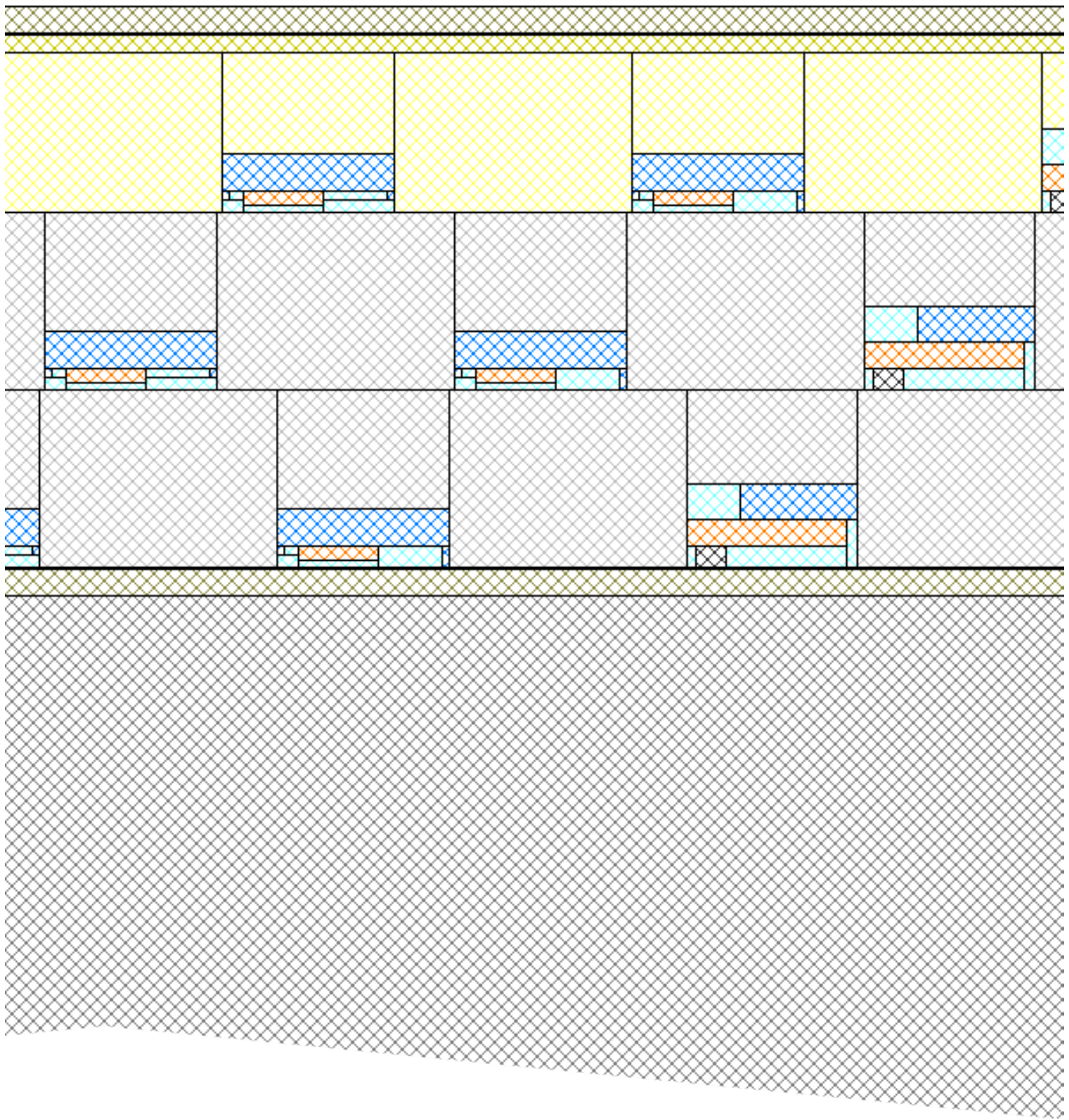




Fugts påvirkning på isoleringsevnen ved flade tage

Dynamiske hygrotermiske simuleringer

28. januar 2025



TEKNOLOGISK
INSTITUT



**TEKNOLOGISK
INSTITUT**

Fugts påvirkning på isoleringsevnen ved flade tage

Dynamiske hygrotermiske simuleringer

Rekvirent:

Tector
Att. Lasse Regin & Uffe Furlig Larsen
Oliemøllegade 8
2100 København Ø

Udarbejdet af:

Teknologisk Institut
Gregersensvej 4
2630 Taastrup
Byggeri og Anlæg
Britt Haker Høegh

Kvalitetssikring:

Sagsansvarlig: Lies Vanhoutteghem, tlf. 7220 2226, liva@teknologisk.dk
Godkendt af: Lies Vanhoutteghem, tlf. 7220 2226, liva@teknologisk.dk

Opgavenr.: P2011162-1

Versionsnr.: 2

28. januar 2025

Resultater af Institutts opgaveløsning beskrevet i denne rapport, herunder fx vurderinger, analyser og udbedringsforslag, må kun anvendes eller gengives i sin helhed, og må alene anvendes i denne sag. Institutts navn eller logo eller medarbejdernes navn må ikke bruges i markedsføringsøjemed, medmindre der foreligger en forudgående, skriftlig tilladelse hertil fra Teknologisk Institut, Direktionssekretariatet.



Indhold

1.	Indledning	5
2.	Baggrund.....	5
3.	Formål.....	5
4.	Data og modtagne informationer.....	6
5.	Beregningsmetoder	6
6.	Input og definitioner for beregningsmodeller	6
6.1.	Definition af beregningstværsnit	6
6.1.1.	Laboratorietest.....	6
6.1.2.	Test i fladt tag	8
6.2.	Materialedata	9
6.3.	Randbetingelser	10
6.3.1.	Laboratorietest.....	10
6.3.2.	Test i fladt tag	10
6.4.	Fugttekniske materialeforhold ved beregningsstart.....	11
6.5.	Simuleringsperiode	11
6.5.1.	Laboratorietest.....	11
6.5.2.	Test i fladt tag	11
6.6.	Simulerede varianter	11
7.	Beregningsresultater – Dataudtræk til rekvirenten	12
7.1.	Laboratorietest.....	12
7.1.1.	Datafiler med resultater af temperatur og RF i definerede punkter	12
7.1.2.	Film fra defineret periode i 1D simuleringen	13
7.2.	Test i fladt tag	13
7.2.1.	Datafiler med resultater af temperatur, RF og vandindhold i vægt-% i definerede punkter	13
7.2.1.1.	Test med 0 liter vand i testkassen, startfugt 72 % RF ved 20 grader Celsius.....	17
7.2.1.2.	Test med 1 liter vand i testkassen	18
7.2.1.3.	Test med 2 liter vand i testkassen	19
7.2.2.	Piktogrammer af fordeling af RF, temperatur og vandindhold i vægt-% over beregningstværsnittet	20



7.2.2.1.	Piktogrammer af fugtfordeling på tre dage i forårsperioden – fugten bliver presset nedad i konstruktionen.....	21
7.2.2.2.	Piktogrammer af fugtfordeling på tre dage i efterårsperioden – fugten bliver presset opad i konstruktionen.....	22
7.2.3.	Film fra definerede perioder i 2D simuleringen	23
8.	Supplerende undersøgelse for alternerende fugtniveauer i varmtagskonstruktioner.....	23
9.	Vurdering	25



1. Indledning

Efter aftale med Lasse Regin v/Tector har Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg gennemført dynamiske hygrotermiske simuleringer af et testforløb i 6 testkasser på Instituttets laboratorie i Århus C og af et forsøg med 4 testkasser indbygget i et fladt tag i Incubas bygning 82 på adressen Palle Juul Jensens Blvd, 8200 Aarhus N.

Simuleringerne blev udført af Britt Haker Høegh, Teknologisk Institut, Byggeri og Anlæg.

Rekvirentens kontaktperson under simuleringerne var Uffe Furlig Larsen v/Tector.

2. Baggrund

Denne rapport indgår som dokumentation i projektet "Fugts påvirkning på isoleringsevnen ved flade tage". I forbindelse med udvikling af nye sensorer, der logger data for temperatur, relativ luftfugtighed (fremover "RF") og vandindhold, har Tector fået indbygget sensorer i dels testkasser til laboratorieforsøg og i testkasser, indbygget i et af Incubas bygningers flade tage. Testkasserne på laboratoriet blev på deres opadvendte og nedadvente overflade udsat for definerede randbetingelser (temperatur og RF), mens testkasserne i det flade tag blev udsat for randbetingelser på stedet, dvs. udeklimaet på stedet og kontorindeklima.

Som led i projektet, anmoder rekvirenten Teknologisk Institut om at udføre dynamiske hygrotermiske simuleringer af fugtforholdene i testkasserne under laboratorieforsøget og i det flade tag, for at rekvirenten kan sammenholde beregningsresultaterne med sensorernes måleresultater.

3. Formål

Ifølge aftale med rekvirenten havde opgaven følgende formål:

- At udføre dynamiske hygrotermiske simuleringer af testkasserne
 - under laboratorieforsøg "Test 2", som 1D-simulering (én-dimensional-simulering),
 - i det flade tag, som 2D-simulering (to-dimensional-simulering).
- At levere resultater fra simuleringer af
 - laboratorieforsøgets 1D-model i form af data (output i .txt-filer) for temperatur og RF i definerede punkter i simuleringsmodellen, samt en film fra en defineret tidsperiode fra en af simuleringerne.
 - det flade tags 2D-model i form af data (output i .txt-filer) for temperatur, RF og vandindhold i vægt-% fra definerede punkter i simuleringsmodellen, herunder fra træklodsen i loggerne af type Flatty og Woody og fra referencepunkter i isoleringslagene, samt grafer af simuleringresultaterne.
- At udarbejde nærværende dokumentationsrapport til beskrivelse af simuleringerne.



4. Data og modtagne informationer

Rekvirenten har oplyst forhold beskrevet i afsnit "Baggrund".

Fra projektet forelå der følgende baggrundsinformationer:

- [1] Loggerdata fra sensorer indbygget i testkassen, fremsendt af Uffe Furlig Larsen, af den 18-11-2024.
- [2] Billeddokumentation: 'Woodsense – Opbygning af kasser', dateret den 16-09-2024.
- [3] Udsnit af en snittegning igennem bygningen med tagopbygning af Incubas bygning, uden dato.
- [4] Fotos af labels af den anvendte isolering i testkasserne.
- [5] Datablad for vådrumsmembran LIP VS 30, anvendt i testkasserne.
- [6] Datablad for dampspærre RAW PRO Standard, anvendt i testkasserne.
- [7] PowerPoint: 'TI Flade tage test – simulering, af tector', Analyse dateret den 02-10-2024.

5. Beregningsmetoder

Simuleringerne blev udført gennem brug af WUFI Pro, Version 6.8 og WUFI 2D, Version 4.6. WUFI Pro og WUFI 2D er bygningsfysiske beregningsværktøjer til dynamiske hygrotermiske simuleringer, som kan vise temperatur, relativ fugtighed og vandindhold i definerede punkter i konstruktioner over tid.

6. Input og definitioner for beregningsmodeller

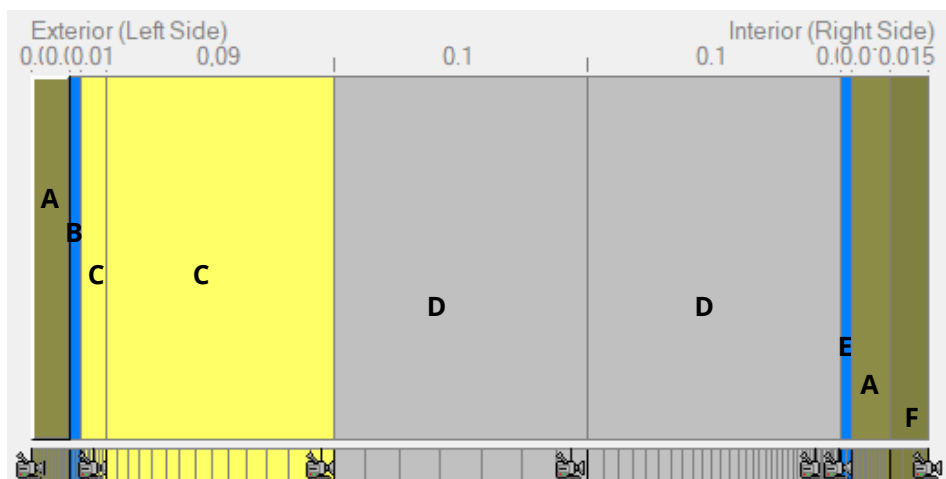
6.1. Definition af beregningstværsnit

Alle testkasserne er opbygget som vist i [2] med følgende tykkelser af materialer oppefra og ned:

- 15 mm krydsfinerplade, vandfast og overfladebehandlet
- 0,2 mm dampspærrefolie, RAW Pro Standard
- 100 mm isolering toplag, HARDROCK ENERGY, Rockwool
- 100 mm isolering mellemlag, UNDERLAY ENERGY, Rockwool
- 100 mm isolering nederste lag, UNDERLAY ENERGY, Rockwool
- Vådrumsmembran som dampspærre, LIP VS 30
- 15 mm krydsfinerplade, vandfast og overfladebehandlet
- 15 mm krydsfinerplade, vandfast

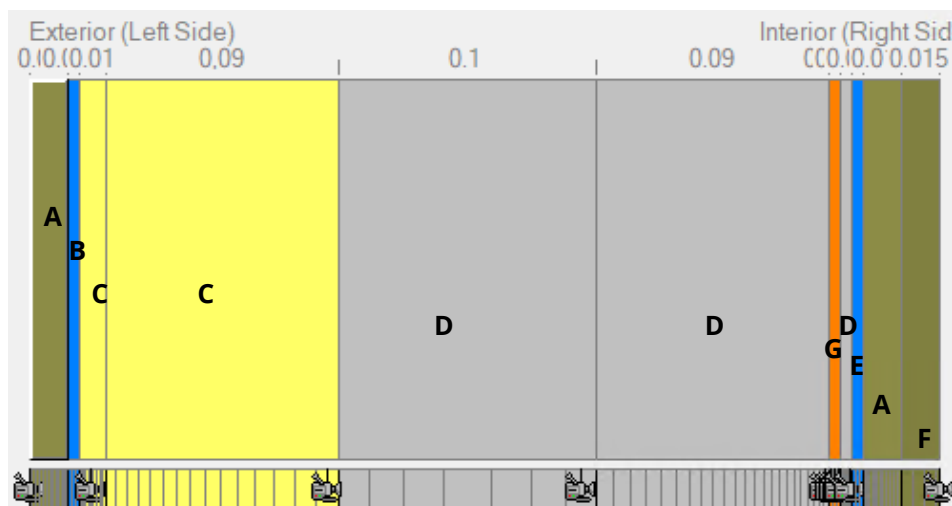
6.1.1. Laboratorietest

For at simulere laboratorietesten blev der i WUFI Pro opstillet en model med materialeglag som vist i *Figur 1*. Testkassernes opadvendte side ligger mod venstre, den nedadvendte side ligger mod højre i modellen. De små ikoner af kameraer nederst i modellen angiver de punkter, hvor simuleringsresultater blev trukket ud. Bogstaverne angiver materialetype jf. næste afsnit.



Figur 1: Beregningstværsnit af testkasse i laboratorieforsøg med angivelse af punkter, hvor resultater blev trukket ud (kamasymboler). Opadvendt kasseside mod venstre, nedadvendt kasseside mod højre. Bogstaverne angiver materialetype jf. afsnit 6.2.

Derudover blev der simuleret én variant, se Figur 2, med et lag fyrretræ på niveaumed den nederste isoleringslag, for at undersøge effekten af et forholdsvis diffusionstæt element (som fx plasticasse af sensorerne) i isoleringen.



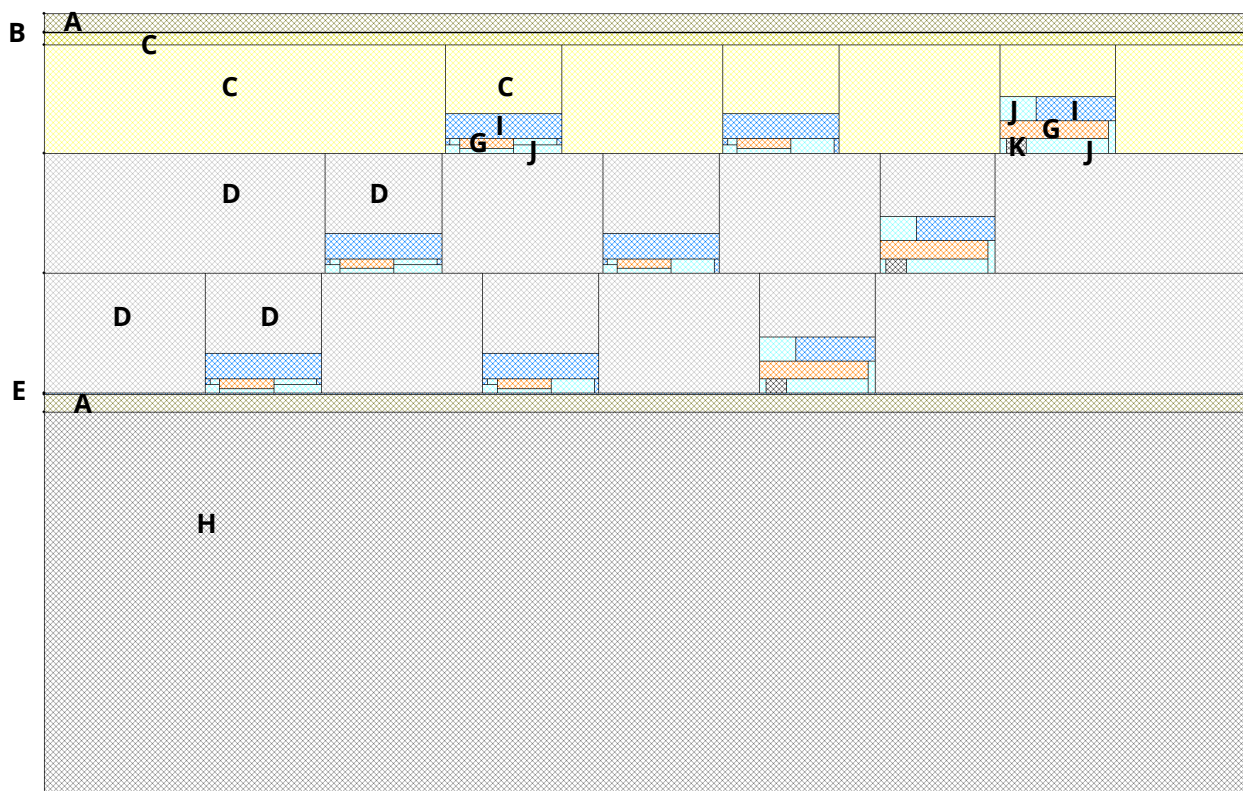
Figur 2: Variant af beregningstværsnit af testkasse i laboratorieforsøg med et lag fyrretræ i det nederste isoleringslag. I tværsnittet er de punkter angivet, hvor resultater blev trukket ud (kamasymboler). Opadvendt kasseside mod venstre, nedadvendt kasseside mod højre. Bogstaverne angiver materialetype jf. afsnit 6.2.



6.1.2. Test i fladt tag

For at simulere in-situ testen i det flade tag hos Incuba blev der opstillet en model i WUFI 2D. Der blev valgt en 2D-simulering, for også mere detaljeret at undersøge fugtfordelingen omkring loggerne. Modellens geometri er vist i *Figur 3*. Testkassernes opadvendte side ligger øverst i modellen. Bogstaverne angiver materialetype jf. *afsnit 6.2*.

I de fysiske testkasser er der per niveau indbygget en Flatty- og en Woody-sensor. Men der er modelleret tre kolonner sensorer, to gang med Flatty-sensorer og en gang med Woody-sensorer. Sensorerne er modelleret i lidt forskudte kolonner. Der er to kolonner med Flatty-sensorer for at undersøge om det har indflydelse på simuleringresultaterne, at der er enten én eller to åbninger i siden af Flatty-sensoren. I kolonnen til venstre snittet lagt, så der er to åbninger i Flatty-sensorens plastikkasse, og i den midterste kolonne er snittet lagt så der er en åben og en lukket side i Flatty-sensorens plastikkasse. Kolonnen til højre repræsenterer Woody-sensorer.



Figur 3: Beregningstværsnit af testkasse i test i fladt tag. Opadvendt kasseside ligger øverst i modellen. Bogstaverne angiver materialetype jf. jf. afsnit 6.2.



6.2. Materialedata

Materialetyperne er angivet af rekvirenten og projektets øvrige deltagere. Materialedata blev valgt fra den i programmet tilgængelige bibliotek eller almindeligt på internettet tilgængelige materialedata.

Tagmembranen i in-situ testen i det flade tag er simuleret som en randbetingelse ved at definere s_d -værdien, se afsnit 6.3.2.

Tabel 1 viser de valgte materialer med deres densitet, varmeledningsevne og diffusionsmodstandsfaktor.

Tabel 1: Anvendte materialer og deres densitet, varmeledningsevne og diffusionsmodstandsfaktor.

	Betegnelse	Densitet [kg/m ³]	Varmeledningsevne [W/mK]	Diffusions- modstandsfaktor μ [-]
A	Krydsfinerplade, vandfast med overfladebehandling → Plywood Exterior-Grade	578	0,098	782
B	RAW PRO PE-folie → vapour barrier, $s_d = 80$ m	130	2,3	40.000
C	Mineraluld, Hardrock → Masterrock NB	166	0,036	1,3
D	Mineraluld, Underlay Energy → Masterrock GF	97	0,035	1,3
E	Vådrumsmembran LIP VS 30 → vapour barrier, $s_d = 80$ m	130	2,3	40.000
F	Krydsfinerplade, almindeligt → Veneer Plywood BFU 100	427	0,12	188
G	Fyrtræ → Spruce, radial	455	0,09	130
H	Beton → Concete, C35/45	2.220	1,6	248
I	Sensorernes plastikkasse, plastprodukt → Vapour barrier, $s_d =$	130	2,3	80.000
J	Luft → Air Layers i forskellige tyk- kelser [mm] fra programmets bibliotek	1,3	(1-5 mm) 0,047 (10 mm) 0,071 (20 mm) 0,13 (30 mm) 0,18	(1-5 mm) 0,79 (10 mm) 0,73 (20 mm) 0,56 (30 mm) 0,46
K	Metalskrue → Steel	7900	60	1.500.000



6.3. Randbetingelser

6.3.1. Laboratorietest

- Klima ovenover testkasserne, angivet som gennemsnitsværdier over testperioden
 - Temperatur: 60,71 °C
 - Relativ luftfugtighed: 8,54 %
- Klima på undersiden af testkasserne, angivet som gennemsnitsværdier
 - Temperatur: 23,4 °C
 - Relativ luftfugtighed: 42,5 %
- Overgangsisolanser jf. DS 418:2011, 7. udgave
Udvendigt, lodret nedadvendt: 0,04 m²·K/W
Indvendigt, lodret, nedadvendt: 0,17 m²·K/W

6.3.2. Test i fladt tag

- Udeklima
Der blev hentet klimadata fra portalen 'Climate Data Store' for placeringen "Skejby" (56,19°N/10,18°Ø), nordlig bydel i Århus, hvor Incubas bygning 82 er placeret. Der blev hentet data af følgende nøgletal (engelske betegnelser): Temperature, Relative Humidity, Short-Wave Radiation, Wind, Rain, Cloud Index, Air Pressure.
Klimafilen er sat sammen af udeklimadata fra 1. januar 2024 til den 6. december 2024. De resterende dage i december er udfyldt med klimadata fra 2023 fra samme lokation.
- Indeklima
Der forelå ikke loggerdata fra indeklimaet på kontoret i Incubas bygning. Der blev derfor antaget et indeklima, forventeligt i kontorer, svarende til grænsen mellem fugtbelastningsklasse (FBK) 1 og 2 jf. SBI-anvisning 277, *Fugt i bygninger – Teori, beregning og undersøgelse*, 2023, Kapitel 3.3.3 Fugtbelastningsklasser, Tabel 4, som er baseret på DS/EN ISO 13788 fra 2013.
 - Temperatur: 20-23 °C
 - Relativ luftfugtighed: 35-61 % RF.
- Overgangsisolanser jf. DS 418:2011, 7. udgave
 - Udvendigt, lodret nedadvendt: 0,04 m²·K/W
 - Indvendigt, lodret, opadvendt: 0,1 m²·K/W
- Øvrige overfladeforhold på oversiden af kasserne
 - Short-Wave Radiation Absorptivity: 0,2
 - Long-Wave Radiation Emissivity: 0,9
 - Ground Short-Wave Reflectivity: 0,2
 - Ground Long-Wave Emissivity: 0,9
 - Ground Long-Wave Reflectivity: 0,1
 - s_d-value for tagpap: 300 m for Bituminous Felt with PVC
 - Adhering fraction of rain: 1



6.4. Fugttechniske materialeforhold ved beregningsstart

Generelt blev materialerne sat til en startfugt på 50 % RF ved 20 °C. Kun i testen i det flade tag med 0 liter vandtilførsel blev materialernes startfugt sat til 72 % RF ved 20 °C.

I de øverste 10 mm af det øverste lag mineraluld blev vandindhold varieret, så det afspejlede vandtilførsel til testkasserne under testforløbet. Kasserne har en størrelse på 600 x 600 mm. Ud fra den under testforløbet tilførte vandmængde blev vandindholdet i de øverste 10 mm af isoleringen sat til:

Vandmængde påført i testkasse	[liter]	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4
Vandindhold i de øverste 10 mm af isoleringen	[kg/m ³]	55,6	111,1	166,7	222,2	277,8	555,6	1111,1

Under simuleringen viste det sig, at casen med vandtilførsel af 4 liter i testkassen ikke kunne simuleres, da programmet automatisk reducerede vandindholdet på 1111,1 kg/m³ i isoleringen til 938 kg/m³. Denne case blev derfor ikke simuleret.

6.5. Simuleringsperiode

6.5.1. Laboratorietest

Simuleringsperioden er i 1D-simuleringerne sat til 1 måned generelt.

I simuleringen jf. *Figur 2*, hvor der er modelleret et lag fyrretræ på niveau med den nederste sensor, er simuleringsperioden sat til 1 år, for at kunne visualisere effekten af et forholdsvis diffusionstæt element nederst i isoleringen.

6.5.2. Test i fladt tag

Simuleringerne i 2D-simuleringerne er blev udført over 7 år, for at sikre resultater, der viser en rimelig ligevægt (dvs. samme fugtniveau set over et år). At der ikke opnås absolut stabile tilstande, hænger sammen med, at der i simuleringsmodellen forekommer en vis fugtafgivelse gennem testkassernes top og bund, idet intet materiale er absolut diffusionstæt.

6.6. Simulerede varianter

Oversigten i Tabel 2 viser de udførte simuleringer af laboratorietesten og testen i det flade tag.

Tabel 2: Udførte dynamiske hygrotermiske simuleringer.

Beregningstværsnit	Vandtilførsel under laboratorietest i liter							
	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1	2	4
Laboratorietest 1D jf. <i>Figur 1</i>	•	•	•	•	•	•		
Laboratorietest 1D med et lag fyrretræ jf. <i>Figur 2</i>						•		
Test i det flade tag 2D jf. <i>Figur 3</i>	•	•	•	•	•	•	•	•



7. Beregningsresultater – Dataudtræk til rekvirenten

På grund af usikkerheder i både inputdata men også randbetingelser må beregningsresultaterne ikke betragtes som eksakte. Derudover baserer beregningerne i programmerne sig primært på fugttransport via diffusion, og ikke på kapillartransport, tyngdekraft eller konvektion.

Det er sammenligningen af forskellige scenarier og udviklingen i tværsnittet over tid, som muliggør en vurdering af forholdene.

7.1. Laboratorietest

7.1.1. Datafiler med resultater af temperatur og RF i definerede punkter
Beregningsresultaterne fra laboratorietesten er afleveret som følgende .txt-filer.

-  Case 1 Test 2, 1 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 2 Test 2, 0,8 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 3 Test 2, 0,6 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 4 Test 2, 0,4 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 5 Test 2, 0,2 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 6 Test 2, 0 l i 10 mm_wufi.txt
-  Case 7 Test with alternating temperature and wooden layer_wufi.txt

Forklaring på filnavnene er følgende:

- "Case 1-7": Løbenumrene fra beregningen
- "Test 2": Det er laboratorietest nr. 2, der er simuleret
- "0 l" til "1 l": Mængden af vand påført testkassen
- "10 mm": Vandet er indlejret i de øverste 10 mm af isoleringen

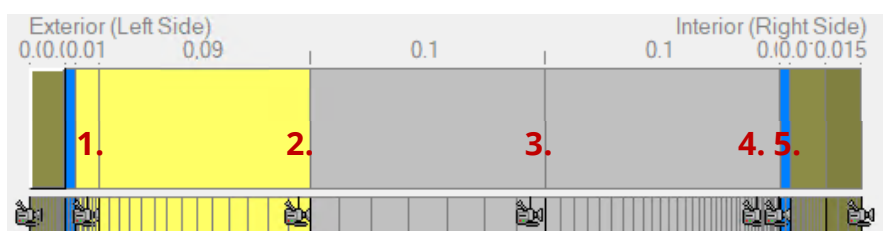
I hver output-fil findes resultater (temperatur og RF) fra forskellige punkter (kamerapositioner) i modellen, som er markeret med tal fra **1.** til **5.** i beregningstværsnittet i *Figur 4* på næste side. De yderste kamerapositioner har ikke fået tildelt numre, da der er tale om den opadvende (Exterior) og den nedadvende (Interior) testkasseoverflade, som er irrelevante for rekvirentens evalueringer.

Punkterne **1.** til **5.** har i .txt-filerne følgende navne:

- 1.** Midt i de øverste 10 mm af det øverste lag mineraluld:
"Rockwool Masterrock NB (Without lamination) (0,005344 m)"
- 2.** Nederst i det øverste lag mineraluld:
"Rockwool Masterrock NB (Without lamination) (0,085285 m)"
- 3.** Nederst i det midterste lag mineraluld:
"Rockwool Masterrock GF (Without lamination) (0,093847 m)"



4. Ca. 10 mm over bunden af boksen, dvs. 10 mm over bunden af det nederste lag mineraluld:
"Rockwool Masterrock GF (Without lamination) (0,089964 m)"
5. Nederst i det nederste lag mineraluld:
"Rockwool Masterrock GF (Without lamination) (0,09959 m)"



Figur 4: Beregningstværsnit af testkasse i laboratorieforsøg med nummerering af punkterne (kamera-positioner) til udtræk af data. De to kamerapositioner til højre og venstre er ikke nummereret, da disse ligger udenfor testkassen og dermed er irrelevante for rekvirentens evaluering.

7.1.2. Film fra defineret periode i 1D simuleringen
Derudover er der afleveret følgende film i .avi-format:

 WBDK Tector med Sprucelag.avi

I filmen vises resultaterne af de dynamiske hygrotermiske simuleringer over tværsnittet gennem konstruktionen med en temperaturkurve (rød), en kurve af den relative luftfugtighed (grøn) og en kurve for vandindholdet i materialet (blå). Alle kurver har en "skygge" i hhv. lyserød, lysegrøn og lyseblå, som viser intervallet, som hhv. temperatur, relativ luftfugtighed og vandindhold svinger i over beregningsperioden.

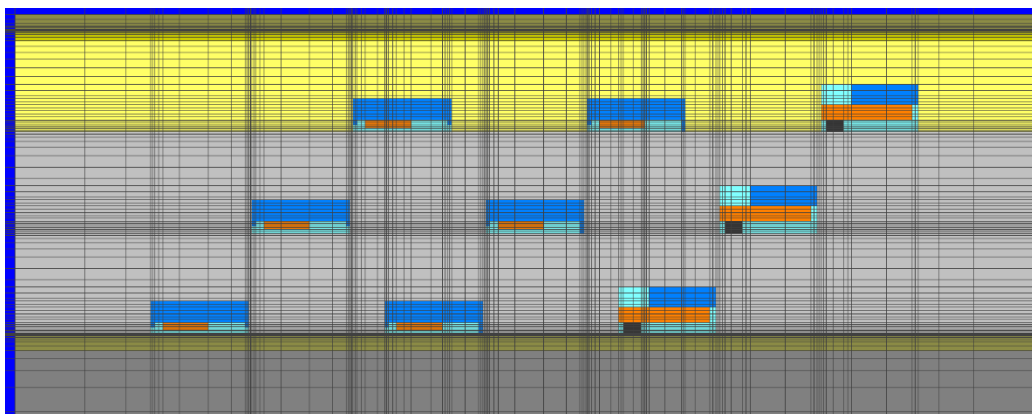
Derudover ses der over hvert diagram med graferne et vandret søjlediagram, hvor flowet af temperatur og vanddamp er angivet med vandrette hhv. lyserøde og lyseblå søjler med en pilespids. Længden af søjlen angiver størrelsesordenen af flowet, mens pilespiden angiver retningen.

7.2. Test i fladt tag

7.2.1. Datafiler med resultater af temperatur, RF og vandindhold i vægt-% i definerede punkter

Beregningstværsnittet er vist i Figur 3 i afsnit 6.1.2, og gengives – farvelagt – i Figur 5. Der ses tre kolonner (lidt skråt forskudt) af sensorer med de tre typer loggere:

- Kolonne til venstre: Flatty-sensor åben på begge sider
- Kolonne i midten: Flatty-sensor åben på en side, lukket på den anden
- Kolonne til højre: Woody-sensor

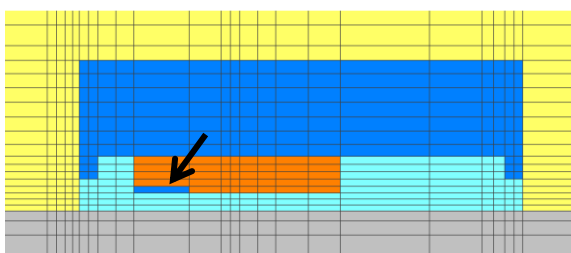


Figur 5: Beregningstværsnittet af test i fladt tag i farver som oversigt over placering af de tre kolonner med de tre typer loggere. Af betondækket er der kun vist de øverste centimeter.

I det følgende angives de præcise punkter i modellen, hvor beregningsresultaterne er trukket ud. I aftale med rekvirenten er der trukket data ud for Flatty-sensorerne i kolonnen til venstre, dvs. dem med åbninger i begge sider af sensorkassen, og for Woody-sensorerne i kolonnen til højre. Der er ikke trukket data ud for Flatty-sensorerne i kolonnen i midten, bl.a. fordi deres resultater lå meget tæt op ad dem fra Flatty-sensorerne i kolonnen til venstre.

Målepunkt i Flatty-sensor med åbning i begge sider

Piktogrammet i Figur 6 viser placering af punktet til udtræk af data i Flatty-sensor, repræsentativt i det øverste isoleringslag. Valgt datacelle ses som blå celle i orange træklods.

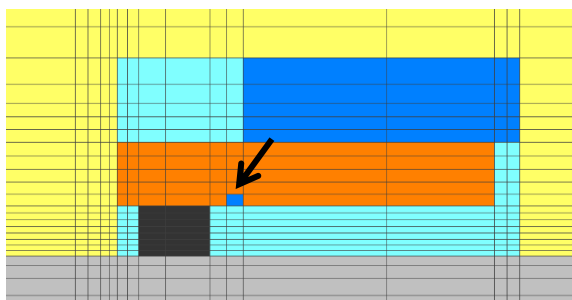


Figur 6: Flatty-sensor: Markering af celle til dataudtræk – se pil på blå celle.



Målepunkt i Woody-sensor

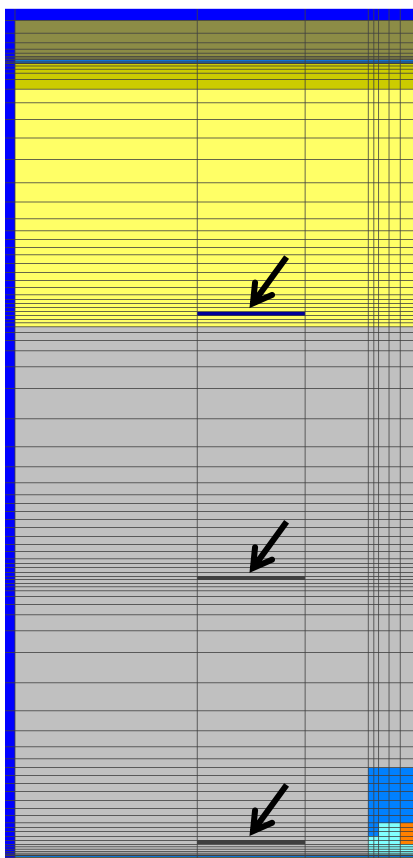
Piktogrammet i Figur 7 viser placering af punktet til udtræk af data i Woody-sensor, repræsentativt i det øverste isoleringslag. Valgt datacelle ses som blå celle i orange træklods.



Figur 7: Woody-sensor: Markering af celle til dataudtræk – se pil på blå celle.

Målepunkter i mineraluldslagene som reference

Piktogrammet i Figur 8 viser placering af punkter til dataudtræk i alle isoleringslagene som grå celler.



Figur 8: Referencepunkter i mineraluldslagene: Markering af celler til dataudtræk – se pile på grå celler.



Der er genereret 9 sæt outputfiler. Hvert sæt indeholder en .txt-fil med datasæt fra de 9 punkter i beregningsmodellen og en .png-fil med grafer over de respektive data:

 0 liter RH.png
 0 liter RH.txt
 0 liter temperature.png
 0 liter temperature.txt
 0 liter vandindhold i masseprocent.png
 0 liter vandindhold i masseprocent.txt
 1 liter RH.png
 1 liter RH.txt
 1 liter temperature.png
 1 liter temperature.txt
 1 liter vandindhold i masseprocent.png
 1 liter vandindhold i masseprocent.txt
 2 liter RH.png
 2 liter RH.txt
 2 liter temperatur.png
 2 liter temperatur.txt
 2 liter vandindhold i masseprocent.png
 2 liter vandindhold i masseprocent.txt

Organisering af data i .txt-filerne er vist i *Tabel 3*, og graferne i .png-filerne viser udviklingen af hhv. RF, temperatur og vandindhold i vægt-% i de definerede punkter i modellen over hele beregningsperioden, dvs. over 7 år.

Tabel 3: Organisering af .txt-outputfiler

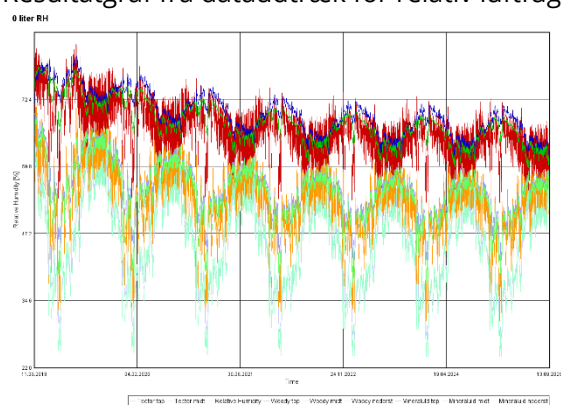
	Temperatur	RF	Vandindhold i vægt-%
0 liter	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor
	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor
	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt
1 liter	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor
	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor
	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt
2 liter	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor	3 x Flatty-sensor
	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor	3 x Woody-sensor
	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt	3 x referencepunkt

I de følgende afsnit vises grafer af resultaterne af de enkelte outputfiler, samt at outputfilernes navne er angivet.



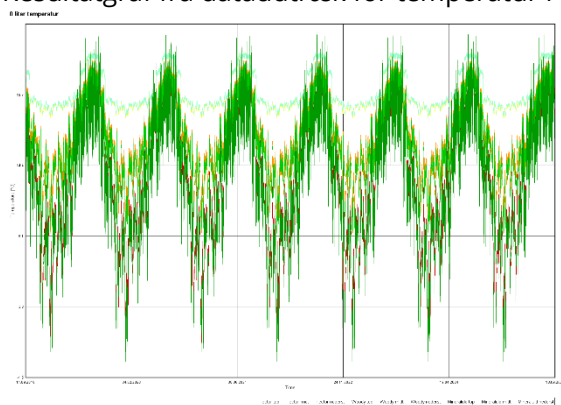
7.2.1.1. Test med 0 liter vand i testkassen, startfugt 72 % RF ved 20 grader Celsius

Resultatgraf fra dataudtræk for relativ luftfugtighed i målepunkterne:



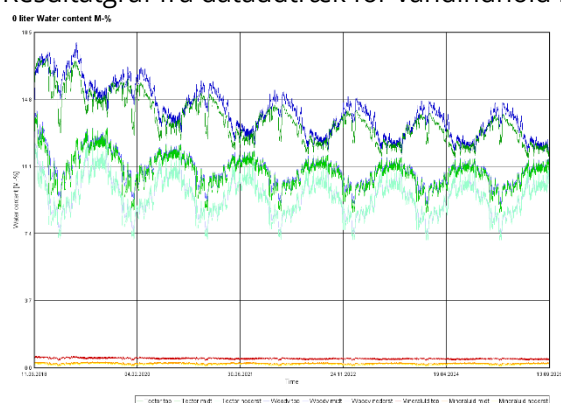
Data gemt som .txt-fil under navnet: 0 liter RH.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for temperatur i målepunkterne:



Data gemt som .txt-fil under navnet: 0 liter temperature.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for vandindhold i vægt-% i målepunkterne:

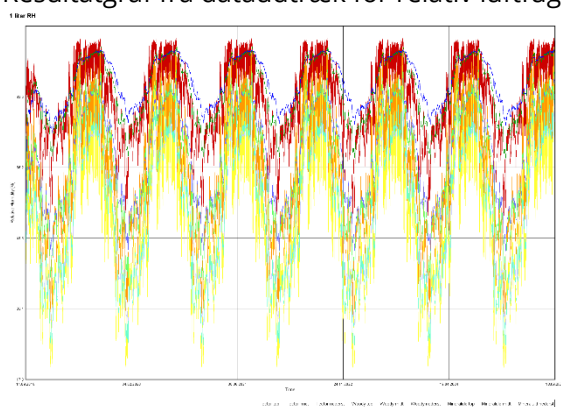


Data gemt som .txt-fil under navnet: 0 liter vandindhold i masseprocent.txt



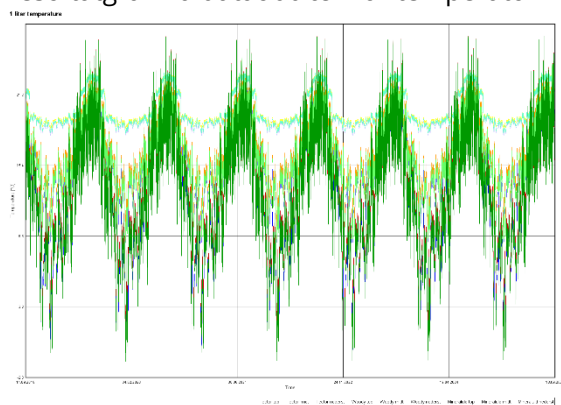
7.2.1.2. Test med 1 liter vand i testkassen

Resultatgraf fra dataudtræk for relativ luftfugtighed i målepunkterne:



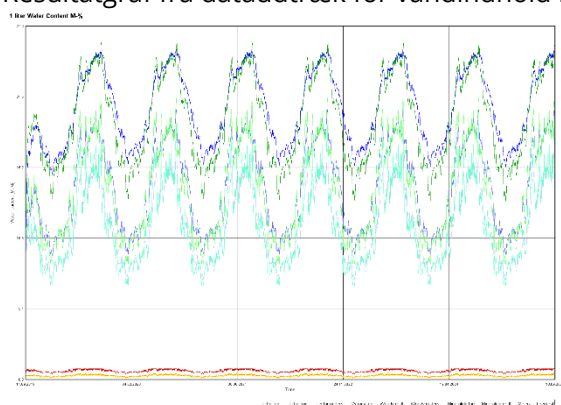
Data gemt som .txt-fil under navnet: 1 liter RH.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for temperatur i målepunkterne:



Data gemmes som .txt-fil under navnet: 1 liter temperature.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for vandindhold i vægt-% i målepunkterne:

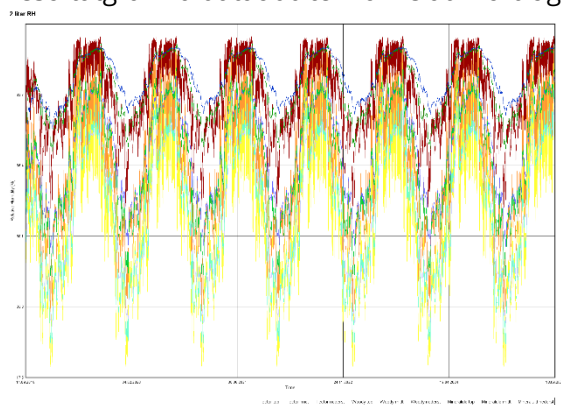


Data gemmes som .txt-fil under navnet: 1 liter vandindhold i masseprocent.txt



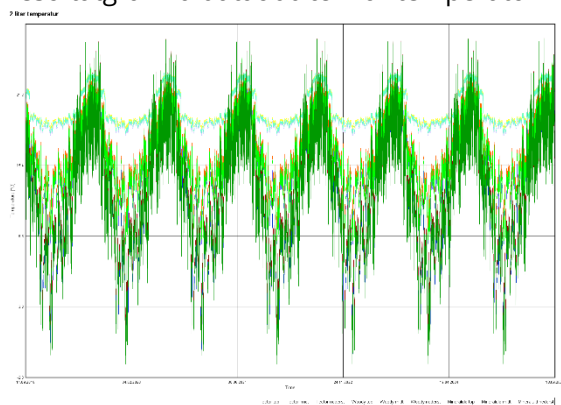
7.2.1.3. Test med 2 liter vand i testkassen

Resultatgraf fra dataudtræk for relativ luftfugtighed i målepunkterne:



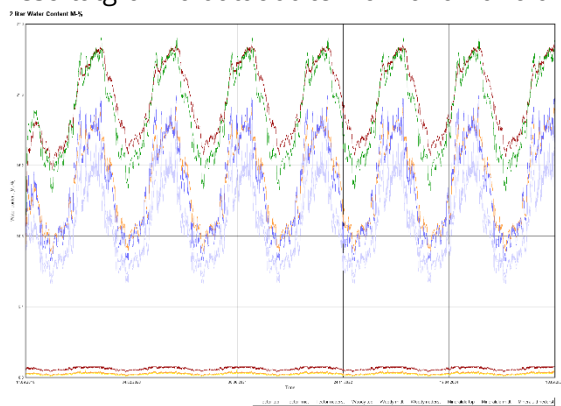
Data gemt som .txt-fil under navnet: 2 liter RH.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for temperatur i målepunkterne:



Data gemmes som .txt-fil under navnet: 2 liter temperature.txt

Resultatgraf fra dataudtræk for vandindhold i vægt-% i målepunkterne:



Data gemmes som .txt-fil under navnet: 2 liter vandindhold i masseprocent.txt



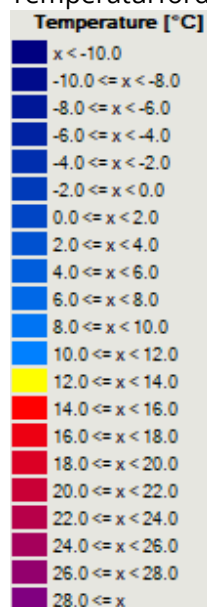
7.2.2. Piktogrammer af fordeling af RF, temperatur og vandindhold i vægt-% over beregningstværsnittet

I dette afsnit vises resultater fra de dynamiske hygrotermiske beregninger i testkassen i det flade tag med 2 liter vandtilførsel. Resultaterne vises som piktogrammer af hhv. fordeling af RF, temperatur og vandindhold i vægt-% på bestemte tidspunkter i det sidste beregningsår.

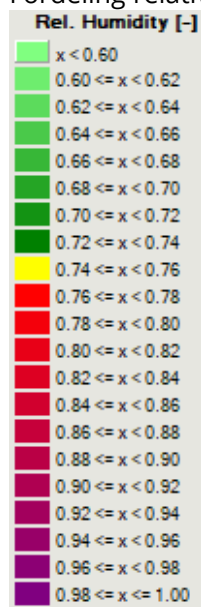
I piktogrammerne er de kritiske områder på hhv. 13 °C og 75 % RF fremhævet med gult, se Figur 9. Disse værdier er fremhævet, fordi de udgør grænsen for risiko for skimmelsvampevækst, når almindelig varm indeluft (20 °C og 50 % RF) bliver kølet ned til 13 °C, fx på overflader af kuldebroer. I så fald stiger den relative luftfugtighed nemlig til 75 %, som er grænsen for betingelser for skimmelsvampevækst.

Piktogrammerne over vandindhold i vægt-% har en farvekode, der er afstemt til isoleringsmaterialet. Hygroskopisk fugtindhold (fra 0 til lidt under 100 % RF (relativ porefugt)) i isoleringsmaterialet er fremhævet i blå, mens overhygroskopisk fugtindhold (vand i væskeform fra lidt under til langt over 100 % RF) i isoleringsmateriellet er markeret med lyserødt over lilla til sort. OBS! farvelægningen er derfor ikke retvisende for træklodserne i sensorerne.

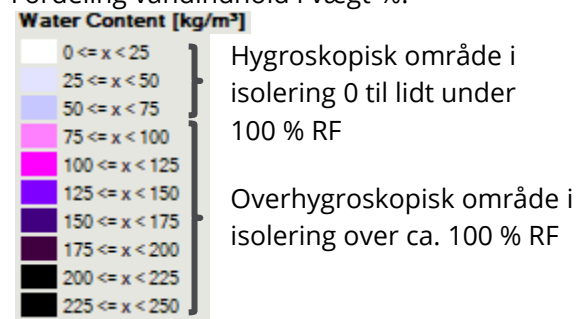
Temperaturfordeling:



Fordeling relativ luftfugtighed:



Fordeling vandindhold i vægt-%:



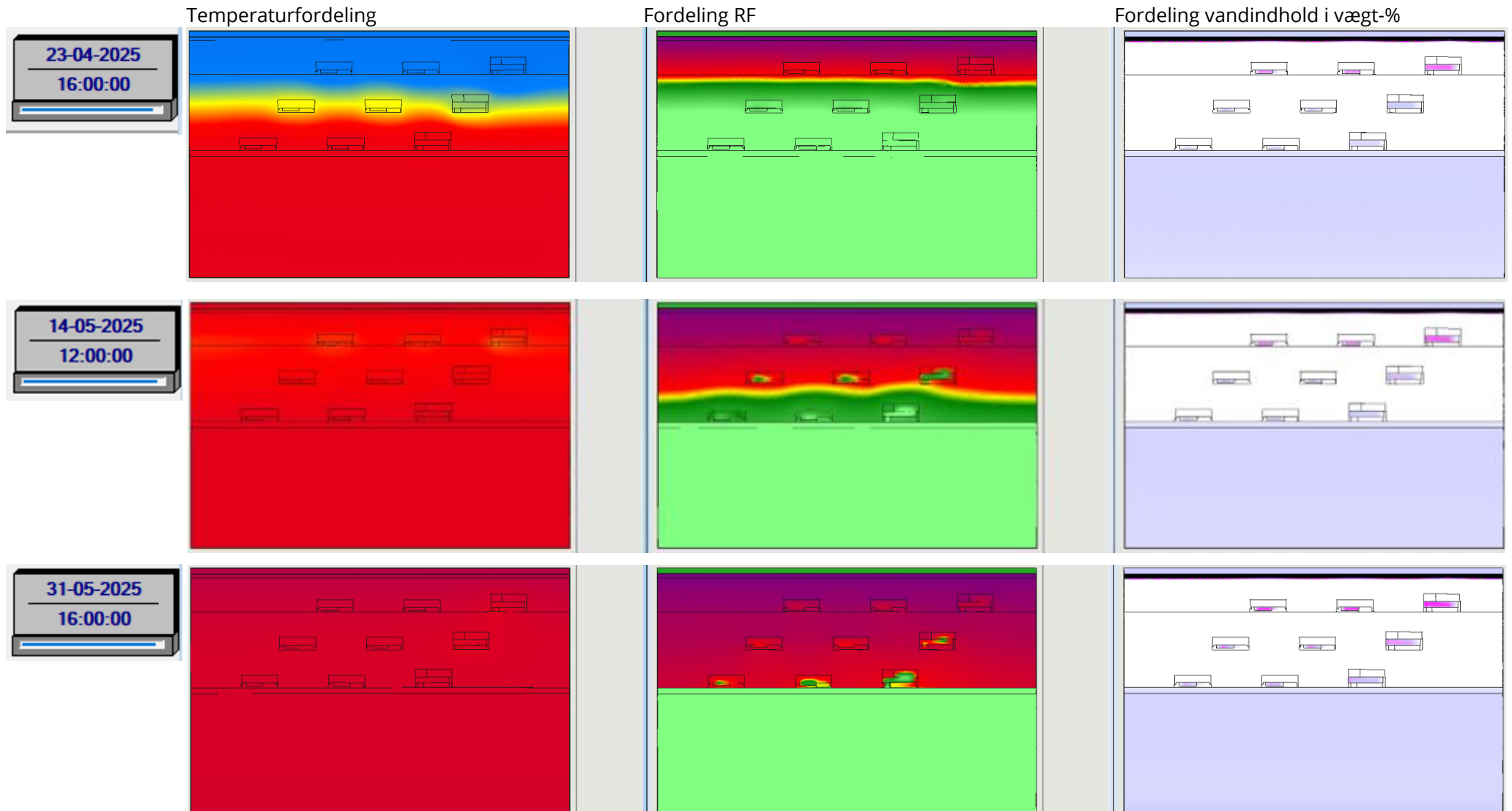
Figur 9: Signaturforklaring piktogrammer.

I de følgende to afsnit 7.2.2.1 og 7.2.2.2 vises piktogrammer fra det sidste beregningsår for hhv. tre dage i forårsperioden, hvor fugten bliver presset nedad i konstruktionen, og for tre dage i efterårsperioden, hvor fugten bliver presset opad i konstruktionen.

Piktogrammerne skal visualisere bevægelsesmønstre i konstruktionen og omkring sensorerne.

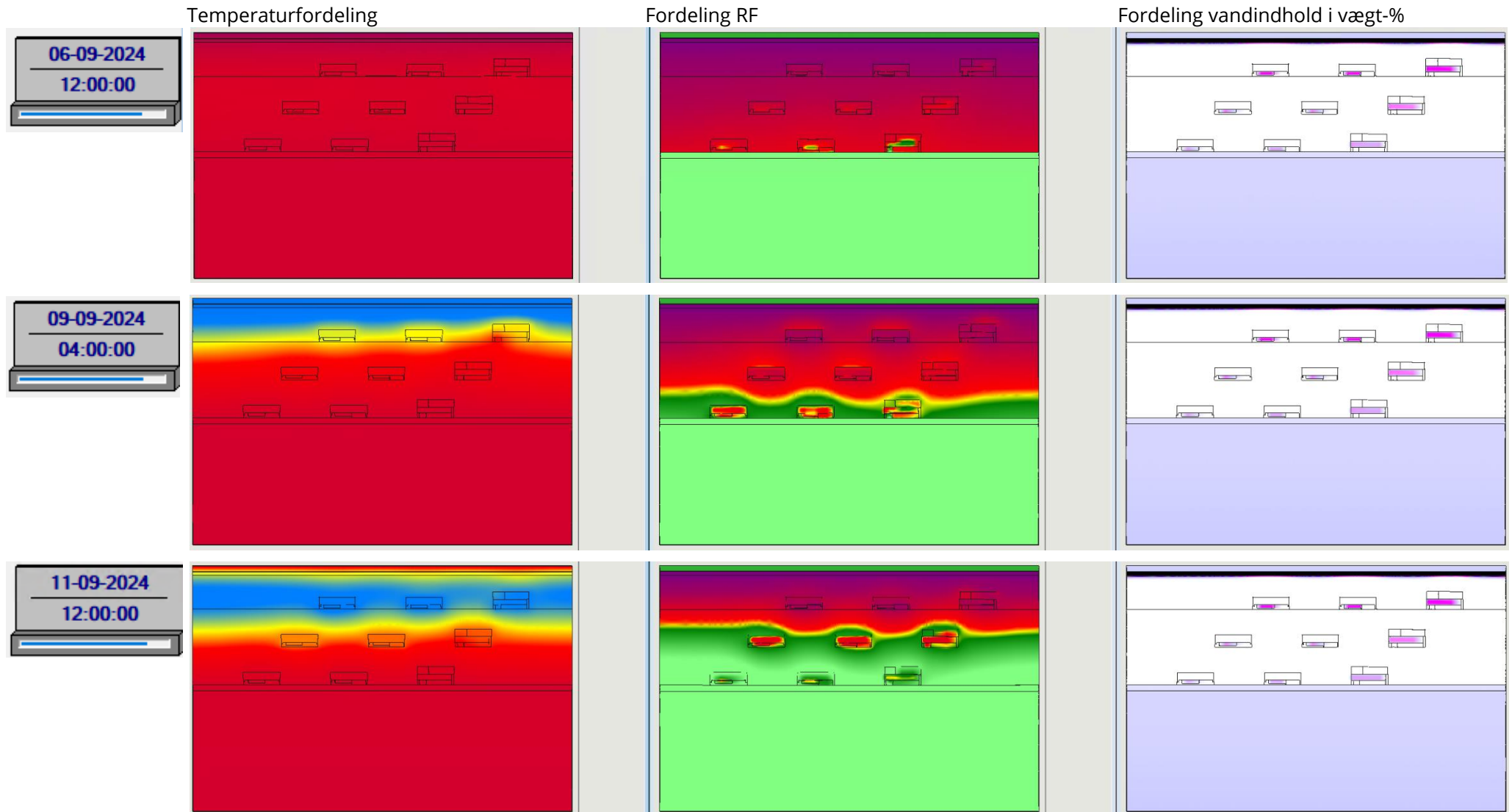


7.2.2.1. Piktogrammer af fugtfordeling på tre dage i forårsperioden – fugten bliver presset nedad i konstruktionen.





7.2.2.2. Piktogrammer af fugtfordeling på tre dage i efterårsperioden – fugten bliver presset opad i konstruktionen.





7.2.3. Film fra definerede perioder i 2D simuleringen

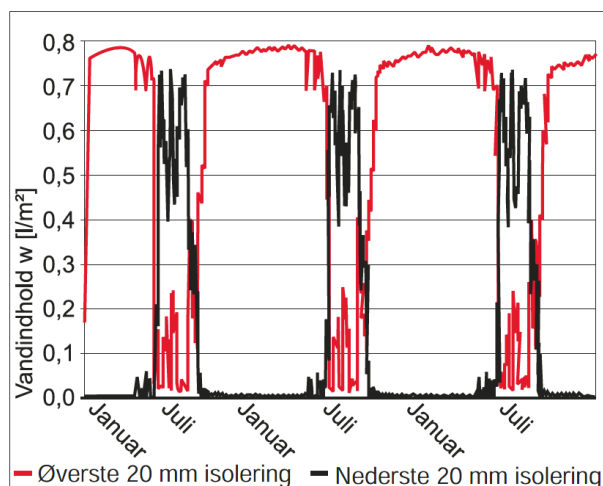
Derudover er der genereret to videofilm i .mp4-format af hhv. forårsperioden og efterårsperioden i simuleringen. Disse er gemt med følgende filnavne:

 WBDK_Incuba_2 liter_efterårsperiode.mp4

 WBDK_Incuba_2 liter_forårsperiode.mp4

8. Supplerende undersøgelse for alternerende fugtniveauer i varmtagskonstruktioner

I BYG-ERFA blad (27)100322, *Varme tage – efterisolering og fugtforhold*, er der i Figur 4 vist en graf over vandringen af fugt, lukket inde i en varmtagskonstruktion. Figuren, som kan ses gengivet herunder, indikerer, at fugten i løbet af året flyttes rundt i konstruktionen og alternerende ligger enten i de øverste eller de nederste lag af isoleringen. Vandindholdet i denne test/simulering er ikke angivet, men på skalaen i grafen ses, at der må være tale om hygroskopisk fugtindhold, dvs. under 100 % porefugt.



Figur 4. Simulering [3] af fugtbevægelser i et varmt tag med fugt indespærret mellem tagdækning og dampspærre. Det ses, at fugten vandrer op og ned i taget med årstiden samt at fugtindholdet ikke reduceres af betydning.

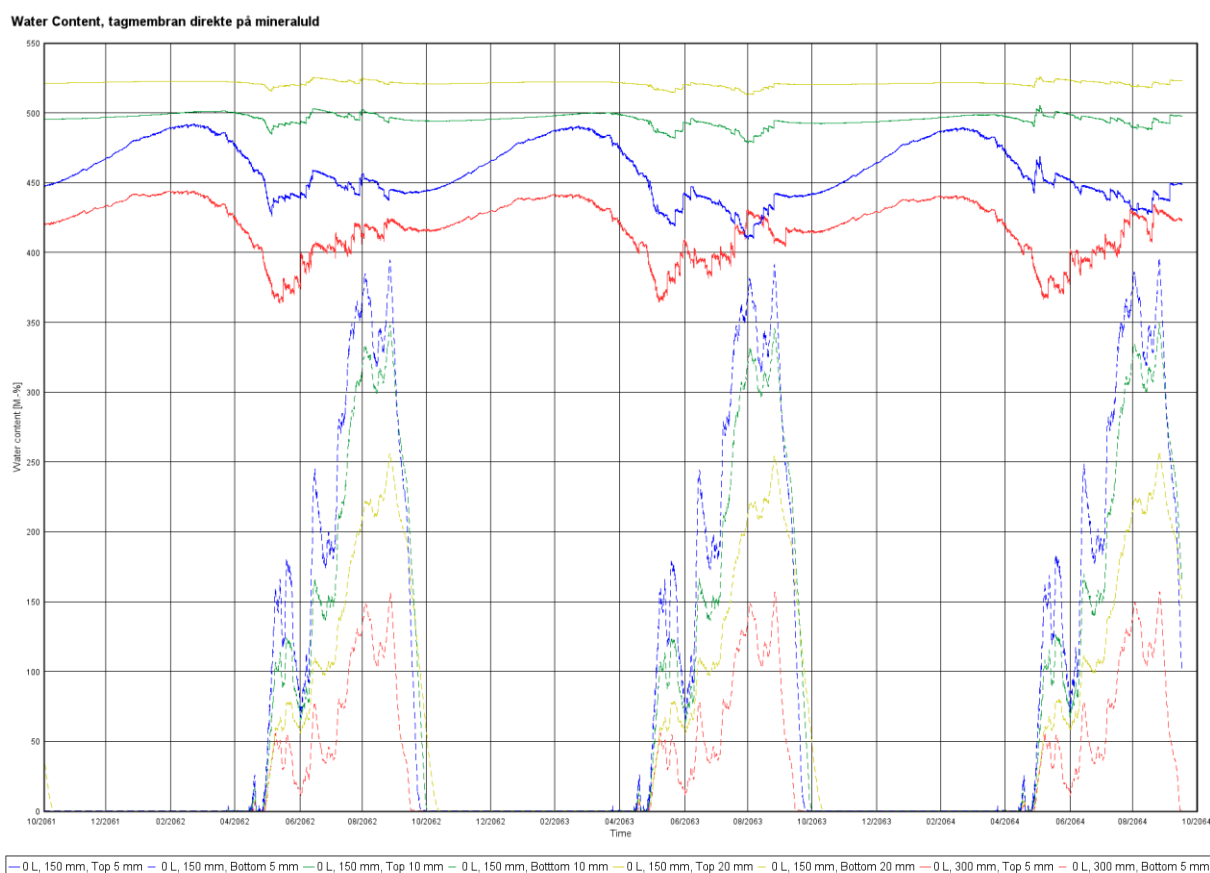
I nærværende projekt blev der udført simuleringer for test i det flade tag, hvor der ikke blev tilført ekstra vand (0 liter vandtilførsel). Dvs. at fugtvandringen udelukkende omhandler det vand, der er indlejret i konstruktionen fra materialernes startfugt. Disse simuleringer viser en lignende tendens, se den nederste resultatgraf fra dataudtræk vedrørende vandindhold i vægt-% i målepunkterne vist i afsnit 7.2.1.1. Denne graf viser, at fugten om vinteren ligger i toppen af isoleringslaget, mens der sker en flytning af fugt ned i de nedre lag om sommeren. Der flyttes dog langt fra al fugten i de nederste lag af isoleringen, dvs. at fænomenet ved simulering i WUFI er langt fra så udpræget, som i figur 4 fra BYG-ERFA bladet.



Idet resultaterne vist i figur 4. i BYG-ERFA bladet ikke blev genskabt, men der kun ses en lignende tendens, er der udført supplerende simuleringer i 1D modellen med følgende tilpasninger:

- Udgangspunkt er konstruktionen uden tilførsel af ekstra vand (0 liter vandtilførsel), dvs. kun med fugtindhold svarende til materialernes startfugt på 70 % RF ved 20 °C.
- Krydsfinerpladen i toppen af 1D-modellen er blevet fjernet fra simuleringsmodellen, isoleringstykkelsen på 300 mm blev bibeholdt.
- Der blev anvendt samme udeklima for placeringen "Skejby" (56,19°N/10,18°Ø), nordlig bydel i Århus, som beskrevet i afsnit 6.3.2.
- Der blev supplerende simuleret med 150 mm isoleringslag, svarende til den test, der lå til grund for graferne i BYG-ERFA bladet jf. kilde [3] i selve bladet: *"Combined Heat and Moisture Transfer in Building Constructions (MATCH). Rapport nr. 214. Laboratoriet for Varmeisolering. DTH, 1990."*
- Der blev simuleret over 40 år.

I Figur 10 vises resultatgraferne af de ovennævnte simuleringer.



Figur 10: Fugtindhold i de hhv. øverste (fuldoptrukne grafer) og nederste lag (stiplede grafer) i en varmetagskonstruktion med hhv. 150 mm (gule, grønne og blå grafer) og 300 mm (røde grafer) isolering. Resultaterne bliver vist for de sidste 3 af 40 beregningsår.



Graferne i *Figur 10* viser den samme tendens som ved de tidligere simuleringer, beskrevet i afsnit 7.2.1.1. Om vinteren er der et meget højt fugtindhold i toppen af isoleringslaget og om sommeren flyttes noget af fugten nedad i isoleringslaget. Men ikke al fugten bliver presset i bunden af isoleringslaget. Det sker hverken ved et tykkere (300 mm – røde grafer) eller et tyndere (150 mm – gule, grønne og blå grafer) isoleringslag. Ved evaluering af fugtfordelingen er det gennemsnitlige fugtindhold i et defineret lag af isolering i hhv. top og bund undersøgt. Fugtens flytning i konstruktionen fremtræder mest udpræget, jo tyndere et lag isolering der evalueres for (5 mm – blå grafer). Jo tykkere et lag isolering der evalueres for (20 mm – gule grafer) jo mindre udpræget fremtræder flytningen af fugten både i grafen fra toppen af isoleringen, men især af grafen i bunden af isoleringen, hvor det maksimale fugtniveau falder med tiltagende tykkelse af det evaluerede isoleringslag.

9. Vurdering

I dette afsnit foretages en kort vurdering af plausibiliteten af de udførte simuleringer. Teknologisk Instituts vurdering indeholder ikke en sammenligning af måledata og simuleringsdata. Den egentlige analyse og vurdering af beregningsresultater i forhold til måledataene, som blev genereret med sensorerne, foretages af rekvirenten selv. Tector har præsenteret deres sammenligning af måleresultater og simuleringsdata fra laboratorietesten til Teknologisk Institut. Der kunne ses samme trends af udviklingen i fugtforholdene ved hhv. måling og simulering. Dog var udviklingen i simuleringerne lidt langsommere end den målte udvikling.

På grundlag af de foretagne beregninger samt givne data og informationer kan Instituttet udtale følgende:

Det skal indledningsvist pointeres, at beregningsresultaterne, på grund af usikkerheder i både inputdata men også randbetingelser, ikke må betragtes som eksakte. Det er sammenligningen af forskellige scenarier og udviklingen i tværsnittet over tid, som muliggør en vurdering af forholdene.

Simuleringerne uden tilførsel af vand i overhygroskopiske mængder (testsituationer med 0 liter vandtilførsel) har ikke helt vist det fænomen, der er beskrevet i BYG-ERFA blad (27)100322, *Varmer tage – efterisolering og fugtforhold*, hvor alt fugten i varme tage afhængigt af årstiden alternerende ligger oppe (vinter) og nede (sommer) i konstruktionen. I de nærværende simuleringer er der kun set alternerende tendensen af, at noget af fugten i det varme tag bliver presset længere ned i isoleringslaget om sommeren. Der forbliver meget højt fugtindhold i toppen af isoleringslaget om vinteren. Selvom simuleringsmodellen blev tilpasset forholdene af testen i det omtalte BYG-ERFA blad, kunne den alternerende fugtfordeling, hvor stort set al fugten i toppen om vinteren flyttes til bunden om sommeren, ikke genskabes. Dette vurderes at kunne hænge sammen med forskelligheder i programmerne MATCH og WUFI, som fx

- Forskellige materialeparametre for isolering
- Metoden til håndtering/omfordeling af overhygroskopisk fugt.



Derudover skal det pointeres, at WUFI-programmerne er skabt til at beregne fugtfordelingen via diffusion. Fugttransport via kapillarsugning, tyngdekraft eller konvektion er ikke som sådan en del af beregningssystemet. Dog er WUFI programmerne skabt til at kunne håndtere fugt i overhygroskopisk tilstand (dvs. vand i væskeform som opstår fra lidt under 100 % RF opefter). Det betyder, at programmet ved beregningsstart og under beregningen kan acceptere, at der i beregningsmodellernes celler forekommer overhygroskopisk fugtindhold. Det er forudsætningen for, at simuleringerne kunne gennemføres med de under beregningsstart valgte overhygroskopiske vandmængder i det øverste lag af isoleringen.

Men det kan ses af simuleringerne, og især af resultater af fordeling af vandindhold i vægt-% fra 2D-simuleringerne med tilhørende videoer, at vandet fra de øverste 10 mm isolering ikke rigtigt bliver givet videre til resten af modellen. Dette vurderes at hænge sammen med, at der kun simuleres fugttransport via diffusion. Det vurderes derfor at WUFI som program kun i et vist omfang kan bruges til simulering af de foreliggende testsituationer, hvor der påføres vand i væskeform og der dermed skabes et overhygroskopisk fugtindhold i de øverste celler af modellen.

Det anbefales at overveje, om det vil give værdi for udviklingen af sensorerne og analysen af sensordata fra flade tage at undersøge testforløbene med et program, der også kan håndtere fugtfordeling via kapillarsugning. Fugtfordeling via konvektion vurderes i foreliggende konstruktion ikke at have en relevant betydning. Om der findes programmer, der kan simulere indflydelse af tyngdekraft skal undersøges.