

Anvendelse af biogene isoleringsmaterialer i ydervægskonstruktioner



Fugtteknisk robust ydervægskonstruktion

Z-værdibetragtninger mellem tæthedsplanet,
på den varme side af
ydervægskonstruktioner og vindspærren

Martin Aagaard Thomsen & Søren Schaldemann Hansen

Master i Bygningsfysik

BUILD Institut for Byggeri, By og Miljø

Aalborg Universitet, København.

9. juni 2023



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:

4. semester

Titel på projekt:

Anvendelse af biogene isoleringsmaterialer i ydervægskonstruktioner – Fugtteknisk robust ydervægskonstruktion, Z-værdi-betragtninger mellem tæthedsplanet, på den varme side af ydervægskonstruktioner og vindspærren

Projektperiode:

Februar – juni 2023

Vejleder:

Torben Valdbjørn Rasmussen

Martin Morelli

Studerende:

Martin Aagaard Thomsen

Søren Schaldemann Hansen

Antal normalsider:

Ca. 67 sider á 2.400 anslag

Afleveringsdato: 9. juni 2023**Resumé:**

Set i lyset af øget fokus på klimaforandringerne, ses der indenfor byggeriet et stigende behov og interesse for anvendelse af biogene isoleringsmaterialer. Der forventes at både udviklingen, samt nødvendigheden for viden af biogene isoleringsmaterialer vil øges i de kommende år. Der stilles i Bygningsreglementet krav til grænser for udledning af CO₂ i forbindelse med udførelse af nybyggeri, og i fremtiden også for renovering. Flere og flere vælger at bygge med biogene materialer, frem for konventionelle. Derfor er det relevant med fokus på robuste fugttekniske ydervægskonstruktioner, som denne rapport belyser.

I Danmark er der mange års erfaring med traditionel byggeskik, og mange bygningsdele er udviklet gennem årene til at blive gode robuste konstruktioner. Der er bygget med tunge såvel som lette ydervægskonstruktioner gennem generationer, og de første isoleringsmaterialer man anvendte var sågar udført af biogene materialer som f.eks. tørv, ler, halm mv.

Formålet med denne rapport er, med udgangspunkt i en traditionel let ydervægskonstruktion, at analysere konstruktioners Z-værdiforhold, så der ikke opstår risiko for skimmelvækst.

Med udgangspunkt i beregninger fra WUFI, defineres der, hvilke krav der skal sættes til dampdiffusionsmodstanden i tæthedsplanet, ved anvendelse af forskellige biogene isoleringsmaterialer.

Til denne rapport er der udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægskonstruktioner, for at beregne mindstekrav for Z-værdiforholdet mellem tæthedsplanet på den varme side af ydervægskonstruktioner, og vindspærren. Med baggrund i fugttekniske sunde ydervægskonstruktioner, med U-værdi på 0,15 W/m²K og 0,10 W/m²K, vurderes ydervæggen i forhold til dens anvendelse i fugtbelastningsklasse 2 og 3.

Rapporten konkluderer, at indvendige tæthedsplan for de biogene isoleringsmaterialer varierer med Z-værdier på mellem 6 GPa s m²/kg og 13 GPa s m²/kg, hvor vindspærren i konstruktion er udført med en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg. Resultaterne viser, at halm, træfiber og cellulose har de laveste Z-værdiforhold, hvorimod hamp, hør og græs har et højere Z-værdihold i forhold til referencekonstruktionen med mineraluld. Ved beregninger med vekslende fugtbelastningsklasser 2 og 3 viser resultater, at ved ændring fra fugtbelastningsklasse 3 til 2 kan Z-værdien for tæthedsplanet reduceres betragteligt. Derimod stiger Z-værdien for tæthedsplanet, når U-værdi ændres fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K.

Resume

Set i lyset af øget fokus på klimaforandringerne, ses der indenfor byggeriet et stigende behov og interesse for anvendelse af biogene isoleringsmaterialer. Der forventes at både udviklingen, samt nødvendigheden for viden af biogene isoleringsmaterialer vil øges i de kommende år. Der stilles i Bygningsreglementet krav til grænser for udledning af CO₂ i forbindelse med udførelse af nybyggeri, og i fremtiden også for renovering. Flere og flere vælger at bygge med biogene materialer, frem for konventionelle. Derfor er det relevant med fokus på robuste fugttekniske ydervægskonstruktioner, som denne rapport belyser.

I Danmark er der mange års erfaring med traditionel byggeskik, og mange bygningsdele er udviklet gennem årene til at blive gode robuste konstruktioner. Der er bygget med tunge såvel som lette ydervægskonstruktioner gennem generationer, og de første isoleringsmaterialer man anvendte var sågar udført af biogene materialer som f.eks. tørv, ler, halm mv.

Formålet med denne rapport er, med udgangspunkt i en traditionel let ydervægskonstruktion, at analysere konstruktionens Z-værdiforhold, så der ikke opstår risiko for skimmelvækst.

Med udgangspunkt i beregninger fra WUFI, defineres der, hvilke krav der skal sættes til dampdiffusionsmodstanden i tæthedsplanet, ved anvendelse af forskellige biogene isoleringsmaterialer.

Til denne rapport er der udført hygrotermiske simuleringer af lette ydervægskonstruktioner, for at beregne mindstekrav for Z-værdiforholdet mellem tæthedsplanet på den varme side af ydervægskonstruktioner, og vindspærren. Med baggrund i fugttekniske sunde ydervægskonstruktioner, med U-værdi på 0,15 W/m²K og 0,10 W/m²K, vurderes ydervæggen i forhold til dens anvendelse i fugtbelastningsklasse 2 og 3.

Rapporten konkluderer, at indvendige tæthedsplan for de biogene isoleringsmaterialer varierer med Z-værdier på mellem 6 GPa s m²/kg og 13 GPa s m²/kg, hvor vindspærren i konstruktion er udført med en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg. Resultaterne viser, at halm, træfiber og cellulose har de laveste Z-værdiforhold, hvorimod hamp, hør og græs har et højere Z-værdihold i forhold til referencekonstruktionen med mineraluld. Ved beregninger med veksling mellem fugtbelastningsklasserne 2 og 3 viser resultater, at ved ændring fra fugtbelastningsklasse 3 til 2 kan Z-værdien for tæthedsplanet reduceres betragteligt. Derimod stiger Z-værdien for tæthedsplanet, når U-værdi ændres fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K.

Abstract

In light of increased focus on climate change, there is a growing need and interest within the construction industry for the use of biogenic insulation materials. It is expected that both the development and the necessity for knowledge of biogenic insulation materials will increase in the coming years. The Building Regulations impose requirements on limits for CO₂ emissions in connection with new construction and, in the future, also for renovation. More and more people are choosing to build with biogenic materials instead of conventional ones. Therefore, it is relevant to focus on robust moisture-technical exterior wall constructions, as this report illuminates.

In Denmark, there is extensive experience with traditional construction practices, and many building components have been developed over the years to become robust and reliable constructions. Both heavy and lightweight exterior wall constructions have been used for generations, and the first insulation materials used were even made from biogenic materials such as peat, clay, straw, etc.

The purpose of this report is to analyze the Z-value ratio of constructions based on a traditional lightweight exterior wall construction to avoid the risk of mold growth. Based on calculations from WUFI, the requirements for vapor diffusion resistance in the airtight layer are defined when using different biogenic insulation materials.

For this report, hygrothermal simulations of lightweight exterior wall constructions have been conducted to calculate the minimum requirements for the Z-value ratio between the airtight layer on the warm side of the exterior wall construction and the wind barrier. Based on moisture-technically sound exterior wall constructions with U-values of 0.15 W/m²K and 0.10 W/m²K, the exterior wall is assessed in relation to its use in moisture load classes 2 and 3.

The report concludes that the internal airtight layer for the biogenic insulation materials varies with Z-values ranging from 6 GPa s m²/kg to 13 GPa s m²/kg, while the wind barrier in the construction has a Z-value of 1 GPa s m²/kg. The results show that straw, wood fiber, and cellulose have the lowest Z-value ratios, whereas hemp, flax, and grass have higher Z-value ratios compared to the reference construction with mineral wool. When calculating with the transition between moisture load classes 2 and 3, the results show that when changing from moisture load class 3 to 2, the Z-value for the airtight layer can be significantly reduced. However, the Z-value for the airtight layer increases when the U-value is changed from 0.15 W/m²K to 0.10 W/m²K.

1.	Indledning	5
1.1.	Problemformulering.....	6
1.2.	Afgrænsning	6
1.3.	Læsevejledning	6
2.	Teori	8
2.1.	Fugttransport	8
2.2.	Dampdiffusionsmodstand.....	8
2.3.	Nedbrydningsmekanismer	10
2.4.	Klima	12
3.	Litteraturstudie af biogene isoleringsmaterialer	17
3.1.	Hamp.....	17
3.2.	Hør	17
3.3.	Halm.....	18
3.4.	Ålegræs (tangisoleringsmåtter)	20
3.5.	Græs.....	21
3.6.	Træfiber	22
3.7.	Celluloseisolering	23
4.	Metode og materialer.....	24
4.1.	Beregningsværktøj – WUFI	24
4.2.	Materialets egenskab.....	27
4.3.	Skimmelmodeller	30
4.4.	Konstruktioner	36
4.5.	Beregningsparameter	37
5.	Analyse	39
5.1.	Hamp.....	41
5.2.	Hør	43
5.3.	Halm.....	44
5.4.	Græs.....	52
5.5.	Træfiber	53
5.6.	Celluloseisolering	60
5.7.	Z-værdi varianter med vindspærre	61
6.	Resultater.....	66
6.1.	Resultater med Z-værdi på 1 GPa s m ² /kg for vindspærren	66
6.2.	Resultater med Z-værdi på 2-5 GPa s m ² /kg for vindspærren.....	68
6.3.	Resultater for RHT-indeks	69
7.	Diskussion	72
8.	Konklusion.....	79
9.	Perspektivering	80
10.	References	81
11.	Bilag.....	84

1. Indledning

Pr. 1. januar 2023 trådte regeringens nye krav om dokumentering af klimapåvirkninger (CO₂) i kraft. Dette har betydning for et stort antal byggerier, nu og i fremtiden, da der her skal udarbejdes en Livscyklusvurdering (LCA). På nuværende tidspunkt må bygninger over 1.000 m² ikke overskride en CO₂ grænseværdi svarende til 12 kg CO₂-ækv/m²/år (Bolig- og planstyrelsen, 2022). Denne grænse er planlagt til at blive reduceret jævnt de næste 6. år.

Igennem århundreder har mennesket afbrændt fossile brændstoffer som kul og olie, hvilket har øget koncentrationen af kuldioxid (CO₂) i atmosfæren. Stigningen sker, fordi kul- eller olieafbrændingsprocessen kombinerer kulstof med ilt i luften, som frembringer CO₂ (NASA, 2023).

Byggeriet spiller en stor rolle i udledning af CO₂, og tal viser at ca. 40% af Danmarks energiforbrug er fra bygninger (DM, Dansk Magisterforening, 2023). For en ny bygning ligger, den samlede klimabelastning allerede ved endt byggeri, på mellem 50-70% ud af den samlede klimabelastning for en bygnings levetid.

For at reducere klimabelastningen i byggebranchen skal der tænkes i anvendelsen af andre materialer. Ved brug af biogene materialer i byggeriet, vil der kunne reduceres markant i udledningen af CO₂. Omtrent en halvering kan opnås ved at gå, fra konventionelle og gængse byggematerialer, over til anvendelsen af biogene byggematerialer (DM, Dansk Magisterforening, 2023).

Mange biogene materialer kan dyrkes i Danmark, hvilket bl.a. minimerer transporten så længe det produceres og anvendes her. Råstoffer som bl.a. træer, halm, hamp og hør kan dyrkes herhjemme på marker og i skove. Ålegræs kan dyrkes i havet lige ved de danske kyster. Desuden indeholder biogene materialer kulstof, således at byggeriet kan udgøre et CO₂ lager.

Udfordringen i de kommende år er, at der i forhold til robuste løsninger, ikke findes nok dokumenteret ydeevne ved brug af biogene isoleringsmaterialer i ydervægskonstruktioner. Der opfordres til at dele viden med hinanden i det offentlige rum (Rasmussen, et al., 2022) med såkaldte fyrtårnsprojekter, hvor dokumenteret erfaringer fra projekter kan komme alle til gode.

Byggeskader for ydervægge er stigende, jf. beretning af byggeskadefonden (Byggeskadefonden, 2022). Derfor er det vigtigt at bygge fugtteknisk robuste konstruktioner, og især i tiden hvor byggeriet står overfor at skulle finde mere bæredygtige løsninger med et reduceret CO₂ aftryk, som indebærer øget anvendelse af fugtfølsomme byggematerialer. Reduceret CO₂ aftryk er ikke bæredygtigt i sig selv, det handler også om anvendelsen af jordens ikke fornybare ressourcer.

1.1. Problemformulering

Rapporten har til hensigt at belyse, hvilken dampdiffusionsmodstand der er nødvendig for det tæthedsplanet, på den varme side, i en fugtteknisk sund ydervægskonstruktion, ved anvendelse af biogene isoleringsmaterialer. En sund ydervægskonstruktion, er i denne sammenhæng konstruktioner uden risiko for vækst af skimmel i anvendelse. Således er byggefugt ikke en del af analysen.

Med udgangspunkt i en traditionel let ydervægskonstruktion som referencekonstruktion undersøges det, hvilke krav der skal sættes til dampdiffusionsmodstanden, ved anvendelse af forskellige biogene isoleringsmaterialer. Referencekonstruktionen er isoleret med mineraluldsisolering, som substitueres med biogent materiale, som er egnet til isolering af ydervægskonstruktioner.

På baggrund af et litteraturstudie omkring biogene isoleringsmaterialer vælges en række materialer, det er muligt at analysere med, et for os tilgængeligt, beregningsværktøj, som substitut for traditionel mineralsk isolering. Dertil analyseres og vurderes materialerne ud fra egenskaber og tilgængelighed. Ligeledes vurderes det hvorledes de biogene isoleringsmaterialer bidrager til den samlede konstruktions ydeevne i forhold til, forholdet mellem vindspærreplanets- og tæthedsplanets dampdiffusionsmodstand.

Konstruktionens fugttekniske egenskaber vurderes på baggrund af beregningsværktøjet WUFI, hvor kriteriet for en fugtteknisk sund konstruktion, vurderes i forhold til risikoen for vækst af skimmel i vægkonstruktionens materialer. Med baggrund i en fugtteknisk sund ydervægskonstruktion med U-værdi på 0,15 W/m²K og 0,10 W/m²K, vurderes ydervæggen i forhold til dens anvendelse i fugtbelastningsklasse 2 og 3.

Resultaterne sammenholdes og der ønskes at undersøge, om der er sammenhæng mellem biogene isoleringsmaterialers dampdiffusionsmodstand, fugtbelastningsklasse og krav til Z-værdi forhold mellem vindspærre og tæthedsplan.

1.2. Afgrænsning

Ved anvendelse af fugtbelastningsklasser beregnes konstruktionerne, i denne opgave, ikke med fugtbelastningsklasser 1, 4 og 5. Fugtklasse 1 medtages ikke da denne klasse har med byggeri som bl.a. ubenyttede bygninger, tørre lagerhaller, idrætshaller uden tilskuere mv., se endvidere kapitel 2.4.1. Konstruktioner for bygninger i fugtbelastningsklasse 1, vil generelt ikke have samme opbygning som den konstruktion vi har anvendt i denne rapport. Det samme gør sig gældende for fugtbelastningsklasserne 4 og 5, da bygninger i disse klasser befinder sig i modsat ende af skalaen for fugttilskud ved anvendelse. Disse bygninger, er bygninger som f.eks. svømmehaller mv., som har et stort fugttilskud, se kapitel 2.4.1 Fugtbelastningsklasser.

1.3. Læsevejledning

Første del af denne rapport indeholder grundlaget for rapporten. Her sætter vi fokus på konstruktionernes risiko for fugt ved anvendelse af biogene isoleringsmaterialer, se kapitel 1. I anden del beskrives relevante teorier, metoder og materialer med relation til simuleringer. Anvendelsen af beregningsmetoder samt fokus på rapportens biogene isoleringsmaterialer og tilhørende konstruktionsopbygning, se kapitel 2, 3, 3 og 4.3. Tredje del af rapporten analyserer og viser resultater for beregningerne, se kapitel 5 og 6. Fjerde og sidste del er diskussion og konklusion af resultater samt en perspektivering, se kapitel 7, 8 og 9.

Kapitel 1 definerer opgaven med bl.a. indledning og problemformulering. Det er her, opgaven definerer, hvad der undersøges i forhold til isoleringsmaterialet og konstruktioner, med fokus på tæthedsplanets Z-værdi for en fugtteknisk korrekt konstruktion. I denne del angives der også, hvilke afgrænsninger vi vælger i forhold til fugtbelastningsklasser.

Kapitel 2 til 4.3 indeholder teorier bag de beregninger og analyser, vi anvender i rapporten. Derudover beskriver vi også i denne del, hvilke metoder der anvendes, hvorledes de anvendes, samt hvilke justeringer der foretages. Denne del indeholder en gennemgang af vores biogene isoleringsmaterialer med konstruktionernes opbygning samt justeringer af disse.

Kapitel 5 og 6 præsenterer analysearbejdet, samt de resultater vi er kommet frem til. Det er her alle varierende parameter for U-værdi, fugtbelastningsklasser, orientering samt hvilken Z-værdi tæthedsplanet resulterer i, ud fra en fugtteknisk korrekt konstruktion med de forskellige variationer.

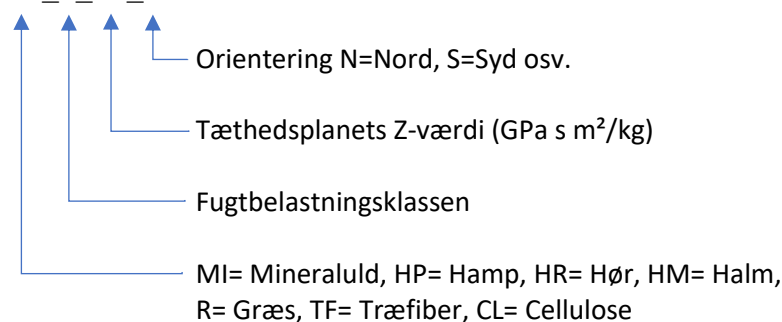
Kapitel 7 til 9 starter med en diskussion af resultater, der samtidig vurderer disse op mod relevante teorier, i forhold til rapportens beregnet resultater. Der konkluderes i kapitel 8 med fokus på besvarelse af problemformulering. Sidst i denne del afsluttes der med kapitel 9, hvor der vurderes på hvilke mulige beregninger, der kunne være aktuelle, at viderebearbejde i et evt. fremtidigt arbejde. Der gives også her en vurdering på muligheden, for anvendelsen af biogene isoleringsmaterialer nu og i fremtiden.

Når der i denne rapport nævnes Z-værdier, i forbindelse med beregninger mv., så er det altid ment som Z-værdien for tæthedsplanet på den varme side af isoleringslaget, med mindre andet er angivet.

I oversigten over konstruktioner med forskellige parametre Bilag 1, anvendes der ID-numre for alle konstruktionernes variationer. På Figur 1 forklaring på disse ID-numre, som skal aflæses således for de enkelte konstruktioner:

Eksempel:

MI_3_10_N



Figur 1 - Forklaring på konstruktionernes ID nummerering

Der findes udvidelse af ID-nummeret med forskellige forkortelse, disse forkortelser har følgende betydning:

- U1 = Her er der tale om en konstruktion med U-værdi på 0,10 W/m²K
- VS2, VS3, VS4 og VS5 = Disse anvendes hvor vi har lavet analyser med anden Z-værdi for vindspærren. VS2 = Z-værdi på 2 GPa s m²/kg, VS3 = Z-værdi på 3 GPa s m²/kg osv.

2. Teori

2.1. Fugttransport

Fugt transporteres via luften gennem materialer, der hvor der er forskel på vanddampptrykket, vil denne forskel forsøge at transportere fugt gennem konstruktioner. Materialer vil gå i fugtligevægt med de omkringliggende klimas fugtniveau.

Transportformer

Fugt transporteres i forskellige former, enten væske- eller dampform. Når fugt transporteres i materialer, kan det være i form af konvektion, diffusion og kapillartransport.

Ved konvektion transporteres den fugtige luft ved lufttrykforskelle, dvs. luftstrømme. Konvektion kan være naturlig eller tvungen konvektion.

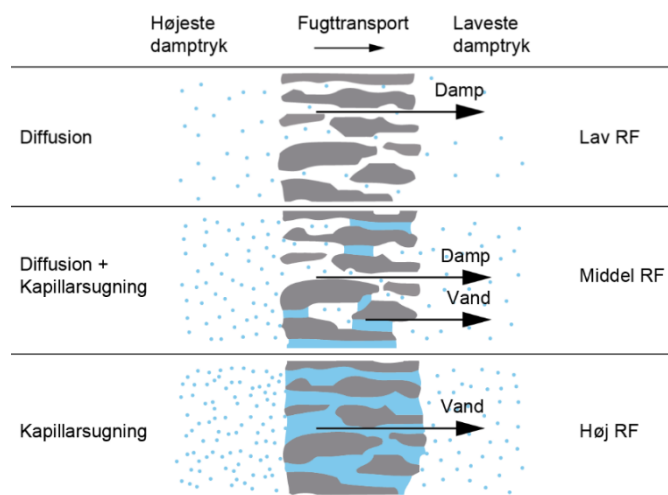
Naturlig konvektion opstår ved temperaturforskelle i luftens massefylde. Hvilket bl.a. kan opstå i meget porøse materialer eller hulrum, hvor de tilstødende overflader har forskellige temperaturer. Dette gør sig især gældende om vinteren, hvor udeluften er koldere.

Tvungen konvektion skyldes kræfter, som påvirker luften, hvilket kan være ventilatorer eller vindpåvirkning. Vindspærren i ydervægskonstruktioner, skal eliminere konvektion i isoleringslaget, således at kold luft ikke ledes ind i konstruktionen.

Fugtkapacitet

Materialers fugtkapacitet angiver, hvor meget fugt et materiale kan indeholde ved en given relativ fugtighed RF% (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023). Fugtkapacitet kan aflæses på sorptionskurver, hvor der kan være store forskelle på de forskellige materialer. Et materiales fugtkapacitet angiver evnen til at optage og afgive fugt i det hygroskopiske område.

Hygroskopiske materialer optager, og afgiver fugt, hvor disse vil opnå fugtligevægt med de omkringliggende omgivelser. Hygroskopiske materialer, med høj fugtkapacitet kan bidrage til at udjævne store udsving i den relative fugtighed. Når egenskaben anvendes, i forhold til at udjævne fugtvariationer i indeklimaet, skal fugten kunne afgives til udeklimaet eller tilbage til indeklimaet fx ifm. ventilering.



Figur 2 - Fugttransport i materialer (SBI277)

2.2. Dampdiffusionsmodstand

Dampdiffusionsmodstand kan angives på forskellige måder, men fælles er, at de udtrykker, hvor damptætte de enkelte materialer er over for dampdiffusion.

Metoder, til bestemmelse af isoleringsmaterialers vanddampdiffusionsmodstand, er beskrevet i standarden DS/EN 12086, "Termisk isolering i byggeriet – Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber" som er en Europæisk standard.

For andre byggematerialer, såsom byggeplader, dampspærre mv., vil kopmetoden, som er beskrevet

i DS/EN ISO 12572 "Byggematerialers og -produkters hygrotermiske ydeevne – Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber" – , kunne anvendes.

Permeabilitet / Vanddamppermeabilitet

Et materiales permeabilitet definerer, hvor let vanddamp kan passere gennem materialet pr. tidsenhed, hvor tykkelsen defineres i forhold til angivelse af en modstand. Materialets permeabilitet måles gennem et prøvelegeme, hvor dampdiffusionstallet angives med enheden $\text{kg} / (\text{s} * \text{m} * \text{GPa})$, som er den reciprokke værdi af dampdiffusionsmodstanden, målt som Z-værdi (Bengtsson & Selck, 2006).

Angivelse af et materiales vanddamppermeabilitet er forholdet mellem dens egenskaber, i forhold til fugtgennemtrængelighed, samt tykkelsen på det givne materiale (DS/EN 12086, 2013).

Vanddamppermeabiliteten udregnes derfor med nedenstående formel:

$$\delta = W \times d$$

Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor

Når et materiales vanddampdiffusionsmodstandsfaktor angives, er det forholdet mellem luftens vanddamppermeabilitet og materialets vanddamppermeabilitet (DS/EN 12086, 2013).

Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren udregnes derfor som nedenstående formel:

$$\mu = \frac{\delta_{\text{air}}}{\delta}$$

Z-værdi (vanddampdiffusionsmodstand)

Z-værdien for et materiale angiver en modstandsfaktor, i forhold til, hvor meget vanddamp der pr. m^2 diffunderer gennem materialet, ved en given trykforskel. Z-værdien er angivet i $(\text{GPa} * \text{s} * \text{m}^2) / \text{kg}$, hvilket angiver, hvor stor en trykforskel der skal til for at flytte 1 kg vanddamp (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023). Jo større Z-værdi, jo mindre vanddamp diffunderer gennem materialet (Bengtsson & Selck, 2006).

I litteratur som Europæiske standarder, kan Z-værdien være angivet i andre enheder, men selve forståelsen af Z-værdi er ens, da de angiver en modstandsfaktor. I standarden DS/EN 12086, er Z-værdien angivet i $(\text{m}^2 * \text{h} * \text{Pa}) / \text{mg}$, og udregnes som den reciprokke værdi af materiales gennemtrængelighed overfor vand.

Vanddampdiffusionsmodstanden som Z-værdi, udregnes derfor som nedenstående formel:

$$Z = \frac{1}{W}$$

Sd-værdi (vanddampdiffusionsmodstand)

En Sd-værdi, er på samme måde som Z-værdien, en modstandsfaktor som indikerer, hvor modstandsdygtig materialet er overfor vanddamp. Enheden for Sd-værdier, angives i meter, og angiver tykkelsen af et ubevægeligt luftlag, som har samme vanddampsmodstand som tykkelsen på prøveemnet, målt i meter (DS/EN 12086, 2013).

Vanddamppermeabiliteten udregnes derfor som nedenstående formler:

$$Sd = \mu \times d$$

$$Sd = \delta_{\text{air}} \times Z$$

2.3. Nedbrydningsmekanismer

Der er forskellige nedbrydningsmekanismer i forhold til, hvilket type materiale som analyseres. Fugt og skimmel er essentiel, når biogene materialer analyseres, som i denne rapport. Biogene materialer er hygroskopiske, hvilket betyder, at de optager og afgiver fugt til omgivelserne for at opnå fugtligevægt. Denne egenskab kan være en fordel, i forhold til at udjævne større udsving i luftfugtigheden, men fugtbalancen skal være dimensioneret til den konkrete konstruktion.

Ved en høj relativ fugtighed, over 75%, er der risiko for skimmelvækst på træ, og generelt træbaserede og ikke rengjorte produkter. Dette er tilfældet hvis disse over en længere periode, udsættes for en relativ fugtighed over 75%, ved en temperatur på 20 °C (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023). Ved faldende temperaturer øges den relative fugtighed, hvorved der opstår risiko for skimmelvækst (Krus, Seidler, & Sedlbauer, 2010), se Figur 3.

Biogene materialer kan nedbrydes biologisk, hvilket f.eks. kan være skimmelsvampe, som udvikler sig til trænedbrydende svampe, insekter, større skadedyr samt algevækst. Nogle af disse nedbrydningsmekanismer igangsætter den biologiske nedbrydning af materialerne, hvilket er det man ønsker at stoppe, når biogene materialer anvendes i byggeriet. Vækst af skimmel anvendes som indikator for hvornår et materiale påbegynder nedbrydning. Risikoen for vækst af skimmel bruges derfor som vurderingsparameter i forhold til en fugtteknisk sund konstruktion.

Til at vurdere skimmelrisiko i konstruktioner findes der forskellige analysemetoder, som både kan være simple og komplekse, hvor enkelte af dem beskrives i nærværende rapport.

Nogle studier viser at statistiske modeller, kan være mere retningsgivende og præcise i forhold til at forudsige risiko skimmelvækst. En undersøgelse fra 2021 undersøger netop forskellige metoder til at analysere risiko for skimmelvækst, samt vurderer modellernes resultat i forhold til feltundersøgelser (Johansson, Lång, & Capener, 2021). Feltundersøgelser viser generelt at de statistiske modeller kan vise falsk positiv, hvor de dynamiske modeller modsat kan vise falsk negativ (Johansson, Lång, & Capener, 2021).

RHT-model skimmel

RHT-modellen er en indekseret model anvendt og udviklet i Nord Amerika (Cornick & Dalglish, 2003). Et forskningskonsortium, kaldet *MEWS (Moisture Management of Exterior Wall Systems)* udviklede en metode, ved hjælp af hygrotermisk modellering, til at identificere steder hvor der i vægkonstruktioner kunne opleves fugtrelaterede problemer.

Metoden klassificerer klimaer efter et fugtindeks (MI= Moisture Index), baseret på befugtnings- og tørrepotentialer. En klimaklassificering baseret på et fugtindeks blev udviklet. Fugtindekset relaterer til et klimas befugtnings- og udtørningspotentiale med risiko for fugtrelateret skade (RHT: *Relative Humidity and Temperature data over a time periode*).

Et foreløbigt kort over Nordamerika blev produceret ved hjælp af Moisture Index-tilgangen, dette kortlagde kontinentet i zoner relateret til potentielle fugtproblemer.

VTT-model

VVT-skimmelmodellen er en matematisk model, som er baseret på laboratorieforsøg med udgangspunkt i rent fyr- og grantræ. VTT-modellen er udviklet af Finlands Tekniske Forskningscenter -VTT - (Viitanen, Krus, Ojanen, Eitner, & Zirkelbach, 2015).

Skimmelmodellen er udviklet til analysering af træ, og tager udgangspunkt i et skimmelindeks fra 0-6, hvor 0 = ingen vækst, og 6 = visuelt detekterede dækning 100 % (Hukka & Viitanen, 1999).

Vækst af skimmelsvampe vil under gunstige forhold ikke stige til højeste skimmelindeks, uden en vis temperatur og vandmængde (relativ fugtighed RF%) er tilstede (Hukka & Viitanen, 1999).

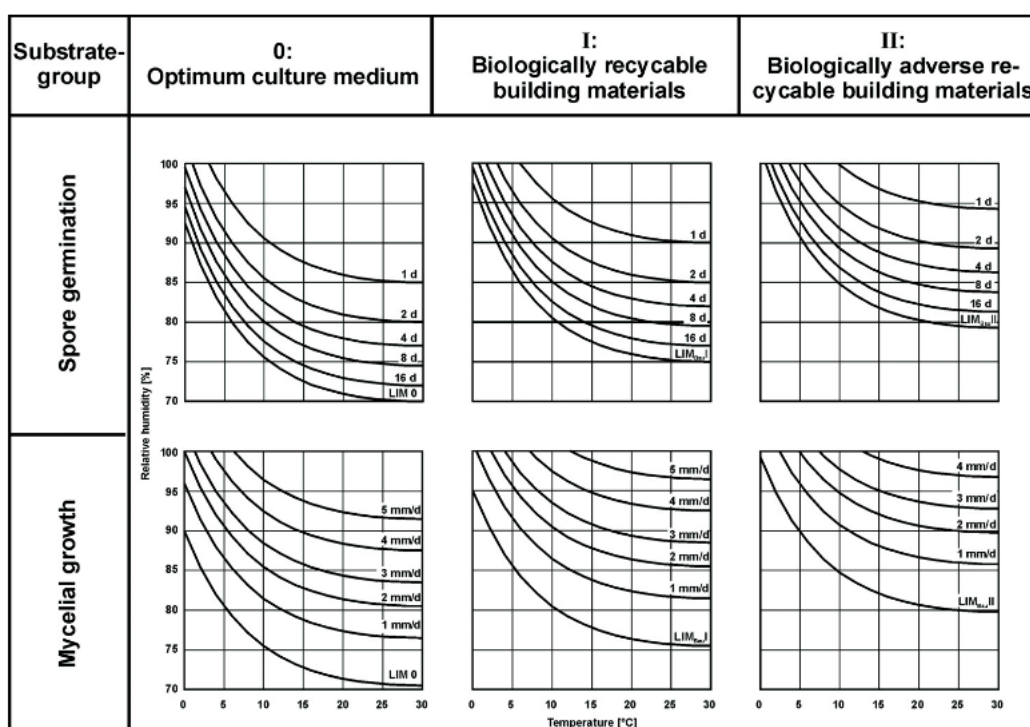
VTT-skimmelmodellen fås som plugin til WUFI, og anvendes til at analysere risikoen for vækst af skimmelsvampe ved forskellige dybder i konstruktionen.

LIM-model

LIM-skimmelmodellen er en forkortelse af, Lowest Isoleth for Mould, hvor Klaus Sedlbauer i 2001 har udviklet en biohygrotermisk procedure i forbindelse med forudsigelse af vækst af skimmelsvampe, sammen med Isoleth-modellen (Sedlbauer, Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, 2001). Isoleth-systemerne vurderer sporespiring og væksthastighed af mycelier, hvor det er baseret på målte data under laboratorieforhold (Sedlbauer, Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, 2001).

Proceduren med flydende randbetingelser, er en vurdering af skimmelvækst i forhold til længere varende forhold med kritisk vandindhold, og dermed spiren af skimmelspore (Sedlbauer, Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, 2001).

Isoleth systemet tager udgangspunkt i forskellige substratgrupper, i forhold til vurdering af risiko for skimmel, hvor kurverne angiver tiden ud fra temperatur og relativ fugtighed %.



Figur 3 - Isoleth system med substratgruppe 0, I, og II (Krus, Seidler, & Sedlbauer, 2010)

Skimmelmodellen kan anvendes i WUFI, som et tillægsprogram, og anvendes i forbindelse med analysering af risiko for skimmel på overflader, samt inde i konstruktionen, ligesom VTT-modellen. Dette tillægsprogram hedder BIO i WUFI og anvendes på samme måde som VTT, hvor aflæsningen af analysen sker via et trafiklys, som giver indikation på, om der er risiko for skimmelvækst i konstruktionen.

MRD model

MRD står for Moisture Resistance Design. Modellen er udviklet af Lunds Universitet i Sverige. MRD evaluerer risikoen for skimmelvækst i overensstemmelse med svensk tilgang (WUFI MRD-model, 2023). Modellen er relateret til en grænsetilstand for initiering af skimmelvækst, observeret i mikroskop. For en given materialeoverflade afhænger potentialet for skimmelvækst af; relativ fugtighed ϕ , temperatur T og eksponeringens varighed. Generelt afhænger både ϕ og T af tiden t . MRD-modellen transformerer en vilkårlig klimaeksponering [$\phi(t)$, $T(t)$] til en dosis $D(t)$. Denne dosis har enhedstidsvarigheden, og varierer kontinuerligt med tiden. Dosis stiger, når klimaforholdene er gunstige for skimmelsvamp (f.eks. fugtige og varme forhold), og falder når betingelserne er ugunstige for vækst (tørre og/eller kolde forhold).

Skimmelmodellen MRD, kan hentes fra WUFIs hjemmeside, og anvendes som plugin ved simuleringer i Wufi.

2.4. Klima

Vejr er som definition det atmosfæriske forhold, på givent tidspunkt og sted, i forhold til temperatur, nedbør, fugtighed, grad af skyer, vind og sigtbarhed. Vejrforhold opstår ikke lokalt, de påvirker vejret rundt omkring, og kan påvirke vejret hundreder eller tusinder af kilometer væk (UNDP - United Nations Development Programme (FN), 2023).

Klima er som definition, hvordan vejret er i et specifikt område over en længere periode, normalt 30 eller flere år.

Menneskelig aktivitet, især i den industrielle tidsalder og i det sidste århundrede, har ændret jordens klima markant ved frigivelsen af skadelige drivhusgasser (UNDP - United Nations Development Programme (FN), 2023). Drivhuseffekten er alt afgørende for livet på vores klode. Menneskeskabte partikler og drivhusgasser sendes op i atmosfæren og fanger og bremser varmetabet til rummet (NASA, 2023).

Drivhuseffekten kan beskrives som et isolerende lag, rundt om kloden, der gør at atmosfæren holder på varmen. Uden drivhuseffekten ville temperaturen på kloden være omkring de -19°C , måske endda koldere (København Universitet, 2023). Drivhusgasserne indfanger en stor del af den infrarøde stråling, som er den måde hvorved jorden sender noget af den varme jorden modtager fra solen, retur ud i verdensrummet på. Hvis denne varme indfanges i atmosfæren, vil der i stedet for den historisk kendte balance, den balance vi kender på nuværende tidspunkt mellem den varme vi får fra solen, og den varme vi afgiver til verdensrummet, således blive en ubalance der vil øge varmen på jorden (København Universitet, 2023). Denne menneskeskabte udledning af drivhusgasser har resulteret i en radikal ændret balance, som med tiden skal finde et nyt niveau for temperaturen på jorden. De vigtigste drivhusgasser er kuldioxid (CO_2), dinitrogenoxid, metan, chlorfluorcarboner (CFC'er) samt vanddamp.

Man har indtil for nyligt ment at solen spillede en rolle i klimaændringerne, men nu peger beviserne på, at den nuværende opvarmning ikke skyldes solen (NASA, 2023).

Mange af de materialer vi i dag anvender i byggeri, er materialer, hvis råstoffer fremkommer fra undergrunden. Disse råstoffer er ikke fornybare, og flere af disse som f.eks. sand og grus er på vej til at blive råstoffer, som der er knaphed på. Det forventes at Hovedstadsregionen allerede i dette årti, løber tør for netop disse råstoffer (DM, Dansk Magisterforening, 2023). Råstofferne kan ikke fornyes, som biogene materialer kan, hvis ellers disse forvaltes bæredygtigt og erstattes med nye træer, planter mv.

Processerne med biogene materialer kræver stadig energi, men meget af energien er allerede tilkommet gratis til træet eller planten fra solen, når de gror og inden de efterfølgende forarbejdes. Det vil således være selve forarbejdnings- og produktionsfasen der skal ændres fra fossile forbrændingsenergi til mere vedvarende energi.

Fremtidig klima

Fortsætter vi udledning af drivhusgasser viser fremtidige klimadata, at jordens klima fremadrettet vil ændre sig. Vi kan forvente mere regn, og stigninger i temperaturen, som vil medføre mildere vintre og varmere somre. Der forventes mere vind, og vandstanden vil stige (Klimatilpasning, 2023). Alt i alt noget der påvirker vores bygningers klimaskærm.

Det forventes, at der i fremtiden findes en løsning der ved forbrænding kan indfange CO₂, denne teknologi kaldes CCS-teknologi (Carbon Capture and Storage) (DM, Dansk Magisterforening, 2023). Således vil den CO₂ som træer, planter mv. optager, ikke blive frigivet til atmosfæren, med derimod indfanget under forbrændingen ved endt levetid.

2.4.1. Fugtbelastningsklasser

SBI Anvisningen 277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023) vedr. Fugt – teori, beregning og undersøgelse, giver mulighed for beregning af fugttilskud og indhold af fugt i indeklime i bygninger. Der gives også mulighed for i andre tilfælde, at skønnes fugttilførslen i bygningen. (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023) Tidligere udgaver af anvisningen (SBI 224), gav kun mulighed for at benytte tabel for fugttilskud, ud fra anvendelsen af bygningen. SBI 277 giver således både mulighed for beregning eller anvendelse af tabel, opdelt i belastningsklasser 1-5 Figur 4. Ved bygninger, hvor der anvendes befugtning af indeklime, anvendes de betingelser anlægget er indreguleret med (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023).

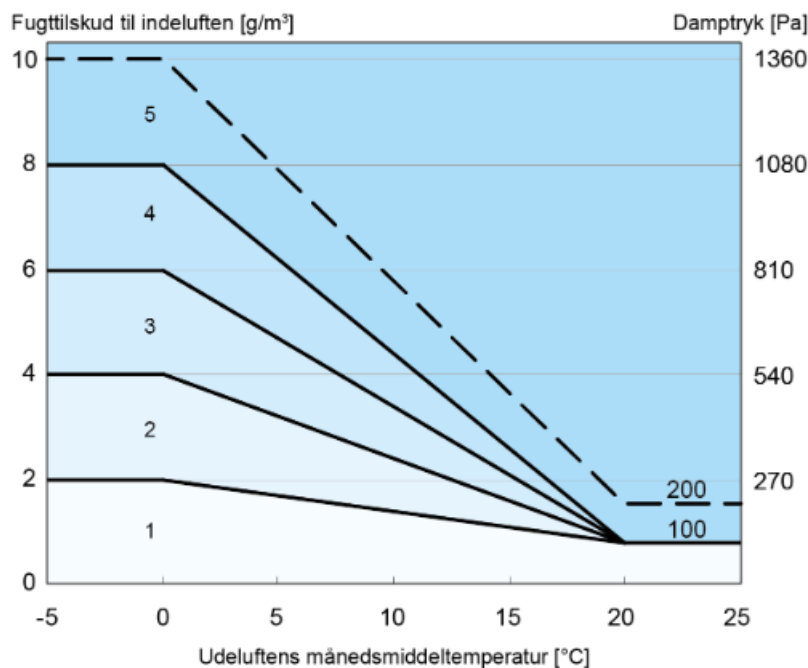
I denne opgave vælges der, for beregning af fugttilskuddet i indeklime, den traditionelle mulighed ved anvendelse af tabel med fugttilskud ud fra belastningsklasserne. Der vælges ikke at udfører beregninger med den manuel beregningsmetode som ligeledes er angivet i SBI 277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023).

Den valgte metode er valgt, da dette giver os en mulighed for, at udfører beregningerne med konstruktioner tilpasset bygninger indenfor visse anvendelseskriterier. Disse anvendelser passer fint til mange bygningstyper, og resultaterne fra vores simuleringer kan derfor benyttes ved en stor andel af de fremtidige byggerier.

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

Figur 4 - Viser fugtbelastningsklasserne 1-5 der kan anvendes ved beregning af fugttilskud i indeklime, set ud fra bygningens anvendelse (SBI 277).

Ved fugtbelastningsklasserne beregnes fugttilskuddet til indeklimaet i g/m^3 ved hjælp af graf Figur 5, fugttilskuddet ændrer sig ud fra, hvilke udetemperaturer der er på et givent tidspunkt (månedsmiddeltemperatur). Lavere udendørs temperaturer giver et højere tilskud af fugt til indeklimaet. Jo mere udendørstemperaturen nærmer sig indeklimaets temperatur, jo mindre fugttilskud vil der være til indeklimaet. Grunden til denne justering, (at fugttilskuddet bliver lavere ved varmere udendørstemperaturer), er at der forventes mere udluftning i bygningen ved højere udetemperatur end ved lavere. Ved 20° udenfor, og derover, forventes der ingen tilskud til fugten i indeklimaet fra udeluften (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023).



Figur 5 - Graf der viser fugttilskud i g/m^3 (0-10) bestemt ud fra bygningens anvendelse mellem belastningsklasse 1-5.

2.4.2. Orientering

Ved simuleringer er der flere parametre, der har indflydelse på det endelige resultat. Disse parametre vurderes ud fra en konkret placering, eller en tænkt placering for en givende konstruktion. Således bliver resultatet af simuleringerne så tæt på virkeligheden som muligt, da konstruktionerne påvirkes af forskellige faktorer som regn, vind, sol, orientering mv. I dette projekt justerer vi disse parametre, så konstruktionerne simuleres med forskellige parametre. Herved fremkommer resultater, der på bedste vis spejler virkeligheden.

Solstråling

På udvendige overflader kan skimmelvækst forhindres ved påvirkning af solstråling. Fungicider nedbrydes af høje temperaturer samt UV-strålingen fra solen. Regn har også en hindrende påvirkning, da regnen er med til at skylle sporene væk. (WUFI-Forum, 2018).

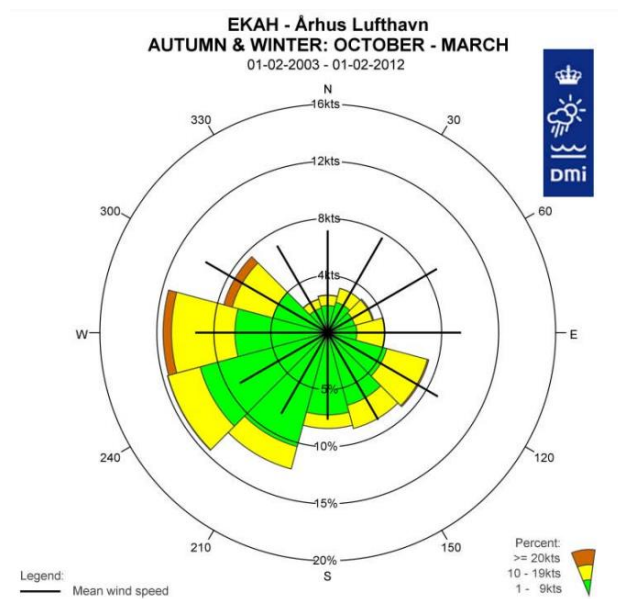
I Wufi anvendes solstråling i simuleringerne, hvilket gør at Wufi har brug for strålingsdata i vejrdatabasen, såfremt der anvendes eksterne data (eksternt data indhentes i Wufi og kræver at filformatet understøttes af Wufi) (WUFI-Help, 2023).

Solens stråler der rammer jorden er kortbølgede. Det samme er de bølger, der kastes tilbage fra jorden og skyerne og ud i rummet (Klimarealisme, 2021). De langbølgede stråler opstår når jord- og havoverfladen opvarmes, og energien herfra kaster varme tilbage ud i rummet. Udfordringen med

drivhusgasserne er, at disse opfanger denne energi, og sendes tilbage til jorden. Dette giver øget temperaturer på jorden, som b.la. vises i IPCC's rapporter om opvarmning (DMI, 2018).

Vindrose

Ofte beskrives vindklimaet ved illustration af en vindrose i Figur 6. I Danmark er hovedparten af vindretningen fra vest og syd-vest (Laursen, 2012). Ligeledes er de kraftigste vinde mellem syd-vest og nord-vest se Figur 6 (Laursen, 2012). Det er hovedsageligt om vinteren, at vi i Danmark får de hårdeste vinden (storm og orkan, vindhastigheder på 24,5 m/s og opefter) (DMI). Vindens styrke svinger meget, alt efter hvor i landet der måles, f.eks. så kan de hårde vinden i Skagen komme op på hele 170 døgn (vindhastigheder mellem 10,8 -13,8 m/s) hvorimod den i andre byer vil ligge på ca. 30 døgn.



Figur 6 – Vindrose - DMI's registrering oktober-marts ved Aarhus Lufthavn mellem 2003-2012

En vindrose illustrerer vindhastigheden samt vindstyrken, og vil i de fleste tilfælde være baseret på meteorologiske målinger. En vindrose er normalt inddelt i 12 sektioner, i nogen tilfælde 8 eller 16, men 12 sektioner er standarden, som er vedtaget i Det Europæiske Vindatlas (Viden om vind, 2020)

Vind skabes af solens varme, der får luften til at stige op, og der dannes et højtryk i de øvre luftlag. Til gengæld vil der over jorden dannes lavtryk, og det højtryk vil forsøge at bevæge sig mod lavtrykket for at skabe balance og udligne sig, herved opstår der bevægelser og dermed vind (Danske Møller, 2023). På grænsen mellem vand og land vil trykket være forskellige, da vandet opvarmes langsommere end landjorden. Dette medfører et lavtryk over land og et højtryk over vand, og luften vil her, som det oftest ses, gå fra vandområde ind over landområder. Dette kan også ske ved områder over landjorden, da jorden kan opvarmes forskelligt når solens stråler rammer med forskellige vinkler på jorden.

Orienteringsretning

Det har betydning for simuleringernes resultater, hvilken retning konstruktionen er fokuseret imod. Flere erfaringer peger på, at konstruktioner mod nord har større risiko for skimmelvækst (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner. SBI 2017:20, 2017, s. 25). Den større risiko for skimmelvækst mod nord, kommer sig af lavere temperaturer, da der fra nord givetvis er mangel på solstråling. Det modsatte gør sig gældende for konstruktioner vendt mod syd.

Slagregn kan også have betydning for simuleringerne, og det antages normalt, at det er vigtigt med simuleringer, hvor slagregn er en del af input fra vejrdato. Tidligere erfaringer med simuleringer for lette facadestrukturer viser, at ved facader vendt mod syd har en betydning om beregningerne simuleres med eller uden slagregn. Betydningen ved slagregn er samtidig, at konstruktionen er udført korrekt og tæt, så slagregn ikke kan trænge ind i konstruktionen. (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner. SBI 2017:20, 2017, s. 31). Uanset hvordan simuleringen udføres, så er det ikke muligt at vide, om konstruktionen bliver udført tæt i den endelige udførelse i byggeriet. Dog vil lette konstruktioner, hvor der er ventileret luftlag mellem regnskærmen og vindspærre, ikke påvirkes i samme omfang som konstruktioner uden luftlag, da slagregn har sværere ved at trænge ind i konstruktionen. På baggrund af ovenstående vil vi i denne rapport, fokusere orienteringen af vores konstruktioner i retning mod nord.

3. Litteraturstudie af biogene isoleringsmaterialer

Biogene isoleringsmaterialer anvendt i dette afsnit har alle hygroskopiske egenskaber, hvilket betyder, at materialet optager fugt fra omgivelserne, og afgiver fugten igen til omgivelserne i form af vanddampe (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023).

3.1. Hamp

Hamp udvindes fra plantestilke og anses som værende et godt alternativ som isoleringsmateriale (Figur 7), som substitut til konventionelt isoleringsmateriale. Netop fordi hamp er plantebaseret, reproducere de i naturen. Derudover har hamp samme egenskab som andre plantebaserede materiale, at det lagrer CO₂.

Anvendelse af hamp som isoleringsmateriale er ikke noget nyt fænomen, men er derimod blevet anvendt til isolering og stopning af huse tilbage i tiden.

Nu om dage, og siden slutningen af 1990'erne, er det muligt at købe hampisolering i form af måtter i tykkelser 50, 75 og 100 mm, Figur 7. Udover måtter fås hampisolering også som løs isolering, der blæses ind (Bæredygtigt Byggeri DK, 2023).



Figur 7 – Hampisolering i måtter

Tabel 1 - Hamp isoleringsmåtter

Densitet	kg/m ³
	35Kg/m ³
Porøsitet	m ³ /m ³
	95%
Varmekapacitet	J/kgK
	1.660
Varmedningsevne	W/mK
	0,04
Vanddampdiffusionsmodstand	μ
	1,5
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³
	21

3.2. Hør

Hørisolering udvindes af fibre fra hørplanten, og har mange ligheder med hamp.

Det der gør hør til et egnet isoleringsmateriale, er at det kan dyrkes som afgrøder, og har være anvendt og dyrket i Danmark igennem mange år (Boliu, 2023). Hørplanten er meget modstandsdygtig som afgrøde, og har været anvendt i mange år til bl.a. tekstiler, reb, samt til sejl til både og skibe.

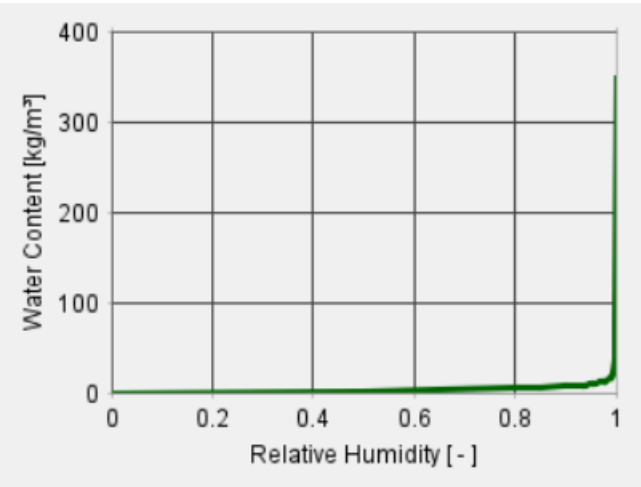
Til anvendelse som isolering er isoleringsmåtterne ofte tilsat plastfibre eller andet tilsvarende materiale, for stivhed og stabilitet. Kommer hørisoleringen fra udlandet skal man være opmærksom på, at nogle kan

Tabel 2 - Hør isoleringsmåtter

Densitet	kg/m ³
	38
Porøsitet	m ³ /m ³
	95 %
Varmekapacitet	J/kgK
	1.660
Varmedningsevne	W/mK
	0,035 - 0,040
Vanddampdiffusionsmodstand	μ
	1,5
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³
	19,2

indeholde borsalte som brandhæmmer. I Danmark arbejdes der på alternativer for brandhæmmer, så som naturligt natriumsilikat (Boliu, 2023).

Til forskel for hampisolering fås hørisoleringen ikke som løs isolering til indblæsning.



Figur 8 - Sortionskurve for hør fra WUFI Pro (Flax Insulation Board DP)

3.3. Halm

Halm er et restprodukt, som primært anvendes til foder og strøelse i landbruget, samt fast biomasse i den danske energiforsyning.

Der er en stor mængde halm til rådighed i Danmark, hvor der i årene 2015-2019 blev brugt 1,49 mio. tons til energiudnyttelse, samt 1,56 mio. tons til foder og strøelse (Rasmussen, et al., 2022). Dertil er der store mængder halm, som ikke udnyttes, men nedgraves i forbindelse med kornproduktionens cyklus, da korn er en etårig afgrøde. Halm formulerer i jorden, og bidrager dermed positivt til jordkvaliteten. Vurderingen er, at 10% yderligere vil kunne anvendes i andre sektorer, uden at forringe jordkvaliteten (Rasmussen, et al., 2022).

Der er et stort potentiale for anvendelse af halm i byggeriet samt andre sektorer, hvor det kan anvendes som isoleringsmateriale, plademateriale (Rasmussen, et al., 2022). Desuden kan man udnytte halmens indholdsstoffer f.eks. lignin, som bl.a. kan være bindere til isoleringsmaterialer og træprodukter, antioxidanter mv. (SEGES & Landbrug & Fødevarer, 2023).

Tabel

Densitet	kg/m³
	100 ±15
Porøsitet	m³/m³
	90 %
Varmekapacitet	J/kgK
	2000
Varmeledningsevne	W/mK
	0,048
Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor	μ
	1,4-2,0
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m³
	-

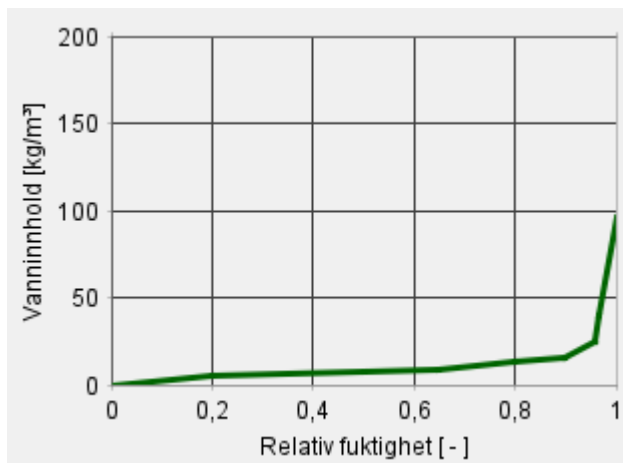
På nuværende tidspunkt anvendes halm ikke så ofte som isolering i ydervægskonstruktioner, selvom det første halmhus blev bygget i 1996. De typiske halmkonstruktioner udføres uden dampspærre, hvor der pudses direkte på halmballerne, eller vægelementerne, med ler- eller kalkpuds. Vægkonstruktionen kan udføres med regnskærm for at beskytte pudsen mod vejrlig, og reducere opfugtningen af væggen.

Halmvægge udføres normalt med stråretningen parallelt med varmestrømsretningen (Pedersen, Hansen, Hansen, & Marsh, 2003), hvilket også produktionsmæssigt giver mening i forhold til halmelementer, når halmen skal fastholdes i elementerne.

Fugtkapaciteten for halm er større end ved traditionel mineralsk isolering. Her er sorptionskurven næsten vandret, indtil man opnår 90 % relativ fugtighed, og stiger eksplosivt ved opnåelse af min. 99% relativ fugtighed. For halm stiger fugtkapaciteten gradvis mod 90% relativ fugtighed, hvor fugtkapaciteten herefter øges væsentligt, som vist på Figur 10.



Figur 9 - Billede af halmvæg fra producenten Ecococon (Ecococon, 2023)



Figur 10 - Sorptionskurve for halm fra WUFI Pro (Fraunhofer-IBP, straw bales)

Halm skønnes at have samme kapillarsugningsevne som hørisolering, hvilket er 100 kg/m^3 (Pedersen, Hansen, Hansen, & Marsh, 2003).

Halm tilsættes normalt ikke tilsætningsstoffer, så som brandhæmmere og lign. (Pedersen, Hansen, Hansen, & Marsh, 2003), som man ser for andre biogene isoleringsmaterialer.

3.4. Ålegræs (tangisoleringsmåtter)

Ålegræs er en flerårig blomsterplante med 50-100 cm lange stængler, der lever i havet. Ålegræs skylles op på stranden, hvor det efterfølgende bjerges i land, og anvendes til forskellige byggematerialer. Herunder tangisoleringsmåtter, men også akustik paneler mv.

Ålegræs, også kaldet "bændeltang" eller på latin "Zostera marina", vokser især på lavvandede kyster med havdybder ned til 5 meter og med mudret eller sandet bund (Pallesen, 2018). Ålegræsplanternes blade afstødes løbende, og planternes tilstedeværelse er en indikator på kvalitet af havvandet i de områder hvor ålegræsset gror (Rasmussen, et al., 2022).

Ålegræsset har et naturligt indhold af salt og kisel, hvilket er afgørende for dens egenskaber som ikke brandbart materiale (Pallesen, 2018).

Tangmåtter anses bl.a. som velegnede til gulvbatts. Her kan de hygroskopiske egenskaber, med at optage og afgive fugt, til stede uden at materialet rådner (Pallesen, 2018). Derudover findes der hårdt pressede plader lavet af ålegræs (Søuld, 2023), med evt. mulighed for anvendelse som vindspærre.

Tabel

Densitet	kg/m ³
	35-70
Porøsitet	m ³ /m ³
	-
Varmekapacitet	J/kgK
	2000
Varmeledningsevne	W/mK
	0,037-0,045
Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor	μ
	1-2
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³
	-



Figur 11 - Eksempel på anvendelse af tangisoleringsmåtter, i sommerhusbyggeri (Pallesen, 2018).

3.5. Græs

Græs til produktion af isolering kan enten opsamles fra græsslåning af offentlige arealer, eller dyrkes og høstes på marker, som vi kender det fra landbruget.

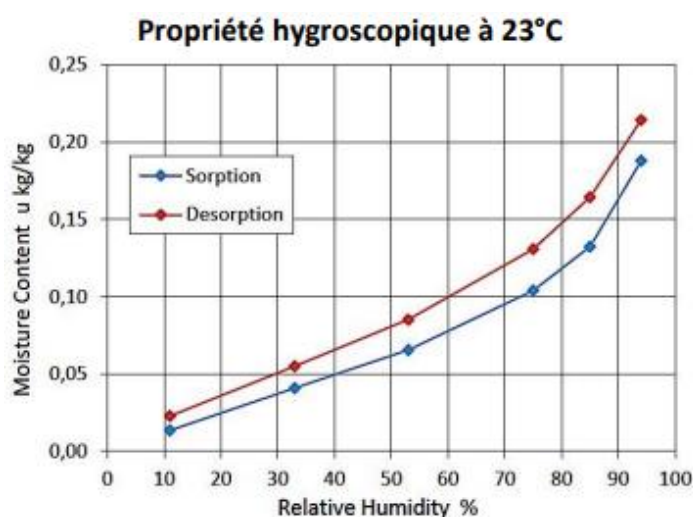
Græsisolering kan erstatte konventionel isolering til væg- og loftskonstruktioner, hvor det produceres som batts, med samme installationsteknik som mineralisk isolering.

Græs som isoleringsmateriale er på nuværende tidspunkt tilsyneladende mest anvendt i Frankrig og Belgien. Det forhandles i Danmark, men der er kun kendskab til enkelte projekter herhjemme, hvor denne type isolering er anvendt.

Sorptionskurve for græsisolering, viser fugtkapaciteten i kg vand/pr. kg græsisolering ved en given relativ fugtighed. De fleste sorptionskurver viser kg vand pr. m³ materiale.

Tabel

Densitet	kg/m ³
	40
Porøsitet	m ³ /m ³
	95%
Varmekapacitet	J/kgK
	1700
Varmeledningsevne	W/mK
	0,040
Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor	μ
	1
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³



Figur 12 - Sorptionskurve for græsisolering (Gramitherm, 2023)



Figur 13 - Græsisolering som tildannes og installeres i loftskonstruktion (Havnens-H, 2023)

3.6. Træfiber

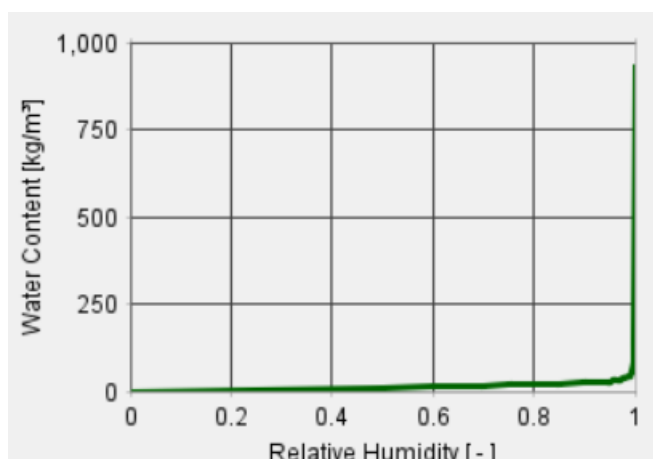
Anvendelsen af træfiber er et nyt produkt på markedet, siden 1990'erne, som vi kender det nu. Før i tiden anvendte man savsmuld og høvlspåner fra træet bl.a. i etageadskillelser som isoleringsmateriale (Bæredygtigt Byggeri DK, 2023).

I dag ses træfiber anvendt som isoleringsmateriale i stort set alle bygningsdele, dog med undtagelse af terrændæk. Isoleringen kan blæses ind i konstruktionen som det ses på Figur 14, og anvendes derfor også i forbindelse med efterisolering. Træfiber isolering findes også som isoleringsmåtter, hvor de anvendes i vægge samt tagkonstruktioner.



Figur 14 - Træfiber blæst ind som løssuld

Træet som anvendes til udvinding af træfiberisolering, er resttræ samt grene, der ikke kan anvendes til andet. Altså resttræ fra f.eks. møbelproduktion, konstruktionstræ mv. (Holdbar.dk, 2023)



Figur 15 - Sortionskurve for træfiber fra WUFI Pro (Wood-fibre Insulation Board)

Tabel 3 - Træfiber pladeisolering

Densitet	kg/m ³
	50
Porøsitet	m ³ /m ³
	0,97
Varmekapacitet	J/kgK
	2100
Varmedledningsevne	W/mK
	0,038-0,042
Vanddampdiffusionsmodstand	μ
	3-5
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³
	-173,1

3.7. Celluloseisolering

Celluloseisolering, også kendt som papirisolering, har en relativ høj densitet, hvilket gør at materialet er tæt. (IsoleringDanmark, 2023). Celluloseisolering er samtidigt et porøst materiale, der indeholder store mængder af luft mellem materialet.

Isoleringen er fremstillet af genbrugspapir, brugte aviser mv.. De behandles efterfølgende med kemikalier som borsalte samt aluminiumhydroxid, disse behandlinger virker både brandhæmmende, og forhindrer svampeangreb (Bolius, 2023).

Isolering bliver til små stykker også kaldet granulat.

Tabel 4 - Celluloseisolering, løst (Climacell)

Densitet	kg/m ³
	40-60
Porøsitet	m ³ /m ³
	0,93
Varmekapacitet	J/kgK
	2.544
Varmeledningsevne	W/mK
	0,037
Vanddampdiffusionsmodstand	μ
	1 - 2
CO ₂ -ækvivalenter	kg/m ³
	6,2 (-1,33)

Celluloseisolering anvendes løst indblæst i vægge, på lofter, gulve samt i tagkonstruktioner, Figur 16. Papiret sætter sig, da materialetykkelsen ændre sig, i løbet af tiden efter indblæsningen, ca. 10-15 % som således pålægges den endelige tykkelse.



Figur 16 - Celluloseisolering indblæst på loft

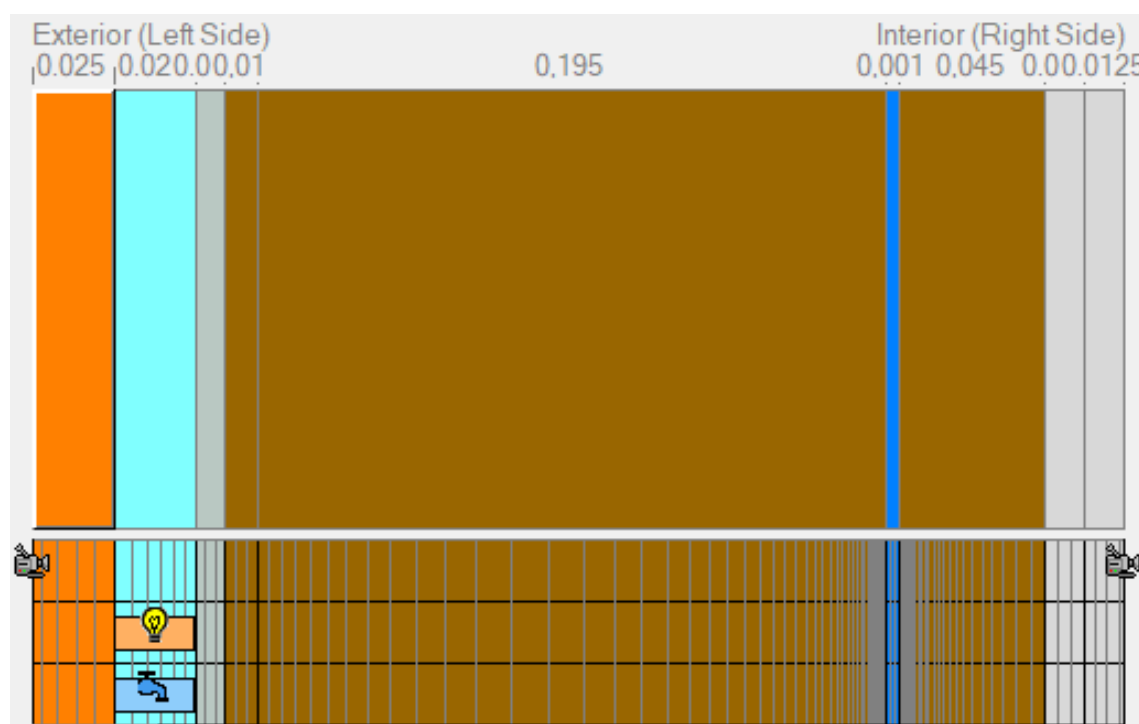
4. Metode og materialer

4.1. Beregningsværktøj – WUFI

Som simuleringsværktøj for vores konstruktioner bruger vi WUFI pro version 6.7 (WUFI, 2023). Vi har valgt WUFI til fugtsimulering, da dette simuleringsværktøj opfylder behovet, til at simulere de valgte konstruktioner med biogene isoleringsmaterialer. Disse beregninger i forhold til de resultater som efterfølgende behandles, for at kunne bestemme grænsen for tæthedsplanet (tæthedsplanet udført på den varme side af konstruktionen, indvendigt i forhold til bygningen, se Figur 17

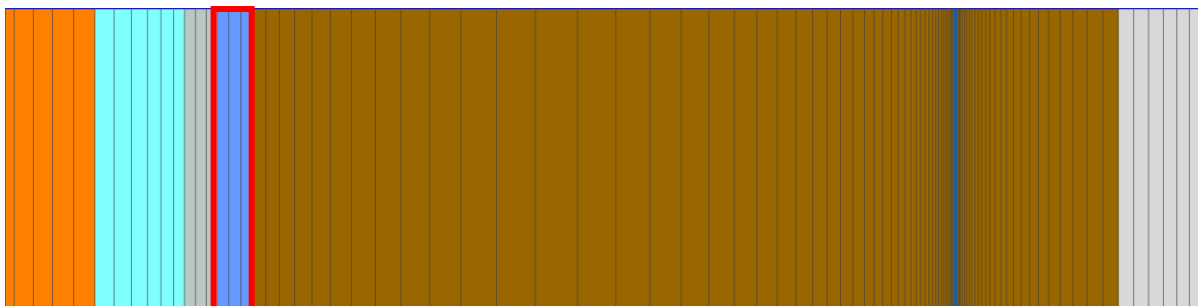
WUFI-simuleringer udføres normalt for at få indsigt i en konstruktions ydeevne, eller i dens holdbarhed og dens modstandsdygtighed over for fugtskader. WUFI's beregninger giver resultater i form af vandindhold, temperaturer, fugtstrømme, risiko for evt. skimmelvækst mv. Resultaterne vurderes og konkluderes. For at udføre den bedst mulige vurdering af konstruktioner vil vi udføre kvantitative simuleringer, som vil give os en detaljeret undersøgelse af forskellige biogene isoleringsmaterialer, forskellige konstruktionssammensætninger, samt forskellige Z-værdier.

Simulering i WUFI er primært udført over en 3-årig periode, hvor konstruktionen på tredje år er blevet periodestabil, og hvor resultaterne efterfølgende kan analyseres. Startbetingelser ved simulering er en temperatur på 20 grader, samt en relativ fugtighed på 80 %, medmindre andet er nævnt under de enkelte beregninger.



Figur 17 - Opbygning af referencekonstruktion med mineraluld i WUFI Pro. Indvendigt beklædning er udført med 2 lag gips, efterfulgt af 45 mm isoleringslag, tæthedsplanet (blå linje), primær isoleringslag, 9 mm vindspærre, 25 mm ventilationsspalte, og 25 mm træbeklædning som yderste facadebeklædning.

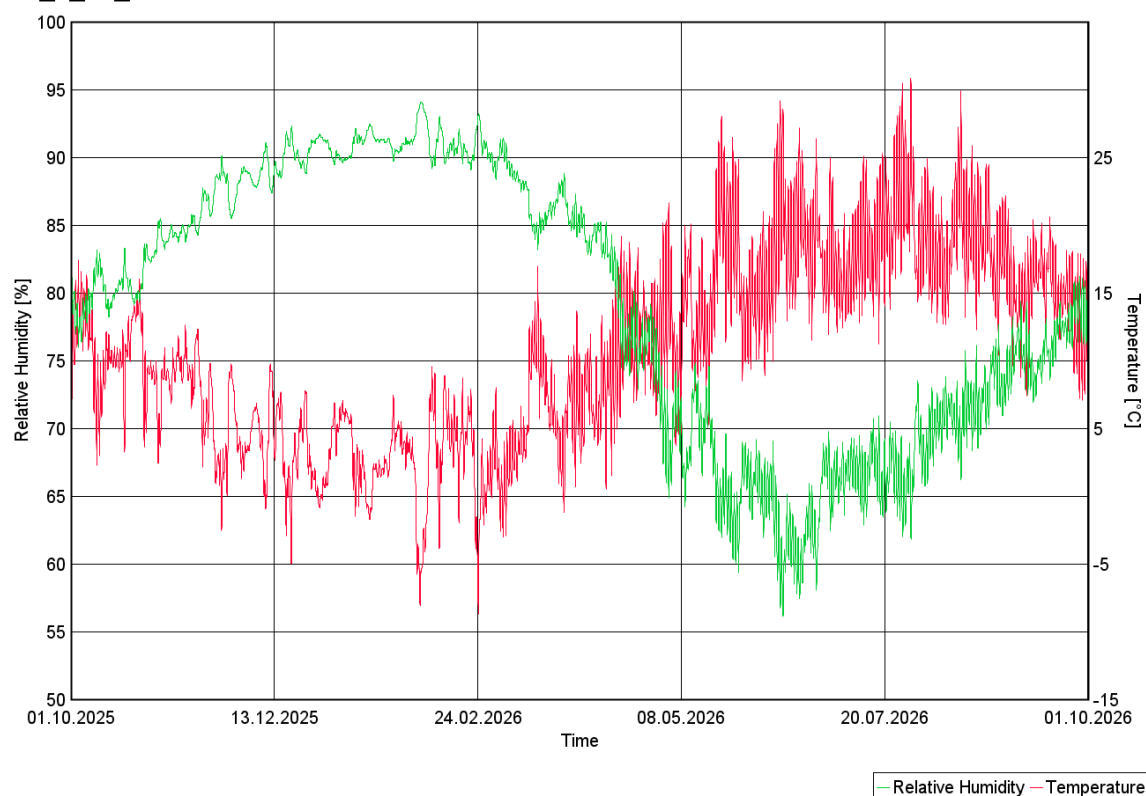
Analysen med dataudtræk fra WUFI tager udgangspunkt i den yderste centimeter (10 mm) af isoleringslaget. Her er værdierne en gennemsnitsværdi af den yderste centimeter. I WUFI anvendes WUFI-graph til dataudtræk, som efterfølgende databehandles og analyseres på baggrund af temperatur og relativ fugtighed. Dataudtrækket fra WUFI er baseret på timeværdier, hvor disse timeværdier konverteres til døgnmiddelværdier for at simplificere analysen, og hvor dataene benyttes til at beregne RHT indeks samt vurdering af skimmelrisiko, som analyseres med formler.



Figur 18 - Opsætning i WUFI-Graph med angivelse af materialelag, som medtages i grafer og den videre databehandling for analysering af konstruktionerne. Den yderste centimeter af isoleringslaget medtages til analysering af fugtforhold, hvor det er de lyseblå felter, som er inden for den røde markering.

I WUFI-Graph er det muligt at analysere specifikke områder i de simulerede konstruktioner, som efterfølgende kan vises som grafer, samt data kan oplyses som timeværdier i tekstformat. Ved udtræk af data i tekstformat har det efterfølgende været muligt at anvende data til formlerne for beregning af risiko for skimmelvækst i den yderste centimeter af isoleringslaget.

MI_3_10_N



Figur 19 - Eksempel på graf med relativ fugtighed og temperatur, som er grundlag for dataudtræk. Dette er lavet for alle beregnede konstruktioner, for sidste simuleringsår.

Placering

Den placering vi vælger at anvende for vores simuleringer, er Sjælsmark lokaliseret på Sjælland nord for København, som vist [Figur 20](#). De vejrdata vi anvender til simulering i WUFI, er vejrdata fra rapporten *Klimadata til fugtsimulering* (Jensen, Hansen, Morelli, Svane, & Waagepetersen, 2023). Vi anvender filen navngivet *referenceår2*, som er en vejrdatafil fra projektet, der ligger til grund for ovennævnte rapport, og som er udviklet til anvendelse i WUFI.



Figur 20 - Klimakort fra rapporten (Jensen, Hansen, Morelli, Svane, & Waagepetersen, 2023) . Den røde cirkel markerer området for Sjølsmark på Sjølland - for klimadata anvendt for simuleringer i WUFI.

Fugtsimulering

WUFI simulerer med varierende temperatur og fugtindhold i konstruktioner, hvilket gør at vandindholdet i konstruktionens forskellige lag, ændrer sig i forhold til materialets sorptionsegenskab, når det udsættes for fugt i luften. Mange skadetyper, forårsaget af for stort vandindhold, som ophober sig i konstruktionerne, skal derfor undgås. En stigning eller formindskelse af vandindholdet i materialer er helt normalt, der hvor vandindholdet passer med niveauet for den periodiske ligevægtstilstand, altså at fugten varierer i overensstemmelse med klimaet omkring konstruktionen (vinter/sommer).

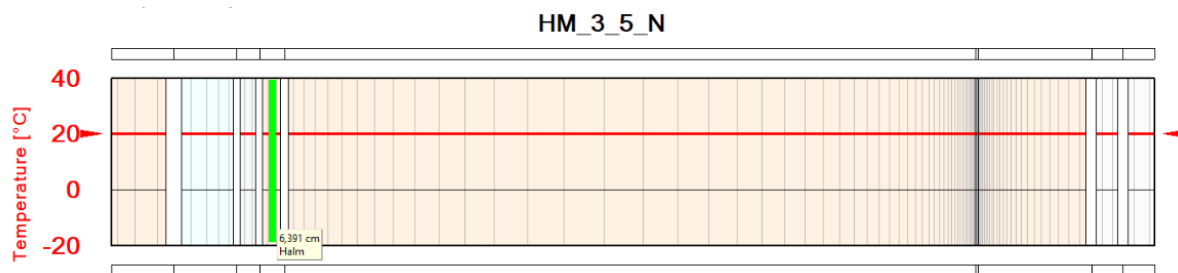
Udfordringen eller risikoen kommer, hvis det gennemsnitlige vandindhold i et af lagene over en flerårig simuleringsperiode stiger kontinuerligt. Dette vil indikere, at konstruktionen har et fugtteknisk problem. På sigt vil der være risiko for skimmelvækst, hvilket kan resultere i nedbrydning af konstruktionen, hvor det yderligere er beskrevet i punkt 2.3. WUFI's grafer der viser fugtindholdet i de enkelte lag, og gør det muligt at tilføje grafen en rød referencelinje på et brugerdefineret niveau. Dette gør det muligt ved vurdering at få øje på fugtindhold, der evt. overstiger dette niveau (WUFI-Forum, 2018).

WUFI BIO og VTT

WUFI har nogle plug-in programmer, som kan anvendes til analysering af risiko for skimmel, på konstruktionernes overflader, men også inde i konstruktionen.

Analyserne i WUFI BIO og VTT, anvendes ikke til at bestemme konstruktionernes ydeevne i forhold til risiko for skimmelvækst, men for at se forskellen på dynamiske simuleringer, og beregningsmetoder.

Til analysering med WUFI BIO og VTT, anvendes filmfremviseren, til at kunne definere det område som ønskes analyseret i forhold til risiko for skimmelvækst.



Figur 21 - Eksempel på visning fra filmfremviseren i WUFI til bestemmelse af område som analyseres i WUFI BIO og VTT. Området der analyseres er markeret med grønt, den er i midten af den yderste centimeter af isoleringslaget.

WUFI BIO og VTT har ens platform i træstrukturen med input, klima og resultater. Fanen med input er lidt forskelligt, da udgangspunktet for analysen ikke er ens. Fanen for klima er helt ens, og aflæsning af resultater er næsten ens, hvor der er lidt forskel på opgørelse for vækst af skimmel.

4.2. Materialets egenskaber

Alle biogene isoleringsmaterialer anvendt i simuleringer bør undersøges i forhold til korrekte materialespecifikationer. Der er i dette projekt anvendt materialer fra WUFI's materiale bibliotek, hvor der primært er indarbejdet fem parametre, som er oplistet herunder:

- Densitet
- Porøsitet
- Varmekapacitet
- Varmeledningsevne
- Vanddampdiffusionsmodstand

Der hvor det bl.a. ikke været muligt at indhente materialespecifikationer, såsom vandindhold, i form af sorptionskurver samt vandets påvirkning på varmeledningsevnen mv. Her vil de ændrede materialer forsat have samme specifikationer, som det materiale der er anvendt som udgangspunktet.

Der er enkelte materialer anvendt i denne rapport til beregninger i WUFI, hvor materialet ikke har været tilgængeligt i WUFI's materialebibliotek. Her har vi kopieret og taget udgangspunkt i et allerede oprettet materiale i WUFI, med egenskaber tættest på pågældende manglende materiale. Herefter er det nye oprettet materiale tilpasset med de korrekte data for dette materiale, og efterfølgende anvendt i simuleringerne for dennes konstruktion.

4.2.1. Hamp

Den anvendte hamp-isolering har en varmeledningsevne λ på 0,037. For at opnå samme U-værdi øges tykkelsen i det lag, der i referencekonstruktionen har en tykkelse på 205 mm. Isoleringslaget med hamp bliver således 240 mm, se kapitel 4.4 Tabel 6. Øvrige ændring i WUFI er angivet herunder.

For isoleringen er følgende data ændret iht. WUFI materialet "Flax Insulation Board DP" fra Fraunhofer-IBP:

- Densitet er ændret fra 38 kg/m³ → 35 kg/m³
- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,036 W/mK → 0,04 W/mK

Ovenstående data stammer fra Hempitecture (Hempitecture, 2023), der producerer hamp-isolering som batts, ligesom vi kender det fra glas- og stenuldsisolering.

Materialet Flax Insulation (hørisolering) er valgt som grundlag for hamp-isolering, på baggrund af litteraturen, hvor bl.a. SBI-vejledning 207 (Pedersen, Hansen, Hansen, & Marsh, 2003), skønner at data fra hørisolering, er bedste skøn for data til hamp-isolering.

4.2.2. Hør

For isoleringen er følgende data ændret, iht. WUFI materialet "Flax Insulation Board DP" fra Fraunhofer-IBP:

- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,036 W/mK $\rightarrow$ 0,037 W/mK

Ovenstående data er ændret på baggrund af litteratur, med angivelse af varmeledningsevne λ på 0,035-0,04 W/mK, hvor 0,037 W/mK er en middelværdi i forhold til produkter på markedet (Bæredygtigt Byggeri, 2023).

4.2.3. Halm

Halm har en lidt højere varmeledningsevne λ end de øvrige undersøgte isoleringsmaterialer, hvilket giver en tykkere ydervæg. Dette kan aflæses i Tabel 6 under kapitel 4.4. Udgangspunktet for data, til simulering og beregning af U-værdi, stammer primært fra Fachverband Strohballenbau Deutschland e.V. (FASBA, 2023), der producerer og leverer halm til byggeriet. Derudover tages data også fra WUFI, hvis der ikke foreligger specifikationer fra en leverandør.

Følgende data er ændret, iht. WUFI materialet "straw bales":

- Densitet er ændret fra 85 kg/m³ $\rightarrow$ 100 kg/m³
- Varmekapacitet er ændret fra 1800 J/kgK $\rightarrow$ 2000 J/kgK
- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,067 W/mK $\rightarrow$ 0,048 W/mK

Ovenstående data stammer fra FASBA – Fachverband Strohballenbau e.V., (FASBA, 2023), samt deres ETA godkendelse 17/0247 (Baustroh, 2023).

4.2.4. Ålegræs

Det har ikke været muligt at finde datablade på ålegræsisolering (tangisoleringsmåtter), samt at WUFI ikke har haft lignende materialer, som efter vores vurdering har kunne anvendes til formålet.

4.2.5. Græs

Følgende data er ændret iht. WUFI materialet "Flax Insulation Board DP" fra Fraunhofer-IBP:

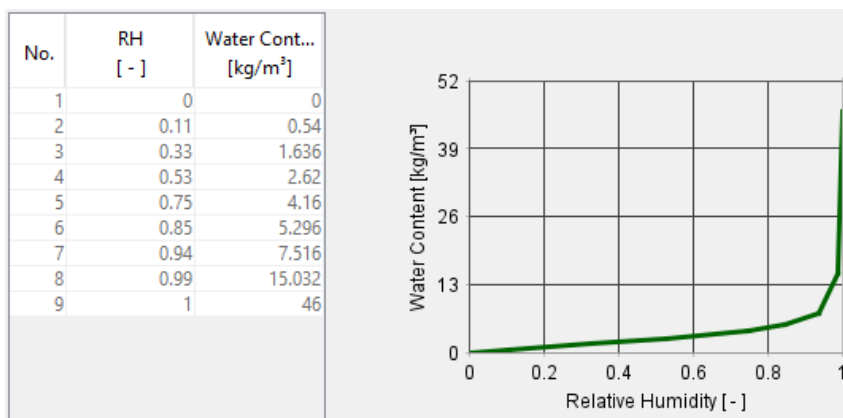
- Densitet er ændret fra 38 kg/m³ $\rightarrow$ 40 kg/m³
- Varmekapacitet er ændret fra 1660 J/kgK $\rightarrow$ 1700 J/kgK
- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,036 W/mK $\rightarrow$ 0,04 W/mK

- Dampdiffusionsmodstand μ er ændret fra 1,5 $\rightarrow$ 1,0

Ovenstående data stammer fra producenten Gramiterm, hvor data er hentet fra Havnens Hænder, der er leverandør (Havnens-H, 2023). Sorptionskurven er ændret ud fra tilsendte data iht. deres sorptionskurve i teknisk datablad (Gramitherm, 2023). Gramiterm angiver i deres tekniske datablad, at 100 mm græsisolering kan indeholde 4,6 kg vand/m², hvilket gør, at 1 m³ græsisolering vil kunne indeholde 46 kg vand. Dette er inddraget i betragtningen ved udvidelse af sorptionskurven, da Gramiterm kun har analyseret op til 94% relativ fugtighed.

Climates			Measured values - Moisture content u				
No	Temp. °C	Rel.hum. %	1 (M01) %	2 (M01) %	3 (M02) %	Mean value %	Mean value kg/kg
1	-	-	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0000
2	23	11	1,28	1,27	1,49	1,35	0,0135
3	23	33	4,05	4,09	4,12	4,09	0,0409
4	23	53	6,62	6,54	6,49	6,55	0,0655
5	23	75	10,57	10,45	10,18	10,40	0,1040
6	23	85	13,74	13,35	12,63	13,24	0,1324
7	23	94	19,57	19,16	17,63	18,79	0,1879

Figur 22 - Tabel fra Gramiterm, med værdier iht. sorptionskurve



Figur 23 - Tilrettet sorptionskurve for græsisolering i WUFI

4.2.6. Træfiber

Den træfiberisoleringen der er valgt til dette projekt, har en lidt højere dampdiffusionsmodstand end de fleste andre produkter på markedet, samt flere af de øvrige isoleringsmaterialer som er medtaget i nærværende rapport.

Følgende data er ændret, iht. WUFI materialet "AiF Flexible Wood-Fiber Insulation WF" fra Fraunhofer-IBP:

- Varmekapacitet er ændret fra 1400 J/kgK $\rightarrow$ 2100 J/kgK
- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,035 W/mK $\rightarrow$ 0,038 W/mK

- Dampdiffusionsmodstand μ er ændret fra 2 $\rightarrow$ 4

Ovenstående data stammer fra Hunton, der producerer træfiberisolering (Hunton Nativo Træfiberisolering Plade, 2023).

4.2.7. Celluloseisolering

Celluloseisolering har en høj varmekapacitet, i forhold til de isoleringsmaterialer som er medtaget under de forskellige konstruktionsopbygninger. Samtidig havde WUFI et materiale som næsten stemte overens med det anvendte, hvor vi blot har ændret et parameter.

Følgende data er ændret iht. WUFI materialet "Cellulose Insulation" fra MASEA Database, Germany:

- Varmeledningsevne λ er ændret fra 0,0357 W/mK $\rightarrow$ 0,037 W/mK

Ovenstående data stammer fra producenten CWA Cellulose Werk Angelbachtal GmbH, hvor bl.a. Breinholm Gruppen og Isolering Danmark er leverandør af Climacell Papirisolering (Isolering Danmark, 2023). Disse kan både anvendes til vægge, lofter mv. (Isolering Danmark, brochure, 2023).

4.2.8. Egenskaber til simulering

De enkelte biogene isoleringsmaterialer kan have varierende egenskaber, hvor de generelle egenskaber for de enkelte isoleringsmaterialer som er anvendt til fugtsimuleringer, er oplistet i nedenstående Tabel 5.

Tabel 5 - Oversigt med generelle egenskaber for isoleringsmaterialer, som er anvendt til fugtsimulering i WUFI.

Materiale \ Enheder	Densitet	Porøsitet	Varmekapacitet	Varmeledningsevne	Vanddampdiffusionsmodstandsfaktor
	Kg/m ³	m ³ /m ³	J/kg/K	W/mK	-
Mineraluld	20	0,992	850	0,034	1,3
Hamp	35	0,95	1660	0,040	1,5
Hør	38	0,95	1660	0,037	1,5
Halm	100	0,90	2000	0,048	1
Græs	40	0,95	1700	0,040	1
Træfiber	50	0,97	2100	0,038	4
Cellulose	55	0,93	2544	0,037	2

4.3. Skimmelmodeller

Rapporten tager udgangspunkt i flere skimmelmodeller, for at kunne analysere konstruktionerne på forskellige metoder. For de 4 beregningsmetoder som er medtaget i rapporten, gælder følgende vurdering, at konstruktioner ikke vurderes at være fugtteknisk robust, hvis blot én af grænseværdierne med risiko for skimmelvækst overskrides.

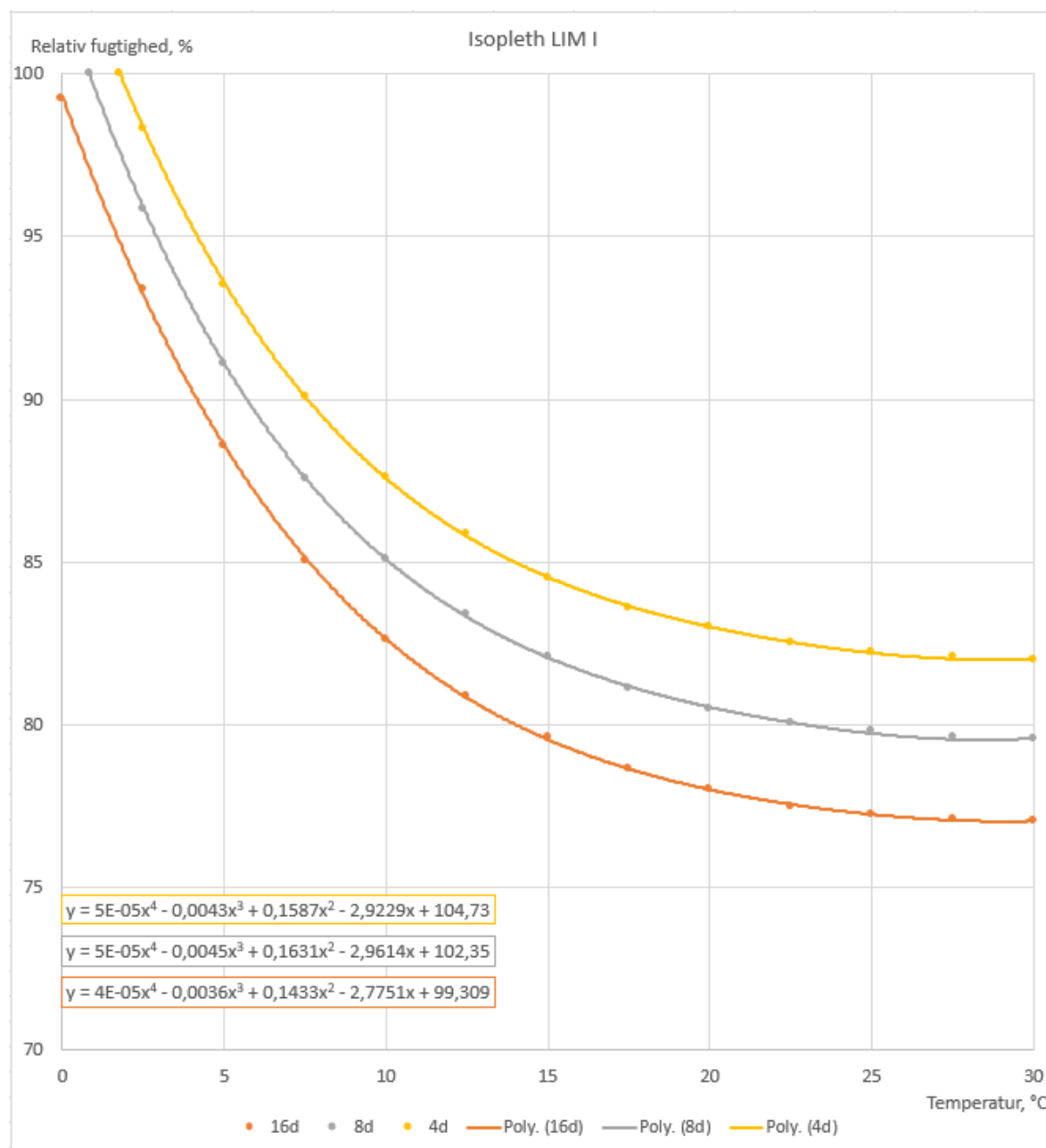
Isopleth-system

Isopleth systemet er valgt som en af analysemetoderne til at vurdere og analysere risikoen for skimmelvækst i ydervægskonstruktioner. Denne model er valgt på baggrund af, at statiske modeller oftest er mere pålidelige end dynamiske skimmelmodeller (Johansson, Lång, & Capener, 2021), hvor

bl.a. skimmelmodellen fra Klaus Sedlbauer (Sedlbauer, Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, 2001), viser sig at være et konservativt valg af skimmelmodel.

For at kunne vurdere og analysere ydervægskonstruktionerne, er der lavet hygrotermiske simuleringer i WUFI. Data er efterfølgende trukket ud, og behandlet ved at anvende formler fra isopleth systemet, med de såkaldte LIM-grænser (Lowest Isopleth og Mould).

Det har ikke været muligt, i litteraturen, at finde formler for isopleth kurverne der kunne anvendes. Vi har derfor valgt at anvende nogle tilnærmede formler, fra eget studie på baggrund af isopleth kurverne, som er indsat i Excel.



Figur 24 – Isopleth-systemet med tilhørende tilnærmede formler ud fra LIM-kurver, som er anvendt til beregningsmetoder for skimmelvækst.

I denne rapport tages der udgangspunkt i substratgruppe I, der omhandler biologisk genanvendelige og nedbrydelige byggematerialer samt råmateriale. Dette stemmer overens med de materialer, som indgår i de analyserede ydervægskonstruktioner.

Isopleth kurven som er udgangspunkt for formler og analysen, er sporespurring skimmelvækst ud fra temperatur og relativ fugtighed RF%, samt tiden af vækstbetingelser, som ligeledes fremgår af Figur 24.

Formel for grænseværdi af skimmelvækst

Ved formel for grænseværdien for skimmelvækst anvender vi formel fra SBI277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023). Formlen ser således ud:

Ligning 1 - Formel for kritisk skimmelvækst fra SBI 277

$RF_{krit} = 0,02 \theta^2 - 1,18 \theta + 95,2$, hvor θ er temperaturen i °C.

Dato	Temperatur, gennemsnit pr. dag	RF% gennemsnit pr. dag	Grænseværdi for skimmelvækst	RHT indekstal	Er der risiko for skimmelvækst	Isopleth 8 dags skimmelgrænse	Er der risiko for skimmelvækst	Isopleth 4 dags skimmelgrænse	Er der risiko for skimmelvækst	Isopleth 16 dags skimmelgrænse	Er der risiko for skimmelvækst
23-11-2025	2,03	92,06%	92,89%	34,62		96,97%		99,42%		94,24%	
24-11-2025	0,64	92,92%	94,45%	11,48		100,52%		102,92%		97,59%	
25-11-2025	2,67	92,85%	92,19%	47,69		95,52%		97,97%		92,85%	
26-11-2025	4,85	92,42%	89,95%	84,43		91,34%		93,83%		88,84%	
27-11-2025	9,01	90,99%	86,20%	144,03		85,95%		88,47%		83,57%	
28-11-2025	7,65	90,93%	87,35%	121,83		87,40%		89,91%	2	84,99%	
29-11-2025	4,88	91,54%	89,92%	80,68		91,29%	4	93,78%		88,79%	
30-11-2025	3,87	91,98%	90,93%	65,70		93,09%		95,56%		90,52%	5
01-12-2025	2,73	92,58%	92,13%	47,93		95,40%		97,86%		92,74%	
02-12-2025	3,08	92,83%	91,75%	54,94		94,65%		97,11%		92,02%	
03-12-2025	3,48	92,93%	91,34%	62,31		93,85%		96,31%		91,25%	
04-12-2025	4,26	92,83%	90,54%	75,89		92,37%		94,85%		89,83%	
05-12-2025	5,87	92,39%	88,96%	102,15		89,73%		92,23%		87,27%	
06-12-2025	6,48	92,10%	88,40%	110,76		88,88%		91,38%	2	86,44%	
07-12-2025	5,40	92,28%	89,41%	93,39		90,44%	4	92,93%		87,96%	
08-12-2025	3,99	92,74%	90,81%	70,75	14	92,86%		95,34%		90,30%	7
29-12-2025	-0,42	94,67%	95,70%	-8,25		103,62%		105,98%		100,50%	
30-12-2025	0,52	94,76%	94,60%	10,21		100,86%		103,26%		97,91%	
31-12-2025	1,03	94,85%	94,00%	20,52		99,46%		101,87%		96,59%	
01-01-2026	2,05	94,86%	92,87%	40,63		96,94%		99,38%		94,20%	
02-01-2026	3,94	94,66%	90,87%	77,37		92,96%		95,43%		90,40%	
03-01-2026	5,86	94,29%	88,97%	113,02		89,75%		92,25%	1	87,29%	
04-01-2026	4,26	94,27%	90,53%	82,11		92,36%		94,84%		89,82%	
05-01-2026	5,56	94,05%	89,26%	105,92		90,20%		92,69%		87,73%	
06-01-2026	6,29	93,72%	88,57%	117,72		89,14%		91,63%		86,69%	
07-01-2026	6,09	93,53%	88,76%	112,81		89,42%		91,91%		86,97%	
08-01-2026	5,84	93,38%	88,99%	107,32		89,78%		92,28%		87,32%	
09-01-2026	5,42	93,35%	89,39%	99,45		90,42%	8	92,91%	5	87,94%	
10-01-2026	2,32	93,79%	92,57%	43,66		96,30%		98,74%		93,59%	10
11-01-2026	1,36	94,17%	93,64%	25,97		98,63%		101,05%		95,80%	
12-01-2026	1,78	94,24%	93,17%	34,20		97,58%		100,01%		94,81%	
13-01-2026	1,97	94,41%	92,96%	38,19		97,12%		99,56%		94,38%	1
14-01-2026	1,55	94,53%	93,42%	30,22	16	98,14%		100,57%		95,34%	
15-01-2026	-0,66	94,88%	95,99%	-13,19		104,39%		106,74%		101,21%	

Figur 25 - Eksempel for databehandling som grundlag for Bilag 2, med beregninger for RHT-indeks samt oversigt indikation for evt. risiko for skimmelvækst ud fra formler fra SBI 277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023) samt formler fra isopleth kurver Klaus Sedlbauer (Sedlbauer, Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation, 2001). Rød indikerer risiko for skimmelvækst, grøn er uden risiko for skimmelvækst.

Grænseværdien for antal dage med risiko for skimmelvækst iht. formel fra SBI-anvisningerne vedr. fugt, er 8 dage med risiko skimmelvækst valgt på baggrund af sammenligningen med isopleth kurvegrænserne. Isopleth grænseværdier for 8-dags kurven stemmer godt overens med formel fra SBI-anvisningerne vedr. fugt, når man sammenligner de beregnede grænseværdier for relativ

fugtighed. Ved grænser der ud fra beregninger viser et resultat på over 100% relativ fugtighed, her vil disse tolkes som 100%.

RHT

I denne rapport har vi valgt at se på anvendelsen af RHT-indeks modellen, der en anden model for vurdering af risiko for skimmelvækst i konstruktioner. Vi anvender dog ikke denne som en indikator for skimmelgrænse i konstruktionerne anvendt i denne rapport. Grænseværdier findes ved at RHT-indekset udføres ved brug af data fra WUFI. Disse data sættes op i et regneark, Figur 25, ved anvendelse af formler. En formel anvendes til udregning af RHT indeks, en anden formel anvendes til udregning af grænseværdi for skimmelvækst. Vi vurderer RHT-indekset ud fra de øvrige skimmelgrænseformler, vi anvender i denne rapport, og vil således finde RHT-grænsen for de enkelte biogene isoleringsmaterialer.

Formel for RHT-indeks er taget fra (Cornick & Dalglish, 2003, s. 6) og er således: $(RH - RH_{\text{threshold}}) / (T - T_{\text{threshold}})$ hvor RH er Relativ fugtighed %, T er temperatur, $_{\text{threshold}}$ er grænseværdier for henholdsvis RF% og Temperatur.

RH/RF% grænseværdien for relativ fugtighed sættes til 75%, da dette tal normalt kan anses som det kritiske fugtniveau på materialets overflade (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023).

Grænseværdien for T-Temperatur sættes til 0°, da der ved temperaturer under 0°, jf. modeller anvendt i SBI277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023), ikke ses nogen skimmelvækst.

RHT-indekset fortæller umiddelbart ikke, om der er risiko for skimmelvækst i konstruktionen. Andre rapporter har sammenlignet med en traditionel sikker konstruktion, og derved vurderet ud fra de indekstal denne konstruktion har. Hvilket betyder at de har vurderet ud fra om indekstallet i deres analyseret konstruktion, ligger under den traditionelle konstruktions indekstal. Her har andre vurderet at der umiddelbart ikke er risiko for skimmel. Ligger den over er det derimod ikke nødvendigvis en indikation på, at der i konstruktionen er risiko for skimmelvækst.

Vi vil i vores analyseafsnit prøve om vi ud fra øvrige beregninger, kan indikere et mere præcis indekstal for RHT-værdien for de enkelte biogene isoleringsmaterialer vi anvender i denne rapport.

Således bliver formelen:

Ligning 2 - Formel for beregning af RHT-indeks

$(RF-75)/(T-0)$, hvor data for RF og T udtrækkes af simuleringerne fra WUFI.

Skimmelgrænseanalyse samt RHT-indeks

Vi anvender udtræk i form af tekstfiler fra WUFI. Tekstfilerne indhentes i Excel, og bearbejdes til formlerne for bl.a. skimmelgrænser samt det Canadiske RHT-indeks (Cornick & Dalglish, 2003).

1²₃ Time Step	Time [dd,MM,yyyy]	1.2 Relative Humidity %	1.2 Temperature Å°C	
1	0	01-10-2025	76,65466148	10,99629794
2	1	01-10-2025	76,84719334	10,43472437
3	2	01-10-2025	77,00132332	10,09002411
4	3	01-10-2025	77,14521685	9,70951782
5	4	01-10-2025	77,27943569	9,358418322
6	5	01-10-2025	77,41798973	8,941998377
7	6	01-10-2025	77,55798582	8,521010432
8	7	01-10-2025	77,67738186	8,252147377
9	8	01-10-2025	77,75473501	8,226920809
10	9	01-10-2025	77,70847169	8,942996768
11	10	01-10-2025	77,56189735	9,92706295
12	11	01-10-2025	77,36686192	10,86296708
13	12	01-10-2025	77,14881846	11,73749769

Figur 26 - Tekstdata fra WUFI indhentet i Excel og transformeres (tilpasses nødvendige formler) om til beregningsarket.

Disse data overføres til formler, og angiver således resultater som ses på Figur 26. Resultaterne opsamles som vist i Figur 27. Ved Figur 27 indikerer de grønne felter endelig konstruktion uden risiko for skimmel ud fra de anvendte formler i denne rapport. Alle konstruktioner fra hver Excel-fil overføres til en samlet oversigt, som kan ses ved Bilag 1.

Der udføres således udtræk, transformering og behandling for hvert beregningsresultat, der ses i hver række på oversigten i Bilag 1.

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 3	=HM_3_5_N_RHT indek	=HM_3_6_N_RHT indek	=HM_3_7_N_RHT indek	=HM_3_8_N_RHT indek	=HM_3_10_N_RHT inde	=HM_3_50_N_RHT inde	=HM_3_5_S_RHT indek	=HM_3_10_S_RHT inde	=HM_3_50_S_RHT inde	=TF_3_5_N_RHT indek	=TF_3_6_N_RHT indek	=TF_3_7_N_RHT indek	=TF_3_10_N_RHT indek	=TF_3_50_N_RHT indek
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	13	11	7	6	5	0	2	0	0	7	7	6	4	0
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	174,18	159,57	148,65	140,13	127,39	74,42	103,77	78,21	44,39	160,64	153,81	147,84	132,94	75,66
RHT-indeks i alt pr. år	14.309,32	13.340,77	12.517,32	11.846,95	10.805,00	6.257,99	7.668,78	5.333,97	2.393,91	12.837,42	12.101,16	11.449,44	9.993,85	5.815,56
Antal sammenhængende dage => 4 dage if. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	6	6	3	3	0	0	0	0	0	4	3	3	0	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage if. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	9	7	7	6	6	0	2	0	0	7	7	6	5	0
Antal sammenhængende dage => 16 dage if. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	26	14	10	9	7	0	6	1	0	17	11	11	7	1
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	92,60%	92,18%	91,79%	91,49%	90,97%	87,56%	89,56%	87,12%	82,97%	91,17%	90,76%	90,38%	89,42%	85,73%

Figur 27 - Eksempel på opsamlingsark for hver parametergruppe, eksemplet (udsnit fra oversigt Bilag 2) her for konstruktioner med U-værdi 0,15 W/m²K i Fugtbelastningsklasse 3.

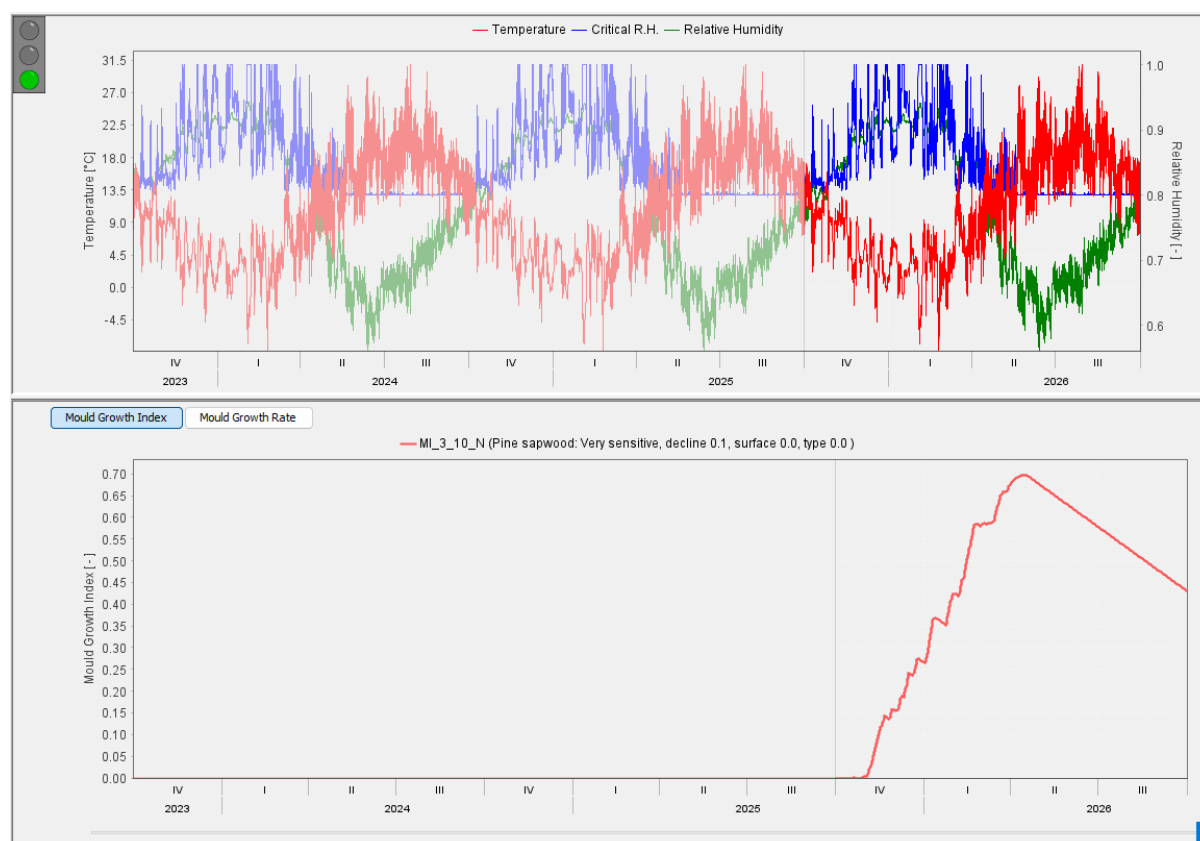
RHT-indeks anvendes i denne rapport ikke som indikator for om konstruktionen er fugtteknisk robust. Rapporten beregner RHT-indekset for at finde ud af, om grænsen for RHT-indekset varierer

alt efter konstruktion og materiale. Og derved finder den aktuelle grænse for hvert af de biogene isoleringsmaterialer, med den givende konstruktion der anvendes i denne rapport.

WUFI BIO og VTT

WUFI BIO og VTT analyserer risikoen for skimmelvækst i konstruktionerne, og giver grønt, gul eller rødt lys, hvilket indikerer, om der er risiko for skimmelvækst og i hvor høj grad. Analysen af risiko for skimmel gives for hele simuleringsperioden fra WUFI, hvor der kan være forskel på første simuleringsår og sidste simuleringsår.

Begge plug-in programmer sættes til at analysere inde i konstruktionen. WUFI BIO er sat til substrat klasse I, der omhandler bionedbrydelige materialer. WUFI VTT tager udgangspunkt i "pine sapwood" iht. standarden ASHRAE 160.



Figur 28 - Eksempel fra WUFI VTT, med analysering af risiko for skimmelvækst, for referencekonstruktionen med mineraluld og en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg, for det indvendige tæthedsplan. Der tages udgangspunkt i sidste simuleringsår, og som det fremgår af trafiklyset i øverste venstre hjørne, indikere WUFI VTT en sund konstruktion, uden risiko for skimmelvækst.

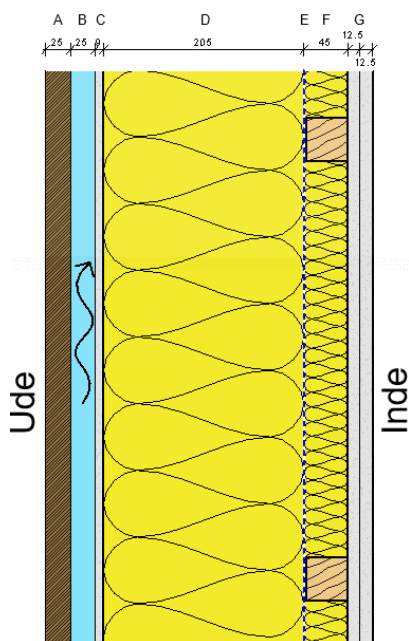
Resultaterne fra WUFI BIO og VTT er indskrevet i Bilag 1, der viser opsummering af alle konstruktioner.

Analyseresultaterne fra WUFI BIO og VTT anvendes ikke direkte, som parametre til analysering om konstruktionerne er fugtteknisk robuste. Resultaterne anvendes til at sammenligne resultater fra de øvrige formler, som anses for at være mere pålidelige end dynamiske simuleringsværktøjer (Johansson, Lång, & Capener, 2021).

4.4. Konstruktioner

I dette projekt, der omhandler biogene isoleringsmaterialer, holder vi som udgangspunkt forskellige konstruktioner med biogene isoleringsmaterialer op mod en konstruktion med traditionelt anvendt isoleringsmateriale. Det traditionelle isoleringsmateriale vi sammenligner op mod, er en mineraluld med en λ -værdi på 0,034. Vores referencekonstruktion er en almindeligt anvendt konstruktion for facader ved lette konstruktioner, taget ud fra almen teknisk fælleseje. Dermed en konstruktion som traditionelt anvendes i dansk byggeri, hvor udgangspunktet for ydervæggen er en let konstruktion. Denne konstruktion kan anvendes ved fremtidige byggerier, med ønske om anvendelse af biogene isoleringsmaterialer, i stedet for konventionelle isoleringsmaterialer (glasuld, mineraluld mv.).

Standardkonstruktionen er opbygget med forskellige Z-værdiforhold mellem vindspærre og tæthedsplan, samt konstruktionsopbygninger som angivet i Tabel 6. Simulering med biogene isoleringsmaterialer, udføres først med Z-værdier på 50, 10 og 5 GPa s m^2/kg for tæthedsplanet, hvor der på baggrund af resultaterne, vil blive udført simuleringer med lavere eller højere Z-værdier, hvilket er fremgangsmåden til at analysere grænseværdien for Z-værdiforholdet. Z-værdien for vindspærren er i beregningerne sat til 1 GPa s m^2/kg , medmindre andet er angivet.



Figur 29 - Referencekonstruktion vist i lodret snit

Referencekonstruktioner er opbygget med følgende lag, (Figur 29): Konstruktionens lag beskrevet udefra og mod indvendig side (0,15 W/m²K):

- A: 25 mm træbeklædning.
- B: 25 mm luftspalte/afstandslist, lodrette.
- C: 9 mm vindspærre.
- D: 45x205 mm træskellet opbygget med lodret konstruktionstræ pr. 600 mm, udfyldt med isolering.
- E: Tæthedsplan
- F: 45x45 mm træskellet opbygget med vandret regler pr. 450 mm, udfyldt med isolering.
- G: 2 x 12,5 mm gipsplader.

Denne konstruktion, Figur 29, anvender vi som udgangspunkt (referencekonstruktion). Vi udskifter den traditionelle isolering, i begge isoleringslag, med biogent isoleringsmateriale. For at få samme U-værdi ved konstruktionerne med biogene isoleringsmaterialer, tilpasses tykkelsen af isoleringen samt tilhørende træskeletkonstruktions dybde, se Tabel 6. Vi ændrer således det isoleringslag, der i referencekonstruktionen har en tykkelse på 205 mm. Vi tager ikke hensyn til isoleringsmaterialerne beskaffenhed i forhold til den valgte tykkelse, disse tykkelser er udelukkede for, at få præcis samme U-værdi i konstruktionerne.

Tabel 6 - Oversigt over tykkelses-forøgelsen med biogene isoleringsmaterialer kontra mineraluldsisolering fra referencekonstruktionen.

Oversigt over isolerings-forøgelse ud fra λ -værdi	Isolerings-tykkelse m.	λ -værdi isolering	λ -værdi inkl. træskelet	Isolans	Konstr. total isolans	Konstr. total U-værdi W/m ² K
Referencekonstruktion med mineraluld	0,205	0,034	0,040	5,07	6,69	0,150
Konstruktion med hamp	0,240	0,040	0,046	5,22	6,72	0,149
Konstruktion med hør	0,220	0,037	0,043	5,09	6,64	0,151
Konstruktion med halm	0,285	0,048	0,053	5,34	6,71	0,149
Konstruktion med græs	0,240	0,040	0,046	5,22	6,72	0,149
Konstruktion med træfiber	0,225	0,038	0,044	5,10	6,63	0,151
Konstruktion med cellulose	0,220	0,037	0,043	5,09	6,64	0,151

Alle materialer bør testet ifm. fugtsimulering, så korrekte materialeegenskaber er indarbejdet i simuleringen. Der vil kunne forekomme variationer efter laboratorietest af de anvendte materialer, da de er kopieret fra andre materialer fra WUFI bibliotek.

4.5. Beregningsparameter

Ved simuleringer i WUFI simuleres konstruktionen, indtil at denne er periodestabil. For hovedparten af konstruktionerne er denne periode det sidste år i en 3. årig simulering. Hvis ikke denne periode er stabil, udvides perioden med x-antal år, til der ses et år, der er stabilt i simuleringen.

Ved måling med WUFI i konstruktionen måles der i den yderste del af konstruktionen, da dette område vil være det mest kritiske område i forhold til risiko for skimmelvækst.

Ved tilskud for fugt fra indeklimaet anvendes der ved beregninger fugtbelastningsklasserne 2 og 3, som er defineret i standarden DS/EN ISO 13788:2013.

Regnskærm i den valgte konstruktion som vi anvender i simuleringen, er opbygget som en ventileret regnskærm. Der ventileres mellem beklædning og vindspærrer, og ventileringen er sat til et luftskifte, der svarer til 10x i timen. Denne løsning er valgt, da det er en løsning, der ofte anvendes i konstruktioner indenfor dansk byggeskik samt ved almen teknisk fælleseje som bl.a. TRÆ 55 (Koch, 2021).

Som beregningsforudsætning anvender vi konstruktioner med udgangspunkt i 2 forskellige U-værdier én på 0,15 W/m²K og én på 0,1 W/m²K. Vi har valgt vores konstruktioner som udgangspunkt med en U-værdi på 0,15 W/m²K, da dette er mindstekravet for ydervægskonstruktioner i BR18, hvor der ikke er krav til en energirammeberegning, som ved ændret anvendelse BR18 § 268.

Valgte for yderlige simuleringer, med en forbedret U-værdi på 0,10 W/m²K er medtaget, da vi ser denne U-værdi som værende et oplagt valgt i fremtiden, ved ønske om en konstruktion med et mindre varmetab.

Tabel 7 - Materialeegenskaber for materialer som er anvendt til simulering i WUFI. Gipsbeklædning på 25 mm, svare til en Z-værdi 0,88 GPa s m²/kg. Tæthedsplanet er angivet med en vanddampdiffusionsmodstand på 2000, hvilket svare til en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg, med en tykkelse på 1 mm. Vindspærren er angivet med en vanddampdiffusionsmodstandsfaktor på 22,2, hvilket svare til en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, med en tykkelse på 9 mm.

Materiale \ Enheder	Densitet Kg/m ³	Porøsitet m ³ /m ³	Varmekapa- citet J/kg/K	Varmeled- ningsevne W/mK	Vanddamp- diffusions- modstands- faktor -
Gipsbeklædning	625	0,706	870	0,16	7,03
Tæthedsplan	130	0,001	2300	2,3	2000
Vindspærre	1153	0,52	1200	0,32	22,2

Note: Når materialernes Z-værdi for tæthedsplan og vindspærre varierer til de forskellige konstruktioner, er det vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren som er ændret, hvor materialetykkelsen er bevaret.

Valg af Z-værdier

Alle simuleringer opstarter vi i WUFI med 3 varianter af Z-værdien på tæthedsplanet. Disse 3 variationer er Z-værdierne 5, 10 og 50 GPa s m²/kg (se kapitel 2.2 vedr. Z-værdi og damdiffusionsmodstand). Dette for at få en passende variation for opstart af efterfølgende analyser. Herefter justeres Z-værdien til nye simuleringer, ud fra hvorvidt der er risiko for skimmelvækst eller ej. Simuleringer og analyserne fortsætter med justeringer for Z-værdier med heltal, og justeres inden for denne nøjagtighed indtil vi har tilstrækkeligt med simuleringer, der indikerer konstruktioner med og uden risiko for skimmelvækst. Der medtages således ikke decimaler ved justering af Z-værdier for tæthedsplanet i simuleringerne.

Variationer af vindspærrens Z-værdi

Rapporten analyserer de enkelte isoleringsmaterialer med variationer af Z-værdien for vindspærren, for at undersøge om Z-værdiforholdet bevarer samme forhold ved ændringer af Z-værdien i vindspærren. Vi er nysgerrige på om dette forhold evt. ændre sig, eller viser en forskel mellem de analyseret isoleringsmaterialer. Der beregnes og analyseres med udgangspunkt i referencekonstruktionen med mineraluld samt træfiberisolering. Vi analyserer ligeledes, hvorledes RHT-indekset udvikler sig, med disse isoleringsmaterialer ved ændring af Z-værdien i vindspærren.

5. Analyse

Skimmelrisiko analyseres med formler fra:

- SBI-anvisning 277 (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023),
- LIM-model med 4, 8 og 16 dages grænseværdier
- Beregning af RHT-indeks

Resultaterne betragtes i forhold til isoleringsmaterialet, men kan ligeledes sammenholdes med referencekonstruktionen med mineraluld.

For at kunne sammenligne referencekonstruktionen med resultaterne fra de biogene isoleringsmaterialer, er referencekonstruktionen blevet analyseret, for at finde grænsen for Z-værdi forholdet, som for de øvrige konstruktioner.

Resultaterne som er anført i tabellerne under delresultater, er udelukkende resultater fra beregninger med formlerne som angivet i kapitel 4.3, hvor resultater fra WUFI BIO og VTT, blot er medtaget i Bilag 1.

Konstruktioner der er analyseret for at finde Z-værdigrænsen, er beskrevet under dette afsnit, hvor delresultaterne er oplistet i forhold til de enkelte analyser. Z-værdigrænsen er baseret på udslag i beregningerne, når grænserne med risiko for skimmelvækst overskrides.

Herunder er forklaring for tekster der er anført i tabellerne:

Eksempel: "Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk" – hvilket angiver, hvor mange gange på ét år, at grænsen på 8 dage i træk er overskredet med risiko for skimmel.

Eksempel: " Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk " – hvilket angiver det højeste antal dage i træk med risiko for skimmel, over den beregnede periode på ét år.

Beregningerne for mineraluld er oplistet i Tabel 8, med en U-værdi på 0,15 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Tabellen inderholder beregninger for RHT-indeks, risiko for skimmelvækst samt den højeste relative fugtighed.

Tabel 8 - Delresultaterne for standardkonstruktionen med mineraluld, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi, refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: MI_3_N						
Z-værdi – GPa s m ² /kg						
Analysemetode	50	10	9	8	7	5
RHT-indeks	5.182	11.875	12.565	13.364	14.269	16.638
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	2	2	3	7
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	1	6	8	9	12	19
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	2

Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	0	1	2	3	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	4
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	3	6	7	7	14
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	3
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	0	11	14	14	15	23
Højeste relativ fugtighed	88,2%	93,9%	94,3%	94,8%	95,3%	96,3%

Som det fremgår af Tabel 8, ligger grænsen for Z-værdiforholdet, for referencekonstruktionen på 1:10, hvor vindspærreplanet har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, og tæthedsplanet har en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg.

For at kunne sammenligne de forskellige konstruktioner, er referencekonstruktionen analyseret med U-værdier på 0,15 W/m²K og 0,10 W/m²K, samt i fugtbelastningsklasserne 2 og 3. Disse resultater fremgår af Tabel 9, hvor grænseværdien for en fugtteknisk robust konstruktion med mineraluld kan aflæses i forhold til de forskellige opsætninger.

Tabel 9 - Delresultater for mineraluld, med forskellige U-værdier og fugtbelastningsklasser. Orientering er mod nord, hvor øvrige definitioner af konstruktionen opsætning fremgår af tabellen. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: MI_2-3_N_U1						
	MI_2_N		MI_3_N_U1		MI_2_N_U1	
Z-værdi – GPa s m ² /kg						
Analysemetode	5	6	11	12	6	7
RHT-indeks	12.378	11.464	12.196	11.728	12.169	11.525
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	1	0	1	0	1	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	8	5	8	6	8	5
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0

Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	1	0	2	1	1	1
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	4	2	4	4	4	3
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	14	14	14	11	14	14
Højeste relativ fugtighed	94,1%	93,5%	94,6%	94,3%	94,5%	94,1%

Ud fra resultaterne med standardopsætning for de biogene isoleringsmaterialer, hvor ydervægskonstruktioner er placeret i fugtbelastningsklasse 3, med en U-værdi på 0,15 W/m²K og orientering mod nord, har vi valgt at udføre supplerende og lignende analyser for isoleringsmaterialerne halm og træfiber. Samme analyser er udført med referencekonstruktionen med mineraluld. De supplerende analyser har til hensigt at finde grænseværdierne for isoleringsmaterialerne, når U-værdien ændres til 0,10 W/m²K, samt konstruktionerne placeret i fugtbelastningsklasse 2.

Halm og træfiber har begge gode forudsætninger, her er Z-værdiforholdet lavt. Samtidig er det ressourcer, der er tilgængelige i Danmark, hvilket er grundlaget for at vælge netop disse materialer i forbindelse med supplerende analyser.

5.1. Hamp

Id: HP_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

De første analyser af standardopsætningen med hamp er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedsplanet. Her viser de første analyser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger på en Z-værdi mellem 10 og 50 GPa s m²/kg, iht. Tabel 10. Med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg, gav alle formler udslag for risiko for skimmel, hvor en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg, kun gav udslag med formel fra SBI.

Efter de indledende resultater er konstruktionen med hamp mod nord, efterfølgende blevet analyseret med en Z-værdi på 8 og 12 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan. Dette for at finde grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, samt se hvor mange udslag, en konstruktion med en Z-værdi på 8 gav, i forhold til Z-værdierne 5 og 10 GPa s m²/kg.

Analysen af Z-værdierne 8 og 12 GPa s m²/kg gav begge udslag på formel fra SBI(se kapitel 4.3), men ikke på LIM-kurverne, hvor begge resultater var identiske med resultatet med en Z-værdi på 10 GPa s m²/kg. Efterfølgende blev konstruktionen analyseret med en Z-værdi på 15 GPa s m²/kg, hvilket indikerer en fugtsikker konstruktion, der ikke gav udslag. Dermed ligger grænsen for en fugtteknisk

robust konstruktion med en Z-værdi på 13 eller 14 GPa s m²/kg, hvor begge analyseresultater indikerer fugtsikre konstruktioner.

Konstruktionen med en Z-værdi på 13 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion i forhold til de opstillede betingelser, udført med hamp som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Analyserne for isopleth kurverne gav ikke udslag med en Z-værdi på 8 GPa s m²/kg, hvilket indikerer store forholdsmæssige forskelle på analyseresultat mellem formlerne, når spændet på Z-værdien som min. er fra 8 til 13 GPa s m²/kg, afhængig af hvilken formel man anvender.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne viser begge modeller, at næsten alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen. Hvor det kun er VTT, som angiver gult lys, med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for tæthedsplanet, som angivet i Bilag 1. Dermed angiver hovedparten af resultaterne, at der ingen risiko for skimmelvækst er, ud fra WUFI BIO og VTT analysemetoden.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for hamp, spænder fra 7.462 til 16.879 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 13 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 11.548, som angivet i Tabel 10 og Bilag 1. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for hamp i netop denne konstruktion/opbygning, tæt på et RHT-indeks på 11.548.

5.1.1. Delresultater for hamp

Beregningerne der er udført med isoleringsmaterialet hamp i fugtbelastningsklasse 3, og med en U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet herunder i Tabel 10. Z-værdierne i øverste kolonne er for det indvendige tæthedsplan.

Grænsen for den beregnede Z-værdi med hamp, er 13 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan.

Tabel 10 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med isolering af hamp, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HP_3_N						
Z-værdi GPa s m ² /kg						
Analysemetode	50	13	12	10	8	5
RHT-indeks	7.462	11.548	11.929	12.847	14.062	16.879
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	1	1	2	7
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	7	8	8	14	18
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1	2
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	1	2	4	6

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	3
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	2	4	4	7	12
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	2
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	1	14	14	14	14	23
Højeste relativ fugtighed	89,6%	93,2%	93,5%	94,1%	94,8%	96,0%

5.2. Hør

Id: HR_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

De første analyser af standardopsætningen med hør er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedspanet. Her viser de første analyser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger med en Z-værdi på mellem 10 og 50 GPa s m²/kg, som angivet i Tabel 11. Analysen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for tæthedspanet gav udslag på alle beregninger, hvor 10 GPa s m²/kg kun gav udslag på en formel.

Efterfølgende blev konstruktionen analyseret med Z-værdierne 8 og 12 GPa s m²/kg, ligesom for hamp. Analyseresultaterne viste, at en Z-værdi på 12 GPa s m²/kg ikke gav nogle udslag i beregningerne, samt at 8 gav udslag på én formel som Z-værdien på 10 GPa s m²/kg. Derefter kan grænsen bestemmes med en sidste beregning, med en Z-værdi på 11 GPa s m²/kg.

Beregningen med en Z-værdi på 11 GPa s m²/kg, gav udslag i én formel, som værdierne 8 og 10 GPa s m²/kg. Grænsen for en fugtsikker konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med hør som isoleringsmateriale, er med en Z-værdi på 12 GPa s m²/kg, for det indvendige tæthedspan.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne viser begge modeller, at næsten alle konstruktioner ved 3. simuleringssår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, hvor det kun er VTT, som angiver gult lys, med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for tæthedspanet som angivet i Bilag 1. Dermed angiver hovedparten af resultaterne, at der ingen risiko for skimmelvækst er, ud fra WUFI BIO og VTT analysemetoden.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for hør, spænder fra 7.296 til 17.020 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 12 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 11.910 som angivet i Tabel 11. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for hør i netop denne konstruktion/opbygning, tæt på et RHT-indeks på 11.910.

5.2.1. Delresultater for hør

Delresultater for beregningerne med hør som isoleringsmateriale, i fugtbelastningsklasse 3, med U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i nedenstående Tabel 11, hvor grænsen for Z-værdiforholdet, er beregnet til 1:12.

Tabel 11 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med hør, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HR_3_N						
Z-værdi GPa s m ² /kg						
Analysemetode	50	12	11	10	8	5
RHT-indeks	7.296	11.910	12.349	12.851	14.105	17.020
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	1	1	2	7
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	7	8	8	14	19
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	2
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	2	2	2	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	2	3
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	3	4	4	5	14
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	2
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	1	14	14	14	14	23
Højeste relativ fugtighed	89,6%	93,6	93,8%	94,1%	94,9%	96,1%

5.3. Halm

Id: HM_3_N/S	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord & Syd
---------------------	---------------------------------------	----------------------	------------------------------------

De første analyser af standardopsætningen med halm er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedsplanet. De første analyser viser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger på en Z-værdi mellem 5 og 10 GPa s m²/kg som vist i Bilag 1. En Z-værdi på 10 GPa s m²/kg giver indikation af en konstruktion uden risiko for skimmelvækst. Analysen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg giver udslag på alle beregningerne i forhold til risiko for skimmelvækst.

Mod syd, ligger alle beregninger i forhold til risiko for skimmelvækst, inden for grænserne, og indikerer dermed en fugtsikker konstruktion, når orienteringen er mod syd.

Efter de indledende resultater er konstruktionen med halm mod nord, efterfølgende blevet analyseret med en Z-værdi på 8 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan. Denne analyse ligger ligeledes inden for grænsen, og indikerer en fugtsikker konstruktion i forhold til de opstillede kriterier. De efterfølgende resultater for konstruktionen med Z-værdierne 6 og 7 GPa s m²/kg, ligger tæt på resultat på beregningen med en Z-værdi på 8 GPa s m²/kg, dog er konstruktionen med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg lidt anderledes. Konstruktionen med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg giver udslag på to ud af fire beregningsformler med risiko for skimmelvækst. Konstruktionen giver ikke udslag på isopleth kurven for 8- og 16-dags grænseværdier, og giver udslag på kurven for 4-dags grænseværdier, samt formlen fra SBI fugtanvisningerne, som angivet i Tabel 12.

Konstruktionen med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtsikker konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med halm som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for halm spænder fra 6.258 til 14.310. (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 12.518 som angivet i Tabel 12. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for halm med en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3 og orientering mod nord, tæt på et RHT-indeks på 12.518.

Id: HM_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 2	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægskonstruktionen med halm og en U-værdi på 0,15 W/m²K, analyseres yderligere i fugtbelastningsklasse 2, for at finde grænsen, for Z-værdiforholdet, ved normal beboelsestæthed.

Konstruktionen blev analyseret med Z-værdierne 5 og 3 GPa s m²/kg, da grænsen for Z-værdiforholdet vil være mindre i fugtbelastningsklasse 2, end de tidligere analyser i fugtbelastningsklasse 3.

Analysen med Z-værdierne 5 og 3 GPa s m²/kg gav ikke udslag på analysemetoderne, og indikerer dermed en fugtteknisk robust konstruktion for disse Z-værdier. Efterfølgende blev Z-værdien sænket til 2 GPa s m²/kg, hvor analysen gav udslag på alle beregninger, og dermed ikke betegnes som en fugtteknisk robust konstruktion.

Konstruktionen med en Z-værdi på 3 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med halm som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 2.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner, spænder fra 11.092 til 13.956 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 3 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 12.750 som angivet i Tabel 14. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker

konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for halm med en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, tæt på et RHT-indeks på 12.750.

Id: HM_3_N_U1	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
----------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægskonstruktionen med halm er yderligere analyseret med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, for at kunne analysere grænsen for Z-værdiforholdet, ved højisolerede konstruktioner med halm, når det er ukendt beboelsestæthed.

Analysen i WUFI med tre simuleringsår gav ikke periodestabilitet, hvor simuleringsperioden blev øget til syv år, og dermed blev konstruktionen periodestabil, til de efterfølgende analyser af grænsen for Z-værdiforholdet.

Ud fra resultaterne med halm, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, startede analyserne med Z-værdierne 7 og 10 GPa s m²/kg, for at vurdere om Z-værdien efterfølgende skulle hæves til over 10 GPa s m²/kg, eller om den kunne holdes under.

Resultat fra analyserne viser, at grænsen ligger mellem 7 og 10 GPa s m²/kg, da Z-værdien på 10 GPa s m²/kg indikerer en fugtsikker konstruktion, men hvor 7 GPa s m²/kg, gav udslag på alle beregninger. Ved at sænke U-værdien var det forventet, at konstruktionen med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg, ville give udslag på minimum nogle af beregningerne.

Efterfølgende blev Z-værdierne 8 og 9 GPa s m²/kg analyseret, resultatet heraf var at med en Z-værdi på 8, gav 3 ud af 4 beregninger udslag, hvor konstruktionen med en Z-værdi på 9 GPa s m²/kg, ikke gav nogle udslag.

Konstruktionen med en Z-værdi på 9 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med halm som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,10 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 7. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT-analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner spænder fra 10.713 til 12.085 (i alt for ét helt år over det 7. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 9 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 11.117 som angivet i Tabel 15. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for halm med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, tæt på et RHT-indeks på 11.117.

Id: HM_2_N_U1	U-værdi: 0,10 W/m²K	Fugtklasse: 2	Orientering: Nord
----------------------	----------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægskonstruktionen med halm og en U-værdi på 0,10 W/m²K er yderligere analyseret i fugtbelastningsklasse 2, for at kunne analysere grænsen for Z-værdiforholdet, ved højisolerede konstruktioner med halm, når det er normal beboelsestæthed.

Analysen i WUFI med tre simuleringsår gav ikke periodestabilitet, hvor simuleringsperioden blev øget til syv år, og dermed blev konstruktionen periodestabil, til de efterfølgende analyser af grænsen for Z-værdiforholdet.

Ud fra tidligere resultater blev konstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,10 W/m²K i fugtbelastningsklasse 2, først analyseret med Z-værdierne 5 og 3 GPa s m²/kg, som for tidligere beregninger i fugtbelastningsklasse 2.

Resultatet af analyserne viser, at Z-værdien på 3 giver udslag på alle beregninger, hvor Z-værdien på 5 ikke giver nogle udslag, og dermed indikerer en fugtteknisk robust konstruktion. Den efterfølgende analyse af Z-værdien på 4 GPa s m²/kg gav ingen udslag, ligesom konstruktionen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan.

Konstruktionen med en Z-værdi på 4 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, i forhold til de opstillede betingelser udført med halm som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,10 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 2.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 7. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner, spænder fra 10.604 til 11.815 (i alt for ét helt år over det 7. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 4 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 11.166, som angivet i Tabel 16. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for halm med en U-værdi på 0,10 W/m²K i fugtbelastningsklasse 2, tæt på et RHT-indeks på 11.166.

5.3.1. Delresultater for halm

Konstruktioner med halm som isoleringsmateriale er analyseret med forskellige orienteringer, U-værdier samt fugtbelastningsklasser, det fremgår af Tabel 12 til Tabel 16.

Delresultater for konstruktionen med halm fremgår af Tabel 12, med en U-værdi på 0,15 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3, og orientering mod nord. Grænseværdien for Z-værdiforholdet er beregnet til 1:7, når vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg.

Tabel 12 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HM_3_N						
Z-værdi GPa s m²/kg						
Analysemetode	50	10	8	7	6	5
RHT-indeks	6.258	10.805	11.847	12.518	13.341	14.310

Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	1	3
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	5	6	7	11	13
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	0	3	3	6	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	6	6	7	7	9
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	0	7	9	10	14	26
Højeste relativ fugtighed	87,6%	91,0%	91,5%	91,8%	92,2%	92,6%

Halm er sammen med mineraluld de to konstruktioner, der er analyseret mod syd, hvor delresultater for halm med en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt med orientering mod syd. Ud fra beregningerne med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan, giver ingen af disse indikationer på risiko for vækst af skimmel.

Tabel 13 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod syd. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HM_3_S			
Z-værdi GPa s m ² /kg			
Analysemetode	50	10	5
RHT-indeks	2.394	5.334	7.669
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	0	2

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	0	0
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	0	2
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	0	1	6
Højeste relativ fugtighed	83,0%	87,1%	89,6%

Delresultater for halm med en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord, er oplistet i Tabel 14, hvor det fremgår, at grænsen for Z-værdiforholdet er beregnet til 1:3.

Tabel 14 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan

Delresultater for konstruktions ID: HM_2_N			
Z-værdi GPa s m ² /kg			
Analysemetode	5	3	2
RHT-indeks	11.092	12.750	13.956
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	3
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	5	7	12
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	3	6

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	6	7	9
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	7	13	26
Højeste relativ fugtighed	91,1%	92,0%	92,6%

Delresultaterne for halm med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, og med orientering mod nord, fremgår af Tabel 15. Ud fra resultaterne af beregnede konstruktioner, er en Z-værdi på 9 GPa s m²/kg, grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion med netop denne opsætning.

Tabel 15 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HM_3_N_U1				
Z-værdi GPa s m ² /kg	10	9	8	7
Analysemetode	10	9	8	7
RHT-indeks	10.713	11.117	11.570	12.085
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	1	1
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	7	7	8	9
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	2	3	4	5
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	7	7	7	8

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	11	11	16	32
Højeste relativ fugtighed	91,0%	91,2%	91,4%	91,6%

Delresultater for halm er oplyst i nedenstående Tabel 16, med en U-værdi på 0,10 W/m²K i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord. Grænseværdien for Z-værdiforholdet er beregnet til 1:4.

Tabel 16 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: HM_2_N_U1			
Z-værdi GPa s m ² /kg			
Analysemetode	5	4	3
RHT-indeks	10.604	11.166	11.815
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	1
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	7	7	9
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	2	3	5
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	7	7	8
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	11	11	19
Højeste relativ fugtighed	91,0%	91,3%	91,5%

5.4. Græs

Id: GR_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

De første analyser af standardopsætningen med græs er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedsplanet. Her viser de første analyser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger med en Z-værdi på mellem 10 og 50 GPa s m²/kg som angivet i Tabel 17. Analysen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for tæthedsplanet, gav udslag på alle beregninger, hvor 10 GPa s m²/kg kun gav udslag på en formel.

Efterfølgende blev konstruktionen analyseret med en Z-værdi på 12 GPa s m²/kg, for at vurdere om grænsen, er nået, eller om den skal hæves. Analyseresultatet viste, at en Z-værdi på 12 GPa s m²/kg ikke gav nogle udslag i beregningerne, hvilket indikerer en fugtsikker konstruktion.

Derefter kan grænsen bestemmes med en sidste beregning med en Z-værdi på 11 GPa s m²/kg, hvor beregningen ikke viste udslag.

Grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, i forhold til de opstillede betingelser for græs som isoleringsmateriale, er med en Z-værdi på 11 GPa s m²/kg, for det indvendige tæthedsplan.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at næsten alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, hvor det kun er VTT, som angiver rødt lys med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for tæthedsplanet, som angivet i Bilag 1. Dermed angiver hovedparten af resultaterne, at der ingen risiko for skimmelvækst er, ud fra WUFI BIO og VTT analysemetoden.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for hør, spænder fra 6.992 til 17.729 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 11 havde et RHT-indeks på 12.441, som angivet i Tabel 17. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for hør i netop denne konstruktion/opbygning, tæt på et RHT-indeks på 11.910.

5.4.1. Delresultater

Delresultaterne for græs i fugtbelastningsklasse 3, med U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er indskrevet i Tabel 17. Grænseværdien er beregnet til et Z-værdiforhold på 1:11, som ligger lige over referencekonstruktionen.

Tabel 17 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med græs, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: GR_3_N					
Z-værdi GPa s m ² /kg					
Analysemetode	50	12	11	10	5
RHT-indeks	6.992	11.947	12.441	13.003	17.729
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	1	8
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	3	7	8	20

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	3
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	1	2	6
				10	
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	4
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	2	3	4	14
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	3
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	1	13	14	15	24
Højeste relativ fugtighed	90,2%	93,8%	94,1%	94,3%	96,2%

5.5. Træfiber

Id: TF_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

De første analyser af standardopsætningen med træfiber er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedsplanet. Her viser de første analyser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger med en Z-værdi mellem 5 og 10 GPa s m²/kg, som angivet i Tabel 18. En Z-værdi på 10 GPa s m²/kg giver indikation af en konstruktion uden risiko for skimmelvækst, hvor analysen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg, giver udslag på to af beregningerne i forhold til risiko for skimmelvækst.

Efter de indledende resultater er konstruktionen med træfiber mod nord, efterfølgende blevet analyseret med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan. Denne analyse ligger ligeledes også inden for grænsen, og indikerer en fugtsikker konstruktion i forhold til de opstillede kriterier.

Den efterfølgende analyse for konstruktionen med træfiber er med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg, hvor resultatet ikke giver udslag på nogle af analysemetoderne. Konstruktionen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg, giver udslag på to af beregningsmetoderne, hvilket er LIM-modellen for 4- og 16-dags grænsen.

Konstruktionen med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med træfiber som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Tabel 18. Dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetoden.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for træfiber spænder fra 5.816 til 12.837 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg havde et RHT-indeks på 12.101, som angivet i Tabel 18. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for træfiber i netop denne konstruktion/opbygning, tæt på et RHT-indeks på 12.101.

Id: TF_2_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 2	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægskonstruktionen med træfiber og en U-værdi på 0,15 W/m²K, analyseres yderligere i fugtbelastningsklasse 2, for at finde grænsen, for Z-værdiforholdet, ved normal beboelsestæthed.

Konstruktionen blev analyseret med Z-værdierne 5 og 3 GPa s m²/kg, da grænsen for Z-værdiforholdet vil være mindre i fugtbelastningsklasse 2, end de tidligere analyser i fugtbelastningsklasse 3.

Analysen med Z-værdierne 5 og 3 GPa s m²/kg, gav ikke udslag på analysemetoderne, og indikere dermed en fugtteknisk robust konstruktion, for disse Z-værdier. Efterfølgende blev Z-værdien sænket til 2 GPa s m²/kg, hvor analysen ikke gav udslag på nogle beregningerne. Herefter blev Z-værdien sænket til 1 GPa s m²/kg, hvor analysen gav udslag på to af beregningerne, hvilket var LIM-modellen med 4- og 16-dags grænseværdier. Dermed kan konstruktionen med en Z-værdi på 1, ikke betegnes som en fugtteknisk robust konstruktion.

Konstruktionen med en Z-værdi på 2 GPa s m²/kg, er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion i forhold de opstillede betingelser, udført med træfiber som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 2.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 3. simuleringsår, indikere sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT-analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner, spænder fra 9.941 til 13.014 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 2 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 11.982 som angivet i Tabel 19. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for træfiber med en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, tæt på et RHT-indeks på 11.982.

Id: TF_3_N_U1	U-værdi: 0,10 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
----------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægskonstruktionen med træfiber er yderligere blevet analyseret med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, for at analysere grænsen for Z-værdiforholdet ved højisolerede konstruktioner med træfiber, når det er ukendt beboelsestæthed.

Analysen i WUFI med tre simuleringsår gav ikke periodestabilitet, hvor simuleringsperioden blev øget til syv år, og dermed blev konstruktionen periodestabil til de efterfølgende analyser af grænsen for Z-værdiforholdet.

Ud fra resultaterne med træfiber, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, startede analyserne med Z-værdierne 6 og 10 GPa s m²/kg, for at vurdere, om Z-værdien efterfølgende skulle hæves til over 10 GPa s m²/kg, eller om den kunne holdes den under.

Resultat fra analyserne viser, at grænsen ligger mellem 6 og 10 GPa s m²/kg, da Z-værdien på 10 GPa s m²/kg indikerer en fugtsikker konstruktion, men hvor 6 GPa s m²/kg, giver udslag på en af beregningerne. Ved at sænke U-værdien til 0,10 W/m²K, var det også forventet at konstruktionen med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg ville give udslag på minimum en af beregningerne, når det er grænseværdien med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Efterfølgende blev Z-værdien 7 analyseret, resultatet var, at den gav samme udslag som med en Z-værdi på 6 GPa s m²/kg. Herefter blev Z-værdierne 8 og 9 GPa s m²/kg analyseret, ingen af disse gav udslag på beregningerne, og indikerer dermed fugtsikre konstruktioner.

Konstruktionen med en Z-værdi på 8 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, i forhold til de opstillede betingelser, udført med træfiber som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,10 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Der er stor forskel på de forskellige beregningsmodeller, samt udslag på risiko for skimmelvækst. Beregningsformel som giver udslag med den Z-værdi på 7 GPa s m²/kg er kun for LIM-kurven for 16-dags grænsen. Næste formel der giver udslag, er LIM-kurven med 4- og 8-dagsgrænsen, men med en Z-værdi på 2 GPa s m²/kg. Dette eksempel er et udtryk for hvor stor forskel der er i de forskellige beregningsformler, afhængig af parametre for de enkelte konstruktioner.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 7. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1, og dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner spænder fra 9.392 til 12.662 (i alt for ét helt år over det 7. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 8 GPa s m²/kg havde et RHT-indeks på 9.980, som angivet i Tabel 20. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for træfiber med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, tæt på et RHT-indeks på 9.980.

Id: TF_2_N_U1	U-værdi: 0,10 W/m²K	Fugtklasse: 2	Orientering: Nord
----------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Ydervægsstrukturen med træfiber og en U-værdi på 0,10 W/m²K er yderligere blevet analyseret i fugtbelastningsklasse 2, for at kunne analysere grænsen for Z-værdiforholdet ved højisolerede konstruktioner med træfiber, når det er normal beboelsestæthed.

Analysen i WUFI med tre simuleringsår gav ikke periodestabilitet, hvor simuleringsperioden blev øget til syv år, og dermed blev konstruktionen periodestabil til de efterfølgende analyser af grænsen for Z-værdiforholdet.

Ud fra tidligere resultater blev konstruktionen med halm, og en U-værdi på 0,10 W/m²K i fugtbelastningsklasse 2, først analyseret med Z-værdierne 4-6 GPa s m²/kg. Beregningerne startede med Z-værdien 4 GPa s m²/kg, hvilket ikke gav udslag, hvor Z-værdien efterfølgende skulle sænkes.

Efterfølgende blev Z-værdierne 2 og 3 GPa s m²/kg analyseret, hvor Z-værdien på 2 gav udslag på en af beregningerne, men Z-værdien på 3 GPa s m²/kg gav ikke udslag, og dermed indikerer en fugtteknisk robust konstruktion,

Konstruktionen med en Z-værdi på 3 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, i forhold til de opstillede betingelser udført med træfiber som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,10 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 2.

Det er kun beregningsmodellen fra LIM-kurven med 16-dags grænseværdier, som giver udslag på beregninger med træfiber i fugtbelastningsklasse 2, og en U-værdi på 0,10 W/m²K. Der er foretaget beregninger med en Z-værdi på 0 GPa s m²/kg for tæthedsplanet, hvor det kun er den indvendige gipsbeklædning og isoleringsmaterialet træfiber, der definerer dampdiffusionsmodstanden i konstruktionen. Beregningerne med formel fra SBI, samt LIM-kurverne for 4 og 8-dagsgrænsen, indikerer dermed fugtteknisk robuste konstruktioner, uden brug af et defineret tæthedsplan.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved både 1. og 7. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1. Dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner spænder fra 9.336 til 11.053 (i alt for ét helt år over det 7. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 3 GPa s m²/kg, havde et RHT-indeks på 9.727, som angivet i Tabel 21. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for træfiber med en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, tæt på et RHT-indeks på 9.727.

5.5.1. Delresultater

Træfiber er analyseret med forskellige U-værdier og fugtbelastningsklasser, hvor delresultater fremgår af Tabel 18 til Tabel 21.

Delresultater for træfiber i fugtbelastningsklasse 3, med U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i Tabel 18, hvor der fremgår at grænsen for Z-værdiforholdet, er beregnet til 1:6, for træfiber med netop disse forudsætninger.

Tabel 18 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med træfiber, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: TF_3_N					
Z-værdi GPa s m ² /kg					
Analysemetode	50	10	7	6	5
RHT-indeks	5.816	9.994	11.449	12.101	12.837
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	4	6	7	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	0	3	3	4

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	5	6	7	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	1	7	11	11	17
Højeste relativ fugtighed	85,7%	89,4%	90,4%	90,8%	91,2%

Delresultater for træfiber i fugtbelastningsklasse 2, med U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i Tabel 19, hvor der fremgår at grænsen for Z-værdiforholdet, er beregnet til 1:2, for træfiber med netop disse forudsætninger.

Tabel 19 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med træfiber, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: TF_2_N				
Z-værdi GPa s m ² /kg				
Analysemetode	5	3	2	1
RHT-indeks	9.941	11.141	11.982	13.014
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	4	6	7	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	3	3	5
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	4	6	7	7

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	7	9	11	17
Højeste relativ fugtighed	89,4%	90,3%	90,8%	91,4%

Delresultater for træfiber i fugtbelastningsklasse 3, med U-værdi på 0,10 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i Tabel 20, hvor der fremgår at grænsen for Z-værdiforholdet, er beregnet til 1:8, for træfiber med netop disse forudsætninger.

Tabel 20 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med træfiber, og en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: TF_3_N_U1				
Z-værdi GPa s m ² /kg				
Analysemetode	10	8	7	6
RHT-indeks	9.392	9.980	10.331	10.703
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	5	5	5	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	2	2
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	5	5	5	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	9	11	17	17
Højeste relativ fugtighed	88,6%	88,9%	89,1%	89,3%

Delresultater for træfiber i fugtbelastningsklasse 2, med U-værdi på 0,10 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i Tabel 21, hvor der fremgår at grænsen for Z-værdiforholdet, er beregnet til 1:3, for træfiber med netop disse forudsætninger.

Tabel 21 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med træfiberisolering, og en U-værdi på 0,10 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 2, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: TF_2_N_U1					
Z-værdi GPa s m ² /kg					
Analysemetode	4	3	2	1	0
RHT-indeks	9.336	9.727	10.183	10.699	11.053
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	5	5	5	6	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	1	2	2
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	5	5	5	6	7
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	1	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	9	11	17	17	17
Højeste relativ fugtighed	88,6%	88,8%	89,1%	89,4%	89,3%

5.6. Celluloseisolering

Id: CL_3_N	U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
-------------------	---------------------------------------	----------------------	--------------------------

De første analyser af standardopsætningen med cellulose er med orientering mod nord, og med Z-værdier på 5, 10 og 50 GPa s m²/kg for tæthedsplanet. Her viser de første analyser, at grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion ligger på en Z-værdi mellem 5 og 10 GPa s m²/kg, som angivet i Tabel 22. En Z-værdi på 10 GPa s m²/kg giver indikation af en konstruktion uden risiko for skimmelvækst. Analysen med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg giver udslag på alle beregningerne i forhold til risiko for skimmelvækst.

Efter de indledende resultater er konstruktionen med cellulose mod nord, efterfølgende blevet analyseret med Z-værdier på 6, 7 og 8 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan.

Analyseresultaterne på Z-værdierne 7 og 8 GPa s m²/kg gav ingen udslag på beregningerne, hvor Z-værdien på 6 GPa s m²/kg gav udslag på to af beregningerne. Z-værdien på 6 GPa s m²/kg gav udslag på LIM-modellen med 4- og 16-dags grænseværdierne, hvor LIM-modellen med 8-dags grænse, samt skimmelgrænsen fra SBI, havde maksimalt 7 dage i træk med risiko for skimmel.

Konstruktionen med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg er dermed grænsen for en fugtteknisk robust konstruktion, i forhold til de opstillede betingelser udført med cellulose som isoleringsmateriale, når orientering er nord, U-værdien er 0,15 W/m²K, og i fugtbelastningsklasse 3.

Ved anvendelse af WUFI BIO og VTT til analysering af konstruktionerne, viser begge modeller, at alle konstruktioner ved 3. simuleringsår indikerer sunde konstruktioner med grønt lys i resultatloggen, som angivet i Bilag 1. Dermed er der ingen risiko for skimmelvækst ud fra WUFI BIO og VTT analysemetode.

RHT-indekset på de beregnede konstruktioner for cellulose spænder fra 7.349 til 15.663 (i alt for ét helt år over det 3. år), hvor konstruktionen med en Z-værdi på 7 GPa s m²/kg havde et RHT-indeks på 13.997 som angivet i Bilag 1. Vi vurderer derfor, at denne konstruktion med dette RHT-indeks er en sikker konstruktion, og derved ligger RHT-grænsen for cellulose i netop denne konstruktion/opbygning tæt på et RHT-indeks på 13.997.

5.6.1. Delresultater

Delresultater for celluloseisolering i fugtbelastningsklasse 3, med U-værdi på 0,15 W/m²K, samt orientering mod nord, er oplistet i nedenstående Tabel 22, hvor resultat fra beregninger viser, at grænsen for Z-værdiforholdet er 1:7 med disse forudsætninger.

Tabel 22 - Delresultater for ydervægskonstruktionen med cellulose, og en U-værdi på 0,15 W/m²K, i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord. Vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor øverste linje med angivelse af Z-værdi refererer til det indvendige tæthedsplan.

Delresultater for konstruktions ID: CL_3_N						
Z-værdi						
Analysemetode	50	10	8	7	6	5
RHT-indeks	7.349	12.362	13.373	13.997	14.752	15.663
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	0	3
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	0	5	6	7	7	12

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	0	1	3	3	5	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	0	6	6	7	7	9
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	1	1
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	1	7	11	14	26	26
Højeste relativ fugtighed	87,4%	91,2%	91,9%	92,2%	92,7%	93,1%

5.7. Z-værdi varianter med vindspærre

De tidligere analyser af konstruktioner med forskellige isoleringsmaterialer, er lavet med udgangspunkt i en vindspærre med en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg, hvor nedenstående analyser er lavet med Z-værdier på 2-5 GPa s m²/kg for vindspærren. Disse analyser viser udviklingen i Z-værdiforholdet, når Z-værdien for vindspærren hæves. Der medtages 2-3 beregninger for hver konstruktion, med en given Z-værdi for vindspærren, hvor øvrige resultater kan aflæses i Bilag 6.

Som det fremgår af Tabel 23, er det delresultater for mineraluld med Z-værdierne 2 og 3 GPa s m²/kg for vindspærren, hvor grænsen for det indvendige tæthedsplan er analyseret med samme metode som øvrige beregninger.

Resultaterne viser, at grænsen for Z-værdiforholdet med en vindspærre på 2 GPa s m²/kg, er 1:5,5, hvor det med en vindspærre på 3 GPa s m²/kg, er beregnet til 1:4. Ved at ændre vindspærren fra 1 GPa s m²/kg, til 2 eller 3 GPa s m²/kg, ændres Z-værdiforholdet betragteligt fra 1:10 med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg, til Z-værdiforholdet 1:4 med en vindspærre på 3 GPa s m²/kg.

Tabel 23 - Delresultater for mineraluld med Z-værdier på 2 og 3 GPa s m²/kg for vindspærren. Z-værdiforholdet skal aflæses som følgende – Z-værdi vindpærre:Z-værdi tæthedsplan. U-værdien er 0,15 W/m²K, samt det er fugtbelastningsklasse 3.

Delresultater for konstruktions ID: MI_3_N_VS2 og MI_3_N_VS3					
Z-værdiforhold					
Analysemetode	2:11	2:12	3:12	3:13	3:15
RHT-indeks	13.271	12.674	13.989	13.400	12.404

Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	2	0	2	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	8	6	8	6	5
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	1	0	1	0	0
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	6	3	6	4	2
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	14	14	15	14	11
Højeste relativ fugtighed	94,7%	94,3%	94,9%	94,6%	94,1%

Delresultater for mineraluld med Z-værdierne på 4 og 5 GPa s m²/kg for vindspærren, fremgår af Tabel 24. Her viser resultaterne, at når Z-værdien på vindspærren hæves med 1 GPa s m²/kg, hæves grænsen for det indvendige tæthedsplan ligeledes med 1 GPa s m²/kg.

Z-værdiforholdet for vindspærren med en Z-værdi på 4 er beregnet til 1:3,5, hvor Z-værdiforholdet er beregnet til 1:3 for vindspærren med en Z-værdi på 5.

Tabel 24 - Delresultater for mineraluld med Z-værdier på 4 og 5 GPa s m²/kg for vindspærren. Z-værdiforholdet skal aflæses som følgende – Z-værdi vindpærre:Z-værdi tæthedsplan. U-værdien er 0,15 W/m²K, samt det er fugtbelastningsklasse 3.

Delresultater for konstruktions ID: MI_3_N_VS4 og MI_3_N_VS5					
Z-værdiforhold					
Analysemetode	4:13	4:14	4:15	5:14	5:15
RHT-indeks	14.353	13.797	13.295	14.525	13.992
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	2	0	0	2	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	8	6	6	8	6

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	1	0	0	0	0
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	6	4	3	6	4
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	15	14	14	15	14
Højeste relativ fugtighed	94,9%	94,7%	94,5%	94,9%	94,7%

Som det fremgår af delresultaterne med Z-værdivarianter for mineraluld, ændres Z-værdiforholdet fra 1:10 med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg, til 1:3 med en vindspærre på 5 GPa s m²/kg.

Delresultaterne for træfiber, med varierende Z-værdiforhold, er oplistet i Tabel 25 for vindspærre med Z-værdierne 2 og 3 GPa s m²/kg.

Som det fremgår af beregningerne, er grænsen for Z-værdiforholdet med en vindspærre på 2 GPa s m²/kg, beregnet til 1:4,5, hvor det for vindspærren med en Z-værdi på 3 GPa s m²/kg, er 1:4.

Tabel 25 - Delresultater for træfiber med Z-værdier på 2 og 3 GPa s m²/kg for vindspærren. Z-værdiforholdet skal aflæses som følgende – Z-værdi vindpærre:Z-værdi tæthedspan. U-værdien er 0,15 W/m²K, samt det er fugtbelastningsklasse 3.

Delresultater for konstruktions ID: TF_3_N_VS2 og TF_3_N_VS3						
Z-værdiforhold						
Analysemetode	2:8	2:9	2:10	3:11	3:12	3:18
RHT-indeks	12.813	12.223	11.699	12.415	11.942	9.792
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	7	7	6	7	6	3
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0

Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	3	3	3	3	3	0
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	7	7	6	7	6	4
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	1	0	0	1	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	17	14	11	17	11	7
Højeste relativ fugtighed	91,1%	90,8%	90,5%	90,9%	90,6%	89,3%

Delresultaterne for træfiber med varierende Z-værdiforhold for vindspærre med Z-værdierne 4 og 5 GPa s m²/kg, er oplistet i Tabel 26.

Som det fremgår af beregningerne, er grænsen for Z-værdiforholdet med en vindspærre på 4 GPa s m²/kg beregnet til 1:3,25, hvor det er 1:3 for vindspærren med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg.

Tabel 26 - Delresultater for træfiber med Z-værdier på 4 og 5 GPa s m²/kg for vindspærren. Z-værdiforholdet skal aflæses som følgende – Z-værdi vindpærre:Z-værdi tæthedsplan. U-værdien er 0,15 W/m²K, samt det er fugtbelastningsklasse 3.

Delresultater for konstruktions ID: TF_3_N_VS4 og TF_3_N_VS5						
Z-værdiforhold						
Analysemetode	4:12	4:13	4:14	5:13	5:14	5:15
RHT-indeks	12.807	12.354	11.940	13.025	12.592	12.188
Skimmel risiko – SBI formel, antal gange over 8-dage i træk	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – SBI formel, max antal dage i træk	7	6	6	7	7	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 4-dagsgrænsen	3	3	3	3	3	3

Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen overskrides	0	0	0	0	0	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 8-dagsgrænsen	7	7	6	7	7	6
Skimmel risiko – antal gange hvor Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen overskrides	1	0	0	1	1	0
Skimmel risiko – max antal dage i træk med Isopleth kurve for 16-dagsgrænsen	17	14	11	17	17	14
Højeste relativ fugtighed	91,0%	90,8%	90,5%	91,1%	90,9%	90,6%

6. Resultater

Under resultater er de konstruktioner, der beregningsmæssigt er kategoriseret som fugtteknisk robuste konstruktioner, uden risiko for skimmelvækst, med de opstillede parametre.

Alle resultater for konstruktionerne med en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg for vindspærren er oplistet i Tabel 27 til Tabel 30, hvor resultaterne/grænseværdierne for Z-værdiforhold, RHT-indeks, samt højeste relative fugtighed er anført. Der er foretaget beregninger for alle isoleringsmaterialer med en U-værdi på 0,15 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod, hvor varianter med anden U-værdi og fugtbelastningsklasse, blot er foretaget med isoleringsmaterialerne mineraluld, halm og træfiber.

Resultaterne for konstruktioner med varierende Z-værdier for vindspærren fremgår af Tabel 31 og Tabel 32, med Z-værdier på 2-5 GPa s m²/kg for vindspærren, hvilket er beregnet for isoleringsmaterialerne mineraluld og træfiber.

Dertil er resultaterne for RHT-indeks ligeledes oplistet, hvor udviklingen i RHT-indeks analyseres ved ændring af de forskellige parametre.

6.1. Resultater med Z-værdi på 1 GPa s m²/kg for vindspærren

Resultaterne i Tabel 27 er udgangspunktet/sammenligningsgrundlaget for de øvrige konstruktioner, hvor beregningerne er foretaget for alle isoleringsmaterialerne.

Resultaterne spænder fra et Z-værdiforhold på 1:6 for træfiber, til et Z-værdiforhold på 1:13 for hamp, hvor de øvrige isoleringsmaterialer ligger inden for dette spænd. Mineraluld, som sammenholdes med de biogene isoleringsmaterialer, har et Z-værdiforhold på 1:10, hvor tre af isoleringsmaterialerne har et højere Z-værdiforhold, og tre har et lavere.

Tabel 27 - Samlet resultatoversigt for alle biogene isoleringsmaterialer samt mineraluld med Z-værdi, RHT-grænse samt højeste relative fugtighed. Resultatet er set ud fra 3. simuleringsår.

Konstruktioner med følgende opsætning: U-værdi 0,15 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 3 --- Orientering mod Nord			
Isoleringsmateriale \ Grænseværdier	Z-værdi forhold	RHT-indeks	Højeste relativ fugtighed
Mineraluld	1 : 10	11.875	93,9%
Hamp	1:13	11.548	93,2%
Hør	1:12	11.910	93,6%
Halm	1 : 7	12.518	91,8%
Græs	1:11	12.441	94,1%
Træfiber	1:6	12.101	90,8%
Cellulose	1:7	13.997	92,2%

Ved at ændre fugtbelastningsklassen fra 3 til 2 sænkes Z-værdiforholdet for alle isoleringsmaterialerne. Z-værdien for det indvendige tæthedsplan sænkes med 4 GPa s m²/kg ved alle beregningerne, hvorimod RHT-indekset og den højeste relative fugtighed stort set er uændret.

Tabel 28 - Samlet resultatoversigt for halm og træfiber med Z-værdi, RHT-grænse samt højeste RF%. Resultatet er set ud fra 3. simuleringsår, og er en totalværdi herfor.

Konstruktioner med følgende opsætning: U-værdi 0,15 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 2 --- Orientering mod Nord			
Isoleringsmateriale \ Grænseværdier	Z-værdi forhold	RHT-indeks	Højeste relativ fugtighed
Mineraluld	1:6	11.464	93,5
Halm	1:3	12.750	92,0%
Træfiber	1:2	11.982	90,8%

Når U-værdien sænkes til 0,10 W/m²K, og fugtbelastningsklassen er 3, hæves Z-værdiforholdet for alle isoleringsmaterialer. RHT-indeks og relativ fugtighed sænkes ligeledes for halm og træfiber, hvor RHT-indeks for mineraluld stort set er uændret, og den højeste relative fugtighed stiger en anelse.

Z-værdien for det indvendige tæthedsplan, hæves med 2 GPa s m²/kg for alle isoleringsmaterialer, i forhold til resultaterne i Tabel 27.

Tabel 29 - Samlet resultatoversigt for halm og træfiber med Z-værdi, RHT-grænse samt højeste RF%. Resultatet er set ud fra 3. simuleringsår, og er en totalværdi herfor.

Konstruktioner med følgende opsætning: U-værdi 0,10 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 3 --- Orientering mod Nord			
Isoleringsmateriale \ Grænseværdier	Z-værdi forhold	RHT-indeks	Højeste relativ fugtighed
Mineraluld	1:12	11.728	94,3%
Halm	1:9	11.117	91,2%
Træfiber	1:8	9.980	88,9%

Resultater for konstruktioner med ændret U-værdi til 0,10 W/m²K, samt til fugtbelastningsklasse 2, sænkes Z-værdien med 3 GPa s m²/kg, hvilket er gældende for alle isoleringsmaterialerne.

Ved sammenligning af Tabel 27 og Tabel 30 ses de største ændringer i RHT-indekset og den relative fugtighed ved træfiber. Resultaterne for halm er faldende, men ikke i samme omfang som træfiber. RHT-indeks og relativ fugtighed for mineraluld, og stort set uændret.

Tabel 30 - Samlet resultatoversigt for halm og træfiber med Z-værdi, RHT-grænse samt højeste RF%. Resultatet er set ud fra 3. simuleringsår, og er en totalværdi herfor.

Konstruktioner med følgende opsætning: U-værdi 0,10 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 2 --- Orientering mod Nord			
Isoleringsmateriale \ Grænseværdier	Z-værdi forhold	RHT-indeks	Højeste relativ fugtighed
Mineraluld	1:7	11.525	94,1%
Halm	1:4	11.166	91,3%
Træfiber	1:3	9.727	88,8%

6.2. Resultater med Z-værdi på 2-5 GPa s m²/kg for vindspærren

Resultaterne med varierende Z-værdier for vindspærren er oplistet i de efterfølgende tabeller, hvor den første tabel er for mineraluld, og derefter for træfiber.

Z-værdivarianter for konstruktioner med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg er udgangspunktet for de øvrige standardkonstruktioner, hvorfor disse ikke er medtaget under resultaterne for Z-værdivarianter.

Resultaterne for mineraluld med varierende Z-værdiforhold viser, at Z-værdiforholdet sænkes betragteligt, når vindspærres Z-værdi ændres fra 1 til 5 GPa s m²/kg. Med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg er Z-værdiforholdet 1:10, hvor dette ændres til 1:3, når vindspærren har en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg.

Tabel 31 - Samlet resultatoversigt for mineraluld med Z-værdivarianter for vindspærren fra 2-5 GPa s m²/kg. Konstruktionerne har en U-værdi på 0,15 W/m²K, og placeret i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord.

Z-værdivarianter for mineraluld med følgende opsætning: U-værdi 0,15 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 3 --- Orientering mod Nord				
Analysemetode \ Z-værdiforhold	2:12	3:13	4:14	5:15
RHT-indeks	12.674	13.400	13.797	13.992
Højeste relativ fugtighed	94,3%	94,6%	94,7%	94,7%

Resultater for varierende Z-værdiforhold med træfiber, viser at Z-værdiforholdet halveres fra 1:6 med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg, hvor dette ændres til Z-værdiforholdet 1:3, når vindspærren ændres til en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg.

Tabel 32 - Samlet resultatoversigt for træfiber med Z-værdivarianter for vindspærren fra 2-5 GPa s m²/kg. Konstruktionerne har en U-værdi på 0,15 W/m²K, og placeret i fugtbelastningsklasse 3, samt orientering mod nord.

Z-værdivarianter for træfiber med følgende opsætning: U-værdi 0,15 W/m²K --- Fugtbelastningsklasse 3 --- Orientering mod Nord				
Z-værdiforhold	2:9	3:12	4:13	5:15

Analysemetode				
RHT-indeks	12.223	11.942	12.354	12.188
Højeste relativ fugtighed	90,8%	90,6%	90,8%	90,6%

Resultaterne for varierende Z-værdiforhold viser, at både mineraluld og træfiber har et Z-værdiforhold på 1:3, med en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg for vindspærren, selvom udgangspunktet med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg er forskelligt.

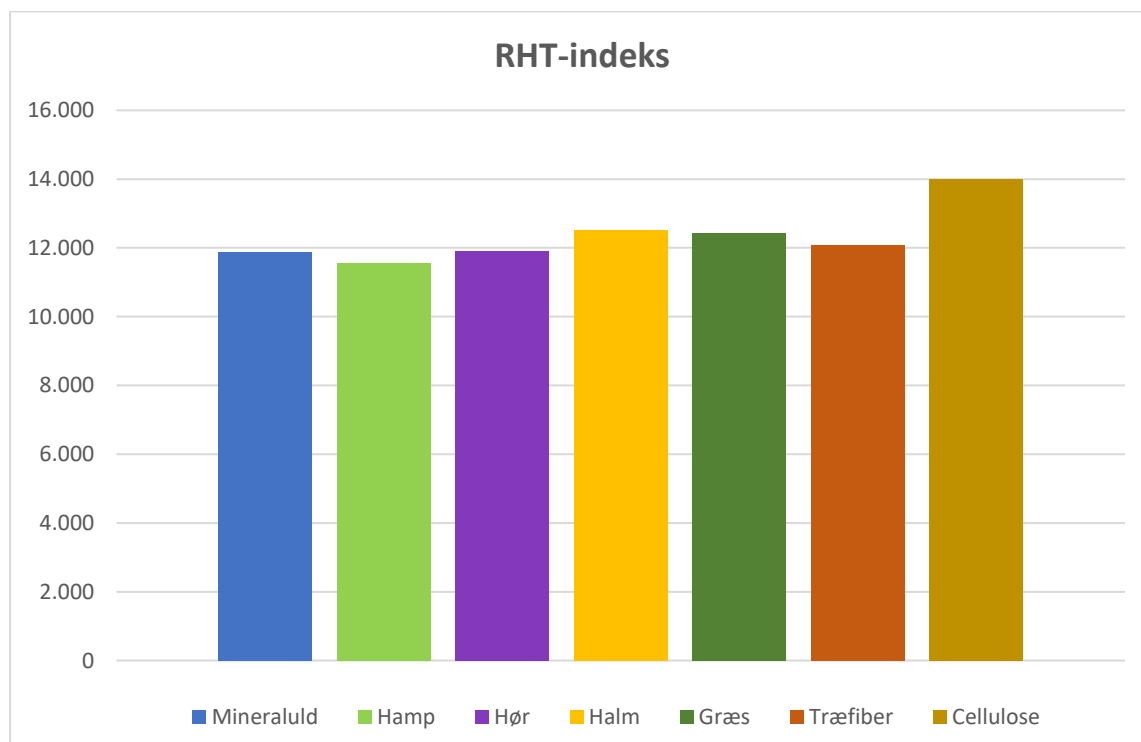
6.3. Resultater for RHT-indeks

U-værdi: 0,15 W/m²K	Fugtklasse: 3	Orientering: Nord
---------------------------------------	----------------------	--------------------------

Vi kan ud fra beregninger og resultatoversigt i Tabel 27, se resultatet på RHT-grænser for konstruktioner, der er beregnet med de forskellige biogene isoleringsmaterialer samt standardkonstruktionen med mineraluld.

Som det ses i Tabel 27 varierer grænseværdier for de biogene isoleringsmaterialers RHT-indeks i forhold til hinanden, fra hamp med et RHT-indeks på 11.548 til cellulose med et RHT-indeks på 13.997. Standard konstruktionen med mineraluld har et RHT-indeks på 11.875. Det kan således ikke siges, at grænsen for alle materialer er som for standardkonstruktionen med mineraluld med et RHT-indeks på 11.875. Tabel 27 fortæller derimod, at denne grænse er forskellig, alt efter hvilket materiale der er tale om.

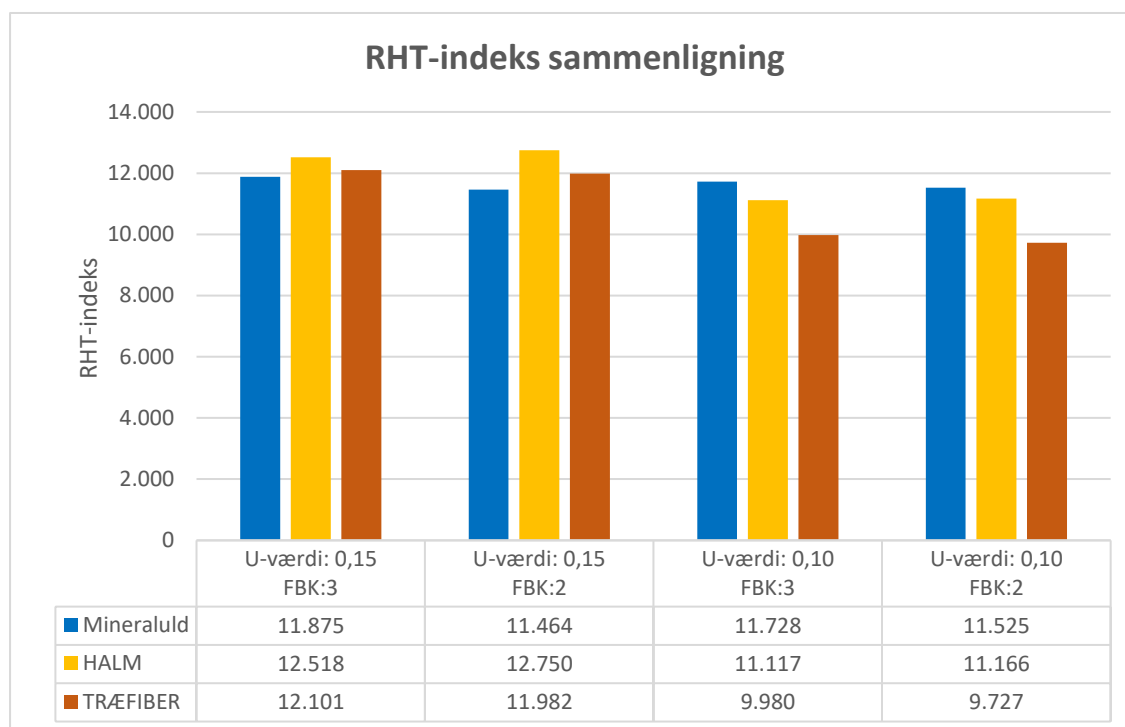
Det vurderes at hvert materiale har sin grænseværdi for RHT-indekset, hvilket ses i Tabel 27. Resultatet er for konstruktionen med en U-værdi på 0,15 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3. På Figur 30 ses det, at RHT-indeks ligger meget jævnt for mange af de biogene isoleringsmaterialer inkl. mineraluld, det eneste materiale der har et væsentligt højere indeks, er cellulose.



Figur 30 - RHT-indeks sammenlignet ud fra Tabel 27 for valgte konstruktioner, alle under grænserne for skimmelvækst.

RHT-indeks ved ændringer i parameter

Mineraluld i referencekonstruktionen samt halm og træfiber er analyseret, som nævnt tidligere, med anden U-værdi samt ændret fugtbelastningsklasse. Resultatet for RHT-indekset ses i Figur 31, her ses der en stigning i RHT-indekset for halm, når der ændres i fugtbelastningsklassen fra 3 til 2. Hvorimod at der ved træfiber og mineraluld ses et lille fald i RHT-indekset. Vi vurderer, at dette er tilfældigt, og at tallene bør være identiske ved ændring af fugtbelastningsklassen. For halm og træfiber viser RHT-indekset et fald, ved ændring af U-værdi fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K. Ved mineraluld ses derimod både fald og stigning. Et lille fald ved ændring fra U-værdi 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3, og en lille stigning ved samme ændring i U-værdi i fugtbelastningsklasse 2.



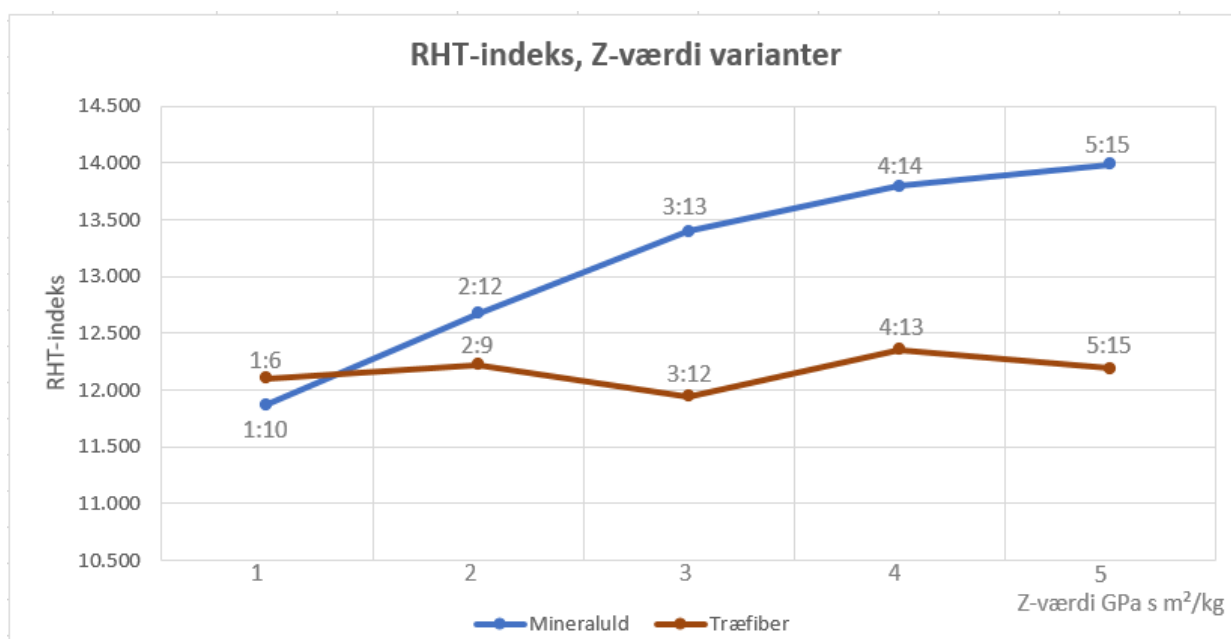
Figur 31 – Resultat/sammenligning for mineraluld, halm og træfiber med RHT-indeks, ved ændring af U-værdi og fugtbelastningsklasse. FBK=Fugtbelastningsklasse. U-værdi 0,15 og 0,10 angivet i W/m²K.

Vi vurderer, at RHT-indekset ved ændring af fugtbelastningsklassen ikke bør variere betydeligt fra hinanden. Beregninger af Z-værdier med én decimaler, kan give et mere præcis RHT-indeks, og at resultaterne således vil ligge tættere på hinanden.

Ved ændring af U-værdien fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K vurderer vi, at faldet ved de biogene isoleringsmaterialer skyldes deres hygroskopiske egenskaber. Ved mineraluld vurderer vi, at der ikke bør ske en ændring i RHT-indekset ved ændring af U-værdi fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K.

RHT ved ændret Z-værdier i vindspærreplanet

Ved simuleringer med ændret Z-værdi i vindspærreplanet er der blevet simuleret med Z-værdierne 2, 3, 4 og 5 GPa s m²/kg, ud over 1 GPa s m²/kg som standard. Disse simuleringer er foretaget med materialerne mineraluld og træfiber. Figur 32 viser kurver for RHT-indekset ud fra variationer med Z-værdierne 1-5 GPa s m²/kg i vindspærreplanet, samt laveste Z-værdi i tæthedsplanet, med konstruktioner uden risiko for skimmelvækst. Det ses i Figur 32, at RHT-indekset for træfiber ligger i en jævn linje, hvorimod der ved mineraluld ses en stigning i RHT-indekset i takt med øget Z-værdi i vindspærreplanet.



Figur 32 - RHT-indeks (total for sidste simuleringsår) for mineraluld og træfiber med varierende Z-værdi for vindspærreplanet med tilhørende Z-værdi for tæthedsplanet, uden risiko for skimmelvækst. Beregninger er udført i fugtbelastningsklasse 3 og med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Vi antager, at der ligeledes ved øvrige biogene isoleringsmaterialer vil være et jævnt RHT-indeks, som vist i Figur 32, og at dette udslag gør sig gældende i materialet grundet deres hygroskopiske egenskaber (se kapitel 4.5 under afsnit vedr. Z-værdi varianter). Det vil være nødvendigt med flere simuleringer af biogene isoleringsmaterialer, for at få dette endeligt verificeret.

7. Diskussion

I denne diskussion vurderes følgende; formler anvendt for beregning af risiko for skimmelvækst, resultaterne for det beregnede nødvendige tæthedsplan, samt Z-værdiforhold i forhold til fugtbelastningsklasser og U-værdier. Vurdering af data for biogene isoleringsmaterialer samt brugen af RHT-indekset.

Der er i denne rapport anvendt flere kriterier for vurdering af risiko for skimmelvækst. Det vurderes, at dette antal af kriterier ikke bør reduceres fra de 4 beregningsformler, der er anvendt i denne rapport. Der er med analyserne konstateret, at alt efter materialetype, U-værdi og fugtbelastningsklasse vil udfaldet variere for hvilken formel der giver risiko for skimmelvækst.

Det anses nødvendigt, at kriteriet for sunde konstruktioner er, at alle formler skal ligge inden for de definerede grænseværdier i forhold til risiko for skimmelvækst, før konstruktionen vurderes fugtteknisk robust.

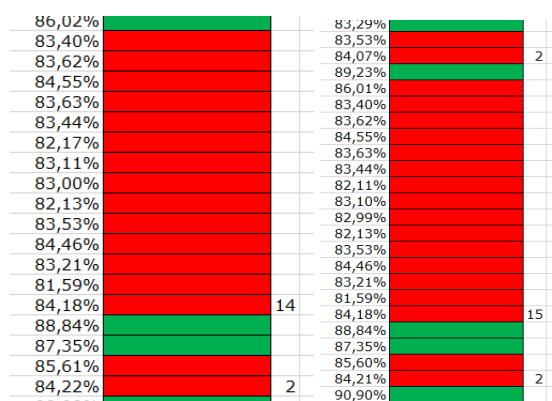
Med beregningerne der er udarbejdet, er det muligt i Bilag 1 at se andre resultater med grænseværdier for skimmelvækst. Dette valg kan være op til hver enkelte at vurdere i forhold til metodevalg for beregning af skimmelgrænse.

Nødvendig indvendigt tæthedsplan

Grænsen for tæthedsplanet godkendes med Z-værdi, der er vurderet ud fra de 4 formler anvendt i denne rapport. Alle formler vurderer risiko for skimmelvækst i konstruktionen, og antal af sammenhængende overskredede dage afgør om det aktuelle Z-værdiforhold, giver en robust sund konstruktion.

Figur 33 viser eksempler hvor sammenhængende dage(rød) ikke overskrider grænsen. Dog ses få dage omkring perioden uden risiko for skimmelvækst (grøn). Når der er én dag uden risiko for skimmelvækst, der afbryder de sammenhængende dage, giver dette ikke udslag for skimmelvækst. Dette gør sig gældende for alle formler.

Her bør beregninger vurderes i forhold til en længere periode, hvor der vedtages antal dage uden risiko for skimmelvækst, der minimum må være i perioden.



Figur 33 - Udklip fra beregninger der med rød og grøn farve indikerer hvorvidt der er risiko for skimmelvækst eller ej. Hver celle udgør én dag, tallene ud for afsluttende røde felter (14, 2, 2, 15 og 2) udgør antallet af sammenhængende dage, med risiko for skimmel. Ovenstående figur er bagvedliggende beregninger fra oversigt Bilag 2 – Databehandling af konstruktioner i FBK 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

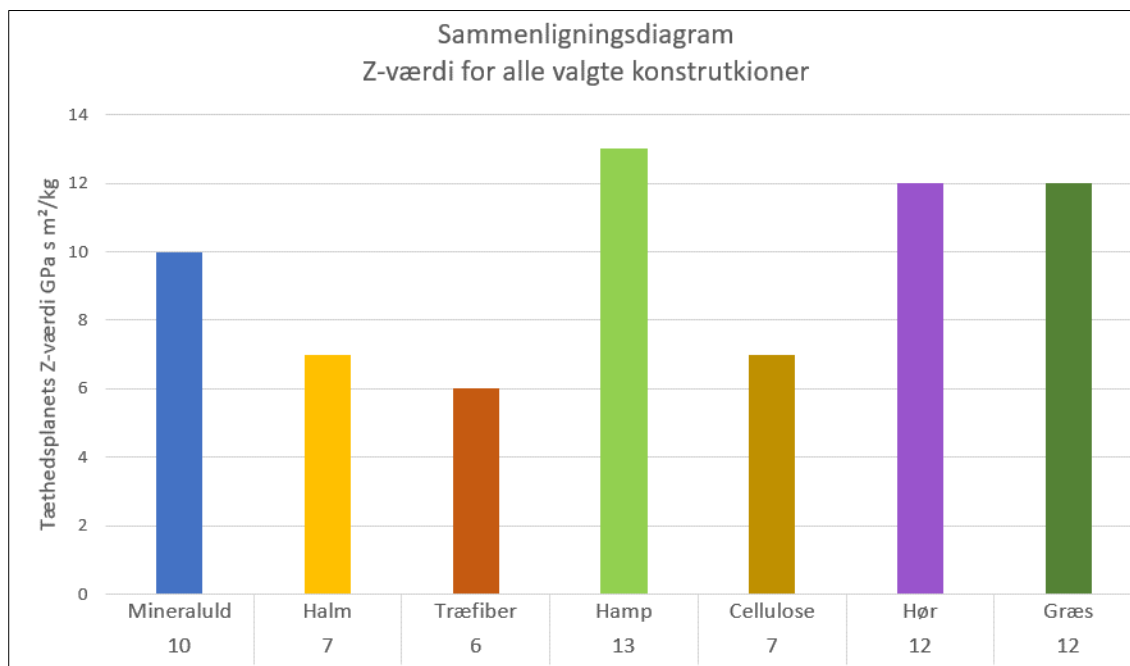
Tæthedsplan kontra referencekonstruktion

For at kunne sammenligne de forskellige konstruktioner med en referencekonstruktion, er udgangspunktet en let ydervægskonstruktion med mineraluld. Denne konstruktion er reference i forhold til Z-værdiforholdet. Vores beregnede konstruktion, viser et Z-værdiforhold på 1:10 med en U-værdi på 0,15 W/m²K, når vindspærren er 1 GPa s m²/kg.

I litteraturen er der forskellige vurderinger og konklusioner på, hvilket Z-værdiforhold man kan tage udgangspunkt i som grundregel. I SBI-anvisning 278 Fugt i bygninger, (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI-anvisning 278, 2023), beskrives et Z-værdiforhold på 1:10 el. højere, ved anvendelse af dampspærre med en Z-værdi på mindst 50 GPa s m²/kg. Dette vurderes at være på den sikre side, hvor vores beregninger viser, at med en vindspærre på 5 GPa s m²/kg vil det være tilstrækkeligt med en Z-værdi på 15 GPa s m²/kg for det indvendige tæthedsplan. Denne vurdering er ud fra beregningerne for mineraluld og træfiber, med højere Z-værdier i vindspærren. Dette er grænseværdien, hvor der ikke er taget hensyn til en sikkerhedsmargen i forhold til år med ekstreme vejrlig og lignende.

Tidligere er der lavet studier og artikler om Z-værdier, hvor det bl.a. konkluderes at forholdet kan reduceres til 1:5 i fugtbelastningsklasse 1-3, med anvendelse af mineraluld som isoleringsmateriale (Morelli, Rasmussen, & Therkelsen, Exterior Wood-Frame Walls—Wind–Vapour Barrier Ratio in Denmark, 2021).

Ifølge vores analyser i fugtbelastningsklasse 3, skal man være påpasselig med et lavt Z-værdiforhold. Hovedparten af vores analyser er udført med en vindspærre, der har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg. Analyserne med U-værdi 0,15 W/m²K i fugtbelastningsklasse 3 viser at Z-værdiforholdet, med biogene isoleringsmaterialer, både er højere og lavere end referencekonstruktionen. De biogene isoleringsmaterialer i Figur 34 har Z-værdiforhold fra 1:6, som er træfiber, til 1:13 som er for isoleringsmaterialet hamp. Disse resultater viser en større difference i Z-værdien for det indvendige tæthedsplan, når vindspærren har en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg.



Figur 34 - Sammenligning af alle beregnet konstruktioner med laveste Z-værdi for tæthedsplanet, hvor konstruktionerne er fugtteknisk robust, uden risiko for skimmelvækst ud fra formler med skimmelgrænser anvendt i denne rapport. Gældende for alle konstruktioner er, at vindspærreplanets Z-værdi er 1 GPa s m²/kg, konstruktionernes U-værdi er 0,15 W/m²K samt beregnet ved fugtbelastningsklasse 3.

Isoleringsmaterialerne halm og træfiber er yderligere analyseret i fugtbelastningsklasse 2, samt med en U-værdi på 0,10 W/m²K. Tendensen er som forventet at Z-værdiforholdet øges, når U-værdien sænkes fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K. Samtidig falder Z-værdiforholdet, når fugtbelastningsklassen sænkes fra 3 til 2, som vist på Figur 37.

Hvis man øger Z-værdien på vindspærren, er tendensen at Z-værdiforholdet sænkes. Dette gælder for mineraluld og træfiber, der i denne sammenhæng er de analyserede isoleringsmaterialer. Analyserne er udført med Z-værdier på 1-5 GPa s m²/kg, hvor begge isoleringsmaterialer ender med et Z-værdiforhold på 1:3, når vindspærren har en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg, som vist på Figur 32.

Vurderingen er, at i takt med at Z-værdien for vindspærren samt tæthedsplanet hæves, påvirkes isoleringen i ydervægskonstruktionen mindre af ude- og indeklimaet, og dermed absorbere isoleringen mindre fugt. Fugtpåvirkningen i isoleringslaget, bliver dermed mindre når Z-værdien for tæthedsplanet og vindspærreplanets hæves.

Biogene isoleringsmaterialers egenskaber

De anvendte biogene materialer til fugtsimuleringer, er materialer fra WUFI's materialebibliotek. Disse er tilrettet med de kendte data, der har været tilgængelige. Når disse data ændres i begrænset omfang, kan det ses i, at resultaterne ikke varierer meget. Som eksempel har hamp og hør bl.a. samme "grundmateriale" fra WUFI, hvor disse resultater ligeledes ligger tæt op ad hinanden. For netop de materialer har det ikke været muligt at få oplyst sorptionskurver, hvilket er meget afgørende i forbindelse med fugtsimuleringerne.

Resultaterne for hamp og hør, som kan aflæses i kapitel 5 og 6 samt i Bilag 1, ligger meget tæt. For netop disse materialer er der ikke nævneværdige ændringer, og dette kan være grunden til, at resultaterne er meget ens. På baggrund af ovennævnte er det derfor meget vigtigt, forud for opførelse af et konkret byggeri, at få oplyst tilstrækkelige data på de materialer som ønskes anvendt i fugtsimuleringer.

Nogle parametre, såsom densitet og vanddampdiffusionsmodstand, ser ud til være afgørende parametre. Som eksempel har halm den højeste densitet af de undersøgte materialer, og træfiber har den højeste vanddampdiffusionsmodstand. Begge materialer har nogle af de laveste Z-værdiforhold, i forhold til de undersøgte isoleringsmaterialer.

Nogle isoleringsmaterialer giver oftere udslag på bestemte beregninger/analysemetoder. Blandt andet giver mineraluld, hamp og hør som de første, udslag på beregningen med formel fra SBI Fugt-anvisningerne (Brandt, Bunch-Nielsen, Hansen, Morelli, & Nielsen, SBI 277, 2023). Forskellen kan være Z-værdier op til 5 GPa s m²/kg, før beregningerne med LIM-modellen giver udslag. Det er bl.a. begrundelsen for, at der i denne rapport er medtaget flere beregningsmodeller og formler, for at få synliggjort de udsving resultaterne kan give.

Tendensen for træfiber, er at isopleth-modellen for 16-dags grænseværdien, giver udslag med U-værdi på 0,10 W/m²K. Som vist i blå markering på Figur 35, vises en større difference i Z-værdien til næste formel med udslag.

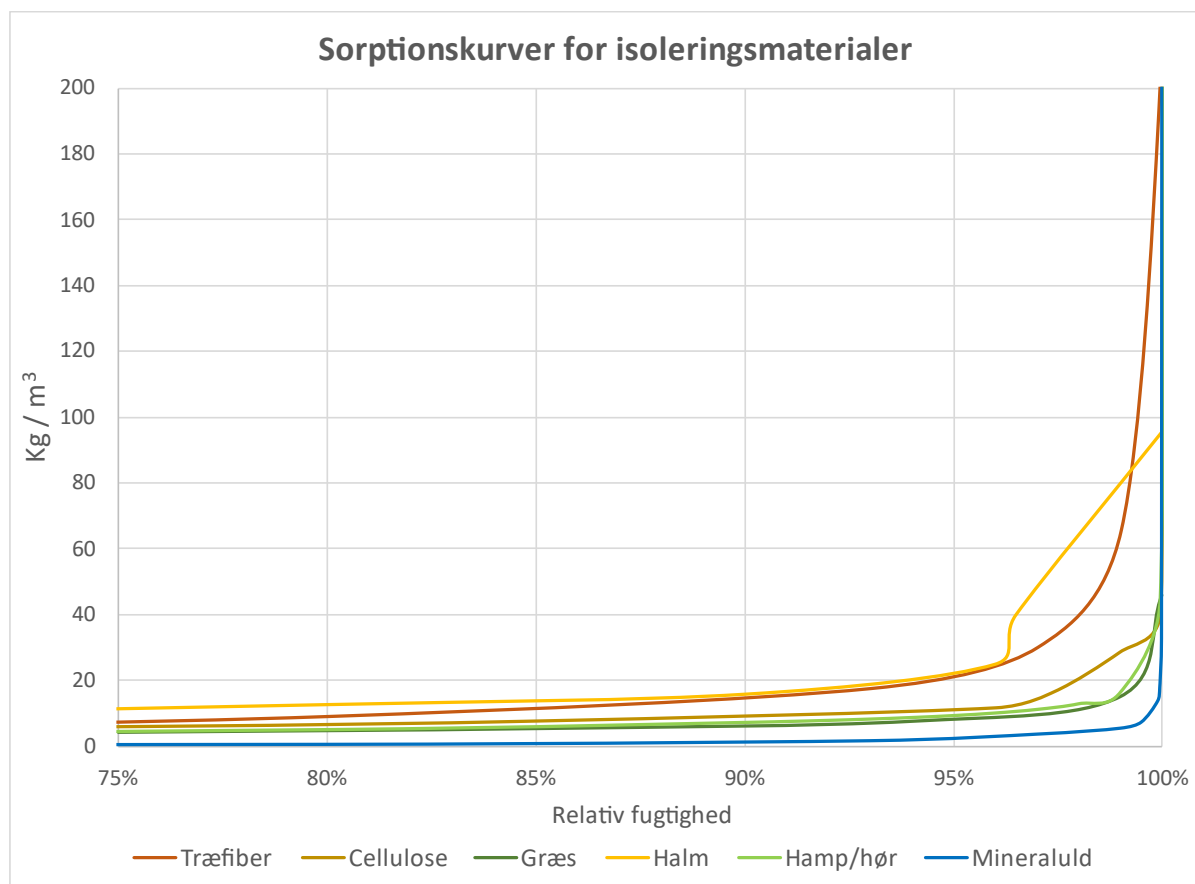
ID		Skimmelgrænse SBI formel og 8-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 4-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 8-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 16-dags betragtning
U-værdi 0,15					
TF_2/3_N	TF_3_50_N				
	TF_3_10_N				
	TF_3_7_N				
	TF_3_6_N				
	TF_3_5_N				
	TF_2_5_N				
	TF_2_3_N				
	TF_2_2_N				
	TF_2_1_N				
	TF_2_0_N				
U-værdi 0,1					
TF_2/3_N_U1	TF_3_10_N_U1				
	TF_3_8_N_U1				
	TF_3_7_N_U1				
	TF_3_6_N_U1				
	TF_3_5_N_U1				
	TF_3_4_N_U1				
	TF_3_3_N_U1				
	TF_3_2_N_U1				
	TF_2_4_N_U1				
	TF_2_3_N_U1				
	TF_2_2_N_U1				
	TF_2_1_N_U1				
	TF_2_0_N_U1				

Figur 35 - Udklip fra bilag 1, med resultater af beregning af skimmelrisiko, med formel fra SBI Fugt-anvisninger, samt LIM-modellen

Træfiber kan optage og afgive fugt, og træfiber har en højere vanddampdiffusionsmodstand end de øvrige undersøgte materialer, hvilket kan have indflydelse på hvilke beregningsmetoder som giver udslag. Vores vurdering er bl.a. at træfiber har sværere ved at optage og afgive fugt pga. vanddampdiffusionsmodstanden, hvilket betyder at træfiberisoleringen har gode egenskaber i forhold til, at holde en jævn relativ fugtighed, men ligeledes har længere perioder med en relativ fugtighed som ligger tættere på den nedre grænseværdi for skimmel, og dermed giver udslag på 16-dags grænsen, når U-værdien er 0,10 W/m²K. Grunden til denne betragtning er, at konstruktionen med en U-værdi på 0,10 W/m²K, har en større mængde isolering, og kan dermed indeholde en større mængde fugt pr. m², end konstruktionen med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Halm og træfiber er de to analyserede materialer med størst fugtkapacitet, og dermed de materialer som bedst kan udjævne store udsving og holde en mere stabil relativ fugtighed. Halm har ikke så høj vanddampdiffusionsmodstandsfaktor som træfiber, hvor halm kan optage og afgive fugt hurtigere. Ydervægskonstruktionen med halm, kan indeholde mere fugt end med træfiber, da halm har en lidt dårligere varmeledningsevne, og dermed indeholder en større mængde materiale pr. m² ydervæg end træfiber.

Sorptionskurver for de materialer som er analyseret, er vist i nedenstående Figur 36.



Figur 36 - Sorptionskurver for biogene isoleringsmaterialer, som er analyseret i rapporten, hvor dataene kommer fra WUFI's materiale bibliotek, på nær græs som er tilpasset i forhold til specifik sorptionskurve for græsisolering. Hamp er ikke medtaget, da hamp og hør har samme egenskaber. Sorptionskurver er kun vist fra 75% relativ fugtighed, og op til 200 kg/m³ vandindhold i materialet.

Sorptionskurver er en vigtig information om materialerne i forbindelse med fugtsimuleringer, hvilket også kan læses i tidligere specialer omkring isoleringsmaterialer i lette ydervægge (Leszmann, 2022).

De analyserede isoleringsmaterialer, er ikke lige tilgængelige i Danmark, enten ved at isoleringsmaterialerne skal importeres, eller at byggemetoderne ikke er særlig anerkendt, på nuværende tidspunkt.

Nogle af de isoleringsmaterialer som vurderes at have et stort potentiale, er træfiber og halm, hvor disse materialer er tilgængelige i Danmark, samt der forestår en vis mængde som er tilgængelig (Rasmussen, et al., 2022). Begge materialer kan indsamles som restprodukter, og anvendes til produktion af isoleringsmaterialer.

Resistens for skimmelvækst

Nogle biogene isoleringsmaterialer, har ifølge dele af litteraturen, egenskaber som gør dem mere resistente over for vækst af skimmel, hvor grænsen er højere end de normale 75% relativ fugtighed som sættes for biogene isoleringsmaterialer (Sedlbauer, Hofbauer, Krueger, Mayer, & Breuer, 2011).

Analyserne i (Sedlbauer, Hofbauer, Krueger, Mayer, & Breuer, 2011), giver enkelte materialer nogle såkaldte "materialespecifikke isopleth-systemer", hvor disse kan anvendes til vurdering af

materialers resistens over for vækst af skimmel, ud fra relativ fugtighed og temperatur. Ved udvikling af disse isopleth systemer, vil det være muligt at kunne anvende forskellige formler til analyser for vækst af skimmel, afhængigt af hvilket isoleringsmateriale som anvendes. Dette skal selvfølgelig vurderes i forhold til de øvrige materialer som indgår i ydervægskonstruktionen.

Fugtbelastningsklasser og U-værdier

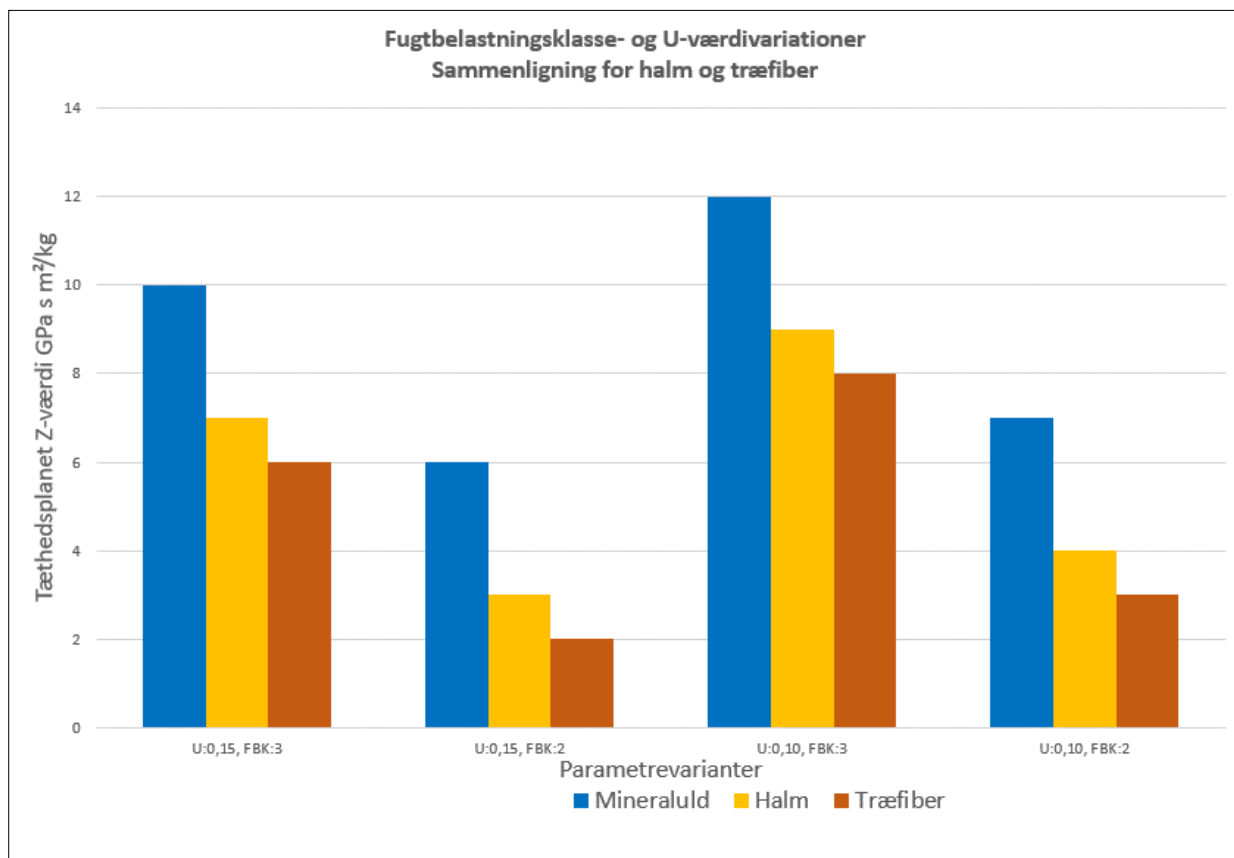
Når U-værdien sænkes til $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, ændre det på konstruktionernes ydeevne, og dermed er der nogle forhold som har indflydelse på resultaterne. Det er bl.a. RHT-indekset, hvor grænsen forskydes/ændres når U-værdien sænkes. Som vist i Figur 31, har træfiber (TF_3_6_N) f.eks. et RHT-indeks på 12.101, hvor konstruktionen (TF_3_8_N_U1) med en U-værdi på $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$, havde et RHT-indeks på 9.980. Hvis man sammenligner resultaterne for halm, er tendensen den samme som for træfiber, hvor RHT-indekset sænkes, når U-værdien sænkes.

Grænsen for RHT-indekset, sættes på baggrund af resultaterne fra beregningerne, med formler fra SBI Fugtanvisningerne, samt LIM-modellerne, hvor tendensen for RHT-indekset er, at det falder, jo lavere U-værdien er. Hvis man ønsker at anvende RHT-indekset som pejlemærke, skal man kende U-værdien og isoleringsmaterialet, da disse informationer har betydningen for RHT-indekset. For at kunne fastsætte RHT-indeks for konstruktioner, bør disse være afprøvet/kendte konstruktioner, og ikke blot analyseret på baggrund af teori, da beregninger og forudsætninger kan afvige fra resultaterne, i forhold til klima, udførelsen mv.

Z-værdiforskydning ved varieret kombinationer for fugtbelastningsklasse og U-værdi

Ved Figur 37 sammenlignes mineraluld, halm og træfiber i forhold til variationer og kombinationer med U-værdier og fugtbelastningsklasser. Variationerne for U-værdi er for U-værdier $0,15 \text{ W/m}^2\text{K}$ og $0,10 \text{ W/m}^2\text{K}$. Og fugtbelastningsklasser variationer er for fugtbelastningsklasserne 2 og 3, se kapitel 2.4.1.

For mineraluld, halm og træfiber ses der i Figur 37, at Z-værdien ved de forskellige variationer, følges med samme afstand i Z-værdien. I denne sammenligning ses der, mellem mineraluld og halm en afstand i Z-værdien på $3 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$, og tilsvarende mellem halm og træfiber på $1 \text{ GPa s m}^2/\text{kg}$, med samme variation i U-værdier og fugtbelastningsklasser. Tendensen ud fra resultaterne, er at man med en beregnet referencekonstruktion med et givent Z-værdiforhold, vil kunne forudsige Z-værdiforholdet ved ændring i U-værdi eller fugtbelastningsklasse.



Figur 37 - Sammenligning af mineraluld, halm og træfiber, for gældende minimal Z-værdi i tæthedetsplanet ved konstruktioner uden risiko for skimmelvækst jf. formler anvendt i denne rapport. U:0,15 står for at konstruktionen er med en U-værdi på 0,15 W/m²K, ses ligeledes med variation med U-værdi på 0,10 W/m²K. FBK:3 står for en konstruktion anvendt ved fugtbelastningsklasse 3, ses ligeledes med variation med fugtbelastningsklasse 2.

RHT-indeksmodellen

Vi mener ikke at RHT-indekset som udgangspunkt kan stå alene, og at man ud fra denne model kan vurdere om en konstruktion er egnet i et aktuelt klima. Ud fra vores beregninger vil RHT-indekset variere, alt efter hvilke parametre ens konstruktion har, det være sig materialesammensætning, U-værdi, Z-værdi for både vindspærre- og tæthedetsplanet mv. Så snart der er udført kvalificeret beregninger med egnet beregningsværktøj, og evt. analyseret ved formel med risiko for skimmelvækst, herefter kan RHT-indekset for den pågældende konstruktion anvendes, men kun ved anvendelse af bygningsdele af præcis sammen konstruktionsopbygning som beregnet/analyseret.

Konstruktion

Ydervægge er med til at definere en bygnings brutto samt netto arealer, hvor brugeren er interesseret i de brugbare netto arealer. Dette kan blive en udfordring, eller et væsentligt kriterie i opførelsen af bygninger hvor der anvendes biogene isoleringsmaterialer, da tykkelsen på ydervæggene kan variere. Referencekonstruktionen med mineraluld, har en primær isoleringstykkelse 205 mm med en U-værdi på 0,15 W/m²K, hvor halm har en primær isoleringstykkelse på 285 mm, hvilket er en stigning på 39% i isoleringslaget.

8. Konklusion

Vores resultater for det indvendige tæthedspan ved de biogene isoleringsmaterialer, viser at laveste nødvendige Z-værdiforhold for en fugtteknisk robust ydervægskonstruktion, både ligger over og under Z-værdiforholdet for vores reference konstruktion.

Det indvendige tæthedspan varierer for de biogene isoleringsmaterialer med Z-værdier på mellem 6 GPa s m²/kg og 13 GPa s m²/kg, hvor vindspærren i konstruktion er udført med en Z-værdi på 1 GPa s m²/kg. Z-værdien ved det indvendige tæthedspan for referencekonstruktionen med mineraluld, er på 10 GPa s m²/kg ud fra beregningerne, hvilket svarer til et Z-værdiforhold på 1:10.

Resultaterne viser at halm, træfiber og cellulose har de laveste Z-værdiforhold, imod hamp, hør og græs der har et højere Z-værdihold i forhold til referencekonstruktionen med mineraluld.

Vores resultater viser at biogene isoleringsmaterialer kan anvendes i ydervægskonstruktioner, som opfylder kravet for en fugtteknisk robust konstruktion, for klimaforhold i Danmark.

Der er i denne rapport beregnet med fugtbelastningsklasserne 2 og 3, og resultater viser at hvis der ændres fra fugtbelastningsklasse 3 til 2, kan Z-værdien for tæthedspanet reduceres betragteligt. Derimod vil Z-værdien for tæthedspanet stige hvis U-værdi ændres fra 0,15 W/m²K til 0,10 W/m²K.

Ved ændring af Z-værdi for vindspærren, viser resultater at Z-værdiforholdet sænkes ved de 2 analyseret konstruktioner, når Z-værdi for vindspærren øges:

- Referencekonstruktionen med mineraluld har et Z-værdiforhold på 1:10, hvor vindspærrens Z-værdi er på 1 GPa s m²/kg, ændres dette til et Z-værdiforhold på 1:3 når vindspærren har en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg.
- Konstruktionen med træfiberisolering for samme Z-værdiforhold på 1:3 når vindspærren har en Z-værdi på 5 GPa s m²/kg. Denne konstruktion har til forskel et Z-værdiforhold på 1:6 med en vindspærre på 1 GPa s m²/kg.

9. Perspektivering

Rapportens fokus på biogene isoleringsmaterialer og på baggrund af resultaterne herfra. Disse kan anvendes for videre beregninger og analyser, ved konstruktioner sammensat på anden vis.

De anvendte biogene isoleringsmaterialer i denne rapport, kan i fremtiden erstattes med andre biogene isoleringsmaterialer, hvor der på nuværende tidspunkt mangler viden og data, da denne rapport blev udført.

Det samme gør sig gældende for andre sammensatte konstruktioner. Her kan denne rapport ligge til grund for øvrige beregninger og analyser, både ved anvendelse af de biogene isoleringsmaterialer der er anvendt i denne rapport, samt fremtidige biogene isoleringsmaterialer.

Denne rapport viser beregnede grænseværdier for tæthedsplanet, hvor disse grænseværdier, kunne anvendes til at designe ydervægskonstruktioner hvor biogene materialer udgør tæthedsplanet. På denne måde vil rapporten kunne bidrage med data, ved udvikling af nye materialer. Her vil udviklingen af nye materialer, kunne anvende Z-værdier fra denne rapport, som pejlemærker for Z-værdi i det materiale der udvikles.

Rapporten viser udviklingen af Z-værdiforholdet, når vindspærrens Z-værdi ændres. Disse resultater er særligt interessante, da udviklingen er betragteligt med de undersøgte værdier på 1-5 GPa s m²/kg. Hvilket udvikling vil der være med en vindspærre på 8 GPa s m²/kg, eller 0,5 GPa s m²/kg? Dette vil være interessant at undersøge ifm. fremtidige analyser af lette ydervægskonstruktioner med biogene isoleringsmaterialer.

De teoretiske beregninger som er udført i denne rapport, vil være interessante at verificere og teste, for at kunne eftervise teorien. Dette kan f.eks. være en fuldskalatest med forskellige materialer, eller ét materiale med forskellige klimasæt.

Rapporten tager udgangspunkt i biogene isoleringsmaterialer, hvor tilgængelige data er indarbejdet i simuleringer. Det har været et ønske at udføre laboratorie test af ét eller flere materialer, men dette har ikke været muligt pga. den begrænsede tid. Det vil være interessant at undersøge i fremtiden, for at udbygge materialebiblioteker til fugtsimuleringsværktøj.

At udbygge viden om biogene materials egenskaber, samt udfører forskellige test af disse, vil være med til at fremme brugen af biogene materialer.

Vores fremtidsklima gør det ikke lettere at bygge med biogene materialer, hvor forudsigelserne bl.a. er stigende temperaturer, mere regn og stærkere storme samt øget vandstand. Disse betragtninger skal medtages i designet af fremtidige bygninger med biogene isoleringsmaterialer, samt opførelsen heraf.

For at fremme biogene materialer, kunne lovgivningen evt. ændres i en periode, således at LCA beregningen ved endt levetid, ikke medtager CO₂ udledningen ved forbrænding af biogene materialer.

10. References

- Baustroh. (30. 04 2023). Hentet fra FASBA: https://baustroh.de/pdf/ETA-017-0247_Baustroh.pdf
- Bengtsson, L., & Selck, P. (2006). *Byggeriets materialer*. København K: Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck A/S.
- Bolig- og planstyrelsen. (19. 10 2022). *Bolig- og planstyrelsen*. Hentet fra Bolig- og planstyrelsen (tilgået 06.06.2023): <https://bpst.dk/da/Byggeri/Baeredygtigt-byggeri/NY-Klimakrav-i-bygningsreglementet#introduktion>
- Bolius. (1. marts 2023). *Bolius*. Hentet fra Videnscentret Bolius (tilgået: 01.03.2023): <https://www.bolius.dk/isolering-faa-det-store-overblik-98118>
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Hansen, T. K., Morelli, M., & Nielsen, A. (2023). *SBI-anvisning 277, Fugt i bygninger - Teori, beregninger og undersøgelser*. København: BUILD, Aalborg Universitet.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., Hansen, T. K., Morelli, M., & Nielsen, A. (2023). *SBI-anvisning 278. I Fugt i bygninger, projektering og udførelse*. København: BUILD, Aalborg Universitet.
- Byggeskadefonden. (05. 05 2022). *Byggeskadefonden*. Hentet fra Byggeskadefonden (tilgået 06.06.2023): <https://bsf.dk/om-fonden/nyheder-og-pressemeddelelser/nyt-byggeri-star-for-en-stigende-andel-af-de-anmeldte-byggeskader>
- Bæredygtigt Byggeri*. (2023). Hentet fra Bæredygtigt Byggeri DK (tilgået d. 11.05.2023): <https://www.xn--bredygtigtbyggeri-rrb.dk/isolering-hoer-og-hampe>
- Bæredygtigt Byggeri DK. (21. 02 2023). *Bæredygtigt Byggeri DK*. Hentet fra Vidensportalen - Bæredygtigt Byggeri (tilgået: 21.02.2023): <https://www.xn--bredygtigtbyggeri-rrb.dk/isolering-traefiber>
- Cornick, S. M., & Dalgliesh, W. A. (2003). *A Moisture index approach to characterizing climates for moisture*. Vancouver, Canada: NRC Publications Archive Record. Hentet fra <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/accepted/?id=e4a056e6-73ea-47da-89cb-6ea52f433575>
- Danske Møller. (22. 03 2023). *Danske Møller*. Hentet fra Danske møller (tilgået: 22.03.2023): <https://danske-moeller.dk/folkeskolen/hvorfor-blaeser-det-viden-om/>
- DM, Dansk Magisterforening. (06. 03 2023). *DM BIO*. Hentet fra DM - Fagforening for akademikere (tilgået: 06.03.2023): <https://dm.dk/bio/artikler/alle-artikler/nye-teknologier-og-materialer/vejen-til-en-baeredygtig-byggebranche-gaar-gennem-mark-og-skov>
- DMI. (04. 10 2018). *DMI*. Hentet fra DMI - Tema: FN's klimapanel: <https://www.dmi.dk/da/klima/ipccs-femte-hovedrapport/fakta-om-ipcc/>
- DS/EN 12086. (16. 04 2013). *Termisk isolering i byggeriet - Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber*. Dansk Standard.
- DS/EN ISO 12572:2016. (07. 09 2016). *Byggematerialers og -produkters hygrotermiske ydeevne - Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber - Kopmetoden*. København.
- DS/EN ISO 13788. (07. 03 2013). *Byggekomponenters og -elementers hygrotermiske ydeevne - Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overfladefugtighed og kondensdannelse i hulrum - Beregningsmetoder*. København.

- Ecococon* . (2023). Hentet fra Ecococon Danmark ApS (tilgået 03.06.2023): <https://ecococon.eu/dk/>
- FASBA*. (2023). Hentet fra FASBA – Fachverband Strohballenbau e.V. (tilgået 30.04.23): <https://fasba.de/bauen-mit-stroh/eigenschaften-technische-daten/>
- Gramitherm*. (16. 03 2023). Hentet fra <https://gramitherm.eu/wp-content/uploads/2023/02/Technical-data-Gramitherm-23022023V4.pdf>
- Havnens-H*. (2023). Hentet fra Havnens Hænder (tilgået d. 11.05.2023): <https://havnens-h.dk/wp-content/uploads/2021/05/Graesisolering-Datablad-og-Brochure.pdf>
- Hempitecture*. (2023). Hentet fra Hempitecture Inc. (tilgået 11.05.2023): https://www.hempitecture.com/_files/ugd/f5e528_02179504682b44828e4bcb0aed9bea6d.pdf
- Holdbar.dk. (28. 02 2023). *Holdbar*. Hentet fra Holdbar - Bæredygtige Byggeløsninger (tilgået: 28.02.2023): <https://hldbar.dk/isolering-hvilke-slags-kender-du/>
- Hukka, A., & Viitanen, H. A. (1999). *A mathematical model of mould growth on wooden material*, s. 475-485. Wood Science and Technology.
- Hunton Nativo Træfiberisolering Plade*. (2023). Hentet fra Hunton (tilgået d. 12.05.2023): https://hunton.dk/wp-content/uploads/sites/15/2018/11/NativoTraefiberisolering_Haandbog-0223_DK_WEB.pdf
- Isolering Danmark*. (2023). Hentet fra Isolering Danmark (tilgået d. 12-05-2023): https://www.isoleringdanmark.dk/CustomerData/Files/Folders/30-pdf-2/744_teknisk-datablad-climacell-sonic-loft.pdf
- Isolering Danmark, brochure*. (2023). Hentet fra Isolering Danmark (tilgået d. 12-05-2023): https://www.isoleringdanmark.dk/CustomerData/Files/Folders/3-pdf/903_climacell-pure-comfort.pdf
- IsoleringDanmark*. (01. 03 2023). Hentet fra Breinholm Gruppen (tilgået: 01.03.2023): https://www.isoleringdanmark.dk/CustomerData/Files/Folders/30-pdf-2/752_soleringsevne-om-lambdavrldi.pdf
- Jensen, N. F., Hansen, T. K., Morelli, M., Svane, A. M., & Waagepetersen, R. (2023). *Udkommer 2023, Klimadata til fugtsimuleringer*. København: BUILD, Aalborg Universitet.
- Johansson, P., Lång, L., & Capener, C.-M. (2021). How well do mould models predict mould growth in buildings, considering the end-user perspective. *Journal og Building Engineering*.
- Klimarealisme. (13. 11 2021). *Klimarealisme - Virkelighedens Komplekse Klima*. Hentet fra Klimarealisme: <https://klimarealisme.dk/2021/11/13/straalingsbalancen/>
- Klimatilpasning. (09. 03 2023). *Klimatilpasning.dk*. Hentet fra Klimatilpasning (tilgået: 09.03.2023): <https://www.klimatilpasning.dk/borger/hvordanbliverfremtidensklima>
- Koch, M. (2021). *Træfacader TRÆ 55 - Udvendige bræddebeklædninger*. Kongens Lyngby: TRÆ Information - Viden- og formidlingscenter for træbyggeriet.
- Krus, M., Seidler, M., & Sedlbauer, K. (2010). Comparative Evaluation of the Predictions of Two Established Mold Growth Models.

- København Universitet. (02. 03 2023). *Fysikleksikon*. Hentet fra Kbh.UNI, GeoFysik (tilgået: 02.03.2023): <https://fysikleksikon.nbi.ku.dk/d/drivhuseffekt/>
- Laursen, E. V. (10. 12 2012). *DMI*. Hentet fra DMI rapport: <https://www.dmi.dk/fileadmin/Rapporter/TR/tr12-19.pdf>
- Leszmann, A. (2022). *Fugttekniske krav til isoleringslag i lette ydervægge uden dampspærre - Parameterstudier af sorptionskurver og diffusionsmodstande i WUFI*. København: Aalborg Univeristet.
- Morelli, M., Nielsen, A., & Vanhoutteghem, L. (2017). *Fugtproblemer i højsolerede konstruktioner. SBI 2017:20*. København: SBI/Build.
- Morelli, M., Rasmussen, T. V., & Therkelsen, M. (2021). Exterior Wood-Frame Walls—Wind–Vapour Barrier Ratio in Denmark. *Buildings* 11,, 1-13. [428].
- NASA. (02. 03 2023). *Global Climate Change*. Hentet fra NASA Climate (tilgået: 02.03.2023): <https://climate.nasa.gov/>
- Pallesen, B. E. (2018). *Bæredygtige Tangisoleringsmåtter fra ålegræs*. Miljøstyrelsen .
- Pedersen, C., Hansen, E. J., Hansen, M. H., & Marsh, R. (2003). *Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer*. Hørsholm: By og Byg, Statens Byggeforskningsinstitut.
- Rasmussen, T. V., Thybring, E. E., Munch-Andersen, J., Nord-Larsen, T., Jørgensen, U., Gottlieb, S. C., . . . Wittchen, A. (2022). *Biogene materials anvendelse i byggeriet*. København: Institut for Byggeri, By og Miljø (BUILD), Aalborg Universitet.
- Sedlbauer, K. (2001). Prediction of Mould Growth by Hygrothermal Calculation. *Fraunhofer-Institute for Building Physics, Holzkirchen*.
- Sedlbauer, K., Hofbauer, W., Krueger, N., Mayer, F., & Breuer, K. (2011). The “Isopleth-traffic Light”. *Material Specific Isopleth-systems as Valuable Tools for the Assessment of the Durability of Building Materials Against Mould Infestation – The “Isopleth-traffic Light”*. Porto: Durability og Building Materials and Components.
- Seegrashandel. (2023). Hentet fra Seegrashandel GmbH (tilgået 08.06.2023): <https://www.seegrashandel.de/technische-daten/>
- SEGES, & Landbrug & Fødevarer. (2023). *SEGES innovation*. Hentet fra SEGES innovation P/S (tilgået 03.06.2023): https://www.seges.dk/innovation-og-udvikling/futurefarming/produktioner/white_papers
- Søuld. (01. 06 2023). *Søuld (tilgået: dato 01.06.2023)*. Hentet fra Søuld: <https://www.sould.dk/products>
- UNDP - United Nations Development Programme (FN). (02. 03 2023). *Climate Promise*. Hentet fra Climate Promise (tilgået: 02.03.2023): <https://climatepromise.undp.org/news-and-stories/climate-dictionary-everyday-guide-climate-change>
- Viden om vind. (2020). *Viden om vind*. Hentet fra Vindrosen: <https://videnomvind.dk/wiki/vindrosen/>

Viitanen, H., Krus, M., Ojanen, T., Eitner, V., & Zirkelbach, D. (2015). Mold Risk Classification Based on Comparative Evaluation of Two Established Growth Models. *6th International Building Physics Conference, IBPC 2015*. Elsevier Ltd.

WUFI. (2023). *WUFI*. Hentet fra WUFI: <https://wufi.de/>

WUFI MRD-model. (30. 03 2023). *WUFI*. Hentet fra WUFI - Moisture Resistance Design (MRD) model (tilgået: 30.03.2023): <https://wufi.de/de/wp-content/uploads/sites/9/2016/04/Lund-MRD-model.pdf>

WUFI-Forum. (21. 11 2018). *WUFI Forum*. Hentet fra Forum for the WUFI Software family (tilgået: 06.03..2023): <https://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=1623>

WUFI-Help. (16. 03 2023). *WUFI Help Online*. Hentet fra WUFI Wiki - online help (tilgået: 16.03.2023): <https://www.wufi-wiki.com/mediawiki/index.php/>

11. Bilag

Bilag 1 – Oversigt over analyseret konstruktioner inkl. parameter

Bilag 2 – Databehandling af konstruktioner i FBK 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Bilag 3 – Databehandling af konstruktioner i FBK 3 med en U-værdi på 0,10 W/m²K.

Bilag 4 – Databehandling af konstruktioner i FBK 2 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Bilag 5 – Databehandling af konstruktioner i FBK 2 med en U-værdi på 0,10 W/m²K.

Bilag 6 - Databehandling af konstruktioner med Z-værdi variation i vindspærren, i FBK 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Bilag 7 - Beregninger af konstruktionernes U-værdi

Bilag 8 – Grafer fra simuleringer i WUFI

Bilag 1

Dato: 09.06.2023

Oversigt over analyseret konstruktioner inkl. parametre

		Isolerings-		Z-værdi for	Z-værdi for		Højeste RF	BIO	BIO	VTT	VTT		Skimmelgrænse	Skimmelgrænse	Skimmelgrænse	Skimmelgrænse
ID		materiale	FBK	tæthedspan	vindspærre	Forhold	bag	simulering	simulering	simulering	simulering	RHT indeks	SBI formel og	Isopleth	Isopleth	Isopleth
							vindspærren	start	slut	start	slut		8-dags betragtning	4-dags betragtning	8-dags betragtning	16-dags betragtning
U-værdi 0,15																
MI_2/3_N/S	MI_3_50_N	Mineraluld	3	50	1	1:50	88,2%					5.182				
	MI_3_10_N	Mineraluld	3	10	1	1:10	93,9%					11.875				
	MI_3_9_N	Mineraluld	3	9	1	1:9	94,3%					12.565				
	MI_3_8_N	Mineraluld	3	8	1	1:8	94,8%					13.364				
	MI_3_7_N	Mineraluld	3	7	1	1:7	95,3%					14.269				
	MI_3_5_N	Mineraluld	3	5	1	1:5	96,3%					16.638				
	MI_2_6_N	Mineraluld	2	6	1	1:6	93,5%					11.464				
	MI_2_5_N	Mineraluld	2	5	1	1:5	94,1%					12.378				
U-værdi 0,10																
MI_2/3_N	MI_3_12_N_U1	Mineraluld	3	12	1	1:12	94,3%					11.728				
	MI_3_11_N_U1	Mineraluld	3	11	1	1:11	94,6%					12.196				
	MI_2_7_N_U1	Mineraluld	2	7	1	1:7	94,1%					11.525				
	MI_2_6_N_U1	Mineraluld	2	6	1	1:6	94,5%					12.169				
U-værdi 0,15																
HP_3_N	HP_3_50_N	Hamp	3	50	1	1:50	89,6%					7.462				
	HP_3_15_N	Hamp	3	15	1	1:15	92,8%					10.927				
	HP_3_14_N	Hamp	3	14	1	1:14	93,0%					11.215				
	HP_3_13_N	Hamp	3	13	1	1:13	93,2%					11.548				
	HP_3_12_N	Hamp	3	12	1	1:12	93,5%					11.929				
	HP_3_10_N	Hamp	3	10	1	1:10	94,1%					12.847				
	HP_3_8_N	Hamp	3	8	1	1:8	94,8%					14.062				
	HP_3_5_N	Hamp	3	5	1	1:5	96,0%					16.879				
U-værdi 0,15																
HR_3_N	HR_3_50_N	Hør	3	50	1	1:50	89,6%					7.296				
	HR_3_12_N	Hør	3	12	1	1:12	93,6%					11.910				
	HR_3_11_N	Hør	3	11	1	1:11	93,8%					12.349				
	HR_3_10_N	Hør	3	10	1	1:10	94,1%					12.851				
	HR_3_8_N	Hør	3	8	1	1:8	94,9%					14.105				
	HR_3_5_N	Hør	3	5	1	1:5	96,1%					17.020				
U-værdi 0,15																
HM_2/3_N/S	HM_3_50_N	Halm	3	50	1	1:50	87,6%					6.258				
	HM_3_10_N	Halm	3	10	1	1:10	91,0%					10.805				
	HM_3_8_N	Halm	3	8	1	1:8	91,5%					11.847				
	HM_3_7_N	Halm	3	7	1	1:7	91,8%					12.518				
	HM_3_6_N	Halm	3	6	1	1:6	92,2%					13.341				
	HM_3_5_N	Halm	3	5	1	1:5	92,6%					14.310				
	HM_2_5_N	Halm	2	5	1	1:5	91,1%					11.092				
	HM_2_3_N	Halm	2	3	1	1:3	92,0%					12.750				
	HM_2_2_N	Halm	2	2	1	1:2	92,6%					13.956				
	HM_3_50_S	Halm	3	50	1	1:50	83,0%					2.394				
	HM_3_10_S	Halm	3	10	1	1:10	87,1%					5.334				
	HM_3_5_S	Halm	3	5	1	1:5	89,6%					7.669				
U-værdi 0,10																
HM_2/3_N_U1	HM_3_10_N_U1	Halm	3	10	1	1:10	91,0%					10.713				
	HM_3_9_N_U1	Halm	3	9	1	1:9	91,2%					11.117				
	HM_3_8_N_U1	Halm	3	8	1	1:8	91,4%					11.570				
	HM_3_7_N_U1	Halm	3	7	1	1:7	91,6%					12.085				
	HM_2_5_N_U1	Halm	2	5	1	1:5	91,5%					11.815				
	HM_2_4_N_U1	Halm	2	4	1	1:4	94,1%					11.525				
	HM_2_3_N_U1	Halm	2	3	1	1:3	94,5%					12.169				

Bilag 1

Dato: 09.06.2023

Oversigt over analyseret konstruktioner inkl. parametre

		Isolerings- materiale	FBK	Z-værdi for tæthedspan	Z-værdi for vindspærre	Forhold	Højeste RF bag vindspærren	BIO simulering start	BIO simulering slut	VTT simulering start	VTT simulering slut	RHT indeks	Skimmelgrænse SBI formel og 8-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 4-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 8-dags betragtning	Skimmelgrænse Isopleth 16-dags betragtning
U-værdi 0,15																
GR_3_N	GR_3_50_N	Græs	3	50	1	1:50	90,2%					6.992				
	GR_3_12_N	Græs	3	12	1	1:12	93,8%					11.947				
	GR_3_11_N	Græs	3	11	1	1:11	94,1%					12.441				
	GR_3_10_N	Græs	3	10	1	1:10	94,3%					13.003				
	GR_3_5_N	Græs	3	5	1	1:5	96,2%					17.729				
U-værdi 0,15																
TF_2/3_N	TF_3_50_N	Træfiber	3	50	1	1:50	85,7%					5.816				
	TF_3_10_N	Træfiber	3	10	1	1:10	89,4%					9.994				
	TF_3_7_N	Træfiber	3	7	1	1:7	90,4%					11.449				
	TF_3_6_N	Træfiber	3	6	1	1:6	90,8%					12.101				
	TF_3_5_N	Træfiber	3	5	1	1:5	91,2%					12.837				
	TF_2_5_N	Træfiber	2	5	1	1:5	89,4%					9.941				
	TF_2_3_N	Træfiber	2	3	1	1:3	90,3%					11.141				
	TF_2_2_N	Træfiber	2	2	1	1:2	90,8%					11.982				
	TF_2_1_N	Træfiber	2	1	1	1:1	91,4%					13.014				
U-værdi 0,10																
TF_2/3_N_U1	TF_3_10_N_U1	Træfiber	3	10	1	1:10	88,6%					9.392				
	TF_3_8_N_U1	Træfiber	3	8	1	1:8	88,9%					9.980				
	TF_3_7_N_U1	Træfiber	3	7	1	1:7	89,1%					10.331				
	TF_3_6_N_U1	Træfiber	3	6	1	1:6	89,3%					10.703				
	TF_3_5_N_U1	Træfiber	3	5	1	1:5	89,5%					11.133				
	TF_3_4_N_U1	Træfiber	3	4	1	1:4	89,7%					11.582				
	TF_3_3_N_U1	Træfiber	3	3	1	1:3	90,0%					12.088				
	TF_3_2_N_U1	Træfiber	3	2	1	1:2	90,2%					12.662				
	TF_2_4_N_U1	Træfiber	2	4	1	1:4	89,1%					10.183				
	TF_2_3_N_U1	Træfiber	2	3	1	1:3	89,4%					10.699				
	TF_2_2_N_U1	Træfiber	2	2	1	1:2	89,5%					10.988				
	TF_2_1_N_U1	Træfiber	2	1	1	1:1	89,3%					11.053				
	TF_2_0_N_U1	Træfiber	2	0	1	1:0	91,3%					11.166				
U-værdi 0,15																
CL_3_N	CL_3_50_N	Cellulose	3	50	1	1:50	87,4%					7.349				
	CL_3_10_N	Cellulose	3	10	1	1:10	91,2%					12.362				
	CL_3_8_N	Cellulose	3	8	1	1:8	91,9%					13.373				
	CL_3_7_N	Cellulose	3	7	1	1:7	92,2%					13.997				
	CL_3_6_N	Cellulose	3	6	1	1:6	92,7%					14.752				
	CL_3_5_N	Cellulose	3	5	1	1:5	93,1%					15.663				

Bilag 2
Databehandling af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Dato: 09.06.2023

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 3	=MI_3_50_N_RHT i	=MI_3_10_N_RHT i	=MI_3_9_N_RHT in	=MI_3_8_N_RHT in	=MI_3_7_N_RHT in	=MI_3_5_N_RHT in	=MI_3_50_S_RHT i	=HM_3_5_N_RHT in	=HM_3_6_N_RHT in	=HM_3_7_N_RHT in	=HM_3_8_N_RHT in	=HM_3_10_N_RHT	=HM_3_50_N_RHT	=HM_3_5_S_RHT in	=HM_3_10_S_RHT	=HM_3_50_S_RHT
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	2	2	3	7	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	6	8	9	12	19	0	13	11	7	6	5	0	2	0	0
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	64,43	115,56	123,88	133,65	145,07	178,49	29,51	174,18	159,57	148,65	140,13	127,39	74,42	103,77	78,21	44,39
RHT-indeks i alt pr. år	5.182,45	11.874,52	12.565,04	13.363,72	14.269,33	16.637,92	1.350,15	14.309,92	13.340,77	12.517,92	11.846,95	10.805,00	6.257,99	7.668,78	5.333,97	2.393,91
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	0	0	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	2	3	7	0	6	6	3	3	0	0	0	0	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	0	0	0	4	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	3	6	7	7	14	0	9	7	7	6	6	0	2	0	0
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	11	14	14	15	23	0	26	14	10	9	7	0	6	1	0
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	88,24%	93,90%	94,34%	94,84%	95,27%	96,27%	84,14%	92,60%	92,18%	91,79%	91,49%	90,97%	87,56%	89,56%	87,12%	82,97%

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 3	=TF_3_5_N_RHT in	=TF_3_6_N_RHT in	=TF_3_7_N_RHT in	=TF_3_10_N_RHT i	=TF_3_50_N_RHT i	=HP_3_5_N_RHT in	=HP_3_8_N_RHT in	=HP_3_10_N_RHT i	=HP_3_12_N_RHT i	=HP_3_13_N_RHT i	=HP_3_14_N_RHT i	=HP_3_15_N_RHT i	=HP_3_50_N_RHT i	=CL_3_5_N_RHT in	=CL_3_6_N_RHT in	=CL_3_7_N_RHT in	=CL_3_8_N_RHT in	=CL_3_10_N_RHT i	=CL_3_50_N_RHT i
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	0	0	0	7	2	1	1	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	7	7	6	4	0	18	14	8	8	7	4	3	0	12	7	7	6	5	0
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	160,64	153,81	147,84	132,94	75,66	174,13	136,66	128,06	121,90	119,26	116,93	114,81	90,33	166,44	157,99	150,99	144,93	134,38	79,83
RHT-indeks i alt pr. år	12.837,42	12.101,16	11.449,44	9.993,85	5.815,56	16.879,16	14.062,02	12.846,73	11.928,84	11.548,35	11.215,29	10.926,70	7.462,34	15.662,70	14.751,91	13.997,26	13.373,17	12.361,93	7.348,74
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	4	3	3	0	0	6	4	2	1	1	1	1	0	6	5	3	3	1	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	7	7	6	5	0	12	7	4	4	2	2	2	0	9	7	7	6	6	0
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	17	11	11	7	1	23	14	14	14	14	10	8	1	26	26	14	11	7	1
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	91,17%	90,76%	90,38%	89,42%	85,73%	96,04%	94,80%	94,06%	93,48%	93,25%	93,02%	92,81%	89,62%	93,15%	92,67%	92,24%	91,86%	91,22%	87,36%

Bilag 2

Databehandling af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Dato: 09.06.2023

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 3	='HR_3_5_N_RHT in		='HR_3_8_N_RHT in		='HR_3_10_N_RHT in		='HR_3_11_N_RHT in		='HR_3_12_N_RHT in		='HR_3_50_N_RHT in		='GR_3_5_N_RHT in		='GR_3_10_N_RHT in		='GR_3_11_N_RHT in		='GR_3_12_N_RHT in		='GR_3_50_N_RHT in	
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	7		2		1		1		0		0		8		1		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	19		14		8		8		7		0		20		8		7		3		0	
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	171,27		135,30		127,60		124,37		121,38		89,15		168,17		125,86		122,06		118,71		85,41	
RHT-indeks i alt pr. år	17.019,81		14.104,59		12.850,92		12.349,16		11.910,45		7.296,09		17.729,06		13.003,25		12.441,13		11.947,44		6.992,44	
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	2		0		0		0		0		0		3		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	6		2		2		2		1		0		6		2		1		1		0	
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	3		0		0		0		0		0		4		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	14		5		4		4		3		0		14		4		3		2		0	
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	2		0		0		0		0		0		3		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	23		14		14		14		14		1		24		15		14		13		1	
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	96,13%		94,89%		94,15%		93,84%		93,56%		89,62%		96,17%		94,34%		94,07%		93,84%		90,21%	

Bilag 3
Databehandling af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 3 med en U-værdi på 0,10 W/m²K.

Dato: 09.06.2023

U-værdi 0,10 Fugtbelastningskl. 3	=MI_3_11_N_RHT i	=MI_3_12_N_RHT i	=HM_3_7_N_RHT i	=HM_3_8_N_RHT i	=HM_3_9_N_RHT i	=HM_3_10_N_RHT i	=TF_3_2_N_RHT in	=TF_3_3_N_RHT in	=TF_3_4_N_RHT in	=TF_3_5_N_RHT in	=TF_3_6_N_RHT in	=TF_3_7_N_RHT in	=TF_3_8_N_RHT in	=TF_3_10_N_RHT in
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	8	6	9	8	7	7	7	7	7	7	6	5	5	5
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	122,91	119,04	155,18	149,10	144,11	140,04	157,19	153,08	149,37	146,13	142,74	139,91	137,18	132,49
RHT-indeks i alt pr. år	12.196	11.728	12.085	11.570	11.117	10.713	12.662	12.088	11.582	11.133	10.703	10.331	9.980	9.392
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	2	1	5	4	3	2	4	3	3	2	2	2	1	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	4	4	8	7	7	7	9	7	7	7	6	5	5	5
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	14	11	32	16	11	11	26	23	22	17	17	17	11	9
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	94,6%	94,3%	91,6%	91,4%	91,2%	91,0%	90,2%	90,0%	89,7%	89,5%	89,3%	89,1%	88,9%	88,6%

Bilag 4

Databehandling af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 2 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

Dato: 09.06.2023

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 2	=MI_2_5_N_RHT in	=MI_2_6_N_RHT in	=HM_2_2_N_RHT in	=HM_2_3_N_RHT in	=HM_2_5_N_RHT in	=TF_2_1_N_RHT in	=TF_2_2_N_RHT in	=TF_2_3_N_RHT in	=TF_2_5_N_RHT in
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	3	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	8	5	12	7	5	7	7	6	4
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	116,90	109,43	166,79	149,56	128,40	161,67	152,09	143,78	130,54
RHT-indeks i alt pr. år	12.378	11.464	13.956	12.750	11.092	13.014	11.982	11.141	9.941
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	6	3	0	5	3	3	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	4	2	9	7	6	7	7	6	4
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	1	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	14	14	26	13	7	17	11	9	7
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	94,1%	93,5%	92,6%	92,0%	91,1%	91,4%	90,8%	90,3%	89,4%

Bilag 5
Databehandling af konstruktioner i fugtbelastningsklasse 2 med en U-værdi på 0,10 W/m²K.

U-værdi 0,10 Fugtbelastningskl. 2	= 'MI_2_6_N_RHT in	= 'MI_2_7_N_RHT in	= 'HM_2_3_N_RHT in	= 'HM_2_4_N_RHT in	= 'HM_2_5_N_RHT in	= 'TF_2_0_N_RHT in	= 'TF_2_05_N_RHT	= 'TF_2_1_N_RHT in	= 'TF_2_2_N_RHT in	= 'TF_2_3_N_RHT in	= 'TF_2_4_N_RHT in
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	8	5	9	7	7	7	6	6	5	5	5
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	122,27	117,02	151,88	144,53	138,80	146,81	145,29	143,09	139,14	135,55	132,37
RHT-indeks i alt pr. år	12.169	11.525	11.815	11.166	10.604	11.053	10.988	10.699	10.183	9.727	9.336
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	1	1	5	3	2	2	2	2	1	1	0
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	4	3	8	7	7	7	6	6	5	5	5
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0	0	1	0	0	1	1	1	1	0	0
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	14	14	19	11	11	17	17	17	17	11	9
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	94,5%	94,1%	91,5%	91,3%	91,0%	89,3%	89,5%	89,4%	89,1%	88,8%	88,6%

Bilag 6

Databehandling af konstruktioner med Z-værdi varianter i vindspærren, i fugtbelastningsklasse 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

U-værdi 0,15 Fugtbelastningskl. 3 Højre Z-værdi'er med udgangspunkt for vindspærreplanet - Mineraluld & Træfiber	='MI_3_11_N_VS2_		='MI_3_12_N_VS2_		='MI_3_12_N_VS3_		='MI_3_13_N_VS3_		='MI_3_15_N_VS3_		='MI_3_20_N_VS3_		='MI_3_25_N_VS3_		='MI_3_30_N_VS3_		='MI_3_13_N_VS4_		='MI_3_14_N_VS4_		='MI_3_15_N_VS4_		='MI_3_14_N_VS5_		='MI_3_15_N_VS5_	
Antal sammenhængende dage => 8 dage, hvor der er risiko for skimmelvækst	2		0		2		0		0		0		0		0		2		0		0		2		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	8		6		8		6		5		0		0		0		8		6		6		8		6	
RHT-indeks, gennemsnit over ét døgn. Højeste beregnet indekstal	121		114		122		115		106		93		83		77		120		114		109		118		112	
RHT-indeks i alt pr. år	13.271		12.674		13.989		13.400		12.404		10.527		9.226		8.315		14.353		13.797		13.295		14.525		13.992	
Antal sammenhængende dage => 4 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	1		0		1		0		0		0		0		0		1		0		0		0		0	
Antal sammenhængende dage => 8 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	6		3		6		4		2		0		0		0		6		4		3		6		4	
Antal sammenhængende dage => 16 dage jf. Isopleth, hvor der er risiko for skimmelvækst	0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0		0	
Maksimal antal dage i træk, hvor der er risiko for skimmelvækst	14		14		15		14		11		5		2		1		15		14		14		15		14	
RF% Maksimal ved gennemsnit pr. dag	94,7%		94,3%		94,9%		94,6%		94,1%		93,3%		92,6%		92,0%		94,9%		94,7%		94,5%		94,9%		94,7%	

Bilag 6

Databehandling af konstruktioner med Z-værdi varianter i vindspærren, i fugtbelastningsklasse 3 med en U-værdi på 0,15 W/m²K.

='TF_3_8_N_VS2_R			='TF_3_9_N_VS2_R			='TF_3_10_N_VS2_			='TF_3_8_N_VS3_R			='TF_3_10_N_VS3_			='TF_3_11_N_VS3_			='TF_3_12_N_VS3_			='TF_3_18_N_VS3_			='TF_3_60_N_VS10_			='TF_3_12_N_VS4_			='TF_3_13_N_VS4_			='TF_3_14_N_VS4_			='TF_3_13_N_VS5_			='TF_3_14_N_VS5_			='TF_3_15_N_VS5_		
0			0			0			1			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0					
7			7			6			9			7			7			6			3			0			7			6			6			7			7			6		
157			151			146			165			155			150			146			127			94			152			148			144			152			149			145		
12.813			12.223			11.699			14.099			12.927			12.415			11.942			9.792			6.804			12.807			12.354			11.940			13.025			12.592			12.188		
0			0			0			1			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0		
3			3			3			6			3			3			3			0			0			3			3			3			3			3			3		
0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0			0		
7			7			6			7			7			7			6			4			0			7			7			6			7			7			6		
1			0			0			1			1			1			0			0			0			1			0			0			1			1			0		
17			14			11			38			17			17			11			7			3			17			14			11			17			17			14		
91,1%			90,8%			90,5%			91,8%			91,1%			90,9%			90,6%			89,3%			87,1%			91,0%			90,8%			90,5%			91,1%			90,9%			90,6%		

U-værdiberegning med mineraluld - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)
					-10
Ude			0,3	1,35	
					-8,65
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,16	
					-8,50
Træskelet + iso	0,205	0,040	5,07	22,74	
					14,24
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00	
					14,25
Træskelet + iso	0,045	0,043	1,06	4,74	
					18,99
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43	
					19,42
Inde			0,13	0,58	
					20,00
					20
		R _{tot}	6,686	Δθ _{tot} (°C)	30
		U-værdi	0,150		
Find and Input					
Control value					
					Tag 0,10
					Horisontalt 0,13
					Gulv 0,17

U-værdiberegning med mineraluld - 0,10 W/m2K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	$\Delta\theta$ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	0,90							
					-9,10						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,10							
					-9,00						
Træskelet + iso	0,340	0,040	8,41	25,16							
					16,16						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00							
					16,16						
Træskelet + iso	0,045	0,043	1,06	3,16							
					19,32						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,29							
					19,61						
Inde			0,13	0,39							
					20,00						
					20						
		R_{tot}	10,023	$\Delta\theta_{tot}$ (°C)	30						
		U-værdi	0,100								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

U-værdiberegning med hamp - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m²K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	1,34							
					-8,66						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,15							
					-8,51						
Træskelet + hamp	0,240	0,046	5,22	23,30							
					14,80						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00							
					14,80						
Træskelet + iso	0,045	0,048	0,94	4,19							
					18,99						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43							
					19,42						
Inde			0,13	0,58							
					20,00						
					20						
		R _{tot}	6,716	Δθ _{tot} (°C)	30						
		U-værdi	0,149								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

U-værdiberegning med hør - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)
					-10
Ude			0,3	1,35	
					-8,65
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,16	
					-8,49
Træskelet + hør	0,220	0,043	5,09	22,98	
					14,49
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00	
					14,49
Træskelet + iso	0,045	0,045	0,99	4,49	
					18,98
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43	
					19,41
Inde			0,13	0,59	
					20,00
					20
		R _{tot}	6,644	Δθ _{tot} (°C)	30
		U-værdi	0,151		
Find and Input					
Control value					
					Tag 0,10
					Horisontalt 0,13
					Gulv 0,17

U-værdiberegning med halm - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	1,34							
					-8,66						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,15							
					-8,50						
Træskelet + halm	0,285	0,053	5,34	23,85							
					15,34						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00							
					15,35						
Træskelet + iso	0,045	0,055	0,82	3,64							
					18,99						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43							
					19,42						
Inde			0,13	0,58							
					20,00						
					20						
		R _{tot}	6,714	Δθ _{tot} (°C)	30						
		U-værdi	0,149								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

U-værdiberegning med halm - 0,10 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m²K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	0,90	-9,10						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,10	-9,00						
Træskelet + halm	0,460	0,053	8,61	25,87	16,87						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00	16,87						
Træskelet + iso	0,045	0,055	0,82	2,45	19,32						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,29	19,61						
Inde			0,13	0,39	20,00						
					20						
		R _{tot}	9,991	Δθ _{tot} (°C)	30						
		U-værdi	0,100								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

U-værdiberegning med græs - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)
					-10
Ude			0,3	1,34	
					-8,66
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,15	
					-8,51
Træskelet + græs	0,240	0,046	5,22	23,30	
					14,80
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00	
					14,80
Træskelet + iso	0,045	0,048	0,94	4,19	
					18,99
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43	
					19,42
Inde			0,13	0,58	
					20,00
					20
		R _{tot}	6,716	Δθ _{tot} (°C)	30
		U-værdi	0,149		
Find and Input					
Control value					
					Tag 0,10
					Horisontalt 0,13
					Gulv 0,17

U-værdiberegning med træfiber - 0,15 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)
					-10
Ude			0,3	1,36	
					-8,64
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,16	
					-8,49
Træskelet + træfiber	0,225	0,044	5,10	23,05	
					14,57
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00	
					14,57
Træskelet + iso	0,045	0,046	0,97	4,41	
					18,98
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43	
					19,41
Inde			0,13	0,59	
					20,00
					20
		R _{tot}	6,632	Δθ _{tot} (°C)	30
		U-værdi	0,151		
Find and Input					
Control value					
					Tag 0,10
					Horisontalt 0,13
					Gulv 0,17

U-værdiberegning med træfiber - 0,10 W/m²K

Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m ² K/W)	$\Delta\theta$ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	0,90							
					-9,10						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,10							
					-9,00						
Træskelet + træfiber	0,375	0,044	8,49	25,41							
					16,41						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00							
					16,41						
Træskelet + iso	0,045	0,046	0,97	2,91							
					19,32						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,29							
					19,61						
Inde			0,13	0,39							
					20,00						
					20						
		R _{tot}	10,029	$\Delta\theta_{tot}$ (°C)	30						
		U-værdi	0,100								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

U-værdiberegning med cellulose - 0,15 W/m²K

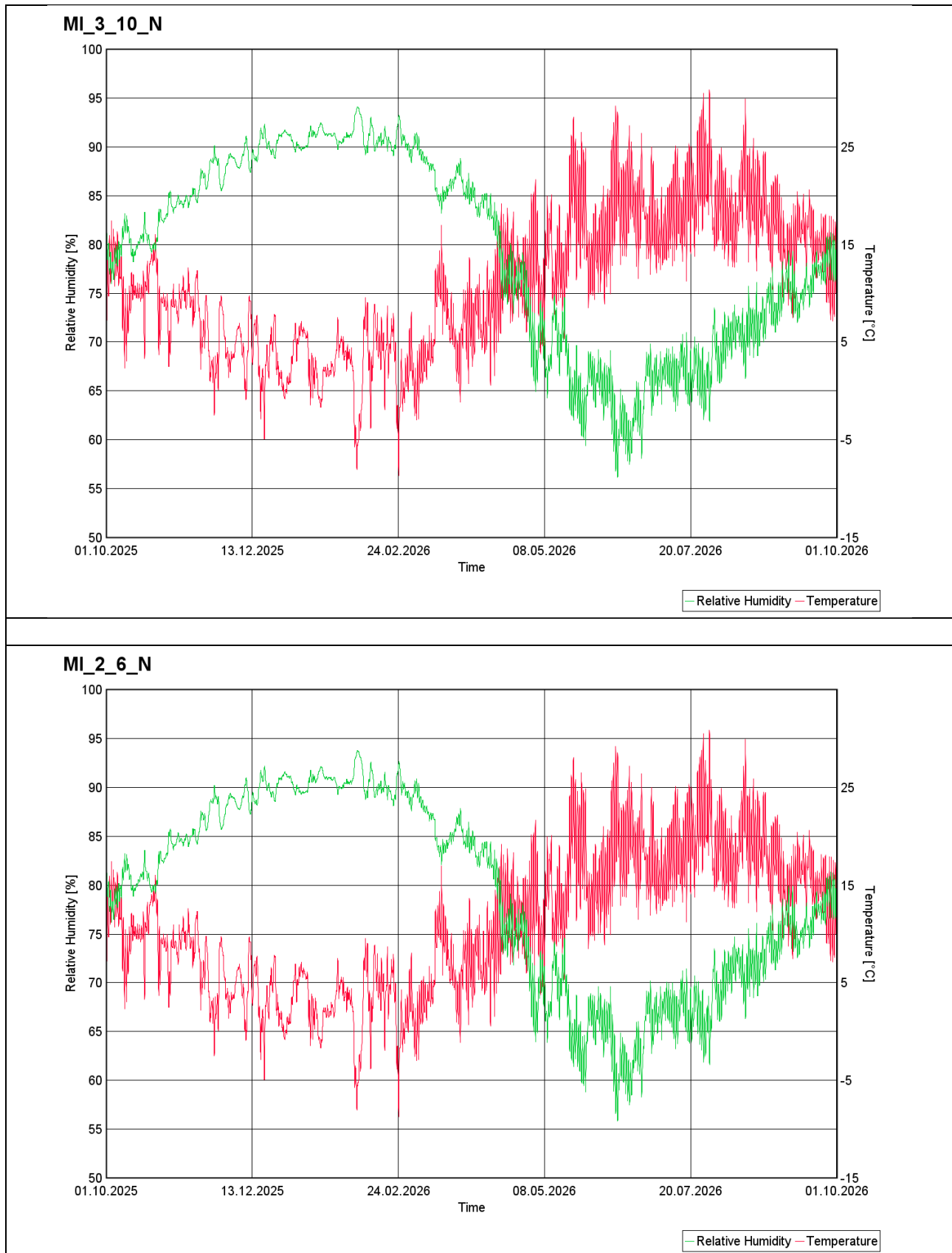
Materiale	Tykkelse	Lambda	Isolans	Temp diff.	Temperatur						
	d (m)	λ (W/mK)	R (m²K/W)	Δθ (°C)	θ (°C)						
					-10						
Ude			0,3	1,35							
					-8,65						
vindspærre	0,009	0,26	0,03	0,16							
					-8,49						
Træskelet + cellulose	0,220	0,043	5,09	22,98							
					14,49						
Dampspærre	0,001	1,70	0,00	0,00							
					14,49						
Træskelet + iso	0,045	0,045	0,99	4,49							
					18,98						
Gips	0,025	0,26	0,10	0,43							
					19,41						
Inde			0,13	0,59							
					20,00						
					20						
		R _{tot}	6,644	Δθ _{tot} (°C)	30						
		U-værdi	0,151								
Find and Input											
Control value											
<table><tr><td>Tag</td><td>0,10</td></tr><tr><td>Horisontalt</td><td>0,13</td></tr><tr><td>Gulv</td><td>0,17</td></tr></table>						Tag	0,10	Horisontalt	0,13	Gulv	0,17
Tag	0,10										
Horisontalt	0,13										
Gulv	0,17										

Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

Grafer fra WUFI, er **kun** de beregnede fugtteknisk robuste konstruktioner, uden risiko for skimmelvækst.

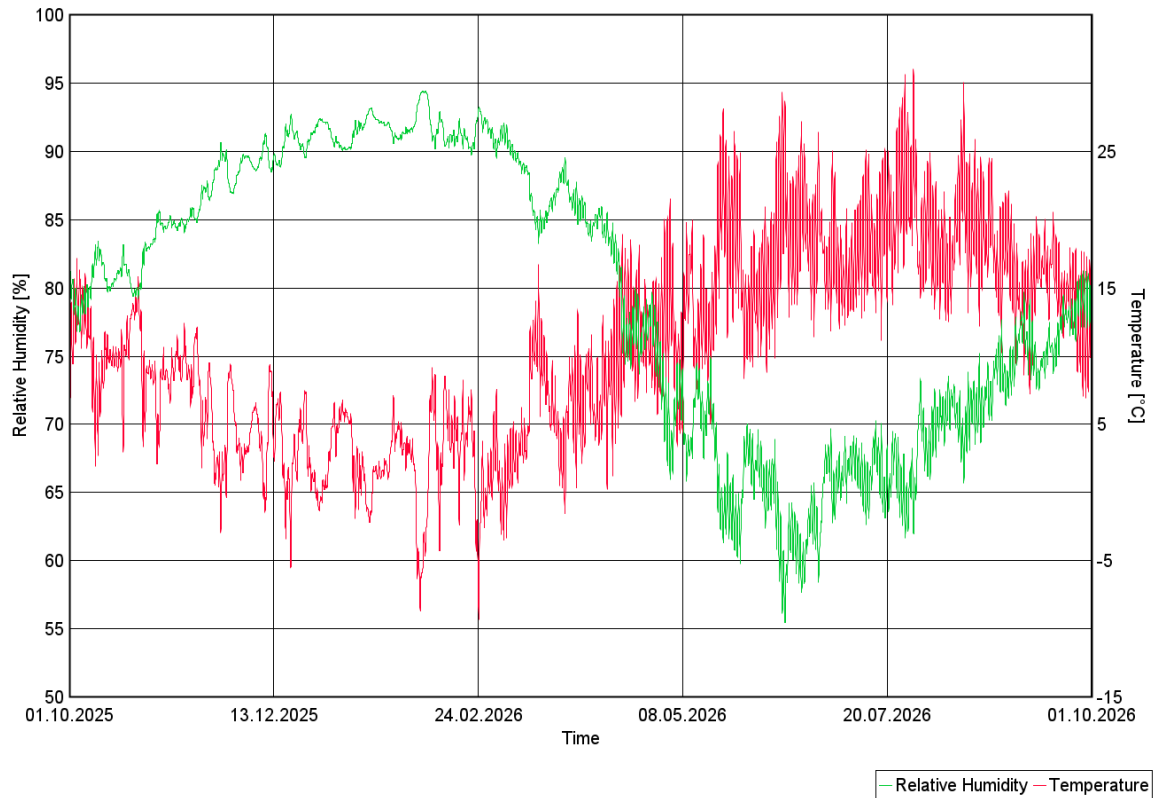


Bilag 8

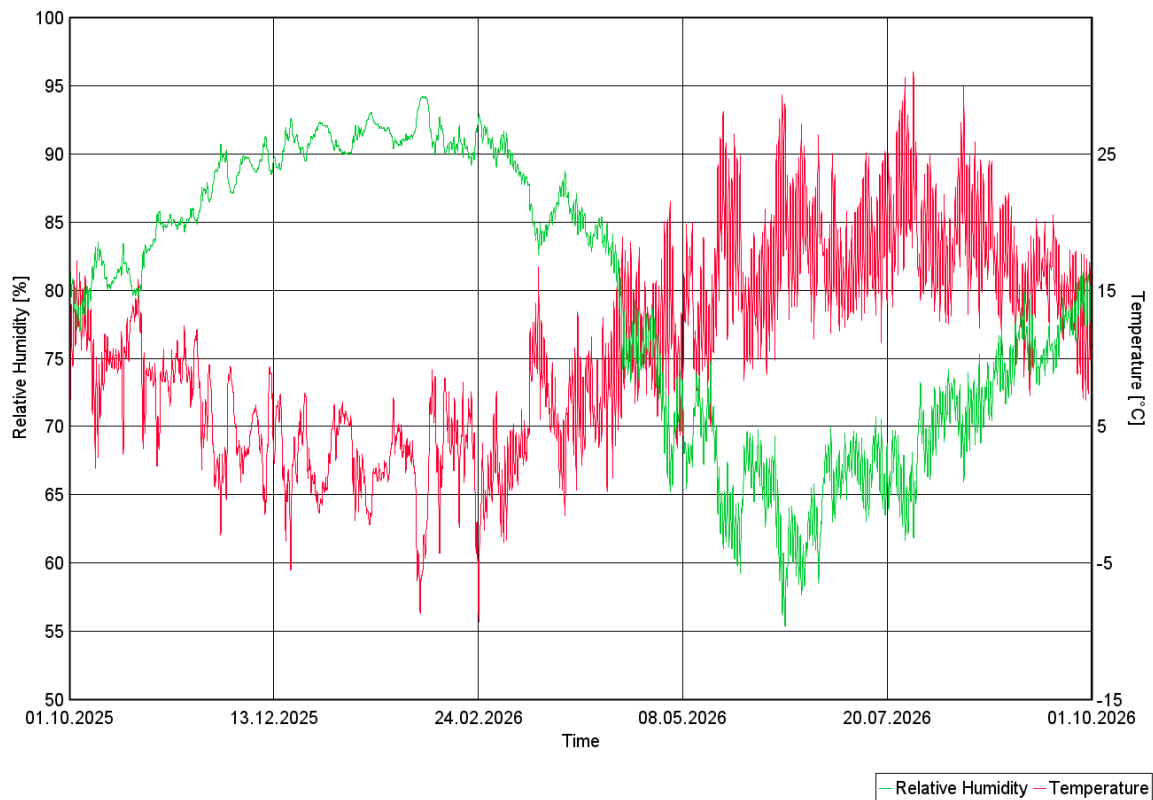
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

MI_3_12_N_U1



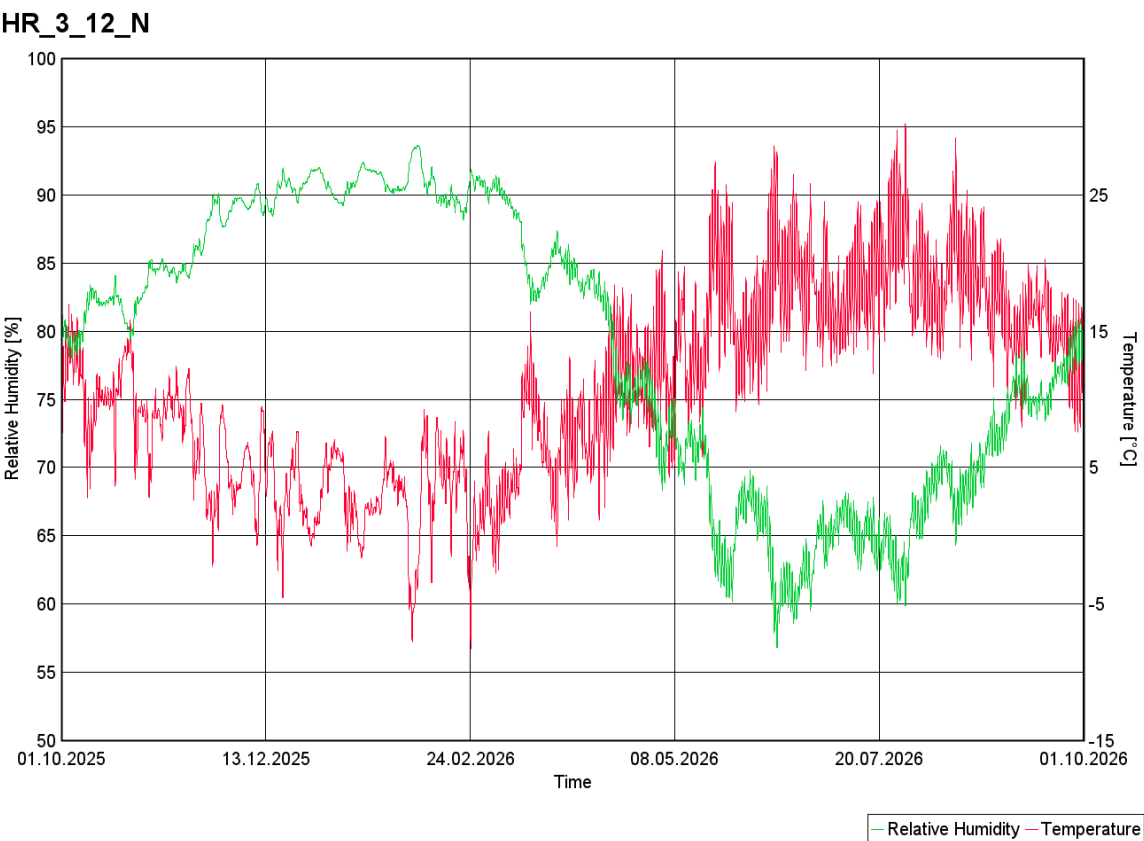
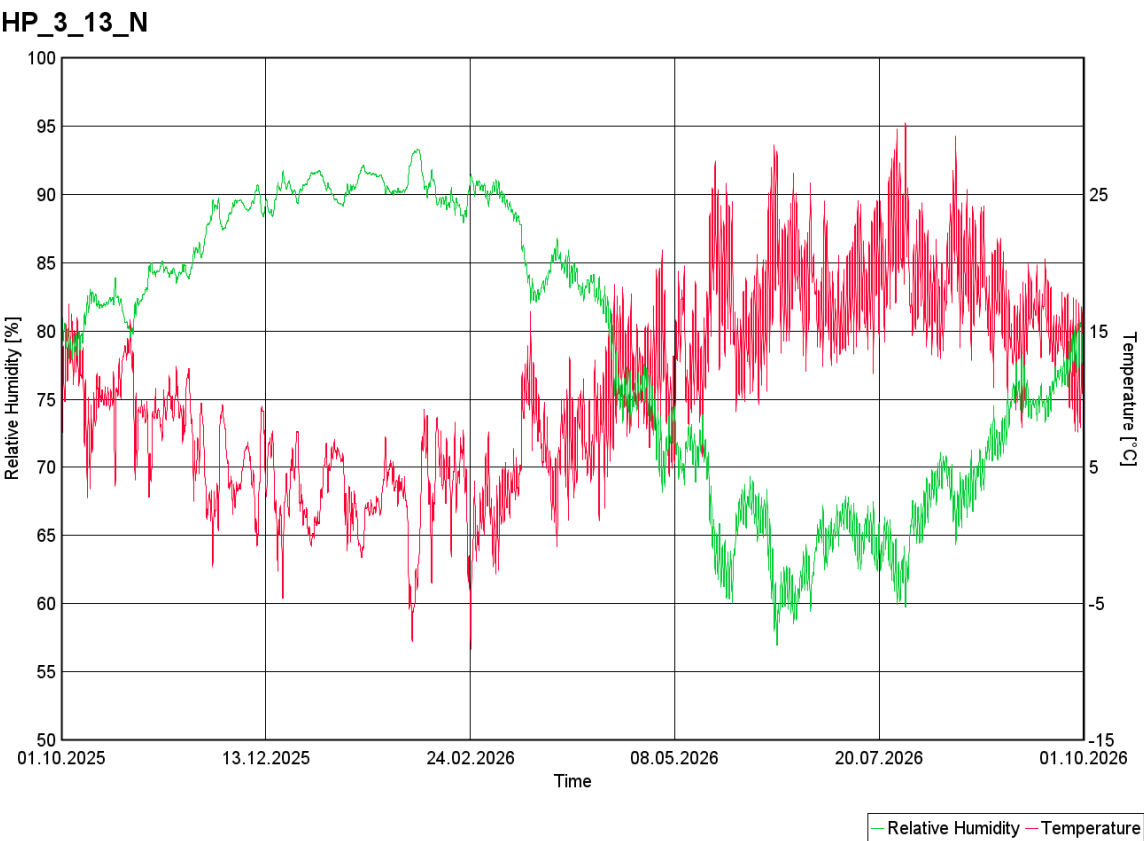
MI_2_7_N_U1



Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

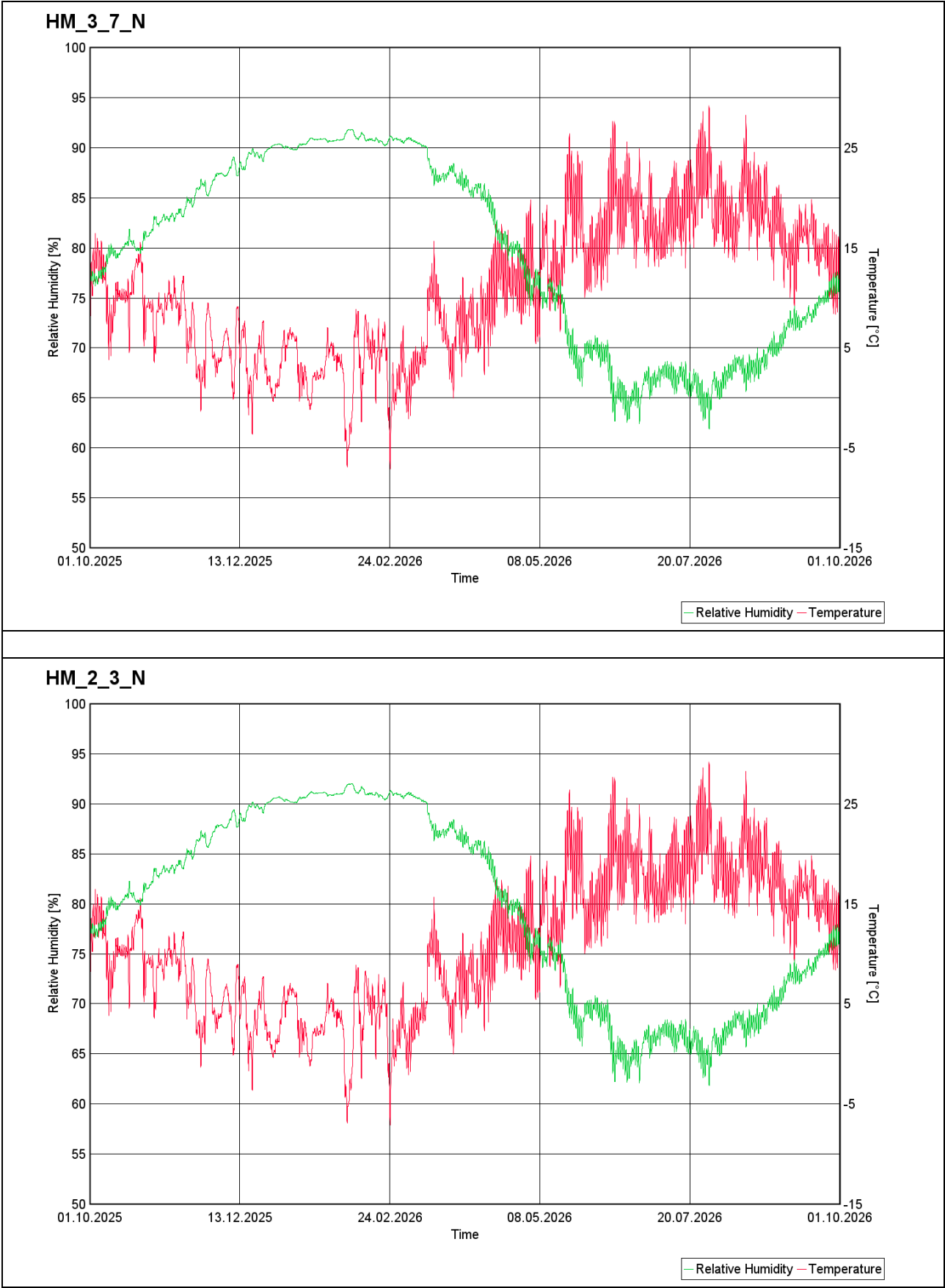
Dato: 09.06.2023



Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

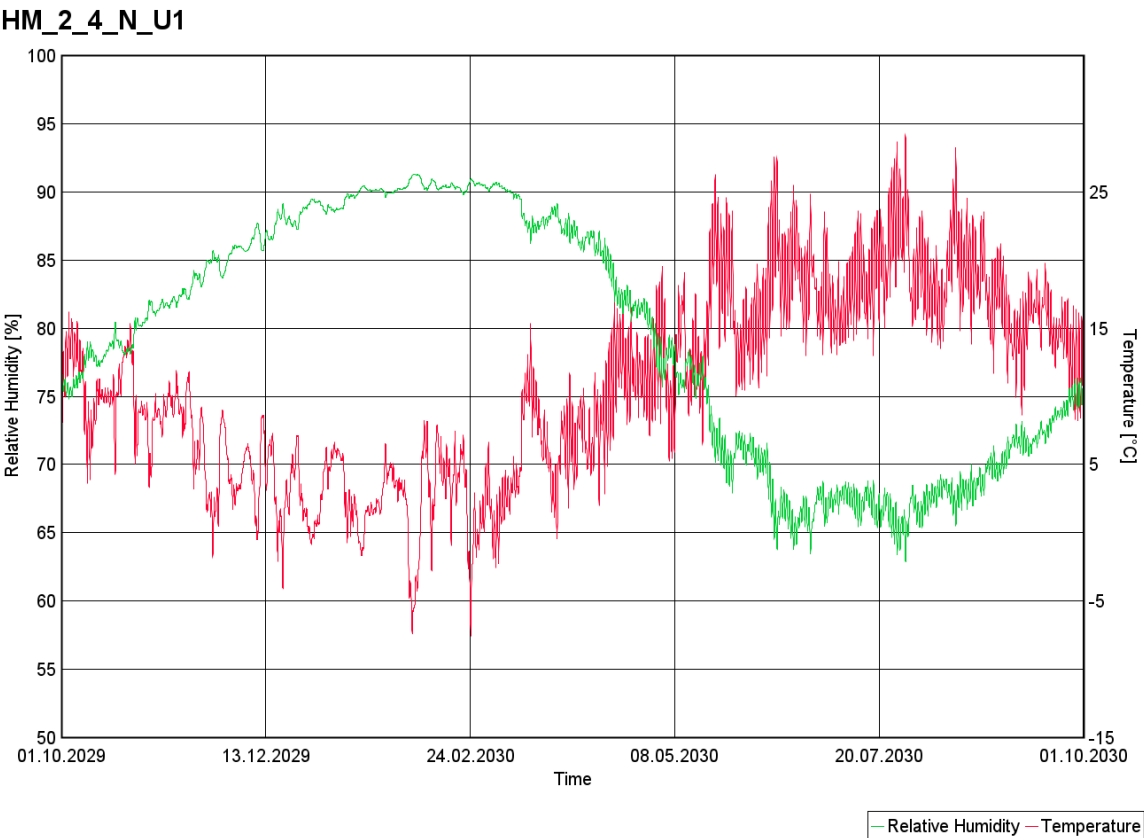
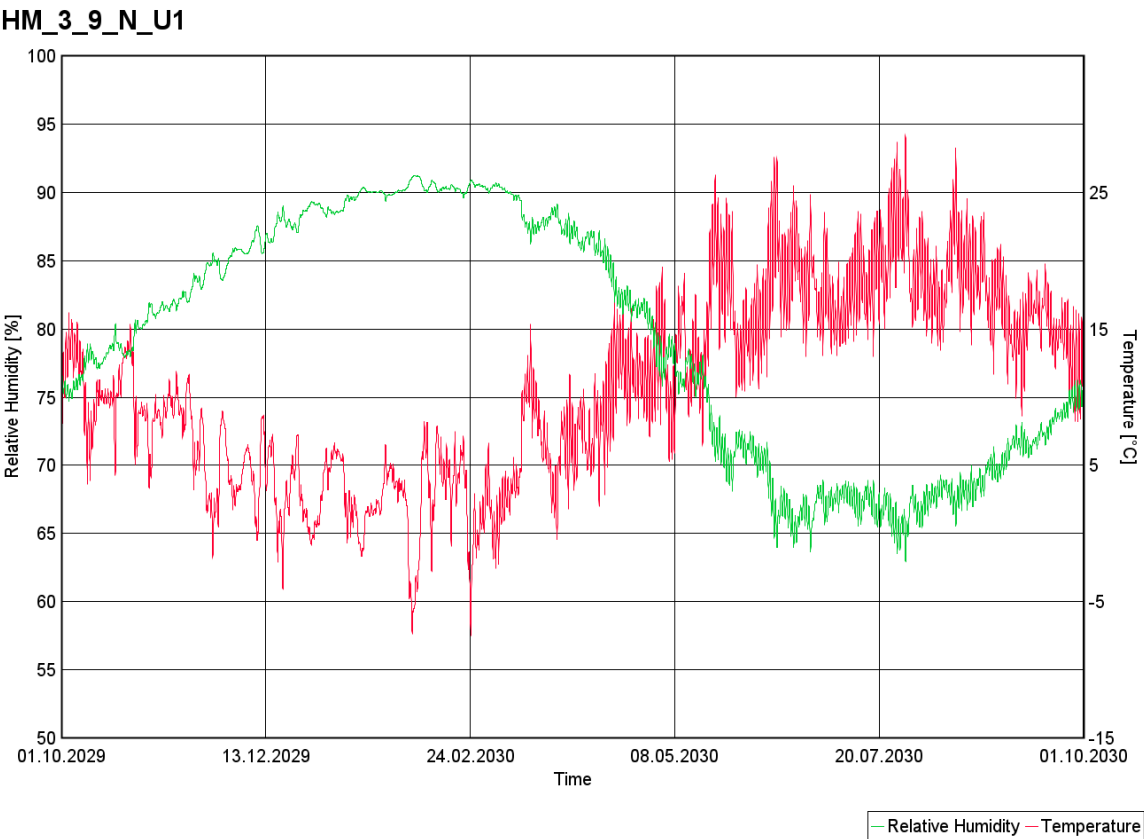
Dato: 09.06.2023



Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

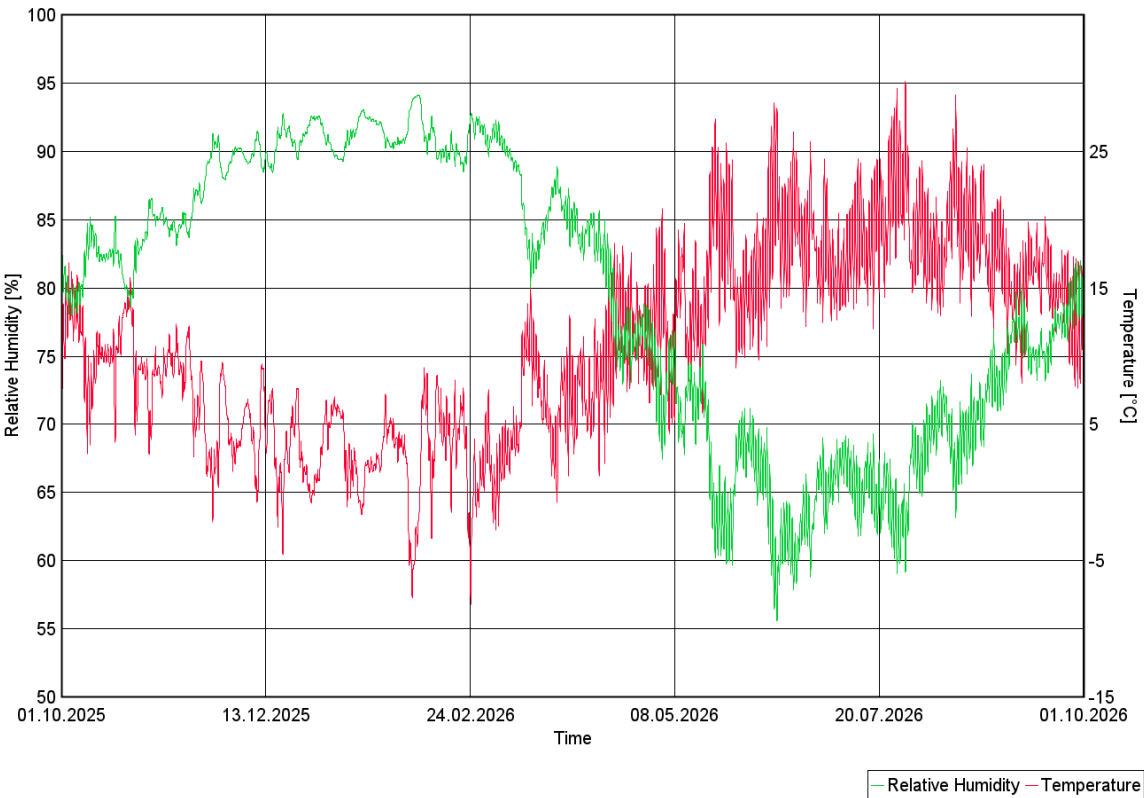


Bilag 8

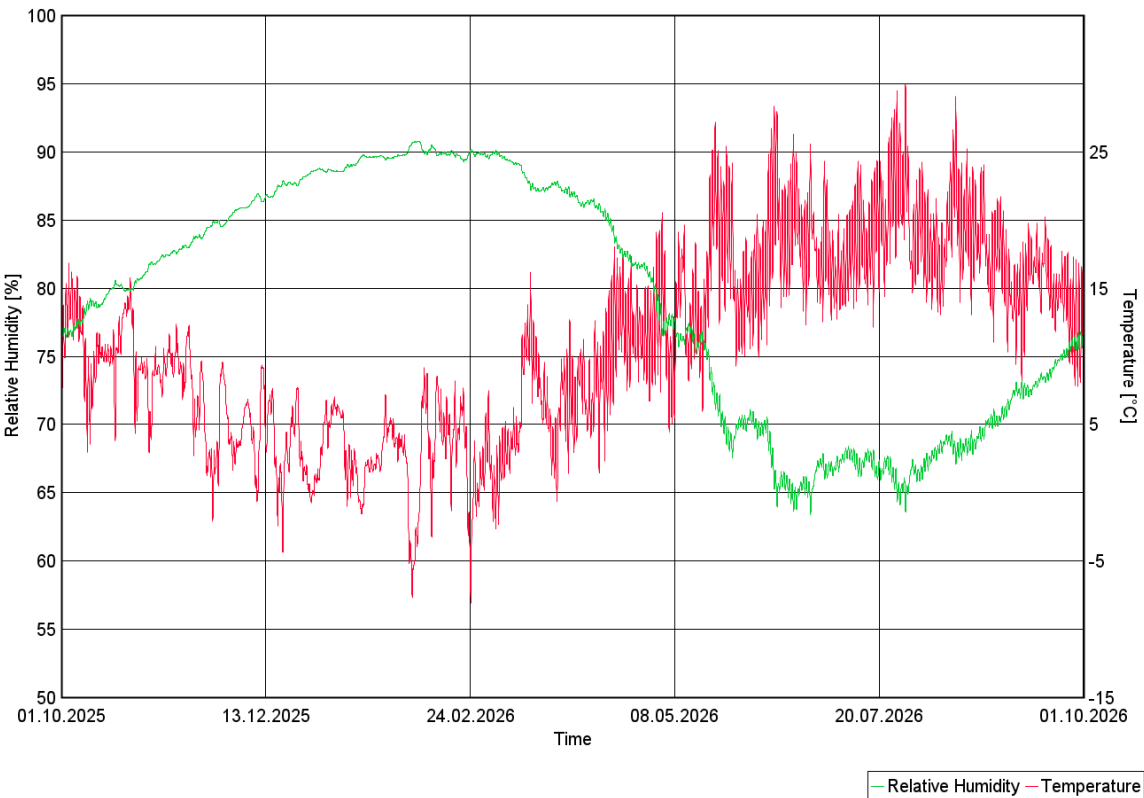
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

GR_3_11_N



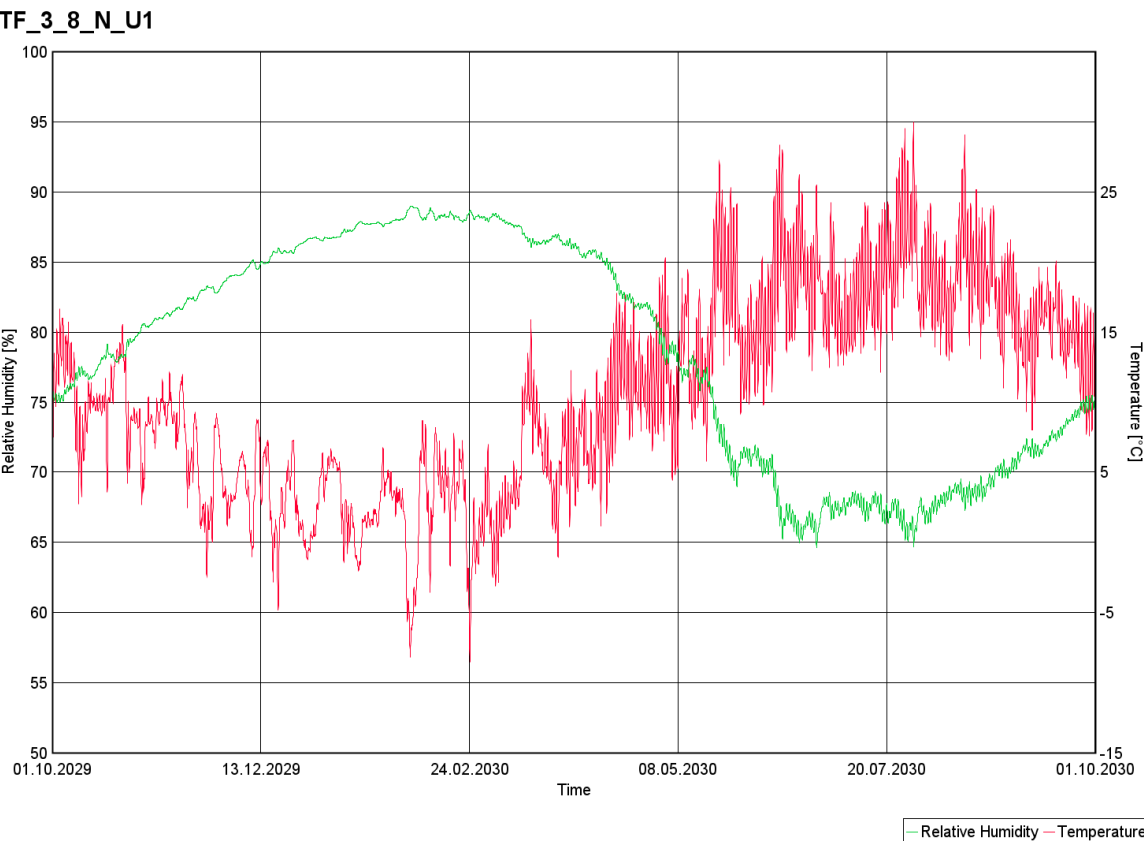
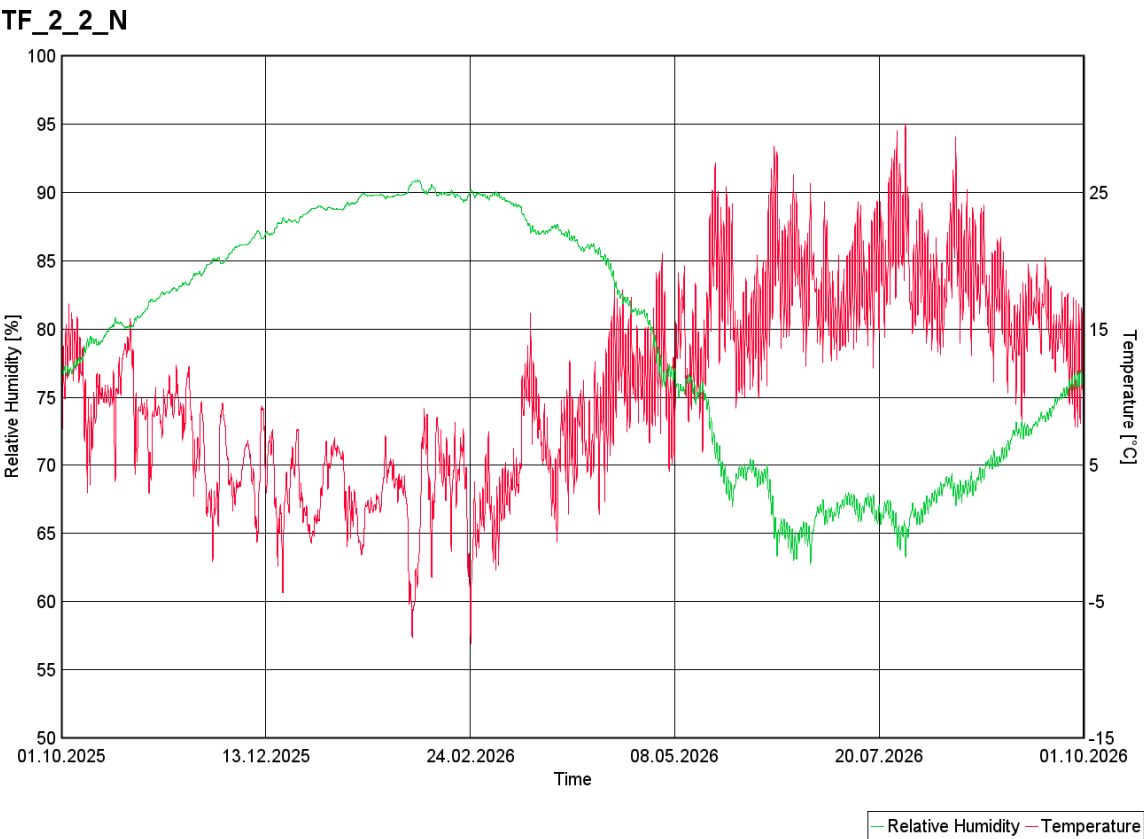
TF_3_6_N



Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

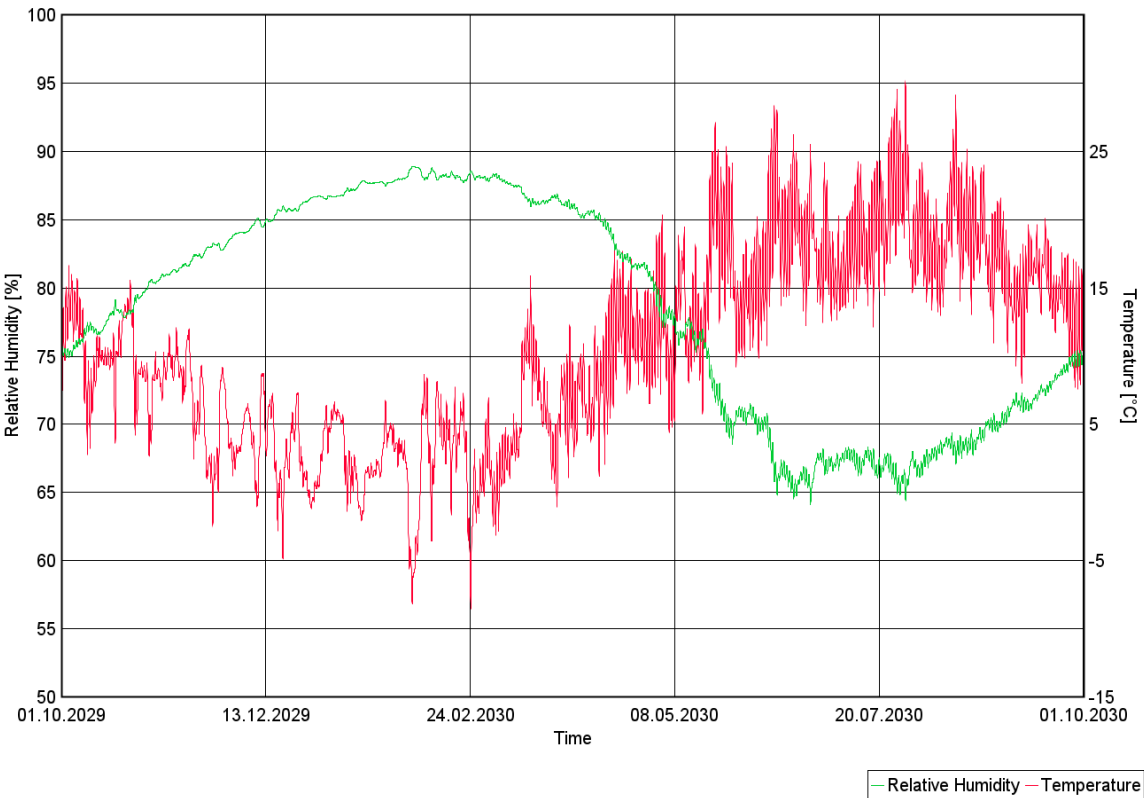


Bilag 8

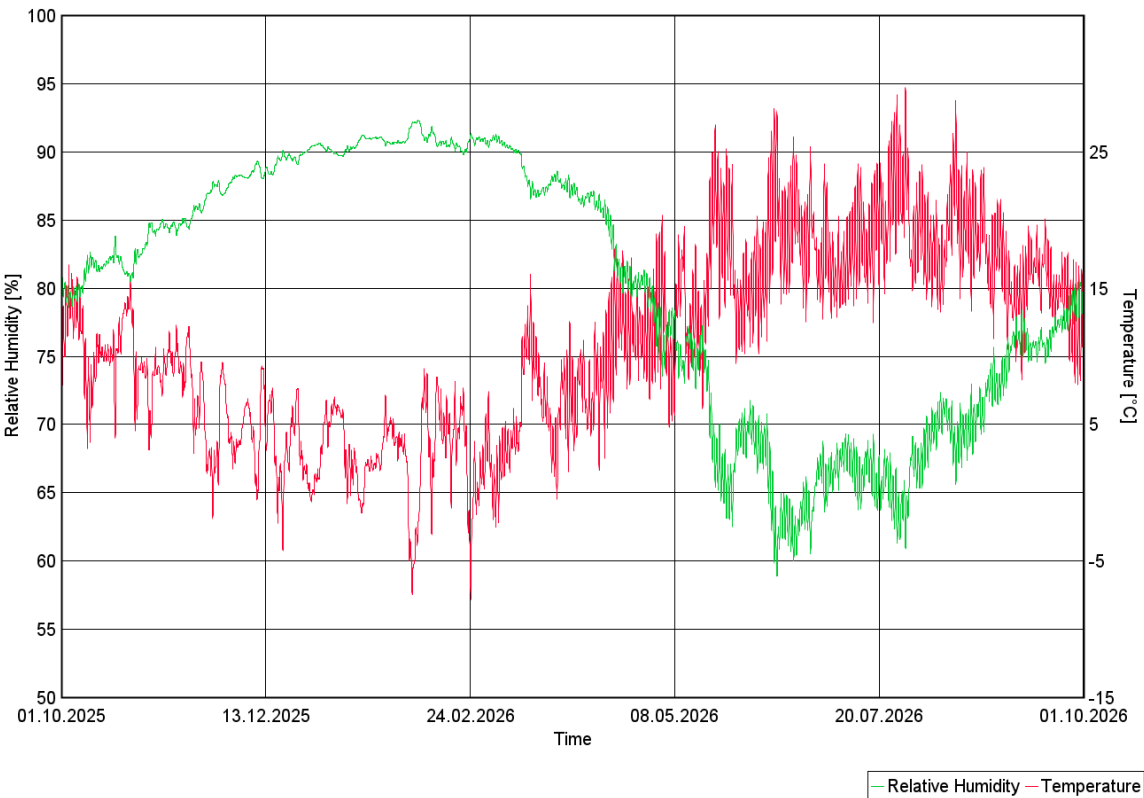
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

TF_2_3_N_U1



CL_3_7_N

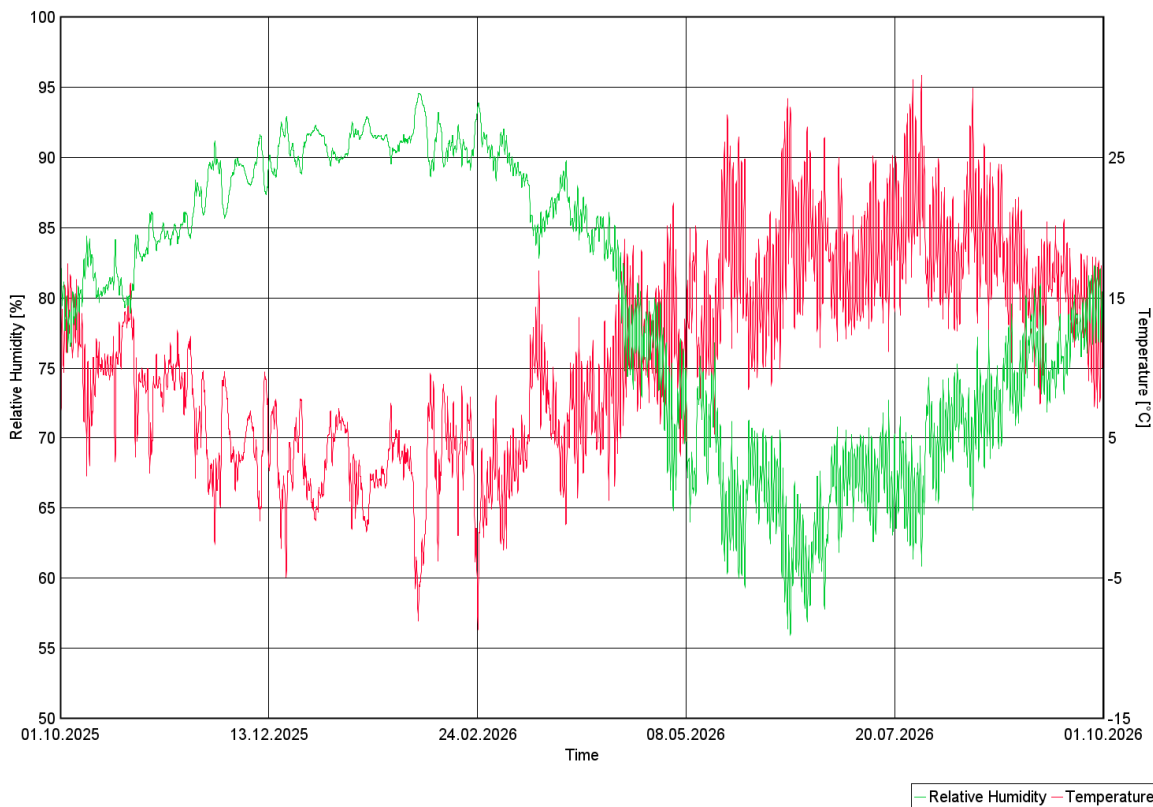


Bilag 8

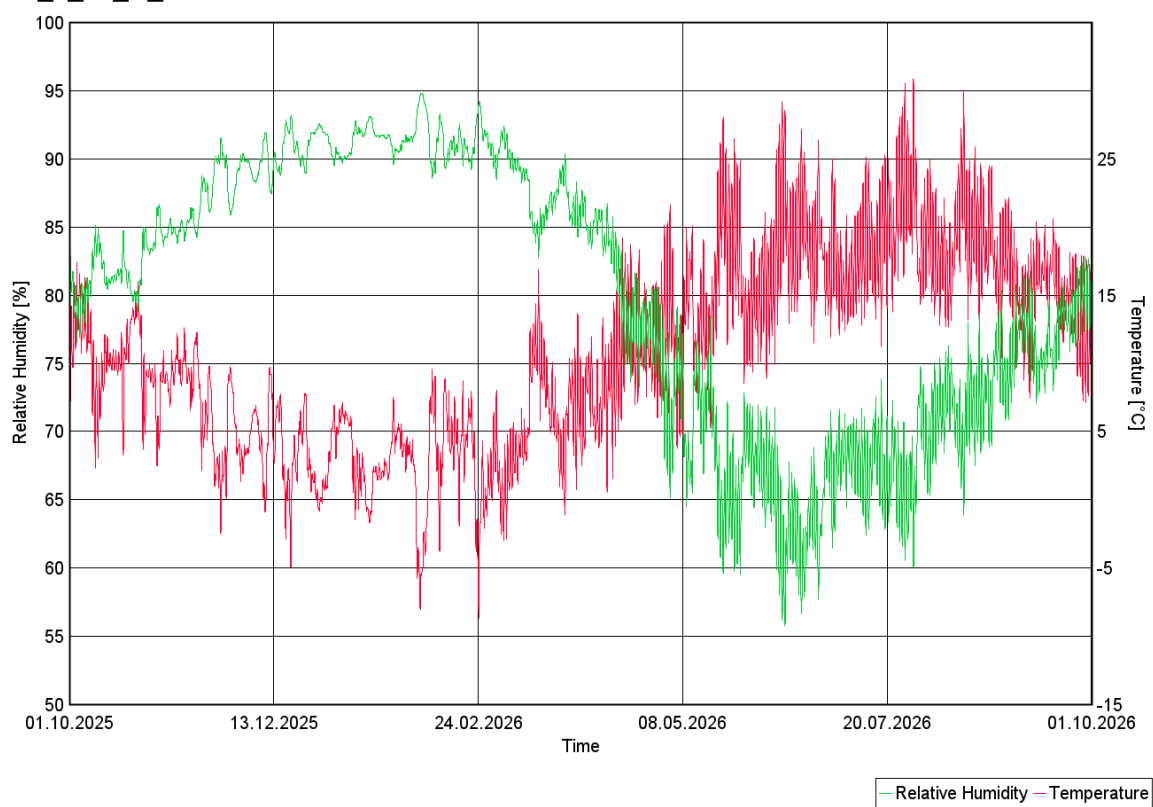
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

MI_3_12_N_VS2



MI_3_13_N_VS3

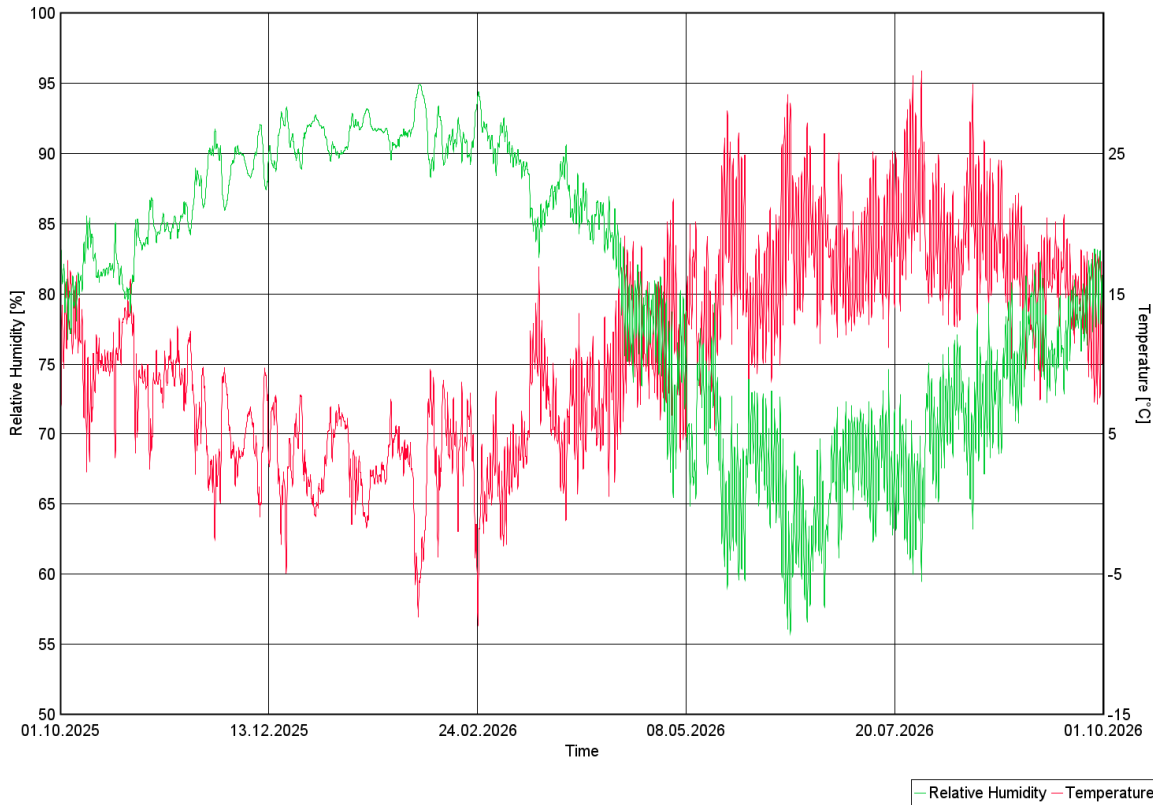


Bilag 8

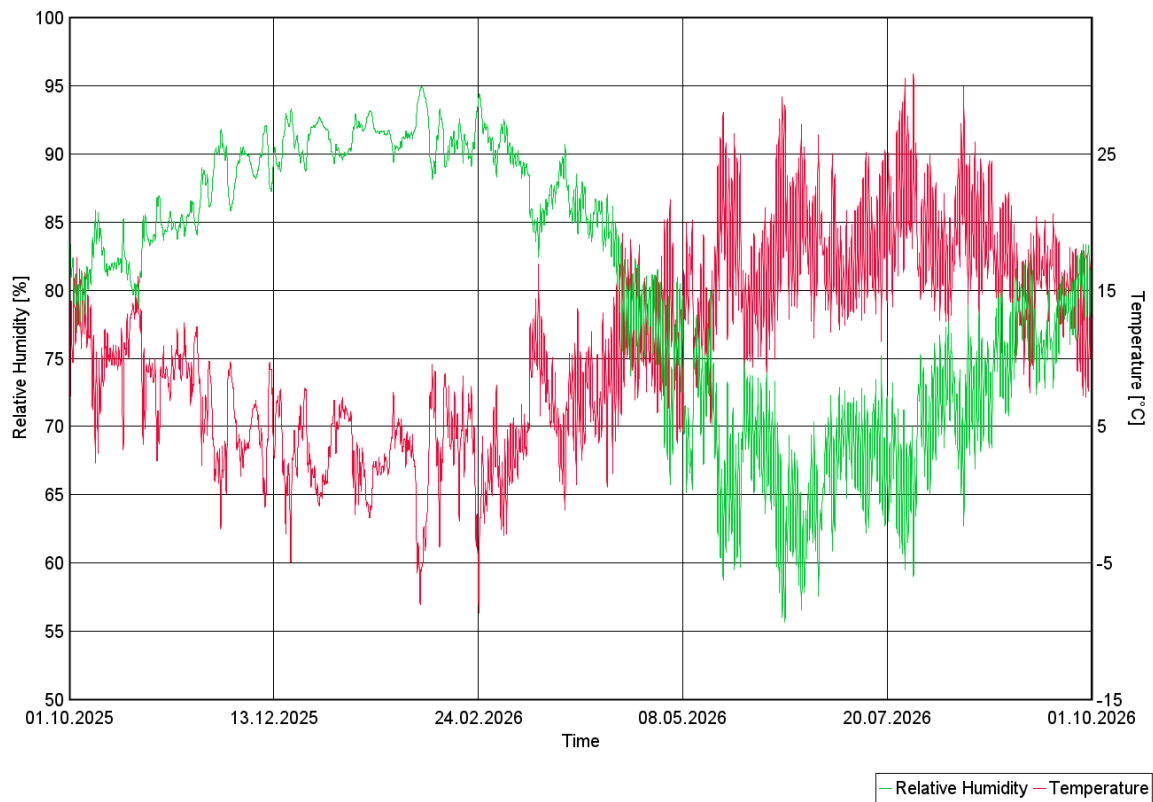
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

MI_3_14_N_VS14



MI_3_15_N_VS5

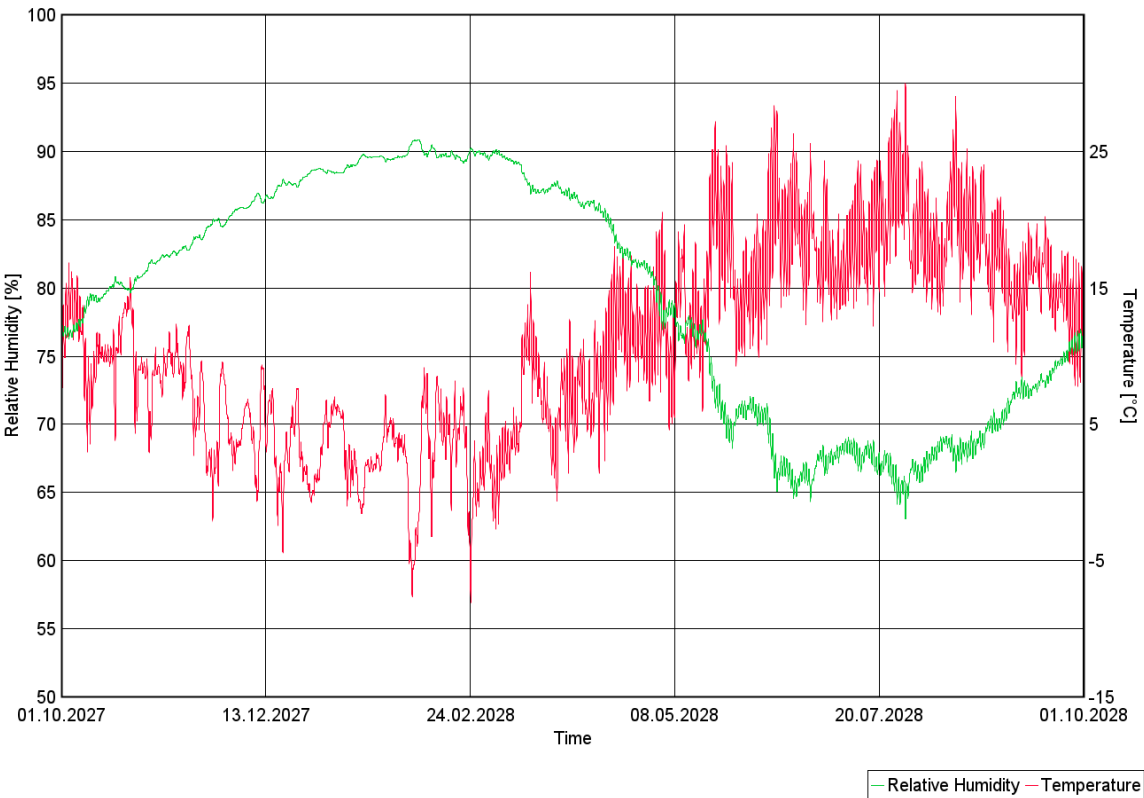


Bilag 8

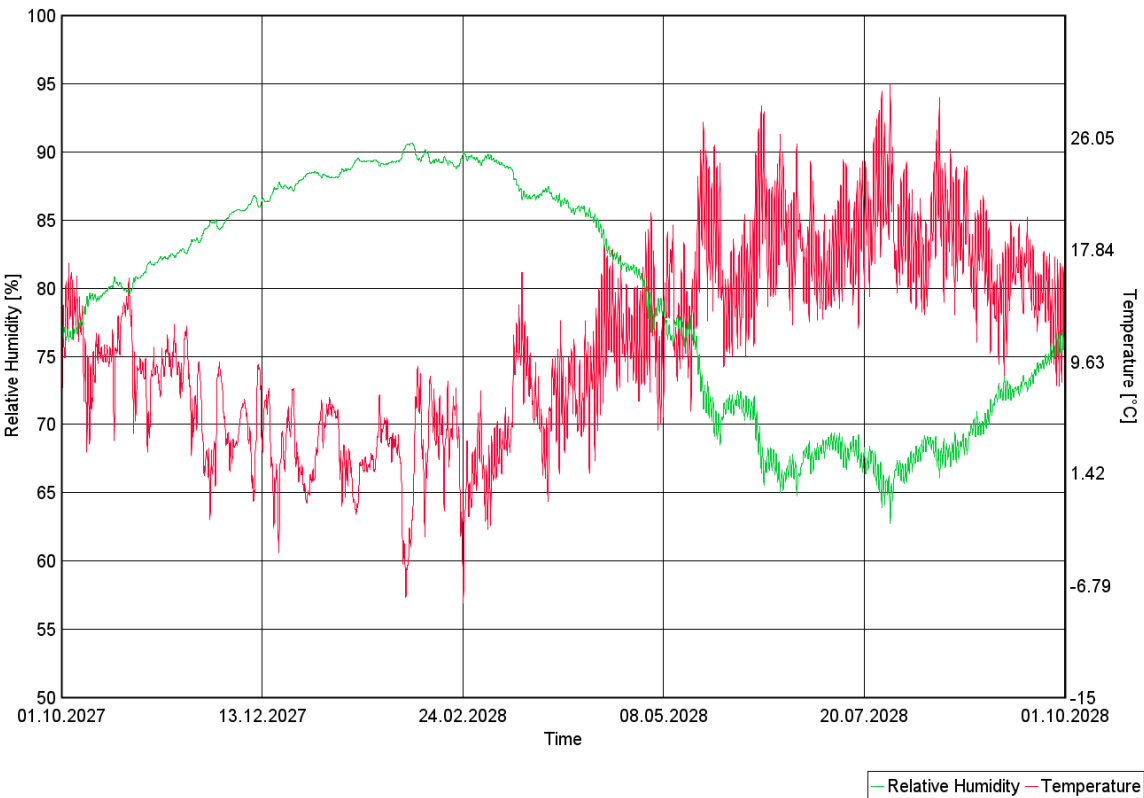
Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

TF_3_9_N_VS2



TF_3_12_N_VS3

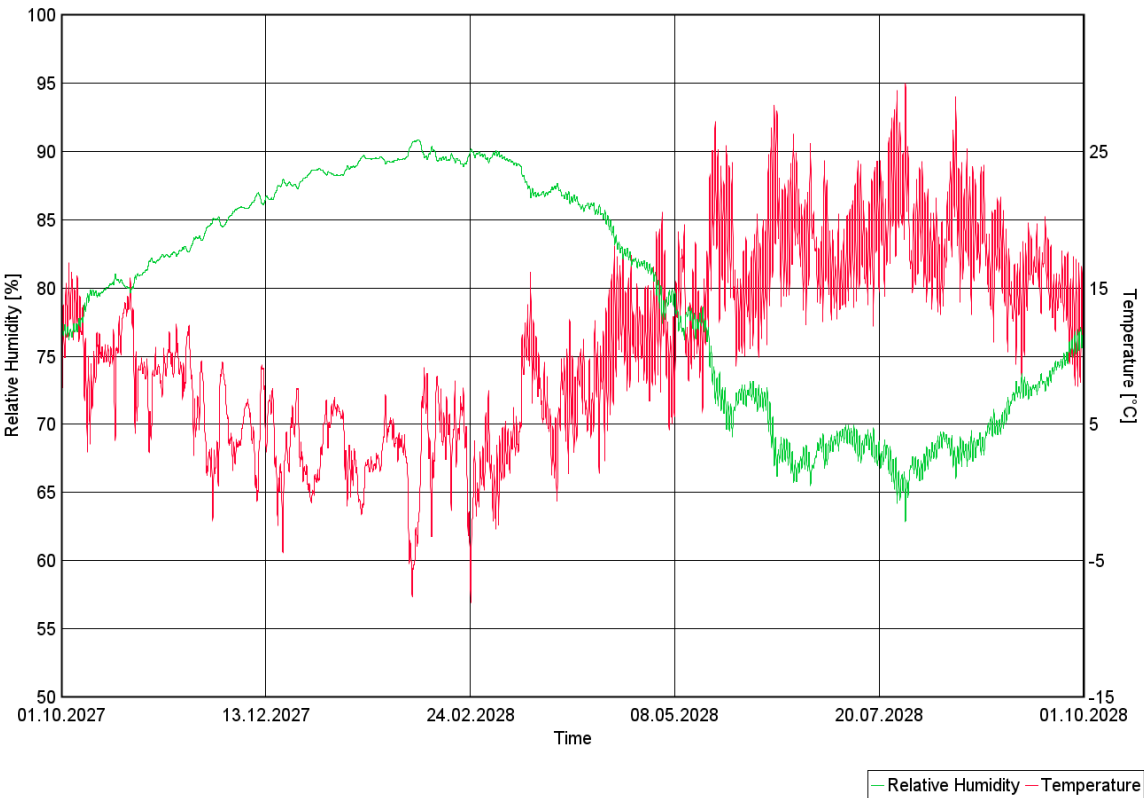


Bilag 8

Grafer fra simulering i WUFI

Dato: 09.06.2023

TF_3_13_N_VS4



TF_3_15_N_VS5

