

FUGTTEKNISKE EGENSKABER AF BIOBASEREDE YDERVÆGSKONSTRUKTIONER

VURDERET UD FRA STATISKE FORSØG



MASTER I BYGNINGSFYSIK
AALBORG UNIVERSITET, KØBENHAVN

Masterspeciale af Mathias Brønøe Vestergaard, den 4. juni 2025





AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

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

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i Bygningsfysik

Semester:

04

Titel på projekt:

Fugttekniske egenskaber af biobaserede ydervægskonstruktioner – Vurderet ud fra statiske forsøg

Projektperiode:

Februar – juni 2025

Vejleder:

Torben V. Rasmussen

Nickolaj F. Jensen

Studerende:

Mathias Brønøe Vestergaard

Antal normalsider:

55 sider af 2400 anslag

Afleveringsdato:

4. juni 2025

Resumé:

Rapporten udvikler en metode til vurdering af fugtteknisk robusthed i lette ydervægge med biobaseret isolering og tæthedsplan med vanddampdiffusionsmodstand svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer. Metoden bygger på dynamiske simuleringer i WUFI Pro og WUFI Bio med vurdering af skimmelindeks under tre klimascenarier: nutidigt klima, fremtidigt varmt og fugtigt klima samt et hypotetisk AMOC-scenarie med koldt klima. Der gennemføres systematiske variationer af vanddampdiffusionsmodstand (Z-værdi) i tæthedsplan og vindspærre i konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering.

Resultaterne dokumenterer markante forskelle i fugtteknisk ydeevne mellem isoleringstyper. Konstruktioner med træfiberisolering kræver generelt lavere Z-værdi i tæthedsplanet end mineraluldsisolering for at opretholde skimmelindeks under 3. Der opstilles en materialespecifik vurderingskurve for acceptable Z-værdikombinationer, som anvendes til sammenligning med måledata fra hotbox/coldbox-forsøg under et statisk fugtregime.

Sammenligningen viser, at konstruktioner, som i simuleringerne netop opfylder kriteriet for fugtteknisk robusthed, udviser højere fugtniveau end den målte referencekonstruktion. Dette muliggør anvendelse af den simulerede vurderingskurve som konservativt kriterium i laboratorietests. 1/10-reglen for Z-værdiforhold mellem tæthedsplan og vindspærre viser sig utilstrækkelig som generelt dimensioneringsgrundlag.

Metoden muliggør direkte og kvantificerbar vurdering af fugtteknisk robusthed ved kombination af dynamiske simuleringer og statiske testforløb. Den kan anvendes som grundlag for projektering af ydervægge med træfiberisolering i fugtbelastningsklasse 3, forudsat at klimabelastning og materialedata svarer til det analyserede grundlag.

Resumé

Rapporten udvikler en metode til vurdering af fugtteknisk robusthed i lette ydervægge med biobaseret isolering og tæthedspan med vanddampdiffusionsmodstand svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer. Metoden bygger på dynamiske simuleringer i WUFI Pro og WUFI Bio med vurdering af skimmelindeks under tre klimascenarier: nutidigt klima, fremtidigt varmt og fugtigt klima samt et hypotetisk AMOC-scenarie med koldt klima. Der gennemføres systematiske variationer af vanddampdiffusionsmodstand (Z-værdi) i tæthedspan og vindspærre i konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering.

Resultaterne dokumenterer markante forskelle i fugtteknisk ydeevne mellem isoleringstyper. Konstruktioner med træfiberisolering kræver generelt lavere Z-værdi i tæthedspanet end mineraluldsisolering for at opretholde skimmelindeks under 3. Der opstilles en materialespecifik vurderingskurve for acceptable Z-værdikombinationer, som anvendes til sammenligning med måledata fra hotbox/coldbox-forsøg under et statisk fugtregime.

Sammenligningen viser, at konstruktioner, som i simuleringerne netop opfylder kriteriet for fugtteknisk robusthed, udviser højere fugtniveau end den målte referencekonstruktion. Dette muliggør anvendelse af den simulerede vurderingskurve som konservativt kriterium i laboratorietests. 1/10-reglen for Z-værdiforhold mellem tæthedspan og vindspærre viser sig utilstrækkelig som generelt dimensioneringsgrundlag.

Metoden muliggør direkte og kvantificerbar vurdering af fugtteknisk robusthed ved kombination af dynamiske simuleringer og statiske testforløb. Den kan anvendes som grundlag for projektering af ydervægge med træfiberisolering i fugtbelastningsklasse 3, forudsat at klimabelastning og materialedata svarer til det analyserede grundlag.

Abstract

This report develops a method for assessing the hygrothermal robustness of lightweight timber-framed walls with biobased insulation and an airtightness layer with water vapour diffusion resistance corresponding to the level of biobased building materials. The method is based on dynamic simulations using WUFI Pro and WUFI Bio, with mould growth index as the evaluation criterion under three climate scenarios: present-day conditions, a future warm and humid climate, and a hypothetical cold AMOC-collapse scenario. Systematic variations of water vapour diffusion resistance (Z-values) in the airtightness layer and wind barrier are simulated in constructions with wood fibre and mineral wool insulation.

The results document significant differences in hygrothermal performance between insulation types. Constructions with wood fibre insulation generally require lower Z-values in the airtightness layer than those with mineral wool to maintain a mould index below 3. A material-specific assessment curve for acceptable Z-value combinations is established and compared against measured data from hotbox/coldbox testing under a static moisture regime.

The comparison shows that constructions which barely meet the robustness criterion in the simulations exhibit higher moisture levels than the measured reference wall. This allows the simulated curve to be used as a conservative threshold in laboratory tests. The traditional 1/10 rule for Z-value ratios between wind barrier and airtightness layer proves insufficient as a general design principle.

The method enables direct and quantifiable assessment of hygrothermal robustness by combining dynamic simulations with static test scenarios. It can serve as a basis for designing exterior walls with wood fibre insulation in moisture load class 3, provided that climate exposure and material data correspond to the analysed conditions.

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	7
2	Baggrund	9
2.1	Opgaveformulering.....	9
2.2	Afgrænsning.....	10
3	Teori og faglig kontekst.....	11
3.1	Fugt i byggematerialer og konstruktioner	11
3.1.1	Mekanismer for fugttransport.....	11
3.1.2	Kritiske fugtniveauer	12
3.1.3	Vanddampdiffusionsmodstand og omregningsværdier	13
3.2	Fugtbelastningsklasser.....	14
3.3	Ydervæggens funktion og opbygning	15
3.3.1	To-trinstætning og ventilationsfunktion.....	16
3.3.2	Vindspærren.....	17
3.3.3	Varmeisolering.....	18
3.3.4	Tæthedsplanet.....	19
3.3.5	Krav til Z-værdier mellem vindspærren og tæthedsplanet	20
3.4	Biobaserede byggematerialers fugttekniske egenskaber.....	21
3.4.1	Træfiberisolering	23
3.4.2	Mineraluldsisolering.....	23
3.4.3	Sammenligning af træfiberisolering og mineraluldsisolering.....	23
3.5	Vurdering af fugtteknisk robusthed	24
3.5.1	Klimascenarier og fremtidig belastning.....	24
3.6	Skimmelmodeller.....	28
3.6.1	LIM-kurver (Isopleth-system).....	28
3.6.2	VTT-skimmelmodel	31
3.6.3	Biohygrotermisk model (WUFI Bio)	34
4	Metoder og materialer.....	36
4.1	Opbygning og afgrænsning af WUFI-model.....	36
4.1.1	Ventileret hulrum bag regnskærm	36
4.1.2	U-værdier for simulerede konstruktioner.....	36
4.1.3	Omregning til Z-værdi	37
4.1.4	Orientering, hældning og højde af ydervægsflade.....	37
4.1.5	Overfladekoefficienter	38
4.1.6	Indledende fugttilstand	39

4.1.7	Klimadata og simuleringsperioder.....	40
4.1.8	Numeriske indstillinger	42
4.2	Materialeopbygning af ydervæggen	42
4.2.1	Vægopbygning og lagstruktur	43
4.2.2	U-værdi og beregningsgrundlag.....	43
4.2.3	Materialedata og Z-værdi.....	46
4.3	Indledende parameterstudie med LIM-metoden.....	47
4.4	Hovedparameterstudie med WUFI Bio	48
4.4.1	Observation af stabilisering og skift i vurderingsmetode i WUFI Bio	50
4.5	Sammenligning med statisk fugtregime	52
4.5.1	Forsøgsopbygning og konstruktion	52
4.5.2	Randbetingelser og måledata.....	54
4.5.3	Databehandling og klimaprofil til simulering	55
4.5.4	Fluktuationer i måledata.....	55
4.5.5	Udvælgelse af konstruktioner til sammenligning.....	55
4.6	Sammenligning af fugtforløb ved statisk belastning.....	55
4.7	Samlet overblik over simuleringsomfang	56
5	Analyse og resultater.....	57
5.1	Vurderingskriterier og modellerede kombinationer	57
5.2	Dynamiske simuleringer – træfiberisolering	57
5.2.1	Resultater U-værdi 0,10 W/m ² K.....	58
5.2.2	Resultater U-værdi 0,15 W/m ² K.....	61
5.2.3	Delkonklusion: Træfiberisoleirng.....	63
5.3	Dynamiske simuleringer – mineraluldsisolering	65
5.3.1	Resultater U-værdi 0,10 W/m ² K.....	65
5.3.2	Resultater U-værdi 0,15 W/m ² K.....	67
5.3.3	Delkonklusion: Mineraluld	70
5.4	Afrunding på hovedparameterstudiet.....	71
5.5	Supplerende analyser	73
5.5.1	Tendenser ved forskellig isoleringstykkelse	73
5.5.2	Delkonklusion: Supplerende analyser.....	74
5.6	Sammenligning med statiske fugtregime	75
5.6.1	Måledata og klargøring af klimaprofil.....	75
5.6.2	Simuleret forløb og grafisk sammenligning	77
5.6.3	Delkonklusion: Robusthed ved statisk fugtregime.....	80
5.7	Samlet vurdering på tværs af materialer	80

6	Diskussion.....	83
6.1	Hovedresultater og betydning for vurderingspraksis	83
6.2	Robusthed og overførbare af modelresultater	85
6.3	Vurdering af WUFI Bio som værktøj	86
6.4	Kritisk vurdering af 1/10-reglen.....	88
6.5	Usikkerheder og databegrænsninger	89
6.6	Energikrav, lufttæthed, brand og akustik	91
7	Konklusion	93
8	Perspektivering	95
9	Litteratur	100
10	Bilag	107

1 Indledning

Lette ydervægge med biobaseret isolering anvendes i stigende grad i nybyggeri, men deres fugttekniske robusthed er ofte utilstrækkeligt dokumenteret. Dette udgør en barriere for godkendelse, særligt under skærpede klimakrav. Byggebranchen står for ca. 40 % af Danmarks samlede CO₂-udledning (Gottlieb, et al., 2024). For at reducere byggesektorens klimaaftryk har Danmark som det første land i verden indført CO₂-grænseværdier for nybyggeri. Fra 2023 er loftet fastsat til 12 kg CO₂-eq/m²/år, og i juni 2025 skærpes kravet til 7,1 kg CO₂-eq/m²/år for standardbyggeri (Social-, 2024). Grænseværdien forventes reduceret yderligere frem mod 2029 med ca. 10 % hvert andet år. Denne udvikling øger behovet for lavemissionsløsninger, herunder anvendelse af biobaserede byggematerialer med lav produktionsudledning og lavt ressourceforbrug.

Selvom biobaserede materialer lagrer betydelige mængder kulstof, medregnes dette ikke i det lovpligtige klimaregnskab for nybyggeri. Potentialet for kulstoflagring i biogene byggematerialer er veldokumenteret og kan i visse tilfælde overstige de samlede udledninger fra dansk betonforbrug (Rasmussen, et al., 2022).

Anvendelsen af biobaserede byggematerialer som halm, hamp, græs og træfiber begrænses dog af dokumentationskrav og fugttekniske udfordringer (Gottlieb, et al., 2024). Materialernes høje fugtabsorption og indhold af letnedbrydelige organiske forbindelser øger risikoen for skimmelvækst og nedbrydning ved længerevarende fugtpåvirkning. Fugtsikker anvendelse af biobaserede materialer i ydervægge forudsætter veldokumenteret viden om konstruktionernes hygrotermiske egenskaber og deres fugttekniske ydeevne under varierende klimabelastninger.

Fremskrivninger fra DMI's Klimaatlas viser, at Danmark frem mod år 2100 vil opleve højere temperaturer, øget nedbør, flere hedeølgedage samt hyppigere stormfloder og ekstremhændelser (NCKF, 2024). Det fugttekniske design af ydervægge skal derfor tage højde for både nutidige og fremtidige fugtbelastninger under varmere, fugtigere og koldere klimascenarier.

Fugtteknisk robusthed vurderes i lette ydervægge med biobaseret isolering og tæthedsplan med vanddampdiffusionsmodstand svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer.

Undersøgelsen anvender forsøgsdata fra VIGOT-projektet (Vidensbaseret Grøn Omstilling af Tømmeruddannelsen), som har til formål at udvikle og dokumentere biobaserede vægkonstruktioner med lavt klimaaftryk og høj praktisk anvendelighed.

Som en del af projektet er der gennemført hotbox/coldbox-forsøg med statisk fugtregime. I denne analyse sammenholdes resultater fra dynamiske simuleringer i WUFI og skimmelvurdering i WUFI Bio med måledata fra forsøget. Målet er at identificere kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet, som muliggør fugtteknisk robusthed i konstruktioner med biobaseret isolering under varierende klimabelastninger. Der opstilles grænsekurver for fugtforløb, som kan anvendes som vurderingsgrundlag i laboratorietests og ved projektering af ydervægge med biobaseret isolering.

2 Baggrund

Biobaserede byggematerialers fugttekniske egenskaber er ikke fuldt dokumenterede. Dette begrænser deres anvendelse i ydervægge, hvor manglende dokumentation for fugtteknisk robusthed kan forhindre godkendelse og praktisk implementering. Konstruktionernes ydeevne vurderes i nærværende analyse under fugtbelastningsklasse 3, som omfatter bygninger med ukendt beboersammensætning, herunder énfamiliehuse, kædehuse og rækkehuse i udlejningsbyggeri.

2.1 Opgaveformulering

Rapporten vurderer fugtteknisk robusthed i lette ydervægskonstruktioner med biobaseret isolering. Variationer i vanddampdiffusionsmodstand i vindspærren og tæthedsplanet samt valg af isoleringstype påvirker fugttransport, opfugtning, udtørring og skimmelrisiko. Vurderingen baseres på dynamiske simuleringer i WUFI Pro og skimmelvurdering i WUFI Bio under tre klimascenarier: nutidigt klima, et fremskrevet varmt og fugtigt klima samt et koldt scenarie baseret på hypotetisk svækkelse af den atlantiske meridionale omvendingscirkulation (AMOC).

Undersøgelsen anvender måledata fra VIGOT-projektets hotbox/coldbox-forsøg, hvor ydervægselementer eksponeres for statisk fugtbelastning i kontrolleret testmiljø. Målingerne omfatter temperatur og relativ luftfugtighed i konstruktionens vurderingspunkt. Data anvendes til sammenligning med simulerede fugtforløb for at vurdere konstruktionernes fugttekniske robusthed under et statisk fugtregime.

Formålet er at identificere kombinationer af materialer og Z-værdier, der sikrer lav skimmelrisiko under varierende klimabelastninger. Der opstilles vurderingskriterier baseret på skimmelindeks i WUFI Bio, og metoden sammenholdes med eksisterende vurderingspraksis.

2.2 Afgrænsning

Analysen omfatter lette ydervægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering. Fokus er på skimmelrisiko som funktion af klimabelastning og vanddampdiffusionsmodstand i vindspærren og tæthedsplanet.

Energibalance, lydtransmission, brandforhold, bygbarhed, statik, LCA og økonomi indgår ikke. Lufttæthed vurderes ikke ud fra simuleringer af volumenstrømme eller konvektiv fugttransport.

Materialemodeller er ikke kalibreret. Hygrotermiske egenskaber stammer fra WUFI's database og anvendes uden justering. Resultaterne gælder alene for de analyserede produkter og det anvendte statiske fugtregime og kan ikke overføres til konstruktioner med markant afvigende fugttransportegenskaber.

Andre biobaserede isoleringstyper som hamp, hør og græs er ikke simuleret. Analysen fokuserer på konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering i fugtbelastningsklasse 3.

3 Teori og faglig kontekst

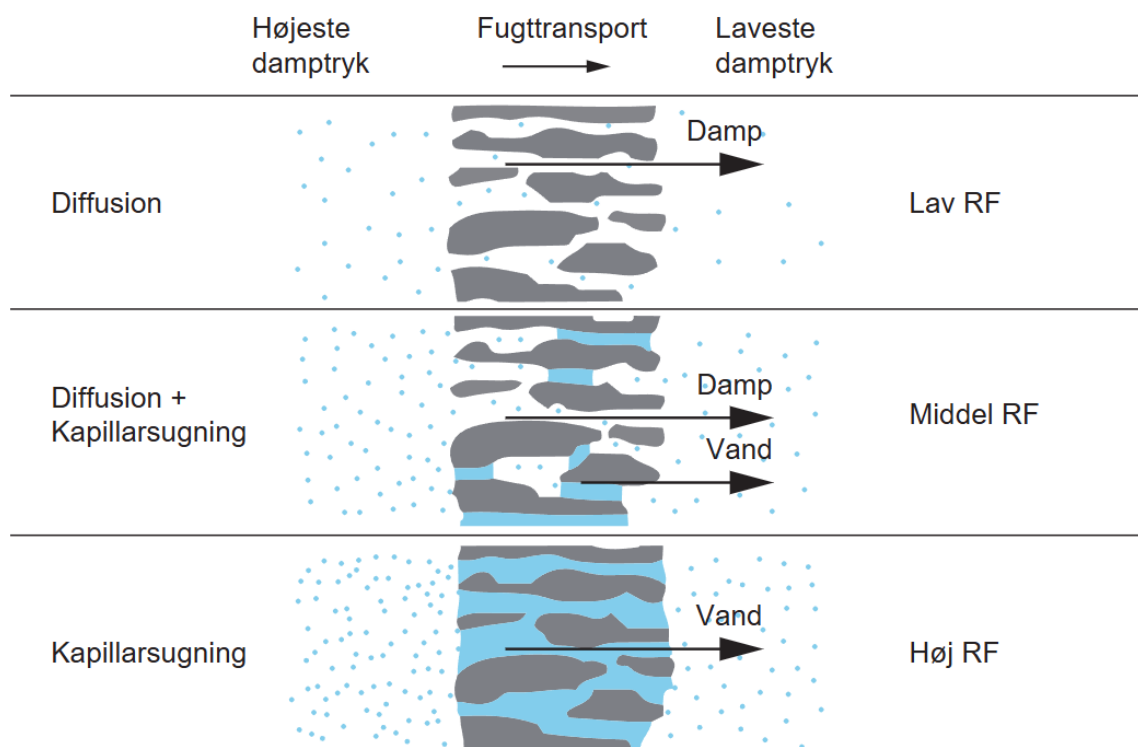
Dette kapitel præsenterer den teoretiske baggrund og centrale resultater fra tidligere analyser, som er relevante for vurdering af fugtteknisk robusthed i lette ydervægge med vanddampdiffusionsmodstand i tæthedsplanet svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer. Formålet er at etablere en faglig ramme for den efterfølgende analyse og simulering af konstruktioner baseret på biobaserede byggematerialer.

3.1 Fugt i byggematerialer og konstruktioner

Fugt optræder i byggematerialer i både gas-, væske- og fast form og påvirker både ydeevne og holdbarhed. Den optages og afgives afhængigt af temperatur og relativ luftfugtighed og indgår i en dynamisk fugtbalance. Biobaserede byggematerialer har stor evne til at optage vanddamp fra luften og høj fugtkapacitet, hvilket kan medføre større udsving i fugtindhold sammenlignet med visse konventionelle materialer (Jensen, et al., 2025b).

3.1.1 Mekanismer for fugttransport

Fugt transporteres i konstruktioner i damp- eller væskeform, drevet af potentialeforskelle. Ved normale fugtniveauer foregår transporten primært som vanddampsdiffusion forårsaget af forskelle i damptryk mellem porerne i materialet. Ved en relativ luftfugtighed over 98 % kan kapillartransport dominere i porøse materialer, hvor porevolumenet er mættet med væske, som illustreret i Figur 1. Konvektion kan desuden bidrage til transporten som følge af vindpåvirkning eller termisk opdrift (Brandt, et al., 2023a).



Figur 1 - Fugttransport i materialer afhængig af vanddamptryksforskelle og relativ luftfugtighed. Kilde: (Brandt, et al., 2023a). Figuren er gengivet med tilladelse fra Anvisninger.dk.

3.1.2 Kritiske fugtniveauer

Skimmelvækst forudsætter fire grundlæggende betingelser: tilgængeligt vand, gunstige temperaturer, ilt og næringsstoffer. I bygningskonstruktioner er tre af disse forhold normalt altid til stede, da ilt findes i poreluften, temperaturerne i opvarmede bygninger typisk ligger inden for det optimale interval for skimmelvækst (15–30 °C), og mange byggematerialer udgør et egnet næringsgrundlag. Fugt udgør derfor den primære begrænsende faktor ved vurdering af skimmelrisiko.

Det kritiske fugtniveau for træ og træbaserede materialer ligger omkring 18 vægtprocent, svarende til ligevægt med en relativ luftfugtighed på 75–80 % ved 20–25 °C. Disse tærskler anvendes som praktiske referenceværdier ved vurdering af fugtteknisk robusthed i konstruktioner (Brandt, et al., 2023a) (Johansen, et al., 2023).

3.1.3 Vanddampdiffusionsmodstand og omregningsværdier

Materialers modstand mod vanddampsdiffusion kan beskrives ved flere parametre. I Danmark anvendes primært Z-værdien [$\text{GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$], mens S_d -værdien [m] og den dimensionsløse vanddampdiffusionsmodstandsfaktor μ er mere udbredt internationalt og i hygrotermiske simuleringssprogrammer som WUFI.

μ -værdien angiver, hvor mange gange langsommere vanddamp diffunderer gennem et materiale sammenlignet med stille luft. Ud fra μ og materialetykkelsen d [m] kan S_d -værdien beregnes som:

$$S_d = \mu \cdot d$$

S_d -værdien udtrykker den ækvivalente tykkelse af et stillestående luftlag med samme vanddampdiffusionsmodstand som det betragtede materiale.

Z-værdien angiver vanddampdiffusionsmodstanden og udtrykkes i SI-enheden $\text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$.

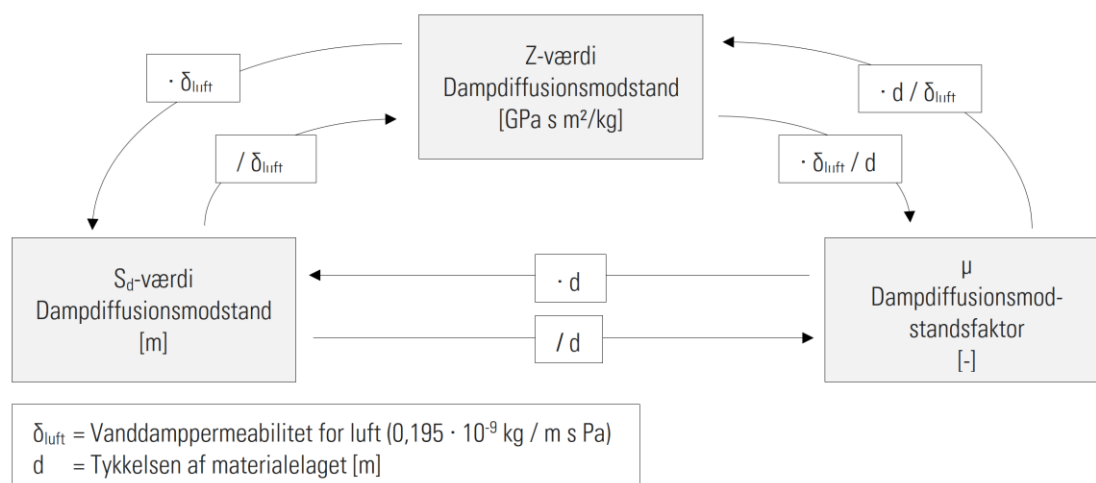
Sammenhængen mellem Z og S_d bestemmes af luftens vanddamppermeabilitet, som i standardberegninger sættes til:

$$\delta_{\text{luft}} = 0,195 \cdot 10^{-9} \text{ kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{Pa})$$

Z-værdien beregnes herefter som:

$$Z = \frac{S_d}{\delta_{\text{luft}}} = \frac{\mu \cdot d}{\delta_{\text{luft}}}$$

Kendes én af værdierne (μ , S_d eller Z), kan de øvrige beregnes ud fra materialetykkelsen og luftens vanddamppermeabilitet jf. Figur 2.



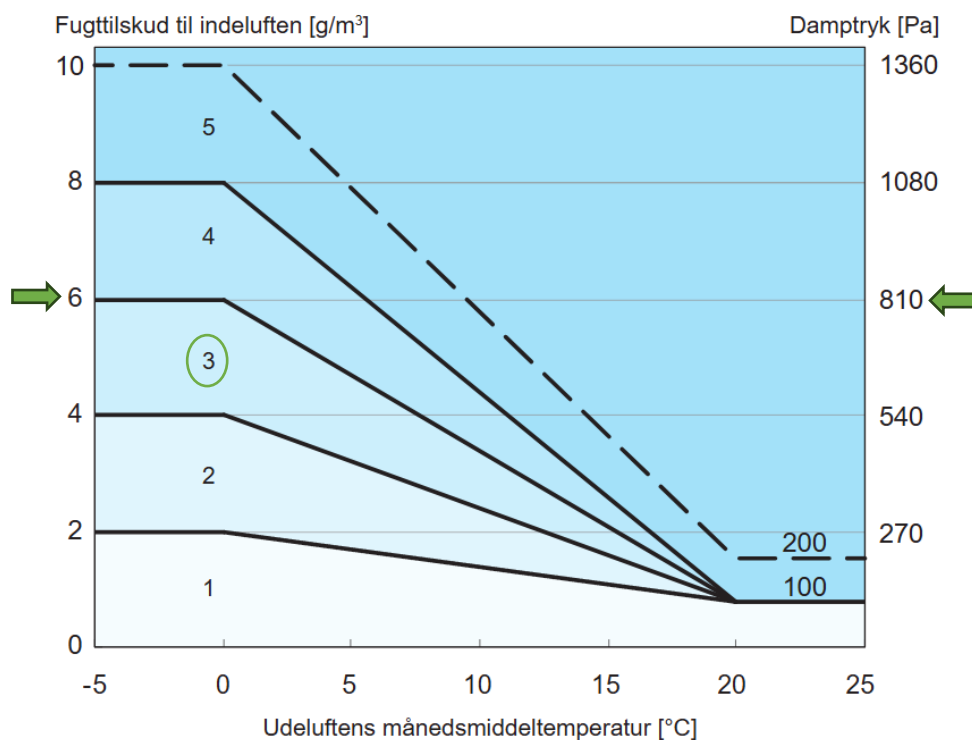
Figur 2 - Sammenhæng mellem Z-værdi, S_d-værdi og μ. Kilde: (Therkelsen, 2020). Figuren er gengivet med tilladelse fra Marcus Therkelsen.

Vanddampdiffusionsmodstand benævnes herefter som Z-værdi.

3.2 Fugtbelastningsklasser

Fugtbelastningsklasser beskriver den indvendige fugtpåvirkning, som bygningskonstruktioner udsættes for, afhængigt af bygningstype og aktivitetsniveau (Dansk Standard, 2013). De anvendes som grundlag for fugttekniske vurderinger, når der ikke foreligger målinger af det aktuelle indendørs fugtniveau.

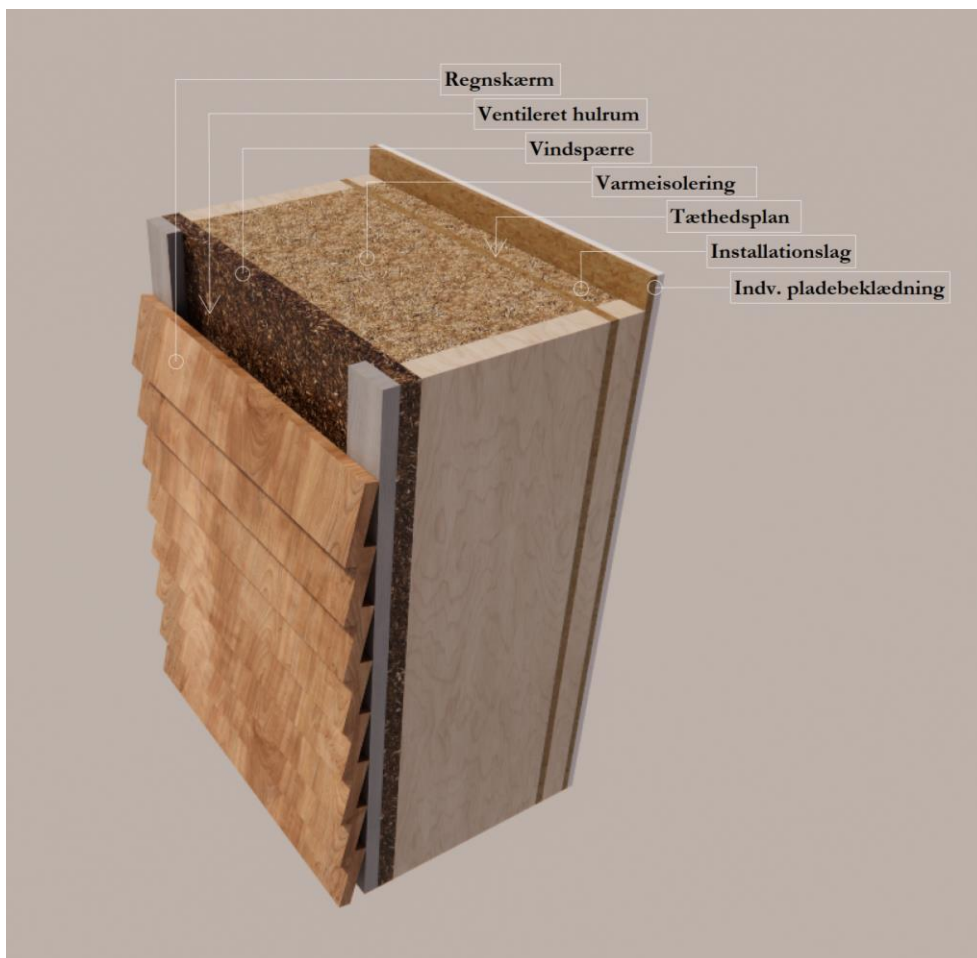
I nærværende analyse anvendes fugtbelastningsklasse 3, som dækker almindelige boliger med ukendt beboersammensætning. Klassen er karakteriseret ved et fugttilskud til indeluften på 6 g/m^3 i fyringssæsonen, hvilket svarer til et indendørs damptryk op til 810 Pa over udeluftens damptryk (Brandt, et al., 2023a). Figur 3 viser fugttilskud og resulterende damptryk for fugtbelastningsklasserne 1 til 5 som funktion af udeluftens månedsmiddeltemperatur. Kurverne er gengivet fra SBI-anvisning 277, hvor de er udarbejdet på grundlag af beregningsmetoden i DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013). Belastningen er højest i vintermånederne og aftager gradvist ved stigende udetemperatur. Fugtbelastningsklasse 3 er markeret i figuren.



Figur 3 - Fugtilskud og damptryk for fugtbelastningsklasser. Kurverne viser grænseværdier for fugtilskud og damptryk som funktion af udetemperatur. Kilde: (Brandt, et al., 2023a). Figuren er gengivet med tilladelse fra Anvisninger.dk.

3.3 Ydervæggens funktion og opbygning

Ydervægge udgør en central del af bygningens klimaskærm og skal beskytte mod varmetab, vindpåvirkning og fugtpåvirkning under varierende klimatiske forhold. De bidrager til at opretholde et stabilt indeklima med hensyn til temperatur og relativ luftfugtighed. I lette ydervægskonstruktioner realiseres disse funktioner gennem en lagdelt opbygning, hvor hvert enkelt lag varetager en specifik funktion med henblik på bl.a. at sikre konstruktionens samlede hygrotermiske ydeevne jf. Figur 4.

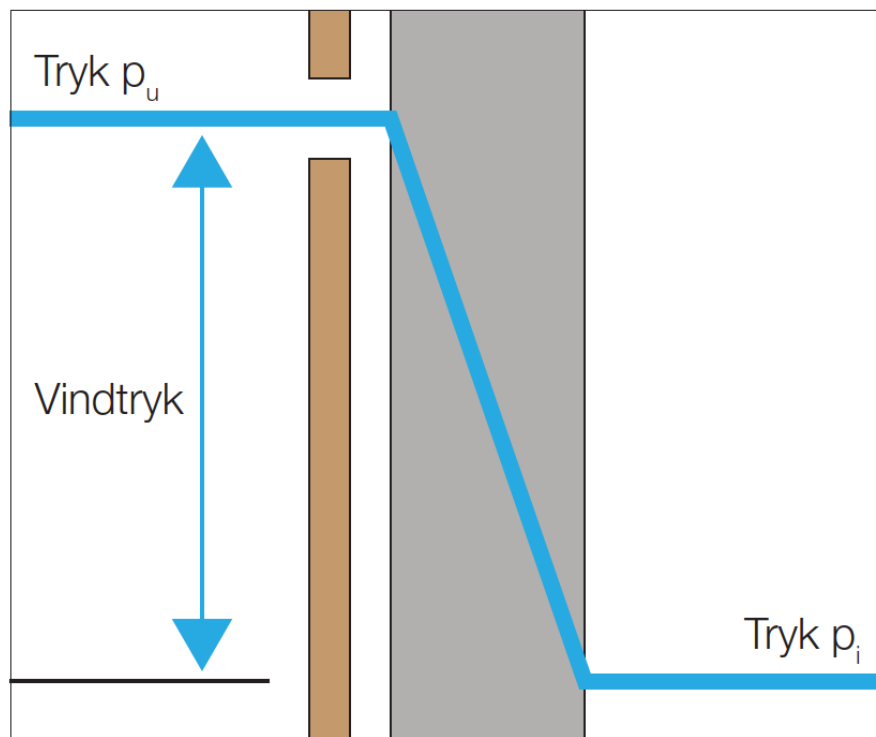


Figur 4 - Isometri af en let ydervægskonstruktion med to-trinstætning og ventileret hulrum.

3.3.1 To-trinstætning og ventilationsfunktion

Regnskærmen udgør konstruktionens første forsvar mod slagregn og har til opgave at minimere indtrængning af vand til de bagvedliggende lag. Dens effektivitet afhænger af facadeorientering, bygningens højde og eksponering for vind og regn. Som led i to-trinstætningsprincippet indgår en ventilationsspalte bag regnskærmen. Trykforskelle mellem udvendigt vindtryk og indvendigt lufttryk kan medføre, at regnvand suges ind gennem utætheder i regnskærmen, hvis denne ikke er tilstrækkeligt tæt. Når trykket udlignes i hulrummet, reduceres denne drivkraft markant, hvilket mindsker slagregns påvirkningen (Zachariassen, et al., 1993) (Christensen, 2005) (Thompson, et al., 2015) (Møller, et al., 2016) (Bunch-Nielsen, et al., 2017) (Johansen, et al., 2025). Dette er illustreret i Figur 5, hvor det udvendige tryk p_u og det indvendige tryk p_i , hvilket minimerer den drivkraft, der ellers ville trække vand ind i konstruktionen (Brandt, et al., 2022).

Regnvand, der trænger ind, skal kunne afledes effektivt fra bagsiden af regnskærmen, og konstruktionen må ikke medføre fugtophobning. I vægge med vanddampdiffusionsåbne materialer og tæthedsplan med lav Z-værdi kan vanddamp fra indeklimaet diffundere gennem konstruktionen. Det ventilerede hulrum bag regnskærmen bidrager her til udtørring, da det er i kontakt med udeluften og muliggør fjernelse af fugt, som når konstruktionens yderside (Johansen, et al., 2025).



Figur 5 - Trykprofil gennem klimaskærmen ved to-trinstætning. Det udvendige tryk p_u udlignes hurtigt i det ventilerede hulrum, så trykforskellen over regnskærmen reduceres og regnvandsbelastningen på de bagvedliggende lag mindskes. Kilde: (Brandt, et al., 2022). Figuren er gengivet med tilladelse fra Fonden BYG-ERFA.

3.3.2 Vindspærren

Vindspærrens primære funktion er at forhindre luftbevægelse i isoleringslaget som følge af ventilation med kold udeluft. Dette reducerer varmetab ved konvektion og sikrer, at isoleringsmaterialets termiske ydeevne bevares. Vindspærren fungerer som sekundær barriere mod slagregn og kan beskytte konstruktionen i byggefasen, før regnskærmen er monteret (Bunch-Nielsen, et al., 2017).

For at kunne opfylde disse funktioner skal vindspærren være både vindtæt og diffusionsåben. Vindtætheden begrænser luftstrømme og mindsker risikoen for kondensdannelse, mens den nødvendige vanddampdiffusionsåbenhed sikrer, at fugt indefra kan transporteres ud gennem konstruktionen. Z-værdien skal være lav nok til at undgå fugtophobning i væggens ydre lag (Brandt, et al., 2023b) (Johansen, et al., 2025).

Hvis Z-værdien er for høj i forhold til konstruktionens samlede fugttransportevne, kan vindspærren fungere som en barriere for udgående vanddamp. Dette øger risikoen for fugtophobning i de bagvedliggende materialer (Brandt, et al., 2023b).

Vindspærren skal kunne modstå mekanisk påvirkning og UV-stråling i byggefasen. Ved høj vindeksponering er det afgørende, at slagregn ikke trænger forbi regnskærmen og ind til det vindtætte lag. Valget af vindspærremateriale bør derfor afstemmes med krav til både fugtteknisk funktion, holdbarhed og robusthed (Christensen, 2005) (Thompson, et al., 2015) (Bunch-Nielsen, et al., 2017).

3.3.3 Varmeisolering

Varmeisoleringen reducerer varmetabet gennem konstruktionen og bidrager til at sikre en tilstrækkelig indvendig overfladetemperatur. Et isoleringsmateriales varmeledningsevne (λ -værdi) udtrykker den effektive varmeledning under tørre, statiske forhold og deklareres ved 10 °C i henhold til DS/EN ISO 10456 (Dansk Standard, 2008). I biobaserede isoleringsmaterialer afhænger varmeledningsevnen i høj grad af densitet, fugtindhold og temperatur. Den øges med højere densitet og temperatur, mens lav densitet og tør tilstand giver lavere λ -værdi. Dette er dokumenteret i laboratorieforsøg, hvor træfiberisolering med en densitet på 40 kg/m³ viste en stigning på op til 20 % i λ -værdi ved temperaturændring fra -10 °C til 30 °C (Veitmans, et al., 2016).

Ved lav U-værdi forskydes temperaturniveauet længere ud i konstruktionen, hvilket sænker temperaturen nær vindspærren. Ved uændret damptryk medfører det en lokal stigning i relativ luftfugtighed og øger risikoen for opfugtning og skimmelvækst. Hygrotermiske simuleringer viser, at konstruktioner med $U = 0,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ generelt er mere fugtteknisk følsomme end

konstruktioner med $U = 0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, især når tæthedspanet har lav Z -værdi og isoleringen består af biobaserede lavdensitetsmaterialer som hamp, hør eller græs (Hansen, et al., 2024). Den høje fugtbufferkapacitet i disse materialer kan føre til øget fugtophobning i kolde zoner. Enkelte studier har vist, at en øget isoleringstykkelse kan forstærke denne effekt, særligt i kombination med lav densitet og Z -værdier svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer (Jensen, et al., 2025b). Ifølge (Morelli, et al., 2017) har isoleringstykkelsen dog kun begrænset betydning for fugtforholdene, når tykkelsen overstiger ca. 250 mm. Forskellen i fugtindhold mellem 250 mm og 400 mm isolering vurderes som marginal, og risikoen for skimmelvækst øges kun i begrænset omfang. Studiet peger i stedet på, at Z -værdien i vindspærren og tæthedspanet samt fugttilskuddet fra indeklimaet har større betydning for fugtbalancen i lette ydervægskonstruktioner.

3.3.4 Tæthedspanet

Tæthedspanet fungerer som konstruktionens indvendige barriere mod luft- og vanddampassage og har central betydning for både energimæssig ydeevne og fugtteknisk robusthed. Dets primære funktion er at sikre lufttæthed og begrænse fugttilførsel til væggen i kolde zoner gennem modstand mod både vandampdiffusion og konvektion fra indeklimaets fugtproduktion.

Hvis vanddamp diffunderer uhindret gennem væggen og møder kolde materialelag, kan den relative luftfugtighed lokalt stige til niveauer, hvor kritisk opfugtning og skimmelvækst kan forekomme. Risikoen reduceres væsentligt, hvis tæthedspanet har en tilstrækkelig høj Z -værdi. I dansk byggeteknisk praksis betragtes materialer med en Z -værdi over $50 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ som dampspærre (Schjønning, et al., 2015) (Brandt, et al., 2023b) (Johansen, et al., 2025).

PE-baserede dampspærre har typisk Z -værdier i intervallet $300\text{--}600 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ved en tykkelse på $0,15\text{--}0,20 \text{ mm}$ (Gottfredsen, et al., 1997) (Rasmussen, et al., 2020). Disse værdier er ofte baseret på målinger eller ældningstests med en forudsat anvendelsestemperatur på 10°C . Da temperaturen nær tæthedspanet i lette konstruktioner typisk ligger omkring 20°C , kan den faktiske Z -værdi være lavere end den deklarerede, afhængigt af materialets temperaturfølsomhed (Rasmussen, et al., 2020).

Konvektiv fugttransport kan få væsentlig betydning ved utætheder i tæthedsplanet, især i opvarmede bygninger med høj fugtbelastning. Selv mindre utætheder kan medføre luftbåren fugttilførsel til kolde zoner og øge risikoen for skimmelvækst. For at undgå dette skal tæthedsplanet udføres kontinuerligt lufttæt over hele fladen og beskyttes mod mekanisk beskadigelse. Lufttætheden afhænger i høj grad af korrekt udførelse, herunder samlinger, gennembrydninger og tilslutninger (Rasmussen, et al., 2013) (Schjønning, et al., 2015) (Brandt, et al., 2023b) (Schjønning, et al., 2024) (Johansen, et al., 2025).

3.3.5 Krav til Z-værdier mellem vindspærren og tæthedsplanet

For at styre vanddamptransporten gennem konstruktionen og sikre, at indvendig fugtproduktion ikke ophobes i ydervæggens opbygning, etableres en diffusionsgradient mellem vindspærren og tæthedsplanet, som muliggør kontrolleret udtørring mod det ventilerede hulrum. I dansk byggeteknisk praksis anbefales det, at vindspærrens Z-værdi maksimalt må være 1/10 af tæthedsplanets Z-værdi (Schjønning, et al., 2015) (Brandt, et al., 2023b) (Johansen, et al., 2025). Enkelte kilder angiver, at forholdet kan reduceres til 1/5 (Much-Andersen, 2024), mens anden litteratur præciserer, at dette kun gælder ved fugtbelastningsklasse 1–2 (Brandt, et al., 2023b).

Flere studier har dog påvist, at 1/10-forholdet ikke nødvendigvis er generelt gyldigt. Morelli et al. (Morelli, et al., 2021) viste gennem hygrotermiske simuleringer med vurdering i VIT-skimmelmodellen, at vægge i fugtbelastningsklasse 3 kunne opretholde fugtteknisk robusthed ved Z-forhold på 1/5, afhængigt af isoleringstype og fugtpåvirkning. Studiet indikerer, at tommelfingerreglen kan være for konservativ under visse forudsætninger.

Hansen et al. (Hansen, et al., 2024) videreførte analysen og kvantificerede, hvordan materialevalg og fugtbelastning påvirker det nødvendige forhold mellem Z-værdi i vindspærren og tæthedsplanet. Undersøgelsen viste, at det nødvendige Z-forhold varierer betydeligt mellem isoleringstyper. Ved samme klimabelastning og tæthedsplan krævede mineraluld generelt højere Z-forhold end træfiberbaserede isoleringsmaterialer. Det blev dokumenteret, at væggenes U-værdi har direkte betydning for det nødvendige Z-forhold.

Jensen et al. (Jensen, et al., 2025b) gennemførte en systematisk analyse af sammenhængen mellem U-værdi, tæthedspanets Z-værdi og vindspærrens Z-værdi. Resultaterne viste, at kravet til tæthedspanets Z-værdi stiger, når vindspærrens Z-værdi reduceres, og at et 1/10-forhold ikke nødvendigvis sikrer fugtteknisk robusthed i konstruktioner med meget vanddampdiffusionsåbne vindspærre. For hørisolering blev der observeret et krav til tæthedspanets Z-værdi på $24 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ ved en U-værdi på $0,10 \text{ W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ og en vindspærre med $Z = 1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ – svarende til et Z-forhold på 1/24.

Samlet set viser litteraturen, at nødvendige Z-forhold ikke bør fastsættes som en universel standard. Kravene afhænger af fugtbelastningsklasse, materialernes fugttekniske egenskaber, vindspærrens Z-værdi og væggen isoleringsevne. I konstruktioner med biobaseret isolering og vanddampdiffusionsåbne opbygninger bør forholdet mellem vindspærren og tæthedspanet vurderes projektspecifikt på baggrund af hygrotermiske simuleringer eller målinger af fugtforløb og skimmelrisiko.

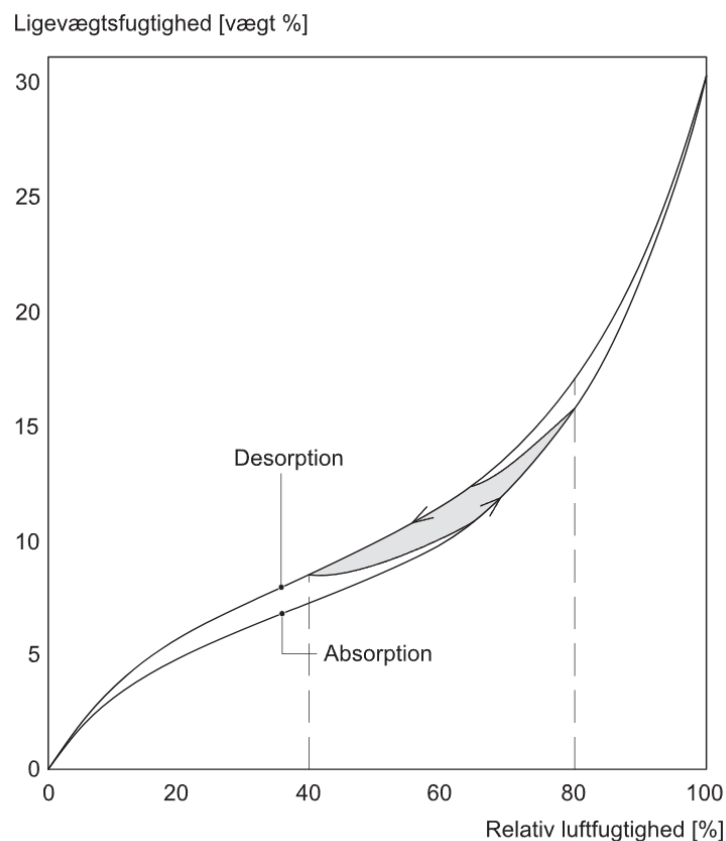
3.4 Biobaserede byggematerialers fugttekniske egenskaber

Biobaserede byggematerialer er porøse og hygroskopiske. Deres fugtoptag beskrives ved sorptionskurven, som angiver ligevægtsfugtindholdet som funktion af relativ luftfugtighed. De fugttekniske egenskaber varierer betydeligt mellem produkter og afhænger af råstof, forarbejdning og densitet (Rasmussen, et al., 2022). Et laboratoriestudie viste, at træfiberprodukter kunne optage op til 2000 vægt-% vand ved kortvarig nedsækning, mens korkplader under samme betingelser optog ca. 8 vægt-%. Nogle produkter gik i opløsning eller udviklede skimmelvækst ved langvarig fugtpåvirkning, mens andre forblev intakte trods højt fugtindhold. Samme studie viste også store forskelle i skimmelrisiko for to halmbaserede isoleringstyper, hvor tiden til vækst varierede fra 8 til 17 dage under identiske forsøgsbetingelser (Andersen, et al., 2025). Resultaterne fra studiet påviser, at fugtoptag og skimmelrisiko kan variere væsentligt selv inden for samme materialegruppe.

Supplerende undersøgelser viser, at forskelle i råstofsammensætning og produktionsmetode også kan medføre betydelige variationer i sorptionsforløb. Et andet studie viste ligeledes, at materialer med næsten identisk fugtbufferkapacitet, men forskellig råstofsammensætning, kunne udvise

markant forskellige sorptionsforløb (Ranefjärd, et al., 2024). Fugtudledning kan derfor ikke vurderes alene ud fra råmateriale eller enkle laboratoriemålinger. Fugtteknisk ydeevne afhænger i høj grad af produktionsmetode og materialekonstruktion og bør dokumenteres for hvert enkelt produkt.

Hysteresese er en grundlæggende egenskab ved hygroskopiske materialer, hvor adsorption og desorption ikke følger samme forløb. Materialets fugtindhold ved en given relativ luftfugtighed afhænger derfor af, om det er under opfugtning eller udtørring. Fænomenet skyldes porestrukturen og er illustreret i Figur 6. I simuleringer anvendes typisk en gennemsnitlig sorptionskurve, men hysteresese bør inddrages i vurderingen af fugtakkumulering og udtørring i konstruktioner med biobaserede materialer (Larsen, 2021) (Brandt, et al., 2023a) (Johansen, et al., 2025).



Figur 6 - Illustration af hysteresese i forbindelse med sorption. Kurverne viser forskellen mellem absorption og desorption. Kilde: (Brandt, et al., 2023a). Figuren er gengivet med tilladelse fra Anvisninger.dk.

3.4.1 Træfiberisolering

Træfiberisolering er et hygroskopisk materiale med høj fugtbufferkapacitet og stor fugtoplagringsevne. Sorptionskurven viser højt fugtoptag allerede ved moderat relativ luftfugtighed. Materialet udligner fugtsvingninger i konstruktionen, men kræver gunstige udtørningsforhold for at undgå langvarig opfugtning. Laboratoriestudier viser, at produkter kan bevare strukturel integritet ved højt fugtindhold, men fugtfølsomheden varierer med densitet og sammensætning (Andersen, et al., 2025).

3.4.2 Mineraluldsisolering

Mineraluldsisolering har lav fugtkapacitet og begrænset bufferfunktion (Dansk Standard, 2008). Materialet er diffusionsåbent og tørrer hurtigt ved faldende relativ luftfugtighed. Den lave sorption betyder, at fugtindholdet forbliver lavt ved kortvarig belastning, men materialet har begrænset effekt på konstruktionens fugtudligning. Variation mellem produkter er begrænset.

3.4.3 Sammenligning af træfiberisolering og mineraluldsisolering

Træfiberisolering adskiller sig fra mineraluldsisolering ved højere fugtkapacitet, lavere varmeledningsevne og langsommere fugttransport (Rode, et al., 2005) (Rasmussen, et al., 2022). Forskellene har betydning for fugtfordeling og udtørring i konstruktioner, hvor Z-værdi og fugtbufferkapacitet styrer forløbet.

I laboratorieforsøg med både dynamisk og statisk fugtbelastning er træfiber- og mineraluldsisolering testet under ens klimabetingelser. Konstruktionerne viste sammenligneligt fugtforløb over året, men med forskudt profil: Træfiber gav højere relativ luftfugtighed i vinterperioden og lavere i sommerperioden. Ved korrekt dimensioneret Z-værdi kunne begge isoleringstyper holdes under 85 % relativ luftfugtighed i vurderingspunktet (Geving, et al., 2015).

Ved luftlækager og konvektiv fugttilførsel blev forskellene mellem isoleringstyper mindre markante. Begge isoleringstyper viste høj fugtakkumulering, og træfiberens fordel bestod primært i en midlertidig fordeling af fugt, ikke i reduktion af samlet opfugtning (Bunkholt, et al., 2021).

3.5 Vurdering af fugtteknisk robusthed

Fugtteknisk robusthed betegner en konstruktions evne til at modstå fugtpåvirkning over tid uden at udvikle skimmelvækst, råd, materialenedbrydning eller nedsat funktion. En konstruktion betragtes som robust, hvis materialernes fugtindhold forbliver under kritiske tærskelværdier i hele eksponeringsperioden. Tærskelværdierne afhænger af materialetype, lagplacering og eksponering for varierende klimabelastning.

I denne analyse anvendes skimmelvækst som primær indikator for fugtteknisk svigt, da skimmelsvampe kræver lavere fugtindhold og kortere eksponeringstid end øvrige nedbrydningsmekanismer. Skimmelsporer findes naturligt i både indendørs og udendørs miljøer og begynder at spire efter få dages opfugtning, hvis temperatur og næring er til stede (Thrane, et al., 2020). Konstruktioner, som opretholder betingelser under væksttærsklen, vurderes som fugtteknisk robuste og dermed også som beskyttede mod øvrige fugtskader som limsvigt og biologisk nedbrydning (Vinha, 2008).

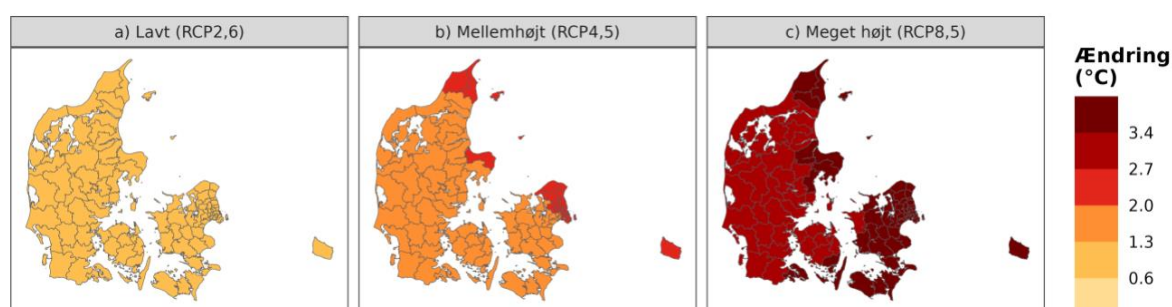
De anvendte tærskelværdier for skimmelvækst fremgår af afsnit 3.1.2. En konstruktion vurderes som robust, hvis fugtniveauet holdes under disse grænser, eller hvis udtørring forhindrer akkumuleret vækst over tid.

3.5.1 Klimascenarier og fremtidig belastning

Klimaforandringer forventes at øge fugtbelastningen af bygningskonstruktioner markant over de kommende årtier. For at vurdere konstruktioners fugttekniske robusthed under fremtidige forhold, er det nødvendigt at inddrage klimamodeller og fremskrivninger, der dækker relevante scenarier for temperatur, nedbør og luftfugtighed.

IPCC's Sjette Hovedrapport, Synteserapporten (Hoesung, et al., 2023), samler det aktuelle videnskabelige grundlag for vurdering af fremtidens klima og danner grundlag for klimatilpasning i både forskning og praksis. Rapporten opstiller fem såkaldte Shared Socioeconomic Pathways (SSP-scenarier), som kombinerer samfundsudvikling med drivhusgasudledning. I Danmark anvendes typisk SSP2-4.5 som referencescenarie og SSP5-8.5 som højbelastningsscenarie, bl.a. i DMI's og Miljøstyrelsens vejledninger (NCKF, DMI, 2025).

Fremskrivninger fra IPCC og DMI's KlimaAtlas (NCKF, 2024) viser, at Danmark i fremtiden vil opleve højere temperaturer og øget fugtbelastning. Ifølge SSP5-8.5-scenariet forventes årsmiddeltemperaturen at stige med op til 4 °C frem mod år 2100, og den årlige nedbørsmængde kan øges med 10–25 % sammenlignet med referenceperioden 1991–2020. Stigningen er særligt udtalt i vinterhalvåret, som i forvejen udgør den mest fugtteknisk kritiske periode for ydervægge. Den geografiske fordeling og størrelsesordenen af temperaturstigningen frem mod 2100 for Danmark er illustreret i Figur 7 (Hoesung, et al., 2023) (NCKF, DMI, 2025).



Figur 7 - Forventet stigning af gennemsnitstemperatur i Danmark i perioden 2071–2100 sammenlignet med referenceperioden 1981–2010 under tre udledningsscenarier. Kilde: (NCKF, 2024). Figuren er gengivet med tilladelse fra DMI.

Sådanne ændringer har direkte betydning for konstruktioners fugttekniske ydeevne. Varmere og vådere vintre øger risikoen for opfugtning, mens lange, fugtige perioder i sommerhalvåret kan skabe gunstige vækstbetingelser for skimmel i konstruktionens ydre zoner.

Ud over de fremskrevne scenarier for opvarmning og fugtbelastning peger nyere forskning på risikoen for en markant svækkelse af Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) – den havstrømsdrevne del af Golfstrømssystemet, som transporterer varme fra troperne til Nordatlanten. Et kollaps af AMOC (herefter benævnt AMOC-scenariet) vil kunne føre til koldere, vådere og mere fugtmættede forhold i Danmark og Nordeuropa. Ditlevsen et al. (Ditlevsen, et al., 2024) estimerer, at et sådant kollaps kan indtræffe mellem 2025 og 2095, med 2057 som mest sandsynlige år. Smolders et al. (Smolders, et al., 2024) vurderer risikoen for kollaps som betydelig inden 2050, afhængigt af metode og datagrundlag. FN's klimapanel vurderer fortsat risikoen som lav, men flere forskere har kritiseret modellernes følsomhed over for effekten af øget smeltevandstilførsel fra Grønland (Nian, et al., 2023) (Scheel, 2025).

AMOC- scenariet vil repræsentere en anderledes belastning end det fremskrevne opvarmningsscenarie: lavere temperaturer, høj relativ luftfugtighed og reduceret udtørningspotentiale. I ydervægskonstruktioner vil dette kunne øge varigheden af fugtbelastning og mindske muligheden for naturlig udtørring.

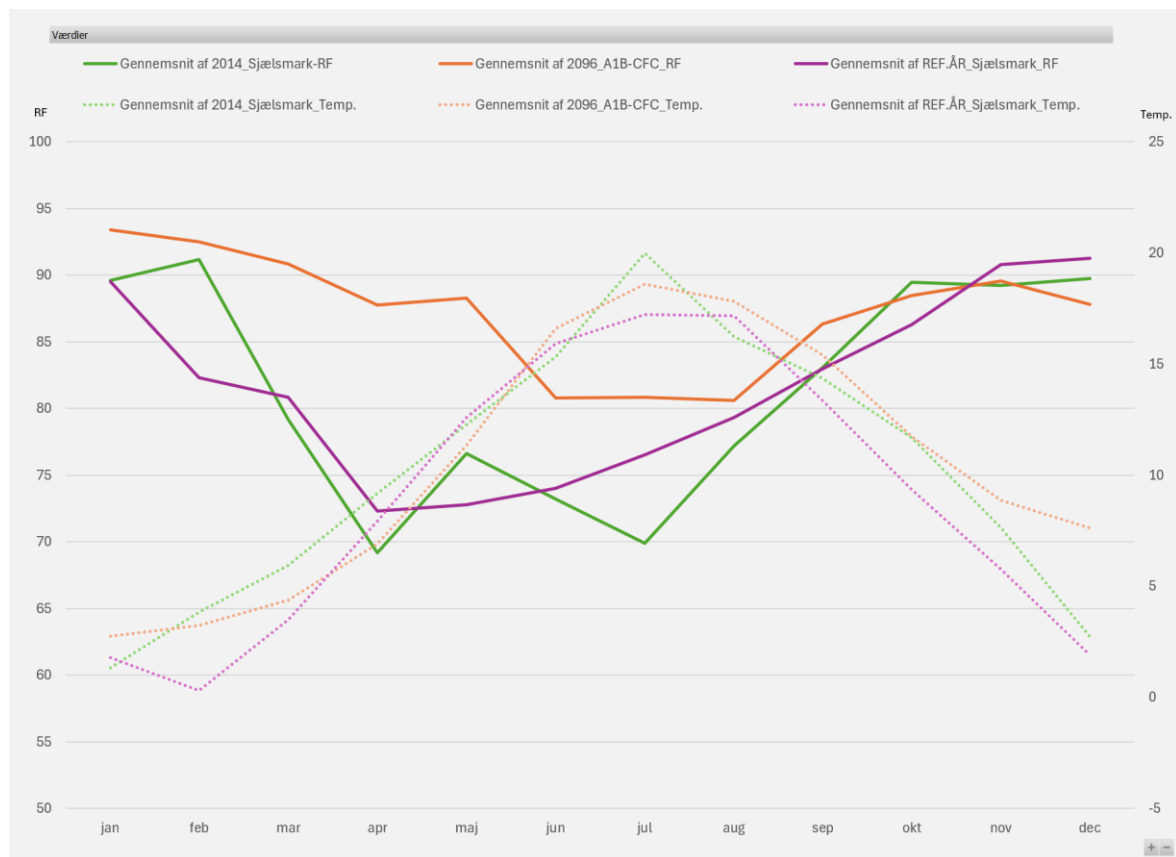
Det er derfor afgørende, at vurdering af fugtteknisk robusthed ikke alene baseres på historiske eller nutidige klimadata, men også inkluderer både realistiske og ekstreme klimascenarier. Det gælder særligt ved anvendelse af biobaserede materialer, hvor robustheden er tæt knyttet til fugtniveau, temperatur og varigheden af kritiske betingelser.

For at illustrere forskellene mellem de anvendte klimafilere er månedsgennemsnit for temperatur og relativ luftfugtighed vist i Figur 8. Figuren viser ét repræsentativt år fra tre af de fire anvendte klimatyper:

- Referenceåret (TRY): sammensat af udvalgte måneder fra perioden 2001–2019
- Det mest fugtkritiske målte år (2014) fra Sjælsmark-serien 2011–2024
- Det mest fugtkritiske fremtidsår (2096) fra A1B-scenariet i perioden 2089–2099

Som det fremgår, adskiller de tre klimafilere sig væsentligt gennem året. Referenceåret, der i dag anbefales til fugtsimulering i danske projekter (Jensen, et al., 2023), viser ikke konsekvent højere fugtbelastning end de øvrige scenarier. Særligt i vinterhalvåret viser A1B-scenariet højere relativ luftfugtighed end referenceåret, mens 2014_Sjælsmark data i perioder har tilsvarende eller større variation.

AMOC-scenariet er ikke medtaget i denne graf, da de anvendte klimadata for Québec ikke forelå i et format, hvor månedsgennemsnit for temperatur og relativ luftfugtighed kunne sammenlignes direkte med de øvrige klimafilere.



Figur 8 - Månedsmiddel for temperatur (stiplet linje) og relativ luftfugtighed (fuld linje) i tre klimascenarier: målt klima (Sjælsmark 2014), fremskrevet fremtidsscenarie (A1B, 2096) og danske referenceår (TRY 2001–2019).

Figur 8 underbygger behovet for at simulere på tværs af både målte, syntetiske og fremskrevne klimaforhold for at afdække konstruktionens fugttekniske robusthed under realistiske og ekstreme scenarier.

Fugtrisiko i konstruktioner skal vurderes ud fra både fugtbelastning og materialernes udtørningsevne. Øget fugtpåvirkning forudsætter, at byggeri planlægges med høj fugtteknisk robusthed, herunder valg af materialer og opbygninger der tåler længerevarende opfugtning og reduceret udtørningspotentiale (Høegh, 2023b). Det understøtter behovet for at inkludere både fremskrevne og ekstreme klimascenarier i simuleringer.

3.6 Skimmelmodeller

Til vurdering af skimmelrisiko i bygningskonstruktioner er der udviklet en række modeller med varierende kompleksitet og anvendelsesområde. De spænder fra simple grænseværdi-baserede metoder til avancerede dynamiske modeller, der simulerer vækst over tid under varierende klimabelastning.

Flere modeller anvender isopletbaserede metoder, hvor vækstgrænser angives som funktioner af temperatur og relativ luftfugtighed. Eksempler herpå er modellerne fra Ayerst, Smith & Hill, Hens samt Sedlbauers LIM-kurver. Sidstnævnte har dannet grundlag for senere værktøjer til hygrotermisk simulering og anvendes stadig i forenklede analyser af fugtteknisk robusthed (Vereecken, et al., 2012).

Nyere modeller som VTT og WUFI Bio simulerer skimmelvækst som dynamisk respons på skiftende klimabelastninger og materialernes fugttekniske egenskaber.

3.6.1 LIM-kurver (Isopleth-system)

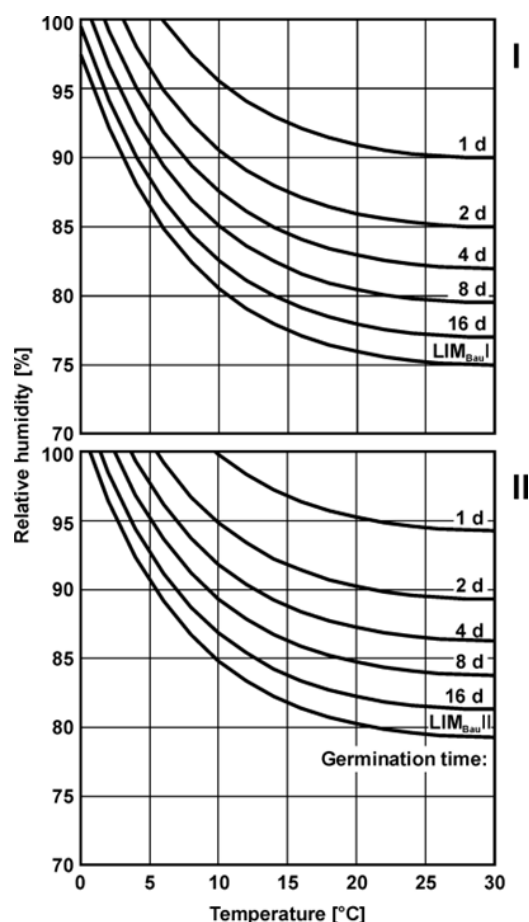
LIM-modellen (Lowest Isopleth for Mould), udviklet af Sedlbauer (Sedlbauer, 2001), er en tærskelbaseret metode til vurdering af skimmelrisiko. Modellen angiver de lavest mulige hygrotermiske betingelser, hvor skimmelsvampe kan spire, og anvender kombinationen af temperatur og relativ luftfugtighed som vurderingskriterium. LIM er en statisk model uden tidsopløsning og vurderer alene, om vækstbetingelser er til stede – ikke hvor hurtigt væksten sker.

Modellen er baseret på laboratorietest af typiske svampearter og opdelt i tre substratkategorier:

- LIM 0: Ideelle vækstbetingelser
- LIM I: Organiske og biologisk nedbrydelige byggematerialer
- LIM II: Uorganiske og mineralske materialer med lav næringsværdi

LIM I anvendes typisk til biobaserede byggematerialer. Kurvesættet angiver sporespiringstærskler ved eksponeringstider fra 1 til 16 dage, mens den nederste kurve (LIM_{bau}) repræsenterer en

konservativ grænse for sporespiring i materialer med lav næringsværdi. Figur 9 viser LIM-kurver for substratkategorierne LIM I og LIM II.



Figur 9 - LIM-kurver for skimmelspores spiring som funktion af temperatur og relativ luftfugtighed ved eksponering i dage. Øverst: LIM I (organiske materialer). Nederst: LIM II (uorganiske materialer). Kilde: (Sedlbauer, 2001). Figuren er gengivet med tilladelse fra Klaus Sedlbauer.

LIM-metoden angiver, om vækstbetingelserne for skimmel er opfyldt, men ikke væksthastigheden. Den anvender statiske tærskelkurver for temperatur og relativ luftfugtighed og forudsætter konstant fugtbelastning uden hensyntagen til udtørring, vækstforsinkelse eller gentagne variationer i fugtforhold (Krus, et al., 2010) (Vereecken, et al., 2012) (Viitanen, et al., 2015). Metoden er derfor velegnet til screeningsbaserede vurderinger, hvor konstruktionens fugtforløb sammenholdes med grænsebetingelser for sporespiring. LIM-kurver anvendes typisk til efterbehandling af data fra hygrotermiske simuleringer eller målinger, hvor risikoen vurderes ud fra antallet af timer eller døgn med overskridelse af tærskelværdierne.

Anvendelse i nyere rapporter

LIM-kurverne anvendes i tidligere specialrapporter til vurdering af fugtteknisk robusthed. I (Thomsen, et al., 2023) og (Hofmann, 2024) sammenholdes dagsgennemsnit af temperatur og relativ luftfugtighed med kritiske LIM-værdier i Excel. Konstruktionerne vurderes som ikke robuste, hvis sporespiring kan forekomme over en given sammenhængende periode.

Vurderingskriterierne baserer sig typisk på 4-, 8- og 16-dageskurver og en forenklet formel fra SBI-anvisning 277 (Brandt, et al., 2023a), der angiver kritisk relativ luftfugtighed som funktion af temperatur:

$$RF_{\text{krit}} = 0,02 \cdot \theta^2 - 1,18 \cdot \theta + 95,2$$

Her er θ temperaturen i °C og RF_{krit} den kritiske relative luftfugtighed i procent.

Udvidet anvendelse og formeltilpasning

I en nyere specialrapport fra december 2024 (Bøggild-Ugelvig, et al., 2024) anvendes samme metode med tilpassede polynomier, med 30-dageskurver og justerede formler i overensstemmelse med VIGOT-projektets tilgang (Rasmussen, 2025). LIM_{bau} anvendes her som konservativ reference for sporespiring ved 30 dages eksponering. Følgende formler anvendes til kritisk relativ luftfugtighed (RF) ved hhv. 4, 8, 16 og 30 dage:

30 dage:

$$RF = 0,0000375209104619412 \cdot \theta^4 - 0,0036713012477847 \cdot \theta^3 + 0,144648258603979 \cdot \theta^2 - 2,79360678536204 \cdot \theta + 97,3773149644012$$

16 dage:

$$RF = 0,0000372494172494742 \cdot \theta^4 - 0,00363613053613676 \cdot \theta^3 + 0,143330128205093 \cdot \theta^2 - 2,77505515317171 \cdot \theta + 99,3090659340182$$

8 dage:

$$RF = 0,0000487675570655099 \cdot \theta^4 - 0,00445155023002286 \cdot \theta^3 + 0,163087171587449 \cdot \theta^2 - 2,96137876546891 \cdot \theta + 102,34640528192$$

4 dage:

$$RF = 0,0000459995574773053 \cdot \theta^4 - 0,00426314132693051 \cdot \theta^3 + 0,158718934526178 \cdot \theta^2 - 2,92292045387694 \cdot \theta + 104,726757291497$$

Disse formler anvendes til at identificere, om sporespiring kan forekomme under fugtbelastningsklasse 3. Overskrides grænsebetingelserne i en sammenhængende periode, vurderes konstruktionen som ikke fugtteknisk robust.

Anvendelse i nærværende analyse

Den beskrevne LIM-metode dannede grundlag for analysens oprindelige vurderingsstrategi, hvor simulerede fugtdata fra WUFI blev behandlet i Excel med de nævnte formler. Metoden blev dog erstattet af en tilgang, hvor skimmelrisikoen vurderes direkte i WUFI Bio på baggrund af de samme simulerede fugtdata, da ingen konstruktioner kunne godkendes under det fremtidige varme og fugtige klimabelastninger med LIM-tilgangen.

3.6.2 VTT-skimmelmodel

VTT-modellen, også kaldet Viitanen-modellen, er en empirisk og matematisk metode til vurdering af skimmelvækst i byggematerialer under dynamiske fugt- og temperaturforhold. Den blev oprindeligt udviklet ud fra laboratorieforsøg med fyr og gran og er senere udvidet med materialeparametre for andre byggematerialer (Hukka, et al., 1999) (Viitanen, et al., 2015).

Modellen bygger på et skimmelindeks (Mould Index), der kvantificerer vækstens omfang på en skala fra 0 til 6, baseret på visuel og mikroskopisk vurdering. Indekset anvendes til at følge vækstniveauet over tid:

Mould Index:	Beskrivelse:
0	Ingen vækst
1-2	Mikroskopisk vækst
3	Visuel vækst under 10 %
4	Visuel vækst mellem 10–50 %
5	Visuel vækst over 50 %
6	Total overfladedækning

Tabel 1 - Mould Index. Definition af skimmelindeks baseret på visuelle og mikroskopiske vurderinger anvendt i VTT-modellen (Viitanen, et al., 2015)

Modelens kerne er en differentieret vækstformel, der beregner ændringen i skimmelindekset over tid:

$$\frac{dM}{dt} = \frac{1}{7 \cdot \exp(-0,68 \cdot \ln(T) - 13,9 \cdot \ln(RH) + 0,14 \cdot W - 0,33 \cdot SQ + 66,02)} \cdot k_1 \cdot k_2$$

hvor:

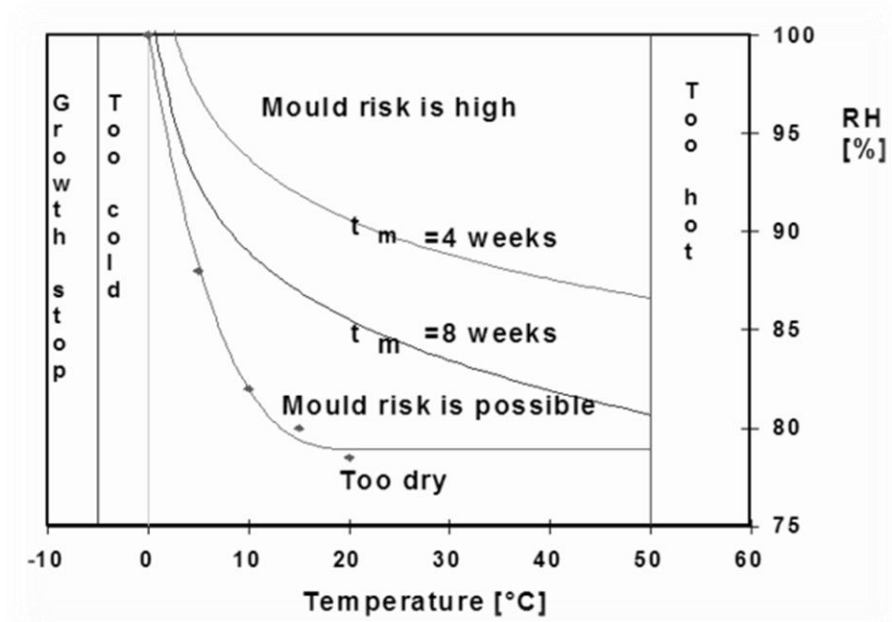
- $\frac{dM}{dt}$ er ændringen i skimmelindeks over tid
- T er temperaturen (°C)
- RH er den relative luftfugtighed (%)
- W er antallet af uger siden vækstbetingelserne opstod
- SQ er det aktuelle skimmelindeks
- k_1 & k_2 er materialspecifikke koefficienter, som justerer væksthastighed og maksimalt vækstniveau for forskellige materialetyper

Konstanten 7 er en kalibreringsfaktor for tidsskalaen (dagbaseret), mens koefficienterne -0,68 for $\ln T$ og -13,9 for $\ln RH$ er bestemt empirisk ud fra laboratoriemålinger og angiver vækstens følsomhed over for henholdsvis temperatur og relativ luftfugtighed. Ledet $0,14 \cdot W$ beskriver effekten af eksponeringstid under gunstige vækstbetingelser, hvor væksthastigheden øges med varigheden af fugtbelastningen. Ledet $+66,02$ og $-0,33 \cdot SQ$ sikrer, at væksten bremser op, når skimmelindekset nærmer sig sit maksimale niveau (Viitanen, et al., 2015).

En vigtig egenskab ved modellen er dens følsomhed over for fugthistorik og evne til at inddrage tørre perioder, hvor væksten stopper eller aftager. Dette gør modellen velegnet til realistiske vurderinger i konstruktioner med varierende fugtpåvirkning (Hukka, et al., 1999).

Materialer klassificeres i fire følsomhedsniveauer (meget følsom, følsom, middelresistent, resistent), hver med egne parametre for væksthastighed og kritisk relativ luftfugtighed. Ved ugunstige forhold reduceres skimmelindekset lineært afhængigt af materialetype (Ojanen, et al., 2010).

Figur 10 illustrerer VIT-modellens vækstgrænser og hvor hurtigt skimmel kan opstå ved forskellige temperatur- og fugtforhold:



Figur 10 - Skimmelrisiko i VTT-modellen. Figuren viser kritiske kombinationer af temperatur og relativ luftfugtighed for vækst. Lavere værdier af t_m angiver hurtigere vækst. Ekstreme temperaturer på ydersiden af feltet medfører vækststop. Kilde: (Hukka, et al., 1999) (Fraunhofer IBP, 2015). Figuren er gengivet med tilladelse fra Fraunhofer Publica.

Anvendelse i WUFI

WUFI's implementering af VTT-skimmelmodellen anvender et trafiklyssystem, hvor skimmelindekset farvekodes:

- Grøn: $M \leq 1$
- Gul: $M = 2 - 3$
- Rød: $M > 3$

Farvekodningen giver et hurtigt visuelt overblik over perioder og zoner med forhøjet risiko. Gul angiver en væksthastighed mellem ca. 176 og 239 mm/år, hvilket i denne analyse anvendes som vurderingsgrundlag for overflader inde i konstruktionen uden direkte kontakt til indeluften.

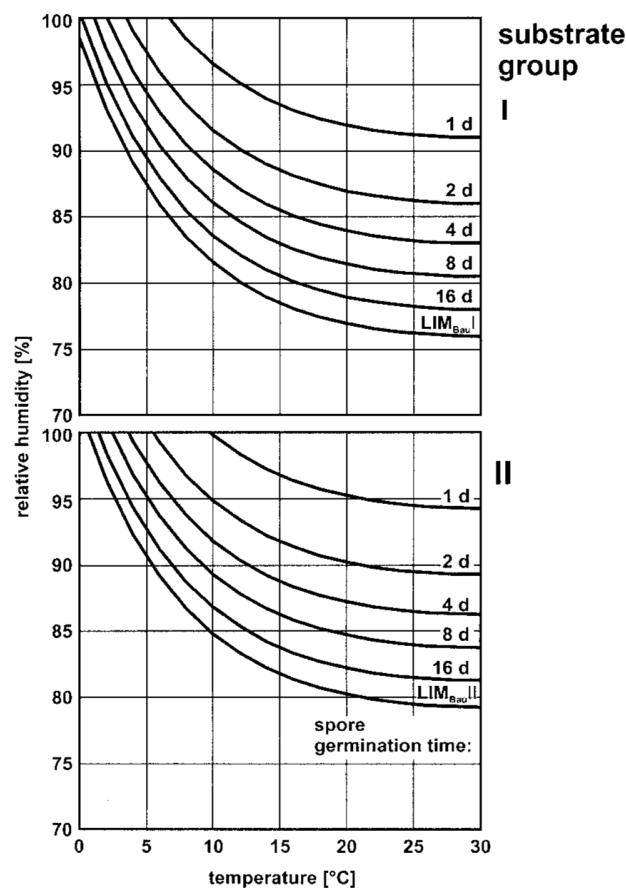
Skimmelmodellen korrigerer ikke automatisk for indkøringsperioder. Hvis simuleringen påbegyndes med fugtniveauer over tærskelværdien, kan modellen akkumulere vækst umiddelbart, hvilket medfører en overvurdering af risikoen (Fraunhofer IBP, 2024b).

3.6.3 Biohygrotermisk model (WUFI Bio)

WUFI Bio er en dynamisk vurderingsmodel, der beregner skimmelvækst som funktion af temperatur og relativ luftfugtighed over tid. Modellen bygger på Sedlbauers fugtbalancetilgang og antager, at vækst opstår, når en generisk spore har absorberet en kritisk vandmængde, bestemt af materialets sorptionskurve og de aktuelle klimabetingelser (Sedlbauer, 2001). WUFI Bio bygger på samme teoretiske grundlag som LIM-kurverne, men foretager en kontinuert beregning af vækstbetingelser time for time. I modsætning til de statiske LIM-kurver fra begyndelsen af 2000'erne er WUFI Bio udviklet til dynamisk simulering og opdateres løbende siden introduktionen i 2011. Modellen er derfor velegnet til simuleringer med ubrugte klimamåleserier og fremskrevne klimadata (Fraunhofer IBP, 2011) (Fraunhofer IBP, 2024a) (Fraunhofer IBP, 2024b).

I modsætning til VTT-modellen benytter WUFI Bio en kontinuert vækstfunktion uden fastsat maksimum. Væksten akkumuleres over tid og standser midlertidigt under ugunstige forhold, men reduceres ikke (Viitanen, et al., 2015). WUFI Bio anvender samme skimmelindeks som VTT-modellen. Se afsnit 3.6.2 for vurderingsgrundlag.

Den kritiske tærskel for vækst i WUFI Bio er baseret på en revideret udgave af Sedlbauers LIM-kurver, som oprindeligt blev præsenteret i hans Ph.d.-afhandling (Sedlbauer, 2001). Året efter offentliggjorde Sedlbauer en videnskabelig artikel med en revideret version af kurverne, tilpasset anvendelse i hygrotermiske simuleringer (Sedlbauer, 2002). Det er denne version, der anvendes i WUFI Bio. Selvom Fraunhofer IBP flere steder henviser til Sedlbauers afhandling fra 2001 (Fraunhofer IBP, 2019), er det i praksis den reviderede version fra 2002, der er implementeret i softwaren. Sammenlignet med de oprindelige isopleter ligger vækstgrænserne typisk lidt lavere i den reviderede udgave. Ifølge Sedlbauer er formålet med ændringen at tage højde for biologisk variation og sikre større praktisk relevans (Sedlbauer, et al., 2003). Den anvendte vækstgrænse er vist i Figur 11.



Figur 11 - Justeret LIM I-kurve anvendt i WUFI Bio. Figuren viser grænsen for skimmelvækst på organiske materialer som funktion af relativ luftfugtighed, temperatur og eksponeringstid. Vækst er mulig, når de hygrotermiske forhold befinder sig over kurven. Kilde: (Sedlbauer, 2002) (Fraunhofer IBP, 2024a). Figuren er gengivet med tilladelse fra Klaus Sedlbauer.

WUFI Bio er valideret i både laboratorie- og fuldskalaeksperimenter. Studier viser generelt god overensstemmelse mellem simulerede og observerede vækstforløb under både statiske og dynamiske fugtbelastninger (Holzhueter, et al., 2017) (Jensen, et al., 2020). Modellen anvendes i dag bredt i forskningssammenhæng som standardværktøj til vurdering af fugtteknisk robusthed (Nath, et al., 2022).

4 Metoder og materialer

Dette kapitel beskriver den anvendte metode til vurdering af fugtteknisk robusthed i lette ydervægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering. Analysen baseres på dynamiske simuleringer i WUFI Pro med vurdering af skimmelvækst i WUFI Bio. Resultaterne sammenholdes afslutningsvis med måledata fra hotbox/coldbox-forsøget i VIGOT-projektet.

4.1 Opbygning og afgrænsning af WUFI-model

Til de hygrotermiske simuleringer er der opstillet en generisk, lagdelt model i WUFI, som beskriver varme- og fugttransport i konstruktionen. Modellen er konfigureret med fastlagte parametre for klimadata, orientering, hældning, bygningshøjde, overfladekoefficienter og numerisk opløsning.

Der anvendes reelle klimadata frem for referenceår. Vurderingen af skimmelvækst foretages først efter en indkøringsperiode på tre år for at undgå overvurdering i starten af simuleringen. Se Bilag 3 for navngivning og organisering af de simulerede WUFI-modeller anvendt i parameterstudiet.

4.1.1 Ventileret hulrum bag regnskærm

Alle simuleringer forudsætter et ventileret hulrum på 25 mm mellem regnskærmen og vindspærren med et luftskifte på 30 h^{-1} . Denne værdi er fastlagt ud fra anbefalinger for veldimensionerede hulrum i højisolerede ydervægge og skal sikre trykudligning og borttransport af vanddamp (Morelli, et al., 2017).

4.1.2 U-værdier for simulerede konstruktioner

I de hygrotermiske simuleringer er ydervæggen modelleret med en samlet U-værdi på $0,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ eller $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

4.1.3 Omregning til Z-værdi

I WUFI angives materialers vanddamptransportegenskaber med μ -værdier. For at kunne sammenligne den samlede vanddampdiffusionsmodstand i konstruktionen er alle materialers μ -værdier omregnet til Z-værdier ($\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$), som udtrykker vanddampdiffusionsmodstand inkl. lagtykkelse. Omregningen følger formelen beskrevet i afsnit 3.1.3 og er dokumenteret i Bilag 2, som indeholder beregning af Z-værdier ud fra deklarerede μ - og S_d -værdier for de anvendte materialer i vindspærren og tæthedsplanet.

4.1.4 Orientering, hældning og højde af ydervægsflade

Ydervæggen er simuleret med orientering mod nord og en hældning på 90° , hvilket repræsenterer en konservativ fugtbelastning. Nordvendte flader i Danmark har lav temperatur og minimal solindstråling, hvilket forlænger tørretiden og øger risikoen for skimmelvækst (Morelli, et al., 2017) (Fraunhofer IBP, 2024a). Denne orientering er derfor anvendt som reference i vurderingen af fugtteknisk robusthed.

Regnbelastningen er beregnet efter WUFI's koefficientmodel med $R_1 = 0$ og $R_2 = 0,07 \text{ s/m}$, svarende til en lodret flade midt på en lav bygning uden fremspring.

ASHRAE 160 er en amerikansk standard, som foreskriver beregning af indendørs fugtbelastning til bygningssimuleringer ud fra input som beliggenhed, brugstype og ventilationsniveau (ASHRAE, 2016). Metoden medfører typisk periodisk variation i det indendørs damptryk. I nærværende studie er ASHRAE 160 fravalgt, da WUFI's standardmetode er vurderet tilstrækkelig for de undersøgte vægkonstruktioner.

Selv om alle klimascenarier er placeret på den nordlige halvkugle, varierer retningen for maksimal slagregn. I Danmark er sydvest dominerende, mens det i Québec er nordøst (Fraunhofer IBP, 2024a) (Bøggild-Ugelvig, et al., 2024). Da alle simuleringer i nærværende analyse er foretaget uden direkte slagregnspåvirkning og med nordvendt orientering, sikres ensartede og konservative vurderingsbetingelser på tværs af klimascenarier.

Tabel 2 - Indtastning i WUFI: Orientering, hældning og højde

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Orientering	Nord	Lav solpåvirkning – konservativt scenarie
Hældning	90°	Lodret ydervæg
Regnkoefficienter	$R_1 = 0$ $R_2 = 0,07$	WUFI's model for lodret væg med lav eksponering
Bygningshøjde	< 10 m	Standardbetingelse for lavt byggeri

4.1.5 Overfladekoefficienter

I simuleringerne er standardindstillingerne for overfladeparametre justeret, så de afspejler materialevalg og eksponeringsforhold. Den udvendige overgangsisolans er fastsat til $0,04 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (Dansk Standard, 2020), inkl. langbølget stråling. Vindafhængig varmeovergang og eksplicit strålingsbalance er ikke aktiveret. Den kortbølgede absorptionsfaktor er sat til 0,4, svarende til ubehandlet grantræ. På indersiden er overgangsisolansen sat til $0,13 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$ (Dansk Standard, 2020), og der er ikke indtastet yderligere overfladeegenskaber.

Tabel 3 - Indtastning i WUFI: Overfladekoefficienter

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Udvendig overgangsisolans	0,04 m ² ·K/W	jf. DS 418 (Dansk Standard, 2020). Værdien inkluderer 6,5 og er fast, da vindafhængig beregning ikke er aktiveret
Langbølget stråling	6,5 W/m ² ·K	Indgår i den udvendige overgangsisolans
Kortbølget strålingsabsorption	0,4	Svarende til ubehandlet grantræ (WUFI-standard)
Langbølget strålingsparametre	----	Eksplicit strålingsbalance er ikke aktiveret
Skyggefaktorer	----	Ingen reduktion i absorptions- eller emissionsfaktor
Eksplicit strålingsbalance	----	Langbølget stråling beregnes ikke særskilt
Jordens kortbølget refleksion	0,2	WUFI-standardværdi for neutrale omgivelser
Adhærerende regnmængde	0,7	Standard for lodrette facader i WUFI
Indvendig overgangsisolans	0,13	jf. DS 418 (Dansk Standard, 2020)
Indvendig overfladebehandling	----	Der er ikke regnet med maling eller anden diffusionstæt belægning

4.1.6 Indledende fugttilstand

Simuleringerne har startbetingelser med en konstant relativ luftfugtighed på 0,80 i alle materialeg. WUFI beregner vandindholdet i hvert lag ud fra materialernes sorptionskurver. Ved at angive en ensartet relativ luftfugtighed defineres fysisk konsistente startbetingelser, hvor det beregnede vandindhold afhænger af materialets sorptionskurve.

Tabel 4 - Indtastning i WUFI: Indledende fugttilstand

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Startbetingelse for relativ luftfugtighed	0,80	Konstant i hele konstruktionen
Startbetingelse for temperatur	20 °C	Svarende til en typisk temperatur i opvarmede boliger fra oktober til maj måned. (Brandt, et al., 2023a)

4.1.7 Klimadata og simuleringsperioder

Simuleringerne er gennemført med timebaserede klimadata for tre scenarier, som er beskrevet i teoriafsnit 3.5.1. Scenarierne repræsenterer et nutidigt, et fremskrevet varmt og fugtigt, samt et hypotetisk koldt klima.

Nutidigt klima er baseret på målte værdier fra DMI's frie klimadatasæt "*DK_DMI_Raw 2011–2024_Sjælsmark*" (DMI, 2025). Denne fil indeholder ubehandlede timeværdier for temperatur, relativ luftfugtighed, solindstråling og nedbør over en 13-årig periode. Langbølget modstråling indgår ikke direkte og er i dette projekt estimeret med en regressionsbaseret model baseret på gradient-boostede beslutningstræer (LightGBM), trænet på meteorologiske input som temperatur, relativ luftfugtighed og globalstråling. Modellen opnåede en forklaringsgrad (R^2) på 0,93 og er anvendt til at generere kontinuerlige strålingsdata til simuleringerne (Jensen, et al., 2025a). Anvendelsen af måldata frem for et referenceår sikrer, at både typiske og ekstreme variationer indgår i vurderingen. Dette er i overensstemmelse med gældende anbefalinger, hvor referenceår anses for at kunne undervurdere fugtteknisk belastning (Jensen, et al., 2023).

Det varme og fugtige fremtidsscenarie anvender klimafilen

"*KobenhavnTaastrup_12.3_55.667_2070_2100_A1B*" fra Climate for Culture (Fraunhofer IBP, 2025). Filen bygger på simulerede data for temperatur, relativ luftfugtighed, solindstråling og nedbør i perioden 2070–2100 under det tidligere SRES-scenarie A1B (Pachauri, et al., 2007).

Scenariet repræsenterer middelhøje udledninger og svarer omtrent til et belastningsniveau mellem SSP2-4,5 og SSP5-8,5 i nyere IPCC-fremskrivninger (NCKF, DMI, 2025). Der er ikke en

entydig overensstemmelse mellem SRES- og SSP-scenarier, men sammenligningen er baseret på forventet temperaturstigning og udledningsforløb.

Det tredje scenarie anvender klimadata fra Québec, Canada, som en stedfortræder for AMOC-scenariet. Filen stammer fra ASHRAE RP-1325 og er tilgængelig som standardklimafil i WUFI Pro. Den består af tre år udvalgt for varierende sværhedsgrad med hensyn til fugtteknisk belastning og anvendes som repræsentation af et koldt, fugtigt og langvarigt belastende forhold (Oak Ridge National Laboratory, 2011).

Alle tre klimascenarier simuleres som tiårige forløb. De første tre år anvendes som indkøringsperiode, og vurderinger baseres derfor kun på resultater fra starten af år fire. Dette sikrer fugtmæssig ligevægt og inddrager samtidig kritiske spidsbelastninger med betydning for skimmelvækst og fugtteknisk robusthed. Simuleringsperioderne fremgår af Tabel 5.

Indeklimaet er i alle simuleringer defineret med en middeltemperatur på 20 °C og fugtbelastning i henhold til fugtbelastningsklasse 3, jf. afsnit 3.2.

Tabel 5 - Indtastning i WUFI: Beregnede periode / profiler, indeklima temperatur og fugtbelastningsklasse

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Simuleringsperiode for nutidsklima	01-06-2014 - 01-06-2024	De første tre simuleringsår anvendes som indkøringsperiode
Simuleringsperiode for begge fremtidsscenarier	01-06-2089 - 01-06-2099	De første tre simuleringsår anvendes som indkøringsperiode.
Fugtbelastningsklasse	3	Fugttilskud på 6 g/m ³
Middeltemperatur	20 °C	

4.1.8 Numeriske indstillinger

WUFI Pro er konfigureret til koblet varme- og fugttransport med inddragelse af kapillarfugttransport, latent varmetransport og temperaturafhængige materialedata. Adaptiv tidsdiskretisering er aktiveret for at sikre numerisk stabilitet ved varierende belastninger og materialeresponser.

Tabel 6 - Indtastning i WUFI: Numeriske indstillinger

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Varme- og fugttransport	Begge aktiveret	Simulerer koblet varme- og fugttransport
Kapillarfugttransport	Inkluderet	Standardindstilling – kapillærfugttransport er medtaget
Latent varmetransport	Inkluderet	Indkluderer både fordampning, kondensering og fryseprocesser
Temperaturafhængighed	Inkluderet	Varmeledningsevne og latent varme er temperaturafhængige
Øget nøjagtighed	Aktiveret	Forbedrer numerisk stabilitet og præcision
Tilpasset konvergens	Aktiveret	Øger sandsynligheden for konvergens og balanceret fugtregnskab
Adaptiv tidsdiskretisering	Aktiveret	Tidssteg opdeles automatisk ved numeriske problemer
Antal undertrin (Steps)	3	Tidssteg opdeles i op til 3 trin
Maksimalt niveau	5	Tidssteg kan underinddeles op til 5 gange for at opnå konvergens

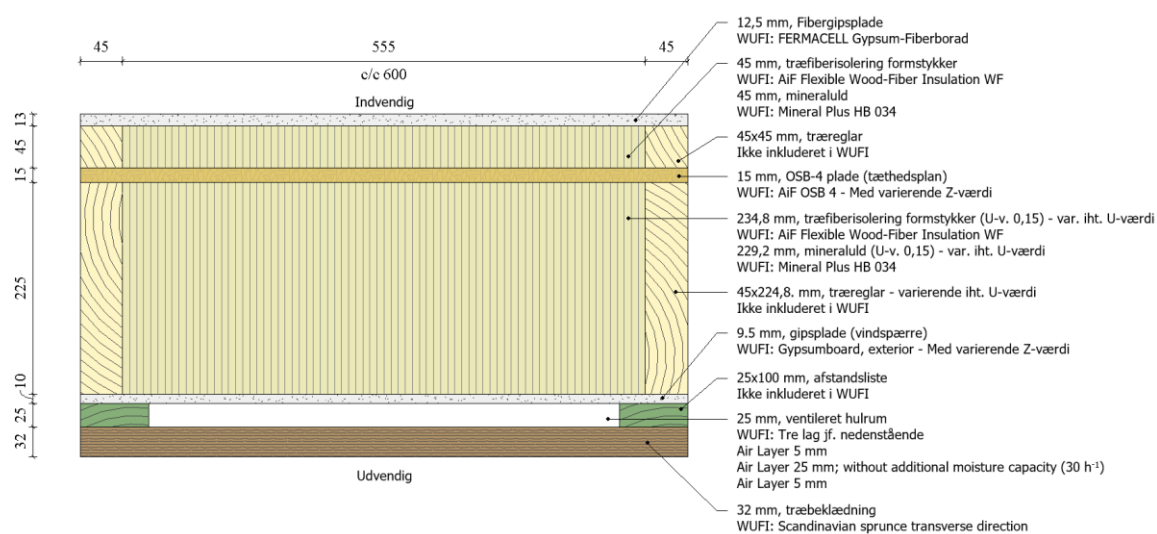
4.2 Materialeopbygning af ydervæggen

De hygrotermiske simuleringer omfatter lette ydervægskonstruktioner med systematiske variationer i Z-værdier for vindspærren og tæthedsplanet. Konstruktionerne er isoleret med enten træfiberisolering eller mineraluldsisolering og dimensioneret til at opfylde definerede U-værdier.

4.2.1 Vægopbygning og lagstruktur

Den simulerede væg er opbygget som en lagdelt konstruktion med regnskærm, ventileret hulrum, vindspærre, isolering, tæthedsplan, installationslag og indvendig beklædning jf. Figur 12.

Opbygningen er teknisk inspireret af laboratorieforsøg i VIGOT-projektet, men er tilpasset med varierende Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet til brug i parameterstudier. Lagtykkelser og materialer er fastlagt ud fra en repræsentativ vanddampdiffusionsåben ydervæg med biobaseret isolering.



Figur 12 - Vandret snit af simuleret ydervægskonstruktion. Figuren viser materialetyper, lagtykkelser samt placering af vindspærren og tæthedsplanet.

4.2.2 U-værdi og beregningsgrundlag

Konstruktionerne er dimensioneret med en samlet U-værdi på $0,10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ eller $0,15 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Isoleringen består af enten træfiberisolering eller mineraluldisolering. U-værdien er beregnet på baggrund af vægtet varmeledningsevne for det samlede isoleringslag, korrigeret for træandel i konstruktionen. Beregningsgrundlag for U-værdier og tilhørende materialedata fremgår af Bilag 1. Det ventilerede hulrum og lagene uden for vindspærren indgår ikke i U-værdiberegningen. I stedet er overgangsisolansen på vindspærrens yderside sat lig den indvendige overgangsisolans i overensstemmelse med DS 418 (Dansk Standard, 2020).

Beregning af vægtet varmeledningsevne

Ydervægsopbygningen er baseret på et træskelet med centerafstand 0,6 m og en væghøjde på 2,5 m. Træandelen i væggen er beregnet ud fra en vægsektion med bredde 0,6 m og inkluderer en hjørnesamling med dobbelte reglar. Bredden af træreglar er 0,045 m.

Arealet af træ ($A_{\text{træ}}$) er beregnet som:

$$A_{\text{træ}} = (\text{bredde af reglar} \cdot \text{højde}) + (\text{afstand mellem reglar} \cdot \text{bredde af reglar} \cdot \text{antal reglar i samling})$$

Indsatte værdier:

$$A_{\text{træ}} = 0,045 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m} + (0,6 \text{ m} - 0,045 \text{ m}) \cdot 0,045 \text{ m} \cdot 2$$

$$A_{\text{træ}} = 0,1125 \text{ m}^2 + 0,04995 \text{ m}^2 = 0,16245 \text{ m}^2$$

Det samlede vægareal ($A_{\text{væg}}$) er:

$$A_{\text{væg}} = 0,6 \text{ m} \cdot 2,5 \text{ m} = 1,5 \text{ m}^2$$

Den procentvise træ- og isoleringsandel er:

$$f_{\text{træ}} = \frac{A_{\text{træ}}}{A_{\text{væg}}} \cdot 100 = \frac{0,16245 \text{ m}^2}{1,5 \text{ m}^2} \cdot 100 = 10,83 \%$$

$$f_{\text{iso}} = 100 \% - 10,83 \% = 89,17 \%$$

Den vægtede varmeledningsevne (λ_s) beregnes som:

$$\lambda_s = \frac{f_{\text{iso}}}{100} \cdot \lambda_{\text{iso}} + \frac{f_{\text{træ}}}{100} \cdot \lambda_{\text{træ}}$$

Med indsatte værdier:

$$\lambda_s = \frac{89,17}{100} \cdot 0,035 \text{ W/m} \cdot \text{K} + \frac{10,83}{100} \cdot 0,13 \text{ W/m} \cdot \text{K} = 0,0312 + 0,0141 = 0,0453 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\lambda_s = 0,0312 \text{ W/m} \cdot \text{K} + 0,0141 \text{ W/m} \cdot \text{K} = 0,0453 \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

Denne korrigerede varmeledningsevne anvendes i U-værdiberegningerne.

Beregning af nødvendige isoleringstykkelser

De nødvendige isoleringstykkelser for at opnå en samlet U-værdi på henholdsvis $0,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ og $0,15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ fremgår af Tabel 7. Beregningerne inkluderer $0,045 \text{ m}$ træandel og er baseret på varmeledningsevner fra WUFI's materialedatabase: $0,034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ for mineraluldsisolering og $0,035 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ for træfiberisolering.

Tabel 7 - Beregnede isoleringstykkelser for valgte U-værdier

Isoleringstype:	U-værdi ($\text{W/m}^2\text{K}$):	Isoleringstykkel (m):
Træfiberisolering	0,10	$0,3755 + 0,045 = 0,4205$
Træfiberisolering	0,15	$0,2348 + 0,045 = 0,2798$
Mineraluld	0,10	$0,3773 + 0,045 = 0,4223$
Mineraluld	0,15	$0,2292 + 0,045 = 0,2742$

Eksempel på samlet U-værdiberegning

U-værdien er beregnet som den reciprokke af den samlede isolans, beregnet ved summering af isolansen for hvert materialeglag:

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

hvor

- R er isolansen [$\text{m}^2\cdot\text{K}/\text{W}$]
- d er lagets tykkelse [m]
- λ er lagets varmeledningsevne [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$]

Materialedata og beregnet isolans fremgår af Tabel 8. Beregningen er udført for en ydervæg med træfiberisolering og samlet U-værdi på $0,10 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$.

Tabel 8 - Beregning af U-værdi for ydervæg med træfiberisolering med en samlet U-værdi på 0,10 W/m²·K.

Træfiberisolering - U-værdi 0.1			
Materiale	Tykkelse, d [m]	Varmeledningsevne, λ [W/m·K]	Isolans, R [m²·K/W] R=d/ λ
Udvendig overgang			0.130
Vindspærre	0.0095	0.2000	0.048
Træfiber med konstruktionstræ	0.01	0.0453	0.221
Træfiber med konstruktionstræ	0.3755	0.0453	8.291
OSB/4-plade	0.015	0.1049	0.143
Træfiber med konstruktionstræ	0.045	0.0453	0.994
Fibergips	0.0125	0.3200	0.039
Indvendig overgang			0.130
Samlet isolans ΣR			9.995
U-værdi			0.1000

U-værdien beregnes som:

$$U = \frac{1}{\Sigma R} = \frac{1}{9,995 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}} \approx 0,10 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

4.2.3 Materialedata og Z-værdi

I simuleringerne er der anvendt materialedata fra WUFI's database, herunder varmeledningsevne (λ), densitet (ρ) og vanddampdiffusionstal (μ). Disse data danner grundlag for beregning af varme- og fugttransport i konstruktionen.

Alle lag i ydervægskonstruktionen er medtaget i simuleringerne. I analysen af Z-værdi er fokus rettet mod forholdet mellem vindspærren og tæthedspanet. Derfor er Z-værdien kun

systematisk varieret for disse to lag, mens øvrige materialer er anvendt med deres standard μ -værdier uden justering. Z-værdierne er beregnet ud fra de angivne μ -værdier i henhold til formelen i afsnit 3.1.3. Anvendte materialedata fremgår af Tabel 9.

Tabel 9 - Materialedata for relevante lag i simuleringerne

Materiale	λ [W/m·K]	ρ [kg/m ³]	μ [-]	Z-værdi [GPa·s·m ² /kg]
Beklædning: Scandinavian spruce transverse direction	0,13	420	50	Ikke omregnet
Ventileret hulrum: Air Layer 5 mm	0,047	0,999	0,79	Ikke omregnet
Ventileret hulrum: Air Layer 25 mm; without additional moisture capacity	0,155	0,999	0,51	Ikke omregnet
Vindspærren: Gypsumboard, exterior.	0,2	675	10,263158	0,5
Træfiberisolering: AiF Flexible Wood- Fiber Insulation WF	0,035	50	2	Ikke omregnet
Mineraluld: Mineral Plus HB 034	0,034	20	1,3	Ikke omregnet
Tæthedsplanet: AiF OSB 4	0,1049	595	65	5
Indvendig pladebeklædning: FERMACELL Gypsum-Fibreboard	0,32	1153	16	Ikke omregnet

4.3 Indledende parameterstudie med LIM-metoden

Som første vurderingsmetode er der gennemført et parameterstudie baseret på LIM-kurver i Excel. Udgangspunktet er WUFI-simuleringer, hvor dagsgennemsnit for temperatur og relativ luftfugtighed bag vindspærren er udtrukket og behandlet i Excel. De anvendte LIM-kurver og vurderingsresultater fremgår af Bilag 4.

Vurderingen er foretaget i henhold til kriterierne for fugtbelastningsklasse 3. Skimmelvækst vurderes påbegyndt, hvis grænsebetingelserne for sporespiring er overskredet inden for en glidende periode på 4, 8, 16 eller 30 døgn (Sedlbauer, 2001).

Der er gennemført systematiske variationer af Z-værdier for vindspærren og tæthedsplanet i konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering. Konstruktioner uden døgn overskridelser af nogen af de fire kurver i hele simuleringsperioden kategoriseres som fugtteknisk robuste. Analysen er udført under tre klimascenarier jf. afsnit 4.1.7.

Parameterstudiet viste, at konstruktionerne kunne godkendes i nutidigt og koldt fremtidigt klima, men ikke i det varme og fugtige fremtidsscenarie. Resultaterne afviger markant fra tidligere studier og vurderes ikke som repræsentative for realistisk skimmelrisiko. Afvigelsen tilskrives to forhold: (1) anvendelsen af ubrudte og ujusterede reelle klimadata frem for konstruerede referenceår og (2) vurdering af sporespiring på baggrund af timeværdier snarere end døgnmiddelværdier. Dette har i det varme scenarie medført højere simuleret fugtbelastning og udløst mere konservative vurderinger.

Flere studier har dokumenteret, at modellen kan overvurdere vækst under tidssvarende forhold og dermed give konservative resultater (Altamirano-Medina, et al., 2009) (Lepage, et al., 2019). LIM-metoden blev derfor vurderet som for konservativ til vurdering af fugtteknisk robusthed under realistiske, tidsvarierende klimabelastninger og blev ikke anvendt i de endelige vurderinger.

4.4 Hovedparameterstudie med WUFI Bio

På baggrund af de urealistisk konservative resultater fra parameterstudiet med LIM-kurver, jf. afsnit 4.3, er hovedparameterstudiet baseret på simuleringer i WUFI Bio. Der gennemføres systematiske simuleringer for kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet under de tre klimascenarier: nutidigt klima, et fremtidigt varmt og fugtigt klima, samt det hypotetisk AMOC-scenarie jf. afsnit 4.1.7.

Z-værdien for vindspærren varierer i diskrete trin: 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2, 2,5 og 3 GPa·s·m²/kg. Intervallet dækker den Z-værdi, som biobaserede materialer typisk har, når de anvendes som

vindspærre. For tæthedsplanet anvendes en stigende Z-værdi i intervallet 0–100 GPa·s·m²/kg. Simuleringerne afbrydes, når konstruktionen opfylder robusthedskriteriet, hvorefter der ikke foretages yderligere stigning i tæthedsplanets Z-værdi. Dette reducerer antallet af nødvendige simuleringer og muliggør præcis identifikation af grænseværdier. Trinbredden for tæthedsplanet er 1 GPa·s·m²/kg nær tærskelværdien.

Konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering vurderes separat, og kriteriet for fugtteknisk robusthed er, at skimmelindekset i WUFI Bio forbliver under 3 i hele simuleringsperioden, svarende til tærsklen for begyndende synlig vækst (Fraunhofer IBP, 2011) (Fraunhofer IBP, 2024b).

Inden simuleringerne importeres til WUFI Bio inspiceres temperatur- og fugtprofiler i modellen ved hjælp af funktionen *"Run Calculation with Film"* i WUFI Pro. Funktionen visualiserer varme- og fugttransport som en tidsafhængig animation og anvendes til kvalitativ vurdering af fugtphobning, startbetingelser og tørrepotentiale. Denne kontrol sikrer konsistent modeladfærd før beregning af skimmelindeks.

WUFI Bio anvendes med indstillinger tilpasset konstruktionens opbygning og materialevalg, jf. Tabel 10. Vurderingspunktet for skimmelvækst er placeret 6,817 cm fra yderkanten af beklædningen, hvilket svarer til 0,167 cm inde i isoleringslaget bag vindspærren. Da punktet er uden kontakt til indeluft, anvendes eksponeringsklassen *"Surfaces inside construction without direct contact to indoor air"* (Fraunhofer IBP, 2011).

Startbetingelsen for relativ luftfugtighed i sporen er sat til 0,80, svarende til den anvendte startbetingelse i WUFI Pro beskrevet i afsnit 4.1.6.

Substratklasse 1 anvendes i alle simuleringer, uanset isoleringstype. Træfiberisolering klassificeres som klasse 1 på grund af moderat næringspotentiale, mens mineraluldsisolering normalt vurderes som klasse 2. Da vurderingspunktet er placeret tæt ved en trækonstruktion (reglar), vurderes træets tilstedeværelse som bestemmende for vækstbetingelserne. Substratklasse 1 anvendes derfor konsekvent som konservativ forudsætning (Krus, et al., 2010) (Fraunhofer IBP, 2011).

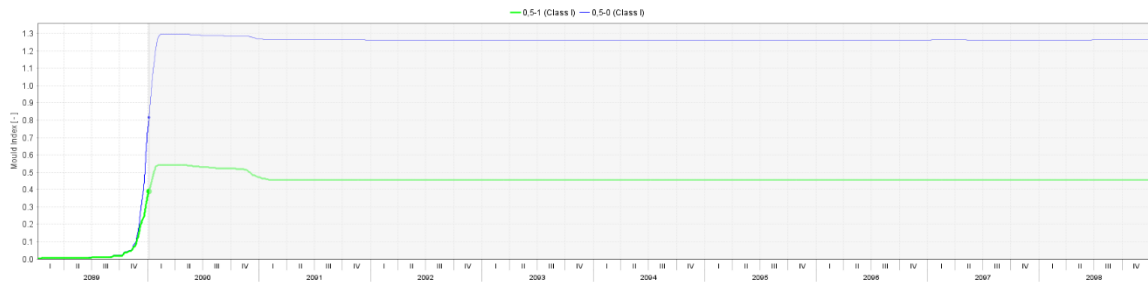
Tabel 10 - Modelindstillinger i WUFI Bio

Parameter:	Værdi:	Bemærkning:
Eksponeringsklasse	Overflader inde i konstruktionen uden direkte kontakt til indeluft	Ingen direkte påvirkning af brugere – dæmper vækstindikator (Fraunhofer IBP, 2019)
Startbetingelse: relativ luftfugtighed i sporen	0,80	Høj startværdi – giver konservativ vurdering (Sedlbauer, 2002)
Substratklasse	Klasse 1	Klasse 1 = moderat næringsgrundlag
Dybde af vurderingspunkt	0,06817 m	6,817 cm fra yderkant beklædning
Simuleringsstart – nutid	01-06-2014	Beregningsperiode: 10 år, hvoraf første 3 år er indkøringsfase
Simuleringsstart – fremtid	01-06-2089	Beregningsperiode: 10 år, hvoraf første 3 år er indkøringsfase

WUFI Bio anvender en teoretisk modelspore i millimeterskala, da faktiske skimmelsporer (2–10 µm) ligger uden for modellens geometriske opløsning. Sporens sorptionskurve og vanddampdiffusionsmodstand er kalibreret, så modellen reagerer realistisk på variationer i relativ luftfugtighed og fugtoverførsel.

4.4.1 Observation af stabilisering og skift i vurderingsmetode i WUFI Bio

Ved simuleringer med referenceår eller standardiserede klimafilere med gentagne årlige mønstre blev der observeret stabilisering i konstruktionens hygrotermiske forhold, efter at startbetingelserne var udlignet. Herefter forblev både temperatur og relativ luftfugtighed næsten uændrede, og det beregnede skimmelindeks i WUFI Bio udviklede sig uden yderligere variation. Figur 13 viser en typisk udvikling, hvor indekset stiger i starten og derefter forbliver konstant.

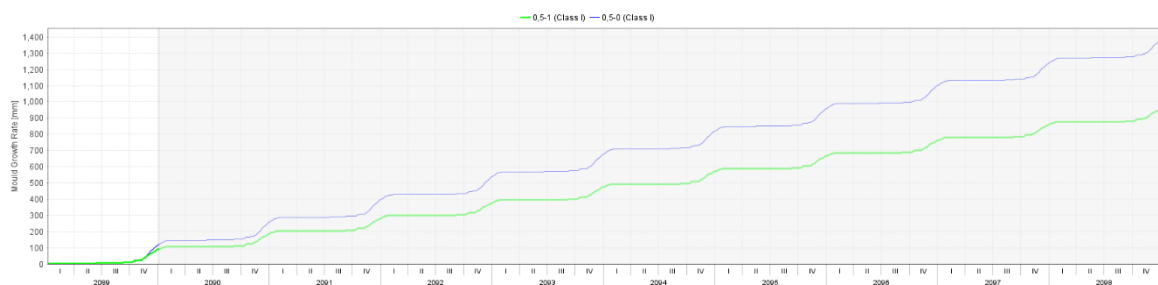


Figur 13 - Simulering med klimadata uden år-til-år-variation. Skimmelindeks stiger i starten og forbliver derefter uændret.

Denne udvikling skyldes, at WUFI Bio ikke reducerer det akkumulerede skimmelindeks under ugunstige betingelser. Ifølge modelbeskrivelsen stoppes væksten midlertidigt, når fugtindholdet i sporen falder under den kritiske tærskel, men indekset nulstilles ikke (Fraunhofer IBP, 2011). Med statiske inputdata vil skimmelvæksten derfor følge et ensartet mønster uden periodisk tørring, som ellers hæmmer vækst i virkelige konstruktioner.

Ved brug af klimafilere med reelle år-til-år-variationer blev denne stabilisering ikke observeret, hvilket bekræfter nødvendigheden af realistiske og tidsvariable klimadata i simuleringer med WUFI Bio.

I simuleringerne med klimadata fra Québec blev der observeret en lignende stabilisering. For at undgå fejlagtig vurdering af skimmelrisiko blev vurderingsmetoden her ændret fra skimmelindeks til mycelievækst målt i millimeter. Figur 14 viser den samme simulering, nu med vækstkurve i stedet for indeks.



Figur 14 - Mycelievækst under simuleret statisk fugtforløb. Vækst fortsætter jævnt i hele perioden.

Vurdering ud fra mycelievækst er baseret på Sedlbauers isoplethmodel og beregner væksthastighed som en kontinuerlig funktion uden øvre grænse. Metoden er anvendt i nærværende studie i

tilfælde, hvor skimmelindekset ikke anses som retvisende grundet klimadataenes begrænsede variation.

4.5 Sammenligning med statisk fugtregime

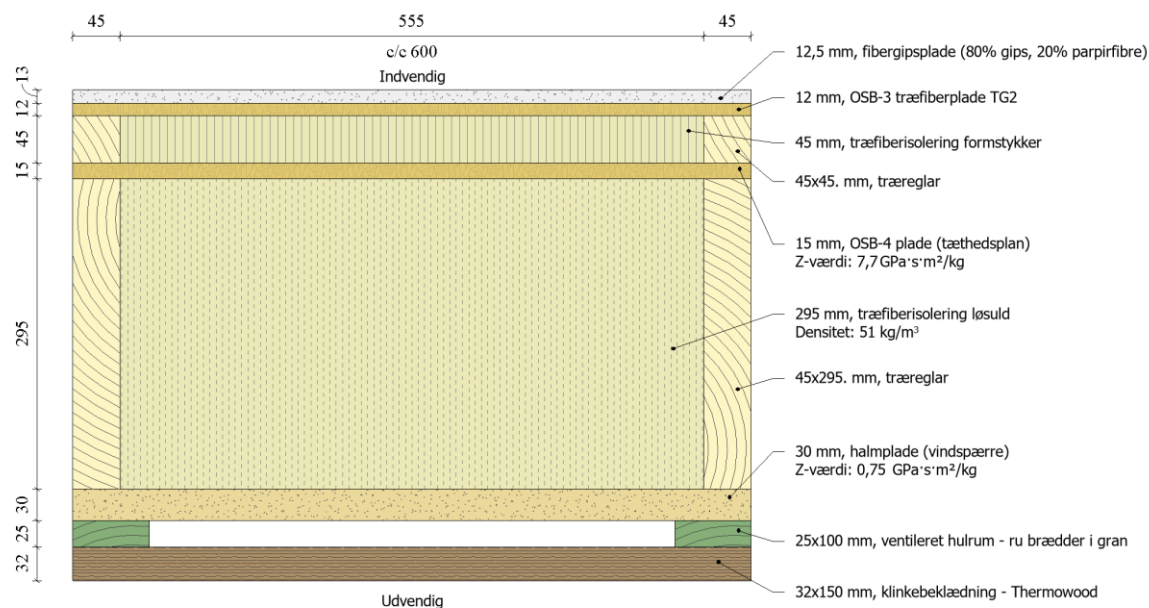
Dette delstudie undersøger, om konstruktioner, der opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3 i WUFI Bio-simuleringerne, ligeledes udviser tilstrækkelig fugtteknisk robusthed under påvirkning fra et statisk fugtregime baseret på laboratoriebelastning.

4.5.1 Forsøgsopbygning og konstruktion

Til vurdering af simuleringsresultaternes overensstemmelse med observerede fugtforhold anvendes måledata fra et statisk hotbox/coldbox-forsøg udført som en del af VIGOT-projektet. Forsøget er baseret på en kontrolleret laboratorieopstilling, hvor en ydervæg placeres mellem to klimakamre med konstante randbetingelser. Den indvendige side er eksponeret for 20 °C og en relativ luftfugtighed svarende til et konstant damptryk på 810 Pa, svarende til et fugttilskud på 6 g/m³ i forhold til udendørsluften, i overensstemmelse med fugtbelastningsklasse 3, jf. afsnit 3.2. Den udvendige side er eksponeret for lidt over 0 °C og 86 % relativ luftfugtighed.

Temperatur og relativ luftfugtighed registreres i udvalgte materialelag med henblik på vurdering af fugtniveau og fugtteknisk robusthed. Formålet er at undersøge, om konstruktionen opretholder et fugtniveau under kritiske tærskler for skimmelvækst under statiske betingelser.

Den analyserede konstruktion, VÆG 4, er opbygget med træfiberisolering (densitet 51 kg/m³), OSB/4 som tæthedspan (Z = 7,7 GPa·s·m²/kg) og en halmbaseret vindspærre (Z = 0,75 GPa·s·m²/kg). En teknisk oversigt over lagtykkelser og materialer fremgår af Figur 15. Den samlede U-værdi er beregnet til 0,1138 W/m²·K ud fra en samlet isolans på 8,784 m²·K/W. Beregningen fremgår af Bilag 1.



Figur 15 - Vandret snit af VÆG 4 fra VIGOT-projektets hotbox/coldbox-forsøg.

For at sikre entydig fugttransport gennem væggen blev top, bund og sider af elementerne forseglet med vådrumsmembran (LIP VS30), og de indvendige flader blev tapet før forsegling. Denne afgrænsning forhindrede damptransport gennem elementets randzoner og øgede datasættets anvendelighed som sammenligningsgrundlag. Forseglingen er dokumenteret i Figur 16.



Figur 16 - Hotbox/coldbox-forsøg: Testelementer med vådrumsforsegling og tapet samlinger (Rasmussen, T. V. personlig kommunikation, 10. april 2025).

4.5.2 Randbetingelser og måledata

VÆG 4 blev udsat for den kontrollerede fugtpåvirkning beskrevet i afsnit 4.5.1. Belastningen blev opretholdt i tre måneder som repræsentation af en typisk vinterperiode i Danmark.

Sensorer til måling af relativ luftfugtighed og temperatur blev placeret bag vindspærren i tre højder. Måledata fra det midterste niveau anvendes i analysen, da dette forløb er stabilt og vurderes repræsentativt for væggen fugtpåvirkning.

4.5.3 Databehandling og klimaprofil til simulering

Måledataene er modtaget som døgnmiddelværdier for temperatur og relativ luftfugtighed. Datasættet dækker forsøgsperioden på tre måneder. For at anvende det som klimaprofil i WUFI Pro er værdierne lineært interpoleret til timetrin.

4.5.4 Fluktuationer i måledata

Datasættet indeholder enkelte udsving i målt temperatur og relativ luftfugtighed, som kan henføres til forstyrrelser i forsøgsopstillingen, herunder tærede kølerør og ventilationsfejl. Udsvingene vurderes ikke at afspejle konstruktionens fugtdynamik og indgår derfor ikke i analysen. Den resterende dataserie udviser et stabilt forløb og anvendes direkte i simuleringerne (Rasmussen, T. V. personlig kommunikation, 9. april 2025).

4.5.5 Udvalgelse af konstruktioner til sammenligning

Sammenligningen omfatter konstruktioner, der i hovedparameterstudiet er vurderet som fugtteknisk robuste under alle tre klimascenarier. Disse konstruktioner videreføres til sammenligning med forsøgsdata under statisk fugtbelastning.

4.6 Sammenligning af fugtforløb ved statisk belastning

De konstruktioner, der i hovedparameterstudiet er vurderet som fugtteknisk robuste under alle tre klimascenarier, beregnes i WUFI Pro med det statiske fugtregime fra hotbox/coldbox-forsøget som klimabelastning. Øvrige simuleringsparametre fastholdes i overensstemmelse med hovedparameterstudiet.

Fugtforløb bag vindspærren sammenlignes med forsøgets måledata for identisk vurderingspunkt. Der opstilles kurver for fire klimabelastninger: nutidigt klima, varmt og fugtigt fremtidsscenarie, hypotetisk AMOC-scenarie samt det statiske fugtregime fra forsøget.

4.7 Samlet overblik over simuleringssomfang

Der er i alt gennemført ca. 760 simuleringer i WUFI Pro, fordelt på ca. 90 vurderinger med LIM-metoden og ca. 670 dynamiske vurderinger med WUFI Bio. Dertil er udført ca. 50 supplerende simuleringer til analyse af varmeledningsevne og isoleringstykkelse ved anvendelse af træfiberisolering. Simuleringerne er baseret på i alt 121 forskellige WUFI-modeller, hvis navngivning og parametre fremgår af Bilag 3.

5 Analyse og resultater

Dette kapitel præsenterer resultaterne fra de dynamiske simuleringer i WUFI Pro med vurdering af skimmelrisiko i WUFI Bio samt sammenligningen med måledata fra VIGOT-projektets hotbox/coldbox-forsøg. Analyserne er struktureret efter isoleringstype, U-værdi og klimabelastning, med fokus på skimmelindeks og kombinationer af Z-værdi i vindspærren og tæthedsplanet. Efter hovedparameterstudiet følger en sammenstilling med statisk fugtregime og en samlet vurdering på tværs af materialer.

5.1 Vurderingskriterier og modellerede kombinationer

Fugtteknisk robusthed vurderes ud fra det maksimale skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren. En konstruktion betragtes som fugtteknisk robust, hvis den overholder acceptkriteriet angivet i afsnit 4.4.

Analysen omfatter ydervægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering samt to U-værdier: 0,10 og 0,15 W/m²K. For hver kombination vurderes nødvendigt forhold mellem Z-værdi i vindspærren og tæthedsplanet under tre klimascenarier, jf. afsnit 4.1.7.

Hovedresultaterne er baseret på en fast Z-værdi i vindspærren på 0,5, 0,75, 1, 1,5, 2, 2,5 og 3 GPa·s·m²/kg og en tilhørende Z-værdi i tæthedsplanet, der samlet sikrer et skimmelindeks under 3.

5.2 Dynamiske simuleringer – træfiberisolering

WUFI Pro er anvendt til simulering af temperatur- og fugtforløb i ydervægge med træfiberisolering. Resultaterne er vurderet i WUFI Bio under tre klimascenarier med skimmelindeks under 3 som acceptkriterium. Der er simuleret for U-værdier på 0,10 og 0,15 W/m²K samt varierende kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet. I dette kapitel vises kun resultater for konstruktioner med en Z-værdi på 0,5 GPa·s·m²/kg i vindspærren. Øvrige kombinationer fremgår af Bilag 5.

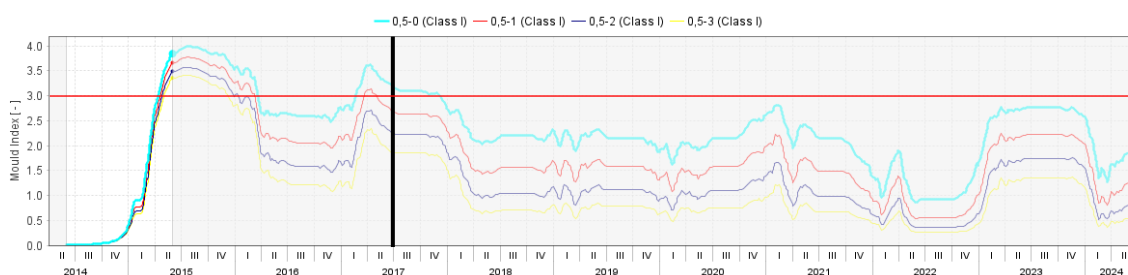
5.2.1 Resultater U-værdi 0,10 W/m²K

Simuleringerne viser skimmelindeks for konstruktioner med træfiberisolering og en U-værdi på 0,10 W/m²K ved en fast Z-værdi i vindspærren på 0,5 GPa·s·m²/kg. Resultaterne fremgår af de følgende figurer og vurderes for hver klimabelastning.

Nutidigt klima

Figur 17 viser det simulerede skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren under nutidigt klima (2014–2024), baseret på faktisk målte klimadata fra Sjælsmark (DMI, 2025).

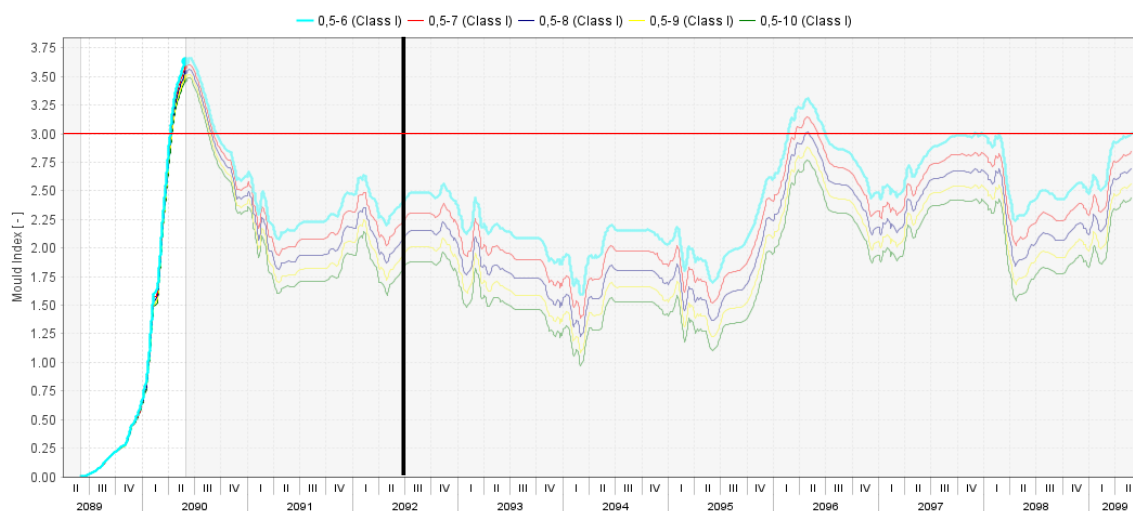
Konstruktionen med $Z = 0$ i tæthedsplanet overskrider tærskelværdien for skimmelindeks allerede i den første vinter. Ved $Z = 1$ reduceres væksten, men indekset forbliver over grænseværdien. Først ved $Z = 2$ og $Z = 3$ forbliver skimmelindekset under tærsklen gennem hele simuleringsperioden.



Figur 17 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren = $0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser skimmelindeks for fire Z -værdier i tæthedsplanet: 0, 1, 2 og 3 $\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Rød vandret linje angiver tærskelværdi for skimmelindeks = 3. Sort lodret streg markerer afslutning på treårig indkøringsperiode.

Fremtidigt varmt og fugtigt klima

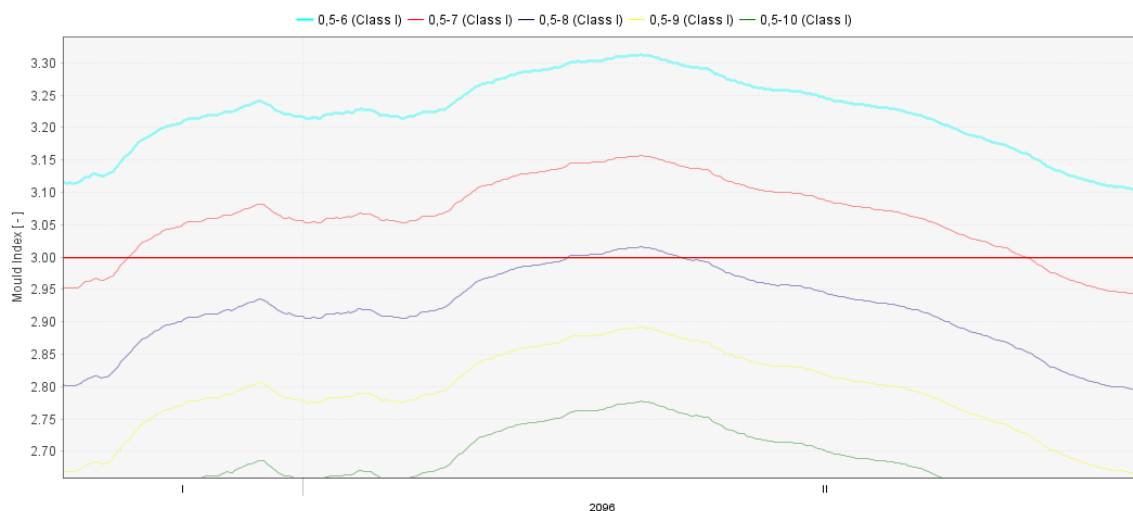
Figur 18 viser det simulerede skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren under det fremskrevne varme og fugtige klima (2089–2099), baseret på klimadata fra Taastrup under A1B-scenariet (Fraunhofer IBP, 2025). Konstruktionerne med Z -værdier i tæthedsplanet på 6, 7 og 8 overskrider tærskelværdien. Først ved $Z = 9$ og $Z = 10$ forbliver skimmelindekset under 3 i hele perioden.



Figur 18 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren = $0,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser skimmelindeks for fem Z -værdier i tæthedsplanet: 6, 7, 8, 9 og $10 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$. Rød vandret linje angiver tærskelværdi for skimmelindeks = 3. Sort lodret streg markerer afslutning på træårig indkøringsperiode.

WUFI Bios zoomfunktion er anvendt til detaljeret inspektion af kurver tæt på tærskelværdien.

Figur 19 viser, at konstruktionen med $Z = 8$ overskrider grænsen kortvarigt i 2096.

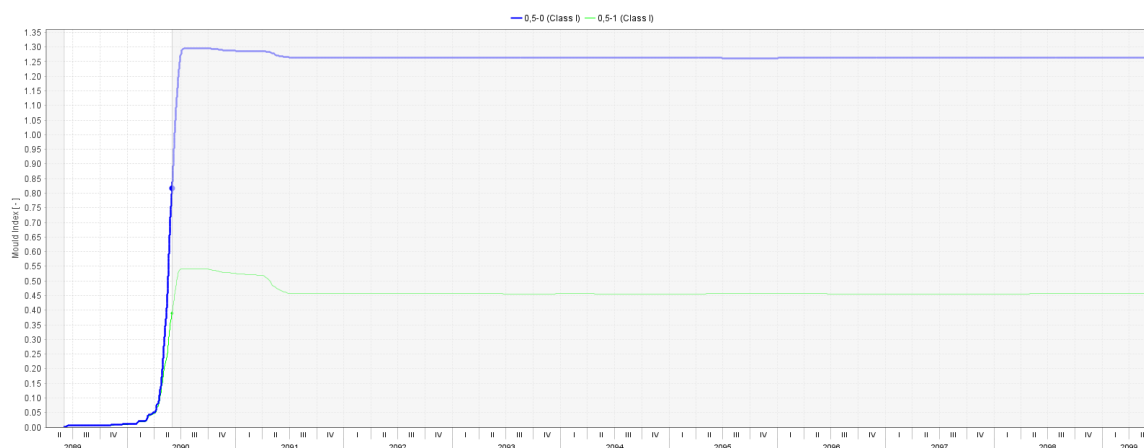


Figur 19 - Udsnit fra Figur 18 med zoom på kurveforløbet i 2096. Flere kurver nærmer sig tærskelværdien for skimmelindeks = 3. Zoomfunktionen i WUFI Bio anvendes til vurdering af, om tærskelværdien overskrides.

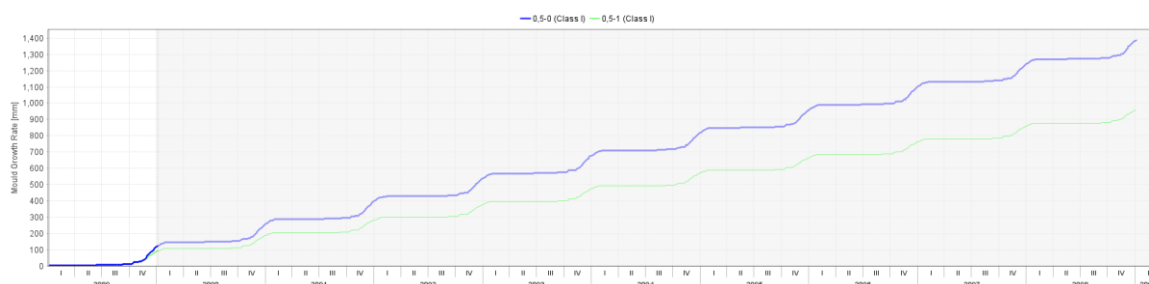
Fremtidigt koldt klima (AMOC-scenariet)

Figur 20 og Figur 21 viser resultaterne fra WUFI Bio for det hypotetiske kolde klimascenarie baseret på klimadata fra Québec (2089–2099) (Oak Ridge National Laboratory, 2011).

Klimadataene er statiske og uden naturlig år-til-år-variation, hvilket medfører ensartede fugtforhold og en lineær vækstprofil i modellen. I disse tilfælde anvendes ikke skimmelindeks som vurderingsparameter, men i stedet den akkumulerede mycelievækst i millimeter. Fremgangsmåden er beskrevet i afsnit 4.4.1.



Figur 20 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med AMOC-scenariet (2089–2099). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser skimmelindeks for to Z -værdier i tæthedsplanet: 0 og $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Da væksten fortsætter lineært uden variation, anvendes Figur 21 til vurdering af fugttechnisk robusthed.



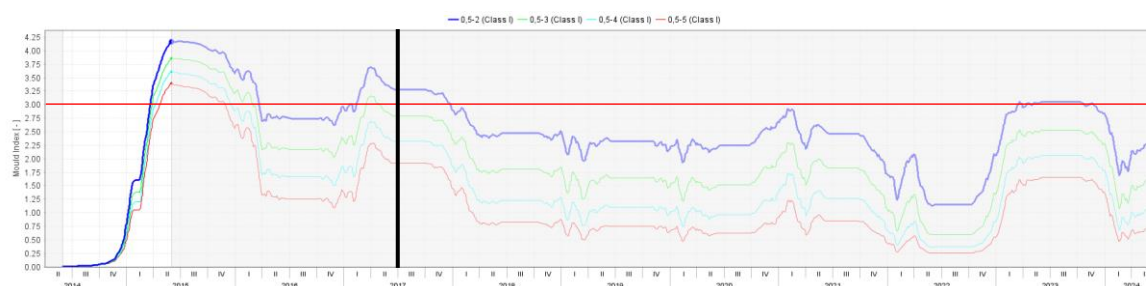
Figur 21 - Simuleret mycelievækst i vurderingspunktet bag vindspærren under AMOC-scenariet (2089–2099). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser to Z -værdier i tæthedsplanet: 0 og $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Begge konstruktioner holder sig under vurderingsgrænsen på 2390 mm.

5.2.2 Resultater U-værdi 0,15 W/m²K

Simuleringerne viser skimmelindeks for konstruktioner med træfiberisolering og en U-værdi på 0,15 W/m²K ved en fast Z-værdi i vindspærren på 0,5 GPa·s·m²/kg. Resultaterne fremgår af de følgende figurer og vurderes for hver klimabelastning.

Nutidigt klima

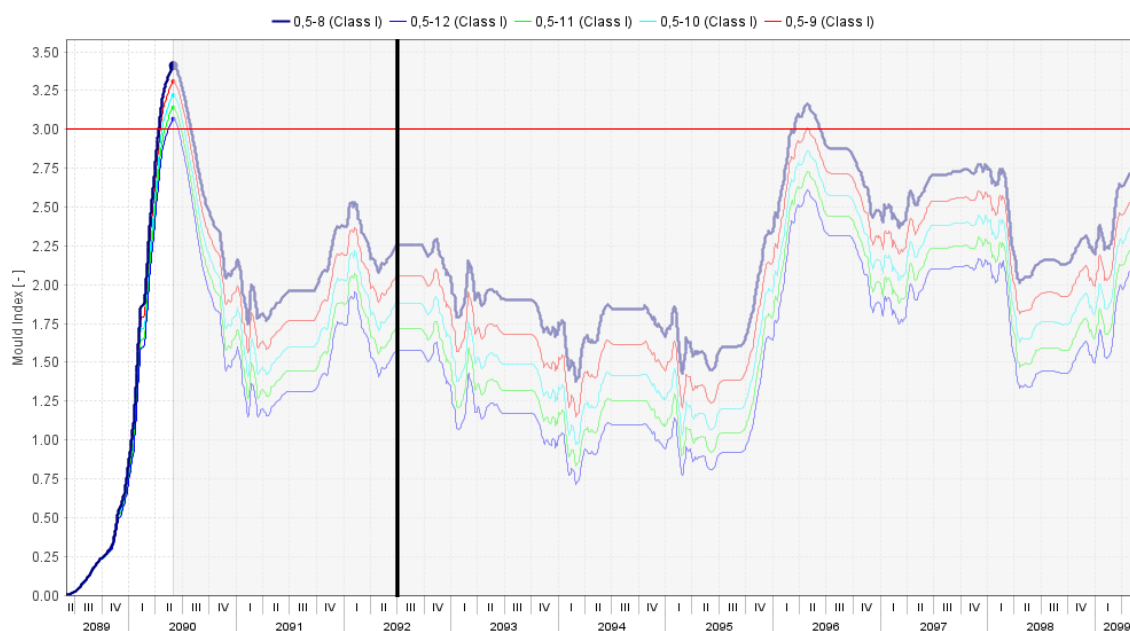
Figur 22 viser det simulerede skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren under nutidigt klima (2014–2024), baseret på faktisk målte klimadata fra Sjælsmark (DMI, 2025). U-værdi 0,15 W/m²K og Z-værdi for vindspærren på 0,5 GPa·s·m²/kg, mens Z-værdien i tæthedsplanet varierer fra 2 til 5. Konstruktionen med Z = 2 overskrider tærskelværdien allerede i den første vinter, mens de øvrige forløb forbliver under grænsen. Der ses generelt højere skimmelindeks sammenlignet med simuleringen ved U-værdi 0,10 W/m²K.



Figur 22 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024). Konstruktion med træfiberisolering, U = 0,15 W/m²K, og Z-værdi i vindspærren = 0,5 GPa·s·m²/kg. Kurverne viser fire Z-værdier i tæthedsplanet: 0, 1, 2 og 3 GPa·s·m²/kg. Rød vandret linje angiver tærskelværdi for skimmelindeks = 3. Sort lodret streg markerer afslutning på treårig indkøringsperiode.

Fremtidigt varmt og fugtigt klima

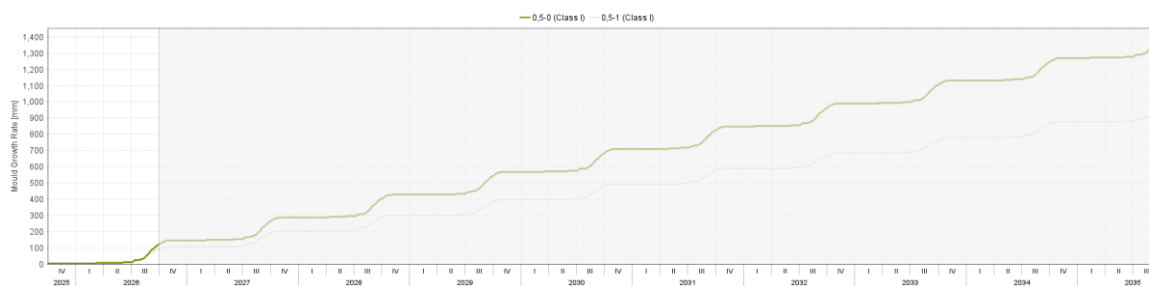
Ved fremskrevet klima (2089–2099) ses generelt højere skimmelindeks end under nutidigt klima. Figur 23 viser resultaterne for konstruktionen med træfiberisolering, U-værdi 0,15 W/m²K og Z-værdi i vindspærren på 0,5 GPa·s·m²/kg. Tæthedsplanet er simuleret med Z-værdier fra 8 til 12 GPa·s·m²/kg. Konstruktionerne med Z = 8 og Z = 9 overskrider tærskelværdien for skimmelindeks, mens forløbene med Z = 10, 11 og 12 forbliver under grænsen gennem hele perioden.



Figur 23 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser fem Z -værdier i tæthedetsplanet: 8, 9, 10, 11 og $12 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Rød vandret linje angiver tærskelværdi for skimmelindeks $= 3$. Sort lodret streg markerer afslutning på træårig indkøringsperiode.

Fremtidigt koldt klima (AMOC-scenariet)

Ved simuleringer med klimadata fra Québec (2089–2099) baseres vurderingen på mycelievækst i millimeter. Baggrunden for metodevalget er beskrevet i afsnit 4.4.1. Figur 24 viser resultaterne for konstruktionen med træfiberisolering, U -værdi $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og Z -værdi i vindspærren på $0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Tæthedetsplanet er simuleret med Z -værdier på 0 og $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Væksten forbliver under 1000 mm over 10 år, svarende til $100 \text{ mm}/\text{år}$.



Figur 24 - Mycelievækst i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med AMOC-scenariet (2089–2099). Konstruktion med træfiberisolering, $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z -værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser to Z -værdier i tæthedetsplanet: 0 og $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

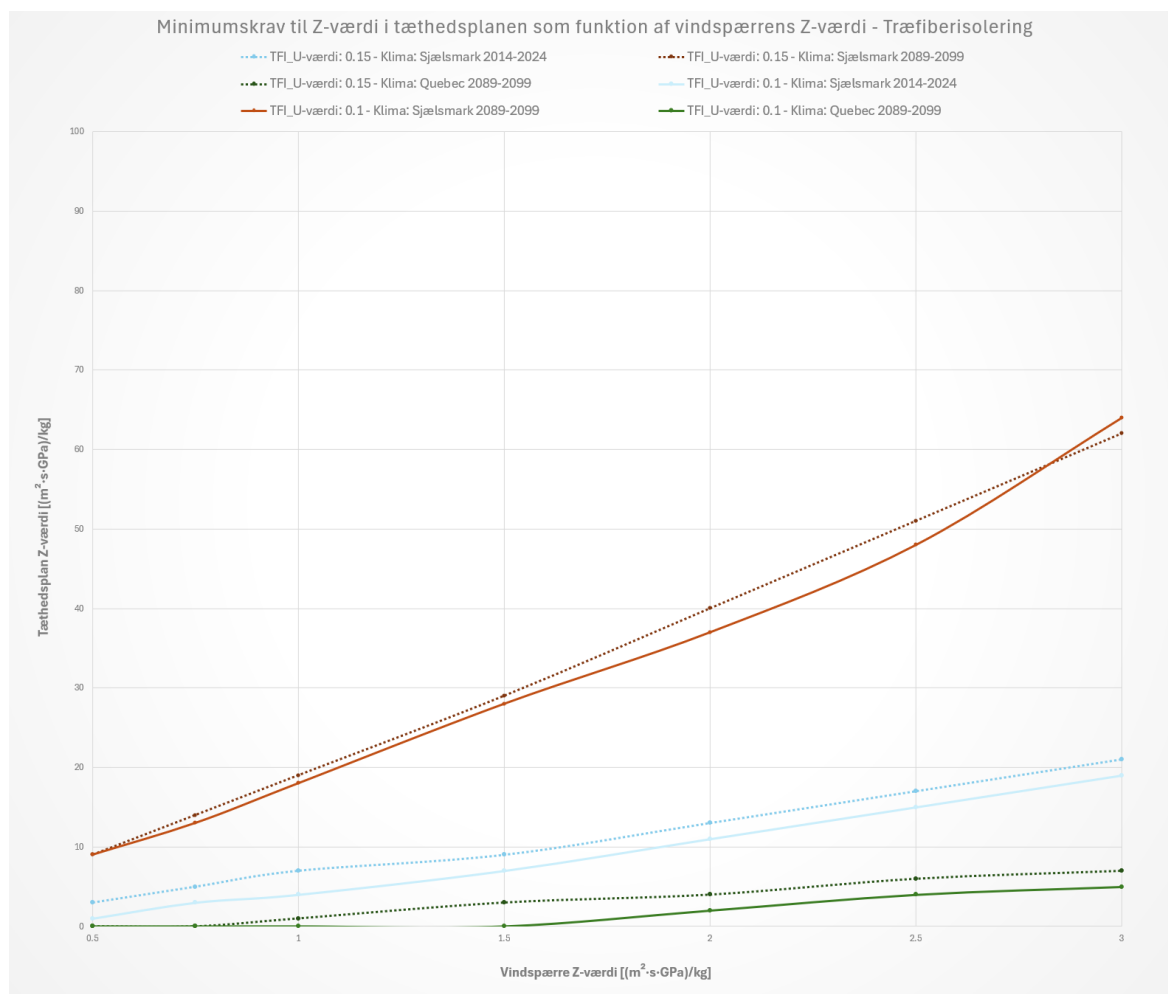
5.2.3 Delkonklusion: Træfiberisoleirng

Fugtsimuleringer i WUFI og efterfølgende vurdering af skimmelrisiko i WUFI Bio viser, at konstruktioner med træfiberisolering generelt opnår lavere skimmelindeks ved lavere U-værdi. Resultaterne viser således, at øget isoleringstykkelse og forskydning af dugpunktet ikke nødvendigvis forringer fugtteknisk robusthed.

De nødvendige kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet varierer markant med både klimabelastning og isoleringstykkelse. Under nutidigt klima kræves et Z-værdi-forhold mellem tæthedsplan og vindspærre på ca. 1/4 ved $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ og 1/6 ved $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ for at opnå skimmelindeks under 3. Under fremtidigt varmt og fugtigt klima øges kravene til ca. 1/20 ved $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ og 1/24 ved $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

I AMOC-scenariet vurderes fugtteknisk robusthed ud fra beregnet mycelievækst i WUFI Bio. Konstruktioner med $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ opfylder acceptkriteriet uden tæthedsplan, selv ved $Z = 1,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ i vindspærren. Ved $U = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ er et tæthedsplan nødvendigt ved $Z = 1,0 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ i vindspærren.

Resultaterne indikerer, at kravene til Z-værdien i tæthedsplanet er klimabetingede og afhænger af væggens samlede opbygning. Figur 25 viser de laveste tilladelige Z-værdier i tæthedsplanet, der opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3.



Figur 25 - Minimumskrav til Z-værdi i tæthedspanen som funktion af vindspærrens Z-værdi. Kurverne viser den laveste Z-værdi i tæthedspanen, der opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3 i WUFI Bio, for konstruktioner med træfiberisolering. Resultaterne er vist for to U-værdier og tre klimascenarier.

5.3 Dynamiske simuleringer – mineraluldsisolering

WUFI Pro er anvendt til simulering af temperatur- og fugtforløb i ydervægge med mineraluldsisolering. Resultaterne er vurderet i WUFI Bio under tre klimascenarier med skimmelindeks under 3 som kriterium. Der er simuleret for U-værdier på 0,10 og 0,15 W/m²K samt varierende kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet.

5.3.1 Resultater U-værdi 0,10 W/m²K

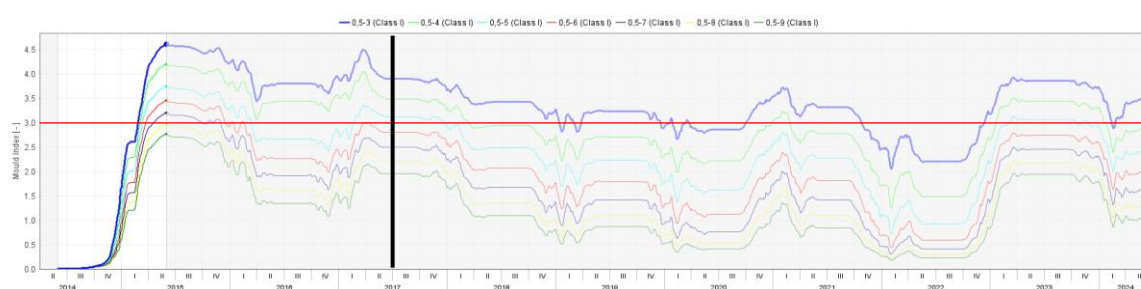
Simuleringerne viser skimmelindeks for konstruktioner med mineraluldsisolering og en U-værdi på 0,10 W/m²K ved en fast Z-værdi i vindspærren på 0,5 GPa·s·m²/kg. Resultaterne fremgår af de følgende figurer og vurderes for hver klimabelastning.

Nutidigt klima

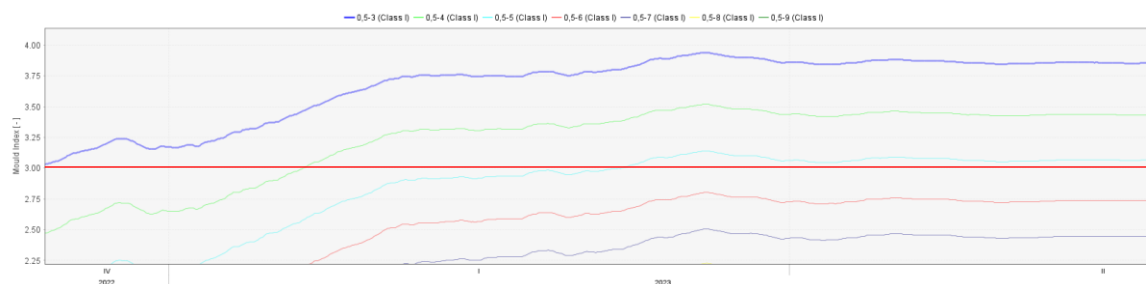
Figur 26 viser skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024), baseret på faktisk målte klimadata fra Sjælsmark (DMI, 2025).

Konstruktioner med tæthedsplanets Z-værdi under 6 GPa·s·m²/kg overskrider tærskelværdien for skimmelindeks efter den treårige indkøringsperiode. Først ved Z = 6 forbliver indekset under grænsen i hele simuleringsperioden.

Indekset toppes typisk i 2015–2016 og udviser herefter år-til-år-variation. Indkøringsperioden er markeret i grafen og medregnes ikke i vurderingen.



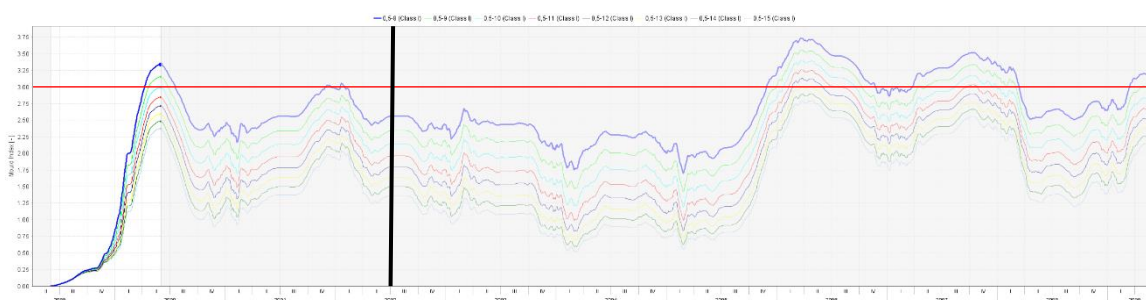
Figur 26 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024). Konstruktion med mineraluldsisolering, $U = 0,10$ W/m²K, og Z-værdi i vindspærren = 0,5 GPa·s·m²/kg. Kurverne viser fem Z-værdier i tæthedsplanet: 3, 4, 5, 7, 8 og 9 GPa·s·m²/kg. Rød vandret linje angiver tærskelværdi for skimmelindeks = 3. Sort lodret streg markerer afslutning på treårig indkøringsperiode.



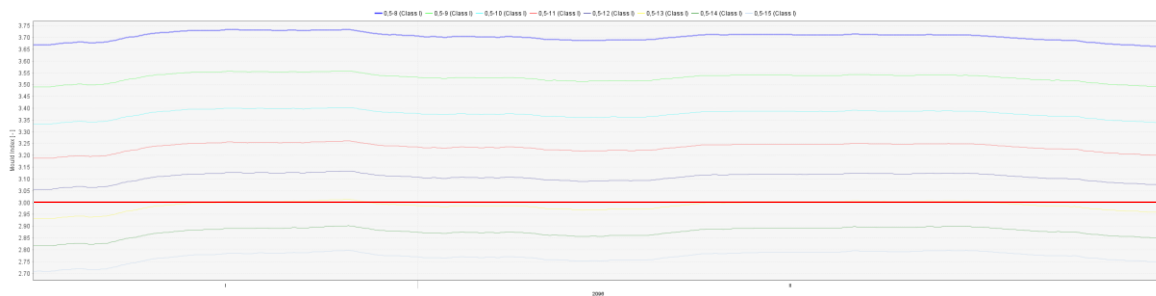
Figur 27 - Udsnit af Figur 26 med zoom på vurderingsperioden i 2023. WUFI Bios zoomfunktion er anvendt til inspektion tæt på tærskelværdien. Konstruktioner med Z-værdi i tæthedsplanet på 5 eller lavere overskrider tærsklen. Konstruktioner med Z-værdi på 6 eller højere forbliver under grænsen.

Fremtidigt varmt og fugtigt klima

Figur 28 viser skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099), baseret på fremskrevne klimadata fra Taastrup (Fraunhofer IBP, 2025). Konstruktioner med tæthedsplanets Z-værdi fra 8 til 13 $\text{GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ overskrider tærskelværdien for skimmelindeks. Først ved $Z = 14$ og $Z = 15$ forbliver indekset under grænsen i hele simuleringssperioden. Den mest markante vækst ses i årene 2096–2098.



Figur 28 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099). Konstruktion med mineraluldsisolering, $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, og Z-værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser Z-værdier i tæthedsplanet fra 8 til 15 $\text{GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$. Kun $Z = 14$ og $Z = 15$ forbliver under tærskelværdien for skimmelindeks = 3.



Figur 29 - Udsnit af Figur 28 med zoom på vurderingsperioden 2006. WUFI Bios zoomfunktion er anvendt til inspektion tæt på tærskelværdien. Konstruktioner med Z-værdi i tæthedsplanet på 13 eller lavere overskrider tærsklen. Konstruktioner med Z-værdi på 14 eller 15 forbliver under grænsen.

Fremtidigt koldt klima (AMOC-scenarie)

Figur 30 viser simuleret skimmelvækst under det fremskrevne kolde og fugtige klima (2089–2099), baseret på klimadata fra Québec (Oak Ridge National Laboratory, 2011). Konstruktioner med tæthedsplanets Z-værdi på 0 eller $1 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$ forbliver under vurderingsgrænsen i hele simuleringsperioden. Ved $Z = 0$ akkumuleres en mycelievækst på ca. 2190 mm, og ved $Z = 1$ ca. 1700 mm.



Figur 30 - Mycelievækst i vurderingspunktet bag vindspærren. AMOC-scenarie (2089–2099). Konstruktion med mineraluldsisolering, $U = 0,10 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$. Vindspærre med $Z = 0,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$. Kurverne viser tæthedsplan med $Z = 0$ og $1 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$.

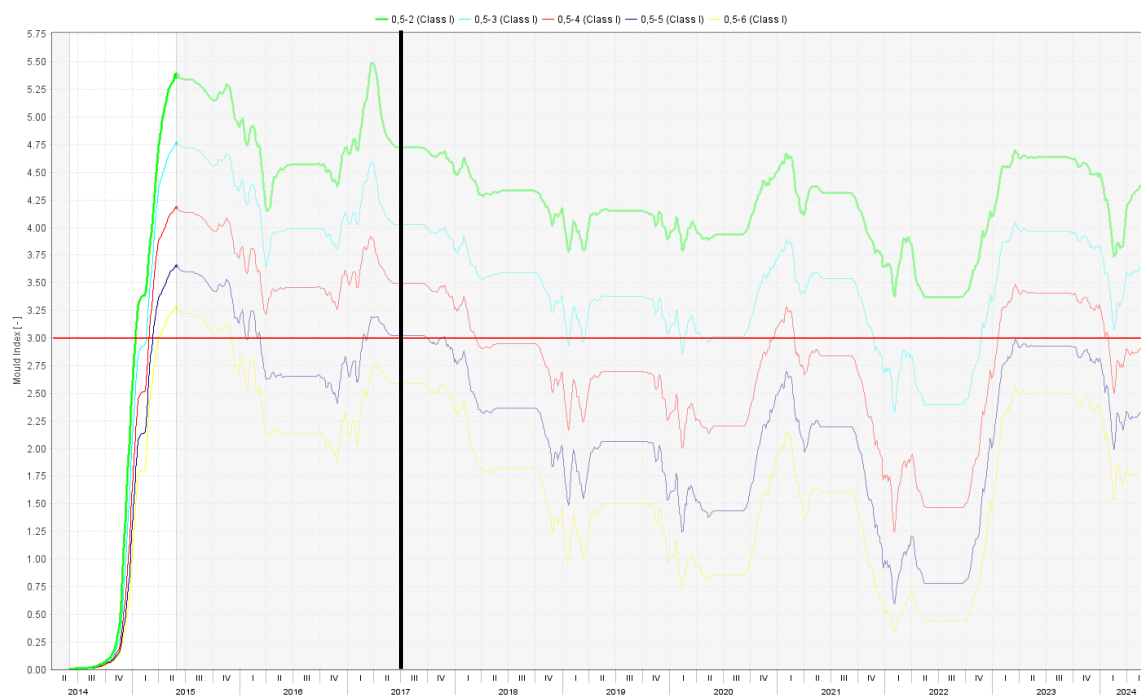
5.3.2 Resultater U-værdi $0,15 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$

Simuleringerne viser skimmelindeks for konstruktioner med mineraluldsisolering og en U-værdi på $0,15 \text{ W} / \text{m}^2 \text{K}$ ved en fast Z-værdi i vindspærren på $0,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$. Resultaterne fremgår af de følgende figurer og vurderes for hver klimabelastning.

Nutidigt klima

Figur 31 viser skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024), baseret på faktisk målte klimadata fra Sjælsmark (DMI, 2025).

Konstruktioner med tæthedspanets Z -værdi fra 2 til 5 $\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ overskrider tærskelværdien for skimmelindeks i perioden 2017–2024. Kun ved $Z = 6$ forbliver indekset under grænsen i hele simuleringssperioden. Ved $Z = 2$ overstiger indekset 5 allerede i første vinter og fortsætter med vækst gennem hele perioden.



Figur 31 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med nutidigt klima (2014–2024). Konstruktion med mineraluldisisolering, U -værdi = $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og Z -værdi for vindspærren = $0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser tæthedspan med $Z = 2\text{--}6 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kun konstruktionen med $Z = 6$ forbliver under tærskelværdien for skimmelindeks = 3.

Fremtidigt varmt og fugtigt klima

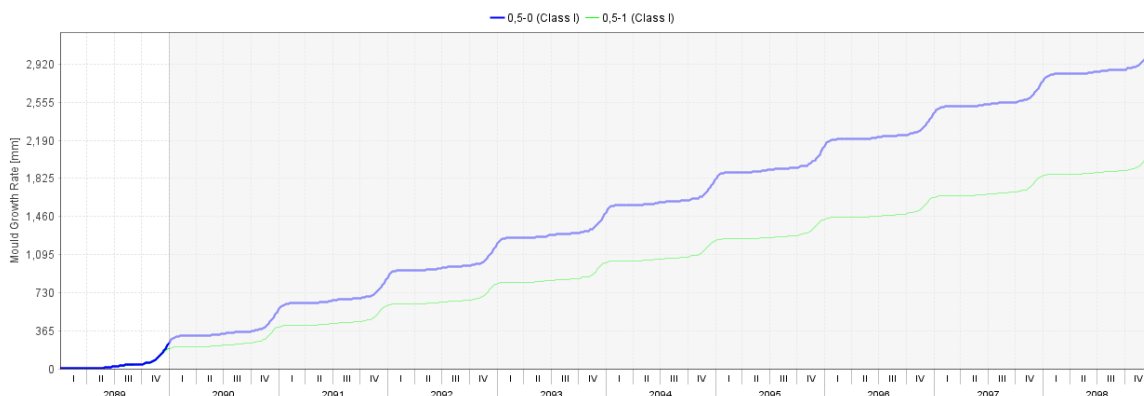
Figur 32 viser skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099), baseret på fremskrevne klimadata fra Taastrup (Fraunhofer IBP, 2025). Konstruktioner med tæthedspanets Z -værdi fra 8 til 9 $\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ overskrider tærskelværdien for skimmelindeks. Ved $Z = 10$ ligger indekset tæt på grænsen, mens $Z = 11$ og $Z = 12$ forbliver under tærsklen i hele simuleringssperioden. Den mest markante vækst ses i årene 2095–2098.



Figur 32 - Skimmelindeks i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med fremtidigt varmt og fugtigt klima (2089–2099). Konstruktion med mineraluldsisolering, $U\text{-værdi} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $Z\text{-værdi for vindspærren} = 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser tæthedsplan med $Z = 8\text{--}12 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kun konstruktioner med $Z = 11$ og $Z = 12$ forbliver under tærskelværdien for skimmelindeks = 3.

Fremtidigt koldt klima (AMOC-scenarie)

Figur 33 viser simuleret skimmelvækst under det fremskrevne kolde og fugtige klima (2089–2099), baseret på klimadata fra Québec (Oak Ridge National Laboratory, 2011). Konstruktioner med tæthedsplanets $Z\text{-værdi}$ på 0 eller $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ forbliver under vurderingsgrænsen i hele simuleringsperioden. Ved $Z = 0$ akkumuleres en mycelievækst på ca. 1380 mm, og ved $Z = 1$ ca. 1060 mm.



Figur 33 - Mycelievækst i vurderingspunktet bag vindspærren ved simulering med AMOC-scenariet (2089–2099). Konstruktion med mineraluldsisolering, $U\text{-værdi} = 0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $Z\text{-værdi for vindspærren} = 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Kurverne viser tæthedsplan med $Z = 0$ og $1 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

5.3.3 Delkonklusion: Mineraluld

Fugtsimuleringer i WUFI og efterfølgende vurdering af skimmelrisiko i WUFI Bio viser, at konstruktioner med mineraluldisolering kræver højere Z -værdier i tæthedsplanet end tilsvarende konstruktioner med træfiberisolering for at opnå tilfredsstillende fugtteknisk robusthed.

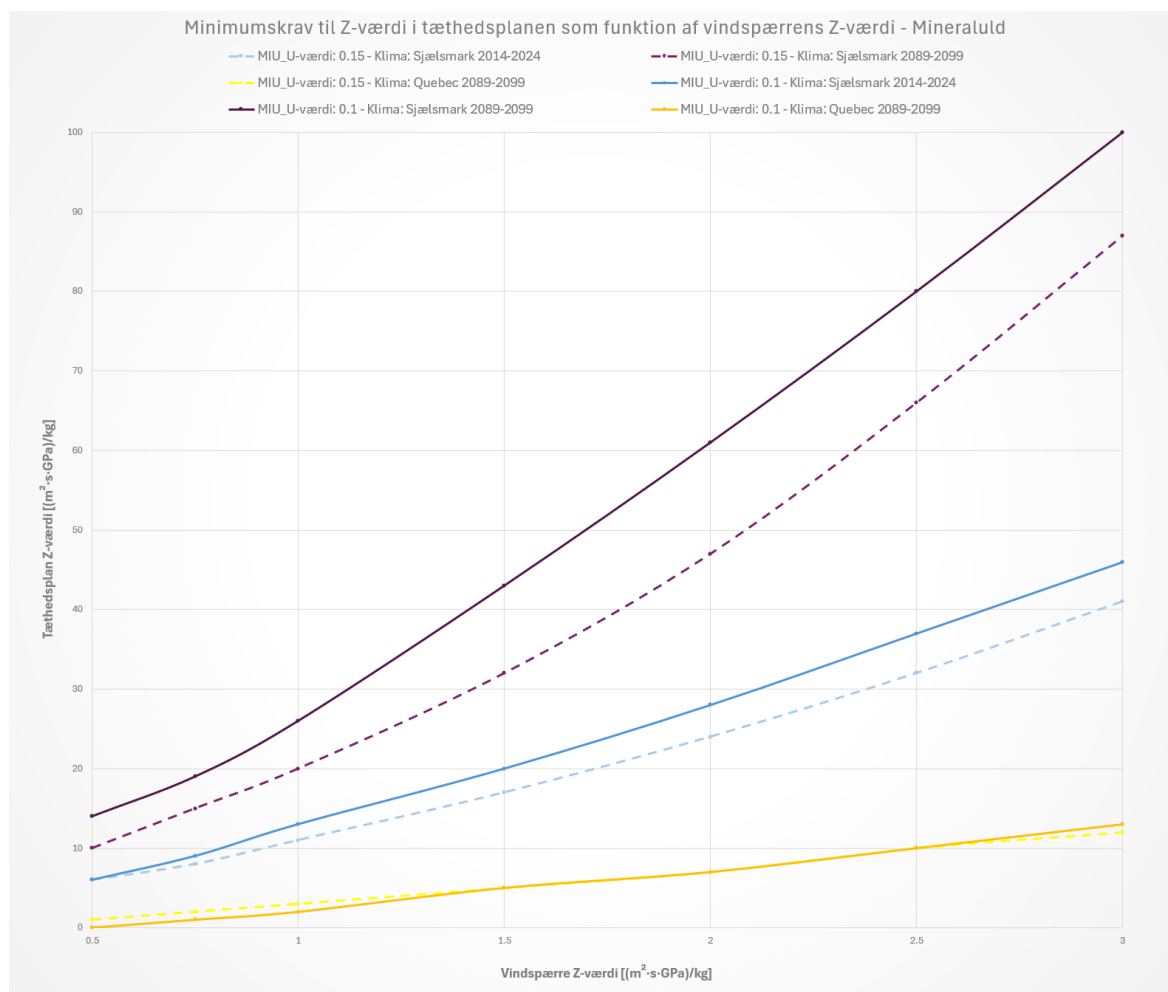
Ved nutidigt klima kræves en Z -værdi i tæthedsplanet på ca. $6 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ for at holde skimmelindekset under 3, uanset om U -værdien er 0,10 eller $0,15 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Det svarer til et Z -værdi-forhold mellem vindspærren og tæthedsplanet på $1/12$.

Under fremtidigt varmt og fugtigt klima skærpes kravene markant. For konstruktioner med vindspærre $Z = 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ kræves $Z = 14$ i tæthedsplanet ved $U = 0,10 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ (forhold ca. $1/28$) og $Z = 11$ ved $U = 0,15 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$ (forhold ca. $1/22$).

I AMOC-scenariet forbliver skimmelvæksten moderat. Konstruktioner med tæthedsplan $Z = 0$ og $Z = 1$ overskrider ikke vurderingsgrænsen, når vindspærren har $Z = 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$.

I modsætning til træfiberisolering viser mineraluldisolering en klassisk tendens, hvor lavere U -værdi medfører lavere temperatur ved vindspærren og dermed øget relativ luftfugtighed og højere skimmelrisiko. Effekten forstærkes under varmt og fugtigt klima.

Resultaterne indikerer, at konstruktioner med mineraluldisolering generelt kræver en højere Z -værdi i tæthedsplanet for at opretholde fugtteknisk robusthed under klimabelastning. Figur 34 viser de laveste tilladelige Z -værdier i tæthedsplanet for hver kombination af klimascenarie og U -værdi.



Figur 34 - Minimumskrav til Z-værdi i tæthedspanet som funktion af vindspærrens Z-værdi. Kurverne viser den laveste Z-værdi i tæthedspanet, der opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3 (eller mycelievækst under 2390 mm ved AMOC-scenarie) for konstruktioner med mineraluldsisolering. Resultaterne er vist for to U-værdier og tre klimascenarier.

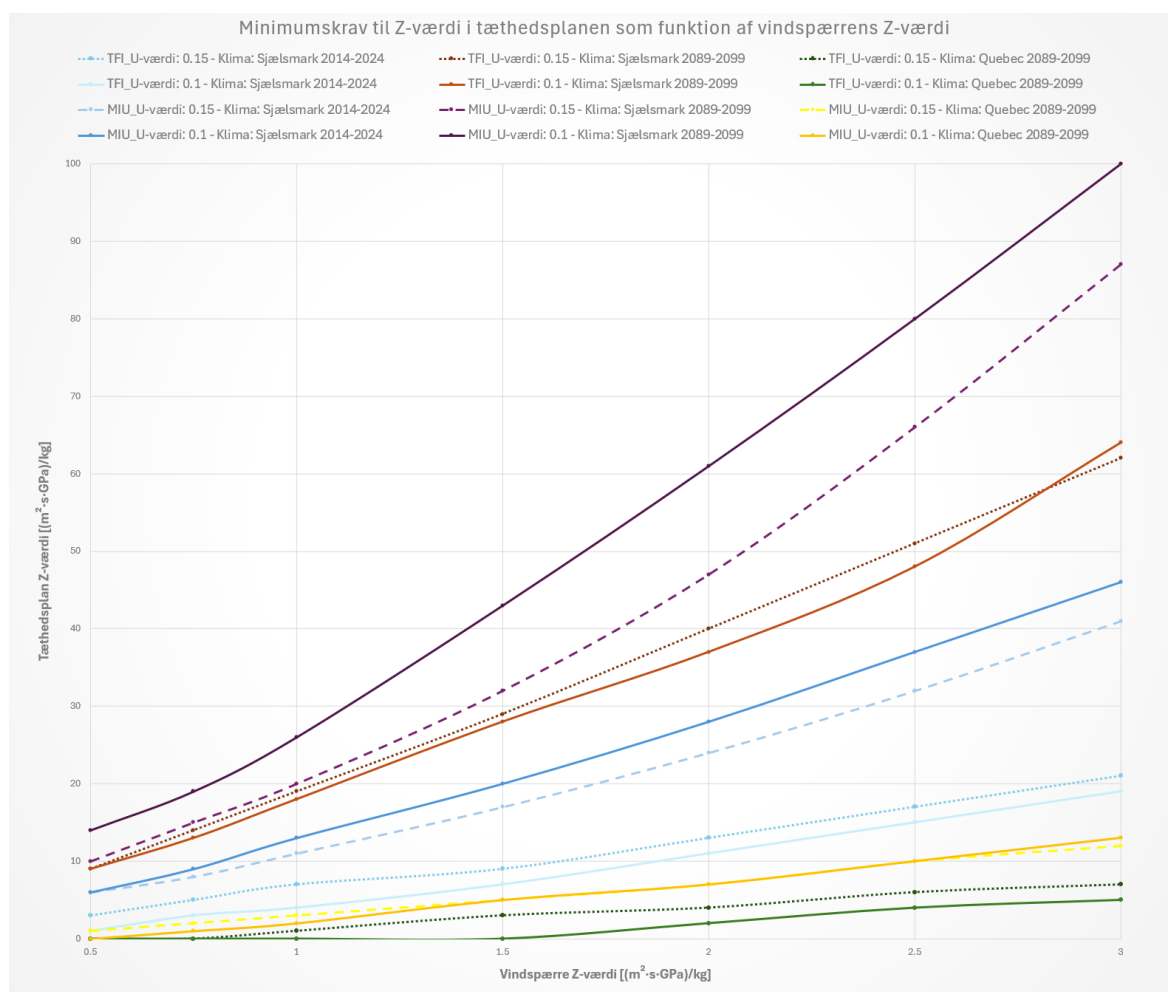
5.4 Afrunding på hovedparameterstudiet

Hovedparameterstudiet viser tydelige forskelle i den nødvendige Z-værdi i tæthedspanet afhængigt af isoleringstype. Ved samme U-værdi og klimabelastning kræver konstruktioner med mineraluldsisolering væsentligt højere Z-værdi i tæthedspanet end konstruktioner med træfiberisolering. Resultatet indikerer, at konstruktionen har begrænset udtørningspotentialer.

Forskellen er mest markant under det varme og fugtige klimascenarie. Ved $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ kræves tæthedspanet $Z = 100 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ for mineraluldsisolering, mens træfiberisolering

opfylder kriteriet ved $Z = 64 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$. I AMOC-scenariet er forskellen mindre, men træfiberisolering resulterer fortsat i lavere skimmelindeks end mineraluldsisolering.

Resultaterne indikerer, at materialevalg har væsentlig betydning for konstruktionens fugttekniske robusthed, og at kravene til tæthedspanet bør vurderes materialespecifikt. Figur 35 viser minimumskrav til Z-værdien i tæthedspanet som funktion af vindspærrens Z-værdi for konstruktioner med både træfiberisolering og mineraluldsisolering med en U-værdi på 0,10 eller 0,15 $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ under de tre klimascenarier.



Figur 35 - Minimumskrav til Z-værdi i tæthedspanet som funktion af vindspærrens Z-værdi under tre klimascenarier (nutid, fremtid, AMOC). Kurverne viser laveste Z-værdi i tæthedspanet, der opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3 over hele simuleringsperioden. Resultaterne er baseret på konstruktioner med træfiberisolering (TFI) og mineraluldsisolering (MIU) ved $U = 0,10$ og $0,15 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}$. Datagrundlag: hovedparameterstudiet.

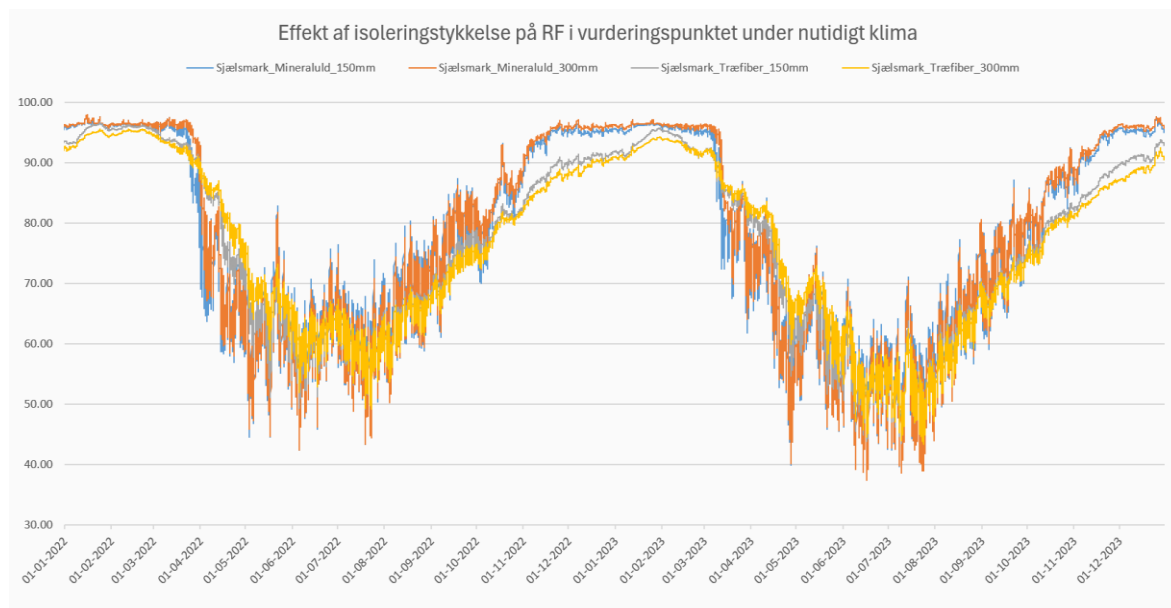
5.5 Supplerende analyser

Ud over hovedparameterstudiet blev der gennemført supplerende analyser med fokus på isoleringstykkelse, materialevalg og robusthed under alternative klimabelastninger. Formålet var at vurdere, om observerede tendenser i hovedstudiet er generelle eller specifikke for de valgte kombinationer.

5.5.1 Tendenser ved forskellig isoleringstykkelse

En central observation er, at øget isoleringstykkelse ikke nødvendigvis forringer konstruktionens fugttekniske ydeevne. I konstruktioner med træfiberisolering ses i flere tilfælde lavere relativ luftfugtighed i vurderingspunktet ved 300 mm end ved 150 mm. Det indikerer, at en højere samlet fugtkapacitet reducerer fugtniveauet og forbedrer robustheden. For mineraluldsisolering ses derimod stigende relativ luftfugtighed ved øget tykkelse. Den øgede masse bidrager ikke væsentligt til fugtbufferen, hvilket medfører højere fugtbelastning i det indre vægforløb.

Dette bekræftes af Figur 36, der viser udviklingen i relativ luftfugtighed for konstruktioner med 150 mm og 300 mm isolering af henholdsvis træfiberisolering og mineraluldsisolering under nutidigt klima. Forskellen mellem materialerne bliver tydeligere ved større isoleringstykkelse, hvor træfiberisolering medfører lavere fugtniveau trods lavere U-værdi.



Figur 36 - Simuleret relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren for fire vægtyper ved nutidigt klima (Sjælsmark 2011–2024). Væggene er isoleret med træfiberisolering eller mineraluldisolering i tykkelser på 150 mm og 300 mm. Øget isoleringstykkelser medfører ikke nødvendigvis højere fugtniveau.

5.5.2 Delkonklusion: Supplerende analyser

De supplerende analyser bekræfter, at høj fugtkapacitet og tilstrækkelig Z-værdi i tæthedsplanet er afgørende for en stabil ydeevne. Konstruktioner med træfiberisolering opnår generelt lavere fugtniveauer end konstruktioner med mineraluldisolering.

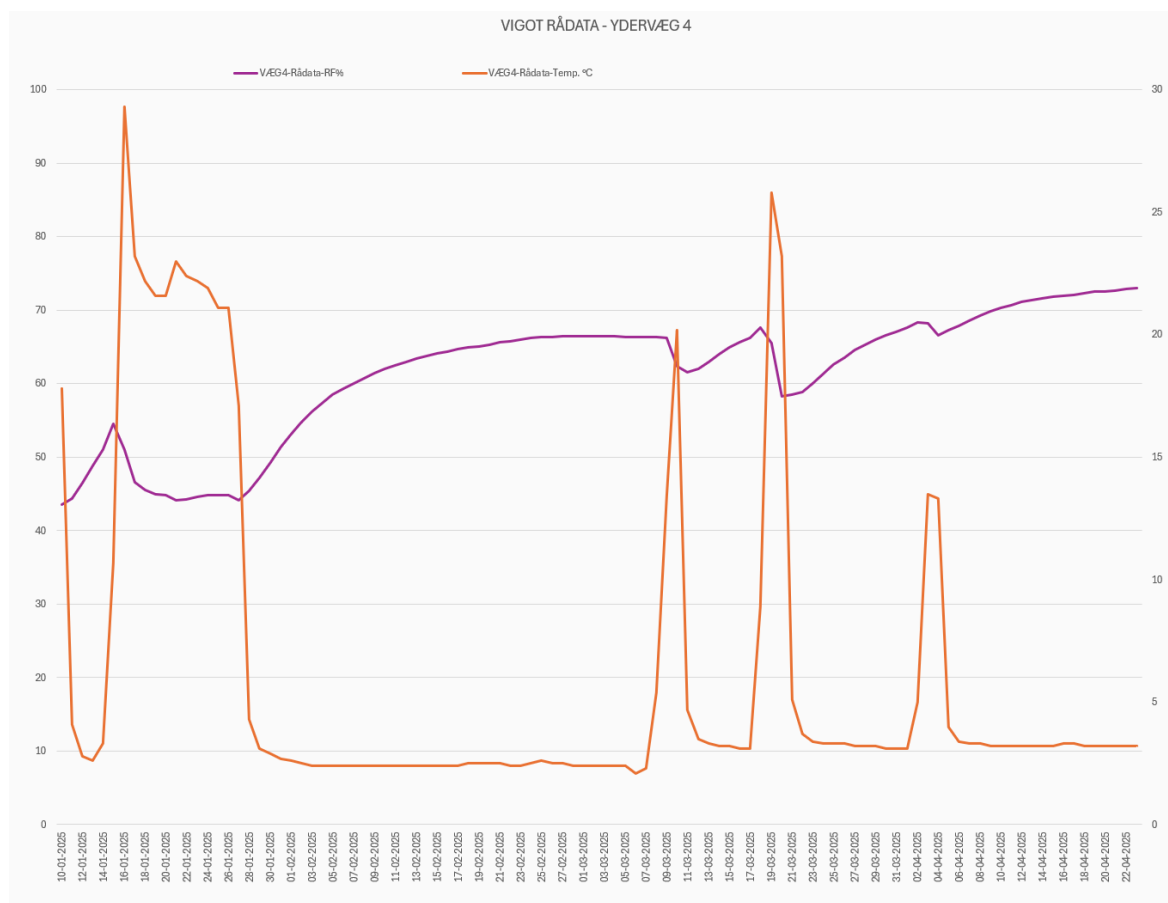
Tilsvarende tendenser fremgår af to nyere studier. Et eksperimentelt studie med DELPHIN-simuleringer og klimakammerforsøg under baltisk klima viser lavere relativ luftfugtighed og skimmelindeks i konstruktioner med træfiber- eller celluloseisolering sammenlignet med mineraluldisolering. Studiet fremhæver fugtkapacitet og vanddampdiffusionsmodstand som afgørende parametre ved høj fugtbelastning og lav U-værdi (Borodinecs, et al., 2025). Et andet studie under finske forhold viser tilsvarende resultater ved femårige simuleringer under RCP8.5-scenariet, hvor træfiberisolering og hørisolering gav lavere skimmelrisiko end mineraluldisolering ved vurdering i grænselaget mellem isolering og gipsplade (Schroderus, et al., 2024).

5.6 Sammenligning med statiske fugtregime

Som supplement til hovedparameterstudiet er der gennemført simuleringer i WUFI Pro med klimabelastning baseret på måledata fra et statiske fugtregime målt i et hotbox/coldbox-forsøg under VIGOT-projektet. Simuleringerne er foretaget på de samme vægmodeller, som tidligere er vurderet som fugtteknisk robuste i WUFI Bio. Formålet er at undersøge, om konstruktionerne også udviser lav skimmelrisiko under det statiske fugtregime fra forsøget. Udtræk af relativ luftfugtighed og temperatur fra simuleringerne er sammenlignet med måledata i Excel. Følgende afsnit beskriver behandlingen af forsøgsdata, opbygning af klimaprofil og sammenligning af forløb.

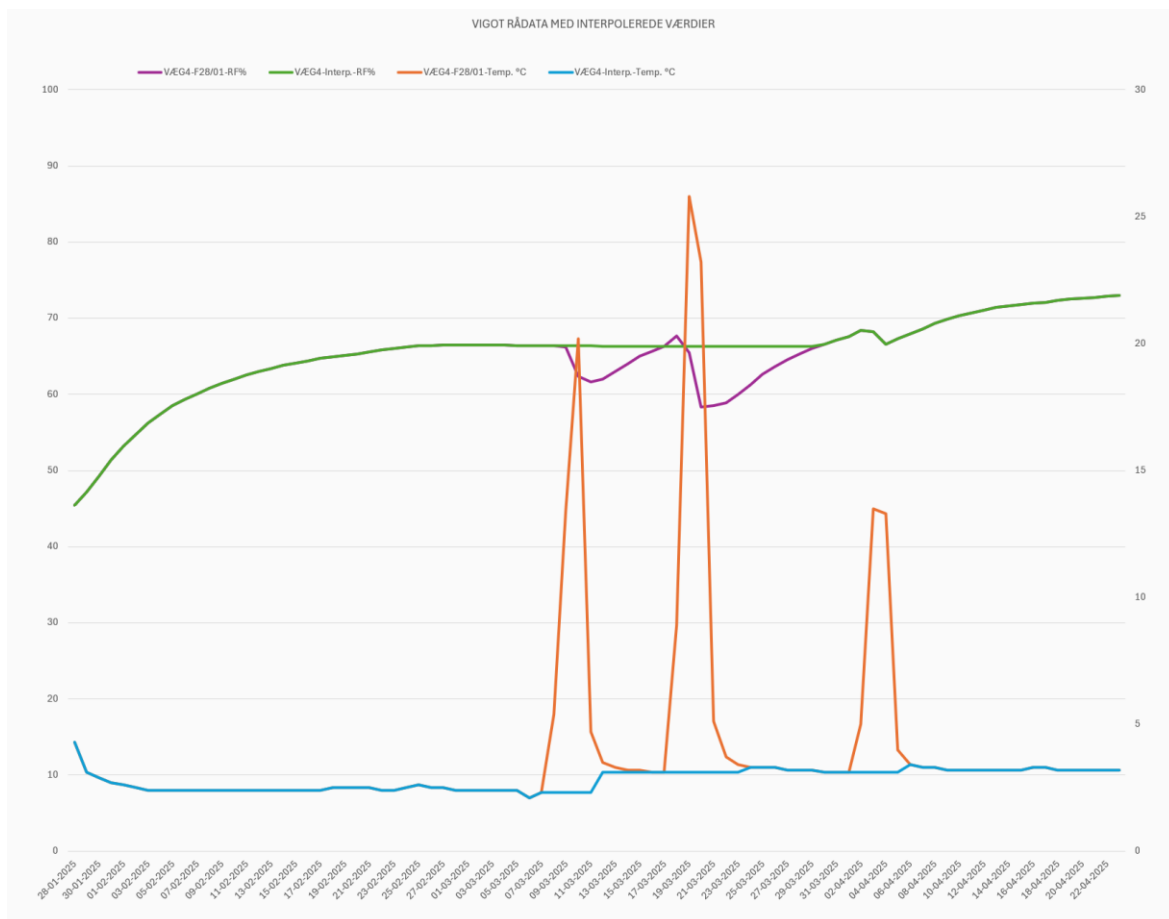
5.6.1 Måledata og klargøring af klimaprofil

Måledata for temperatur og relativ luftfugtighed er udtrukket fra en sensor placeret centralt bag vindspærren i VÆG 4 i VIGOT-projektets hotbox/coldbox-forsøg. Opstillingen blev aktiveret 11. januar 2025, men forsøget var først i stabil drift fra 28. januar. Den indledende periode er præget af store udsving og tekniske fejl, som det fremgår af Figur 28, og anvendes derfor ikke. Den egentlige forsøgsperiode, der danner grundlag for simuleringerne, strækker sig fra 28. januar til 28. april 2025.



Figur 37 - Rådata for temperatur og relativ luftfugtighed målt bag vindspærren i midterste niveau af VÆG 4 under hotbox/coldbox-forsøget. Den indledende periode (11.–28. januar 2025) er præget af ustabil drift og indgår ikke i det videre analysegrundlag.

Efter frasortering af den ustabile startperiode er datagrundlaget behandlet ved lineær interpolation af mindre dataspring, så der opnås en sammenhængende tidsserie til brug i WUFI. Figur 38 viser det bearbejdede forløb, som anvendes som klimaprofil i simuleringerne.



Figur 38 - Bearbejdede måledata fra hotbox-/coldbox-forsøget med lineært interpolerede værdier og frasorteret opstartsperiode. Denne profil anvendes som klimabelastning i simuleringer af udvalgte konstruktioners fugttechniske robusthed.

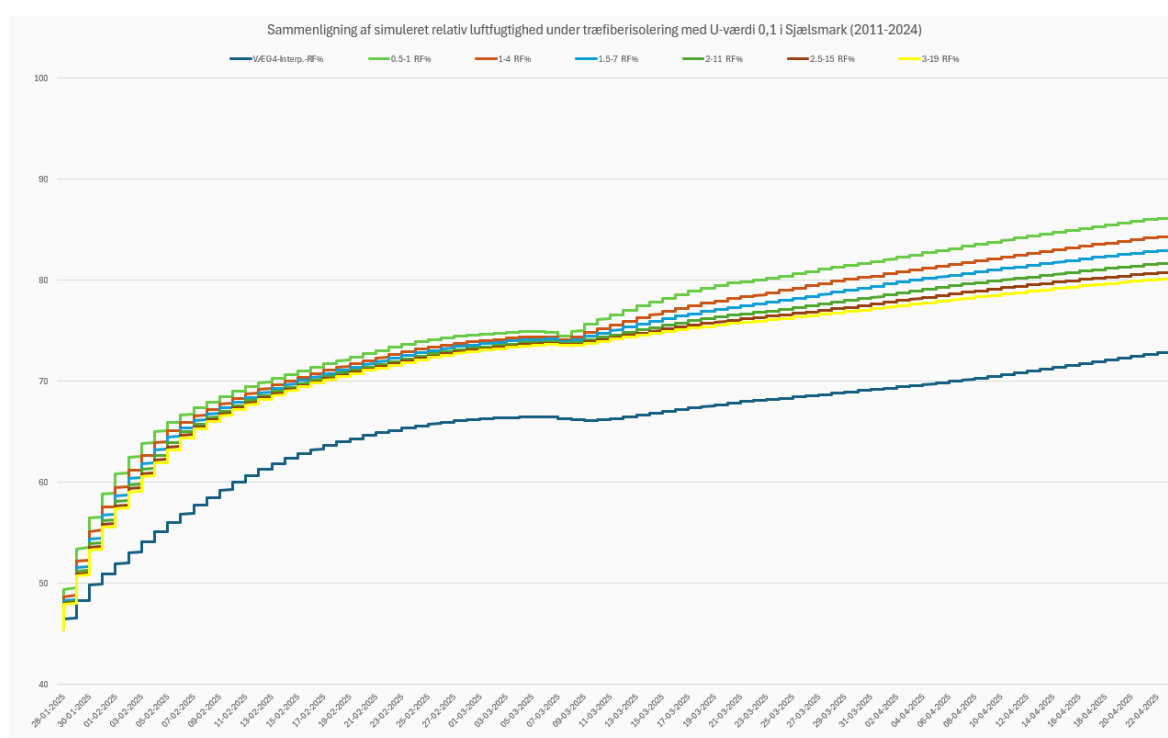
Klimaprofilen er brugt som et fjerde belastningsscenarie i projektet og pålagt de konstruktioner, der i hovedparameterstudiet blev vurderet som fugttechnisk robuste. Dette muliggør en sammenligning mellem ydeevne under fremskrevne klimabelastninger og et kontrolleret, laboratorie fugtforløb.

5.6.2 Simuleret forløb og grafisk sammenligning

På baggrund af den bearbejdede klimaprofil fra det statiske fugtregime er der gennemført simuleringer af samtlige konstruktioner, der i det dynamiske parameterstudie opfyldte kravet om skimmelindeks under 3. Formålet er at vurdere, hvordan disse konstruktioner reagerer under den dokumenterede fugtbelastning fra hotbox-/coldbox-forsøget, og at identificere de strengeste krav til kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet.

Vurderingen baseres på den simulerede relative luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren. Figur 39 viser et eksempel med træfiberisolering og $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, hvor forskellige Z-værdier i tæthedsplanet er sammenlignet med en simulering af VÆG 4. Denne referencekonstruktion er opbygget i WUFI ud fra forsøgsbeskrivelsen og belastet med det statiske fugtregime.

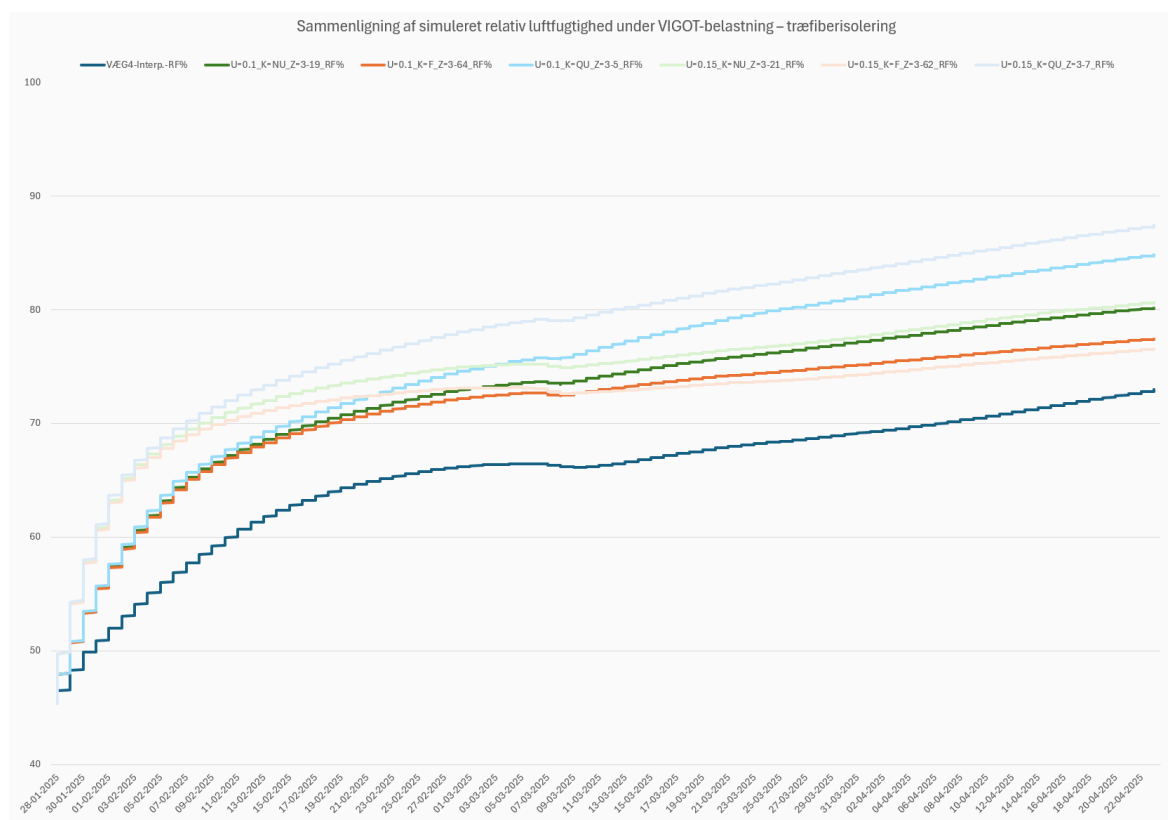
Blandt de simulerede konstruktioner identificeres varianten med vindspærre $Z = 3 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ og tæthedsplanet $Z = 19 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ som den strengeste accepterede kombination. Denne anvendes som reference i den videre vurdering.



Figur 39 - Simuleret relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren under VIGOT-regimet for konstruktioner med træfiberisolering og $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Figuren viser seks konstruktioner med Z-værdi i vindspærren fra 0,5 til $3 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ og tilpasset Z-værdi i tæthedsplanet. Hver konstruktion opfylder netop skimmelindeks under 3 i ét klimascenarie: nutidigt ($K = N$), varmt og fugtigt ($K = F$) eller AMOC ($K = Q$). Alle simuleringer er udført med samme statiske fugtregime. Den mørkeblå kurve viser interpolerede måldata fra VÆG 4.

For at vurdere konstruktionernes følsomhed over for det statiske fugtregime sammenlignes den mest kritiske godkendte konstruktion fra hvert klimascenarie med forsøgsdata. Figur 40 viser relativ luftfugtighed i vurderingspunktet for disse konstruktioner, sammenlignet med simuleret fugtforløb for VÆG 4.

De viste konstruktioner repræsenterer de kombinationer med lavest mulig Z-værdi i tæthedsplanet, som opfylder acceptkriteriet under hvert klimascenarie. I alle tilfælde er det konstruktioner med vindspærre $Z = 3 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$ og lavest mulig Z-værdi i tæthedsplanet, som netop opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3 i det dynamiske parameterstudie. Disse konstruktioner anvendes som reference, da de afgrænser den strengeste accepterede kombination under de givne forudsætninger.



Figur 40- Simuleret relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren under VIGOT-regimet for konstruktioner med træfiberisolering og Z-værdi i vindspærren = $3 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}$. Figuren viser tre konstruktioner med lavest godkendte Z-værdi i tæthedsplanet under hvert klimascenarie. Den mørkeblå kurve viser interpolerede måledata fra hotbox/coldbox-forsøget med VÆG 4. Farvekoder: blå = AMOC, grøn = nutidigt klima (Sjælsmark), orange = fremtidigt varmt og fugtigt klima.

Se Bilag 6 for grafisk sammenligning af simulerede og målte fugtforløb under det statiske fugtregime.

5.6.3 Delkonklusion: Robusthed ved statisk fugtregime

WUFI-simuleringerne med det statiske fugtregime viser, at alle konstruktioner, som i det dynamiske parameterstudie blev vurderet som fugtteknisk robuste, har højere relativ luftfugtighed i vurderingspunktet end VÆG 4 i VIGOT-projektets måldata. Fugtniveauerne for de mest kritiske konstruktioner under hvert klimascenarie danner et samlet spænd, som konsekvent ligger over forsøgets fugtforløb.

Denne systematiske forskel gør det muligt at opstille en teoretisk grænsekurve. Konstruktioner, der under kontrollerede testforhold udviser lavere fugtophobning bag vindspærren end denne kurve, vurderes som fugtteknisk robuste.

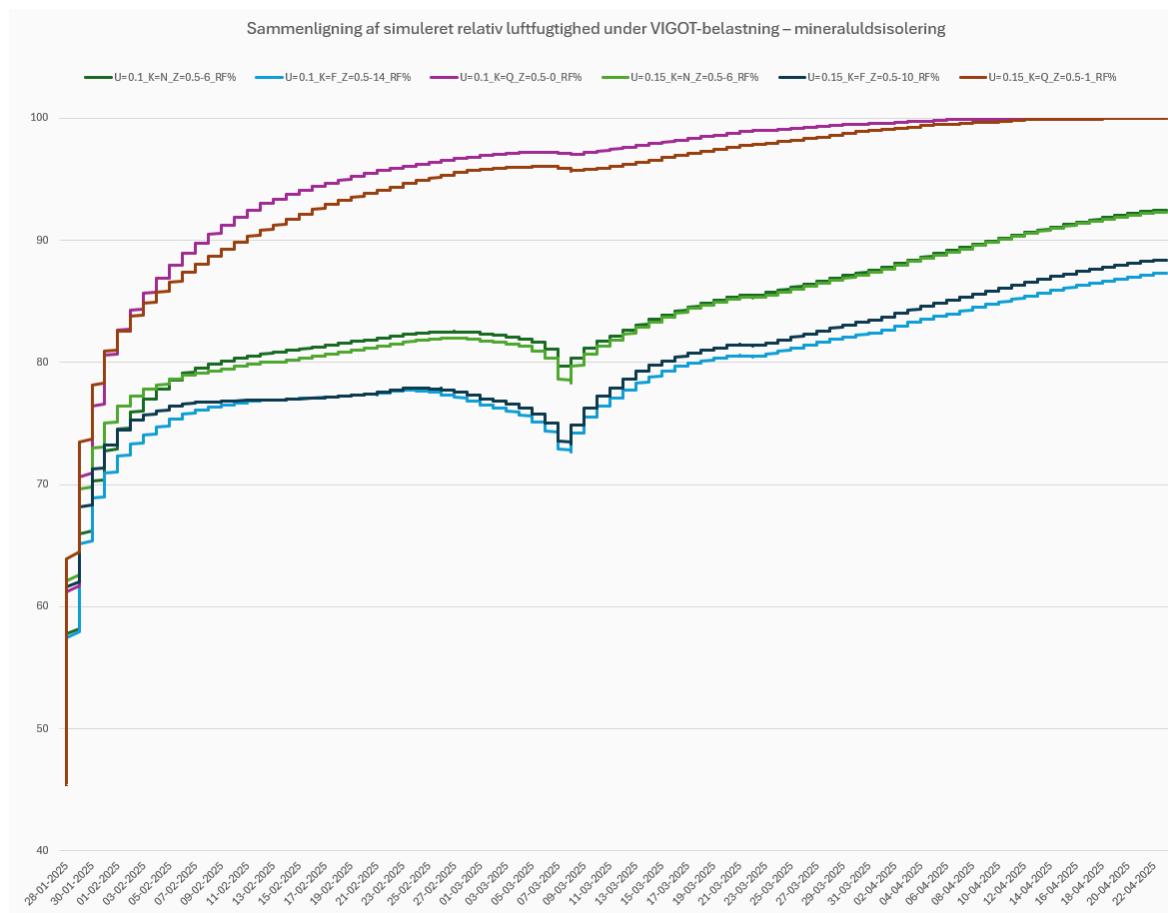
5.7 Samlet vurdering på tværs af materialer

Det simulerede statiske fugtregime fra VIGOT-forsøget er baseret på en konstruktion med træfiberisolering. I det følgende anvendes den samme belastning også for konstruktioner med mineraluldsisolering. Formålet er ikke at sammenligne med måldata, men at vurdere konstruktionernes relative ydeevne under identiske klimaforhold.

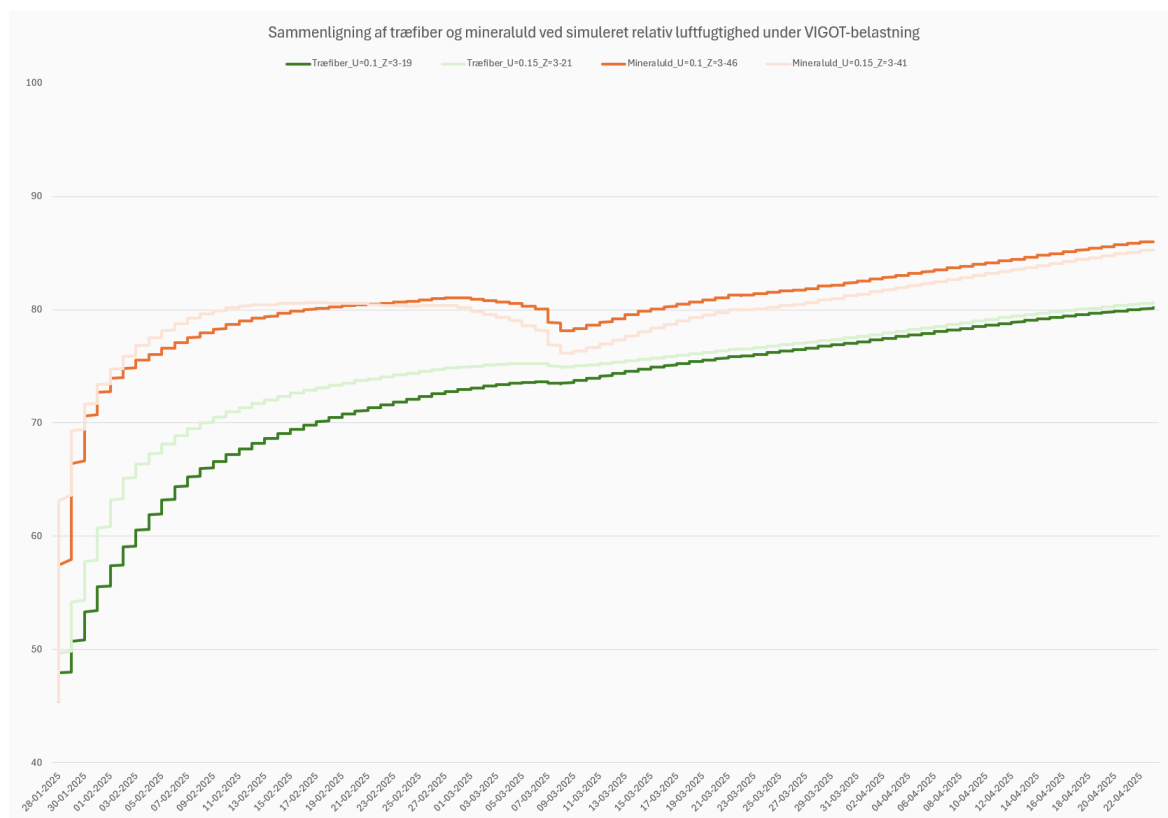
Resultaterne viser markante forskelle i relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren. Konstruktioner med mineraluldsisolering opnår konsekvent højere fugtniveau end tilsvarende konstruktioner med træfiberisolering. Forskellen er særligt udtalt i konstruktioner med lav Z-værdi i tæthedsplanet, hvor mineraluldsisolering i flere tilfælde nærmer sig 100 % relativ luftfugtighed mod slutningen af perioden.

Denne forskel bekræfter, at mineraluldsisolering stiller højere krav til tæthedsplanet for at sikre fugtteknisk robusthed. Den lave fugtkapacitet og begrænsede buffer mod udsving i relativ luftfugtighed gør konstruktionen mere sårbar over for fugtophobning og skimmelvækst. Træfiberisolering udviser derimod et mere afdæmpet fugtforløb og lavere afsluttende fugtniveau under samme belastning.

Den systematiske forskel i fugtteknisk ydeevne fremgår tydeligt af Figur 41 og Figur 42 og underbygger vurderingen af træfiberisolering som et mere robust valg i konstruktioner med tæthedsplaner med Z-værdier svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer.



Figur 41 - Simuleret relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren under VIGOT-regimet for konstruktioner med mineraluldsisolering og $U = 0,10$ eller $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$. Figuren viser seks konstruktioner med Z-værdi i vindspærren $= 0,5 \text{ GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$ og varierende Z-værdi i tæthedsplanet. Hver konstruktion opfylder netop skimmelindeks under 3 i ét klimascenarie: nutidigt ($K = N$), varmt og fugtigt ($K = F$) eller AMOC ($K = Q$). Alle simuleringer er udført med samme statiske fugtregime.



Figur 42 - Simuleret relativ luftfugtighed i vurderingspunktet bag vindspærren for konstruktioner med træfiberisolering og mineraluldsisolering under VIGOT-regimet. Konstruktionerne er udvalgt blandt de fugtteknisk robuste og har identiske Z-værdi i vindspærren. Relativ luftfugtighed sammenlignes under ens klimabelastning.

6 Diskussion

Dette kapitel vurderer robusthed, anvendelighed og begrænsninger ved den opstillede metode til vurdering af fugtteknisk robusthed. Der foretages en faglig gennemgang af hovedresultaternes betydning for dimensionering og vurderingspraksis samt en kritisk analyse af modellens forudsætninger og overførbarehed. Desuden vurderes WUFI Bio som værktøj i forhold til LIM-kruver. Afrundende diskuteres metodeanvendelse i relation til øvrige tekniske krav i byggeriet.

6.1 Hovedresultater og betydning for vurderingspraksis

Analysen har identificeret to centrale fund med betydning for vurderingspraksis og for den metodiske tilgang til dimensionering af ydervægge, hvor tæthedsplanet har en Z-værdi svarende til biobaserede byggematerialer

Det første fund er en ny vurderingskurve for acceptable Z-værdikombinationer mellem vindspærren og tæthedsplanet. Kurvens form og placering adskiller sig fra tidligere studier baseret på referenceår (Hansen, et al., 2024) (Jensen, et al., 2025b). I nærværende analyse er der i stedet anvendt dynamiske klimadata med år-til-år-variation over en tiårig periode, hvor vurderingen foretages på baggrund af det mest kritiske år i perioden. I modsætning til referenceår, hvor belastningen typisk beregnes ud fra månedsgennemsnit, medtager denne tilgang både ekstreme enkeltår og variation i opfugtning og udtørring. Kurven fanger dermed effekterne af klimatiske udsving og akkumuleret fugtbelastning og varierer tydeligt med isoleringstype og U-værdi. Træfiberisolering kræver generelt lavere Z-værdi i tæthedsplanet end mineraluldsisolering for at opnå skimmelindeks under 3. Den samlede vurderingskurve fremgår af Figur 35 og udgør et nyt grundlag for vurdering af fugtteknisk robusthed under realistiske klimabelastninger.

Det andet fund er metodisk afgørende: Den teoretisk bestemte grænsekurve viser sig anvendelig under statiske fugtregimer. Konstruktioner, der i simuleringerne ligger på vurderingskurven, udviser tilsvarende fugtniveau under dynamisk og statisk belastning. Det peger på, at én laboratorietest med kendt Z-værdikombination potentielt kan anvendes til at eftervise fugtteknisk robusthed. Hvis den målte fugtbelastning ligger under den simulerede grænsekurve, indikerer modellen, at konstruktionen opfylder acceptkriteriet. Tærskelværdier fra dynamiske

simuleringer kan dermed indikere vurderingsgrundlag for fysiske test – forudsat god overensstemmelse i fugtregimet.

Sammenligningen viser samtidig, at den målte fugtbelastning fra VIGOT-forsøget systematisk ligger under de strengeste krav, som de simulerede konstruktioner er dimensioneret til at modstå. Dette bekræfter, at vurderingskurven er konservativ og ikke undervurderer risikoen. Det er dog uafklaret, om robustheden skyldes materialespecifikke egenskaber eller usikkerheder i modelparametre. Dette bør afklares i fremtidige, kalibrerede analyser. Resultaterne i nærværende studie vurderes dog tilstrækkelige til at understøtte en kombineret tilgang, hvor dynamiske simuleringer fastlægger grænsekombinationer, som efterprøves ved forsøg.

Analysen viser samtidig, at kravene til Z-værdi i tæthedsplanet under ekstreme klimabelastninger ligger i den høje ende af, hvad der kan opnås med biobaserede materialer. Under det varme og fugtige fremtidsscenario er Z-værdier over $15 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ nødvendige i flere tilfælde. Visse OSB/4-plader i tykkelser omkring 15–18 mm kan opnå op mod $18,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$, hvilket gør dem egnede i kombination med vindspærrers Z-værdi svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer. Bilag 7 dokumenterer, at OSB/4-plader i tykkelser fra 10 til 25 mm har en deklareret vanddampdiffusionsfaktor på $\mu = 200$ i både tør og våd tilstand, svarende til Z-værdier omkring $18,5 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$ ved 18 mm pladetykkelse.

Samlet set indikerer resultaterne, hvilke egenskaber tæthedsplanet skal opfylde ved Z-værdier typiske for biobaserede materialer og belastning fra varme og fugtige klimaforhold. Den opstillede vurderingskurve angiver de kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet, som opfylder kriteriet for skimmelindeks under 3. Resultaterne kan anvendes som grundlag for materialevalg i fugtteknisk vurdering af ydervægge med biobaserede isoleringsmaterialer.

6.2 Robusthed og overførbare af modelresultater

Resultaterne fra hovedparameterstudiet viser høj konsistens og tydelige forskelle mellem konstruktionstyper, hvilket underbygger modellens robusthed. Der ses systematisk lavere skimmelindeks ved træfiberisolering sammenlignet med mineraluldsisolering ved samme U-værdi og Z-værdikombinationer, uanset klimascenarie. Samtidig bekræftes, at lav fugtkapacitet i isoleringsmaterialet fører til højere relativ luftfugtighed i vurderingspunktet og dermed større risiko for skimmelvækst ved udsving i fugtbelastningen. Disse tendenser er konsistente både i de dynamiske simuleringer og ved simulering med det statiske fugtregime.

Modelresultaterne vurderes som direkte anvendelige til dimensionering af ydervægge med vanddampdiffusionsåbne opbygninger, hvor materialernes hygrotermiske egenskaber svarer til de materialemodeller, der er anvendt i WUFI. Det gælder for vægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering i fugtbelastningsklasse 3 og under klimatiske forhold svarende til de analyserede scenarier.

Det er dog væsentligt at understrege, at vurderingskurvernes præcise placering afhænger af materialernes fugtkapacitet og sorptionskurve, som i simuleringen er repræsenteret ved faste inputdata. Resultaterne kan derfor ikke uden videre overføres til konstruktioner med andre hygrotermiske egenskaber – heller ikke til andre produkter inden for samme materialekategori. Selv inden for samme hovedmateriale kan tilsætning af additiver som brandhæmmende salte påvirke sorptionsegenskaberne markant og dermed forskyde grænsekurvernes placering. Forskelle mellem træfiberprodukter kan være betydelige, både i forhold til sorptionskurve, densitet og fugttransport. Som gennemgået i afsnit 3.4 kan der være stor variation selv inden for samme materialetype (Andersen, et al., 2025). Produkt- og datagrundlaget skal derfor vurderes nøje, før metoden anvendes til dokumentation for andre biobaserede materialer.

Metoden vurderes overførbare til andre fugtbelastningsklasser, forudsat at der foreligger et veldefineret statisk fugtregime for den pågældende klasse. I sådanne tilfælde kan der opstilles tilsvarende grænsekurver for skimmelindeks ved hjælp af dynamiske simuleringer. For fugtbelastningsklasse 4 og 5 kræves særskilte simuleringer og vurderingskurver. Konstruktioner, der er indikerer fugtteknisk robusthed under fugtbelastningsklasse 3, vurderes implicit også at opfylde kravene til klasse 1 og 2.

Resultaterne er desuden følsomme over for startbetingelser og antagelser om ventilationsforhold i hulrummet bag regnskærmen. Disse er i simuleringen defineret stringent i overensstemmelse med SBI-rapport 2017:20 (Morelli, et al., 2017), hvor der forudsættes et konstant luftskifte på 30 h^{-1} i hulrummet. Konstruktioner uden ventileret hulrum bør vurderes særskilt og frarådes generelt, da fraværet af trykdugning og udtørring øger risikoen for fugtophobning og skimmelvækst jf. afsnit 3.3.1. Det reelle luftskifte varierer dog betydeligt afhængigt af facadens udformning og vindeksponering, manglende ventilation kan medføre markant forhøjet relativ luftfugtighed bag vindspærren. Det valgte luftskifte på 30 h^{-1} vurderes som et konservativt skøn for korrekt udførte facader med ventileret hulrum.

Samlet set indikerer resultaterne en høj grad af overførbarhed inden for det analyserede spænd af klimabelastninger, isoleringstyper og Z-værdier. Anvendelse på vægopbygninger med væsentligt afvigende fugttransportegenskaber eller under fugtbelastningsklasser, der ikke er omfattet af dette studie, bør dog ske med forsigtighed.

6.3 Vurdering af WUFI Bio som værktøj

WUFI Bio er anvendt som vurderingsværktøj til kvantificering af skimmelrisiko i lette ydervægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering. Modellen beregner et skimmelindeks baseret på temperatur og relativ luftfugtighed bagved vindspærren. I nærværende analyse er acceptkriteriet fastlagt som et skimmelindeks under 3 over en tiårig simuleringsperiode, eksklusiv de første tre år, som anvendes som indkøringsfase. Indeksverdier i denne periode indgår ikke i vurderingen. Tilgangen er baseret på anbefalinger fra programudviklerne, hvor vurderingen alene foretages i den del af simuleringen, hvor fugtforholdene er stabiliseret og konstruktionen er i balance (Fraunhofer IBP, 2024a).

Simuleringerne viser, at skimmelindekset i WUFI Bio varierer ved ændringer i Z-værdier for vindspærren og tæthedsplanet. Det bekræfter modellens følsomhed over for inputparametre og understreger behovet for præcise materialedata ved vurdering af fugtteknisk robusthed.

WUFI Bio anvender en fast fugtoptagelseskurve for skimmelsporer, som relaterer vandoptag til temperatur og relativ luftfugtighed. Modellen medtager ikke hysteres, og forskellen mellem adsorption og desorption indgår derfor ikke i vurderingen. Det kan påvirke resultaterne ved skiftende fugtbelastning, hvor sporerne reaktion i praksis kan være asymmetrisk.

Sorptionskurven for selve byggematerialet anvendes ikke direkte i skimmelmodellen, men påvirker den relative luftfugtighed i konstruktionen og dermed indirekte skimmelrisikoen. I parameterstudiet er materialemodellerne i vindspærren og tæthedsplanet udvalgt ud fra deres Z-værdi, mens fugtkapacitet og sorptionsforløb, følger det valgte produkt i WUFI. Forskelle i simuleret ydeevne afspejler derfor både variationer i vanddampdiffusionsmodstand og fugtbufferevne.

Skiftet fra LIM-metoden til WUFI Bio vurderes metodisk nødvendigt. Ingen konstruktioner kunne opnå tilstrækkelig robusthed under det varme og fugtige klimascenarie, når vurderingen blev baseret på LIM-kurver. LIM-metoden er konservativ og medregner ikke år-til-år-variation, ekstreme fugtperioder eller naturlig udtørring, hvilket fører til systematisk overvurdering af risikoen. Tærskelværdierne blev overskredet i langt hovedparten af simuleringerne, og metoden tillader ikke vurdering af konstruktionens fugtbufferevne eller dynamisk akkumulering af fugt og risiko. WUFI Bio muliggør derimod løbende vurdering af skimmeludvikling i relation til fugtbalancen i konstruktionen. LIM-beregningerne er dokumenteret i Bilag 4.

WUFI Bios styrke ligger i, at modellen muliggør systematisk og kvantitativ vurdering af fugtteknisk robusthed under realistiske klimabelastninger. Den er særligt egnet til sammenlignende analyser, hvor forskelle i konstruktioners ydeevne vurderes under ens betingelser. Da skimmelmodellen er generisk og ikke produktspecifik, er WUFI Bio ikke egnet til kvantitativ forudsigelse af faktisk vækstmængde eller præcis tidspunkt for vækststart i praksis.

Modellen er derfor egnet til vurdering af relative forskelle i fugtrisiko mellem konstruktioner med ens og kendte forudsætninger. Den kan ikke anvendes til absolut vurdering af skimmelvækst i specifikke produkter uden supplerende kalibrering. Resultaterne bør fortolkes som indikatorer for fugtteknisk robusthed – ikke som eksakte forudsigelser af vækstforløb.

6.4 Kritisk vurdering af 1/10-reglen

Analysens resultater bekræfter, at den gængse anbefaling om et Z-værdi-forhold på maksimalt 1/10 mellem vindspærren og tæthedsplanet ikke kan anvendes som universelt dimensioneringsgrundlag i lette ydervægge med biobaseret isolering. Resultaterne ligger i forlængelse af tidligere undersøgelser (Morelli, et al., 2021) (Hansen, et al., 2024) (Jensen, et al., 2025b), som viser, at det nødvendige forhold mellem Z-værdi afhænger af både isoleringstype, U-værdi og fugtbelastning.

1/10-reglen stammer fra konstruktioner med PE-folie som tæthedsplan, hvor Z-værdien typisk ligger i intervallet 300–600 $\text{GPa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^2/\text{kg}$. Disse konstruktioner anvender ofte mineralske vindspærreplader med Z-værdier på 1–5, hvilket giver en markant vanddampdiffusionsgradient. Når tæthedsplanet i stedet udgøres af pladematerialer med lavere Z-værdi, bliver 1/10-forholdet misvisende. Som analysen viser, kan en kombination med vindspærren $Z = 1$ og tæthedsplanet $Z = 10$ føre til opfugtning og skimmelvækst, især ved mineraluldsisolering.

I hovedparameterstudiet ses afvigelser fra 1/10-forholdet i stort set alle konstruktionstyper. Ved nutidigt klima og $U = 0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$ opnår konstruktioner med træfiberisolering tilstrækkelig robusthed ved et Z-forhold omkring 1/4, mens mineraluldsisolering under samme betingelser kræver mindst 1/13. Under det fremtidige varme og fugtige klima stiger kravene yderligere – op til 1/30 for mineraluldsisolering. Variationen understreger, at ét fast forhold ikke er dækkende på tværs af konstruktioner og belastninger.

Reglen tager desuden ikke højde for, at forholdet mellem to meget lave Z-værdier stadig kan være 1/10 – også selvom begge lag er så vanddampdiffusionsåbene, at de reelt ikke begrænser fugttransport. En konstruktion med $Z = 0,00$ i både vindspærren og tæthedsplanet opfylder formelt reglen, men er fuldstændig vanddampdiffusionsåben. Det viser, at 1/10-reglen ikke afspejler den faktiske fugtbalance og derfor er utilstrækkelig som dimensioneringskriterium ved lave Z-niveauer.

Den anvendte metode i denne analyse indikerer en mere egnet tilgang til vurdering af fugtteknisk robusthed end den gængse tommelfingerregel. Den opstillede vurderingskurve er baseret på skimmelindeks i WUFI Bio og relaterer sig direkte til konstruktionens fugttekniske egenskaber

og den aktuelle klimabelastning. Herved muliggøres dimensionering ud fra kvantificerede krav til ydeevne.

6.5 Usikkerheder og databegrænsninger

Flere forhold kan påvirke nøjagtigheden og generaliserbarheden af resultaterne. Dette afsnit redegør for centrale usikkerheder knyttet til klimadata, forsøgsforudsætninger, materialemodeller og startbetingelser i simuleringerne.

Klimadata og klimascenarier

Fremskrivninger af fremtidigt klima er forbundet med betydelig usikkerhed. Resultaterne i dette projekt repræsenterer ét muligt forløb for hvert scenarie og bør ikke tolkes som medianfremskrivninger eller værst tænkelige scenarie. Det anvendte fremtidsscenario A1B er udviklet i regi af Climate for Culture og svarer omtrent til et belastningsniveau mellem SSP2-4,5 og SSP5-8,5. Nyere fremskrivninger viser dog, at endnu højere klimabelastninger ikke kan udelukkes. Følsomheden over for klimabelastning vurderes ved at sammenligne tre markant forskellige scenarier.

Statistiske profiler og forsøgsdata

WUFI-simuleringerne i denne analyse er gennemført med tiårige klimaforløb med naturlig variation, mens hotbox/coldbox-forsøget anvender et statistisk fugtregime over tre måneder. Sammenligningen indebærer derfor metodiske forskelle, da forsøget ikke afspejler årstidsvariation eller ekstreme klimaperioder.

Forsøgsregimet svarer i varighed og fugtniveau omtrent til en dansk vinterperiode og kan anvendes som referenceforløb til vurdering af fugtteknisk robusthed. Det kunne være relevant i fremtidige studier at undersøge, hvor langt et sådant forsøg kan belastes, før konstruktionen ikke længere opfylder kravene – men dette ligger uden for nærværende analyses rammer.

Det simulerede statistiske fugtregime bygger på målinger fra én konstruktionstype med ét sæt materialer. Eventuelle usikkerheder i forsøgsopbygning, fugtindtrængning fra kanter eller variation i startbetingelser kan påvirke det målte forløb. Da alle konstruktioner i analysen viser

højere relativ luftfugtighed end forsøgets referenceforløb, styrker dette dog vurderingen af, at den opstillede grænsekurve er konservativ og dermed robust over for mindre afvigelser i forsøgsdata. Forsøgets gyldighed anerkendes, men reproduktion af vurderingsmetoden bør udføres med samme metodiske omhu.

Materialedata i WUFI

De hygrotermiske egenskaber i simuleringerne er baseret på materialedata fra WUFI's interne database. Der er ikke foretaget kalibrering eller justering af sorptionskurver, fugtkapacitet eller parametre for skimmelvækst. Konstruktionernes fugttekniske ydeevne afhænger derfor direkte af datasættets nøjagtighed og dets repræsentativitet for de anvendte materialer.

I parameterstudiet er samme materialemodel anvendt for vindspærren og tæthedsplanet. Modellen er duplikeret i WUFI og tildelt forskellige μ -værdier for at opnå kontrolleret variation i Z-værdi. Sorptionskurve og fugtkapacitet er uændrede, så effekten af Z-værdien fremstår isoleret.

Startbetingelser og modelantagelser

Simuleringerne er startet med en ensartet relativ luftfugtighed på 0,8 i hele konstruktionen. Dette repræsenterer en konservativ forudsætning uden forudgående udtørring. For at reducere følsomheden over for denne antagelse er de første tre år udeladt af vurderingen. Resultaterne bygger derfor på stabiliserede fugtforhold og repræsenterer konstruktionens respons under længerevarende påvirkning, givet de anvendte klimascenarier og materialedata.

Der er væsentlig usikkerhed knyttet til fugtindholdet ved ibrugtagning. Både vejrlig, konstruktionstype og udførelseskvalitet har stor betydning for, om vægge reelt når at udtørre inden lukning. Utilstrækkelig udtørring kan medføre skimmelvækst i både nye og renoverede bygninger (Høegh, 2023a). Risikoen opstår særligt ved indbygning af fugtige materialer, optag af byggematerialer fra fugtige underlag, eller nedbørspåvirkning under opførelse. Den anvendte metode reducerer afhængigheden af disse forhold ved at fokusere på konstruktionens fugttekniske robusthed efter indkøringsperioden.

6.6 Energikrav, lufttæthed, brand og akustik

Analysen omfatter udelukkende fugttekniske vurderinger og tager ikke stilling til, om konstruktionerne opfylder øvrige tekniske krav som energiramme, lufttæthed, brand, akustik, statik, bygbarhed, økonomi eller LCA.

Tre krav i bygningsreglementet er særligt afgørende ved valg af nye vægkonstruktioner: lufttæthed, lydisolering og dokumentation for brandklassifikation. Disse forhold kan eftervises ved målinger på færdige bygninger eller mock-ups. Lufttæthed dokumenteres fx ved blower door-test med et maksimalt luftskifte på $1,0 \text{ l/s}\cdot\text{m}^2$ ved 50 Pa trykforskel (Social- og Boligstyrelsen, 2025). I praksis opnås tilstrækkelig tæthed i lette konstruktioner ofte med OSB/4-plader som tæthedsplan, når samlinger forsegles med både lufttæt fuge og tape egnet til formålet. Ubehandlede OSB-plader opfylder dog ikke altid lufttæthedskravet uden supplerende tiltag, og deres egnethed bør dokumenteres særskilt (Due, et al., 2020). Pladebeklædning uden høj Z-værdi kan i visse tilfælde opnå lufttæthed gennem tætte samlinger alene, men dette er primært dokumenteret for bygningstyper uden lufttæthedskrav, fx sommerhuse (Christensen, et al., 2015). Lyd- og brandkrav kan tilsvarende eftervises ved fuldskalaforsøg efter gældende standarder.

Lufttæthed kan i visse tilfælde opnås med pladebeklædning med tætte samlinger uden brug af materialer med høj Z-værdi. Dette er dog primært dokumenteret for sommerhuse og andre bygninger, der ikke er omfattet af bygningsreglementets krav om lufttæthed.

I modsætning hertil kan den fugttekniske ydeevne ikke måles direkte i færdigt byggeri. Skimmelvækst og fugtophobning udvikles gradvist og afhænger af klima, materialedata og konstruktionens vanddampdiffusionsforhold. Fugtteknisk vurdering kræver derfor simuleringsbaseret dokumentation, hvor fx WUFI Bio anvendes til at forudsige skimmelrisiko på baggrund af varme- og fugttransport.

Fugttransport ved vanddampsdiffusion adskiller sig fra konvektion og kræver særskilt vurdering. Luftlækager opstår ved trykforskel og lokaliseres ikke i WUFI-modellen. En lav samlet utæthed kan derfor være utilstrækkelig, hvis lækager optræder i kolde zoner eller er stærkt koncentrerede. Selv ved overholdelse af bygningsreglementets krav kan der opstå fugttekniske problemer, hvis

konvektiv fugttransport gennem tæthedspanet forekommer lokalt og ugunstigt placeret. Vurdering af tæthedspanet bør derfor suppleres med dokumentation for lækagelokalitet, fx ved kombineret undertryktest, termografi og varmtrådsanemometri.

Konstruktionernes egnethed i forhold til brand og akustik skal vurderes særskilt. Brandkrav udgør en særlig barriere for biobaserede byggematerialer, da krav til reaktion på brand, overfladespredning og beklædningsklasse ofte forudsætter ikke-biobaserede materialer.

7 Konklusion

Rapportens formål var at udvikle en metode til vurdering af fugtteknisk robusthed i ydervægge med biobaserede materialer, hvor vindspærren og tæthedsplanet har en Z-værdi svarende til niveauet for biobaserede byggematerialer. Der blev gennemført dynamiske simuleringer i WUFI under tre klimascenarier: nutidigt klima, fremtidigt varmt og fugtigt klima samt et koldt AMOC-scenarie. Skimmelindeks blev vurderet i WUFI Bio med et acceptkriterium på under 3 i hele simuleringsperioden.

Analyserne indikerer, at der kan fastlægges entydige materialespecifikke grænsekurver for acceptable kombinationer af Z-værdier i vindspærren og tæthedsplanet. Kurverne afhænger af isoleringsmateriale, U-værdi og klimabelastning og adskiller sig markant mellem træfiberisolering og mineraluldsisolering. Konstruktioner med mineraluldsisolering kræver generelt højere Z-værdier i tæthedsplanet, særligt under fremtidige klimabelastninger, hvilket afspejler materialets lavere fugtkapacitet. Det gængse Z-værdiforhold på 1/10 er utilstrækkeligt til at vurdere konstruktioner med biobaserede materialer i både vindspærren og tæthedsplanet.

Metodens centrale styrke er, at én teoretisk grænsecurve pr. klimabelastning kan fastlægges ved dynamiske simuleringer og anvendes som vurderingskriterium i statiske fugtforsøg. Hvis en konstruktion afprøvet under et kendt fugtregime ligger under den simulerede grænsecurve, vurderes den som fugtteknisk robust. Sammenligningen med måledata fra VIGOT-projektet viser, at disse grænsekurver konsekvent ligger over det observerede fugtforløb. Den konstruktion, der blev testet under forsøget, placerer sig dermed klart under acceptgrænsen og vurderes som fugtteknisk robust med metodens dokumenterede margin.

Metoden kombinerer teoretiske simuleringer med praktiske fugtforsøg. Konstruktioner kan dimensioneres ud fra fastlagte grænsekurver og efterprøves ved standardiserede tests. Dette giver mulighed for en teknisk konsistent og operationelt enkel vurdering af fugtteknisk robusthed.

Metoden er umiddelbart anvendelig til projektering af ydervægge med træfiberisolering og mineraluldsisolering i fugtbelastningsklasse 3, forudsat at materialedata og fugtregime svarer til det anvendte datagrundlag. En vurdering af andre materialetyper eller konstruktioner i fugtbelastningsklasse 4 og 5 kræver supplerende simuleringer og produktprøvning.

Resultaterne indikerer, at den udviklede metode muliggør en direkte, kvantificeret og fagligt konsistent vurdering af fugtteknisk robusthed. Den giver mulighed for at vælge materialer og konstruktioner ud fra dokumenterede kriterier og anvendes som grundlag for dimensionering og videre produktudvikling.

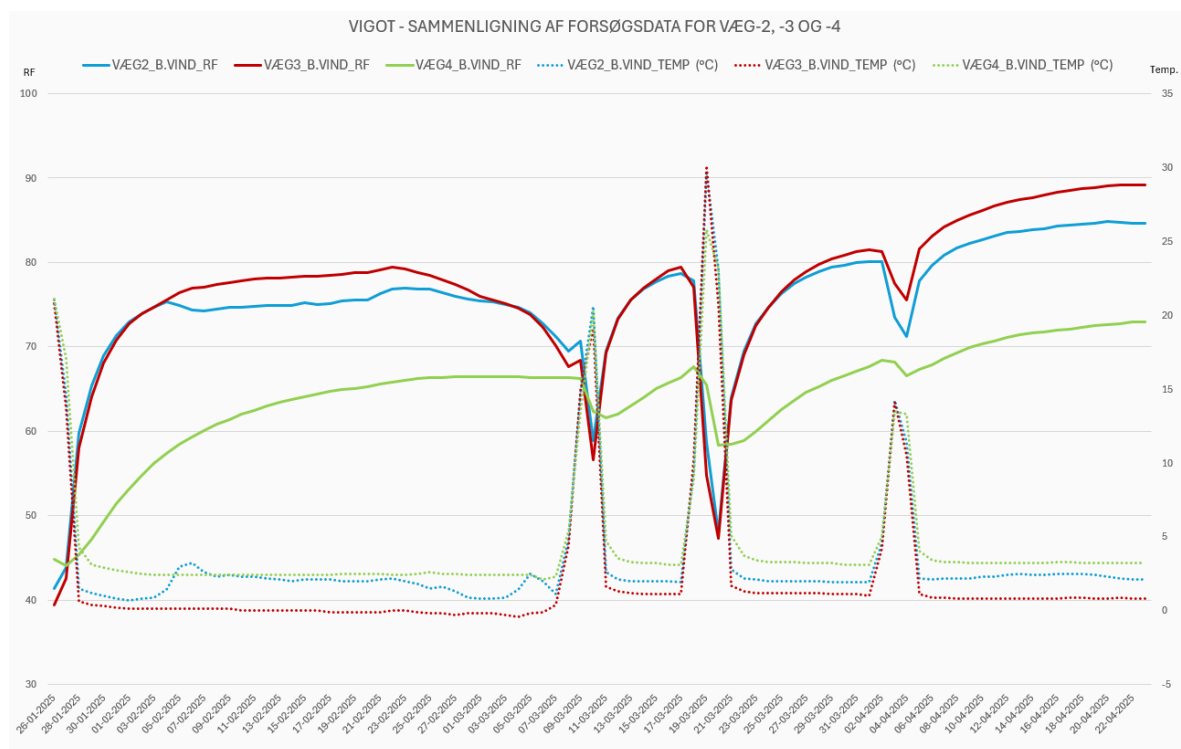
8 Perspektivering

De simulerede grænsekurver giver mulighed for at vurdere konstruktioner under kendte fugtregimer uden gentagne simuleringer. Perspektiveringen retter fokus mod metodens anvendelighed i praksis, nødvendige videreudviklinger og forudsætninger for bred implementering.

Metoden er i nærværende analyse anvendt for fugtbelastningsklasse 3, men kan overføres til øvrige fugtklasser, forudsat at der opstilles tilsvarende statiske fugtregimer og gennemføres nye simuleringer. Der er endnu ikke opstillet grænsekurver for klasse 4 og 5.

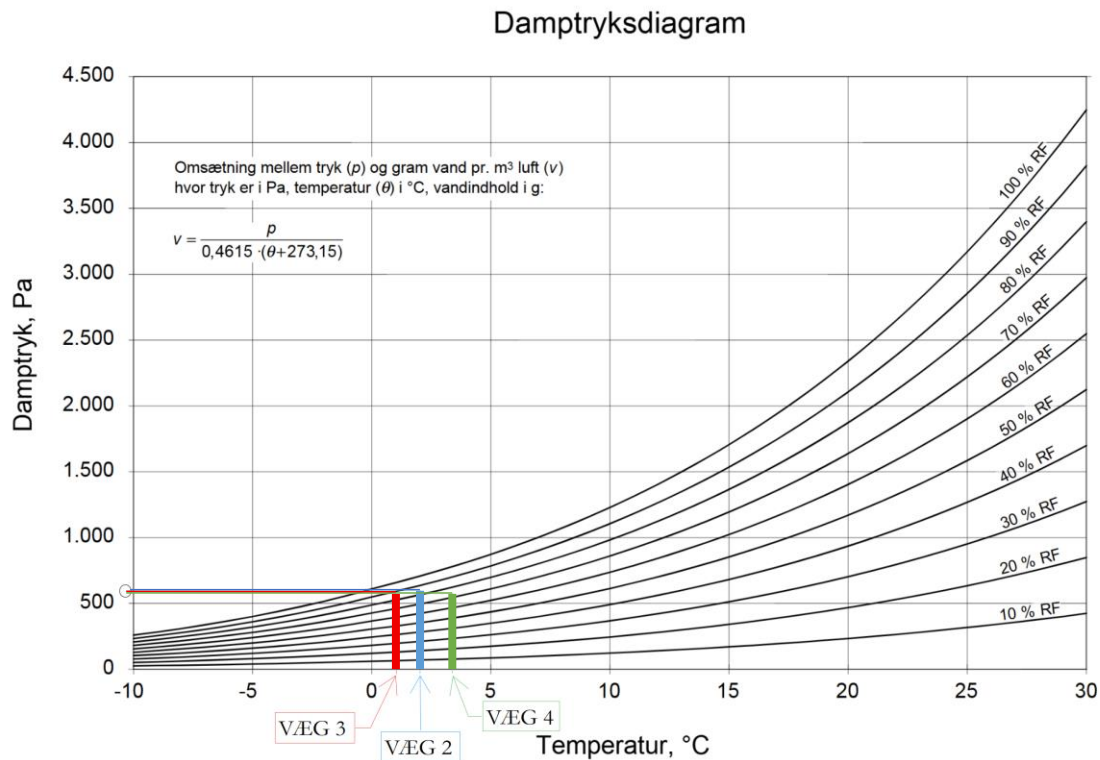
For at afprøve metodens anvendelighed uden for den simulerede konstruktion inddrages to yderligere vægopbygninger fra samme forsøgsopstilling. Disse konstruktioner adskiller sig fra hovedcasen ved isoleringstype og vindspærremateriale, men er opbygget med samme tæthedsplan og fugtbelastning. Formålet er at undersøge, om temperaturprofil og sorptionsegenskaber fører til forskelle i fugtforløbet – og om den fastlagte grænsekurve stadig udgør en konservativ vurdering.

Forsøgsresultaterne fra VIGOT hotbox/coldbox-forsøget giver vigtige indsigter i materialers ydeevne under kontrollerede fugtbelastninger. En sammenligning af VÆG 2 med græsisolering og VÆG 3 med træfiberisolering (jf. Figur 43) viser lavere relativ luftfugtighed bag vindspærren i konstruktionen med græsisolering. Begge vægge har identisk tæthedsplan (OSB/4-plade, $Z = 7,7 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$) og vindspærre (9 mm kompositgipsplade, $Z = 0,49 \text{ GPa} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^2/\text{kg}$), hvilket isolerer forskellen til isoleringsmaterialet. Gipsbaserede vindspærreplader bør ikke udsættes for længerevarende fugtpåvirkning, og flere vejledninger fremhæver, at risikoen for opfugtning kan reduceres ved at placere et isolerende lag uden på vindspærren for at hæve temperaturen på dens indvendige side (Christensen, 2005) (Bunch-Nielsen, et al., 2017). I forsøget er vindspærren placeret direkte mod det ventilerede hulrum, hvilket øger konstruktionens følsomhed over for fugtophobning bag regnskærmen.



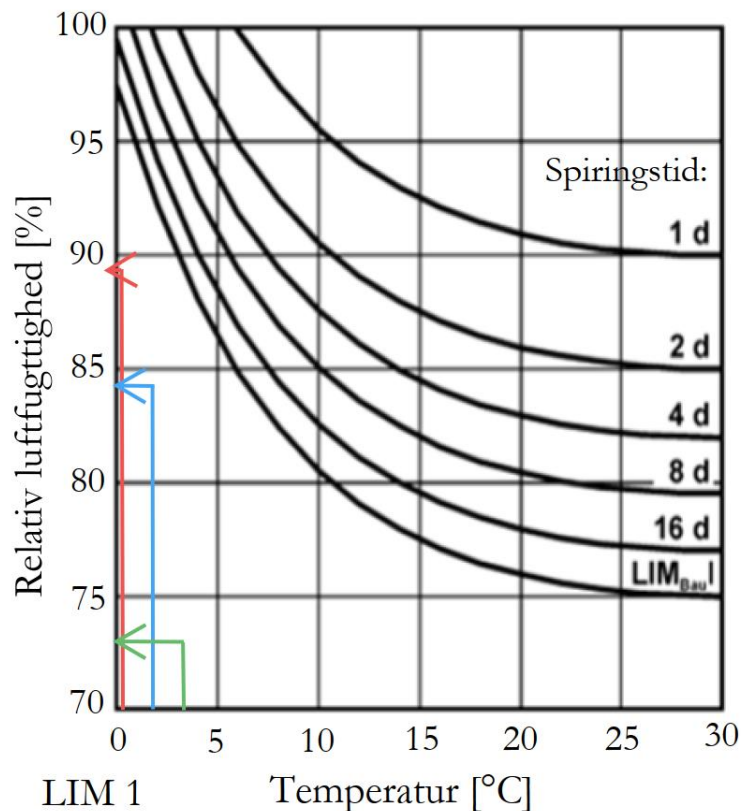
Figur 43 - Målt relativ luftfugtighed og temperatur i vurderingspunktet bag vindspærren i VÆG 2, VÆG 3 og VÆG 4 under hotbox/coldbox-førsøget. VÆG 2 og VÆG 3 har identisk tætbedsplan og vindspærre, men forskellig isoleringstype. VÆG 4 har samme isolering som VÆG 3, men en 30 mm bamplade som vindspærre, hvilket øger temperaturen bag vindspærren.

Ved nærmere analyse af temperaturprofilen i Figur 44 ses, at forskellen i relativ luftfugtighed mellem væggene optræder ved næsten identiske damptryk. Det indikerer, at vandindholdet i luftmængden er omtrent ens, og at forskellen i relativ luftfugtighed primært skyldes temperaturforskelle – ikke forskelle i fugtmængde. Det anbefales, at konstruktionens U-værdi holdes konstant, og temperaturprofilen standardiseres i fremtidige forsøg, hvis formålet er at isolere effekten af Z-værdien og sorptionsegenskaber.



Figur 44 - Damptryksdiagram, der viser sammenhæng mellem temperatur og relativ luftfugtighed ved konstant vandindhold. Samme damptryk medfører forskellig relativ luftfugtighed afhængigt af temperaturen. Kilde: (Brandt, 2013). Figuren er gengivet med tilladelse fra Anvisninger.dk.

De målte fugtforløb er vurderet i forhold til LIM-kriteriet, der er baseret på sporespiningstider i Sedlbauers isopletsystem (jf. Figur 45). I vurderingspunktet for VÆG 2 og VÆG 3 ligger temperaturen typisk mellem 1 og 4°C , og den relative luftfugtighed overstiger kun kortvarigt 85 %. Kurverne krydser ikke nogen af isopleterne. Konstruktionerne ville derfor blive klassificeret som ikke-kritiske i LIM-metoden. Det understøtter, at forsøgsregimet repræsenterer en belastning under væksttærsklen og indikerer, at den simulerede grænsekurve i WUFI Bio er metodisk konservativ.



Figur 45 - Maksimal relativ luftfugtighed i vurderingspunktet for VÆG 2 (blå), 3 (rød) og 4 (grøn) indplaceret i LIM-kurvesystemet. Ved temperaturer på 1–4 °C krydser ingen forløb isopleterne for sporespining inden for 1–8 dage. Konstruktionerne vurderes som ikke fugtkritiske i LIM-metoden. Kilde: (Sedlbauer, 2001). Figuren er gengivet med tilladelse fra Klaus Sedlbauer.

Dette bekræftes af Figur 40 på side 79, hvor den interpolerede fugtprofil fra VÆG 4 ligger under alle de simulerede grænsekurver med træfiberisolering. Grænsen baseret på VÆG 4 er dermed den laveste og mest konservative blandt de vurderede. Sammenlignes med forsøgsdata i Figur 43, ses det, at VÆG 2 og VÆG 3 har højere relativ luftfugtighed bag vindspærren end VÆG 4 og dermed overskrider den fastlagte fugtgrænse. Konstruktionerne ville derfor ikke opfylde kriteriet for fugtteknisk robusthed i den simulerede metode, selvom de ikke vurderes som kritiske i LIM-metoden. Dette understreger, at grænsekurven i Figur 40 er metodisk konservativ i forhold til statiske vurderingsmetoder.

Forsøget viser samlet, at temperaturprofil, materialetykkelse og dynamiske egenskaber har væsentlig betydning for fugtforløbet og skal indgå i fremtidige vurderinger. Forskelle i U-værdi mellem konstruktionerne påvirker den indvendige temperatur, og der er i forsøget ikke kompenseret for, at græsisolering har en højere varmeledningsevne end træfiberisolering. Det

anbefales, at nye materialer som græsisolering og hampplade undersøges i særskilte parameterstudier, hvor konstruktionens U-værdi holdes konstant, og temperaturprofilen standardiseres. Herved kan forskelle i fugtforløb tilskrives materialernes Z-værdi og sorptionsegenskaber, uden at påvirkes af termiske forhold.

En videreudvikling af metoden kræver etablering af kalibrerede inputdata for specifikke produkter. I den anvendte model i WUFI Bio benyttes standardiserede isopleth-systemer og en fast fugtoptagelseskurve for skimmelsporer, som ikke tilpasses det bagvedliggende byggemateriale. Sorptionskurver og fugtkapacitet indgår kun i den hygrotermiske simulering, der forsyner WUFI Bio med inputdata. Der er derfor behov for produktprøvninger og kontrollerede målinger af fugtforløb og skimmelvækst, som kan sammenholdes med modelresultater. Dette er en forudsætning for at vurdere, om de afledte grænsekurver er bredt anvendelige eller skal tilpasses specifikke materialer og producenter.

Endelig bør der udvikles digitale værktøjer, som gør det muligt at omsætte simuleringsresultater direkte til praksis. Et beregningsgrundlag kan fx bestå af et digitalt opslagsværktøj med input for klimabelastning, U-værdi og Z-værdier, som kan understøtte både projektering og produktudvikling og bidrage til bredere anvendelse af biobaserede konstruktioner med dokumenteret fugtteknisk robusthed.

9 Litteratur

Altamirano-Medina, H., et al. 2009. *Guidelines to Avoid Mould Growth in Buildings* : Earthscan, 2009.

Andersen, B. og Rasmussen, T. V. 2025. *Biobased building materials: Moisture characteristics and fungal susceptibility*. København S : BUILD, 2025.

ASHRAE. 2016. *Criteria for Moisture-Control Design Analysis in Buildings* : ASHRAE, 2016.

Borodinecs, A., et al. 2025. *Hygrothermal performance of well-insulated wood-frame walls in Baltic climatic conditions* : Riga Technical University, 2025.

Brandt, E. et al. 2013. *Fugt i bygninger, 2. udgave*. København S : Statens Byggeforskningsinstitut, 2013.

Brandt, E., et al. 2023a. *SBI-anvisning 277 - Fugt i bygninger - Teori, beregning og undersøgelse*. København : BUILD, 2023a.

Brandt, E., et al. 2023b. *SBI-anvisning 279 - Fugt i bygninger. Bygningsdele*. København : BUILD, 2023b.

Brandt, E., et al. 2005. *Skimmel i bygninger – vækstbetingelser og forebyggelse*. Ballerup : Fonden BYG-ERFA, 2005.

Brandt, E., Sebastian, W. og Guldberg, J. P. 2022. *Fugesvigt og udskiftning af fuger omkring vinduer og døre*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2022.

Bunch-Nielsen, T. og Christensen, G. 2017. *Vindspærre af uorganiske pladematerialer i lette ventilerede ydervægge*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2017.

Bunkholt, N. S., et al. 2021. *Effect of forced convection on the hygrothermal performance of a wood frame wall with wood fibre insulation*. Trondheim : SINTEF Community, 2021.

Bøggild-Ugelvig, C. og Møller, M. B. 2024. *Dynamiske fugtsimulerings korrelation til stationære hotbox-forsøg med biobaserede vægkonstruktioner*. København S : Aalborg Universitet - Master i Bygningsfysik, 2024.

Christensen, G. og Møller, E. B. 2015. *Uopvarmede og kortvarigt opvarmede bygninger – dampspærre i klimaskærmen?* København K : Fonden BYG-ERFA, 2015.

Christensen, G. 2005. *Vindgips i lette ydervægge – risiko for fugtskader*. Ballerup : Fonden BYG-ERFA, 2005.

Dansk Standard. 2020. *DS 418 + Till.1:2020 - Beregning af bygningens varmetab*. København : Dansk Standard, 2020. Publikation.

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

Dansk Standard. 2000. *DS/EN 1931. Fleksible membraner til fugtisolerings - Bitumen-, plast- og gummimembraner til fugtisolerings af tage - Bestemmelser af vanddampdissusionssegenskaber*. København : Dansk Standard, 2000.

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

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

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

Ditlevsen, S. og Bendix, H. 2024. aktuelnaturvidenskab.dk. <https://aktuelnaturvidenskab.dk/find-artikel/nyeste-numre/5-2024/statistik-giver-et-bud-paa-fremtidens-klima>. [Online] 2024. [Citeret: 31. 03 2025.]

DMI. 2025. dmi.dk/frie-data. <https://www.dmi.dk/frie-data>. [Online] DMI, 2025.

Due, L. og Brandt, E. 2020. *Bygningers lufttæthed*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2020.

Fraunhofer IBP. 2025. climateforculture.eu. <https://www.climateforculture.eu/>. [Online] Fraunhofer IBP, 2025. [Citeret: 10. 04 2025.]

- Fraunhofer IBP. 2024b. *Guideline for Assessing the Risk of Mould Growth with WUFI* : Fraunhofer IBP, 2024b.
- Fraunhofer IBP. 2015. *WUFI VTT Guide* : Fraunhofer IBP, 2015.
- Fraunhofer IBP. 2019. wufi.de. <https://wufi.de/en/2019/12/03/wufi-bio-4-0/>. [Online] IBP, Fraunhofer, 12 2019.
- Fraunhofer IBP. 2024a. wufi.de. <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>. [Online] Fraunhofer IBP, 12 2024a.
- Fraunhofer IBP. 2011. *WUFI-Bio 4.0: Assessing the Risk of Mould Growth* : Fraunhofer IBP, 2011.
- Fraunhofer IBP. 2009. wufi-wiki.com. <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/Details:Physics>. [Online] Fraunhofer IBP, 2009.
- Geving, S. og Holme, J. 2015. *Laboratory Investigations of Moisture Conditions in Wood Frame Walls with Wood Fiber Insulation*. Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2015.
- Gottfredsen, F. R. og Nielsen, A. 1997. *Bygningsmaterialer: grundlæggende egenskaber*. København : Polyteknisk Forlag, 1997.
- Gottlieb, S. C., et al. 2024. *Hvordan standarder og lovgivning påvirker brugen af biobaserede byggematerialer*. København S : Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet, 2024.
- Hansen, S. S., et al. 2024. *Requirements of the Vapour Barrier in Wood-Frame Walls*. København : BUILD, 2024.
- Hoesung, L., Romero, J. et al. 2023. *CLIMATE CHANGE - Synthesis Report* : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023.
- Hofmann, L. 2024. *Krav til α -værdi i tæthedspånet i lette ydervægge med biogene materialer ved forskellige fugtbelastningsklasser. Materialeparametres betydning for anvendelse i fugttekniske robuste konstruktioner*. København S : Aalborg Universitet - Master i Bygningsfysik, 2024.
- Holzhueter, K. og Itonaga, K. 2017. *An Evaluation of WUFI-Bio to Predict Mold Growth in Straw Bale Walls in Japan*. Nihon : Graduate School of Bioresource Sciences, Nihon University, 2017.

- Hukka, A. og Viitanen, H. A. 1999. *Wood Science and Technology - A mathematical model of mould growth on wooden material, vol. 33, 6. Udgave* : FFRI Joensuu Research Station, 1999.
- Høegh, B. H. 2023a. *Fugtkriterier og udtørring*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2023a.
- Høegh, B. H. 2023b. *Fugtstrategi i byggeprojekter – forebyggelse af skimmelsvampevækst*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2023b.
- Jensen, N. F. og P., Scheutz. 2025a. *Info om Machine Learning model til estimering af modstråling* : Mail, 2025a.
- Jensen, N. F., et al. 2023. *Klimadata til fugtsimuleringer - Referenceår* : BUILD, 2023.
- Jensen, N. F., Rasmusses, T. V. og Hofmann, L. 2025b. *Wood Frame Walls Designed with Low Water Vapour Diffusion Resistance Wind Shields*. København : Division of Building Technology, 2025b.
- Jensen, N.F., et al. 2020. *Hygrothermal assessment of diffusion open insulation systems for interior retrofitting*. Lyngby : DTU, 2020.
- Johansen, B. L., Munch-Andersen, J. og Thomassen, T. 2023. *TRÆ70 Træmaterialer (2. udgave)*. Kgs. Lyngby : Træinformation, 2023.
- Johansen, B.L., et al. 2025. *TRÆ55 Træfacader Udvendige Bræddebeklædninger (3. udgave)*. Lyngby : Træinformation, 2025.
- Johansson, P., Lång, L. og Capener, C-M., 2021. *How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective?* Borås : RISE Research Institutes of Sweden, 2021.
- Krus, M., Seidler, M. og Sedlbauer, K. 2010. *Comparative Evaluation of the Predictions of Two Established Mold Growth Models* : ASHRAE, 2010.
- Larsen, P. K. 2021. *Fugtmåling i træ og tagkonstruktioner*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2021.
- Lepage, R., et al. 2019. *Biodeterioration Models for Building Materials: Critical Review* : ASCE, 2019.
- Morelli, M., Nielsen, A. og Vanhoutteghem, L. 2017. *SBi rapport 2017:20, 1. udgave - Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner*. København : BUILD, 2017.

- Morelli, M., Rasmussen, T. V. og Therkelsen, M. 2021. *Exterior Wood-Frame Walls—Wind–Vapour Barrier Ratio in Denmark*. København : BUILD, 2021.
- Much-Andersen, J. 2024. *Træskelethuse - TRÆ56 3. udgave* . Lyngby : Træinformation, 2024.
- Møller, E. B, Brandt, E. og Pedersen, E. S. 2016. *Småhuse - klimaskærmen*. København : Statens Byggeforskningsinstitut, 2016.
- Nath, S., et al. 2022. *Mould Growth Risks for a Clay Masonry Veneer External Wall System in a Temperate Climate*. : MDPI, 2022.
- NCKF, DMI. 2025. *Vejledning i anvendelse af udledningsscenarier til klimatilpasnin*. : Danmarks Meteorologiske Institut, 2025.
- NCKF, National Center for Klimaforskning. 2024. *Klimaatlas-rapport*. : DMI, 2024.
- Nian, D., et al. 2023. *A potential collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation may stabilise eastern Amazonian rainforests*. : COMMUNICATIONS EARTH & ENVIRONMENT, 2023.
- Oak Ridge National Laboratory. 2011. *Moisture Reference Year Climate Data – Québec* : Oak Ridge National Laboratory. Leveret med WUFI Pro 6.8. Holzkirchen: Fraunhofer IBP, 2011.
- Ojanen, T., et al. 2010. *Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials*. : ASHRAE, 2010.
- Pachauri, R. K. og Reisinger, A. 2007. *CLIMATE CHANGE - Synthesis Report* : Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007.
- Ranefjärd, et al. 2024. *Hygrothermal Properties and Performance of Bio-Based Insulation Materials Locally Sourced in Sweden*. Lund : Lund University, 2024.
- Rasmussen, T. V. og Nicolajsen, A. 2013. *Klimaskærmens Lufttæthed (SBI-anvisning 214, 2. udgave)* : Statens Byggeforskningsinstitut, 2013.
- Rasmussen, T. V., et al. 2020. *Materialeegenskaber - Test af polyethylenmembraners egenskaber før og efter accelereret aldring*. København S : BUILD, 2020.
- Rasmussen, T.V., et al. 2022. *Biogene materials anvendelse i byggeriet*. København SV : BUILD, Aalborg Universitet , 2022.

- Rasmussen, T. V. 2025. VIGOT. <https://vigot.dk/>. [Online] BUILD, 2025.
- Rode, C., et al. 2005. *Moisture Buffering of Building Materials*. Lyngby : DTU, 2005.
- Scheel, A. F. 2025. dr.dk. <https://www.dr.dk/nyheder/viden/klima/verdens-mest- kendte-klimaforsker-taler-med-store-bogstaver-sovende-kaempe-er>. [Online] Danmarks Radio, 06. 02 2025. [Citeret: 30. 03 2025.]
- Schjønning, C., Hansen, M. H og Brandt, E. 2015. *Dampspærrematerialer og fugttransport – væg- og loftkonstruktioner*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2015.
- Schjønning, C., Pedersen, L. og Friderichsen, J,. 2024. *Dampspærre – monteringsdetaljer*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2024.
- Schroderus, S., et al. 2024. *Effect of climate change on hygrothermal performance of timber framed wall with different insulation materials*. Oulu : University of Oulu, P.OB., 2024.
- Sedlbauer, K. 2002. *Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation*. Holzkirchen : Fraunhofer-Institute for Building Physics, 2002.
- Sedlbauer, K. og Krus, M. 2003. *A new Model for Mould Prediction and its Application in Practice*. Holzkirchen, Bavaria : Fraunhofer IBP, 2003.
- Sedlbauer, K. 2001. *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components* : Fraunhofer Institute for Building Physics, 2001.
- Smolders, E. J. V., van Westen, R. M. og Dijkstra, H. A. 2024. *Probability Estimates of a 21st Century AMOC Collapse*. Utrecht, the Netherlands : Department of Physics, Institute for Marine and Atmospheric research, 2024.
- Social- og Boligstyrelsen. 2025. Bygningsreglementet 2018, version 16. 1060 København K : Social- og Boligstyrelsen, 2025, s. §443.
- Social-, Bolig- og Ældreministeriet. 2024. *Tillægsaftale om national strategi for bæredygtigt byggeri*. København K : Social-, Bolig- og Ældreministeriet, 2024.
- Therkelsen, Marcus. 2020. *Dampspærre i lette ydervægge - En nødvendighed eller ej?* København : Statens Byggeforskningsinstitut, 2020.

- Thompson, P., Kolbe, J. og Christensen, G. 2015. *Vindspærre i facader – afdækning i byggeperioden*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2015.
- Thomsen, M. A. og Hansen, S. S. 2023. *Anvendelse af biogene isoleringsmaterialer i ydervægskonstruktioner. Fugtteknisk robust ydervægskonstruktion. Z-værdibetragtinger mellem tæthedsplanet, på den varme side af ydervægskonstruktioner og vindspærren*. København S : Aalborg Universitet - Master i Bygningsfysik, 2023.
- Thrane, U., et al. 2020. *Skimmelsvampe i bygninger – undersøgelse og vurdering (SBI-anvisning 274)*. København : BUILD, Aalborg Universitet, 2020.
- Veitmans, K. og Grinfelds, U. 2016. *Research for Rural Development volume 2 - Wood Fiber Insulation Material* : Latvia University of Agriculture, 2016.
- Vereecken, E. og Roels, S. 2012. *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*. Leuven : Building Physics Section, K.U. Leuven, 2012.
- Viitanen, H., et al. 2015. *Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models* . Espoo : VTT Eco efficient building solutions & Fraunhofer IBP, 2015.
- Vinha, J. 2008. *Analysis method to determine sufficient water vapour retarder for timber-framed walls* : Department of Civil Engineering, Tampere University of Technology, 2008.
- Zachariassen, H., Brandt, A. og Kjær, A. 1993. *Facadefuger - Udformning og materialer (SBI-anvisning 177)*. Hørsholm : Statens Byggeforskningsinstitut, 1993.

10 Bilag

Bilag 1 – Beregning af U-værdier

Bilag 2 – Omregning fra μ - og Sd-værdier til Z-værdi

Bilag 3 – Oversigt over simulerede WUFI-filer

Bilag 4 – Statiske LIM-kurver

Bilag 5 – Simuleringsresultater fra WUFI Bio

Bilag 6 – Sammenligning med statisk fugtregime

Bilag 7 – Tekniske egenskaber for OSB/4-plader (μ -værdier)