleringer ("Nr." refererer til konstruktionsnummer).



Figur 14. Fiktive sorptionskurver anvendt i simuleringer ("Nr." refererer til konstruktionsnummer).

De i simuleringer anvendte væskediffusivitet for adsorption og omfordeling (liquid transport coefficient for suction and redistribution) fremgår af Figur 15 - Figur 18.



Figur 15. Væskediffusivitet, adsorption (liquid transport coefficient, suction) af hampcrete2.



Figur 16. Væskediffusivitet, omfordeling (liquid transport coefficient, redistribution) af hampcrete2.



Figur 17. Væskediffusivitet, adsorption (liquid transport coefficient, suction) af træfiberisolering med høj densitet.



Figur 18. Væskediffusivitet, omfordeling (liquid transport coefficient, redistribution) af træfiberisolering med høj densitet.

Hver gang der ændres isoleringsmateriale, udføres en kontrol om det mest kritiske lag stadig er ved overgang mellem isolering og vindspærre. I øvrigt, kontrolleres der balanceforskel i resultatet og antal "convergence failures" samt om der er opnået periodestabilitet i alle lag. Alle de nævnte kontroller udføres iht. WUFI manual (Fraunhofer IBP, 2019), der anbefaler kontrol af disse for kvalificering af simulering. Der fås 0 "convergence failures" og balance forskel = 0 eller er tæt på 0 (maks. 0,02), medmindre anderledes angivet. I simuleringer er der som udgangspunkt modificeret parametre i isoleringslag. De udvalgte, på baggrund af litteraturgennemgang parametre, ændres trin for trin, for at se hvilken betydning de reelt har. Isoleringstykkelsen ved parametervariationer beholdes som i referencekonstruktionen, medmindre anderledes angivet.

I de undersøgte modificeringer af referencekonstruktion, tages der generelt ikke stilling til U-værdi, medmindre anderledes specificeret.

Simuleringstrin er planlagt som følger:

1. Fjernelse af dampspærre

2. Udnyttelse af fugtkapacitet (hygroskopiske egenskaber) af forskellige kommercielle isoleringsmaterialer

3. Modificering af parametre for at opnå en bedre fugtteknisk robusthed: sorptionskurver, væskediffusivitet, diffusionsmodstand; kombinationer af diverse parametervariationer

4. Parallelle undersøgelser af ydervægges ydeevne i de højere fugtbelastningsklasser 4-5 af de udvalgte konstruktioner.

5. Udnyttelse af høj fugtkapacitet og højere isoleringsevne af vindspærren (der tilføjes isolering på vindspærren) samt udnyttelse af høj permeabilitet af vindspærren (dette punkt undersøges kun på et indledende niveau)

3.4 Databehandling

I denne rapport vurderes skimmelrisiko ud fra RHT-indeks først og efterfølgende foretages der en yderligere vurdering med LIM-modellen, hvor der kræves en mere detaljeret analyse.

3.4.1 Skimmelgrænse, RHT-indeks

Den indledende vurdering af konstruktionen ift. referencekonstruktionen foretages på baggrund af RHT-indeks (Beaulieu, et al., 2002). Den kumulative RHT-indeks er en summering udført på baggrund af et dagsgennemsnit af hver time for det sidste år af simuleringen. Jo højere RHT-indeks, jo større risiko for skimmel er der. Figur 19 viser hvordan RHT-indeks kan summeres i en tabel. RHT-indeks af referencekonstruktionen bliver betragtet som en benchmark – en referenceindeks. Det betyder, at hver konstruktion evalueres op imod referenceindeks.

RHT-indeks, defineres som:

Kumulativ RHT= \sum (RH-RH_X)×(T-T_X) for RH>RH_X% og T>T_X°C for hver time af simulering, hvor RH_X og T_X er grænseværdierne for hhv. relativ fugtighed og temperatur.

RHx er valgt til 75% (organiske materialer) (Brandt, 2013), og Tx er valgt til 0 °C, da ift. flere skimmelmodeller ingen skimmelvækst sker under 0 °C (Sedlbauer, 2001; Viitanen, et al., 2015; Moon, 2005; Clarke, et al., 1999).

	А	E	F	G	Н	I.
	Måned T gennemsnit		RF gennemsnit	Skimmelgrænse	RHT indeks	Dag med
				gennemsnit		skimmelrisiko eller
1	-	•	•	.	•	uden? 🗾 🔻
2	oktober	1.44E+01	7.92E+01	8.22E+01	6.03E+01	ok
26		1.46E+01	7.92E+01	8.22E+01	6.16E+01	ok
50		1.29E+01	7.99E+01	8.30E+01	6.36E+01	ok
74		1.30E+01	8.00E+01	8.30E+01	6.53E+01	ok
98		1.27E+01	8.02E+01	8.32E+01	6.61E+01	ok
122		1.06E+01	8.09E+01	8.48E+01	6.26E+01	ok
146		1.04E+01	8.13E+01	8.51E+01	6.58E+01	ok
170		1.29E+01	8.11E+01	8.31E+01	7.90E+01	ok
194		1.15E+01	8.16E+01	8.39E+01	7.56E+01	ok
218		1.08E+01	8.17E+01	8.44E+01	7.31E+01	ok
242		1.34E+01	8.14E+01	8.27E+01	8.61E+01	ok
266		1.22E+01	8.15E+01	8.35E+01	7.93E+01	ok
290		1.24E+01	8.14E+01	8.34E+01	7.87E+01	ok
314		1.15E+01	8.16E+01	8.39E+01	7.67E+01	ok
338		7.73E+00	8.25E+01	8.77E+01	5.80E+01	ok
362		5.67E+00	8.31E+01	9.07E+01	4.61E+01	ok
386		5.31E+00	8.36E+01	9.11E+01	4.55E+01	ok
1 10		4.82E+00	8.41E+01	9.25E+01	4.37E+01	ok
434		7.31E+00	8.40E+01	8.79E+01	6.58E+01	ok
458		5.19E+00	8.47E+01	9.10E+01	5.04E+01	ok
482		6.04E+00	8.49E+01	8.95E+01	5.99E+01	ok
506		6.94E+00	8.49E+01	8.83E+01	6.86E+01	ok
530		8.87E+00	8.47E+01	8.61E+01	8.64E+01	ok
554		1.01E+01	8.47E+01	8.50E+01	9.88E+01	ok
578		1.14E+01	8.48E+01	8.40E+01	1.12E+02	skimmel
502		1.16E+01	8.49E+01	8.38E+01	1.16E+02	skimmel
526		1.16E+01	8.50E+01	8.39E+01	1.16E+02	skimmel
550		1.14E+01	8.49E+01	8.40E+01	1.13E+02	skimmel
574		9.80E+00	8.53E+01	8.53E+01	1.01E+02	skimmel
598		9.49E+00	8.55E+01	8.56E+01	9.96E+01	ok
			-			

Figur 19. Udklip af en Excel tabel udført efter hver simulering til vurdering af skimmelrisiko. På baggrund af timeværdier fra WUFI er der skabt døgnsgennemsnit for det sidste år af hver simulering.

3.4.2 Skimmelgrænse, LIM I

Skimmelrisiko vurderes mere detaljeret på baggrund af (Sedlbauer, 2001) for organiske materialer, LIM I (Lowest Isopleth for Mould). I denne rapport arbejdes der altid med døgnsgennemsnit af data (relativ fugtighed og temperatur) for at forsimple databehandling. Gennemsnittet er skabt ud fra data fra hver time, som udtrækkes fra WUFI til Excel.

Skimmelgrænsen, der er vist i resultatgraferne i afsnit **4 Resultater**, er beregnet ud fra formlen angivet i Ligning 1. Formlen sætter en 8-dagens grænse for skimmelvækst på organiske overflader i RF (%) som funktion af temperaturen.

Efterfølgende kan antal af dage i træk, der overskrider denne grænseværdi, tælles. Hvis antal dage i træk er mindre end 8, så betragtes konstruktionen som fugtsikker iht. denne metode. Eksempel for denne proces er vist på Figur 19. Den første kolonne angiver en måned. Bagefter er der angivet en døgnsgennemsnit af temperatur (T), relativ fugtighed (RF) samt skimmelgrænsen. Efterfølgende beregnes RHT-indeks og i den sidste kolonne er der en formel der viser om RFgennemsnit overskrider skimmelgrænsen ("skimmel") eller er under skimmelgrænsen ("ok"). Hvis der tælles mindst 8 dage med "skimmel" i træk så antages det at der er en skimmelrisiko. Dette er en tilnærmet beregningsmetode, fordi der tages et døgnsgennemsnit af data.
Formel for 8 dage grænseværdi for RF er som følger:

Ligning 1. Formel for 8-dagens grænseværdi for skimmel (Sedlbauer, 2001).

 $RF = 5E-05T^4 - 0.0045T^3 + 0.1631T^2 - 2.9614T + 102.35$, hvor RF er en grænseværdi for skimmel i % og T= temperatur.

Der er valgt en kurve for 8 dage, fordi 16-dagens grænseværdi vurderes at være for konservativ, da ift. 16-dagens kurve, sker der vækst i referencekonstruktionen, som ikke forventes i en konstruktion opbygget efter alment teknisk fælleseje. 8-dages grænseværdi passer med grænseværdi i VTT-modellen (Viitanen, et al., 2015), hvor der defineres, at der ingen vækst sker under RF=80% (Brandt, 2013). VTT-modellen er bl.a. anvendt i artiklen (Morelli, et al., 2021), hvor konstruktionen med dampspærre S_d=1 m (referencekonstruktionen i denne rapport) vurderes at være fugtsikker. Resultatgraferne skabt efter 8-dagens LIM grænse giver en overskuelig vurdering af skimmelrisiko over et år.

Det bemærkes at formel for skimmelgrænsen iht. LIM metode er bygget op på en måde så der fås RF-værdier over 100%, som også er afspejlet i grafer i afsnit **4 Resultater**. RF over 100% skal betragtes som lige med 100%.

4 Resultater

Opsummering af resultater fremgår af Figur 20. Vandrette søjler der overskrider den stiplede orange linje indikerer, at RHT-indeks er højere end i referencekonstruktionen 1. Under Figur 20 gennemgås og diskuteres resultater af hver simulering.

I de forskellige konstruktioner modificeres kun de parametre som er angivet i beskrivelsen ved den pågældende konstruktion. Andre parametre bliver uændrede ift. referencekonstruktioner. Som udgangspunkt ændres der 1 parameter ad gangen, medmindre anderledes er angivet.

Efter hver sammenhængende række simuleringer, opsummeres resultater i en tabel (i slutninger af hver delafsnit), der viser resultat iht. både LIM-metode, samt RHT-indeks. Hver tabel angiver også resultat af simulering af referencekonstruktionen samt evt. andre relevante konstruktioner for sammenligning. En samlet tabel med resultater fremgår af bilag F.

Der bemærkes at kun referencekonstruktionen (konstruktion 1 og 3) samt konstruktion 38, 39 og 43 har dampspærre i sin opbygning, de øvrige variationer har ikke nogen dampspærre.

Felt *Nummer* i tabeller angiver konstruktionsnummeret (simuleringsnummeret). Felt *Kommentar* angiver, hvilken model (konstruktion) er taget som udgangspunkt (kopi) til modelopbygning.

Forklaring af forkortelser anvendt i tabeller og grafer i dette afsnit er angivet hermed:

LTCS – Liquid Transport Coefficient, Suction (væskediffusivitet for adsorption)
LTCR – Liquid Transport Coefficient, Redistribution (væskediffusivitet for omfordeling)
µ – Dampdiffusionsmodstandsfaktor
A-værdi – Water Absorption Coefficient (vandabsorptionskoefficienten)
Ref.kon. – Referencekonstruktion
Sorpt. – Sorptionskurve
Konstr. – Konstruktion
T – Temperatur
Iso. – Isolering
Fugtbel. – Fugtbelastningsklasse
Grøn farve – beregning viser fugtsikkert resultat iht. den pågældende metode

Grafer som viser skimmelgrænsen samt forløbet af RF og T, der ikke fremgår af dette afsnit, er vedlagt i bilag G.



Figur 20. Opsummering af resultater– søjler repræsenterer RHT-indeks af alle simulerede konstruktioner undtagen Konstruktion 25, som ikke kunne kvalificeres. Vandrette søjler der overskrider den stiplede orange linje indikerer, at RHT-indeks er højere end i referencekonstruktionen 1.

4.1 Referencekonstruktion

I det følgende trin, præsenteres der resultater af beregninger af referencekonstruktioner. Disse resultater opsummeres i Tabel 4.

Konstruktion 1: Referencekonstruktion med mineraluld og dampspærre med diffusionsmodstand S_d =1 m kvalificeres med LIM-metode som værende fugtsikker (antal dage med skimmelrisiko er mindre end 8 i træk). Det bekræfter undersøgelse af (Morelli, et al., 2021). Overblik over årsforløb af RF, temperaturen, samt sammenhængende grænseværdi for skimmel, er vist på Figur 21. Der kan ses, at der er enkelte punkter hvor RF (den sorte linje på graf) overskrider skimmelgrænsen (den grønne linje på graf). Resultat af RHT-indeks er 14636. Denne værdi bliver derfor som udgangspunkt en grænseværdi for kvalificering af de øvrige konstruktioner.

Konstruktion 2: Der fjernes dampspærre fra referencekonstruktionen. Dette resulterer i et fugtteknisk dårligt resultat, med RHT-indeks på 33247. Det er dog usikkert, om simulering kan anvendes pga. stor ubalance i resultatet. På Figur 21 ses der, at RF (blå linje) overstiger skimmelgrænsen (grøn linje) stort set hele efterår, vinter og forår. Der observeres til gengæld kun en lille forskel i RF mellem de to konstruktioner over sommeren. Temperaturen (rød linje) og dermed skimmelgrænsen er næsten identisk for begge konstruktioner.



Figur 21. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i referencekonstruktion 1 med mineraluld og dampspærre (konstruktion 1) sammenlignet med referencekonstruktion 1 uden dampspærre (konstruktion 2), årsvariation.

Konstruktion 3: Referencekonstruktion (konstruktion 1) ændres, så mineraluld udskiftes med celluloseisolering. Der kontrolleres at overgang vindspærre-isolering er mest kritisk ligesom i den første referencekonstruktion. RHT-indeks er lidt lavere end ved referencekonstruktion med mineraluld, den er 13802. Dette kan skyldes den større fugtkapacitet af celluloseisolering. Konstruktion 4: Dampspærre fjernes fra referencekonstruktionen med celluloseisolering (konstruktion 3). Resultat af denne simulering er stabilt og kan derfor godt anvendes. Konstruktionen fungerer fugtteknisk dårligt sammenlignet med konstruktioner med dampspærre. På Figur 22 ses der, at RF-kurve (den blå linje) overstiger skimmelgrænsen (grøn linje) stort set hele efterår, vinter og forår.

Konstruktion med celluloseisolering (konstruktion 3) vælges som referencekonstruktion 2 pga. at opbygning med mineraluld uden dampspærre udviser problemer med kvalificering af beregning. Dette sker ikke ved celluloseisolering. Det viser, at denne type isolering (i dette tilfælde bio-baseret) er et godt udgangspunkt til test af konstruktioner uden dampspærre. I tabeller og grafer i dette afsnit vil resultater af simuleringer, som udgangspunkt, være vist sammen med referencekonstruktion 2 (dvs. en opbygning med celluloseisolering).



Figur 22. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i referencekonstruktion med celluloseisolering og dampspærre (konstruktion 3) sammenlignet med referencekonstruktion uden dampspærre (konstruktion 4), årsvariation.

Tabel 4. Opsummering a	f resultater fra simuleringer "	1-4 – RHT-indeks, LIM-metode.
------------------------	---------------------------------	-------------------------------

Konstr. nummer	1	2	3	4
	Reference kon- struktion 1 (med mineraluld)	Dampspærre fjer- nes fra konstr. 1	Reference konstruktion 2 (med cellulose)	Dampspærre fjer- nes fra konstr. 3
Kommentar		Kopi af 1	Kopi af 1	Kopi af 2
RHT-indeks	14636	33247	13802	23362
LIM	OK	SKIMMEL	OK	SKIMMEL

4.2 Afgørende parametre i isoleringslag

Næste skridt: I det næste trin, lægges der fokus på undersøgelse af parametre i isoleringslag. Der undersøges hvilke parametre af isoleringslag der har den

største indflydelse på fugtforholdene. Opsummering af resultater i dette trin angives i Tabel 5.

Konstruktion 5: Konstruktion uden dampspærre (konstruktion 4) ændres så isolering udskiftes med hampeisolering (hampcrete 1). Litteraturgennemgang (Latif, et al., 2015; Latif, et al., 2018) viste nemlig, at ydervægge med hampeisolering opnår et rigtig godt fugtteknisk resultat. Resultat af denne simulering viser, at RHTindeks er markant lavere end reference konstruktion (9344). Varmeledningsevnen er dog så høj (0,115 W/mK), at man skulle bruge 0,7m isolering i stedet for 0,195m for at opretholde den samme U-værdi som ved mineraluld (0,15 W/m²K). U-værdi beregning er vedlagt i bilag C.

Konstruktion 6: Konstruktion uden dampspærre (konstruktion 4) ændres igen så isolering erstattes med hampeprodukt (hampcrete 2) med bedre varmeledningsevne dvs. 0,08 W/mK. RHT-indeks er igen lavere end referencekonstruktionens (den er 12757) men U-værdi er stadigvæk ret dårlig - kun 0,30 W/m²K. U-værdi beregning er vedlagt i bilag D.

Konstruktion 7: Konstruktion 6 ændres så isoleringstykkelsen øges for at opnå den samme U-værdi som ved referencekonstruktion (0,15 W/m²K). U-værdi beregning er vedlagt i bilag E. Der tilføjes derfor 265 mm ekstra isolering. RHT-indeks fås lavere (bedre) end før. Graf iht. LIM metode viser ikke en enkelt dag med skimmel, se Figur 23. Det ses, at hampeisolering har rigtig gode fugttekniske egenskaber der gør, at den ikke behøver dampspærre, for at gøre konstruktionen fugtteknisk sikker. Dette resultat bekræfter resultater fra litteraturstudier (Latif, et al., 2015; Latif, et al., 2018), som viste at lette ydervægge med hamp har rigtig god fugtteknisk ydeevne. Der observeres yderligere, at hampcrete har en meget stabil kurve ift. referencekonstruktionen, hvor der kan ses større udsving i RF.

Det bemærkes, at hampcrete kan variere betydelig i sammensætning. Hampcrete 2 består af 80% hampefibre (2-20mm) og bindemiddel, men der findes mange forskellige variationer på markedet.



Figur 23. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion med hampcrete2 (konstruktion 7) sammenlignet med referencekonstruktion med celluloseisolering (konstruktion 3), årsvariation.

Tabel 5.	Opsummering af	resultater fra simuleringer	5-7 – RHT-indeks, LIM-metode.
	, .		

Konstr. nummer	3	4	5	6	7
	Reference kon- struktion 2 (med cellulose)	Dampspærre fjernes fra konstr. 3	Hampcrete 1 (Hamp1)	Hampcrete 2 (Hamp2)	Hampcrete 2 med tykkere isolering (Ekstra 265 mm isolering)
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 6
RHT-indeks	13802	23362	9344	12757	8977
LIM	OK	SKIMMEL	OK	OK	OK

4.2.1 Hampcrete – del 1 af simuleringer

Næste skridt: I de næste trin, bliver det undersøgt, hvilke egenskaber af hamp, der bidrager til det fugtteknisk sikre resultat. For at svare på det spørgsmål, tages der oprindelig cellulosekonstruktion hvor der blev fjernet dampspærre (konstruktion 4). Denne konstruktion har en dårlig fugtteknisk ydeevne. Der ændres 1 parameter ad gangen i isolering (bagefter også 2 eller 3 ad gangen) for at vurdere, hvad der har størst indflydelse på resultatet. De parametre der ændres til, er "lånt" fra hampeisolering (hampcrete2), da det er eftervist at den fungerer godt fugtteknisk.

Litteraturgennemgang har vist, at sorptionskurve og diffusionsmodstand generelt er de parametre der har den største betydning for fugtsikkerhed af konstruktionen. Da der i dette tilfælde anvendes konstruktion uden dampspærre, kan det derfor være relevant at undersøge diffusionsmodstanden af selve isoleringslag. Der fokuseres derfor primært på sorptionskurve og diffusionsmodstand af isolering. Opsummering af resultater præsenteres i Tabel 6. Konstruktion 8: Der anvendes den oprindelige vægopbygning med cellulose, uden dampspærre (konstruktion 4) og der ændres først kun på sorptionskurve af isolering så den svarer til sorptionskurve af hampcrete 2. Begge sorptionskurver er vist på Figur 24. Der fås en smule bedre resultat end i den oprindelige konstruktion med cellulose, men der observeres ikke en betydelig forskel. Hamp har større fugtkapacitet end cellulose, det er derfor overraskende at selve sorptionskurve ikke gør en stor forskel for resultatet. RF ift. LIM-grænsen er vist på Figur 25. Der observeres, at RF bag vindspærren bliver lavere om vinteren, men til gengæld højere om forår (ift. konstruktion 4), når der anvendes sorptionskurve med højere fugtkapacitet i isoleringslag.



Figur 24. Sorptionskurve af celluloseisolering og sorptionskurve af hamp2 isolering (hampcrete 2). Hamp har stejlere sorptionskurve end celluloseisolering, dvs. den har højere fugtkapacitet.



Figur 25. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion 4 (uden dampspærre med celluloseisolering) sammenlignet med konstruktion 8 (konstruktion 4 med sorptionskurve af hampcrete2) og konstruktion 13 (konstruktion 4 med diffusionsmodstandsfaktor af hampcrete2), årsvariation.

Konstruktion 9: I dette trin anvendes konstruktion 8 og der ændres diffusionsmodstandsfaktor af isolering så den passer med hampcrete 2 (sorptionskurver bliver beholdt som ændret til hampcrete 2). Her fås der et betydeligt bedre resultat end i den oprindelige konstruktion med cellulose, dog stadig ikke fugtteknisk sikker.

Konstruktion 10: I dette trin, tages der udgangspunkt i konstruktion 8, dvs. hvor der kun er ændret sorptionskurve, og der nu også ændres på væskediffusivitet for adsorption og væskediffusivitet for omfordeling (dvs. en række værdier der hver er afhængig af et givet fugtindhold), da de parametre hænger sammen med sorptionskurve og beskriver hvor hurtigt vand optages og omfordeles i materialet ved et givet vandindhold. Disse parametre har størst betydning for de højere relative fugtigheder, men det er værd at tjekke om de også har nogen betydning her. Resultat er kun en smule bedre end i konstruktion 8, men stadigvæk alt for højt ift. skimmelgrænsen.

Konstruktion 11: Da hverken sorptionskurver eller sorptionskurver i kombination med væskediffusivitet flytter meget på resultatet, undersøges der igen den tredje værdi dvs. diffusionsmodstand. Der tages udgangspunkt i konstruktion 10, hvor den ændrede sorptionskurve samt væskediffusivitet bibeholdes og der nu ændres diffusionsmodstand til den af hampcrete 2. Her fås der endelig et sikkert resultat, som er endnu bedre end referencekonstruktion 1. Resultat kvalificeres også med LIM-kurve som værende fugtteknisk sikker.

Tabel 6. Opsummering af resultater fra simuleringer 8-11 – RHT-indeks, LIM-metode.

Konstr. nummer	1	3	4	8	9	10	11
	Ref.konstr. 1 (med mi- neraluld)	Ref.konstr. 2 (med cellulose)	Dampspærre fjernes fra konstr. 3	Cellulose med sorptionskurve af Hamp2	Cellulose med sorptionskurve og µ af Hamp2	Cellulose med sorptions- kurve, LTCS, LTCR af Hamp2	Cellulose med sorptions- kurve, LTCS, LTCR og µ af Hamp2
Kommentar		Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 8	Kopi af 10
RHT -indeks	14636	13802	23362	22562	18178	22237	14263
LIM	OK	OK	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	OK

4.2.2 Hampcrete – del 2 af simuleringer

Næste skridt: Da der endnu ikke er undersøgt hvilken indflydelse de enkelte parametre: væskediffusivitet, samt selve diffusionsmodstand, har på resultatet, undersøges disse i de næste trin. Sammenspil af de forskellige parametre er svært at estimere, og det vurderes derfor nødvendigt, at undersøge indflydelsen af hver enkelt parameter en ad gangen. Resultater fremgår af Tabel 7.

Konstruktion 12: Der tages udgangspunkt i konstruktion 4 (den oprindelige konstruktion med cellulose uden dampspærre) og der ændres kun på væskediffusivitet for adsorption og omfordeling så de to parametre svarer til hampcrete 2. Der fås en for høj RHT-værdi, højere end i konstruktion 4, dvs. et fugtteknisk dårligt resultat.

Konstruktion 13: Der tages igen udgangspunkt i konstruktion 4 og denne gang ændres der kun diffusionsmodstand så den svarer til hampcrete 2. Konstruktionen fungerer ikke fugtteknisk, men der observeres, at denne parameter har den største indflydelse på resultatet af alle de tre parametre (som er: sorptionskurver, diffusionsmodstand, væskediffusivitet). Det er interessant, fordi nogle litteraturkilder (Latif, et al., 2015; Latif, et al., 2018) efterviser eksperimentalt, at ydervægge med hamp har en god fugttekniske ydeevne, men der er ikke undersøgt hvilke parametre er afgørende. Der antages i litteraturen, at det er pga. høj fugtkapacitet, mens dette resultat viser, at det er diffusionsmodstand der er afgørende. RF og T iht. LIM er vist på Figur 25. Man kan aflæse, at den ændrede diffusionsmodstand (konstruktion 13) flytter generelt mere på resultatet end den ændrede sorptionskurve (konstruktion 8).

4.2.3 Vandabsorptionskoefficient (A-værdi)

Næste skridt: Vandabsorptionskoefficienten (A-værdi) samt sorptionskurver er i de fleste tilfælde tilstrækkelig, til at estimere væskediffusivitet. Derfor skal der undersøges, om det er nok at sætte et krav til A-værdi, i stedet for at undersøge i detaljer forløbet af væskediffusivitet, som er et sæt af værdier. Dette trin undersøges for at være i stand til at forenkle de følgende undersøgelser.

Konstruktion 14: For at undersøge det overstående, tages der udgangspunkt i Konstruktion 9, hvor sorptionskurver samt diffusionsmodstand er ændret til hampcrete 2. A-værdi (vandabsorptionskoefficient) sættes til en værdi som er angivet i hampcrete 2. Der fås et resultat som er bedre end referencekonstruktion og bedre end selve konstruktion 6, dvs. den oprindelige hampcrete 2 konstruktion (se Tabel 7). Dette forklares ved, at ved hampcrete 2 (konstruktion 6) er der i WUFI ud fra A-værdi kun genereret væskediffusivitet for adsorption, mens væskediffusivitet for omfordeling er målt eksperimentalt og ikke genereret ud fra A- værdi. Som nævnt i kapitel **2.3.4 Væskediffusivitet**, bliver der ikke nødvendigvis genereret de korrekte kurver for væskediffusivitet ud fra A-værdi og sorptionskurver. Det vurderes derfor, at A-værdi ikke kan hjælpe med tilnærmelse af væskediffusivitet i alle tilfælde.

4.2.4 Min. diffusionsmodstand af isolering

Næste skridt: Da det er vanskeligt at sætte et krav til sorptionskurve eller væskediffusivitet pga. at de begge består af en række værdier, der hænger sammen med fugtindhold, skal disse parametre vurderes separat i hvert enkelt tilfælde. Det er dog muligt at undersøge, hvad der er den mindst tilladelige diffusionsmodstand når der anvendes sorptionskurve og væskediffusivitet af hampcrete 2. Der tages derfor udgangspunkt i konstruktion 11, som fungerer fugtteknisk godt og der ændres kun på diffusionsmodstand af isolering indtil der fås den mindst tilladelige værdi. Dermed kan der fås et minimumskrav til diffusionsmodstand af isolering ved sorptionskurve og væskediffusivitet af hampcrete 2.

Konstruktion 15: For at undersøge det overstående, simuleres der med forskellige diffusionsmodstandsfaktorer (μ) for isoleringen: 3; 3,5; 3,7; 3,8 (udgangspunkt er taget i konstruktion 11). Resultatet ved diffusionsmodstand (μ) af 3,8 er meget tæt på referencekonstruktionen (se Tabel 7), og selvom den er lidt højere, vurderes den at være på den sikre side ift. LIM-metode. Derfor kan resultat med diffusionsmodstand (μ) for isoleringen på 3,8 betragtes som fugtteknisk forsvarligt. Hermed bliver det eftervist, at hvis isoleringsmateriale har sorptionskurve og væskediffusivitet der svarer til hampcrete 2, og diffusionsmodstandsfaktor (μ) er min. 3.8, samt de øvrige lag er som i referencekonstruktion, så er det sandsynligt, at konstruktionen vil fungere fugtteknisk forsvarligt.

Konstr. nummer	3	4	12	13	14	15
	Reference- konstruktion 2 (med cel- lulose)	Dampspærre fjernes fra konstr. 3	Cellulose med LTCS, LTCR af Hamp2	Cellulose med µ af Hamp2	Cellulose med sorptions- kurve, A-værdi og µ af Hamp2	Cellulose med sorptionskurve, LTCS, LTCR af Hamp2 og µ = 3.8
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 13	Kopi af 11
RHT -indeks	13802	23362	23387	16469	11867	14892
LIM	OK	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	OK	OK

Tabel 7. Opsummering af resultater fra simuleringer 12-15 – RHT-indeks, LIM-metode.

4.2.5 Træfiberisolering – del 1 af simuleringer

Næste skridt: I de næste trin, testes der forskellige træfiberisoleringsmaterialer med forskellige sorptionskurver og væskediffusivitet, for at undersøge om der er nogle vigtige tendenser ift. isoleringsegenskaber, som muligvis blev overset ved de tidligere simuleringer. Egenskaber af de simulerede materialer fremgår af Tabel 3.

Der kigges nærmere på to specifikke træfiberisoleringsmaterialer, en med lav densitet (140kg/m³), og den anden med højere densitet (260kg/m³). Resultater af disse simuleringer fremgår af Tabel 8.

Konstruktion 16: Der tages udgangspunkt i konstruktion 4, og isolering udskiftes med træfiberisolering med høj densitet (260kg/m³). Der fås et rigtig godt fugtteknisk resultat med en lav RHT-værdi (lavere end referencekonstruktionens).

Konstruktion 17: Der tages igen udgangspunkt i konstruktion 4, og isolering udskiftes med træfiberisolering med lav densitet (140kg/m³). Der fås et fugtteknisk dårligt resultat med en høj RHT-værdi (meget højere end referencekonstruktionens).

Graf med RF, temperatur og skimmelgrænse iht. LIM over et år for begge konstruktioner (16 og 17) præsenteres på Figur 26. Der kan observeres en stor forskel mellem RF i begge konstruktioner, hvor den eneste forskel er type af træfiberisolering.



Figur 26. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion uden dampspærre med træfiberisolering med høj densitet (Konstruktion 16) sammenlignet med konstruktion uden damp-spærre med træfiberisolering med lav densitet (Konstruktion 17), årsvariation.

Konstruktion 18: For at undersøge om man kan konkludere, at det igen er de tre parametre der spiller den største rolle iht. isoleringsmaterialer, nemlig: sorptionskurver, væskediffusivitet og diffusionsmodstand, tages der udgangspunkt i en konstruktion med den "dårlige", i fugtteknisk forstand, træfiberisolering (konstruktion 17) og der ændres kun på de tre nævnte parametre, så de svarer til den "gode" træfiberisolering (konstruktion 16). Der fås en rigtig god RHT-værdi, bedre end referencekonstruktionens. Der kan dermed ses, at de tre parametre igen viser sig at spille den største rolle ift. fugtteknisk ydeevne af bio-baserede (og muligvis andre) isoleringsmaterialer.

De tre nøgleparametre sammenlignes hermed:

Diffusionsmodstandsfaktor (μ) af den "fugtteknisk gode" træfiberisolering er 5, mens diffusionsmodstandsfaktor (μ) af den "dårlige" træfiber isolering er 3.

Der er en lille forskel mellem sorptionskurver af de to træfiberisoleringsmaterialer (kurvene ligger meget tæt på hinanden), men der til gengæld er en større forskel i væskediffusivitet, som er afhængige af sorptionskurver. Derfor præsenteres alle tre parametre på Figur 27, Figur 28 og Figur 29.



Figur 27. Sorptionskurve af træfiberisolering m. høj densitet og af træfiberisolering m. lav densitet.



Figur 28. Væskediffusivitet for adsorption af træfiberisolering m. høj densitet (tv.) og af træfiberisolering m. lav densitet (th.).



Figur 29. Væskediffusivitet for omfordeling af træfiberisolering m. høj densitet (tv.) og af træfiberisolering m. lav densitet (th.).

Som nævnt før, er det ikke så nemt at stille et præcis krav til sorptionskurver og væskediffusivitet. Til gengæld ift. diffusionsmodstand, som er en enkelt værdi, observeres der en tendens til, at isoleringsmaterialer med større

diffusionsmodstande performer fugtmæssigt bedre. Det kan derfor være en fordel, fra et fugtteknisk synspunkt, at vælge et isoleringsmateriale med en højere diffusionsmodstand.

Konstr. nummer	3	4	16	17	18
	Reference konstruktion 2 (med cel- lulose)	Dampspærre fjer- nes fra konstr. 3	Træfiberisole- ring høj densi- tet	Træfiberisole- ring lav densi- tet	Konstr. 17 sorptions- kurve, LTCS, LTCR og µ af træfiberiso. 16
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 17
RHT-indeks	13802	23362	11660	17835	12104
LIM	OK	SKIMMEL	OK	SKIMMEL	OK

Tabel 8. Opsummering af resultater fra simuleringer 16-18 – RHT-indeks, LIM-metode.

4.2.6 Træfiberisolering – del 2 af simuleringer

Næste skridt: For at undersøge om det igen er diffusionsmodstand af isolering der har den største betydning, ændres denne parameter i den "dårligere" isolering.

Konstruktion 19: I dette trin, tages der udgangspunkt i en konstruktion med den "dårlige" træfiberisolering, dvs. konstruktion 17, og der ændres kun på diffusionsmodstand af isolering, så den svarer til den "gode" træfiberisolering. Resultat viser sig at være fugtteknisk bedre end referencekonstruktion (se Tabel 9). Der kan dermed observeres, at ved nogle materialer, kan det være relevant at øge fokus på diffusionsmodstanden af isoleringsmateriale.

4.2.7 Mineraluld – modificering af egenskaber

Næste skridt: I de næste tre trin, tages der udgangspunkt i konstruktion 2 dvs. en konstruktion med mineraluldsisolering uden dampspærre. Dette gøres for undersøge, om mineraluld kan fungere lige så godt som de hygroskopiske isoleringsmaterialer, så længe diffusionsmodstanden øges. Opsummering af simuleringer er vist i Tabel 9.

Konstruktion 20: I dette trin, ændres kun diffusionsmodstand af mineraluldsisolering så den svarer til hampcrete 2. Der fås en stabil simulering, ligesom i konstruktioner med bio-baserede isoleringsmaterialer. RHT-indeks bliver næsten halveret ift. konstruktion 2, som er bemærkelsesværdig, selvom den stadig er over en værdi af referencekonstruktionen.

Konstruktion 21: I dette trin tages der udgangspunkt i konstruktion 20 og der ændres også på sorptionskurve. RHT-indeks bliver endnu lavere. Denne gang er der dog ikke så stor forskel. RHT-indeks er stadig højere end referencekonstruktion, men når der kigges nærmere på skimmelrisiko ud fra LIM-metoden, så observeres ingen vækst af skimmelsvamp.

Konstruktion 22: I dette trin tages der udgangspunkt i konstruktion 21 og der ændres også på væskediffusivitet. RHT-indeks er her præcis på det samme niveau som i konstruktion 21.

Tabel 9. Opsummering af resultater fra simuleringer 19-22 – RHT-indeks, LIM-metode.

Konstr. nummer	1	2	3	19	20	21	22
	Reference konstruktion 1 (med mi- neraluld)	Dampspærre fjernes fra konstr. 1	Reference konstruk- tion 2 (med cel- lulose)	Træfiberisole- ring fra 17 med µ af træ- fiberiso. 16	Mineraluld med µ af Hamp2	Mineraluld med µ og sorptions- kurve af Hamp2	Mineraluld med µ, sorptions- kurve, LTCS, LTCR af Hamp2
Kommentar		Kopi af 1	Kopi af 1	Kopi af 17	Kopi af 2	Kopi af 20	Kopi af 21
RHT-indeks	14636	33247	13802	13375	16765	15471	15471
LIM	OK	SKIMMEL	OK	OK	SKIMMEL	OK	OK

4.2.8 Kork

Næste skridt: Før de næste trin er igangsat, undersøges om der findes biogene isoleringsmaterialer i WUFI's materialebibliotek, som har høj diffusionsmodstand. Der undersøges også, om der er materialer som samtidig har lav varmeledningsevne. Det viser sig, at fx kork har meget stor diffusionsmodstand ift. andre kommercielle isoleringsprodukter. Den har også lav varmeledningsevne. Egenskaber af de simulerede materialer fremgår af Tabel 3. Der bemærkes, at normalt bruges kork ikke til bygningsisolering (den bruges til fx akustiske plader).

Konstruktion 23: Referencekonstruktion uden dampspærre (konstruktion 4) anvendes og isolering erstattes af kork. RHT-indeks bliver meget lav – 10929 (se Tabel 10), som er meget lavere end referencekonstruktionen.

Konstruktion 24: Konstruktion 23 tages som udgangspunkt og isolering erstattes af en anden type kork. RHT-indeks bliver endnu lavere end i konstruktion 23, se Tabel 10.

Graf med RF, temperatur og skimmelgrænse iht. LIM over et år for konstruktion med kork (konstruktion 23) samt for referencekonstruktion (konstruktion 3) præsenteres på Figur 30. Der kan observeres, at RF bag vindspærren i konstruktionen med kork er meget lavere end i referencekonstruktionen med dampspærre. RHT-indeks er også lavere, som vist i Tabel 10.



Figur 30. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion uden dampspærre med kork (konstruktion 23) sammenlignet med referencekonstruktion med celluloseisolering og damp-spærre (konstruktion 3), årsvariation.

Konstr. nummer	3	4	23	24
	Reference kon- struktion 2 (med cellulose)	Dampspærre fjer- nes fra konstr. 3	Kork1	Kork2
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 4
RHT-indeks	13802	23362	10929	7669
LIM	OK	SKIMMEL	OK	OK

4.3 Test af diverse sorptionskurver

Næste skridt: I de tidligere trin, er det er eftervist, at det er diffusionsmodstand og ikke fugtkapacitet, der har afgørende effekt på fugtteknisk ydeevne af de biogene isoleringsmaterialer. Det kan dog være, at sorptionskurver også har betydning, når de har et bestemt forløb. Dette kan ikke udelukkes og bør testes.

I de næste trin, testes der forskellige sorptionskurver i isoleringslaget. Som udgangspunkt ændres ikke på andre parametre, medmindre anderledes er angivet. Da det er observeret at væskediffusivitet kun har beskeden betydning for resultatet, er det besluttet, at denne parameter ikke inkluderes i beregning, medmindre anderledes er angivet i de enkelte tilfælde. Opsummering af resultater af de følgende simuleringer fremgår af Tabel 11.

Konstruktion 25: Konstruktion 4 tages som udgangspunkt (konstruktion med cellulose, uden dampspærre) og sorptionskurve ændres til en fiktiv sorptionskurve med en kraftig stigning ved cirka 75-80% (Nr. 25 på Figur 14). Denne variation af sorptionskurve findes ikke i WUFI materialebibliotek. Der er dog ikke opnået ligevægt i nogle lag (selvom simuleringsperiode forlænges med 4 år). Fugtindhold i isoleringslag bliver mindre hvert år men kan ikke stabilisere sig. Resultat kan derfor ikke kvalificeres, selvom RF er meget lav.

4.3.1 Test af diverse eksisterende sorptionskurver

Næste skridt: I de næste trin testes der forskellige sorptionskurver af materialer (ikke kun isoleringsmaterialer) fra WUFI's materialebibliotek for at undersøge om der findes eksisterende materialer der har en sorptionskurve, som vil fungere fugtteknisk acceptabelt i en opbygning uden dampspærre.

Konstruktion 26-32: Konstruktion 4 tages igen som udgangspunkt. Sorptionskurver ændres ved hver simulering til en anden variation fra nr. 26 til 32. Disse sorptionskurver er vist på Figur 13. Sorptionskurver er udvalgt på baggrund af deres diversitet, alle stammer fra WUFI's bibliotek. Der observeres kun små og ubetydelige forskelle i resultater dvs. i RHT-indeks.

Tabel 11. Opsummering af resultater fra simuleringer 25-32 – RHT-indeks, LIM-metode (Sorpt. =sorptionskurve). Konstruktion 25 kunne ikke kvalificeres.

Konstr. nummer	3	25	26	27	28	29	30	31	32
	Reference konstruktion 2 (med cel- lulose)	Sorpt. 1	Sorpt. 2	Sorpt. 3	Sorpt. 4	Sorpt. 5	Sorpt. 6	Sorpt. 7	Sorpt. 8
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4
RHT-indeks	13802	Der op- nås ikke ligevægt	23009	23391	23369	22699	22415	23355	23134
LIM	OK	-	SKIMMEL						

4.3.2 Afprøvning af diverse fiktive sorptionskurver

Næste skridt: Der observeres en tendens til, at de sorptionskurver der stammer fra WUFI's materialebibliotek, har en betydelig stigning i den høje ende af RFværdier (ved omkring 95-100% RF), men da de fugtsikre konstruktioner normalt ikke overskrider 95% RF (det kan observeres i resultater af WUFI-simuleringer, at RF holdes under 95%), er de store variationer i fugtforhold ved 95-100% RF uden en stor betydning. Der undersøges derfor sorptionskurver som har en kraftig stigning ved cirka 60-90% RF. Dette er allerede afprøvet i konstruktion 25, men da denne konstruktion ikke kunne kvalificeres, foretages der yderligere simuleringer.

Konstruktion 33: I dette trin tages der udgangspunkt i konstruktion 4. Her arbejdes der ligesom i konstruktion 25 med meget høj fugtkapacitet i intervaller omkring 65-80% RF (fiktiv sorptionskurve nr. 33 på Figur 14). Ligesom i konstruktion 25, opnås der ikke ligevægt i nogle lag, fugtindhold i isoleringslag bliver mindre hvert år og kan ikke stabilisere sig. RF er generelt lav, men beregning kan ikke kvalificeres. Simuleringsperioden forlænges derfor til 11 år. Der observeres at fugtindhold er nu stabilt i alle lag. Den stabiliserer sig efter cirka 10 år. RHT-indeks er over referencekonstruktionens (se Tabel 12), men overalt er RF lavere end i referencekonstruktionen og der ses på en graf skabt med LIM-metode (vist på Figur 31), at konstruktionen er fugtsikker. Den høje RHT-indeks skyldes, at RF er høj over sommeren, men stadig under skimmelgrænsen. Der observeres, at RF-forløb generelt er mere stabilt ift. referencekonstruktionen (kurven er forholdsvis flad), dvs. der er ikke en stor variation ift. årstid.



Figur 31. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion 33 sammenlignet med referencekonstruktion med celluloseisolering og dampspærre (konstruktion 3), årsvariation.

Simulering i konstruktion 33 viser, at sorptionskurver har betydning ved de mellemhøje RF-intervaller dvs. ved cirka 60-90%. De tidligere anvendte sorptionskurver (konstruktion 26-32) havde ikke nogen betydning for beregningsresultat, fordi de kurver stiger kraftig ved høje RF-værdier – fra cirka 95%, og i de fugtsikre konstruktioner, vil der aldrig opnås så høje RF-værdier bag vindspærren. Derfor er disse sorptionskurver ikke særlig relevante at kigge på, når der ledes efter parametre afgørende for fugtteknisk ydeevne. Det bliver muligvis relevant at undersøge dem, når man arbejder med højere fugtbelastningsklasser.

4.3.3 Fiktive sorptionskurver simplificeres

Næste skridt: I de næste trin, undersøges der sorptionskurver, som tager udgangspunkt i en sorptionskurve af konstruktion nr. 33, som fungerer godt fugtteknisk, men der testes forskellige optioner for at kunne simplificere kurven. Simplificering af kurven kan være nyttig for at nemmere kunne kvalificere forskellige optioner, og afsætte grænseværdier. I dette trin vil der prøves at svare på spørgsmål: Hvad er minimum fugtkapacitet ved hhv. 70, 75, 80 og 85% RF? Det bemærkes, at diffusionsmodstandsfaktor (μ) i de følgende konstruktioner er relativ lav (1,8) og ændres ikke. Alle andre parameterværdier beholdes også som i konstruktion 4 (konstruktion med celluloseisolering).

Sorptionskurven simplificeres, så der arbejdes med mere detaljeret kurve i intervaller mellem 60-90%. Der simuleres over 10 års-perioden, fordi en tidligere beregning viste periodestabilitet efter 10 år, når der simuleres med lignende kurver.

Opsummering af resultater af de følgende konstruktioner fremgår af Tabel 12.

Konstruktion 34-36: Sorptionskurver (Nr. 34, 35 og 36 på Figur 14) testes ved at forhøje fugtkapacitet i intervallet 60-90% RF, indtil der opnås et fugtsikkert resultat. Hvert resultat kvalificeres først med RHT-indeks og efterfølgende med LIM-metoden, da det i nogle tilfælde af tidligere beregninger viste sig, at RHT-indeks

var højere end referencekonstruktion, mens LIM-metode ikke viste nogen skimmelrisiko.

Konstruktion 37: I dette skridt udføres der en simulering med sorptionskurve nr. 37, som er vist på Figur 14. Beregning med denne kurve viser ikke nogen skimmelrisiko. Vandindhold ved RF 70% er 280 kg/m³, ved 75% er 305 kg/m³, ved 80% er 330 kg/m³ og ved 85% er 355kg/m³. Disse værdier skal betragtes som en tilnærmelse, fordi det er vanskeligt at beregne en minimumsværdi for alle RF-punkter separat, da de værdier hænger sammen med hinanden. Det er ikke undersøgt, hvorvidt det har betydning at fugtindhold allerede stiger ved cirka 60-70% RF eller om der er nok hvis kraftig stigning sker omkring 80%.

Gennem simulering 33-37 observeres der en tendens til, at jo højere fugtkapacitet i intervallet mellem 60 og 90% RF, jo bedre fugtteknisk ydeevne opnår konstruktion. Figur 32 viser forløbet af RF, temperaturen og skimmelgrænsen iht. LIM-metode, over et år for konstruktion 37, samt for referencekonstruktion (konstruktion 3). Der kan observeres, at RF bag vindspærren i konstruktionen 37 er markant lavere end i referencekonstruktionen med dampspærre. Der kan også ses, at RF-forløb er meget stabilt (kurven er mere flad).



Figur 32. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion 37 (konstruktion uden dampspærre med fiktiv sorptionskurve) sammenlignet med referencekonstruktion med celluloseisolering og dampspærre (konstruktion 3), årsvariation.

Tabel 12. Opsummering af resultater fra simuleringer 33-37 – RHT-indeks, LIM-metode.

Konstr. nummer	3	33	34	35	36	37
	Reference konstruktion 2 (med cel- lulose)	Sorptions- kurve 9	Sorptions- kurve 10	Sorptions- kurve 11	Sorptions- kurve 12	Sorptions- kurve 13
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 4 Der opnås li- gevægt efter ca. 10 år	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4	Kopi af 4
RHT-indeks	13802	17518 (selvom RHT- indeks er hø- jere end ref.kon. opnås skimmelfri konstruktion)	21499	20103	19807	19142 (selvom RHT- indeks er hø- jere end ref.kon. opnås skimmelfri konstruktion)
LIM	OK	OK	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	OK

4.4 Fugtbelastningsklasser 4-5

Næste skridt: I de næste trin, testes den fugttekniske robusthed af konstruktionen ved at ændre fugtbelastningsklasse i de undersøgte konstruktioner. Da konstruktionen i fugtbelastningsklasse 1-2 forventes at fungere fugtteknisk bedre end i klasse 3, kan disse simuleringer udelades.

Fugtbelastningsklasse 4 anvendes ved storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum, mens fugtbelastningsklasse 5 anvendes ved specielle bygninger fx vaskerier, bryggerier, svømmehaller (Brandt, 2013).

Der undersøges om den konstruktion, der fungerer godt fugtteknisk, vil fungere i fugtbelastningsklasser 4 og 5. Der tages udgangspunkt i konstruktion 37 (fiktiv sorptionskurve). Der simuleres således referencekonstruktion med cellulose (konstruktion 3) for sammenligning. Opsummering af resultater præsenteres i Tabel 13.

Konstruktion 38: I dette trin simuleres referencekonstruktion (konstruktion 3) med celluloseisolering i fugtbelastningsklasse 4. RHT-indeks er højere end for fugtbelastningsklasse 3, som forventet. Iht. LIM-metode, er der risiko for skimmel, da der forekommer perioder med 8 dage i træk med RF der overskrider skimmelgrænsen.

Konstruktion 39: Referencekonstruktion med celluloseisolering (konstruktion 3) simuleres i fugtbelastningsklasse 5. Konstruktion er fugtteknisk uacceptabel da der forekommer forlængede perioder med skimmelrisiko. Forløbet af RF, temperaturen og skimmelgrænsen iht. LIM-metode, over et år, er vist for både konstruktion 38 og 39 samt for referencekonstrution på Figur 33. Af grafen kan det ses, at RF-kurven for referencekonstruktion i både fugtbelastningsklasse 4 og 5 overskrider skimmelgrænsen i en højere grad end RF-kurven for referencekonstruktion i fugtbelastningsklasse 3.



Figur 33. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i referencekonstruktion med celluloseisolering i fugtbelastningsklasse 3 (konstruktion 3), fugtbelastningsklasse 4 (konstruktion 38) og fugtbelastningsklasse 5 (konstruktion 39), årsvariation.

Konstruktion 40: Konstruktion 37 simuleres i fugtbelastningsklasse 4. Resultatet viser, at der forekommer lange perioder med skimmelrisiko.

Konstruktion 41: Konstruktion 37 simuleres i fugtbelastningsklasse 5. Der er skimmelrisiko det meste af tiden.

Forløbet af RF, temperaturen og skimmelgrænsen iht. LIM-metode over et år, er vist for både konstruktion 37 (fugtbelastningsklasse 3), 40 (fugtbelastningsklasse 4), og 41 (fugtbelastningsklasse 5), på Figur 34. Af grafen kan det ses, at RF-kurven for referencekonstruktion i både fugtbelastningsklasse 4 og 5 overskrider skimmelgrænsen, mens RF-kurven for konstruktion 37 i fugtbelastningsklasse 3 holder sig generelt under skimmelgrænsen.



Figur 34. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i konstruktion 37 (fiktiv sorptionskurve) i fugtbelastningsklasse 3, i fugtbelastningsklasse 4 (konstruktion 40) og i fugtbelastningsklasse 5 (konstruktion 41), årsvariation.

Konstr. nummer	3	37	38	39	40	41
	Reference- konstruktion 2 (med cel- lulose)	Sorptions- kurve 13	Referencekon- struktion med cellulose (kon- struktion 3) Fugtbelastnings- klasse 4	Referencekon- struktion med cellulose (kon- struktion 3) Fugtbelastning klasse 5	Konstruktion 37 Fugtbelastnings- klasse 4	Konstruktion 37 Fugtbelastnings- klasse 5
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 4	Kopi af 3	Kopi af 3	Kopi af 37	Kopi af 37
RHT-indeks	13802	19142 (selvom RHT-indeks er højere end ref.kon., opnås skim- melfri kon- struktion)	16166	19311	27129	39332
LIM	OK	OK	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL

Tabel 13. Opsummering af resultater fra simuleringer 38-41 – RHT-indeks, LIM-metode.

4.5 Vindspærrelag

Næste skridt: I de næste trin, undersøges vindspærrelag. Da forskellige studier viser, at højisolerende og samtidig permeable vindspærrer kan bidrage til forbed-ring af fugtforholdene i ydervægge uden dampspærre, er det værd at foretage indledende simuleringer med disse parametre. Opsummering af simuleringsresultater fremgår af Tabel 14.

Konstruktion 42: I dette trin, udføres der en simulering, hvor der tages udgangspunkt i konstruktion 17, dvs. en ydervæg med en fugtteknisk "dårlige"

træfiberisolering uden dampspærre. Vindspærren erstattes her af spånplade og der tilføjes træfiberplade på den udvendige side for at øge isoleringsevnen af vindspærren.

Resultat af simulering viser, at væggen ikke fungerer fugtteknisk. Det mest kritiske lag er igen overgang mellem isolering og vindspærre og RHT-indeks er meget højere end både i konstruktion 17 og i referencekonstruktion.

Det bemærkes yderligere, at varmeledningsevnens afhængighed af fugtindhold ikke er defineret i det brugte materiale. Denne parameter kan have betydning for fugtforholdene i de øvrige lag.

Konstruktion 43: I dette trin tages der udgangspunkt i referencekonstruktion med celluloseisolering (konstruktion 3) og vindspærren ændres til en der er højisolerende (den samme vindspærre som i konstruktion 42). Der observeres kun en lille forbedring af RHT-indeks ift. referencekonstruktionen. Dog når der kigges på kurve iht. LIM (Figur 35), observeres der en stor forskel. Figur 35 viser, at RF i referencekonstruktion er betydeligt højere om vinteren. Den er, til gengæld, meget lavere om sommeren. RF om sommeren i konstruktion 43 ligger dog stadig langt under skimmelgrænsen, men det er det, der bidrager til RHT-indeks er tæt på referencekonstruktionen.



Figur 35. RF, skimmelrisiko og temperatur bag vindspærren i referencekonstruktion (konstruktion 3) sammenlignet med en referencekonstruktion hvor vindspærren erstattes med et højisolerende materiale (konstruktion 43).

Konstruktion 44: I dette trin tages der udgangspunkt i konstruktion 4 (konstruktion med celluloseisolering uden dampspærre). Vindspærren ændres til højisolerende (ligesom i trin 43). Fugtforholdene bliver værre end i konstruktion 4. Det sker sandsynligvis fordi tykkere vindspærre har en højere diffusionsmodstand end i den oprindelige opbygning, og dermed hindres udtørring til ydersiden. Diffusionsmodstandforhold mellem det lufttætte og vindtætte plan bliver dermed vendt om

ift. den traditionelle konstruktion, hvor diffusionsmodstand af det lufttætte lag er normalt højere end diffusionsmodstand af det vindtætte lag.

På baggrund af simulering 42-44, kan der konstateres, at højisolerende vindspærre har et potentiale til at forbedre fugtforholdene i konstruktioner hvor der er introduceret en form af dampspærre / dampbremse. Det bekræfter undersøgelser i litteraturen (Bunkholt, et al., 2021; Vinha, 2008; Pihelo, et al., 2016), som konkluderede at diffusionsmodstand af dampspærrelag kan nedsættes hvis isoleringsevne af vindspærre øges. I konstruktioner uden dampspærre / dampbremse bidrager den højisolerende vindspærre til forringelse af fugtforholdene.

Konstr. nummer	3	4	17	42	43	44
	Reference konstruktion 2 (med cellu- lose)	Dampspærre fjernes fra konstr. 3	Træfiberiso- lering lav densitet	Træfiberisolering lav densitet, vindspær- ren ændres til spån- plade + træfiberisole- ringsplade	Reference kon- struktion med cellulose (kon- str.3) med vind- spærre som i konstr. 42	Konstruktion 4 med vind- spærre som konstr. 43
Kommentar	Kopi af 1	Kopi af 2	Kopi af 4	Kopi af 17	Kopi af 3	Kopi af 4
RHT-indeks	13802	23362	17835	20232	13111	26867
LIM	OK	SKIMMEL	SKIMMEL	SKIMMEL	OK	SKIMMEL

Tabel 14. Opsummering af resultater fra simuleringer 42-44 – RHT-indeks, LIM-metode.

5 Diskussion

5.1 De afgørende parametre

5.1.1 Fugtkapacitet, diffusionsmodstand

Simuleringer viser, at selve fugtkapacitet af isoleringsmaterialer fra WUFI's bibliotek ikke har tilstrækkelig effekt på fugttekniske forhold i konstruktionen, så der kan fjernes dampspærre. Resultater peger på diffusionsmodstand som den afgørende parameter. Det skyldes sandsynligvis, at ved at anvende isoleringsmaterialer med højere diffusionsmodstand, hindrer man fugten i at diffundere ind i det mest kritiske punkt dvs. overgangen mellem isolering og vindspærre. Dvs. man "flytter" dampspærrens egenskaber ind i isoleringslaget.

Det ser ud til, at mange biogene isoleringsmaterialer med høj fugtkapacitet også har høj diffusionsmodstand. Nogle litteraturkilder antager, at den god fugtteknisk ydeevne i disse materialer, som er eftervist igennem hygrotermiske simuleringer (Pihelo, et al., 2016) og feltstudier (Latif, et al., 2018), skyldes en høj fugtkapacitet. De kilder tager dog ikke diffusionsmodstanden af isolering i betragtning. Andre litteraturkilder understreger nemlig, at selve fugtkapacitet af hygroskopisk isolering har en beskeden betydning for fugtteknisk ydeevne af konstruktionen (Bunkholt, et al., 2021; Vinha, 2008). Denne rapport efterviser, at det ikke er fugtkapacitet der er afgørende i de undersøgte materialer.

5.1.2 Høj fugtkapacitet af isolering + højisolerende og diffusionsåben vindspærre

Nogle kilder (Bunkholt, et al., 2021; Vinha, 2008; Pihelo, et al., 2016) beskriver, at man bedst kan udnytte den høje fugtkapacitet af isolering ved at bruge højisolerende og samtidig diffusionsåben vindspærre. Det er vigtigt, at vindspærren i disse tilfælde er så permeabel som muligt, fordi højisolerende vindspærrematerialer kan hindre udtørring til ydersiden, hvis de samtidig ikke er tilstrækkelig diffusionsåbne. Indledende simuleringer viser, at en højisolerende og diffusionsåben vindspærre kan forbedre fugtforholdene, dog ikke i den samme grad som høj diffusionsmodstand af isolering. For at udnytte den positiv virkning af højisolerende vindspærre, skal der introduceres en vis form for dampbremse (dampspærre med lavere diffusionsmodstand som ikke behøver at være af plast). Dette bekræfter konklusioner i litteraturen.

I litteraturen (Vinha, 2008) bliver det også konkluderet, at det mindst tilladeligt diffusionsmodstandsforhold mellem det lufttætte og det vindtætte lag bliver mindre, når der bruges hygroskopiske isoleringer ift. de ikke-hygroskopiske isoleringsmaterialer, hvis der samtidig bruges højisolerende og meget diffusionsåben vindspærre. Det er dog ikke eftervist i nærværende rapport.

5.1.3 Modificering af sorptionskurver

Som nævnt før, havde selve fugtkapacitet af de undersøgte kommercielle isoleringsmaterialer ringe indflydelse på fugtforholdene. Det skyldes, at disse materialer har høj fugtkapacitet ved høje relative fugtigheder dvs. omkring 95-100%, og der opnås aldrig så høje RF-værdier i fugtsikre konstruktioner.

Modificering af sorptionskurver viser sig at være en anden metode at opnå en fugtteknisk robust diffusionsåben konstruktion. Simuleringer af fiktive

isoleringsmaterialer med teoretiske sorptionskurver viste, at hvis der beregnes med høje fugtkapaciteter i de mellem-høje RF-intervaller dvs. omkring 60-90% i isoleringslag, så kan der også opnås lige så godt resultat, som ved den høje diffusionsmodstand af isolering.

Det viste sig, at høj fugtkapacitet (over cirka 300 kg/m³) ved RF-intervallet mellem 60-90% har stor betydning for resultatet. Materialer med lignende sorptionskurver findes dog ikke i WUFI's bibliotek. Det er sandsynligt, at de ikke findes blandt de kommercielle isoleringsmaterialer. Dog hvis de ikke findes, kan de muligvis udvikles.

Det kan være svært at denifere krav til sorptionskurver / fugtkapaciteten, da det ikke er en enkelt værdi, i modsætning til fx diffusionsmodstand. Resultater af simuleringer af de forskellige sorptionskurver præsenterede i denne rapport kan give et godt overblik over de vigtige tendenser, dog skal de kun betragtes som en tilnærmelse. Hver sorptionskurve bør testes enkeltvis. I øvrigt, bør man altid huske, at det er kombination af flere parametre der er vigtig. Dvs. at man ikke alene kan kigge på sorptionskurver uden at kigge på diffusionsmodstand. Det er sammenspillet mellem de forskellige parametre som man skal arbejde med.

Generelt på baggrund af de foretagne simuleringer ses der en tendens til, at både høj diffusionsmodstand og sorptionskurver med høj stigning omkring 60-90%, bidrager til betydende forbedring af fugtteknisk robusthed af en diffusionsåben let ydervæg. Mindst en af de to forudsætninger skal være opfyldt for isoleringslag i en let ydervæg uden dampspærre.

5.2 Skimmelmodeller, vurdering af skimmelrisiko

Der er store forskelle mellem de forskellige skimmelmodeller. Både de simple og de mere avancerede skimmelmodeller udgør en forenkling af den meget komplekse skimmeldannelsesproces. (Vereecken, et al., 2012) har vist, at selvom meget forskning allerede er blevet udført for at nå frem til en mere nøjagtig og pålidelig skimmelmodel, så er der stadig nogle mangler, urealistiske fænomener, modsætninger osv. der findes i de velkendte skimmelmodeller. Undersøgelsen har også vist, at de forskellige skimmelmodeller fører frem til forskellige resultater. Fx kan resultater fra VTT-model være mere optimistisk ift. de andre modeller. Derfor skal man være forsigtig, når man analyserer resultaterne, uanset hvilken skimmelmodel man bruger. Kendskab til fugtteori er nødvendigt.

Selvom der i denne rapport er anvendt 8-dages skimmel LIM model, kan det i andre undersøgelser vise sig relevant at kigge på 16-dages kurve. Det er en vurdering som man bør foretage mht. en specifik sag. I øvrigt, er det altid en fordel at foretage en feltundersøgelse eller laboratorieforsøg. Det kunne hjælpe med at eftervise, om det er nødvendigt at kigge på 16-dages kurve eller om der kan nøjes med 8-dage der stemmer bedre overens med VTT-model.

Denne rapport viser, at det er fordelagtigt at kombinere forskellige metoder til evaluering af resultater. Fx kan konstruktionen ikke altid kvalificeres med RHTindeks. Det viste sig nemlig i nogle tilfælde, at selvom RHT-indeks var højere end referencekonstruktionen, så viste kurve iht. LIM-metoden, at konstruktionen faktisk fungerede fugtteknisk bedre end referencekonstruktionen. Dette var observeret i nogle konstruktioner med fiktive sorptionskurver, samt i konstruktionen med højisolerende vindspærre. Det skyldes, at RF var højere end i referencekonstruktionen over sommeren men alligevel ikke høj nok til at overskride skimmelgrænsen.

I denne rapport er der foretaget en vurdering af skimmelrisiko på baggrund af døgnsgennemsnit af relativ fugtighed samt temperaturen. Konsekvensen af dette valg kan være, at resultatet bliver mere optimistisk end hvis der var anvendt timeværdier. En vurdering på baggrund af timebasis ville være mere præcis, men ville kræve en meget tidskrævende databehandling, og er derfor fravalgt i denne rapport. Resultater fra simuleringer på baggrund af døgnbasis skal betragtes som en tilnærmelse.

5.3 Konkrete materialer, kobling til praksis

På baggrund af bl.a. litteraturen, var der til simuleringer udvalgt nogle specifikke isoleringsmaterialer der fungerede bedst fugtteknisk i konstruktioner uden dampspærre. De materialer er: hampcrete, træfiberisolering med høj densitet og kork. Som nævnt før, har de en god fugtteknisk ydeevne, pga. en høj diffusionsmodstand og ikke som oprindelig tænkt, en høj fugtkapacitet.

Celluloseisolering, som er et af de mest udbredte biogene isoleringsmaterialer i Danmark, har højere diffusionsmodstand end mineraluld, og selvom der ikke er en stor forskel, så er det nok at ændre betydeligt på resultatet ift. skimmelrisiko. Simulering i fugtbelastningsklasse 3 viste dog, at i en konstruktion med celluloseisolering kan man ikke undvære dampspærren. Der kan til gengæld anvendes et materiale, som ikke har lige så høj diffusionsmodstand som en traditionelle dampspærre af plast, fx en dampbremse af et biogent materiale. Der skal dog foretages en fugtteknisk vurdering af en specifik konstruktion, hvis man ønsker at anvende en dampbremse der tillader diffusionen igennem væggen.

Det er eftervist at hampcrete, træfiberisolering med høj densitet og kork generelt er egnet til konstruktion uden dampspærre. Dog er det vigtig, at hvert produkt testes enkeltvis mht. fugtegenskaber, da parametre kan variere betydeligt fra produkt til produkt. Fx sammensætning af hampcrete havde en stor indflydelse på resultatet (se en forskel mellem hamp1 og hamp2 i 4 Resultater) samt densiteten af træfiberisolering havde en stor betydning. Ift. træbaserede materialer kan resultatet variere ikke kun igennem forskellige træsorter, densiteter mv., men også ift, hvor meget af endetræ vs. sidetræ er der til rådighed. Alle de parametre kan have indflydelse på resultatet af skimmelrisikovurdering. Når man arbejder med bio-baserede materialer, er det derfor vigtigt, at være opmærksom på, at de forskellige biogene materialer kan have meget forskellige hygrotermiske egenskaber. Derfor skal der projekteres med et givent produkt, der opfylder de fugttekniske kravene. Det er noget som kan blive en stor udfordring for entreprenøren. der ikke frit kan vælge et andet produkt uden at foretage ekstra undersøgelser. Der er nemlig flere forudsætninger som skal være opfyldt. Denne rapport viser, at en af de forudsætninger er tilstrækkelig høj diffusionsmodstand af isolering. Hver gang der ændres et produkt under projektering eller i opfølgningsfasen bør der foretages en ny hygrotermisk vurdering. I øvrigt, skal fugtbelastningsklasse altid overvejes under projektering og hvis der ændres på forudsætninger, skal der foretages en ny undersøgelse.

I øvrigt, bør man altid overveje om et specifikt materiale fungerer ikke kun i fugtteknisk forstand, men også med hensyn til andre krav der stilles i et pågældende tilfælde, fx brand, lyd, styrke. Det kan være fristende at antage, at isoleringsmaterialer i diffusionsåbne konstruktioner skal have høj diffusionsmodstand. Man skal dog huske, at de materialer ofte har høj densitet og dermed høj varmeledningsevne, dvs. de isolerer dårligere. Det kan betyde, at man i sådanne tilfælde skal bruge mere materiale for at opnå den ønskede U-værdi. Det kan være, at det ikke kan betale sig fra både økonomisk og bæredygtighedsperspektiv.

I øvrigt, er nogle af de alternative isoleringsmaterialer svært fremskaffelige. De produceres normalt i mindre mængder, fx ålegræs eller kork anvendes normalt kun som akustikplader og ikke bygningsisolering. Men det kan godt ændre sig i fremtiden i takt med stigende efterspørgsel. Kork viser sig at have de bedste egenskaber fra både fugtteknisk og isoleringsmæssigt perspektiv, blandt de undersøgte materialer. Hamp er dog et mere udbredt materiale og har et stort potentiale, fordi den kan vokse hurtigt og kraftigt og er ikke en meget krævende plante mht. klima, jord mv.

Byggebranchen er generelt meget konservativ og der foretrækkes afprøvede og kendte løsninger. Derfor vil det tage noget tid, før de alternative isoleringsmaterialer er almindelig anvendt. Et vigtigt fokus for branchen er bæredygtighed og der er incitament til at erstatte mineraluld med et mere miljøvenligt materiale, da processen til fremstilling af mineraluld er meget energikrævende. De bio-baserede isoleringsmaterialer har et stort potentiale, både fordi de er bæredygtige, samt fordi de kan indgå i diffusionsåbne konstruktioner, som kan give en fordel for indeklima. Kravene til CO₂-grænseværdier, der indføres for nybyggeri, vil sikkert fremme både interesse for, og anvendelse af de organiske isoleringsmaterialer.

I øvrigt, ser det ud til, at i nogle tilfælde kan plastfolien spares væk, som ikke gør en kæmpe forskel fra bæredygtighedsperspektiv, men vil være en fordel for arbejdsprocessen, da udførelsen af dampspærre, samt damptætte gennemføringer og detaljer, er tids- og ressourcekrævende og ofte giver store fejl med fugtskader til følge. Utætheder i dampspærren i konstruktioner med bio-baserede isoleringsmaterialer kan betyde så meget, at det muligvis er mere fugtteknisk forsvarligt at fjerne dampspærren i visse tilfælde. Betydning af utætheder i dampspærren er ikke undersøgt i nærværende rapport.

Lufttæthed er meget vigtig at have for øje når man bygger uden traditionel dampspærre, ikke kun pga. selve tæthedskrav i bygningsreglement, men også fordi forholdsvis store mængder af fugt transporteres ved konvektionen dvs. igennem utætte samlinger ift. diffusionen igennem et materiale. Det er især kritisk når vi taler om biogene isoleringsmaterialer, som er meget sårbare over for fugt. Lufttæthed i en diffusionsåben konstruktion skal sikres på andre måder fx ved tætte samlinger mellem plader på den indvendige side af væggen. Det kan dog være vanskeligt at udføre lufttætte samlinger som vil være holdbare i konstruktionens levetid. Der skal derfor stilles et skarpt krav til kvalitetssikring af udførelsen.

5.4 Perspektivering

5.4.1 Parametre og deres modificering

Det anbefales at indflydelsen af de forskellige parametre på fugtteknisk ydeevne af den lette ydervæg uden dampspærre undersøges gennem fx Monte Carlo metode, hvor der undersøges hvilke parametre, er afgørende for at kunne be- eller afkræfte de påstande som konkluderes i nærværende rapport. De analyser der er fundet gennem litteraturgennemgang (Zhao, et al., 2011), har fokus på traditionel konstruktion der inkluderer en form for dampspærre / dampbremse, og der mangler en lignende proces ift. konstruktion uden dampspærre.

Dertil kunne man i de fremtidige undersøgelser også inkludere indflydelsen af parametre som temperatur og ventilationsrate i hulrummet, indtrængning af slagregn igennem vindspærre, infiltrationen fra den indvendige side, betydning af isoleringstykkelse samt varmeledningsevnen af isolering mv.

Det vil i øvrigt være en fordel at foretage en fuldskalatest eller laboratorieforsøg som har i fokus de parametre, som gennem denne rapport har vist sig at have største betydning, for at kunne understøtte resultaterne af de teoretiske simuleringer. Litteraturstudier (Latif, et al., 2015; Palumbo, et al., 2016) viser nemlig, at ikke alle teoretiske resultater af fugtsimuleringer afspejles i de virkelige forhold.

5.4.2 Materialer

I dette projekt, er der kun undersøgt få faktiske isoleringsmaterialer, og alle blev udvalgt fra WUFI's bibliotek. Det anbefales at foretage en grundig gennemgang af flere eksisterende materialer for at finde ud af, om der er andre materialer som muligvis har egenskaber der egner sig til en konstruktion uden dampspærre. Det kan også være fordelagtigt at undersøge en kombination af to forskellige isoleringsmaterialer for at opnå en mere fugtteknisk robust konstruktion. (Latif, et al., 2018) har undersøgt en konstruktion med et lag træfiberisolering og et lag hampkalkisolering ("Biond" panel), da man på denne måde kunne udnytte egenskaber af begge isoleringer. Det kan være en fordel at undersøge flere kombinationer fx cellulose + hamp eller en kombination af organiske og uorganiske materialer i en ydervæg for at opnå optimalt resultat.

5.4.3 Modificering af de eksisterende isoleringsmaterialer

Det anbefales, at fremtidige undersøgelser fokuserer på at finde ud af, hvordan der kan opnås en kraftig stigning i fugtkapacitet ved de mellem-høje RF-værdier. Det kan være, at der skal tilføjes diverse adsorbenter til isoleringsmaterialer, for at øge fugtkapaciteten i de specifikke intervaller. Det kan også være, at forskellige materialer skal blandes sammen for at optimere på deres ydeevne. Dette er undersøgt fx i (Latif, et al., 2014), hvor der er optimeret på hamp-isolering. I øvrigt, kan der overvejes om det vil gavne, at materialet behandles med kemikalier der hindrer skimmelvækst (Latif, et al., 2015). Betydning af kemikalier og tilsætningsstoffer for indeklimaet bør overvejes.

Det viser sig, at nogle eksisterende materialer fungerer fugtteknisk bedre end andre i konstruktioner uden dampspærre. Derfor anbefales det, at undersøge om der kunne udvikles et materiale som har lignende fugttekniske egenskaber som fx kork, men er økonomisk mere rentabelt og nemt fremskaffeligt, og samtidig kan opfylde andre funktionskrav.

5.4.4 De øvrige lag

Indvendige beklædning og overfladebehandling har indflydelse på hvordan fugtkapaciteten af materialet udnyttes (Palumbo, et al., 2016) og skal derfor indgå i fremtidige overvejelser og test. Indvendig beklædningstype påvirker således diffusionsmodstand af konstruktionen. I øvrigt, som det fremgår af forskellige undersøgelser, har træbaserede plader (OSB, krydsfiner, mv.) egenskaber der spænder vidt og den problematik skal tages i betragtning ved fremtidige undersøgelser.

I nærværende rapport er indflydelse af anvendelse af forskellige dampbremser på fugtforholdene ikke undersøgt, da udgangspunktet var en konstruktion uden dampspærre (lufttætheden sikres i beklædning og samlinger mellem plader). Dampbremser af biogene materialer kan med fordel indgå i fremtidige undersøgelser.

I denne rapport er der foretaget indledende simuleringer af fugtforhold i vægge med højisolerende vindspærrer. Der observeres en generelt positiv virkning af højisolerende vindspærrer på fugtforholdene, hvis der samtidig introduceres en form for dampspærre. Dette bekræfter konklusioner i litteraturkilder. I konstruktion uden dampspærre, vil en højisolerende vindspærre have en negativ effekt. Det anbefales, at fremtidige undersøgelser fokuserer på betydningen af vindspærrens isolans samt permeabilitet. Det kan undersøges, hvor meget, diffusionsmodstand af dampspærren kan reduceres, hvis der introduceres en vindspærre med en vis isolans og diffusionsmodstand. Dermed vil det være muligt at fastsætte det mindst tilladeligt diffusionsmodstandforhold mellem det lufttætte og det vindtætte lag i konstruktion med vindspærre med en vist isolans.

5.4.5 Klimaforandringerne

Prognoser for klimaforandringerne i Danmark peger i retning af et varmere og mere fugtigt klima, hvilket tyder på, at fugtmængder der tilføjes fra indeklimaet til de isolerede konstruktioner, skal fremover være så små som muligt for at sikre robuste konstruktioner.

Betydning af klimaforandringer er ikke undersøgt i det nærværende projekt men bør tages i betragtning i de fremtidige undersøgelser. Det vil være en fordel at indbygge fremskrivning af klimadata for en pågældende lokation ind i WUFI simuleringsprogram for at fremme dens anvendelse i projekteringsopgaver.

5.4.6 Opstilling af krav

Der observeres en mangel på tilstrækkelige velforeskrevne krav til de forskellige lag af diffusionsåbne lette ydervægge af organiske materialer. Derfor kan det være svært for branchen at skifte over til diffusionsåbne facader. Det rejser også et spørgsmål, hvem der vil tage ansvar for projektering af disse konstruktioner over for bygherre som ikke vil tage en unødvendige risiko.

Fremtidig forskning bør fokuseres på udvikling af validerede retningslinjer for design af diffusionsåbne lette ydervægge, der er fugtsikre, og holdbare i koldt klima ved at adressere de parametre, der har mest væsentlig indflydelse på fugtteknisk ydeevne. Dette vil bidrage til at udbrede brugen af biogene byggematerialer, som bidrager til en reduktion af miljøpåvirkningerne af bygninger.

6 Konklusion

Der er i denne rapport udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægge opført uden brug af traditionel dampspærre for at undersøge betydningen af variationer af materialeegenskaber, fx sorptionskurver og dampdiffusionsmodstand, samt for at undersøge hvilke krav der skal stilles til isoleringslag i disse konstruktioner.

Konklusionen er, at ift. isoleringslag skal mindst en af de følgende anbefalinger være opfyldt, for at sikre fugttekniske robuste lette ydervægge uden dampspærre med PE-folie:

- Høj diffusionsmodstand af isoleringslag (forekommer i kommercielle biogene isoleringsmaterialer fx kork, hampcrete, træfiberisolering med høj densitet)
- Høj fugtkapacitet i RF-intervaller mellem 60 og 90% (fiktive materialer som evt. kan udvikles)

Der er yderligere eftervist, at de kommercielle biogene isoleringsmaterialer fra WUFI's bibliotek der har en høj fugtkapacitet, udviser en kraftig stigning i fugtkapacitet ved RF over 95%, hvilket ikke har en stor betydning for den fugttekniske ydeevne, når der arbejdes med konstruktioner i fugtbelastningsklasse 1-3, og hvor relativ fugtighed holdes under 95%.

Indledende simuleringer af vindspærrelag på baggrund af litteraturstudier konkluderer, at høj fugtkapacitet af isoleringslag i kombination med høj isolans og høj permeabilitet af vindspærren, kan have en positiv effekt for fugtforholdene i en let ydervæg, hvis der samtidig anvendes en form for dampspærre / dampbremse. I disse tilfælde kan diffusionsmodstandsforhold mellem dampspærren og vindspærren sandsynligvis reduceres.

Lette diffusionsåbne ydervægge med organiske materialer har brug for mere omhyggelig hygrotermisk design og grundig overvejelse af forskellige materialeparametre. Projektering bør derfor udføres på baggrund af et specifikt produkt.

Kilde- og litteraturliste

Adan, O. 1994. On the fungal defacement of interior finishes. Doctoral Thesis. 1994.

Bastien, D. og Winther-Gaasvig, M. 2018. *Influence of driving rain and vapour diffusion on the hygrothermal performance of a hygroscopic and permeable building envelope.* s.l. : Energy, 164, 2018. s. 288-297.

Beaulieu, P., et al. 2002. *Final Report from Task 8 of MEWS Project (T8-03) -Hygrothermal Response of Exterior Wall Systems to Climate Loading: Methodology and Interpretation of Results for Stucco, EIFS, Masonry and Siding-Clad Wood-Frame Walls.* Ottawa : Institute for Research in Construction, National Research Council Canada , 2002.

Brandt, E. 2013. *SBI-anvisning 224. Fugt i bygninger.* København : Statens Byggeforskningsinstitut, 2013.

Bunkholt, Nora Schjøth, et al. 2021. *Effect of forced convection on the hygrothermal performance of a wood frame wall with wood fibre insulation.* s.l. : Building and Environment, Volume 195, 2021.

Clarke, J. A., et al. 1999. A technique for the prediction of the conditions leading to mould growth in buildings. s.l. : Building and Environment, 34, 1999. s. 515-521.

Copeland, C., et al. 2010. Assessing moisture performance of exterior wall assembly design in wood-frame construction in Beijing, China. s.l. : Journal of Building Enclosure Design, 2010. s. 11-15.

Fraunhofer IBP. 2019. WUFI Pro 6 Manual. s.l. : Fraunhofer IBP, 2019.

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). WUFI. [Online] [Citeret: 05. 05 2022.] https://wufi.de/en/software/wufi-pro/.

Gottfredsen, F. R. og Nielsen, A. 1997. *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber.* (1. udgave, 7. oplag 2015 udg.). Lyngby : Polyteknisk Forlag, 1997.

Johansson, Pernilla, Lång, Lukas og Capener, Carl-Magnus. 2021. *How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective*? s.l. : Journal of Building Engineering 40, 2021.

Koch, Mikael. 2021. Træ 56: Træskelethuse (2. udgave). s.l. : Træinformation, 2021.

Lacasse, M.A., et al. 2018. *Guideline on Design for Durability of Building Envelopes.* s.l. : National Research Council (NRC) of Canada, 2018.

Latif, E, et al. 2014. *Hygric properties of hemp bio-insulations with differing compositions.* s.l. : Construction and Building Materials, 2014. s. 702-711.

Latif, E., et al. 2018. An experimental investigation into the comparative hygrothermal performance of wall panels incorporating wood fibre, mineral wool and hemp-lime. s.l. : Energy and Buildings, Volume 165, 2018. s. Pages 76-91.

Latif, Eshrar, Ciupala, Mihaela Anca og Wijeyesekera, Devapriya Chitral. 2014. The comparative in situ hygrothermal performance of Hemp and Stone

Wool insulations in vapour open timber frame wall panels. s.l. : Construction and Building Materials 73, 2014. s. 205-213.

Latif, Eshrar, et al. 2015. *Hygrothermal performance of wood-hemp insulation in timber frame wall panels with a without a vapour barrier.* s.l. : Building and Environment 92, 2015. s. 122-134.

Miljøstyrelsen. 2019. *Det Åndbare Hus - Afsluttende Rapport.* s.l. : Miljøstyrelsen, 2019.

Møller, E. B., Brandt, E. og Pedersen, E. S. 2016. SBI-anvisning 267. Småhuse - Klimaskærmen. København : Statens Byggeforskningsinstitut, 2016.

Moon, HJ. 2005. *Assessing mold risk in buildings uncertainty. Ph.D. thesis.* s.l. : Georgia Institute of Technology, 2005.

Morelli, M., Møller, E.B. og Hansen, T. 2020. *Hygrothermal conditions in ventilated attics with different air change rates and ceiling constructions.* s.l. : EDP Sciences, 2020.

Morelli, Martin, Rasmussen, Torben Valdbjørn. og Therkelsen, Marcus. 2021. Exterior Wood-Frame Walls—Wind–Vapour Barrier Ratio in Denmark. 2021.

Mundt-Petersen, S. Olof. 2015. *Moisture Safety in Wood Frame Buildings -Blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety.* s.l. : Lund Unviversity, 2015.

Osanyintola, Olalekan F. og Simonson, Carey J. 2006. *Moisture buffering capacity of hygroscopic building materials: Experimental facilities and energy impact.* s.l. : Energy and Buildings 38, 2006. s. 1270–1282.

Palumbo, M, et al. 2016. *Determination of hygrothermal parameters of experimental and commercial bio-based insulation materials.* s.l. : Construction and Building Materials, Volume 124, 2016. s. Pages 269-275.

Peuhkuri, R, et al. 2003. *Fugtfordeling i absorberende isoleringsmaterialer.* s.l. : BYG DTU, 2003.

Peuhkuri, Ruut. 2022. BYGGERI+Arkitektur. *Bæredygtigt byggeri brækker halsen uden bygningsfysikken.* [Online] 25. 04 2022. [Citeret: 20. 05 2022.] https://byggeri-arkitektur.dk/Baeredygtigt-byggeri-braekker-halsen-uden-bygningsfysikken.

Pihelo, Peep og Kalamees, Targo. 2016. *The effect of thermal transmittance of building envelope and material selection of wind barrier on moisture safety of timber frame exterior wall.* s.l. : Journal of Building Engineering 6, 2016. s. 29–38.

Rasmussen, T.V., et al. 2020. *Materialeegenskaber - test af polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret ældning.* s.l. : Aalborg University, 2020.

Rasmussen, Torben Valdbjørn og Nicolajsen, A. 2005. Assessment of the performance of organic and mineral-based insulation products used in exterior

walls and attics in dwellings. s.l. : Department of Building Design and Technology, Danish Building Research Institute, 2005.

Salonvaara, M., Karagiozis, A. og Holm, A. 2001. Stochastic building envelope modeling—the influence of material properties. s.l. : Thermal Performance of Exterior Envelopes of Whole Buildings VIII, 2001. s. 2-8.

SedIbauer, Klaus. 2001. *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation.* Holzkirchen : Fraunhofer-Institute for Building Physics, 2001.

Therkelsen, Marcus. 2020. *Dampspærre i lette ydervægge - En nødvendighed eller ej?* København : Aalborg Universitet, 2020.

Uvizlová, Martina, Bečkovská, Tereza og Vacková, Lucie. 2016. *Diffusion of water vapour through the damaged light weight wooden wall.* s.l. : Applied Mechanics and Materials, Volume 824, 2016. s. 571-578.

Vereecken, Evy og Roels, Staf. 2012. *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation.* s.l. : Building and Environment 51, 2012. s. 296-310.

Viitanen, H, et al. 2015. *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models.* s.l. : Energy Procedia 78, 2015. s. 1425 – 1430.

Vinha, J. 2008. *Analysis method to determine sufficient water vapour retarder for timber-framed walls.* s.l. : Building Physics 2008 - 8th Nordic Symposium, 2008.

Zhao, Jianhua, et al. 2011. Stochastic study of hygrothermal performance of a wall assembly—The influence of material properties and boundary coefficients. s.l. : HVAC&R Research, 17:4, 2011. s. 591-601.

Bilagsfortegnelse

- A U-værdi, referencekonstruktion 1 med mineraluld
- B U-værdi, referencekonstruktion 2 med celluloseisolering
- C U-Værdi, konstruktion med hampcrete 1, tykkere isolering
- D U-Værdi, konstruktion 6 (hampcrete 2)
- E U-Værdi, konstruktion 7 (hampcrete 2, tykkere isolering)
- F Samlet tabel med resultater af alle simuleringer

G RF, T og skimmelgrænse bag vindspærren i konstruktion 1-44, årsforløb, døgnsgennemsnit (Nr. i starten af overskrift over hver graf henviser til konstruktionsnumre der er anvendt i rapporten)

Bilag A

U-Værdi konstruktion 1 (Referencekonstruktion 1)

Ydervægskonstruktion:

0,026mGipsplader0,045 mMineraluld 320,195 mMineraluld 320,009 mVindgips

U-værdi: [W/m²K]:	0.15
Udvendige overfladetemperatur: θ [°C]:	-11.4

se. Lambua-	ISOIANS: R (0/A)	Temperatur-	Temperatur:	Henvisning
værdi: λ	[m ² K/W]	ændring: Δθ	θ [°C]	
[W/mK]		[°C]		
		θ _u : [⁰ C]	-12.0	
				Ventileret
	0.40	0.00		hulrum iht. DS418
	0.13	0.63	44.4	03410
00 0 250	0.04	0.17	-11.4	
0.230	0.04	0.17	-11 2	
95 0.039	5.05	24.43	11.2	λ korrigeret
			13.2	Ũ
45 0.039	1.17	5.64		λ korrigeret
			18.9	
26 0.250	0.10	0.50		DS418 Tabel F2
			19.4	
		0.00	19.4	
Indv. Overgangsisolans: 0.7				
210	6.62			
m ⁻ KJ:	0.15	32.00		
PLACE 21/2	0.00	θ _i : [°C]	20.0	
Transmissionskoefficient (U-værdi): [W/m ² K]: 0.15				
træ/isolering				
a lag				
40	mm			
0.075	111			
0.925				
Varmeledningsevne for materialer λ [W/(mK)]				
0.12	(jf. DS418, Tabel F.2)			
0.032	(kl. 32 isolering)			
Middelyærdi af varmeledningsevnen $\lambda' = 0.039 W/(mK)$				
] værdi: λ [W/mK])09 0.250 195 0.039 045 0.039 045 0.039 045 0.039 045 0.039 026 0.250 	værdi: λ [W/mK] [m²K/W] wærdi: λ [W/mK] [m²K/W] 0.013 0.13 009 0.250 0.04 195 0.039 5.05 045 0.039 1.17 026 0.250 0.10 197 0.250 0.10 198 0.039 1.17 192 0.250 0.10 195 0.039 1.17 106 0.13 0.13 197 0.15 0.00 198 1.17 0.15 199 0.250 0.10 100 1.17 0.15 100 1.17 0.15 100 1.17 0.15 100 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 1000 1.17 0.15 <t< td=""><td>Ι værdi: λ [W/mK] [m²K/W] ændring: Δθ [°C] I 0.13 0.63 009 0.250 0.04 0.17 195 0.039 5.05 24.43 045 0.039 1.17 5.64 026 0.250 0.10 0.50 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.15 32.00 0.00 θ_i: [°C] 13 im²K]: 0.15 32.00 0.00 θ_i: [°C] 13 im²K]: 0.15 32.00 0.01 0.50 0.15 im²K]: 0.15 9_i-θ_u [°C] im²K]: 0.15 0.15 0.039 mm m 0.12 (jf. DS418, Tabel F.2) 0.032 0.039 W/(mK) 0.039 W/(mK)</td><td>værdi: λ [W/mK] [m²K/W] ændring: Δθ [°C] θ [°C] 0.13 0.63 -11.0 009 0.250 0.04 0.17 195 0.039 5.05 24.43 045 0.039 1.17 5.64 026 0.250 0.10 0.50 045 0.039 1.17 5.64 045 0.250 0.10 0.50 045 0.039 1.17 5.64 18.9 0.63 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.5 0.15 32.00 10.66 m 0.075</td></t<>	Ι værdi: λ [W/mK] [m²K/W] ændring: Δθ [°C] I 0.13 0.63 009 0.250 0.04 0.17 195 0.039 5.05 24.43 045 0.039 1.17 5.64 026 0.250 0.10 0.50 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.13 0.63 //m²K]: 0.15 32.00 0.00 θ _i : [°C] 13 im²K]: 0.15 32.00 0.00 θ _i : [°C] 13 im²K]: 0.15 32.00 0.01 0.50 0.15 im²K]: 0.15 9 _i -θ _u [°C] im²K]: 0.15 0.15 0.039 mm m 0.12 (jf. DS418, Tabel F.2) 0.032 0.039 W/(mK) 0.039 W/(mK)	værdi: λ [W/mK] [m²K/W] ændring: Δθ [°C] θ [°C] 0.13 0.63 -11.0 009 0.250 0.04 0.17 195 0.039 5.05 24.43 045 0.039 1.17 5.64 026 0.250 0.10 0.50 045 0.039 1.17 5.64 045 0.250 0.10 0.50 045 0.039 1.17 5.64 18.9 0.63 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.4 19.5 0.15 32.00 10.66 m 0.075
Bilag B

U-Værdi konstruktion 3 (Referencekonstruktion 2)

0,026m	Gipsplader
0,045 m	Cellulose
0,195 m	Cellulose
0,009 m	Vindgips

U-værdi: [W/m²K]:	0.17
Udvendige overfladetemperatur: θ [°C]:	-11.3

Materiale nummer	Materiale	Tykkelse: d [m]	Lambda- værdi: λ	lsolans: R (d/λ) [m ² K/W]	Temperatur- ændring: Δθ	Temperatur: θ [°C]	Henvisning
			[W/mK]		[°C]		
					θ _u : [⁰ C]	-12.0	
	Udv.						Ventileret
	Overgangsisola			0.42	0.70		nuirum int. DS418
	115			0.13	0.70	-11 3	20110
1	Vindaips	0.009	0.250	0.04	0.19	-11.0	
			0.200			-11.1	
2	Træ/Cellulose	0.195	0.043	4.51	24.25		λ korrigeret
						13.1	
3	Træ/Cellulose	0.045	0.043	1.04	5.60		λ korrigeret
						18.7	
4	Gipsplader	0.026	0.250	0.10	0.56	40.0	DS418 Tabel F2
						19.3 10.3	
Indv. Overa	angsisolans:			0.13	0.70	10.0	
Den samled	le isolans ΣR: [m	² K/W]		5.95			
Transmissio	onskoefficinet (U-\	/ærdi) [W/m ² K	1:	0.17	32.00		
Tillæg: [W/r	n ² K]: <i>xx</i>	, -	-	0.00	θ _i : [°C]	20.0	
Transmiss	ionskoefficient (U-værdi): [W/ı	m²K]:	0.17	θ _i -θ _u [°C]	32.0	
	Inhom	nogen lag træ	/isolering				
Varmeledn	ingsevne for inh	omogene lag					
Træbredde			45	mm			
cc- afstand	træ		0.6	m			
Andel træ			0.075				
Andel isoler	ing		0.925				
Varmeledni	ngsevne for mate	rialer λ [W/(mk	()]				
Træ			0.12	(jf. DS418, Tabel F.2)			
Isolering			0.037	(kl. 37 isolering)			
Middelvær	di af varmelednir	ngsevnen λ' =	0.043	W/(mK)			

Bilag C

U-Værdi konstruktion med Hampcrete 1, tykkere isolering

0,026m	Gipsplader
0,045 m	Hamp1
0,655 m	Hamp1
0,009 m	Vindgips

U-værdi: [W/m²K]:	0.15
Udvendige overfladetemperatur: θ [°C]:	-11.4

Materiale nummer	Materiale	Tykkelse: d [m]	Lambda værdi: λ [W/mK]	lsolans: R (d/λ) [m ² K/W]	Temperatur- ændring: Δθ	Temperatur: θ [°C]	Henvisning
			[[°C]		
					θ _u : [ºC]	-12.0	
	Udv.						Ventileret
	s			0.13	0.64		DS418
						-11.4	-
1	Vindgips	0.009	0.250	0.04	0.18		
						-11.2	
2	Træ/Hamp	0.655	0.115	5.68	28.09		λ korrigeret
						16.9	
3	Træ/Hamp	0.045	0.115	0.39	1.93	40.0	λ korrigeret
4	Ginsplader	0.026	0 250	0.10	0.51	18.8	DS/18 Tabel E2
4	Cipopiadei	0.020	0.230	0.10	0.01	19.4	
						19.4	
Indv. Overga	angsisolans:			0.13	0.64		
Den samlede	ə isolans ∑R: [m²ł	<td></td> <td>6.47</td> <td></td> <td></td> <td></td>		6.47			
Transmissio	nskoefficinet (U-væ	erdi) [W/m ² K]:		0.15	32.00		
Tillæg: [W/m	² K]: <i>xx</i>			0.00	θ _i : [°C]	20.0	
Transmissio	onskoefficinet (U-	værdi): [W/m	²K]:	0.15	θ _i -θ _u [°C]	32.0	
	Inhomo	ogen lag træ/i	solering				
Varmeledni	ngsevne for inhoi	mogene lag					
Træbredde			45	mm			
cc- afstand t	ræ		0.6	m			
Andel træ			0.075				
Andel isoleri	ng		0.925				
Varmelednin	igsevne for materia	aler λ [W/(mK)]					
Træ			0.12	(jf. DS418, Tabel F.2)			
Isolering			0.115	(WUFI mat. Bibliot.)			
Middelværd	li af varmeledning	jsevnen λ' =	0.115	W/(mK)			

Bilag D

U-Værdi konstruktion 6 (hampcrete 2)

0,026m	Gipsplader
0,045 m	Hamp 2
0,195 m	Hamp 2
0,009 m	Vindgips

U-værdi: [W/m²K]:	0.30
Udvendige overfladetemperatur: θ [°C]:	-10.7

Materiale nummer	Materiale	Tykkelse: d [m]	Lambda- værdi: λ	lsolans: R (d/λ) [m ² K/W]	Temperatur- ændring: Δθ	Temperatur: θ [°C]	Henvisning
					[°C]		
					θ _u : [⁰ C]	-12.0	
	Udv. Overgangsisol						Ventileret hulrum iht.
	ans			0.13	1.26		DS418
						-10.7	
1	Vindgips	0.009	0.250	0.04	0.35		
						-10.4	
2	Træ/Hamp2	0.195	0.083	2.35	22.84		λ korrigeret
						12.5	
3	Træ/Hamp2	0.045	0.083	0.54	5.27		λ korrigeret
		0.000		0.40	4.04	17.7	
4	Gipsplader	0.026	0.250	0.10	1.01	10.7	DS418 Tabel F2
						18.7	
Indv. Overga	ngsisolans:			0.13	1.26		
Den samlede	e isolans ∑R: [m	² K/W]		3.29			
Transmissior	nskoefficinet (U-v	/ærdi) [W/m²k	(]:	0.30	32.00		
Tillæg: [W/m	² K]: <i>xx</i>			0.00	θ _i : [°C]	20.0	
Transmissic	onskoefficinet (U-værdi): [W/	/m²K]:	0.30	θ _i -θ _u [°C]	32.0	
	Inhom	ogen lag træ	/isolering				
Varmelednir	ngsevne for inh	omogene lag	-				
Træbredde			45	mm			
cc- afstand tr	æ		0.6	m			
Andel træ			0.075				
Andel isolerir	ng		0.925				
Varmelednin	gsevne for mate	rialer λ [W/(ml	K)]				
Træ			0.12	(jf. DS418, Tabel F.2)			
Isolering			0.08	(WUFI mat. Bibliot.)			
Middelværd	i af varmelednii	ngsevnen λ' :	0.083	W/(mK)			

Bilag E

U-Værdi konstruktion 7 (hampcrete 2, tykkere isolering)

0,026m	Gipsplader
0,045 m	Hamp 2
0,460 m	Hamp 2
0,009 m	Vindgips

U-værdi: [W/m²K]:	0.15
Udvendige overfladetemperatur: θ [°C]:	-11.4

Materiale nummer	Materiale	Tykkelse: d [m]	Lambda- værdi: λ	lsolans: R (d/λ) [m ² K/W]	Temperatur- ændring: Δθ	Temperatur: θ [°C]	Henvisning
	matorialo		[W/mK]		[°C]		
					θ _u : [⁰ C]	-12.0	
	Udv. Overgangsisol ans						Ventileret hulrum iht. DS418
				0.13	0.64		
						-11.4	
1	Vindgips	0.009	0.250	0.04	0.18		
0	T	0.400	0.000	F F A	07.05	-11.2) ka minanat
2	Træ/Hamp2	0.460	0.083	5.54	27.35	16.2	A Korrigeret
3	Træ/Hamp2	0.045	0.083	0.54	2.68	10.2	λ korrigeret
-						18.8	g
4	Gipsplader	0.026	0.250	0.10	0.51		DS418 Tabel F2
						19.4	
						19.4	
Indv. Overga	ingsisolans:			0.13	0.64		
Den samlede	e isolans ∑R: [m	² K/W]		6.48			
Transmission	nskoefficinet (U-	værdi) [W/m²ł	<] :	0.15	32.00		
Tillæg: [W/m	² K]: <i>xx</i>		- 1	0.00	θ _i : [°C]	20.0	
Transmissio	onskoefficinet (U-værdi): [W	/m²K]:	0.15	θ _i -θ _u [°C]	32.0	
	Inhom	ogen lag træ	/isolering				
Varmeledni	ngsevne for inh	omogene lag	9				
l ræbredde			45	mm			
CC- aistand ti Andel træ	læ		0.075	m			
Andel isoleri	na		0.925				
			0.020				
Varmelednin	gsevne for mate	rialer λ [W/(m	K)]				
Træ			0.12	(jf. DS418, Tabel F.2)			
Isolering			0.08	(WUFI mat. Bibliot.)			
Middelværd	i af varmeledni	ngsevnen λ'	0.083	W/(mK)			

Bilag F

Nummer	Konstruktion	RHT Indeks	LIM
1	1.Reference konstruktion 1 (Sd=1)	14636	OK
2	2.Dampspærre fjernes fra konstr. 1	33247	SKIMMEL
3	3.Reference konstruktion 2 med cellulose (Sd=1)	13802	OK
4	4.Dampspærre fjernes fra konstr. 3	23362	SKIMMEL
5	5.Hampcrete 1 (Hamp1)	9344	OK
6	6.Hampcrete 2 (Hamp2)	12757	ОК
7	7.Hampcrete 2 med tykkere isolering	8977	ОК
8	8.Cellulose med sorptionskurve af Hamp2	22562	SKIMMEL
9	9. Cellulose med sorptionskurve og μ af Hamp2	18178	SKIMMEL
10	10.Cellulose med sorptionskurve, LTCS, LTCR af Hamp2	22237	SKIMMEL
11	11.Cellulose med sorpt., LTCS, LTCR og μ af Hamp2	14263	OK
12	12.Cellulose med LTCS, LTCR af Hamp2	23387	SKIMMEL
13	13.Cellulose med µ af Hamp2	16469	SKIMMEL
14	14.Cellulose med sorpt., A-værdi og μ af Hamp2	11867	ОК
15	15. Cellulose med sorpt., LTCS, LTCR af Hamp2 og μ = 3.8	14892	ОК
16	16.Træfiberisolering høj densitet	11660	ОК
17	17.Træfiberisolering lav densitet	17835	SKIMMEL
18	18.Konstr. 17 med sorpt., LTCS, LTCR og μ af træfiberiso. 16	12104	ОК
19	19. Træfiberiso. fra 17 med μ af træfiberiso. 16	13375	OK
20	20.Mineraluld med μ af Hamp2	16765	SKIMMEL
21	21.Mineraluld med μ og sorpt. af Hamp2	15471	OK
22	22. Mineraluld med $\mu,$ sorpt., LTCS, LTCR af Hamp2	15471	ОК
23	23.Kork 1	10929	OK
24	24.Kork 2	7669	ОК
26	26.Sorptionskurve 2	23009	SKIMMEL
27	27.Sorptionskurve 3	23391	SKIMMEL
28	28.Sorptionskurve 4	23369	SKIMMEL
29	29.Sorptionskurve 5	22699	SKIMMEL
30	30.Sorptionskurve 6	22415	SKIMMEL
31	31.Sorptionskurve 7	23355	SKIMMEL
32	32.Sorptionskurve 8	23134	SKIMMEL
33	33.Sorptionskurve 9	17518	OK
34	34.Sorptionskurve 10	21499	SKIMMEL
35	35.Sorptionskurve 11	20103	SKIMMEL
36	36.Sorptionskurve 12	19807	SKIMMEL
37	37.Sorptionskurve 13	19142	OK
38	38.Ref.kon. med cellulose (konstr. 3), Fugtbel. 4	16166	SKIMMEL

39	39.Ref.kon. med cellulose (konstr. 3), Fugtbel. 5	19311	SKIMMEL
40	40.Konstr. 37, Fugtbel. 4	27129	SKIMMEL
41	41.Konstr. 37, Fugtbel. 5	39332	SKIMMEL
42	42.Træfiberiso. lav densitet, vindspærre m. høj isolans	20232	SKIMMEL
43	43.Ref.kon. med cellulose (Sd=1), vindspærre m. høj isolans	13111	OK
44	44.Konstr. 4, vindspærre m. høj isolans	26867	SKIMMEL

Bilag G




















































































