



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto
Telefon: 9940 2285
master@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: 4. semester

Titel på masterprojekt:

Ventilationens betydning for de
hygrotermiske forhold i ventilerede tagrum

Projektperiode: Forår-2019

Vejleder: Eva B. Møller

Studerende:

Mikael Weiling

Axel Bluhme

Antal normalsider: 80,9

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 03.06.2019

Resume:

Med udgangspunkt i SBI's testhus — og I forlængelse af Ph.D. Projekt DaLo — undersøges luftskiftets betydning for klimaet i uopvarmede tagrum over 6 forskellige loftsofbygninger. Sideløbende undersøges der for skimmel risiko ved det nedsatte luftskifte. Hypotesen er, at luftskiftet har større betydning for de hygrotermiske forhold i tagrummet end dampspærren, isoleringsmaterialet eller isoleringstykkelser, såfremt loftet er lufttæt.

Husets 2 ud af 3 sektioner har fået tilpasset sine tagrums luftskifter til hhv. 35% og 51% af det anbefalede, svarende til at ca. 1/3 og ca. 2/3 af ventilationsåbningerne er blokeret i de respektive tagrum. Luftskiftet er verificeret med sporgastest.

Hver sektion indeholder 6 forskellige loftopbygninger:

1. 150mm mineraluld (- dampspærre)
2. 400mm mineraluld (- dampspærre)
3. 100mm mineraluld og 300mm cellulose (- dampspærre)
4. 400mm cellulose (- dampspærre)
5. 400mm mineraluld (+ dampspærre)
6. 400mm cellulose (+ dampspærre)

Efter 3 måneders målinger ses kun en minimal forskel på RF i tagrum med forskellige isoleringstykkelser. Dette kan skyldes instrumenternes måleusikkerhed. Måleperioden har generelt ikke været lang nok til at kunne be- eller afkræfte behovet for dampspærre ved anvendelse af cellulose baserede isoleringsmaterialer. Målinger viser overordnet større forskelle som følge af ventilationsraten end grundet isoleringstypen.

Der er generelt en forskel på RF i tagrum med og uden dampspærre, men forskellene er mindre tydelige, når der ses på vandindholdet i måleperioden. Ved korttidsmålinger er det ikke muligt at lave en statistisk vurdering af om dette er en generel tendens.

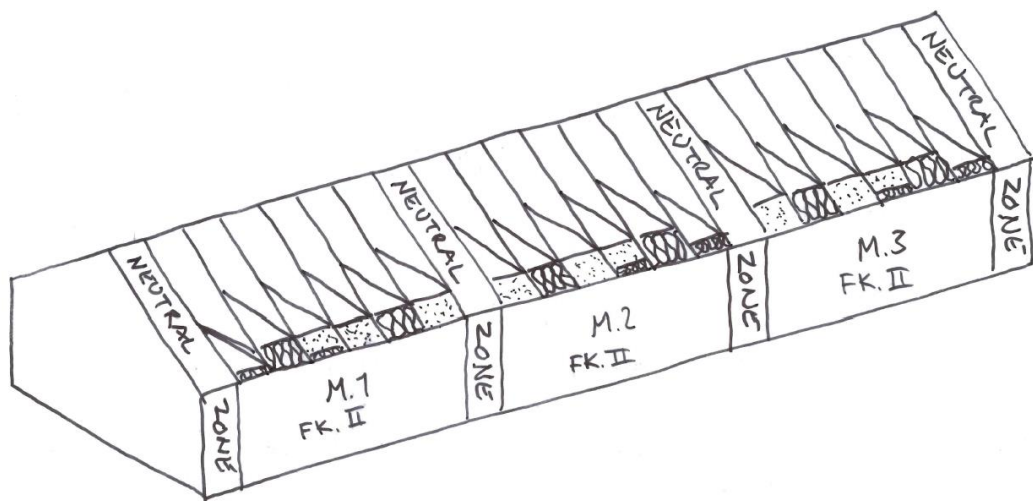
Forskellene mellem sektioner og deres respektive tagrum, vurderes at være et sammenspil mellem alle ovenstående parametre. Det kan derfor ikke med sikkerhed angives, hvilken eller hvilke parametre, der har den største betydning i de enkelte tagrum i alle tilfælde. Tendensen peger i retning af at luftskiftet har en stor betydning for tagrummenes fugtforhold i måleperioden. Det tyder samtidigt på at dampspærrens betydning bliver større ved lavere luftskifte.

Skimmelrisikoen er vurderet ved beregninger efter MRD-metoden og viser et meget lavt niveau. Dette skyldes dels at måleperioden ligger sent i vækstsæsonen for skimmel og dels er meget kort. Simuleringerne viser ingen risiko ved de givne konstruktioner - selv ved lavt luftskifte.

Ventilationens betydning for de hygrotermiske forhold i ventilerede tagrum

Masterprojekt

Ventilations influence on hygrothermal conditions in ventilated roof space.



København, d. 03. juni 2019

Udarbejdet af Axel Bluhme og Mikael Damborg Weiling

Titel	Ventilationens betydning for de hygrotermiske forhold i ventilerede tagrum
Undertitel	Ventilations influence on hygrothermal conditions in ventilated roof space.
Dato	3. juni 2019
Forfattere	Axel Bluhme, bygningskonstruktør, Stud. Nr. 20171529 Mikael Damborg Weiling, bygningskonstruktør, Stud. Nr. 20167382
Redaktion	
Sprog	Dansk
Sidetal	114 (80,9 normalsider)
Litteraturhenvisninger	Side 111
Emneord	Ventilation, Tagrum, hygrotermisk, projekt DaLo, WUFI, BSim,
Illustrationer	Egen produktion vha. Excel, WUFI og BSim
Fotos	Egen produktion
Tegninger	Egen produktion
Tryk	
Udgiver	

RESUMÉ

Formålet med denne opgave er primært at undersøge, hvilken indflydelse en nedsat ventilationsrate har i forhold til det anbefalede åbningsareal på fugtforholdene i det uopvarmede tagrum. Undersøgelsen udføres i SBI's testhus, der oprindeligt er benyttet til Projekt DaLo. Testhuset er inddelt i 3 sektioner, hver med 6 adskilte tagrum, hvor hver loftskonstruktion er udført med forskellige isoleringstykkelser, isoleringstyper og med eller uden dampspærre. 6 tagrum er ventileret via ventilationsåbninger, jf. gældende krav som beskrevet i (SBI 273 - Tøge, 2019, s. tabel 7). 6 tagrum er reduceret med 35% og i de sidste 6 tagrum er luftskiftet reduceret med 51%. Luftskiftet er blevet verificeret med en gennemsnitlig sporgas måling efter PFT-metoden. Således undersøges sammenhængen imellem materialernes hygroskopiske egenskaber, isoleringens tykkelse og brug af dampspærre i forhold til ventilationsraten, samt i hvilken udstrækning disse parametre har indflydelse på vækstforholdene for skimmelsvampe i tagrummene.

Vi har fra januar 2019 til og med marts måned foretaget målinger af temperatur og relativ luftfugtighed hver time, samt målt træfugt hver 7. til 14. dag. Vi opbyggede sideløbende modeller for simulering af de hygrotermiske forhold i BSim og WUFI, for at vurdere brugbarheden af simuleringer til forudsigelser om de hygrotermiske forhold i tagrum. Målingerne viste at en reduktion af luftskiftet generelt hæver den relative luftfugtighed i tagrummene, men også at der er andre parametre, som har en stor betydning for temperaturen og dermed fugtforholdene. Solindstråling opvarmer tagrummene i dagtimerne og presser dermed den relative luftfugtighed ned, hvilket især slår igennem på skyfrie dage. Skydækket spiller dermed også en rolle i for fugtforholdene. Dette ses også i nattetimerne, hvor de påvirker udstrålingen til verdensrummet.

Målingerne viser, at ventilationsraten har større indflydelse på tagrummets fugtindhold end isoleringens tykkelse. Samtidig viser sammenligninger mellem isoleringsmaterialerne, at de hygroskopiske egenskaber ikke har den store betydning og at den relative luftfugtighed generelt er meget ens, uanset om vi ser på mineraluld eller cellulose. Ergo vurderes cellulosens buffereffekt til minimal. Dampspærren giver generelt en lavere relativ luftfugtighed i tagrummene med reduceret ventilation, men i det godt ventilerede tagrum med 150 mm mineraluld ligger RF i perioder lavere end de 2 tagrum med dampspærre i samme sektion. Dette skyldes formodentlig, at vandindholdet i tagrummet primært kommer fra udeluften via ventilationen og kun i mindre grad som tilskud via diffusion og konvektion fra underliggende rum. Tendensen peger i retning af at luftskiftet har en stor betydning for fugtforholdene i tagrummene i måleperioden og at dampspærrens betydning stiger ved lavere luftskifter.

Simuleringerne i både BSim og WUFI viser forventede resultater i tagrummene på nær i tagrum med cellulose, hvor simuleringerne overestimerer de hygroskopiske egenskaber. Overordnet set er det dog vejrdata, der giver de største variabler i forhold til målte data. Skimmelrisikoen er lille i alle tre sektioner, både når der beregnes ud fra målte data og ud fra simuleringerne. Dermed kan det påvises, at skimmelrisikoen er lille, så længe loftskonstruktionerne er lufttætte og tagrummet er ventileret, men at risici for skimmel er større ved lavere luftskifter.

ABSTRACT

The objective of this paper is primarily to investigate if the air change rate has any influence on the hygrothermal behavior of ventilated attics. This investigation was done in a test house, divided into 3 sections, each with 6 different ceiling constructions which enabled us to view the connections between the hygroscopic properties and thickness of the insulation material and the use of a vapour barrier in relation to the air change rate in the attics. Also this study enables us to investigate if these parameters have any effect on the conditions for mould growth in these ventilated attics.

We have used the SBi testhouse, also used in Project DaLo. The house is divided in to three sections (M1.X, M2.X and M3.X), each with six attic sections with different ceiling constructions. Each attic section is ventilated by openings in the roof along the eaves and in the top. M2.X is ventilated according to the current recommendations, described in i (SBI 273 - Tøge, 2019, s. tabel 7), while the ventilation was reduced in M1.X and M3.X. Compared to the ventilation in M2.X, the ventilation in M1.X was reduced by 35% and in M3.X by 51%. The air change rate was verified by using a tracer gas according to the PFT-method.

We have measured in the test house from January throughout March by hourly measuring the temperature and relative humidity. Also we have measured the moisture in the wooden roof truss every 7-14 days. At the same time we have built a model in BSim and WUFI to calculate the hygrothermal behavior in the attics and assessed whether these models could be used as a tool to predict moisture conditions in ventilated attics. Our measurements showed that a reduction of the air change rate in general resulted in a higher level of relative humidity in the attics, but also that other parameters, such as solar radiation and cloud cover, have a big effect on the temperature and relative humidity. This also applies for night hours where the cloud cover affects the radiation to the sky.

The measurements show that the air change rate has a bigger effect on the hygrothermal behavior than the thickness of the insulation. When looking in similar sections with mineral wool or cellulose, we found that the hygroscopic properties of the insulation do not change the relative humidity much, which leads to our conclusion that the moisture buffering is minimal. Attics above ceilings with a vapour barrier, show a lower relative humidity. This was true in the case with a lower air change rate, but not in the well ventilated case. Our assumption is that the moisture is introduced into the attic by the outdoor air through the air change and only very small amounts from diffusion or convection of the indoor air. Our results show that the air change is a very influencing parameter this time of year and they indicate that the vapour barriers influence is more significant the lower the air change rate is.

Our simulations in both BSim and WUFI show the expected results in all cases, except attics with cellulose, where the hygroscopic properties seems to be overestimated by the simulation programs. Above all, however, the weather data seems to be the most important parameter and the reason that simulations and measurements do not match exactly. Calculations of the mould growth index show that the risk of mould growth is minimal, as long as the ceiling construction is airtight and the attic is ventilated, however the risk is bigger in the lesser ventilated attics.

1 INDHOLDSFORTEGNELSE

Resumé	3
Abstract	4
2 Indledning.....	7
2.1 Formål	7
2.2 Afgrænsning	8
3 Baggrund og teori	9
3.1 Teori.....	9
3.1.1 Diffusion	9
3.1.2 Konvektion	10
3.1.3 Relativ luftfugtighed	10
3.1.4 Kondensering.....	12
3.1.5 Udvendig relativ luftfugtighed	13
3.1.6 Indvendig relativ luftfugtighed	13
3.1.7 Ventilering af tagrum	14
3.1.8 <i>Måling af luftskifte med PFT-metoden.</i>	16
3.1.9 Skimmel/Indeklima	17
3.1.10 Vejrdato.....	18
3.1.11 Hygroskopi	20
3.2 Ventilerede tage gennem tiden.....	22
3.2.1 Myndighedskrav og erfaringer.....	24
3.2.2 Ventileret tagrum i nybyggeri	26
3.2.3 Ventileret tagrum i ældre bygninger	27
3.3 Projekt DaLo	29
3.4 Simuleringsprogrammer	32
3.4.1 WUFI PRO ver. 6.3	32
3.4.2 BSim ver. 7.16.8.11	32
3.5 Skimmelvurdering ved beregningsmodeller.....	33
3.5.1 VTT	35
3.5.2 WUFI BIO	36
3.5.3 MRD	37
3.5.4 Samlet vurdering.....	39
3.6 Forventninger til målinger	40
4 Metoder og materialer	42
4.1 Forsøgssopstillinger.....	42
4.1.1 Tilpasset testhus	42
4.1.2 Måleinstrumenter	47

4.1.3	Faktisk Ventilationsrate – Passiv Sporgas test	50
4.1.4	Skimmeltest	52
4.2	Fugtsimuleringer	54
4.2.1	WUFI	54
4.2.2	BSim	59
5	Resultater	65
5.1	Passiv sporgastest	65
5.2	Temperatur- og Fugtmålinger	68
5.3	Skimmeltest	71
5.4	Temperatur og fugt simuleringer	77
6	Diskussion	80
6.1	Testhuset – fysiske ændringer og PFT-test.....	80
6.2	Tagrummets opbygning.....	82
6.2.1	Luftskiftets betydning for de hygrotermiske forhold.	82
6.2.2	Isoleringsmaterialets og dampspærrens betydning for de hygrotermiske forhold.	88
6.3	Målinger vs. Simuleringer	95
6.3.1	BSim simulering	95
6.3.2	WUFI	96
6.3.3	Sammenligning mellem målt data og simuleringsprogrammer..	97
6.4	Skimmelrisiko	99
6.4.1	Vurdering af skimmelrisiko via beregninger og simuleringer ...	101
6.5	Træfugt.....	105
7	Perspektivering	107
8	Konklusion	108
9	Kilder og Henvisninger	111
10	Bilag.....	114

2 INDLEDNING

2.1 FORMÅL

Uopvarmede tagrum over isolerede loftskonstruktioner anbefales erfaringsmæssigt at skulle ventileres for at fjerne fugt. Men er det ventilationen i tagrummet eller dampspærren i den underliggende loftskonstruktion, som er mest betydende for risikoen for et uhensigtsmæssigt klima i det uopvarmede tagrum?

Projekt DaLo¹ undersøger dampspærrens og den anvendte isoleringstykkelse og hygroskopiske egenskabers betydning for fugtforholdene i loftskonstruktionen og i tagrummet.

Vores hypotese er, at ventilationen har en større betydning for indeklimaet i tagrummet end typen eller tykkelsen af isolering og anvendelse af dampspærre. Formålet med denne opgave er at undersøge, hvilken indflydelse en nedsat ventilationsrate har i forhold til det anbefalede åbningsareal på fugtforholdene i det uopvarmede tagrum.

Vi tager udgangspunkt i samme testhus, som benyttes til Projekt Dalo, men fokuserer på ventilationens betydning ved én fugtklasse frem for dampspærren og isoleringstypens betydning ved tre forskellige fugtklasser.

De tre tagrums sektioner omstilles til tre forskellige ventilationsrater. Der udføres målinger af temperatur og relativ luftfugtighed over ca. tre måneder, fra januar til og med marts. Samtidigt udføres simuleringer i BSim og WUFI for at undersøge om vi kan beregne os frem til de samme resultater som målingerne viser.

Vi ønsker dermed at belyse:

1. Om mindre ventilationsareal vil resultere i et lavere luftskifte.
2. Om ventilationens betydning er større end betydningen af dampspærren, isoleringsmaterialet eller isoleringstykkelsen for de hygrotermiske² forhold i tagrummet.
3. Om der er en sammenhæng mellem isoleringstypens hygroskopiske evner og den relative luftfugtighed i tagrummet ved nedsat ventilationsrate.
4. Om der kan påvises en større risiko for skimmelvækst som følge af en lavere ventilationsrate – og om risikoen er større over konstruktioner uden dampspærre.

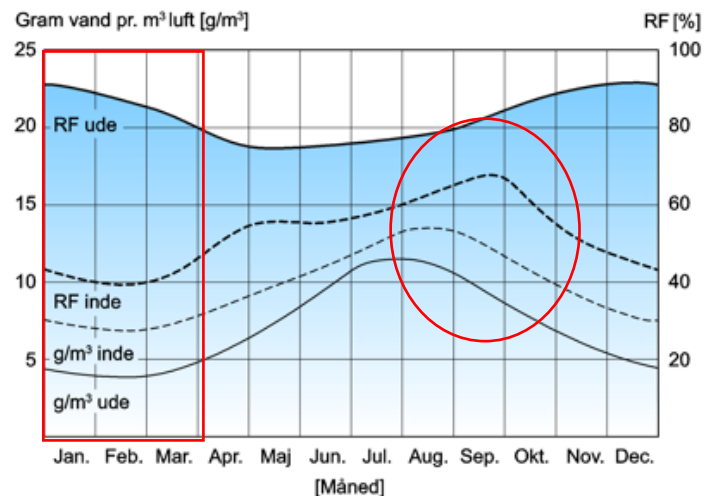
¹ Projekt DaLo er et tre-årigt projekt, hvori 6 forskellige loftsobbygninger mod uopvarmede tagrum undersøges. Fokus er på betydningen af brug af dampspærre, samt type og tykkelse af isoleringsmaterialet ved lufttætte lofter. Underliggende rum udsættes for tre forskellige fugtklasser og dermed afprøves de 6 forskellige loftsobbygninger. Dette betyder at der er 18 tagrum fordelt på 3 sektioner. Projekt DaLo er nærmere beskrevet i afsnit 3.3

² Hygrotermisk = afhængighed af fugt og temperatur forhold.

2.2 AFGRÆNSNING

Nærværende rapport er et masterspeciale, som skrives i foråret 2019. Der udføres målinger ca. tre måneder, fra januar til og med marts. Idet målingerne udføres om vinteren, hvor der er store temperaturforskelle indvendig og udvendigt, vurderes det at måleperioden kan give målbare og brugbare resultater. Ideelt set havde måleperioden været minimum et år, så vinterhalvåret (oktober til marts), hvor der statistisk er højest relativ luftfugtighed i tagrummet havde været målt (Se Figur 1). (Møller E. B., 2010)

Erfaringerne fra Projekt DaLo antyder, at indeklimaet ikke har en væsentlig betydning og at dampspærren kan udelades ved tagrenoveringer i nogen tilfælde, så længe at tagrummet ventileres efter gældende regler og loftkonstruktionen er lufttæt. (VIF-isolering.dk/nyheder, 2019).



Figur 1: Udvendig og indvendige typiske fugtforhold over året. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013). Måleperioden er januar til og med marts, som angivet med en rød firkant. Den højeste RF i indeklimaet forekommer dog i september og oktober måned, som angivet med en rød oval.

I nærværende rapport forudsættes tagdækninger til at være udført tætte, hvilket også er visuelt konstateret. Fokus er på tagrum, hvor ventilationen er begrænset, men hvor konstruktionerne ellers er udført efter gældende normer og standarder.

3 BAGGRUND OG TEORI

3.1 TEORI

Fugtindholdet i et ventileret tagrum afhænger af fugtindholdet i udeluften samt tilskuddet til tagrummet fra de underliggende opvarmede rum og evt. utætheder i tagbeklædningen.

Tilskuddet fra rummene afhænger af fugtbelastningen i de opvarmede rum og omhyggeligheden ved udførelsen af tæthedsplanet, som i sidste ende afgør fugtvandringen igennem konstruktionen og dermed tilskuddet til tagrummet.

3.1.1 Diffusion

Diffusion beskriver 1 af 3 betydende fugttransportformer i klimaskærmen. Ved diffusion vandrer vanddamp igennem luft eller porøse materialer. Drivkraften er vanddamptryk-/vanddampforskelle mellem f.eks. indendørs og udendørs. Transportretningen er altid fra høj til lav – dvs. mod lavere damptryk og dermed ofte indefra indvendig konstruktion og ud til det fri. I tagrum sker diffusionen fra det underliggende opvarmede rum igennem loftskonstruktionen og til tagrummet.

Når vanddampen forsøger af passere gennem et materiale, vil molekylerne møde modstand fra materialets porevægge og dermed er diffusionskoefficienten afhængig af porernes størrelse. Denne modstand kan sammen med luftens diffusionskoefficient angive materialets vanddamppermeabilitet $[\delta_p]$, hvilket er vanddampstrømmen gennem materialet.

Når vi vil vurdere en konstruktion fugtteknisk for diffusion, benytter vi i Danmark vanddampdiffusionsmodstanden, Z -værdien $[Z_p]$. Z -værdien er afhængig af materialets tykkelse $[d]$ og vanddamppermeabilitet $[\delta_p]$ og kan beregnes via formlen:

$$Z_p = d / \delta_p \text{ [GPa s m}^2\text{/kg]}$$

Z -værdien benyttes til at vurdere, hvor damptæt (eller åben) en konstruktion eller et materiale er. Summen af Z -værdier for en konstruktion er lig med konstruktionens Z -værdi, inklusive Z -værdier for overgangsmodstanden dvs. $Z = \sum Z_n$. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 45)

Åbne materialer har en lav Z -værdi omkring 1-3 GPa s m²/kg, og damptætte materialer har som udgangspunkt minimum en Z -værdi på 50 GPa s m²/kg, selvom de normalt brugte dampspærre membraner har en Z -værdi på over 250-450 GPa s m²/kg.

Som tommelfingerregel skal Z -værdien på den varme side af isoleringen være ca. 10 gange højere end Z -værdien på den kolde side af isoleringen, uanset om der benyttes en dampspærre i konstruktionen. (Dampspærreguide, 2019)

3.1.2 Konvektion

Konvektion beskriver den 2³. transportform, hvor vanddamp vandrer igennem materialer via luftstrømme gennem huller, revner eller åbninger i konstruktionen. Ved konvektion kan luften flytte meget større mængder vanddamp end ved diffusion alene. Derfor er det meget vigtigt at etablere en lufttæt konstruktion mellem bolig og tagrum.

Luftens strømninger drives af trykforskelle, som vindens tryk og sug på hver side af taget og / eller skorstenseffekten. Strømningen kan også drives af temperaturforskelle. Strømningen af varm rumluft ud i en kold konstruktion, som tagrummet, kan give risiko for kondensation. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 49)

Skorstenseffekten eller den termiske opdrift drives af trykforskelle, der opstår som følge af, at varm luft er lettere end kold luft. Den varme luft stiger altså opad, mens den kolde synker nedad. Dette bevirker et undertryk i den nederste halvdel af rummet eller huset og et overtryk i den øverste halvdel, hvor midten er neutral. Over- og undertrykket varierer med flere parametre som temperaturforskelle mellem ind og ude, højden af rummet eller bygningen, utætheder og åbningers størrelser og placeringer. Denne fordeling afgør neutralplanets placering, som er i ligevægt med det udvendige tryk. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 50)

Skorstenseffekten i mindre bygninger er ikke så stor, men den er konstant og kan dermed have en stor betydning for fugtvandringen igennem utætheder.

Konvektion kan ske igennem porøse byggematerialer, der indeholder luftspalter eller har en lav densitet. Utætheder i dampspærren vil derfor være følsomme over for konvektion. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 50)

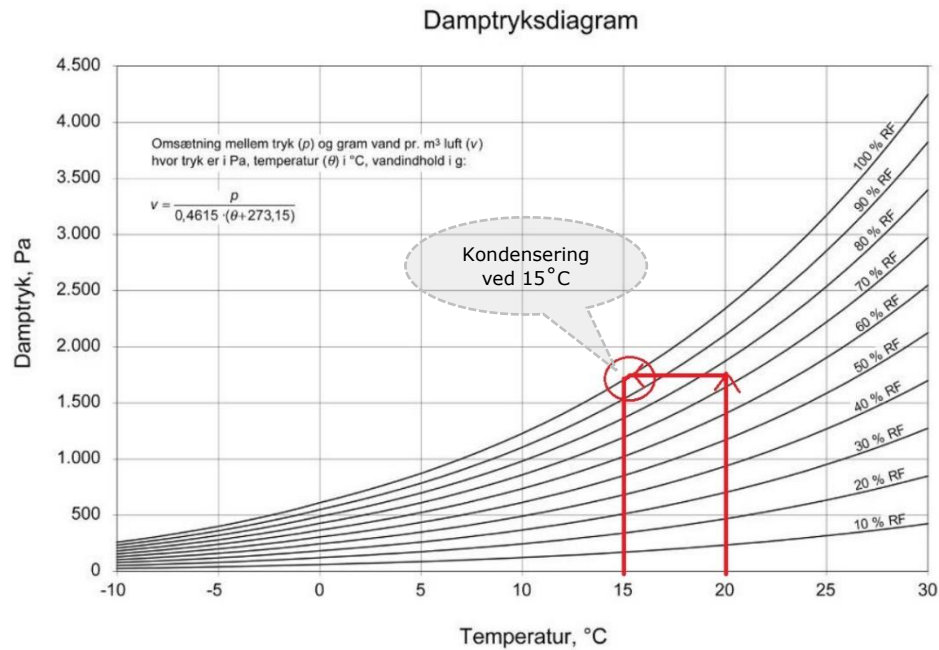
Samtidigt er det også skorstenseffekten – og konvektionen – der bruges til ventilering af tagrum og andre ventilerede konstruktioner. Dette er også grunden til, at det er nødvendigt, at åbningerne er placeret de rigtige steder, så den fugtige luft ventileres ud i det fri og ikke ind i en konstruktion.

3.1.3 Relativ luftfugtighed

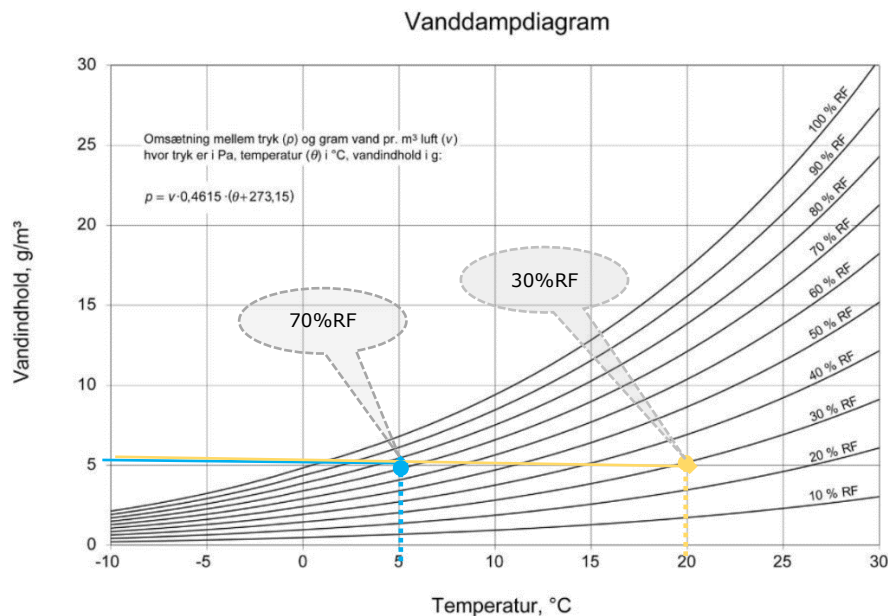
Luften omkring os består af blandinger af luftarter, der med hvert sit partialtryk tilsammen udgør den atmosfæriske luft. De fleste af luftarterne varierer ikke så meget fra land til land. Vanddampindholdet i luften ændrer sig derimod geografisk og lokalt med temperaturen, årstiden og vejrforhold.

Det normale atmosfæretryk er 101325 Pa svarende til 1 atmosfære. Vanddampens partialtryk udgør ca. 1% heraf ved en lufttemperatur på 20 °C og 50% RF (relativ luftfugtighed). Det maksimale vanddampindhold øges eller sænkes med temperaturen. Damptrykket kan omregnes til vanddampindhold og omvendt. Forholdet mellem vandindhold og temperatur illustreres ofte som diagram (Figur 2 og Figur 3). (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 15)

³ Den 3. fugttransportform kaldes *effusion* eller *termodiffusion*, selvom denne er så ubetydelig for transport af vanddamp at der normalt kan ses bort fra den (Janssen, 2011). Oftest fokuseres på kapillarsugning i stedet. Kapillarsugning er dog normal ikke så betydende for tagrum og bliver der ikke yderligere gennemgået i nærværende master.



Figur 2 Damptryksdiagram med angivelse af relativ luftfugtighed ved en given temperatur og damptryk. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013). I dette tilfælde vises et eksempel med $20^{\circ}C$ varm luft med en relativ fugtighed på 75%, der afkøles til $15^{\circ}C$ (ved en koldere overflade eller lignende), hvor den relative luftfugtighed stiger til 100% - dvs. kondensering på overfladen.



Figur 3: Vanddampdiagram med angivelse af relativ luftfugtighed ved en given temperatur og vanddampindhold. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013). I ovenstående eksempel vises forskellen i relativ fugtighed fra 70% ved $5^{\circ}C$ til 30% ved $20^{\circ}C$, idet vandindholdet $5 g/m^3$ er konstant. Dette sker eksempelvis hvis kold udeluft varmes op når den føres ind i en opvarmet bygning.

Hvis luften er helt mættet med vanddamp, svarer det til tåge eller dug. Det svarer til en luftfugtighed på ca. 100% ved en given temperatur. Hvis temperaturen stiger, men vanddampindholdet er uændret vil luftfugtigheden falde til f.eks. 75%. Her benyttes begrebet relativ luftfugtighed (RF), da fugtindholdet er relativt i forhold til den givne temperaturs maksimalt mulige vandindhold.

F.eks. svarer ca. 5 g vand/m³ i 5 °C kold luft til en RF på ca. 70%, mens 5 g vand/m³ svarer til en RF på ca. 30% ved 20 °C (se Figur 3). (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

3.1.4 Kondensering

Hvis luften bliver mættet af vanddamp, kan der opstå kondensering. Det vil f.eks. ske i luften i form af dug eller tåge. Det kan også ske på en overflade eller i en konstruktion i form af frit vand eller rim. Kondenseringen opstår når varm luft køles ned til under sit dugpunkt. Ved 20 °C svarer en RF på 75% til et vanddampindhold ca. 13 g/m³. Hvis den varme luft på 20 °C med RF på 75% rammer en overflade på 15 °C, vil der opstå kondens da 15 °C varm luft maksimal kan indeholde 12,82 g vand/m³. Dugpunktet for de 20 °C ved 75% RF er altså lige over 15 °C (Andersen, Blach, & Christensen, Fugt og kondensation, 1973) (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013). Se Figur 2.

Problemstillingen opstår, hvis kondensering foregår på en overflade eller i en konstruktion, hvor fugten ikke kan nå at bortventileres eller udtørres. Hvis der er utætheder i en konstruktions tæthedsplan, kan der sive varm fugtig rumluft ud i konstruktionen, som kan kondensere, når den møder kold luft eller en kold overflade. Derfor anvendes dampspærre i konstruktioner som f.eks. etageadskillelser mod uopvarmede tagrum for at sikre mod utilsigtede luftstrømninger igennem utætheder (konvektion) og diffusion, jf. afsnit 3.1.1 og 3.1.2.

Kuldebroer beskriver samlinger eller konstruktionsdele, der er dårligere isoleret end resten af bygningsdelen eller konstruktionen. "Kuldeledningen" igennem en kuldebro kan være så markant, at overfladetemperaturen sænkes lokalt til under rumluftens dugpunkt. I disse tilfælde kan der være risiko for fugtskader og råd. Kuldebroen kan betyde, at der lokalt kommer så høj relativ luftfugtighed, at det medfører skimmelvækst (se afsnit 3.5). Ved mindre kraftige kuldebroer kan der ses sorte støvansamlinger fx i hjørner eller vindues-samlinger. Det skyldes støvpartikler mv., der "indfanges" af den kolde tunge luft og bindes til kuldebroens overflade. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013) og (Andersen, Blach, & Christensen, Fugt og kondensation, 1973)

Kondensrisikoen på de indvendige overflader minimeres ved at holde en lav indendørs RF i opvarmede rum om vinteren. Det kan gøres ved at udskifte den fugtige luft ved løbende kraftig udluftning. Mængden af vanddamp, der trænger ind i konstruktionen, vil være lavere og dermed også risikoen for kondensering. Vanddampstransporten kan yderligere begrænses ved etablering af dampspærre på den varme side af f.eks. ydervæggen eller loftet.⁴ (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

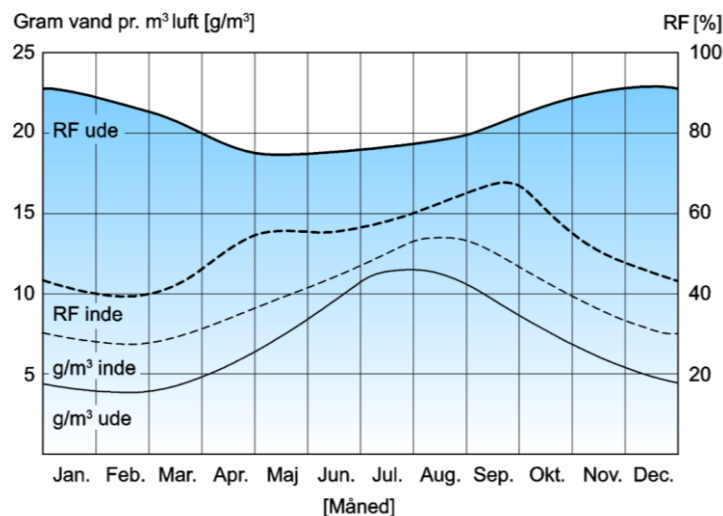
I ventilerede tagrum kan der ske hurtige og store temperaturfald og -stigninger i løbet af dagen og natten. Særligt på skyfrie nætter, hvor udstrålingen til himmelrummet er størst, kan varm fugtig luft fra dagtimerne blive kølet ned på undersiden af tagbelægningen, så der opstår kondens på undersiden af belægningen. For at modvirke kondensdryp og opfugtning af den underliggende isolering og konstruktion, etableres der ofte et undertag, som kan være enten diffusionsåbent eller diffusionslukket, mellem spær og tagbelægning og med afløb til tagrenden. Undertage kan samtidig beskytte tagrummet mod fygesne og vand fra slagregn osv. Damptætte undertage ventileres på undersiden,

⁴ "den varme side" kan som tommelfingerregel betragtes som maksimalt 1/3 inde i konstruktionen fra indvendig overflade (afhængigt af isolansen).

hvor diffusionsåbne undertage kan anvendes i både ventilerede og u-ventilerede tage. (Andersen, Blach, & Christensen, Fugt og Tage, 1974) og (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

3.1.5 Udvendig relativ luftfugtighed

Over et år varierer temperaturen og RF i forhold til årstiden. Om sommeren er RF ca. 75% i gennemsnit over et døgn med et vanddampindhold på ca. 10 g/m³, hvor den om vinteren er ca. 90% selvom vanddampindholdet kun er ca. 5 g/m³. Dette skyldes lavere gennemsnittemperatur om vinteren, der har et lavere totalt mætningsindhold og dermed en højere RF (Figur 4). (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)



Figur 4: Vanddamp og RF variationer over et år for indvendig og udvendig luft for boliger i Danmark. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

3.1.6 Indvendig relativ luftfugtighed

Det meste af året er luften udvendig i gennemsnit koldere end indvendig. Når bygningen ventileres med udeluft, opvarmes den kolde luft til stuetemperatur. Den kolde luft varmes op og dens RF falder, da luftens "vanddampskapacitet" øges. Bygningens RF sænkes ved løbende luftskifte med koldere udeluft, ventilationen sættes normalt til ca. 0,5 gange i timen⁵, som blandes med den varme fugtige luft og dermed fjerner noget af fugten i lokalet.

Fugttilførslen kan inddeles i klasser baseret på bygningens anvendelse samt menneskelig aktivitet. F.eks. vil et kontorbyggeri have en lavere fugtklasse end f.eks. en lejebolig, hvor fugtproduktionen er ukendt. Når udeluften blandes med luft i et kontor, vil RF i kontorlokalet ligge i en fugtbelastningsklasse 2, hvor lejeboligen ligger i klasse 3 (Tabel 1).

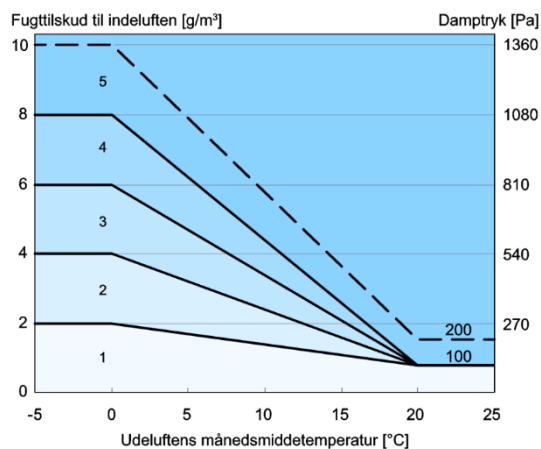
Ifølge DS/EN ISO 13788 kan bygninger inddeles i 5 fugtbelastningsklasser (se Figur 5 og Tabel 1) med forskellige fugttilskud indendørs afhængig af anvendelse.

⁵ ca. 0,5 h⁻¹ svarer til en omregning af BR18 om grundluftskifte på 0,30 l/s pr. m² beboelsesrum med 2,5 m lofthøjde. (BR18, Kap. 22, Ventilation (§420-§452) vejledning punkt 1.6)

Tabel 1: De 5 fugtbelastningsklasser inddeles i (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013):

1. Ubenyttede bygninger, tørre lagerhaller, idrætshaller uden tilskuere, industribygninger uden fugtproduktion
2. Kontorer, forretninger, boliger med normal beboelsestæthed og ventilation (svarer til BR krav om ventilation er opfyldt).
3. Boliger med ukendt beboelsestæthed (såsom lejeboliger), idrætshaller med mange tilskuere.
4. Storkøkkener, kantiner, bade- og omklædningsrum
5. Specielle bygninger, fx vaskerier, bryggerier, svømmehaller

Tilskuddet til den indkomne udeluft er størst om vinteren, hvor gennemsnits-temperaturen er lav. I takt med vejret bliver varmere, åbnes døre og vinduer som øger luftskiftet, der resulterer i at tilskuddet til inde luften falder. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)



Figur 5: Inddeling af fugtklasser 1-5. Grænseværdier mellem klasser angivet med sorte linjer. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

3.1.7 Ventilering af tagrum

Lufttætte konstruktioner hindrer fugtvandring ved konvektion, men ikke ved diffusion. Mængden af fugt der transporteres på dampform via diffusion, er dog meget lille, som tidligere nævnt, i forhold til de mængder der kan transporteres med luftstrømninger, altså via konvektion. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 52).

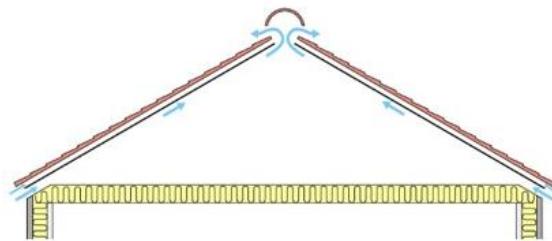
Fugt 8 fra 1974 (Andersen, Blach, & Christensen, Fugt og Tage, 1974) beskriver, at ventilerede tage kun kan fungere som tiltænk, hvis loftkonstruktionen er lufttæt og diffusionstæt. Princippet med at forhindre at varm fugtig luft påvirker tagrummets luftfugtighed, er altså ikke en ny problematik. Problemet derimod blev tværtimod forværret med overgangen fra olie- og/eller brændefyr til fjernvarme eller eldrevne opvarmningsformer, da varmetilskuddet fra skorstenene blev fjernet.

I de senere år er isoleringsmængden ligeledes øget betydeligt, hvilket igen fjerner varmetilskuddet til tagrummene. Dermed siger litteraturen, at dampspærren mod boligen samt ventileringen af tagrummet er forudsætning for at minimere opfugtning af tagrummene. (SBI 273 - Tage, 2019, s. 17)

Især om vinteren vil termisk opdrift forårsage et konstant overtryk, som vil presse fugtig rumluft gennem utætheder op gennem loftkonstruktionen. Selv hvis dampspærren er omhyggeligt udført af tætte og holdbare materialer, vil det være svært at undgå diffusion eller konvektion op gennem loftet og dermed at små vandmængde opfugter tagrummet. (SBI 273 - Tage, 2019, s. 28)

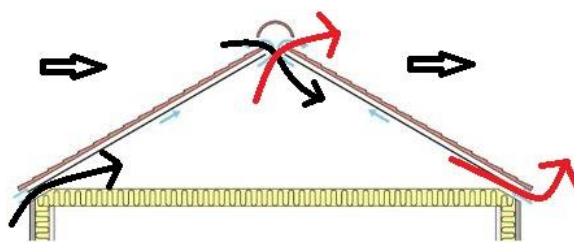
Den mængde fugt som ender i tagrummet, uanset om den kommer inde- eller udefra, skal fjernes, inden fugtniveauet bliver så højt, at det kan gøre skade på tagkonstruktionen. I de fleste tagrum fjernes fugten ved ventilation med udeluft. Naturlig ventilation drives af skorstenseffekten samt de over- eller undertryk, som vinden afstedkommer. Luften strømmer da gennem ventilationspalter i tagfoden og spalter eller ventilationsstudser i eller tæt ved kip. Krav til størrelser på spalter og studser er angivet i Tabel 5, se afsnit 3.2.1.

I nærværende masterspeciale forholder vi os primært til kolde, ventilerede tagrum over en vandret loftkonstruktion. Denne type er ofte udført med gitterspær. Ventilering sker her fra tagfod til tagkip via skorstenseffekten samt fra tagfod til tagfod via vindtryk. Samtidigt er det vigtigt at "døde" zoner undgås, således at der udføres ekstra ventilationsåbninger eller studser over og under eksempelvis ovenlys eller gennemføringer. (SBI 273 - Tage, 2019, s. 51).



Figur 6: Princip for ventilering af tagkonstruktion med gitterspær, jf. (SBI 273 - Tage, 2019, s. 52). Den viste principtegning viser skorstenseffekten, der via den termiske opdrift driver ventilationen med tilluft fra tagfod til afkast via studse i tagets kip.

Vindens retning vil skabe henholdsvis over- og undertryk på hver side af taget. Dette betyder, at vindtrykket kan presse luft ind gennem tagfoden på den side med overtryk og suge luft ud på læsiden, hvilket driver ventilationen. Derfor er det vigtigt, at der er åbninger i begge sider af taget i både tagfod og kip, som tager højde for dette forhold.



Figur 7: Samme principtegning som Figur 6 (SBI 273 - Tage, 2019, s. 52). Denne version viser vindens retning (de store sorte pile), hvor overtrykke på vindsiden presser luften ind gennem åbninger (de tynde sorte pile). Luften i tagrumme presses/suges ud på læsiden (de røde pile).

3.1.8 Måling af luftskifte med PFT-metoden.



Figur 8: Sporgaskilde, grå/silver, med sporgassen PMCP. Her placeret centreret i tagrum i testhuset. Rørskålen viste sig at være godt egnet som holder til sporgaskilden.



Figur 9: Sampler opsættes således at den ende med nummerkode er fri fra overfladen hvorpå den er fastgjort. Når måleperioden startes fjernes gummiproppen. Indtil måleperioden startes skal sampler og sporgaskilde opbevares separat, så de ikke kan influere hinanden inden målingerne skal udføres. Se også hvor placering i tagrum er vist på Figur 10.

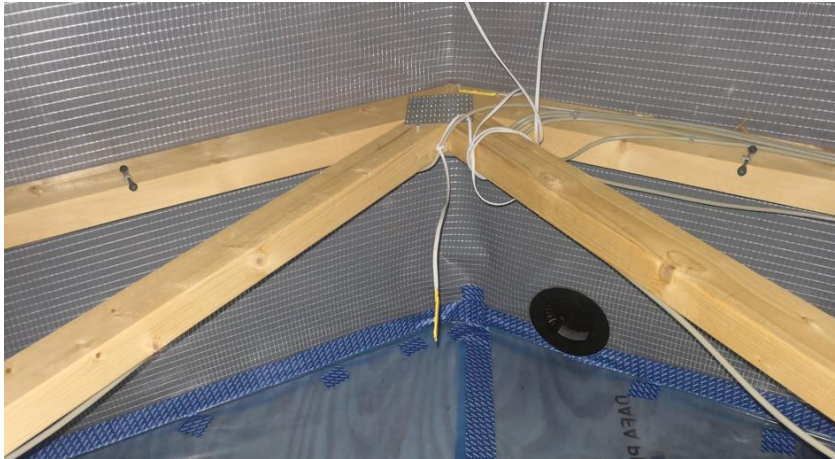
Der findes flere metoder til at vurdere luftskiftet i forskellige scenarier, eksempelvis i tagrum eller boliger. En af disse er PFT⁶-metoden, som er en passiv sporgas målemetode, som angiver et gennemsnitligt luftskifte over en given måleperiode. Denne metode har flere fordele, som egner sig godt til vurdering af luftskiftet i tagrum. En af disse er, at den kan benytte flere typer sporgas samtidigt og dermed, ud over et luftskifte, også kan sige noget om infiltrationen mellem forskellige zoner i bygningen. En anden fordel er, at metoden er passiv, og dermed ikke benytter eksternt udstyr eller har behov for en energiforsyning, men blot opstilles og registreres, hvorefter udstyret nedtages, når måleperioden er ovre. Dette giver mulighed for at placere kilder og samplere i boliger, der er i brug og/eller i forseglede rum.

Sporgas kilderne (Figur 8) opererer med en fast emissionsrate, der er temperaturafhængig. En eller flere kilder udsender en konstant dosis og der opnås en ligevægtskoncentration. Dette betyder, at både volumen og den gennemsnitlige temperatur i zonen, skal kendes. Op-

samlingshylstrene (samplere, se Figur 9) har en kendt opsamlingsrate og når alle disse kendte data foreligger, kan luftskiftet beregnes ud fra den afgivne koncentration, zonen volumen og samplersens opsamlede mængde sporgas. Samplerne indsamles og den opsamlede mængde sporgas vurderes ved brug af en gaschromatograf, hvor sporgassen frigives fra samplersen.

Feltmålinger udføres normalt med minimum 2 samplere pr. zone, både for at vurdere usikkerheden, men også for at sikre et målbart resultat – i tilfælde af at den ene sampler svigter. Det kan ske, at samplersen falder ned, bliver flyttet eller på anden vis fremkommer med et ugyldigt resultat. I tilfælde hvor kun en sampler er brugbar, vurderes måleusikkerheden til +/- 10%. Hvis to eller flere samplere er brugbare, benyttes afvigelsen mellem de to som usikkerhed. (SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, 1992, s. 21).

⁶ PFT står for Perflorocarbon tracer. De kan benyttes op til tre forskellige sporgasarter, PMCP, PMCH og PDCH, samtidigt. Alle er ufarlige for både mennesker og miljø jf. (SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, 1992, s. 10).



Figur 10: Placering af samplere i tagrum. De sidder cirka 0,5 meter fra kip på henholdsvis nord- og sydside af huset

Metoden har dog en systematisk fejl, idet den tilførte luftmængde vil blive undervurderet, som følge af variationerne i måleperioden. Større eller mindre variationer vil have større eller mindre indflydelse på usikkerheden, da metoden bygger på gennemsnitlige koncentrationsværdier. I nærværende undersøgelse er det dog primært stueetagen, der har været udsat for denne usikkerhed i forbindelse med vandpåfyldning og registreringer. (SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, 1992, s. 22)

3.1.9 Skimmel/Indeklima

Skimmelsvampesporer findes overalt omkring os, i både ude- og indeluft. Forekomsten af typer og antal varierer over året. Der er dog en del af disse skimmelsvampe, som trives i fugtige bygninger og som primært er dem, vi skal være opmærksomme på i forbindelse med at sikre et godt indeklima i vores bygninger. Skimmelsvampe mistænkes for at være skyld i udvikling af og evt. forværring af blandt andet luftvejsinfektioner, luftvejssymptomer samt astma og høfeber. (Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse, 2013, s. 11)

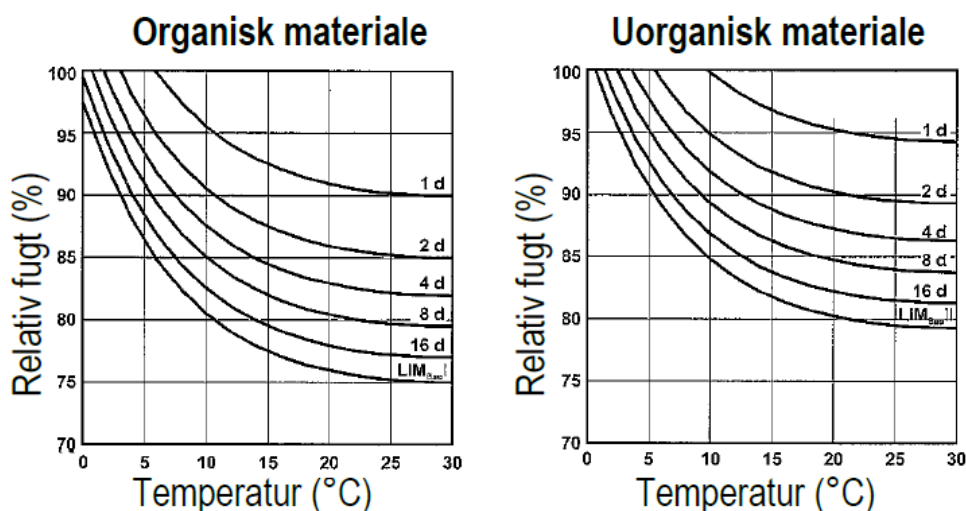
Betydningen af skimmelsvampe i vores bygninger afhænger af, hvor væksten forekommer og dermed om beboere er i direkte kontakt med skimmelsvampen. I tagrum er der kun en mindre risiko for, at den vil påvirke beboerne (SBI 204 - Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, 2003). Til gengæld kan skimmelvækst være grobund for mere destruktive svampeangreb i tilfælde, hvor fugtniveauet er højt nok.

Vækst af skimmelsvampe i bygninger er betinget af temperatur- og fugt forhold, hvilke materialer vi bygger vores huse af, samt den tid disse materialer udsættes for "for" høje fugtforhold ved tilpas høje temperaturer.

De fleste skimmelsvampe udvikler sig ved temperaturer mellem 5 og 40°C, og denne betingelse for vækst er umiddelbart altid opfyldt i vores boligers indeklima. Dertil skal der være organisk materiale tilstede, sådan at svampen har næring, idet skimmelsvampe lever af at nedbryde organisk materiale. Vi indbygger mange typer af organiske materialer i vores bygninger og det gælder altså om at sørge for at de sidste (og mest betydende) parametre for skimmelvækst, nemlig fugt, ikke er tilstede. Hvis et materiale befinder sig i et

miljø med ca. 75-80% RF eller højere vil det give vækstgrundlag for skimmelvækst og dermed vil eksponeringstiden starte. (SBI 204 - Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, 2003, s. 11) Nogle materialer er dog mere modtagelige end andre, f.eks. vil nogle trætyper udvikle skimmelsvampe inden for ca. 1 dag, mens andre vil være ca. 16 dage om det samme. Det afhænger af den relative luftfugtighed, temperaturen, om materialet er organisk eller uorganisk og hvor lang tid eksponeringen varer. LIM-kurven er den nederste grænse, hvor skimmelvækst er mulig. Se Figur 11.

Generelt inddeles materialerne i organiske og uorganiske materialer, som giver forskellige vækstbetingelser for svampe. Nogle typer uorganiske materialer, som metaller og glas, er i sig selv ikke modtagelige for skimmelvækst, men kan blive angrebet af skimmel, hvis overfladen er snavset.



Figur 11: Skimmelvækst set i forhold til temperatur og relativ fugtighed på henholdsvis organisk og uorganisk materiale. Grafer angiver antal dage det (minimum) tager før at skimmelvækst begynder - ved konstante fugt og temperatur forhold. (Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse, 2013, s. 12)

Organiske materialer, så som papir, træ mv., kan blive angrebet af skimmel fra 75-80% relative fugtighed, og dette vil inden for kort tid kunne ses på vægfladen (såfremt passende temperatur og eksponeringstiden også er til stede). Opfugtes fladen kraftigt, eller er temperaturen høj, vil vækstraten kunne øges betydeligt, selvom for høje temperaturer også kan påvirke vækstraten negativt. (SBI 204 - Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, 2003, s. 11). Normalt vil latenstiden være mindst 2-3 dage, hvorefter væksten er i gang. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 96)

Væksten vil fortsætte så længe vækstbetingelserne er tilstede, men stoppe når temperaturen bliver for høj/lav eller den relative fugtighed kommer under 80% (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 98).

3.1.10 Vejrdata

Når vi skal vurdere på de termiske indeklimateforhold i vores boliger (eller på bygningens energiforbrug), må vi nødvendigvis se på de faktorer, der påvirker dem. Vejret er altid omskifteligt og da det ikke er mulig at spå om fremtiden,

bruges i stedet gennemsnitlige data for tidligere perioder. Således er vejrdatasættet DRY⁷ gennemsnittet for perioden 2001 til 2010.

DRY (DMI Teknisk Rapport 12-17, 2012) indeholder timeværdier og kan dermed benyttes i dynamiske simuleringssværktøjer som BSim. DRY indeholder, ud over luftens temperatur og fugtighed, også solindstråling (global, diffus og direkte på vandret), nedbør, vindens retning og vindens hastighed.

DRY er gældende for Danmark, i det vores land ikke er større end at de geografiske forskelle mellem regionerne anses for minimale i forhold til simuleringernes usikkerheder. Der findes dog flere versioner af DRY, som kan benyttes alt efter placering og formål med simuleringen. Dermed kan der vælges et datasæt for København med eller uden skydække, nedbør, lufttryk og vindretning, eller for Danmark som helhed. I forbindelse med byggesager er det dog DRY datasættet "Danmark_2013.DRY" eller "Danmark-V2.DRY", som skal benyttes. I nærværende rapport har vi valgt at basere simuleringer i BSim på "Danmark_2013.DRY"

Tabel 2: Kopi af Tabel 4, (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 66), som viser sammenhængen mellem TRY og fugtbelastningsklasser iht. (DS/EN ISO 13788:2013, 2013). I nærværende masterrapport er testhusets stueplan baseret på fugtbelastningsklasse 2.

Måned	Luft-temperatur	RF _{ude}	Inde-temperatur	Fugtbelastningsklassegrænser ved 20°C			
	TRY	TRY		% RF			
	°C	%	°C	1-2	2-3	3-4	4-5
januar	-0,6	94	20	35	46	58	69
februar	-1,1	91	20	35	46	58	69
marts	2,6	91	20	39	49	58	69
april	6,6	82	20	45	53	58	69
maj	10,6	78	20	50	56	60	69
juni	15,7	67	22	55	59	64	69
juli	16,4	74	23	59	62	66	69
august	16,7	71	23	61	64	66	69
september	13,7	85	22	58	62	65	69
oktober	9,2	87	20	51	57	63	69
november	5	91	20	45	53	61	69
december	1,6	88	20	38	49	59	69

TRY⁸ er et andet vejrdatasæt, som kan benyttes ved mindre detaljerede beregninger, eller til realistisk vurdering af en konstruktion ved eksempelvis en Glaser beregning⁹. TRY er baseret på månedsmiddel for udendørs lufttemperaturer og relative luftfugtigheder.

I Tabel 2 (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. s. 66) er TRY sammenholdt med indetemperaturer samt fugtbelastningsklasser iht. (DS/EN ISO 13788:2013, 2013), se Figur 5.

I WUFI er der ikke et vejrdatasæt for Danmark. Dermed benyttes vejrdatasættet for

Lund, som både er geografisk tæt på Danmark og som antages at være tilstrækkeligt ens med danske forhold. WUFI er dog et tysk udviklet program, og der er derfor forskelle i de datasæt, som anvendes til simuleringerne. Eksempelvis er ikke alle data til WUFI indeholdt i DRY filerne, mens datafilerne for vejrdata fra WUFI ikke indeholder alle de parametre BSim benytter. Dermed kan vi ikke konvertere "Danmark_2013.DRY" direkte til WUFI's system eller omvendt.

⁷ DRY = Design Reference Year, Danmark, er defineret i (DMI Teknisk Rapport 12-17, 2012) samt (DMI Teknisk Rapport 13-18, 2013).

⁸ TRY = Test Reference Year, på dansk referenceåret TRY.

⁹ Glaser metoden kan benyttes til at foretage en stationær vurdering af diffusion igennem en konstruktion på månedsbasis og dermed henover året. Forholdene antages at være konstante på både indvendigt og udvendigt jf. Tabel 2.

Tabel 3: Sammenligning af vejrdatasæt (DRY og TRY) med faktiske målte månedsgennemsnit for Januar, Februar og Marts måned, samt DMI (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019). Det ses tydeligt at alle tre måneder ligger langt højere i gennemsnitlig temperatur end både TRY og DRY. Lund er bemærkelsesværdigt højere end DRY og TRY, dog stadig langt fra det målte. Dermed ligger den relative luftfugtighed ligeledes tilsvarende lavere som funktion heraf. Set med klimaforandringens briller er dette ikke overraskende, selvom gennemsnits temperaturen er meget højere end datasættene. I januar er målinger dog kun udført fra 18.01.2019, og udendørs målinger i testhuset kan nok ikke helt sidestilles direkte med DMI's krav til placeringer af målere. Udendørs målere har i testhuset været placeret under udhænget på nordsiden af huset.

Datasæt	TRY		DRY		LUND		MÅLT		DMI _{københavn}	
Måned	Temp _{·ude}	RF% _{ude}	Temp _{·ude}	RF% _{ude}	Temp _{·ude}	RF% _{ude}	Temp _{·ude}	RF% _{ude}	Temp _{·ude}	RF% _{ude}
Januar	-0,6	94,0	0,7	89,2	2,9	87,9	1,4	83,1	2,0	84,6
Februar	-1,1	91,0	0,4	91,1	2,8	85,8	6,2	82,1	4,7	83,5
Marts	2,6	91,0	-0,7	86,7	4,4	80,0	7,9	77,5	5,8	81,0

Som det ses i Tabel 3, ligger både DMI's målte værdier og vores målte værdier i testhuset for luftens temperatur og relative fugtighed langt over de værdier som BSim benytter til simuleringerne.

3.1.11 Hygroskopi

Hygroskopiske materialer optager og afgiver vanddamp fra luften. Det sker eksempelvis i træ. Denne optagelse eller afgivelse af fugt fortsætter indtil materialet er i ligevægt med omgivelserne. Materialer, der er hygroskopiske, er porøse og optager fugten via de porer, der er i kontakt med luften. Jf. (Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 24-25) kan materialer inddeles i 4 grupper, alt efter størrelsen og typen af porer.

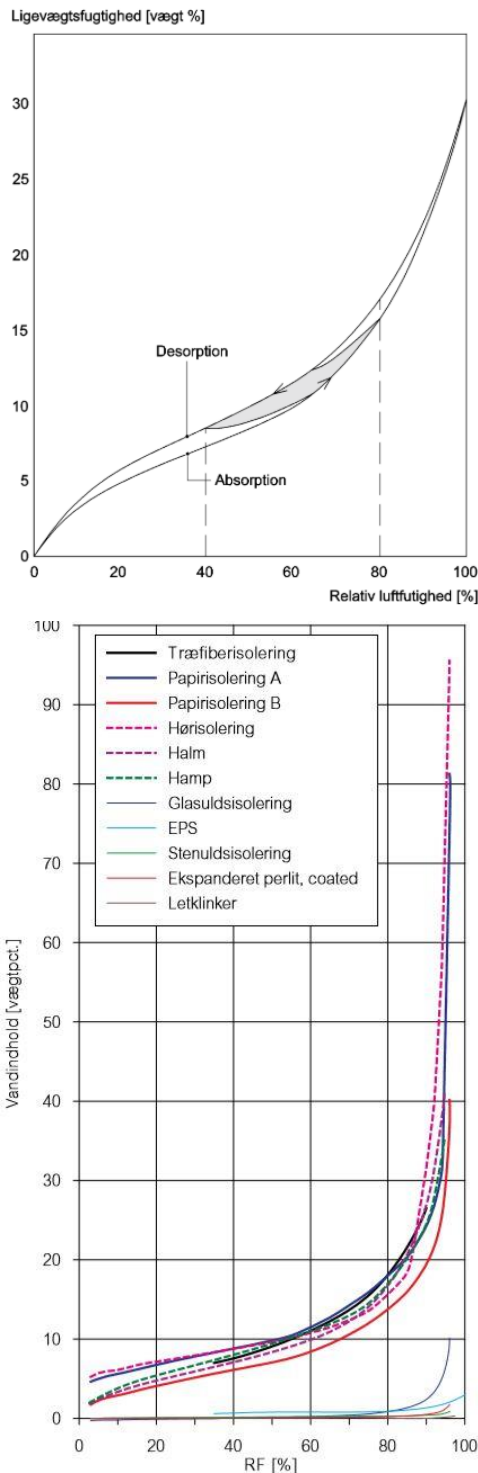
Den 1. gruppe er faste materialer uden porer og er dermed ikke-hygroskopiske materialer. Det kan eksempelvis være glas eller metaller.

Gruppe 2 er faste materialer med lukkede porer, der ikke er sammenhængende, men har små rør i en retning. Det kan eksempelvis være polystyren.

Gruppe 3 er faste materialer med sammenhængende poresystemer. Det kan eksempelvis være træ eller tegl.

Gruppe 4 er ikke-faste materialer med sammenhængende porer eller hulrum. Det kan eksempelvis være mineraluld eller lecanødder. Porernes størrelse er betydende for mængden af vand på dampform eller væskeform, der kan optages og afgives. Optages vandet på væskeform, er der tale om kapillarsugning, hvilket normalt ikke vil forekomme i tagrum med tætte tage.

Et materiale kan optage fugt på flere måder samtidigt, hvis det bliver udsat for de rette påvirkninger som nedbør eller lignende. Optagelse og afgivelse af fugt vil i de fleste materialer resultere i ændrede materialeegenskaber som forringet isoleringsevne eller i dimensionsændringer, hvilket kan ses i træets udvidelse ved opfugtning. Mængden af fugt som materialer udveksler med luften afhænger af typen af materialet.



Figur 12: Adsorptionskurve, Desorptionskurve samt hysteresese, for et materiale. Normalt vil materialet befinde sig i hysteresese-området, under konstant påvirkning af ændringer i omgivelsernes temperatur og luftens relative fugtighed.

Denne sammenhæng mellem den omgivende lufts relative luftfugtighed og materialets vandindhold kan ses ud fra materialetypens sorptionskurve. Sammenholdes forskellige materials sorptionskurver, kan materialernes evne til at optage og afgive fugt til omgivelserne sammenlignes.

Ses på det enkelte materiale vil de fleste materiale have to kurver, en for adsorption (opfugtning) og en for desorption (affugtning). Dette skyldes, at der er forskel på måden hvorpå fugten optages og afgives. Hvis materialet opfugtes, affugtes og igen opfugtes, vil ligevægtsfugtindholdet bevæge sig mellem adsorptionskurven og desorptionskurven, hvilket kaldes hysteresese, se Figur 12. Fugtindholdet i materialet påvirkes af omgivelsernes relative fugtighed og temperatur, altså er de hygrotermiske forhold bestemmende for, om der sker en befugtning af materialet eller om det udtørres.

Afhængigt af materialet kan sorptionskurven være mere eller mindre stejl, alt efter materialets fugtkapacitet. De fleste materialer har højere fugtkapacitet ved meget høje eller meget lave relative luftfugtigheder.

Fugtkapaciteten vil bevirke, at nogen materialer kan fungere som buffer, eller fugtlager, i en given bolig eller bygning. I situationer med høj relativ fugtighed optager materialet meget fugt, som så afgives igen, når luftens relative fugt er lavere. Dette bevirker også, at materialer som træ skal akklimatiseres inden indbygning, for at sikre at det ikke udvider eller trækker sig efter indbygning.

Figur 13: Eksempel på sorptionskurver for isoleringsmaterialer, jf. (SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer, 2003, s. 20) I nærværende masterrapport undersøges både papirisolering og mineraluldsisolering (eks.glas- eller stenuldsisolering).

Byggefugt og udtørring af konstruktioner er af samme årsag også et enormt vigtigt parameter, idet en for tidlig indbygning hurtigt kan resultere i ombygning og et økonomisk tab, som i langt de fleste tilfælde kunne være undgået.

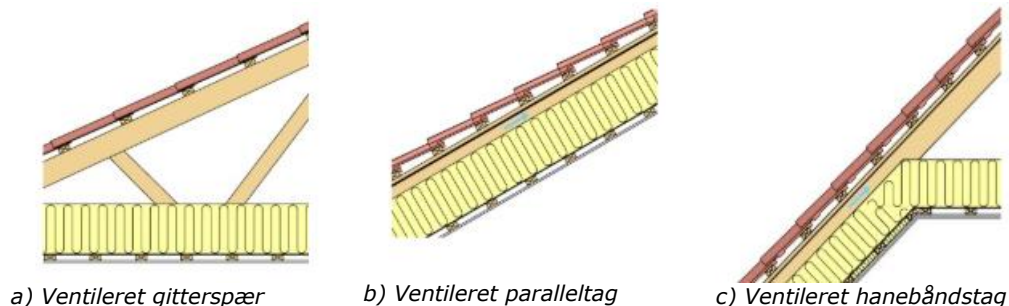
3.2 VENTILEREDE TAGE GENNEM TIDEN

Med udgangspunkt i Kyotoaftalen og senere tilkomne EU målsætninger, som bl.a. Parisaftalen, er der kommet øget fokus på klimaforandringerne, hvor Danmark har forpligtet sig til at reducere vores CO₂ udslip. Dette skal ske ved bl.a. at nedsætte udledning fra bygningers drift og ved at reducere energiforbruget til opvarmning af bygninger. Denne reduktion af bygningers varmetab håndteres igennem bygningsreglementet. (Energistyrelsen, 2019) (Møller E. B., 2012, s. 17, 24)

Varmetabet reduceres primært i nye bygninger ved at tilføje mere isolering til normal konstruktioner og gøre bygningerne mere tætte. (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Litteraturstudie, målinger og beregninger, 2017, s. 4)

Før oliekrisen og BR66 havde etageadskillelsen mellem bolig og tagrum kun lidt eller ingen isolering. Varmen steg fra underliggende rum op i tagrummet, hvor den opvarmede luften, som dermed kunne optage fugttilskuddet fra f.eks. boligen. De mere velisolerede og tætte bygninger har skærpet opmærksomheden på indeklimaet, da fugtproduktionen fra f.eks. bad og madlavning nu ikke længere "bare forsvandt", men i stedet skulle håndteres ved øget ventilation og tæt dampspærre. (Møller E. B., 2012, s. 19, 29) (BYG-ERFA, 2013) (BYG-ERFA, 2015)

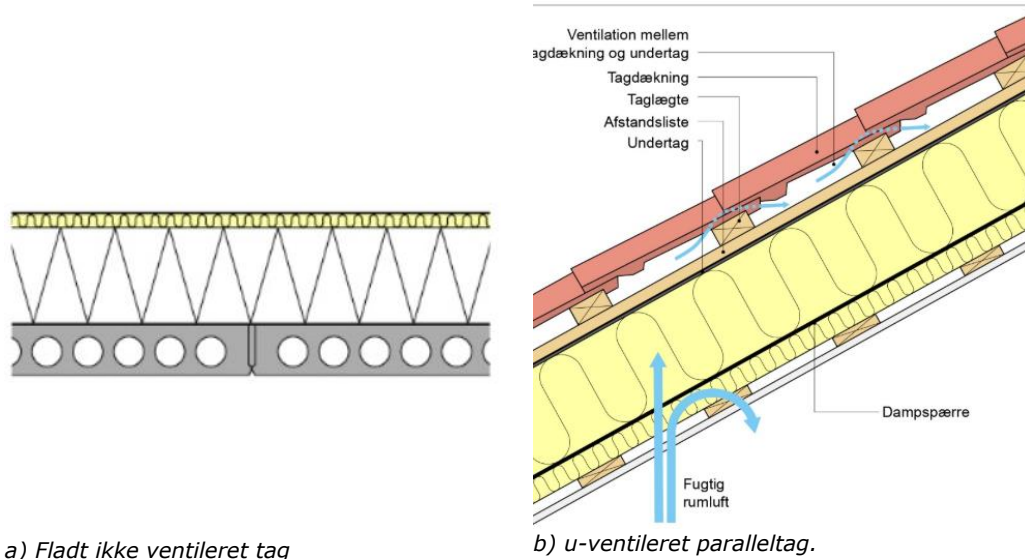
Problemstillingen er særlig relevant i ombygnings- og renoveringssammenhænge, hvor der ofte er et BR-krav om efterisolering, hvis den er rentabel. Hvis bygningen er fra før ca. midten af 1960'erne, er det usikkert, om der er dampspærre og hvis der er, er dampspærrens tæthed begrænset. (Møller E. B., 2012, s. 45-67)



Figur 14 a, b og c viser forskellige ventilerede tage. Der ventileres mellem undertag og tagbeklædning for at undgå fugtskader og råd i taglægter. (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019)

Der kan generelt skelnes mellem ventileret og uventilerede tage. Uventilerede og ventilerede tage anvendes i alle tagformer.

Ventilerede tage ses i form af f.eks. ventilerede gitterspærstage, hanebåndstage, ventilerede paralleltage (Figur 14, a, b, c). Ventilationen er som regel udført med ventilation i tagfod og rygning eller øverste fag i undertaget eller i gavl. Ventilerede tage ventileres mellem undertag og isolering. Efter undertage er blevet introduceret, ventileres der ligeledes også mellem undertag og tagbeklædning. (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019) (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)



a) Fladt ikke ventileret tag

b) u-ventileret paralleltag.

Figur 15 a og b: Det flade tag (a) er uventileret og opført diffusionstæt med tæt dampspærre og tæt tagpapbelægning. Paralleltaget er uventileret mellem isolering og ventilation. Der er i stedet etableret diffusionsåbent undertag. Kilde: (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019)

Uventilerede tage er ofte flade tage, hvor konstruktionen er udført med diffusionstæt dampspærre og tagbelægning (Figur 15, a, b). Uventilerede tage ses også i f.eks. udnyttede tagrum med isolerede skråvægge. I stedet for at ventilere mellem undertag og isolering skal der anvendes diffusionsåben undertag. I tagrum uden ventilationsspalter skal der etableres lidt ventilation for at modvirke risikoen for opfugtning pga. termisk opdrift. (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019) (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013)

Det ventilerede tagrums funktion i det tempererede klima er primært at holde tagfladen kold og holde den relative luftfugtighed i tagrummet så lav, at der ikke opstår kondens. Det ventilerede tagrum har historisk set været det foretrukne valg, men i takt med at tage er blevet mere komplekse med f.eks. flere ovenlysvinduer, har uventilerede tagkonstruktion vundet indpas. (Lstiburek, 2006) (Iffa & Tariku, 2016)

Problemstillingerne ved ventilerede tagrum varierer, afhængig af om tagrummet befinder sig i et fugtigt eller tørt klima og koldt eller varmt klima samt om tagrummet er nær kysten eller inde i landet. (Iffa & Tariku, 2016)

I kolde lande benyttes det ventilerede tagrum oprindeligt til at holde tagfladen kold og først senere i takt med mere velisolerede tage, til at fjerne overskudsfugt. Ønsket om at holde tagfladen kold var begrundet i, at varmetabet fra tagrummet ellers ville danne smeltevand på taget, som ville være skyld i is og sneophobninger på tagoverhæng, der resulterede i ødelagte tage. Om someren holder det ventilerede tagrum bygningen kølig, da varm luft ventileres bort og tagfladen beskyttes mod solen. (Forgues, 1985)

Fugten i det ventilerede tagrum kommer fra det opvarmede underliggende rum og fra udeluften. Jo varmere luft er desto mere fugt kan den indeholde. Fugttilskuddet kommer primært fra madproduktion, bad samt mennesker, der afgiver fugt. Den varme fugtige luft drives op (via skorstenseffekten, se afsnit 3.1.2) i loftet gennem utætheder eller diffusion igennem konstruktionen. Når den varme fugtige luft køles ned, kondenserer den i konstruktionen eller på

overflader i tagrummet. Dette kan forårsage fugtskader, skimmel og råd.
(Forgues, 1985) (BYG-ERFA, 2015)

Forskellige studier i USA og Canada har konstateret, at fugttilskuddet igennem loftskonstruktionen primært stammer fra luftstrømme igennem utætheder i dampspærren eller dampspærende lag og at diffusion, kun spiller en sekundær rolle, hvis der er udført dampspærre. I USA og Canada ses utæthederne ofte som utætte samlinger i dampspærren eller omkring ventilations- og elgennemføringer. (Iffa & Tariku, 2016)

Studierne fra USA og Canada samt et Svensk studie argumenterer for, at det er vigtigere at lukke af for utæthederne end ventilering af tagrummet. Utæthederne er den primære årsag til høj RF i tagrummet, som den kolde luft om vinteren har svært ved at ventilere bort, da den ikke kan optage så meget fugt. Det kan derfor argumenteres for, at ventilering af tagrummet om vinteren er u hensigtsmæssig, da vinterluften kan tilføre fugt i stedet for at fjerne den. I samme studie konkluderes det ligeledes, at der er behov for ventilation af tagrummet resten af året grundet risiko for fugtakkumulering fra varm luft og dermed at ventilation ikke kan undværes alligevel. I studierne er der generel anbefaling om et ventilationsareal på 1:300 i forhold til det bebyggede areal (baseret på erfaring), hvor "erfaringerne" i Danmark er 1:500. (Iffa & Tariku, 2016) (Lstiburek, 2006) (Samuelson, 1998)

Foreløbige resultater fra Projekt DaLo understøtter ovenstående konklusion om vigtigheden af lufttætte konstruktioner. (VIF-isolering.dk/nyheder, 2019)

3.2.1 Myndighedskrav og erfaringer

Frem til bygningsreglementet i 1961 (BR61) har der ikke været nogen landsdækkende krav til klimaskærmens isoleringsevne. (Møller E. B., 2012, s. 24).

Med BR61 samles alle krav i et landsdækkende reglement, der udover mindste isoleringsevne nu bl.a. stiller et generelt krav til fugtisolering, så der ikke må kunne opstå kondensfugt indvendigt eller udvendigt på konstruktionerne. (Bygge- og boligstyrelsen, 1961, s. 63, 66)

Der var egentlig ikke noget krav til ventilering af tage eller dampspærre før 1966, hvor der i bygningsreglementet fra 1966 direkte angives at:

"Tagkonstruktioner, der indeholder træ eller andet organisk materiale, skal forsynes med ventilationsåbninger placeret således, at ventilationsluften fordeler sig jævnt over hele tagfladens underside. Ventilationsåbningernes samlede nettoareal skal være mindst 1/500 af det bebyggede areal. Mellem tagkonstruktioner af træ og opvarmede rum skal der anbringes et dampstandsende lag på den side af varmeisoleringen, der vender mod det opvarmede rum". Citat fra (Bygge- og boligstyrelsen, 1966, s. 78 stk. 7)

Man er altså opmærksom på behovet for at sikre mod kondens og at løsningen bl.a. er at sikre ordentlig ventilation af tagrummet og begrænse tilførslen af opvarmet rumluft til tagrummet.

I 1966 benyttede man typisk alu-folie dampspærre, som har tilsvarende diffusionstæthed som dampspærre i dag. Man var dog ikke opmærksom på, at folien skulle lægges med overlap og tættes i samlinger, hvorfor folien ikke havde den tiltænkte tæthed. (BYG-ERFA, 2015)

I bygningsreglementet fra 1977 stilles der krav om at dampspærren skulle udføres, så der ikke kunne ske luftgennemstrømning. (Bygge- og boligstyrelsen, 1977, s. 97 stk. 7.7). I løbet af 1980'erne blev krav til samlinger præciseret og man begyndte at udføre dampspærren med overlap og tætte, klemte samlinger for at opnå den ønskede tæthed. (BYG-ERFA, 2015)

Den primære årsag til at isoleringskravene blev skærpet frem til 1980'erne har været et ønske om energibesparelser (Figur 16), mens forbedret indeklima og reduktion af fugtskader har været en velkommen sideeffekt. Ønsket om energibesparelser kom særlig til udtryk i bygningsreglementet fra 1977, hvor f.eks. tagets maksimale varmeisoleringsevne (U-værdi) blev halveret fra 0,45 W/m²K til 0,2 W/m²K. Skærpelsen kom bl.a. som følge af energikrisen i 1973. (Møller E. B., 2012, s. 24)

Siden da har Danmark igennem EU og FN forpligtet sig til at nedbringe det samlede CO₂ udslip (Energistyrelsen, 2019). Dette kommer bl.a. til udtryk ved de løbende stramninger af tilladeligt varmetab fra klimaskærmen, som det ses af Tabel 4.

Tabel 4: Udvikling af mindste U-værdikrav (W/m²K) i bygningsreglementer i perioden 1961-2018 ved ombygninger og nybyg. (Møller E. B., 2012, s. 25, tabel 3)

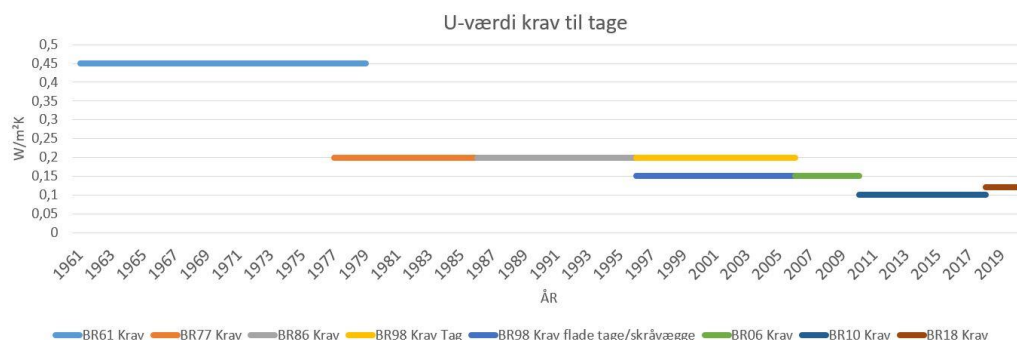
Periode	Tung ydervæg	Let ydervæg	Tag	Terrændæk	Vinduer
1961-1979	1,00	0,60	0,45	0,45	2,90 ³⁾
1979-1986	0,40	0,30	0,20	0,30	2,90
1986-1998	0,35	0,30	0,20	0,30	2,90
1998-2006	0,30	0,20	0,15 ¹⁾	0,20	1,80
2006-2010 ²⁾	0,20	0,20	0,15	0,15	1,50
2010-2018 ²⁾	0,15	0,15	0,10	0,10	Nye regler ⁴⁾
Fra 2018 ²⁾	0,15	0,15	0,12	0,10	Nye regler ⁴⁾

1) For flade tager og skråvægge direkte mod tag var værdien 0,2

2) U-værdier gælder for bygningsdel omkring rum, der opvarmes til mindst 15°C og kun for om- og tilbygninger

3) Krav fra 1972

4) Vinduer vurderes ikke længere alene på U-værdi, men også energitilskuddet (E_{ref})



Figur 16: Udvikling af u-værdikrav til tagkonstruktion fra bygningsreglement 1961 og frem til i dag. Efter energikrisen i 1973 blev kravet strammet op og u-værdien halveret. Fra 1998 blev der gjort forskel på kravet til alm. tagkonstruktioner og flade tage samt skråvægge. I BR18 er kravet slækket fra 0,1 til 0,12 W/m²K, hvilket højst sandsynligt skyldes at kravet dels er svært at overholde, samt at det stadig skal ses i sammenhæng med den samlede energiramme, som blev indført i 2006.

I 2006 kommer der krav til lufttæthed af klimaskærmen ved opførelse af nye bygninger. Jf. DS/EN13829 måtte infiltrationen gennem utætheder i klimaskærmen ikke overstige 1,5 l/s pr. m² opvarmet etageareal ved overtryk på

50 Pa. (Trafik-, bygge- og bolistyrelsen, 2006) Ved indførelse af dette krav kunne energiforbruget til bygninger nedsættes betragteligt. Kravet begrænsede også strømningen af varm fugtig luft i mellem uopvarmede og opvarmede rum og dermed kunne fugt- og skimmelskader begrænses. (Møller E. B., 2012, s. 29)

I forbindelse med denne ændring blev man opmærksom på, at samlingerne i dampspærren ikke blev tilstrækkelige tætte ved at klemme samlinger, som man hidtil havde gjort. Man gik i stedet over til at fuge og tape dem i stedet, som man gør i dag. (BYG-ERFA, 2015)

I bygningsreglementet for 2018 er det tidligere specifikke krav til ventilering af tagrum og forebyggelse mod kondens ændret til funktionskrav. Bygninger skal projekteres, udføres og vedligeholdes, således at vand og fugt ikke medfører en risiko for personers sundhed eller skader på bygningen. (Kap. 14 Fugt og Vådum (§334-§339), 2018)

I SBI anvisning 273 er der opstillet anbefalede min. krav til ventilationsåbninger under hensynstagen til brandsmitte og insektnet, som angivet i Tabel 5. Ventilationsarealerne afhænger af tagets hældning og dybde, men forudsætter generelt en husdybde (facade til facade) på maksimalt 16 m. Ventilationsprincippet 1/500 fra 1966 kan anvendes ved bygninger med dybde på over 16 m. (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013, s. 196) (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019)

Tabel 5: Nødvendig ventilationsåbning mellem isolering og undertag i paralleltag og ventilerede tagrum. Åbninger og studse gælder pr. spærfag med maks. 1,2 m afstand mellem fag. Åbninger ved i tagfod skal være min. 15 mm høje. Hvis der er insektnet skal de være 30 mm høje. Samme princip for studse og spalter i kip, der fordobles, hvis de er udført med insektnet. (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019, s. tabel 7)

	Husdybde	Åbning ved * hver tagfod	Samlet åbning i kip		Type af tagdækning	
			Studse	Spalte		
Tagtype	m	Højde i mm	cm ² (Areal uden/med insektnet)	Højde i mm (Højde uden/med insektnet)	Diskontinu- erte tag- dækninger	Kontinu- erte tag- dækninger
Sadeltag					x	x
≥10 ° hældning	≤ 16	30/15	200/100	20/10		
Pulttag eller tag mod væg	≤ 8	30/15	100/50	20/10	x	x
≥10 ° hældning	≤ 16	30/15	200/100	20/10	x	x
Fladt tag			Ingen åbninger ved kip og ingen ventilationshætter			x
<10 ° hældning	≤ 16	30/15				

**) Hvor der er krav om sikring mod brandspredning, må ventilationsåbningen ved tagfod for nogle bygningstyper højst være 30 mm høj, og den skal være mindst 300 mm lang (Dansk Brand- og sikringsteknisk Institut, 2007).*

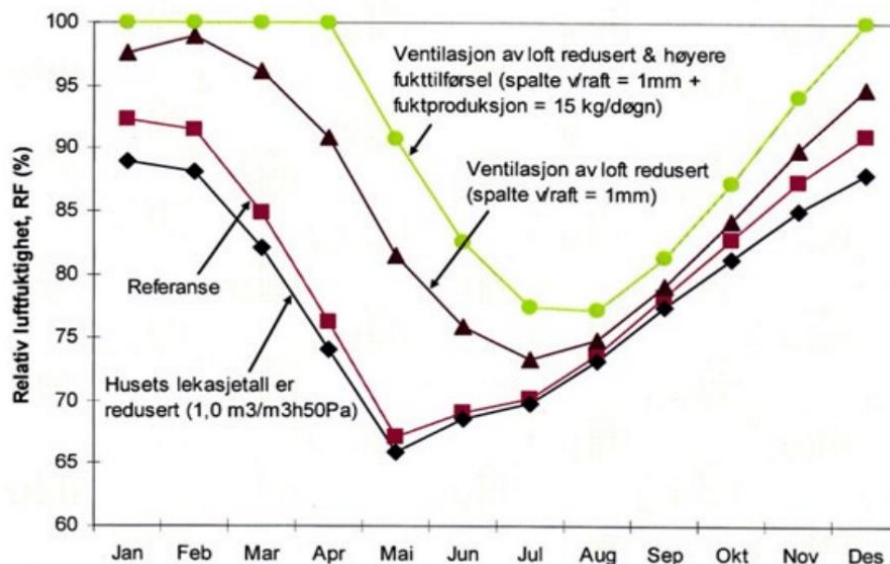
3.2.2 Ventileret tagrum i nybyggeri

I nybyggeri stilles der krav til at klimaskærmens lufttæthed ikke må overstige en infiltration på 1,0 l/s pr. m² ved trykforskel på 50 Pa. (Kap. 11 Energiforbrug (§250-§298), 2018) Dette opnås i dag ved etablering af tæthedsplan med lufttæt dampspærre eller anvendelse af lufttætte bygningsdele. I en let loftkonstruktion vil tæthedsplanet typisk udføres med tæt dampspærre. (Rasmussen & Nicolajsen, 2013, s. 10)

De større isoleringstykkelser i taget stiller større krav til ventilering af konstruktionerne og korrekt udført dampspærre. Endvidere medfører den øgede isolering længere udtørringstider ved f.eks. byggefugt. Højisolerede tage er mere sårbare overfor dårligt udført håndværk eller fejlprojektering, når det kommer til fugt end vægge og krybekældre, da tage er "nemme" at lægge meget isolering i. (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Litteraturstudie, målinger og beregninger, 2017, s. 5)

Risici for skimmel er særlig høj om vinterhalvåret, hvor solen ikke evner at varme tagrummet op tilstrækkeligt så luften kan optage overskydende fugt. Om vinteren er problemstillingen mindre, da gennemsnitstemperaturen er så lav at skimmel ikke trives. (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Litteraturstudie, målinger og beregninger, 2017, s. 10)

I rapporten SBi2017:20 er der foretaget en simulering af et ventileret tagrum med dampspærre og med hhv. 100 mm, 250 mm, 500 mm og 750 mm isolering. Der var ikke de store udfald ved forøgelse af isoleringstykkelsen efter 250 mm, men da der blev simuleret utæt dampspærre og reduceret ventilationsrate i tagrummet, var der tydelige resultater (se Figur 17). (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Litteraturstudie, målinger og beregninger, 2017, s. 21-23)



Figur 17 Simuleringsresultater ved nedsat ventilationsrate, utæt dampspærre og øget fugtbelastning. Klimadata fra Oslo og med 250 mm isolering. (Morelli, Nielsen, & Vanhoutteghem, Litteraturstudie, målinger og beregninger, 2017, s. 23, tabel 15) (Geving, S., Holme, J., 2010, s. 43)

3.2.3 Ventileret tagrum i ældre bygninger

Bygninger opført før 1979¹⁰ har et godt energibesparelspotentiale ved efterisolering af etageadskillelsen mod det ventilerede tagrum. Ældre bygninger blev ofte udført uden dampspærre eller med dampspærre, der ikke sluttede tæt. Ved efterisolering anbefales det, at der generelt etableres dampspærre

¹⁰ Kravet blev gældende med BR77, der indebar en overgangsperiode på 2 år fra 1977 til 1979.

ved isoleringstykkelser på over 150 mm – f.eks. med granuleret mineraluld, da det kan blæses ind over loftet.

Erfaringen siger, at ældre loftsopbygninger med op til 150 mm isolering opvarmer tagrummet nok til at luften i tagrummet kan optage fugten fra det underliggende opvarmede rum og bortventileres. Litteraturen har hidtil sagt, at hvis der isoleres for meget uden at fugten fra det opvarmede rum standses, bliver tagrummet for koldt og der kan opstå kondens (Møller E. B., 2012, s. 66-68) (BYG-ERFA, 2015). Men erfaringerne fra Projekt DaLo siger, at forskellene i temperatur er meget små og dermed er det ikke isoleringens tykkelse, der er årsag til den højere luftfugtighed. Tværtimod er det konvektion igennem utætheder, der er skyld i forhøjet RF fra indeklimaet (VIF-isolering.dk/nyheder, 2019).

Derfor ændres anbefalingen ved efterisolering fra reetablering eller udskiftning af dampspærre, til at denne kan udelades, så længe loftkonstruktionen er lufttæt. Dette er en fordel, da etablering af dampspærre i eksisterende konstruktioner typisk er besværlig uden gennemgribende renovering. (SBI 273 - Tage, 2019, s. 325) (VIF-isolering.dk/nyheder, 2019). Det er vigtigt at tagrummet fortsat ventileres, så tagfoden må evt. tilpasses med vindbræt el. lign. (Møller E. B., 2012, s. 66-68) (BYG-ERFA, 2015)

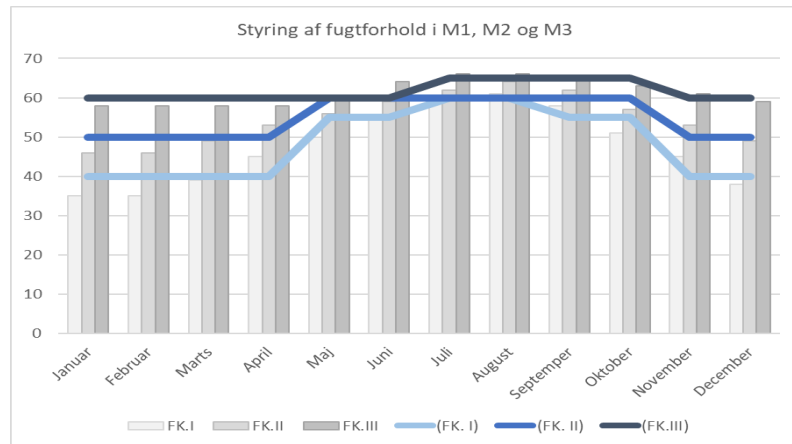
Det kan meget vel være en af årsagerne til, at der igennem årene er dukket alternative typer isolering op på markedet. F.eks. papiruld, der ifølge producenten skulle have en fugtbuffereffekt, hvor overskudfugt fra luften optages i isoleringen og frigives igen, når luftforholdene tillader det. (Papiruld Danmark, 2019)

I Sverige er der i midten af 1990'erne udført forsøg med 8 tagrum, hver med sin type isolering og type ventilering, hvor der er monitoreret temperatur og relativ luftfugtighed i hver tagrum i forsøgsperioden. Der er i forsøget anvendt mineraluldsgranulat og cellulosefibre. Tagrummene er naturlig eller mekanisk ventileret eller uden ventilation. Formålet med forsøget var at udarbejde matematiske modeller til at forudse fugtudvikling i tagrum, ved at sammenligne målt data med beregninger. Resultatet var, at målingerne ikke stemte overens med programmernes beregninger. Dog kunne der delkonkluderes på målinger, som viste en lille buffereffekt i cellulosefibrene sammenlignet med mineralulden. Ligeledes kunne det konstateres, at der var meget store temperatur- og luftfugtighedsvariationer, jo større udeluftens ventilationsrate blev. Studiet anbefaler således lufttæt dampspærre, ventilering af tagrum og begrænsning af byggefugt, som grundlæggende stadigvæk er anbefalingen i dag. (Samuelson, 1998).

3.3 PROJEKT DALO

Projekt DaLo har siden 2016 arbejdet på at undersøge om behovet for dampspærre i forskellige typer loftskonstruktioner kan fraviges ved nogen typer af lofter. SBI har opført et fuldskala forsøgshus, som simulerer fugtforhold i tilsvarende boliger i tre niveauer – M1 = fugtklasse 1, M2 = fugtklasse 2 og M3 = fugtklasse 3- i tre separate sektioner.

Figur 18: Styring af fugtforhold i M1-M3. Fugtklasserne indstilles manuelt på befugteren i hver sektion, hvilket er angivet med de farvede streger (FK.I), (FK.II) og (FK.III)



Styringen af temperatur blev håndteret af en luft-til-luftvarmepumpe, af mærket Bosch i hver sektion, M1, M2 og M3. (Se Figur 19).

Fugtklasserne¹¹ styres af en befugter af typen Brune B300, som manuelt indstilles hen over året til tilpassede RF%, jf. Figur 18. Vandtilførslen til befugter blev manuelt opfyldt en gang om ugen i en vandbeholder, som blev tilsluttet befugteren via en mindre beholder med en flyder, som åbner/lukker for vandet efter behov. (Se Figur 20)



Figur 20: Befugteren er tilsluttet en mindre vandbeholder med en flyder, som styrer vandtilførsel fra den store vandtank. Den store tank opfyldes manuelt en gang om ugen.

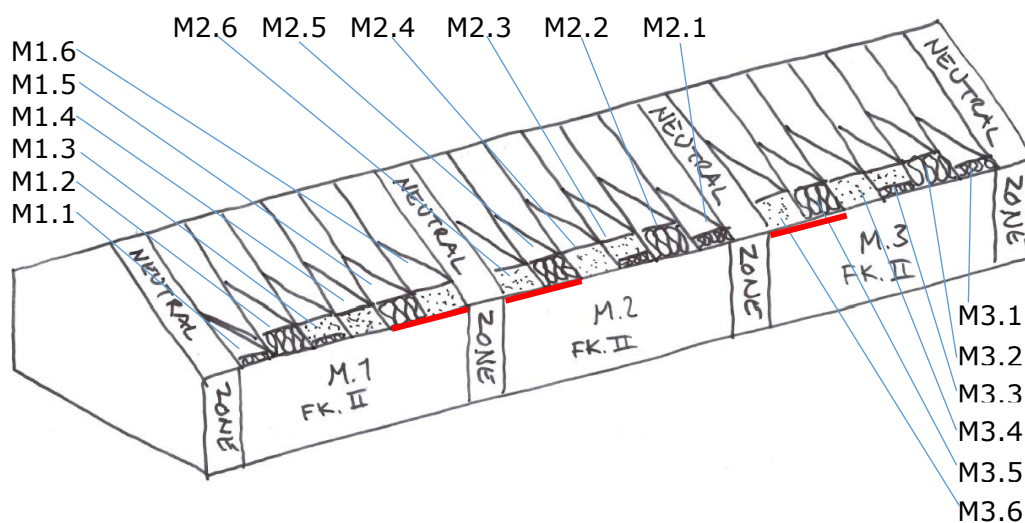


Figur 19 Varmepumpen er monteret på væggen, hvor også målerbokse til træfugtmålere (for hver tagrum) er placeret.

¹¹ Fugtklasserne, generelt, er defineret ud fra (DS/EN ISO 13788:2013), se afsnit 3.1.6

Loftkonstruktioner er opbygget som følger:

MX.1: (M1.1 / M2.1 / M3.1)	150 mm Mineraluldsgranulat, kl. 41 uden dampspærre 13 mm Gipsplade
MX.2: (M1.2 / M2.2 / M3.2)	400 mm Mineraluldsgranulat, kl. 41 uden dampspærre 13 mm Gipsplade
MX.3: (M1.3 / M2.3 / M3.3)	100 mm Mineraluldsgranulat, kl. 41 300 mm papiruldsgranulat (cellulose), kl. 39 uden dampspærre 13 mm Gipsplade
MX.4: (M1.4 / M2.4 / M3.4)	400 mm Papiruldsgranulat (cellulose), kl. 39 uden dampspærre 13 mm Gipsplade
MX.5: (M1.5 / M2.5 / M3.5)	400 mm Mineraluldsgranulat, kl. 41 med dampspærre, 0,2 PE-folie 13 mm Gipsplade
MX.6: (M1.6 / M2.6 / M3.6)	400 mm Papiruldsgranulat (cellulose), kl. 39 med dampspærre, 0,2 PE-folie 13 mm Gipsplade



Figur 21: Tagrum over de 3 sektioner (M1, M2 og M3) er underdelt i 6 mindre sektioner som er adskilt luft- og damptæt fra hinanden. Disse 6 sektioner, MX.1, MX.2, MX.3, MX.4, MX.5 og MX.6 har nedenstående forskellige loftopbygninger, over hver af de 3 underliggende hovedsektioner. I projekt DaLo er alle tagrum ventileret jf. (SBI 273 - Tage, 2019, s. tabel 7)

Alle konstruktioner er lukket luft- og damp tæt mod tilstødende tagrum og mod stueplan, ved brug af 0,2 mm PE-folie, udført som Icopal Elefanthud, med tapede samling på fast underlag (Figur 22). Samlinger i plader er fuget med elastisk fugemasse af ukendt type.

Taget er opbygget på gitter-spær, med en tagopbygning bestående af et lyst metalpladetag, som TP19 eller lignende, med diffusionstæt undertag af banevare af typen Monarfol Super, med en Z-værdi på 855 GPa s m²/kg.

Tagrum ventileres med 4 x 30 mm ventilationsspalter i tagfoden mellem spær samt to ventilationsstudser i kip, af typen Icopal IcoAir (se Figur 23) med et ventilationsareal på 50 cm² pr. studs. Ventilations-spalterne i tagfoden er udstyret med insektnet og dermed er ventilationsarealet ca. 50% af det geometriske areal. Jf. tabel 7 (SBI 273 - Tage, 2019, s. afsnit 2.3.2) overholder forsøgshuset kravene til åbningsarealer.

Facader er opbygget som lette facader, med metalplade facader, ventileret hulrum, vindplade, isoleret trækonstruktion, dampspærre og en indvendig gipsbeklædning.

Gulv mod terræn er hævet over det omkringliggende terræn, for at minimere omkostningerne ved etablering af testhuset. Gulvkonstruktionen vurderes at være isoleret med ca. 300 mm mineraluld, afsluttet med dampspærre og gulvspånplader.

Projekt DaLo er i skrivende stund endnu ikke offentliggjort, men erfaringerne med projektet er flere gange meldt ud i orienteringer til pressen og følgegruppen.

Ifølge disse, tyder projektets resultater på, at dampspærren i nogen tilfælde kan udelades ved efterisolering af lofter, såfremt at lofter er lufttæt.

Samtidigt tyder det på, at indeklimaet ikke nødvendigvis er den mest betydende faktor for fugtforholdene i ventilerede tagrum. (VIF-isolering.dk/nyheder, 2019).



Figur 22: Adgangslem mellem to tagrum. Forseglet med grøn og blå dampspærretape fra Dafa, således at luft- og damptæthed bliver bedst muligt sikret.



Figur 23 Icopal IcoAir. Ventilationsstudsens er vist med delvist blokeret ventilationsareal.

3.4 SIMULERINGSPROGRAMMER

3.4.1 WUFI PRO ver. 6.3

WUFI (Wärme Und Feuchte Instationär) pro er et 1-dimensionelt dynamisk simuleringsprogram, der gennem fugt- og varmestrømberegninger kan anvendes til vurdering af kondensfare samt udtørringstider, slagregnspåvirkning mv. af en given bygnings klimaskærm. Beregningerne udføres som numeriske beregninger i "steps" på timebasis

WUFI anvender materialers hygrotermiske- og varmeegenskaber i kombination med vejrdata fra konstruktionens placering til at vurdere fugttransporten i konstruktionen. Drivkraften for fugten er den relative luftfugtighed og temperaturen.

WUFI simulerer fugttransport i form af diffusion og kappilarsugning og er ved flere uafhængige studier valideret ved sammenligninger af feltmålinger og WUFI resultater. Dog er WUFI begrænset af om tilgængelig vejrdata og de faktiske forhold er sammenlignelige. Resultaterne afhænger yderligere af anvendte materialeegenskaber og øvrige klimaparametre er sammenlignelige med virkeligheden. Det vil sige, at forudsigelser om fremtidig udtørring eller kondensering afhænger af om den anvendte vejrdata afspejler vejret i fremtiden. (Mundt Petersen, 2012)

Der anvendes klimadata fra Lund i Sverige, da WUFI ikke tilbyder klima fra Danmark. (Nielsen, 2014)

I Tyskland, hvor WUFI er udviklet anvendes S_d -værdier [m], til at beskrive Z -værdien [$\text{GPa s m}^2/\text{kg}$] og μ -værdien [-], til at beskrive til at beskrive damp-permeabiliteten i et materiale. μ -værdien beskriver et materiales dampmodstand (permeabilitet) i forhold til lufts dampmodstand. Et materiale med en μ -værdi på 1 er altså lige så permeabel som luft. Er μ -værdien f.eks. 5, har et 1 m tykt materiale samme modstand som et 5 m luftlag. S_d -værdien omsætter tykkelsen af et materiale med en given μ -værdi til en tilsvarende tykkelse [d] på et luftlag med tilsvarende dampdiffusionsmodstand [S_d] som materialet.

(Fraunhofer IBP, 2019), (Morelli, 2012)

Altså er $S_d = \mu \times d$, og $Z = (\mu \times d) / \delta_{air}^{12} = S_d / \delta_{air}^{12} = d / \delta_{materiale}$

WUFI er endimensionel og kan derfor ikke regne på f.eks. bjælker i isoleringen. WUFI kan ikke simulere fugttransport via konvektion, hvilket betyder, at modellen må opbygges på en måde, så konvektionen simuleres via faktorer og ekstra luftlag med forskellige kapaciteter.

Der findes forskellige skimmelmodeller til WUFI til analyse skimmelrisikoen for en given konstruktion. Se endvidere afsnit 3.5.

3.4.2 BSim ver. 7.16.8.11

BSim (Building Simulation) består i dag af 6 forskellige moduler, der tilsammen kan anvendes til simulering af termisk- og atmosfærisk indeklima i en bygning. BSim kan også anvendes til at simulere dagslysforhold og fugtpåvirkninger i bygningen. Hovedsageligt er forskellen mellem WUFI og BSim

¹² δ_{air} svarende til luftens permeabilitet. $\delta_{materiale}$ er materialets permeabilitet.

dog, at BSim simulerer hele bygningen, dvs. indeklima, konstruktioner m.v., hvor WUFI udelukkende fokuserer på den enkelte bygningsdel og 1D.

Ved at angive forskellige systemer, som f.eks. ventilation, varme, brugstid mv. kan BSim vurdere hvordan eksterne påvirkninger, som varme-, CO₂- og fugtbelastning fra mennesker, elektronisk udstyr, solindfald mv. påvirker en bygning.

Ligesom i WUFI er BSim beregningerne dynamiske og afhængige af, at vejrdata og valgte materialer og systemer er sammenlignelige med virkeligheden.

Det er muligt at anvende forskellige vejrdata i BSim. Vi har valgt at anvende DRY, da det er baseret på dansk klimadata og er det mest retvisende (vi har) i DK. Se afsnit 3.1.10.

Med BSim er det ligesom i WUFI muligt at beregne såvel fugttransport som diffusion- og kapillartransport.

BSim beregner dynamiske vind- og ventilationsforhold og kan dermed gengive realistiske ventilations- og fugtforhold i tagrummet og dets materialer. Her er WUFI begrænset til konstante luftskifter, dog kan et målt luftskifte specifikt for rummet anvendes med en omregningsfaktor.

Da vi dels ønsker at analysere fugtforholdene over en længere periode i tagrummene, men også ønsker at vurdere kondenseringen og skimmelrisikoen i de forskellige materialer, udføres simuleringerne både i WUFI og BSim.

WUFI er specialiseret i lange simuleringer af fugtstrømmen og anvendes derfor primært til vurdering af skimmelpotentialet og evt. fugtophobning.

Vi vil bruge BSim til en vurdering af de hygrotermiske forhold (temperaturer og RF) i tagrummet i relation til måleperioden for de forskellige konstruktionsopbygninger.

3.5 SKIMMELVURDERING VED BEREGNINGSMODELLER

Fugt er en væsentlig grund til at vi ser skimmelsvampevækst i vores bygninger, da væksten hænger sammen med en højere fugtighed på eller i materialet.

Fugtniveauet kan have mange årsager, men uanset om det er byggefugt, vandskader eller høj relativ luftfugtighed som følge af fugtbelastningsklassen eller en for lille ventilationsrate, er det vigtigt at belyse årsagen, få at forhindre skimmelsvampevækst.

Skimmelsvampe er overordnet set afhængige af vandindholdet, hvilket angives som vandaktiviteten eller A_w . Ud over vandaktiviteten er temperaturen også vigtig, men også indbyrdes afhængig: Ved lavere temperaturer bliver skimmelsvampenes behov for fugt større, i forhold til at etablere sig. Når materialet og luftens fugt indhold er i ligevægt, svarer vandaktiviteten til den relative luftfugtighed divideret med 100 ($RF/100$). (P. Johansson, 2012).

Udover fugt afhænger væksten af temperaturen, materialets beskaffenhed og tiden, hvor de optimale betingelser for vækst er tilstede. (Se Figur 24) (Sedlbauer e. A., 2001).

Der findes mange forskellige svampefamilier, som alle går under den samlede betegnelse skimmelsvampe. De har dog forskelle og kan blandt andet inddeles efter hvor høj vandaktivitet, de behøver for at kunne gro og udvikle sig. Man inddeler skimmelsvampene i tre overordnede kategorier, efter hvor giftige de er for den menneskelige organisme.

A: Meget giftige, som ikke må forekomme i vores bygninger

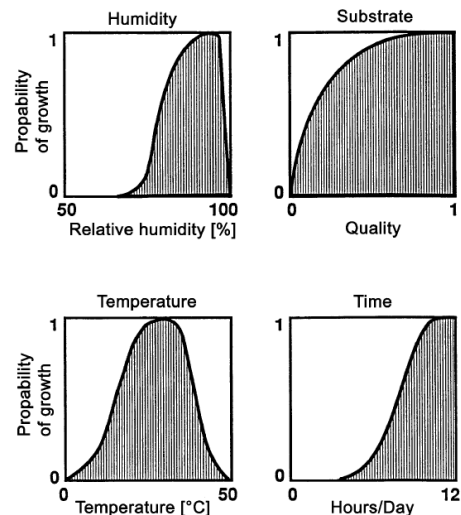
B: Giftige ved eksponeringer over lange perioder og med evt. allergiske reaktioner som følge.

C: Ikke giftige, men med mulige økonomiske konsekvenser.

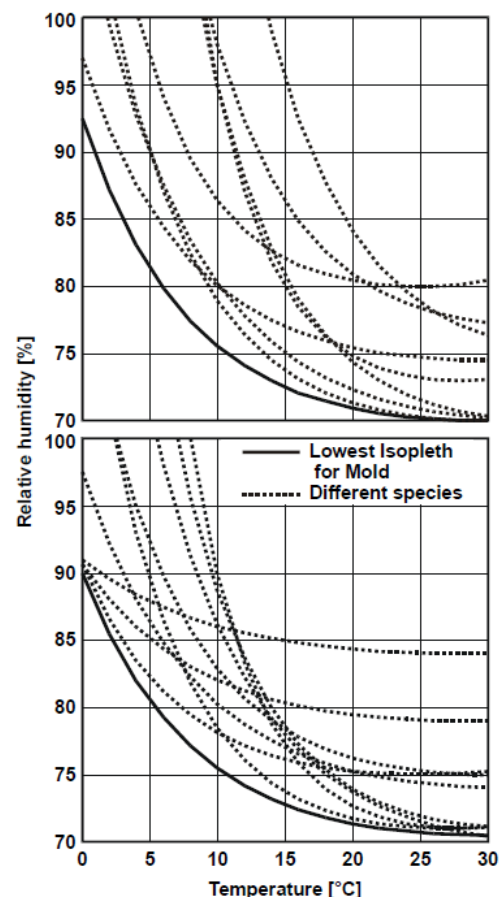
Klasserne B og C slås ofte sammen, da forskellen mellem disse to ikke er stor. Derfor kan der ved skimmelvurderinger normalt skelnes mellem A og B/C. Ud fra disse har man fundet de laveste grænser for etablering af skimmelvækst, hvilket bliver betegnet for LIM¹³. LIM kurven indtegnes som funktion af temperatur og luftens relative fugtighed og dertil kan eksponeringstiden angive kurvens placering. (Se Figur 11 og Figur 25.)

Samtidigt har materialerne meget forskellige egenskaber, hvor nogen er meget modtagelige for skimmelvækst end andre. Men organiske materialer, så som træspær i tagrum, er i risikogruppen. Risiko bliver dog højere, hvis de organiske materialer er i et klima med en høj relativ luftfugtighed og høj temperatur.

I tage vil utætheder i tagbelægning, utætheder i eller manglende dampspærre mod bolig, slagregn og fygesne og for lav ventilationsrate m.v., formodentlig give betydelig større risiko for skimmelvækst. Samtidigt kan synlig skimmelvækst i tagrum også være tegn på utætheder i tagkonstruktionen,



Figur 24: Skimmelsvampes vækst afhænger primært af fugt, temperatur, materialet / næring og tid. Her skematisk fremstillet jf. (Sedlbauer e. A., 2001).



Figur 25: LIM kurven angiver kurven for "lavest mulige vækst" ved en given temperatur og relativ luftfugtighed. (Sedlbauer e. A., 2001)

¹³ LIM = Lowest Isopleth for Mould, altså den laveste observerede grænse for etableringen af skimmelvækst.

loftkonstruktionen eller manglende ventilation.

Skimmelvækst har en kendt latent periode på forskellige materialer. For simuleringer er der udviklet flere skimmelmodeller, som alle ser på skimmelvækst ud fra temperatur og fugt i sammenhæng med valgte materials kendte reaktion over tid på disse forhold.

VTT, WUFI BIO og MRD er tre forskellige skimmelmodeller, som kan benyttes sammen med simuleringssværktøjet WUFI, til at undersøge om en udvikling af skimmelsvampe er sandsynlig under givne forhold. Der findes mange andre skimmelmodeller, f.eks. Time-of Wetness m. flere, men disse tre fungerer godt med WUFI.

Alle modellerne ser på materialets overfladeegenskaber, og de simulerede temperatur og fugtforhold, hvor med en periode med vækst evt. kan ses som en stigning på en graf. Modellerne har dog forskellige måder at vurdere forholdene på, hvilket vil blive nærmere uddybet herunder:

Skimmelsvampes livscyklus kan inddeles i tre faser hvor den første er etableringen af svampen (spore germination), den anden fase er opblomstringen af svampen (mycelium growth) og den tredje er forplantningsfasen (sporulation), hvor skimmelsvampene udsender sporer. De tre modeller herunder fokuserer alle på den første fase og til dels også den anden fase. Dette skyldes, at den bedste måde at undgå skimmelsvampe er at undgå, at de etablerer sig i det hele taget, hvilket samtidigt også sikrer, at andre typer af svampe heller ikke kan få fodfæste. (Sedlbauer e. A., 2001)

3.5.1 VTT

Oprindeligt blev VTT modellen kun udviklet til fyrretræ og gran, men er senere blevet opdateret til at indeholde de mest brugte typer af materialer, bl.a. beton og gips. Modellen blev oprindeligt udviklet, som en empirisk¹⁴ model, baseret på en række laboratorieforsøg i 1990'erne, udført af Viitanen og Ritschkoff i 1991 og senere videreudviklet af Viitanen og Ojanen. (Krus, 2010)

VTT-modellen beregner via differentialligninger sig frem til en vurdering af om de ønskede forhold er tilstede. I positivt udfald udregnes væksten pr. tid som så akkumuleres og angives i et index.

Skimmelsvampes udvikling vurderes i forhold til et "Mould Index", med en skala fra 0 til 6, hvor 0 svarer til ingen udvikling og 6 svarer til 100% dækning/udvikling af svampen. Så længe at udviklingen er under 1 er der ingen problemer, men 1 svarer til at skimmelsvampen er etableret og kan ses i mikroskop med 40 gange forstørrelse. Derfra stiger skalaen til 2, som svarer til 10% dækning. 3 svarer til 10-30% dækning og er synligt uden mikroskop (og producerer nye sporer). 4 svarer til moderat udvikling, dvs. 30-70% dækning af overfladen. 5 er højt udviklet, altså over 70% dækning. Slutteligt svarer 6 til 100% dækning af overfladen. (Vereecken & Roels, 2011, s. 299)

Ud fra modellen kan den kritiske relative fugt for et materiale findes via en formel for RH_{crit} - altså defineres den laveste relative fugt, hvor ved et materiale vil udvikle skimmelsvampe efter en given tidsperiode. Altså definerer RH_{crit} det kritiske fugtniveau på samme vis som en LIM-kurve. Når RH_{crit} overskrides

¹⁴ Empiri = bygger på iagttagelser, undersøgelser, data. I dette tilfælde på laboratorieforsøgenes resultater.

antages skimmelsvampen at udvikle sig. Nedenstående formel benyttes til at vurdere om væksten udvikler sig positivt eller negativt.

$$\frac{dM}{dt} = \frac{k_1 \times k_2}{7 \times tM} = 1$$

Hvor k_1 svarer til vækstraten under gode betingelser, k_2 er max vækst (for at sikre at beregningen ikke stiger for voldsomt) og tM er tiden i uger for at nå til 1 på skalaen. k_1 indeholder ligeledes faktorer som beskriver materialetypen (fyr, gran, ect.) samt overfladens beskaffenhed. (Vereecken & Roels, 2011).

I den udvidede VTT model blev materialernes sensitivitet tilføjet med skalaen meget følsom, følsom, let resistent og resistent, hvor træ eksempelvis er meget følsomt og hvor glas og metaller er resistente.

Modellen skal benyttes med nogen forbehold, idet at negativ vækst ikke fjerner skimmelvæksten i virkeligheden – en skimlet overflade vil fortsat være skimlet selvom væksten ikke foregår. Ydermere er skimmelindexet for de forskellige materialer alle set i forhold til fyrretræ eller grantræ, som er referencen. Ifølge Vereecken kunne man med fordel have benyttet typiske overflader som reference i modellen (Vereecken & Roels, 2011, s. 300-301)

VTT-modellen beregner ej heller under 0 grader, hvilket giver nogen usikkerhed i forhold til virkeligheden. Samtidigt påpeger Vereecken at RH_{crit} bliver for lave for både let resistente og resistente materialer ved temperaturer under 20 grader celsius, da modellen ikke bliver justeret for forskellen i sensitivitet her. (Vereecken & Roels, 2011, s. 301)

En analyse fra 2018 konkluderer ydermere at VTT-modellen ikke er præcis nok i sin analyse og at der er behov for en opdatering af den matematiske model bag VTT-modellens beregning af vækstens hastighed, den maximale vækst ud fra temperatur og relativ luftfugtighed, samt startpunktet for vækst. (Berger, 2018)

3.5.2 WUFI BIO

Sideløbende med udviklingen af VTT-modellen i Finland, blev der i Tyskland udviklet en Biohygrotermisk model, WUFI BIO. Denne model bruger Isopleth, (se Figur 11) systemet til at vurdere udviklingen af skimmelvækst på overfladen af et materiale, som følge af den relative fugt og temperaturen, men dog sammenholdt med materialets modtagelighed og tilsmudsningsgrad. WUFI BIO blev i modsætning til VTT-modellen udviklet ud fra målinger i et fysisk testhus. (Krus, 2010)

Den Biohygrotermiske model vurderer simuleringen ud fra en sammenligning af de hygrotermiske forhold med LIM kurverne (Figur 25) og dermed er vurderingen baseret på det værste tænkelige scenarie.

Der er udviklet 4 kategorier af modtagelig og tilsmudsning, hvor kategori 0 er optimal for udvikling af skimmel, kategori 1 er organiske materialer, kategori 2 er materialer som indeholder BIOlogisk nedbrydelige dele og kategori 3 er uorganiske materialer.

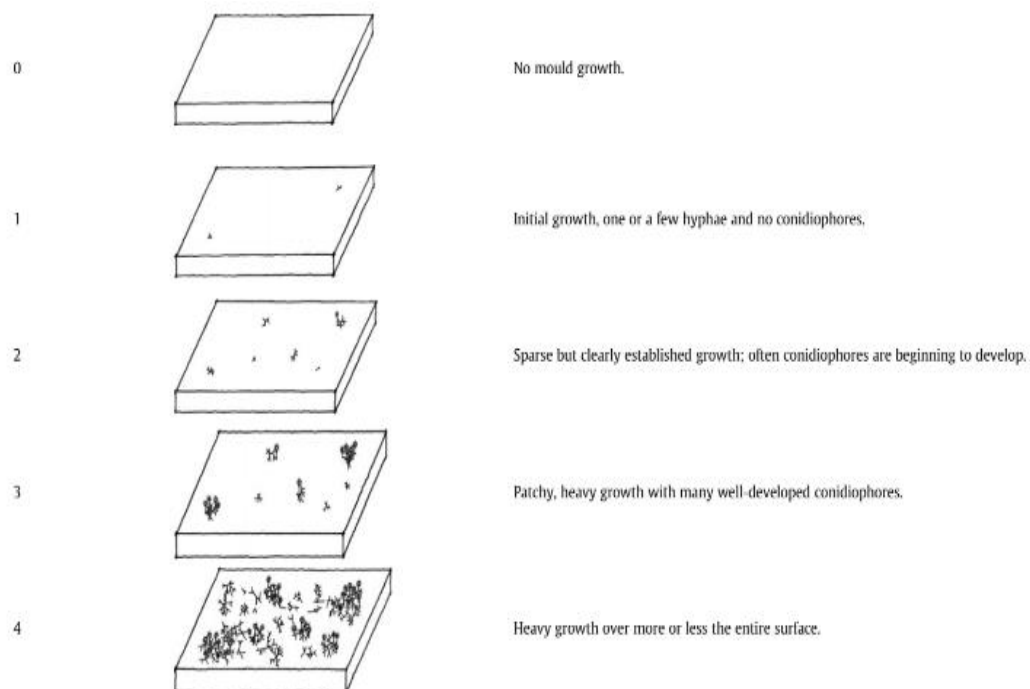
I kategori 1 vil tilsmudsning betyde at risikoen for skimmel er høj. I kategori 3 er skimmelvækst slet ikke mulig hvis ikke der er en høj grad af tilsmudsning.

Principielt fungerer modellen ved at det specifikke vandindhold på materialets overflade måles/simuleres og i de tilfælde hvor vand aktiviteten er tilpas høj, vil skimmelvæksten antages at være påbegyndt. I modsætning til VTT-modellen vil væksten i denne model fortsætte, så længe forholdene er gunstige og vil beholde sit niveau i de tilfælde, hvor forholdene ikke er gunstige. (Krus, 2010)

WUFI BIO benytter to skalaer til at angive skimmelvæksten. En, hvor væksten angives i mm og anden som omregner til VTT's 6-trins skala, da denne er mere udbredt. (Sedlbauer K. , 2001)

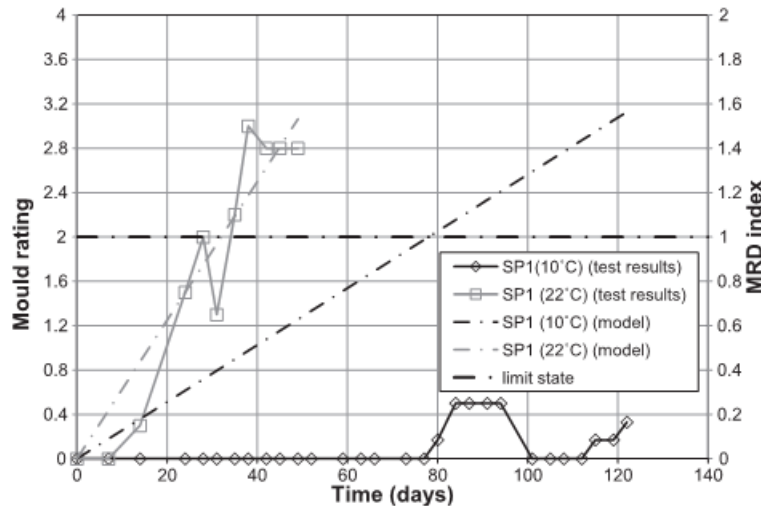
3.5.3 MRD

Mould Resistance Design (MRD) modellen er en nyere skimmelmodel, udviklet som værktøj til at bestemme risikoen for skimmelvækst på materialer der udsættes for fugt. Modellen tager udgangspunkt i et startpunkt hvor skimmel-svampen vurderes at være etableret, som hedder 2 (clearly, established growth) på MRD-karakterskalaen. Denne skala går fra 0 til og med 4. Se Figur 26 herunder.



Figur 26: Karakterskala for skimmelvækst som benyttes i MRD. 2 på karakterskalaen svarer til 1 på MRD indekset (I_{MRD}), som er sammenlignelig med VTT skalaen. Figuren stammer fra (P. Johansson, 2012).

Som det fremgår af Figur 27 svarer karakteren 2 på MRD karakterskalaen til 1 i MRD indekset, som kan sammenlignes med VTT mould growth index, så der kan sammenlignes på tværs af modellerne.



Figur 27: Ovenstående figur viser sammenhængen mellem MRD karakteren 2 på karakterskalaen og MRD indeks 1, angivet som "Limit state" på grafen. Figuren stammer fra (Thelandersson S. I., 2013) og viser testresultater i forskellige cykler ved 10°C eller 22°C.

MRD-modellen bruger klimaets relative luftfugtighed og temperatur til at etablere en dosis $[D_{(t)}]$, hvor alle parametrene $[\Phi_{(t)}, T_{(t)}]$ er afhængige af eksponeringstiden for et givent materiale. Denne dosis sammenholdes med den kritiske dosis $[D_{crit}]$ for materialet, hvor skimmelvækst er startet. D_{crit} svarer til den tid det tager for udviklingen af skimmel til niveau 2 på karakterskalaen i Figur 26, t_{crit} . Dette kan skrives således:

$$D_{crit} = D_{(t_{crit})} = \sum_1^{2(t_{crit})} D_{\phi_{ref,i}} \times D_{T(T_{ref,i})} = t_{crit}$$

Hvor ϕ_{ref} svarer til en konstant relativ fugtighed på 90% og T_{ref} svarer til en konstant temperatur på 20 °C. Derved antages det at skimmelvæksten starter når den samlede dosis, $D(\phi_{(t)}, T_{(t)})$ er lig med den kritiske dosis, D_{crit} . Dermed kan skimmelrisikoen beskrives ved følgende formel: $I_{MRD}(t) = D_{(t)} / D_{crit} < 1$, hvilket betyder at så længe forholdet er under 1 på MRD-indekset, er den kritiske dosis for materialet ikke opnået.

Rent beregningsmæssigt deler modellen døgnet op i en 12 timers middelværdi for henholdsvis nat (kl. 20.00 til kl. 08.00) og dag (kl. 08.00 til kl. 20.00) for at få variationerne over døgnet med, hvor både WUFI BIO og VTT bruger timeværdier. Dette betyder også at der tages højde for perioder med lavere luftfugtighed eller variationer på temperaturen. I tørre perioder og eller i perioder med lave temperaturer er der derfor en forsinkelse eller negativ vækst på udviklingen af skimmelvækst. Dette giver god mening da vejret og dermed de hygrotermiske forhold varierer hen over dagen og året. Det skal dog bemærkes, at der ikke kan være samlet negativ dosis. Forsinkelsen i tørre/kolde perioder bevirker at væksten stopper og ikke starter før D_{crit} opnås igen.

Samlet set opnår MRD-modellen at omsætte dynamiske klimadata til en tidsbestemt dosis, som kan sammenlignes med en målbar kritisk dosis, hvor skimmelvæksten er etableret. MRD-modellen er dog primært egnet til at vurdere *hvornår* skimmelvæksten er klart etableret, hvorefter resultaterne i højere grad viser en overskridelse af D_{crit} end det faktiske omfang af skimmelvæksten. (Thelandersson S. I., 2013) (P. Johansson, 2012)

3.5.4 Samlet vurdering

De tre skimmelmodeller beregner på forskellig vis en sandsynlighed for at en konstruktion bliver angrebet af skimmelsvampe. VTT er, trods opdateringer, den ældste model og har til en vis grænse dannet grundlag for de andre modeller. WUFI BIO er udviklet i Tyskland og på trods af inspiration fra VTT-modellen, har de fokuseret mere på materialets beskaffenhed og modtagelighed for skimmelvækst ud fra målinger i et fysisk testhus. VTT-modellen er baseret på laboratorieforsøg.

Resultaterne kan i WUFI BIO præsenteres i både mm (udvikling) og VTT's 6 trins skala og er dermed direkte sammenlignelige med VTT-modellen. MRD er en nyere model, som er baseret på målte værdier. Dermed er det muligt at validere forsøgsmæssigt, hvor lang tid det tager at udvikle skimmelsvamp under bestemte forhold [D_{crit}]. Samtidigt tager MRD-modellen, ligesom VTT-modellen, højde for at skimmelsvampen i tørre perioder får et tilbageslag som forsinker yderligere vækst, hvor WUFI BIO akkumulerer væksten.

Et studie der sammenligner VTT, WUFI BIO og MRD modellerne konkluderer at placeringen (fra Lund i Sydsverige til Luleå i Nordsverige) har stor indflydelse på skimmelvurderingen i de tre modeller. WUFI BIO angav risiko for skimmel, hvor MRD og VTT angav ingen risiko i simuleringer på ens konstruktioner og geografiske placering. Dermed er studiets vurdering, at resultaternes spredning viser kompleksiteten i at simulere skimmelvækst. Det er derfor vigtigt at være bevidst om begrænsningerne i alle modellerne og valg af klimadata. (Cederlund & Josefsson, 2015)

MRD-modellen blev i et studie vurderet til at være særdeles egnet til at vurdere forskellige designløsninger i forhold til hinanden samt følsomheden overfor forskellige input fra materialer, RF og temperatur. (Thelandersson S. I., 2013) Et studie fra 2018 har udviklet en metode, hvor alle 3 modeller benyttes til at danne en samlet vurdering af skimmelpotentialet for forskellige konstruktioner og scenarier med henblik på optimering. (Gradeci, 2018)

Alle modeller antages at være konservative, dog virker alle tre modeller til at levere forholdsvist præcise vurderinger. (Krus, 2010). VTT-modellen vurderes dog til at være upræcis på visse parametre og formodes under opdatering (Berger, 2018).

MRD-modellen vurderes, at være bedst egnet til at vurdere skimmelrisikoen i nærværende masterprojekt, men at sammenligninger med WUFI BIO og VTT-modellerne vil være relevante. MRD-modellens mulighed for tilbageslag i væksten anses samtidigt til at være mere realistisk end WUFI BIO.

Ydermere har VTT-modellen en usikkerhed, som nævnt ovenfor, om beregningen af RH_{crit} ved de temperaturer som nærværende masterprojekt undersøger.

MRD-indekset (I_{MRD}) har tillige den fordel, at det kan udregnes ud fra de faktiske målingers relative luftfugtighed og temperatur, og dermed kan det faktiske $I_{MRD(M\ddot{a}linger)}$ sammenholdes med simuleringerne $I_{MRD(Simuleringer)}$.

3.6 FORVENTNINGER TIL MÅLINGER

Ud fra ovenstående afsnit opsummeres her på projektets forventninger til målinger udført i testhuset. Testhuset er opbygget i 3 sektioner, hver med 6 forskellige loftkonstruktioner, se afsnit 3.3 nedenfor. Disse 3 sektioner ventileres med 3 forskellige luftskifter: normalt iht. forskrifter (se Tabel 5), reduceret med 1/3 og reduceret med 2/3.

Vi vil som udgangspunkt validere om reduktionen af luftskiftet fungerer som ønsket, ved at udføre en PFT-måling. Derved kan vi finde de gennemsnitlige luftskifter i de tre sektioner, og samtidig validere om tætheden imellem tagrum og stueplan er tilfredsstillende tæt.

Forsøget skal afklare om reduceret ventilering ift. nuværende krav giver fugt-tekniske problemer i ventilerede tagrum. Forventningerne er, at den relative fugtighed i tagrum vil stige som følge af et lavere luftskifte. Dermed vil risikoen for fugtbetingede problemer som skimmelsvamp også stige.

Vi vil sammenholde målingerne i tagrummene for at vurdere om henholdsvis luftskiftet, isoleringstykkelsen, dampspærren eller isoleringsmaterialet har størst betydning for den relative fugtighed, når fugtpåvirkningen fra indeklimaet, i stueplan holdes nogenlunde konstant i fugtbelastningsklasse 2. Vi forventer ligeledes at kunne simulere forholdene i BSim og WUFI, så vi kan vurdere konstruktionens robust for hele året.

Undersøgelsen er relevant i forhold til både nybyggeri og ved renoveringer, og sammenligninger mellem de 6 tagrum, vil nuancere billedet, hvor MX.1 = 150 mm mineraluldisolering, vil svare til et eksisterende hus før efterisolering.

MX.2 vil svare til et nybygget eller efterisoleret hus med 400 mm mineraluld uden dampspærre.

MX.3 vil svare til et eksisterende hus efter efterisolering med 300 mm cellulose udblæst over 100 mm mineraluld uden dampspærre.

MX.4 svarer til et nybygget eller efterisoleret hus, hvor der er brugt 400 mm cellulose, uden dampspærre.

MX.5 svarer til en nybygning med 400 mm mineraluldisolering og dampspærre. Det kunne også svarer til en efterisoleret bygning, hvor dampspærren er etableret.

Det samme gælder for MX.6, hvor der blot er benyttet cellulose i stedet for mineraluld jf. MX.5. (Figur 21)

Forventningen er, at temperaturen vil være lavere i tagrummet, ved større isoleringstykkelser og den relative luftfugtighed dermed vil være højere, hvilket vil give en større risiko, for fugtrelaterede problemer, i konstruktioner med et tykt isoleringslag.

Samtidig er forventningen at noget af fugten vil blive reduceret i de tagrum der er udført med dampspærre, således at færrest fugtproblemer forventes i MX.1 pga. den lave isolering og i MX.5/MX.6 pga. dampspærren. Dertil kommer luftskiftets betydning. Ud fra antagelsen at ventilationen og lufttætheden er afgørende forventer vi ikke fugttekniske udfordringer i M2.1-6 idet alle 6 tagrum her er ventileret efter forskrifterne og dermed ikke er ændret siden testhuset opførelse.

Vi forventer dog fugttekniske udfordringer og mulighed for skimmelvækst i M3.1-6 på grund af den mest reducerede ventilation. Især i M3.2-4, hvor isoleringstykkelsen er stor og der ikke er benyttet dampspærre, forventes risikofyldte forhold. M3.1 forventes ikke nødvendigvis at give udfordringer, da temperaturen formodentlig vil give en lidt lavere relativ luftfugtighed. I M3.5 og M3.6 formodes dampspærren at reducere fugtniveauet, og fugtproblemer er mindre sandsynlige.

Vi vil også sammenligne de hygroskopiske egenskaber mellem mineraluld og cellulose. Litteraturen nævner at fugtbufferegenskaberne i cellulose kun har en begrænset effekt. Vores forventning er derfor, at der ikke er en synlig effekt. (Samuelson, 1998)



Figur 28: billede af SBI's testhus. På billedet ses vest gavlen og indgangen til sektion M1 og M2.



Figur 29: Billede af sektion M3 i stueplan.

4 METODER OG MATERIALER

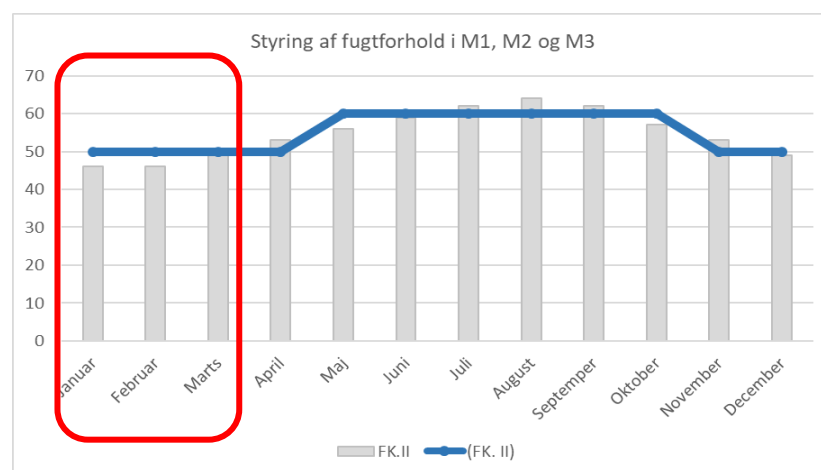
4.1 FORSØGSOPSTILLINGER

4.1.1 Tilpasset testhus

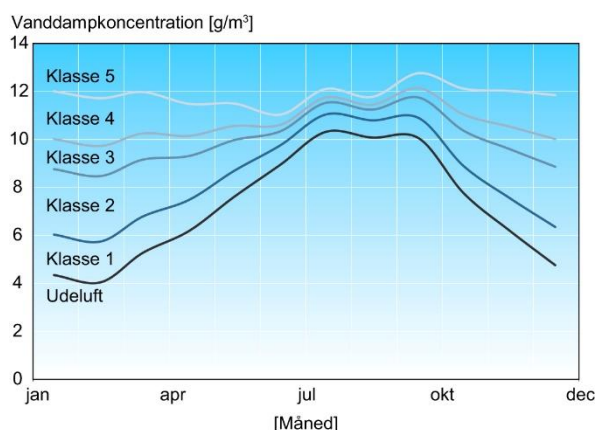
Forsøgshuset blev i forbindelse med vores projekt tilpasset til vores formål om at undersøge ventilationens betydning i forhold til dampspærrens betydning for de hygrotermiske forhold i tagrummene.

Forsøgshusets konstruktioner forblev overordnet set de samme, men fugtbelastningsklasserne i M1, M2 og M3 blev alle indstillet til fugtbelastningsklasse 2, med en temperatur på ca. 20 grader og en relativ fugtighed på ca. 50%, svarende til det omtrentlige RF niveau i januar til marts måned. (Se Figur 30).

Fugtbelastningsklasse 2 er valgt, da det er den mest normale fugtbelastning for parcelhuse og andre en-families boliger, samtidigt med at en højere fugtbelastningsklasse ville øge risikoen for skimmelvækst. Dermed ville nogle loftskonstruktioner få betydende skimmelvækst, der kunne resultere i behov en skimmelsanering. I fugtbelastningsklasse 2 er det mere usikkert om påvirkningen vil resultere i skimmelvækst og dermed er dette mere interessant.

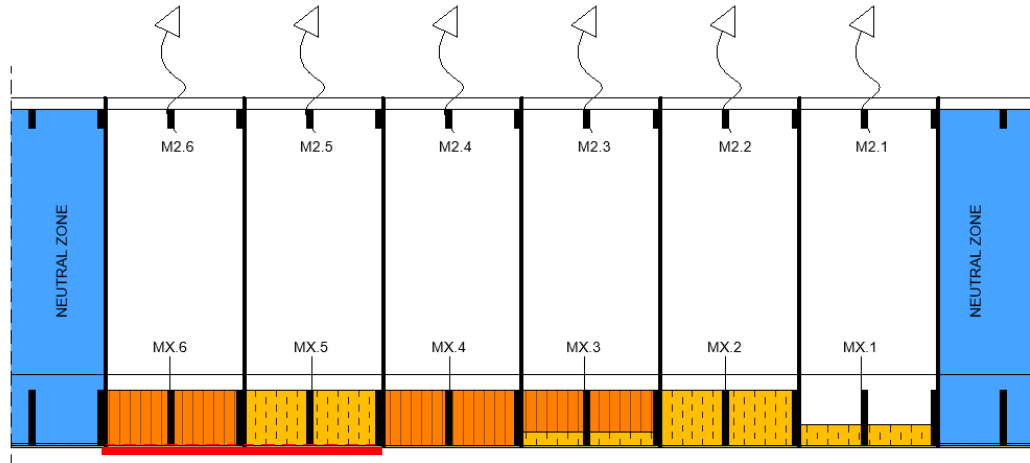


Figur 30: Befugterene i alle tre rum (M1, M2 og M3) indstilles til en forsimplet udgave af fugt-klasse II, hvilket er vist med den blå streg. De grå søjler viser fugtklasse II som den er beregnet jf. DS/EN/ISO 13788 baseret på månedsgennemsnit ift. TRY. Den røde markering viser måleperioden for vores forsøg.

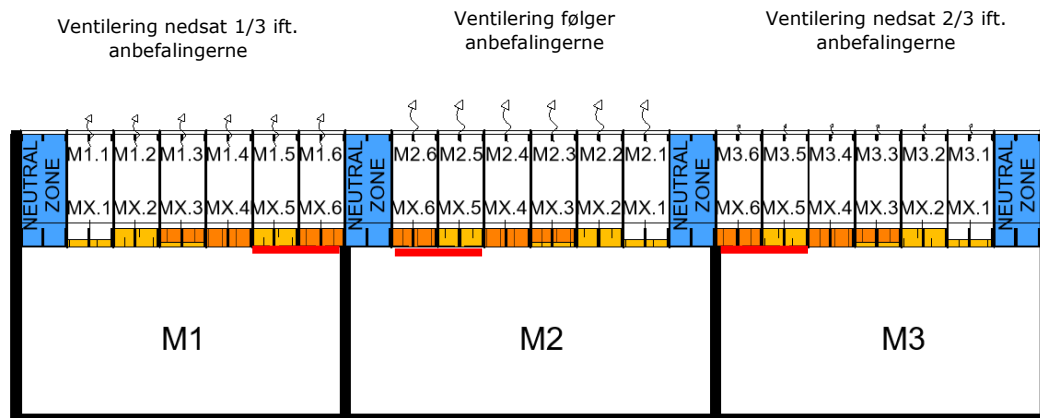


Figur 31: Fugtklasserne 1-5 og udeluftens vanddampkoncentration over året ift. TRY. Beregnet ud fra DS/EN/ISO 13788. Grafen viser hvordan luftens vanddampkoncentration er højere om sommeren, hvor luften kan indeholde mere fugt. Sammenlignes der med Figur 30 ses det, at fugtklasse II stigningen i den relative fugtighed følger vanddampkoncentrationen, dog reguleret af temperaturstigningen.

Selve opbygningen af testhusets konstruktioner og loftkonstruktion forblev uændret og altså som beskrevet i afsnit 3.3. Vi ændrede derimod ventilations-spaltens åbningsarealer således, at ventileringen blev nedsat med ca. 33% i M1.X og 66% i M3.X, hvorimod M2.X forblev uændret for reference. Se Figur 33 som viser forskellen i ventilering og Figur 32, som viser placering af loftkonstruktioner.



Figur 32: Princip for placering af loftkonstruktioner i tagrum. MX.1 = 150 mm Mineraluld, MX.2 = 400 mm Mineraluld, MX.3 = 100 mm Mineraluld + 300 mm cellulose, MX.4 = 400 mm cellulose, MX.5 = 400 mm Mineraluld + dampspærre og MX.6 = 400 mm cellulose + dampspærre. Dampspærren er angivet ved en rød streg.



Figur 33: Overordnet snit i testhuset. De 6 forskellige opbygninger af loftkonstruktionerne fremgår jf. afsnit 3.3. Mineraluld er markeret med gult, Cellulose er markeret med orange. M1.1 er tagrummets nummer. Dampspærren i MX.5 og MX.6 er markeret med en rød streg.

M2.X: 100% ventilering iht. krav er bi-beholdt som ventilationsspalter langs tagfoden på 30 mm i højden (inkl. in-sektnet). I tagets kip er der monteret to ventilationsstudser på 50 cm² pr. styk, altså tilsammen de 100 cm² som beskrives i (SBI 273 - Tøge, 2019, s. 50, tabel 7). Som det er vist på Figur 34 og Figur 35 er der monteret et vindbræt som holder på isoleringen og sikrer at ventilationsåbningen ikke bliver blokeret.

M1.X: 66% ventilering iht. krav udføres ved at blokere ca. 1/3 af åbningsarealet. Den metode vi har valgt er at blokere åbningen i tagfoden fysisk med rørisolering, fremstillet af polyuretan-skum. (se Figur 36) Dette skyldes dels, at materialet er uorganisk og at vinden ikke kan blæse igennem det, men også at materialet kan komprimeres og sættes i spænd. Derudover kan rørisoleringen forholdsvis nemt fjernes igen.

Hver enkelt ventilationsåbning blev målt efter og derefter blev rørisoleringen afskåret således at stykket passede med at blokere 1/3 af spalten. Eksempelvist var de fleste spalter ca. 440 mm, hvilket resulterede i at rørisoleringen blev skåret på ca. 147 mm. (Se Figur 36)

Vi udviklede tilpassede brædder til at få adgang ud til tagfoden, som vi kunne ligge på. (Se Figur 37)

Samtidigt blev der udviklet monteringspinde, for at nå ud i ventilationsspalten. Monteringspindene bestod af rundstokke med kroge i den ene ende og som var fladt afskåret i den anden ende. (Se Figur 38)



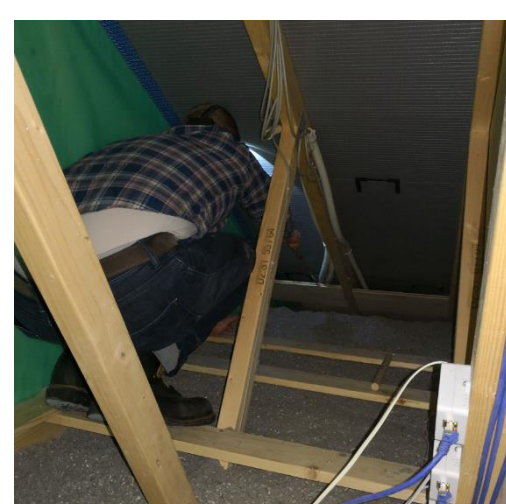
Figur 34: Tagrum MX.4 med 400 mm cellulose. Isoleringen holdes på plads af et vindbræt, som sikrer en ventilationsspalte på 30 mm i højden.



Figur 35: Vindpladen er fuget langs spærtræ og samlinger for at sikre lufttæt alle andre steder end i selve åbningen.



Figur 36: Ventilationsspalten er her blokeret med 1/3 rørisolering.



Figur 37 Adgangen til ventilationsspalten var besværlig, da der ikke er monteret gulv over isoleringen - på nær en smal gangbro centreret i bygningen. Her sidder Mikael på et af vores adgangsbrædder.

M3.X: 33% ventilerings iht, krav udføres ved at blokere ca. 2/3 af åbningsarealet. Metoden var den samme som beskrevet ovenfor under M1.X, dog blev rørisoleringen afskåret så den svarede til 2/3 af spalten, ca. 293 mm.

Ventilationsstudserne i tagets kip blev ligeledes blokeret efter samme metode, blot blev omkredsen målt i stedet for længden. Ud fra omkredsen blev henholdsvis 1/3 i M1.X og 2/3 i M3.X blokeret med et stykke rørisolering (Figur 39). Denne var desuden også skåret over på langs for at gøre det muligt at få den på plads i ventilationsstuds (Figur 40).

cEn af begrundelserne for at benytte dette materiale var også at det er muligt at fjerne rørisoleringen igen og dermed bringe testhuset tilbage til sin oprindelige udformning.

Alle tagrummene blev efterfølgende forseglet, i det adgangslemmene blev tapet til med dampspærretape. Som det ses på Figur 22 er vægge mellem tagrum opbygget af krydsfinerplader, hvor på der er påsat en dampspærre membran, for at sikre luft- og diffusionstæthed mellem tagrummene.



Figur 38: Hjemmebyggede monteringspinde var nødvendige da rørisoleringen nemt kunne blive presset for langt ned eller skulle skubbes på plads.



Figur 39: Rørisolering, af typen Tubolit 13 mm Ø22x2m.



Figur 40: Ventilationsstuds af typen Icopal IcoAir, tilstoppet med rørskål i den ene side. Placeringen af rørisoleringen blev delt således at den 1/3 eller de 2/3 blev ligeligt fordelt i begge sider – og areal over og under var større eller mindre – men åbent begge steder.

Isoleringstyper

Mineraluldsisolering (sten- og glasuld) er traditionelt set de mest brugte isolerende materialer i de bygninger der er opført i Danmark de seneste hundrede år. Granuleret mineraluld er i Danmark meget udbredt til efterisolering som udblæst isolering på lofter, idet det er en forholdsvis effektiv metode til energibesparelse og dermed reduktion af varmeregningen. Mineraluld har en god brandmodstandsevne samt en større resistens over for skimmelvækst, da det er uorganisk. Der er dog anvendt organisk bindemiddel, der gør at materialet ikke er helt uorganisk. (SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer, 2003)

Cellulose (Papiruld/granulat) anses for et alternativt isoleringsmateriale, som oftest benyttes i granuleret form til indblæsning i hule mure og udblæst løst på lofter. I Danmark har cellulose været anvendt siden energikrisen i 1970'erne, selvom det i USA har været anvendt i de sidste 100 år. Produktet fremstilles primært af avispapir, som tilsættes borsalte og evt. aluminiumhydroxid for at beskytte papirulden mod råd, skimmelsvampe, skadedyr og for højne modstandsdygtigheden mod brand. (SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer, 2003, s. 27-28) Borsalte er et såkaldt uønsket stof, jf. miljøstyrelsen. Undersøgelser af indeklimaet påviser dog ikke større koncentrationer af bor end baggrundskoncentrationen i de huse, hvor borsalte er tilsat isoleringen. (SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer, 2003, s. 26)

Når cellulosen udblæses på lofter anbefales en rumvægt på ca. 33 kg/m² og en overhøjde på ca. 50-75 mm ved 300 mm ønsket isoleringstykkelse for at sikre tilstrækkelig isoleringstykkelse efter at granulatet har sat sig. Normalt forventes sætning på omkring 15-20%, (Alternative isoleringsmaterialer, 2005) med mindre densiteten er minimum 50 kg/m² ved vandret udlægning og minimum 65 kg/m² ved lodrette konstruktioner. (SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer, 2003)

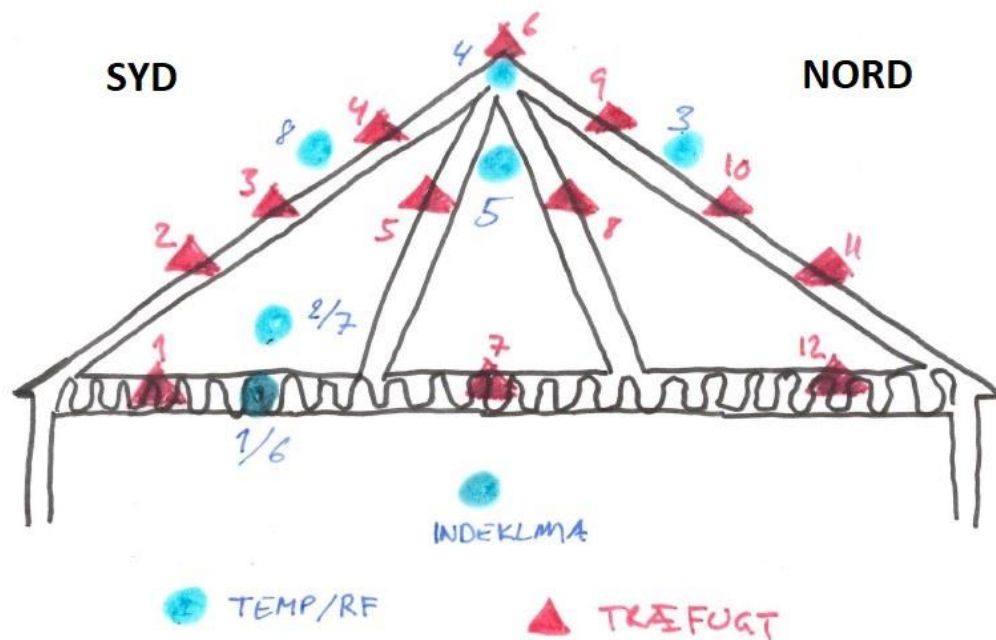
Producenter af cellulosebaseret isoleringsmaterialer reklamerer med at deres produkt kan anvendes uden brug af dampspærre. (Papiruld.dk, 2019). Papiruldens hygroskopiske egenskaber til at optage og afgive fugt bevirker at en dampspærre kan udelades så længe at Z-værdien indvendigt er minimum 5 gange højere end de udvendige materials z-værdi. Dette gælder dog ikke i forbindelse med badeværelser eller andre rum med høj fugtbelastning. Cellulose er hygroskopisk, se afsnit 3.1.11, og kan absorbere 12-16 vægtprocent ved 75% relativ luftfugtighed og 20-25 vægtprocent ved 90% relativ luftfugtighed. Cellulose er desuden kapillarsugende til mere end 180 kg/m³. Der er udført forskellige undersøgelser af papirulds fugttekniske egenskaber og erfaringer med disse (Videnskupon - efterisolering med papiruld i bygninger, 2012). Erfaringerne viser ingen tegn på skimmel eller kondensrelaterede problemer i loftkonstruktioner udført med papiruld. I 3 ud af 4 af de undersøgte loftkonstruktioner er der ikke udført dampspærre.

Uanset typen af isolering har den hidtidige regel været at der skulle anvendes en dampspærre ved isoleringstykkelser over 150 mm. Dette skyldes at temperaturløst skuddet fra boligen vil blive for lille til at opvarme luften i tagrummet og dermed vil den relative luftfugtighed stige med risiko for skimmelvækst til følge. Det er præcis dette, Projekt DaLo undersøger og denne masteropgave udbygger med undersøgelser af luftsiftet. Dermed er de 6 loftsopbygninger en afspejling af de gængse konstruktioner udført med enten mineraluld eller cellulose med eller uden dampspærre.

Sten- og mineraluldsproducenterne er ikke interesseret i at celluloseproducenterne får for store andele af isoleringsmarkedet. Og omvendt. Dermed har der i de sidste mange år været en del forskellige informationer om hvilke produkter der er bedst egnet til forskellige formål. Eksempelvist vandt Rockwool i 2014 et søgsmål over Papiruld Danmark, da Papiruld Danmark blev markedsført som bedre end Rockwool. (Rockwool kontra Papiruld, 2014).

4.1.2 Måleinstrumenter

Der er anvendt forskellige typer af måleinstrumenter, som herunder er grupperet efter den type måling der er foretaget. Figur 41 herunder viser principiel placering af målepunkterne for henholdsvis træfugt og hygrotermiske sensorer.



Figur 41: Principiel skitse med placering af målepunkter i tagrum. De røde trekanter viser placering af skruer til måling af træfugt. De blå cirkler viser placering af sensorer for måling af relativ fugt indhold i luften samt temperatur.

Målepunkterne er placeret således, at det er muligt at følge både træfugt og relativ fugtighed igennem etageadskillelsen samt forskellige steder i tagrummet. De er ligeledes placeret ens både mod nord og syd, således at disse kan sammenlignes og at sensorerne kan bruges til at validere hinanden indbyrdes.

Vi har hovedsageligt valgt at fokusere på målepunkt nr. 5 i vores analyser af tagrummets temperatur og relative luftfugtighed. Vi har sammenlignet med nr. 4 med jævne mellemrum for at sikre at sensorerne målte nogenlunde ens værdier efter kalibrering.

I afsnittet om træfugt har vi fokuseret på målepunkterne 5 og 8, samt 2 og 11, da vores indledende analyse viste at der var forskel på disse punkter.

Temperatur og relativ fugt

Til måling af luftens temperatur og relative luftfugtighed er der benyttet en sensor af typen HTemp-1Wire 3m fra HW Group. Sensoren tilsluttes en samlebox af typen HWg-STE fra HW Group som via en dataswitch som er koblet på en computer.

Derfra kan måleresultaterne tilgås online. Måleresultaterne logges hver time for både RF og temperatur.

Temperatursensoren kan måle fra -30°C til $+80^{\circ}\text{C}$ med en usikkerhed/nøjagtighed på:

$\pm 0,8^{\circ}\text{C}$ mellem 0°C og $+60^{\circ}\text{C}$

$\pm 1,0^{\circ}\text{C}$ mellem -10°C og $+70^{\circ}\text{C}$

$\pm 2,0^{\circ}\text{C}$ mellem -30°C og $+80^{\circ}\text{C}$.

Fugtsensoren kan måle fra 0 til 100% RH med en usikkerhed/nøjagtighed på $\pm 2,5\%$ RF, 20-80% RF, 25°C .

Kalibrering bør ske 1 gang årligt. Kalibrering blev foretaget umiddelbart før påbegyndelse af målinger for denne masterrapport i december og januar måned.

Kalibreringen blev foretaget i lukkede kasser med 3 typer af saltopløsninger, NaCl, KNO_3 og KCl, hvorefter kalibreringskurver blev udregnet for hver sensor. Metoden følger Greenspans anvisninger. (Greenspan, 1976)

Måleresultaterne blev som rådata sorteret og verificeret manuelt i excel, før de målte værdier blev kalibreret ved brug af kalibreringskurven. Den korrigerede data for hver sensor er efterfølgende benyttet til udarbejdelse af graferne.



Figur 42: HTemp-1Wire 3m



Figur 43: HWg-STE

Træfugt

Træfugt måles med et håndholdt instrument af typen Protimeter Mini. Som angivet i Figur 41 er der 12 målepunkter, hvor spærtræets træfugt måles. I disse punkter er der skruet 2 skruer ind i træet, med en ledning fastgjort til hver skrue. Målepunkter i tagrummet er dermed forbundet med måletavler i stueplan, hvor alle træfugt målinger registreres manuelt, på ugentligt basis, ved at holde Protimeter Mini på ledningerne.



Figur 44: Protimeter Mini

Dette er yderligere gjort "brugervenligt" ved at tilslutte samtlige ledninger fra et tagrum til en samleboks i stueplan med en nummeret drejeknap, som svarer til målepunkterne. (Figur 45)

Dermed kan hvert nummer aflæses og fugtindhold noteres løbende, men uden at skulle åbne tagrummene op.

Målepunktet er to skruer, placeret på langs af fibrene, og ikke i knaster. Dermed måles vægtprocent fugtindhold i træet på samme vis som en uisoleret indstiksmåler. Fugtindholdet måler det højeste fugtindhold mellem polerne, men det vides ikke, ud fra denne metode, om dette er inden i træet eller på træoverfladen. Dette giver en mindre usikkerhed, men for langtidsmålinger som disse, hvor vi ikke kan åbne tagrummene op hver uge, er det en acceptabel usikkerhed. Dertil kommer at der udføres træfugt målinger 12 forskellige steder i tagrummet som kan sammenlignes, og validere måleresultaterne. Målingerne omsættes til fugtindhold ved brug af en kalibreringskurve for trætypen, hvilket giver en usikkerhed på ca. +/- 1%.

Protimeter Mini kan måle træets fugtindhold mellem 8% og 30% og kan anvendes i temperature mellem 0 og 50°C. Producenten oplyser ingen usikkerheder udover at målinger over 30% fugtindhold er relative.

For nærværende masteropgave er målingerne udført fra januar til og med marts måned, hvilket betyder at det er en relativt kort måleperiode. Dermed er der en usikkerhed på hvordan træfugten ser ud over et helt år eller flere år i forhold til den ændrede ventilationsrate.

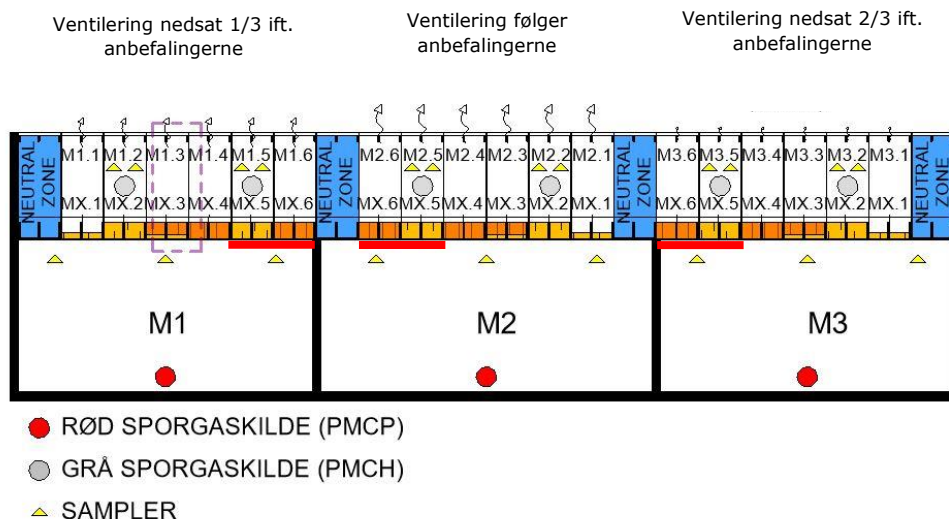


Figur 45: Målepunkt for Træfugt i stueplan. Her for tagrum M2.2.

4.1.3 Faktisk Ventilationsrate – Passiv Sporgas test

Formål

Formålet med undersøgelsen har været, dels at verificere om vores blokering af ventilationsspalter og studser, har givet det ønskede resultat i form af et mindre luftskifte i tagrummene over M1 og M3. Dels har vi ønsket at undersøge om der er infiltration mellem M1-M3 og tagrummene er - og i så fald hvor stor.



Figur 46: Angivelse af placeringer af sporgas kilder og samplere. Derudover er dampspærren i M1.5, M2.5 og M3.5 angivet som en rød stipleet streg.

Fremgangsmåde

Der blev valgt to forskellige sporgas typer, Grå (PMCH) og Rød (PMCP), til henholdsvis tagrum og underliggende stueetage. Vi valgte at placere samplere og kilder i to tagrum over hver sektion samt i "stuen" i alle tre sektioner. Tagrummene MX.2 og MX.5, jf. Figur 46, blev valgt da de begge har 400 mm mineraluldsisolering og MX.5 er udført med dampspærre, hvor MX.2 er udført uden dampspærre. Slutteligt ligger de med to tagrum imellem sig og dermed er risikoen for at forstyrre målingerne mindre.

Tabel 6: Skema med start og slut dato og klokkeslæt for måleperioden.

Start dato:	18.01.2019	Kl. 16.00
Slut dato:	11.02.2019	Kl. 10.30

Efter placering af kilder og samplere var udført, blev tagrummene forseglet imellem hinanden med dampspærretape og måleperioden startet. Efter 24 dage blev kilder og samplere indsamlet og indleveret til analyse hos SBI.

I tagrummene er der placeret en kilde centreret i tagrummet på gangbroen – altså så langt nede som muligt. De to samplere er placeret oppe på spærtræet, således at munden er fri af træet og at disse er tæt ved udluftningsstudsen, men stadig holder en afstand på cirka 0,5 m. Luftskiftet i tagrum bliver styret af vindtryk og vindretning samt skorstenseffekten. Dermed forventes luftstrømningen primært at komme ind via tagfoden i vindsiden og ud i

læsesiden. Samtidig vil den opvarmede luft stige opad og bortventilere via stud-sene i kip. Dermed vil den ovenstående placering give den bedst mulige vur-dering af luftskiftet i tagrummet.

Tagrummenes volumener blev udregnet til ca. 5,4 m³ pr. tagrum.

Tabel 7: Skema med angivelse af hvilke tagrum der er udført PFT-målinger i med grå kilder, samt volumen, temperaturforhold og sampler numre.

Tagrum:	Sporgas kilde Grå (PMCP)			
	Placering		Syd	Nord
	Volume [m ²]	Temp., gms [°C]	Sampler nr.	Sampler nr.
M1.2	5,4	3,1	4144	4247
M1.5	5,4	3,1	4051	4077
M2.2	5,4	3,1	4257	4199
M2.5	5,4	3,1	4193	4147
M3.2	5,4	3,1	4092	4105
M3.5	5,4	3,1	4142	4109

I stueetagen blev der i hver sektion placeret to sporgas kilder, ca. 0,5 m over gulvet og cirka 1,5 m fra den nordlige facade, hvor der er placeret en ind-blæsningsstuds, cirka 0,5 m over gulvet i det nordvestlige hjørne. Der blev opsat 3 samplere i modsatte side af rummet, 2 på stativer, ca. 2 m over gulvet og cirka 1,5 m fra facade samt 1 på facadevægge cirka midt i rummet og 2 m over gulvet. På den sydlige facade var der placeret en udsugning ca. 2 m over gulv i det sydøstlige hjørne.

M1 og M3's volumener blev udregnet til ca. 102,6 m³ og M2's volumen blev udregnet til ca. 117,2 m³.

Via stuerummets indbyggede temperatursensor blev den gennemsnitlige tem-peratur i måleperioden målt til 21,9°C.

Tabel 8: Skema med angivelse af hvilke sektioner, der er udført PFT-målinger i med Rød kilder samt volume, temperaturforhold og sampler numre. De røde numre angiver de samplere der var faldet ned under målingen.

Stueplan:	Sporgas kilde Rød (PMCH)				
	Volume [m ²]	Temp., gms [°C]	Placering		
			SØ	Svæg	SV
			Sampler nr.	Sampler nr.	Sampler nr.
M1	102,6	21,9	4309	4021	3983
M2	117,2	21,9	4205	4130	4082
M3	102,6	21,9	4118	4227	4267

PFT-målinger har generelt usikkerheder i forbindelse med variationer, idet målingen forholder sig til gennemsnitskoncentrationer, men hvor kildens emission er temperaturafhængig. Samtidig var vi også uheldige med tre af vores samplere i underetagen, som af uvisse årsager var faldet ned og dermed ikke nødvendigvis kan give et korrekt billede af luftskiftet. Heldigvis var data fra alle samplere i tagrum anvendelig.

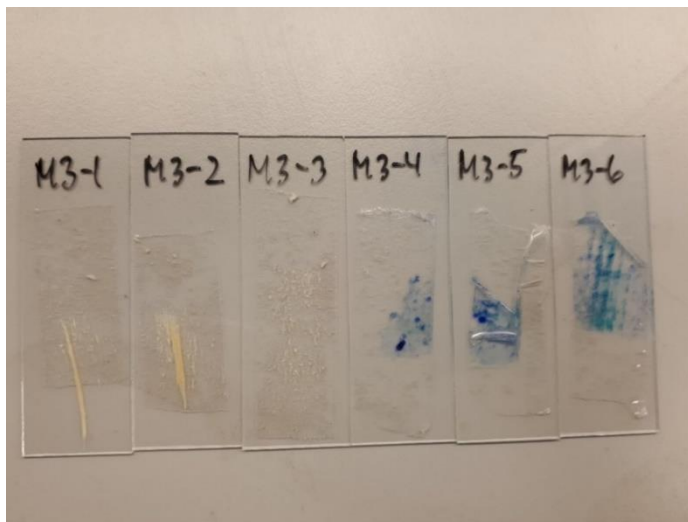
4.1.4 Skimmeltest

I forsøgshuset var et af forsøgsparementrene om den lavere ventilationsrate ville føre til skimmelvækst eller forhøjet risiko for dette.

Vi valgte derfor, at udføre en prøvetagning i form af et aftryk med cello-tape/klartape i alle tagrum. Derved kunne vi verificere om der allerede ved forsøgets start var tegn på skimmelvækst. Tape giver mulighed for at foretage en kvalitativ bestemmelse af skimmelart og slægt, samt kvantitativ bestemmelse af antal jf. SBI 204 (SBI 204 - Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger, 2003, s. 59, tabel 4).

Ved forsøgets afslutning blev tapetesten udført igen og forskelle i resultaterne blev undersøgt med henblik på at påvise en udvikling i skimmelvækst.

Tapeprøven blev udtaget på samme sted i alle tagrum – øverst på træspærrets nordlige del. Prøven blev udtaget på siden af spærret ca. 20 centimeter fra kip. Tapen blev trykket godt fast mod træspærret og derefter klæbet på en glasplade, som vist på Figur 47 herunder.



Figur 47: Eksempel på Tapeprøver påsat på glasplader fra M3.1-6. Disse bliver efterfølgende vurderet ved mikroskopi af en SBI tilknyttet skimmel ekspert. Resultatet fremgår af resultat-afsnittet.

Alle glaspladerne blev efterfølgende analyseret med mikroskop af SBI's svampeekspert, som visuelt vurderede om der var tegn på svampevækst.

Vurderingen af prøverne blev udført ved gennemgang af prøverne i tre spor via et mikroskop og derefter blev der tilføjet en dråbe methylenblåt i 1% opløsning. Dette binder sig til polysakkarider og cellevægskomponenter i skimmelsvampe, samtidigt med at det skaber kontrast i billederne. Derefter blev alle tapeprøver gennemgået i tre spor en gang til. Der blev taget billeder i forskellige opløsninger, fra 40x til 400x.

I tilfælde hvor der er klar og tydelig skimmelvækst ved 40 x zoom i mikroskop, svarer det til 1 på skimmelindexet, hvilket betyder at skimmelsvampen har fået fat og er begyndt at gro på materialet. (Thelandersson S. I., 2013)

Ved udtagelse af tapetest, til vurdering af skimmelvækst, er der en usikkerhed i om prøven bliver udtaget korrekt og ens hver gang. Derfor valgte vi at det var den samme person der udtog prøven, så de alle blev udtages på præcist samme måde.

Visuelt var der ingen synlige tegn på skimmelvækst ved opstart af forsøget. Lokaliteten for prøveudtagningen blev valgt ud fra at stedet var tilgængeligt, placeret på den nordlige side af taget og ikke lige op af en ventilationsstuds. Den nordlige side af taget bliver ikke udsat for direkte solindstråling og materialernes relative fugtighed kan dermed være en anelse højere.

En anden usikkerhed kunne være at prøven ikke udtages, hvor der er skimmelvækst. Vi lavede derfor en visuel gennemgang af tagrummene samtidigt med tapeprøven. Prøverne er desuden meget små, på størrelse med en tommelfinger, og kan derfor udelukkende give en indikation af om der er skimmelsvampe eller ej. Selv hvis prøven ikke viser en skimmelsvamp er der ingen sikkerhed for at der ikke er en skimmelsvamp et sted i tagrummet. Omvendt, hvis prøven viser skimmelvækst er sandsynligheden for at der er mere skimmelvækst overvejende stor.

4.2 FUGTSIMULERINGER

4.2.1 WUFI

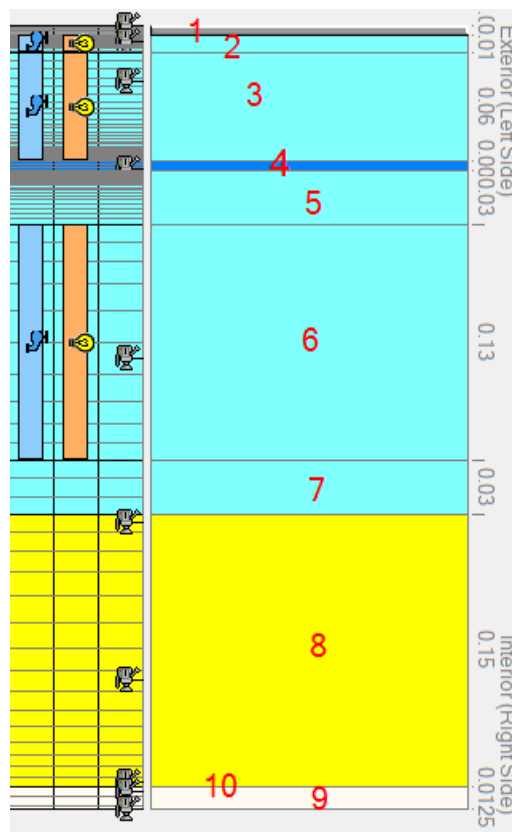
Konstruktionsopbygning

Grundlæggende opbygges tagkonstruktionen af de bygningsdele, der er angivet under afsnit 3.3. Konstruktionerne og luftskiftet ændres iht. det pågældende tagrum der simuleres, hvilket giver i alt 18 simuleringer.

Der er som udgangspunkt valgt materialer fra WUFI's database og kun i enkelte tilfælde ændret på parametrene. Tagkonstruktionen udføres med og uden dampspærre. Figur 48 viser følgende opbygning med dampspærre:

1. 0,8 mm Metal Deck, unperforated
2. 10 mm Air layer, metallic
3. 60 mm Air layer, WAMC15
4. Vapour barrier (undertag)
5. 30 mm Air layer
6. 130 mm Air layer, WAMC15
7. 30 mm Air layer
8. 150-400 mm Mineraluld granulat kl. 41 / Cellulose granulat kl. 39
9. 13 mm gipsplade
10. Dampspærrens placering, hvis udført

Tagbeklædningen på testhuset består af stålpladetag. Der er her valgt en standard plade fra WUFI databasen, som skal gengive varmeledningen fra stålet.



Figur 48: Standard opbygning i WUFI for tag uden dampspærre.

	Densitet Kg/m ³	Porøsitet m ³ /m ³	Varmekapacitet J/kgK	Varmeledningsevne W/mK	Vanddampdiffusionsmodstands faktor
Tagplade	7.800	0,001	450	46	6.400
Luftlag (metalisk)	1,3	0,999	1.000	0,04	0,73
Luftlag (WAMC ¹⁵)	1,3	0,999	1.000	0,337	0,27
Undertag	130	0,001	2.300	2,3	950.000
Luftlag	1,3	0,999	1.000	0,18	0,46
Mineraluld kl 41	60	0,95	850	0,041	1,3
ISOCELL kl. 39	50	0,95	2.110	0,039	1,8
Gipsplade	850	0,65	850	0,2	8,3
Dampspærre	130	0,001	2.300	2,3	95.000

Figur 49: materialeegenskaber for anvendte materialer fra WUFI's database.

¹⁵ Without additional moisture capacity = WUFI luftlag der har realistisk absolut vandindhold.

Luftlag

Oprindeligt er WUFI designet til massive konstruktioner med små eller ingen ventilationsspalter. For at nedsætte regnetiden var luftens fugtkapacitet i de tidlige versioner af WUFI som standard sat til 47 g vand/m^3 svarende til mineralulds mætningspunkt. I takt med større behov for korrekt simulering af luftens fugtkapacitet og forbedring af WUFI's beregninger, er der introduceret et luftlag "uden ekstra fugtkapacitet" svarende til luft med en temperatur på 20°C og maksimalt vandindhold på 17 g vand/m^3 . Luftlagets vandkapacitet og temperatur er dog konstante i modsætning til lufts virkelige hygroskopiske egenskaber. (Fraunhofer IBP, 2019) Fugtkapaciteten er altså ikke afhængig af temperaturen, som i virkeligheden, hvilket kan give et forkert billede af kondensrisici i konstruktionen.

WUFI pro regner endimensionelt. Deres foruddefinerede luftlag (med og uden ekstra fugtkapacitet) medregner derfor varme- og fugttransport ved varmeledning og diffusion, men ikke konvektion. WUFI "medregner" fri konvektion i luftlag ved at justerer luftlagets varmemodstand og diffusionsmodstand afhængig af luftlagets tykkelse. WUFI kan ikke regne med tvungen konvektion, forårsaget af vindtrykket. (Fraunhofer IBP, 2019)

Luftlaget mellem undertag og isolering, består af 130 mm luftlag uden ekstra fugtkapacitet omgivet af 30 mm standard luftlag på hver side (*Figur 48*). (Georgsdottir & Sawirs, 2012)

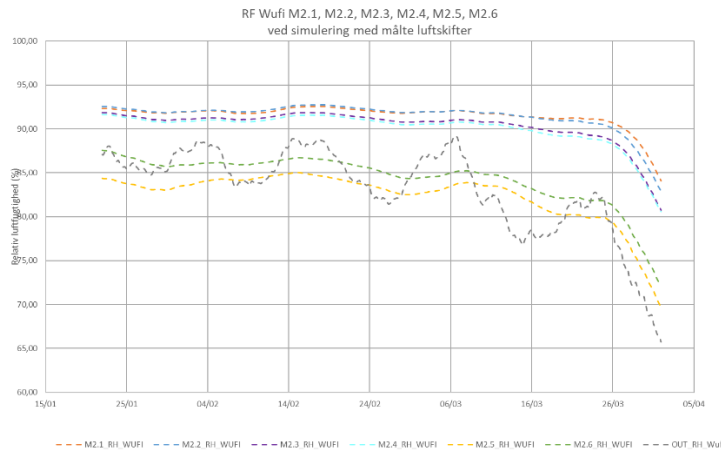
Da vi ikke har måledata for et helt år, er WUFI simuleringerne forsøgt "kalibreret" efter feltmålingerne, så WUFI resultaterne i januar til marts måned stemmer overens med feltmålingerne. Hvis resultaterne genskabes i WUFI vurderes det for sandsynligt, at simuleringerne for resten af året, kan give et fingerpeg om tagrummets udvikling igennem året. Der er derfor indsat luftskifter fra PFT-målingerne i de respektive tagrum.

Der er vurderet et luftskifte på 200 h^{-1} for luftlaget mellem tagpladen og undertaget (Falk, 2014).

I første omgang, er der som nævnt anvendt de målte luftskifte for hhv. M1.X, M2.X og M3.X. I luftlaget uden ekstra fugtkapacitet er der for M1.X indlagt et luftskifte på $4,04 \text{ h}^{-1}$, for M2.X er der indlagt et skifte på $6,24 \text{ h}^{-1}$ og M3.X er der indlagt et skifte på $3,02 \text{ h}^{-1}$ jf. Tabel 11.

De relative luftfugtigheder i hhv. M1.X, M2.X og M3.X ved de målte luftskifter, er imidlertid ikke som ventede – dels pga. en meget høj gennemsnits RF i tagrummene, men primært pga. RF i tagrummet tilsyneladende ikke bliver ventileret med udeluft (*Figur 50*). Resultatet vurderes ikke for realistisk og litteraturen blev derfor gennemgået igen, hvorefter modellen blev opdtaret jf. *Figur 51*.

Den indtastede ventilationsrate i luftlagene anvendes til at simulere fugtforholdene i tagrummet. De er gennemsnitlige og regnes konstant i perioden, da vores målte PFT-værdier er gennemsnitlige.



Figur 50: Ved WUFI simulering med de målte luftskifter i de respektive tagrum ligger RF næsten konstant mellem 90 og 95% i perioden. Dette stemmer ikke overens med de målte værdier eller forventningen om at RF i højere grad følger udendørs RF tendensen.

Ifølge (Thelandersson, Isaksson, & Niklewski, 2014) kan der i stedet anvendes et modelluftskifte, hvor de reelle luftskifter A_0 omregnes til modelværdier A_m .

$$A_m = \frac{V}{a \cdot t} A_0$$

A_0 er det reelle luftskifte [h^{-1}]

A_m er modelværdi af luftskifte til beregningsmodel [h^{-1}]

V er tagrummets volumen [m^3]

a er tagrummets gulvareal [m^2]

t er tykkelse af luftlag i beregningsmodel [m]

Modelluftskifterne er beregnet (Figur 51) og anvendt i simuleringen i stedet, så RF i tagrummene nu vurderes for sammenlignelig.

	M1	M2	M3	
A_0	4,04	6,24	3,02	h^{-1}
A_m	25,07	38,73	18,74	h^{-1}
V	5,4	5,4	5,4	m^3
a	6,7	6,7	6,7	m^2
t	0,13	0,13	0,13	m

Figur 51: Beregnede modelluftskifter A_m anvendes i WUFI i stedet for faktiske målinger.

Membraner

WUFI har svært ved at regne på membraner under 1 mm tykkelse (Fraunhofer IBP, 2019). Det er derfor nødvendigt at lave en omregning fra Z-værdi til Sd-værdi med tilsvarende ændring af tykkelsen på membranen.

I testhuset er der anvendt en PE-folie på 0,2 mm med en Z-værdi på 500 GPa $\text{m}^2 \text{ s/kg}$. WUFI's foruddefinerede PE-membran har en Sd-værdi på 50.000 ved 1 mm tykkelse, hvilket svarer til en Z-værdi på ca. 263 GPa $\text{m}^2 \text{ s/kg}$. Der er derfor anvendt en vapour barrier med en Sd værdi på 95.000 ved 1 mm tykkelse, der svarer til en Z-værdi på 500 GPa $\text{m}^2 \text{ s/kg}$.

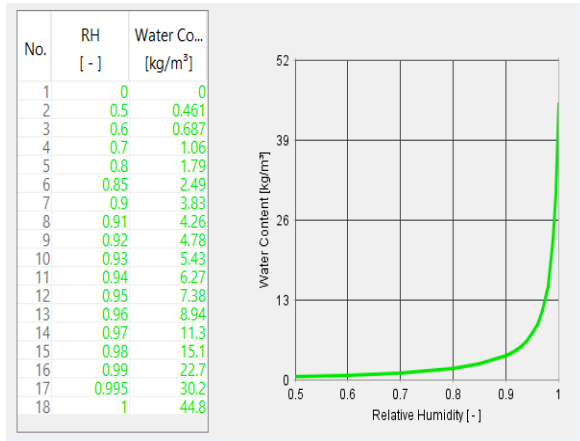
Banevaren er ifølge producenten ca. 0,35 mm tyk og har en Z-værdi på 855 GPa m² s/kg. Dette svarer at banevaren indsættes som en *vapour barrier* med en Sd-værdi på 950.000 ved en tykkelse på 1 mm.

Isoleringsmateriale

I testhuset er der anvendt granuleret mineraluld kl. 41 og granuleret cellulose kl. 39. Disse 2 materialer findes ikke som standard i WUFI's database. Vi har derfor ændret varmeledningsevnen i en mineraluld kl. 40 og cellulose kl. 37 til vores behov uden i øvrigt at ændre på materialernes egenskaber.

I 1999 er der foretaget et studie om Sorptionsisotermer (Hansen & Hansen, 1999), hvor der er udarbejdet sorptionstabeller for forskellige typer isolering (Figur 53)

Vi har valgt en standard mineraluld fra databasen, idet standardens hygroskopiske egenskaber stemmer fint overens med studiets tabeller (Figur 49).

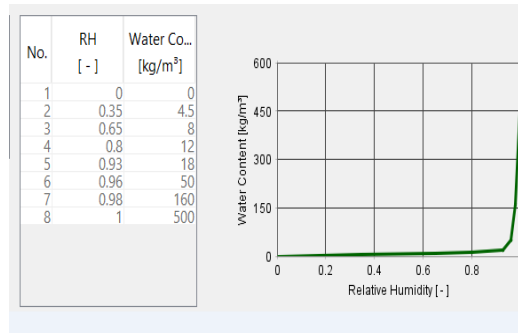


Figur 52: WUFI databasens standard mineralulds sorptionskurve (Fraunhofer IBP, 2019) anvendes idet dens egenskaber anses for at være realistiske.

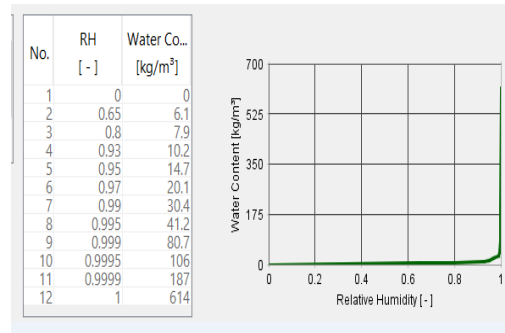
Adsorption		Klimaskab ved 20°C				Reference: tørring ved 70°C	
% RF	Rockwool A-batt	Glasuld 39	Perlite SC (behandlet)	Perlite (ubehandlet)	Ekofiber Vind	Miljø Isolering -1	Miljø Isolering -2, u.salte
3	0.10	0.77	0.61	0.67	7.62	3.71	1.42
6	0.12	0.84	0.60	0.68	8.15	4.42	2.32
9	0.13	0.84	0.60	0.66	8.53	4.78	2.78
12	0.15	0.89	0.61	0.68	8.84	5.12	3.21
15	0.17	0.92	0.60	0.69	9.20	5.50	3.64
25	0.21	0.98	0.62	0.68	10.4	6.64	5.04
35	0.23	1.04	0.65	0.69	11.4	7.68	6.29
45	0.27	1.16	0.68	0.73	12.4	8.64	7.54
55	0.31	1.21	0.71	0.72	13.6	9.71	8.88
65	0.34	1.36	0.76	0.74	15.9	11.5	10.6
75	0.37	1.62	0.83	0.77	19.2	14.2	13.0
85	0.42	2.42	0.97	0.81	23.8	18.2	17.4
90	0.52	3.47	1.17	0.87	27.8	21.8	21.3
92	0.56	4.40	1.32	0.91	30.4	24.0	23.4
94	0.65	6.11	1.59	0.98	34.9	27.9	26.9
96	0.98	11.3	2.39	1.20	86.4	42.9	34.4

Figur 53: Sorptionstabeller med ligevægtsfugtindhold (vægt%) (Hansen & Hansen, 1999, s. 31). Glasuld 39 og miljø isolering-1 anvendes som reference for forventelige hygroskopiske egenskaber, som WUFI's materialer i databasen skal afspejle.

Der findes umiddelbart 3 forskellige granulerede celluloseprodukter i WUFI's database. Ved sammenligning ses der forskel på "standarden" (Figur 54) og de 2 produktbenævnte materialer (Figur 55). Generelt kan standarden optage væsentlig mere vand end de produktbenævnte.



Figur 54: WUFI standard celluloseisolerings. Tabellen ligger lidt højere end sorptionstabellen i Figur 53 og kan dermed indeholde mere vand.



Figur 55: Isocell Zellulosedämmstoff produktet og det andet produkts hygroskopiske egenskaber er sammenlignelige. Ift. tabellen i Figur 53 ligger de lavere.

Sammenlignes simuleringer med hhv. standard og f.eks. Isocell produktet er der som ventet et generelt højere vandindhold i standard celluloseisoleringen, men vandindholdet i hulrummet er ens. Da det tilsyneladende er uden konsekvens for luftlagets vandindhold vælges Isocell produktet til simuleringen, da sorptionskurven ifølge WUFI er underbygget af laboratoriemålinger ved hhv. 65% RF, 80% RF, 93% RF og 97% RF (Fraunhofer IBP, 2019). Standard celluloseisoleringens kurves oprindelse er derimod ukendt.

I WUFI materialedatabase ligger, der kun celluloseprodukter baseret på træfiber og ikke papiruld, som anvendt i testhuset. De hygroskopiske egenskaber, der undersøges i dette masterprojekt, vurderes at være sammenlignelige uanset om der anvendes træfiber- eller papirbaseret granulat, da de ifølge litteraturen har tilsvarende egenskaber (Alternative isoleringsmaterialer, 2005). Sammenlignes datablade fra produkterne, er de fugttekniske egenskaber også tilsvarende. (Bilag 05 og Bilag 07)

Orientering og overflader

Tagfladen mod nord simuleres, idet det antages at denne tagflade har den største temperaturdifferens og dermed har den største risiko for kondensering.

Tagfladens hældning er sat til 30° som testhusets. Slagregns koefficienterne er standard.

Standardvarmemodstanden for tag er valgt indvendigt og udvendigt.

"Sd-value" sættes til "ingen overflade" på indvendig og udvendig side, idet diffusionsmodstanden for metaltaget og gipspladen er defineret under materialerne.

Indbygningfugten sættes til 80% RF og 20°C, da dette afspejler forholdene under opførelsen.

Kontrol og klimadata

Simuleringen foretages henover 5 år iht. WUFI's anbefalinger, så konstruktionen kan opnå ligevægt.

Både varme- og fugttransport medtages i beregningen uden nogen af de hygrottermiske funktioner fravælges.

Der findes ingen danske byer som standard vejrdato i WUFI. Vejrdato er derfor baseret på data indsamlet i Lund i perioden 1995-2005, som anses for sammenlignelig med det danske referenceår (TRY).

DS/EN ISO 13788 er valgt som indendørs klima, da fugtbelastningsklasse 2 i standarden svarer til testhusets fugtklasse som angivet i Tabel 1 og afsnit 3.3.

4.2.2 BSim

Formålet med at benytte BSim er at simulere de faktiske forhold og se om resultaterne er nogenlunde sammenfaldende med vores målinger fra testhuset. I så fald er håbet at vi ved simulering af en model kan komme med et troværdigt bud på om en konstruktion er i risikozonen for skimmelvækst eller ej – hen over et år.

Vi har valgt at fokusere på MX.2 og MX.5 for at validere simuleringerne mod de faktiske målinger – idet vi har de målte gennemsnitlige luftskifter i disse to tagrum. Dernæst simuleres de resterende loftskonstruktioner.

Modellen opbygges af et stueplan og en tagetage. Tagetagen underopdeles i tre tagrum, hvor det midterste er det vi undersøger via simuleringerne. *Site* defineres til at være i København og bygningen orienteres i øst/vest retning, dvs. at der er en tagflade direkte mod nord og en tagflade direkte mod syd, hvilket svarer til testhusets placering og orientering. Vi har valgt at benyttes "Danmark_2013.DRY" som vejrdatasæt for simuleringen.

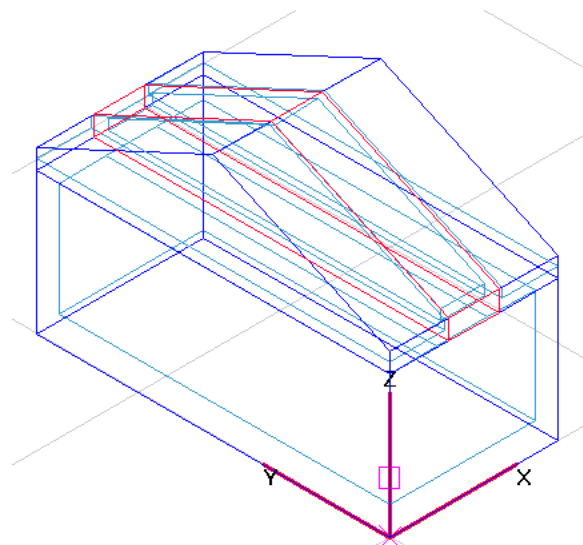
Geometrisk opbygges tagrummet, således at det svarer præcist til de tagrum vi udfører målinger på i testhuset.

Bredde er dermed 0,97 m og Dybde er 6,9 m.

Højden af tagrummet er 1,6 m, svarende til en taghældning på 30 grader.

Tagrummets volumen er 5,4 m³, svarende til det faktiske volumen.

På hver side af tagrummet er en *Boundary Zone*, som er en kopi af det midterste tagrum og som indstilles til fiktive zoner med samme termiske forhold som tagrummet.



Figur 56: BSim model af testhus. Det markerede tagrum er det vi simulerer i, og til begge sider af dette ses boundary zones, som fiktivt er tildelt samme forhold som tagrummet.

Geometrisk er *Boundary Zonerne* 1,2 m brede og 6,9 m dybe med samme taghældning som det midterste tagrum.

Etageskillelsen ned mod stueetagen opbygges i de 6 forskellige loftkonstruktioner, MX.1 – MX.6, jf. afsnit 3.3.

Vægge mod tilstødende tagrum er opbygget med 15 mm krydsfiner og en damptæt membran, tilsvarende den virkelige konstruktion.

Taget er opbygget som et ventileret metaltag. Yderst er en tyndplade af stål, der dog beregningsmæssigt er indsat som en 6 mm tyk fibercementplade¹⁶, dernæst 70 mm ventileret hulrum og en damptæt membran inderst mod tagrummet.

Stueetagen indstilles til fugtklasse II jf. afsnit 4.1.1, med en gennemsnitlig temperatur på 20 grader og 50% relativ fugtighed. Geometrisk har stuen samme bredde som de 3 tagrum tilsammen svarende til 3,4 m og dybden 6,9 m, samt højden 2,8 m.

Væggene er opbygget som træfacader, med 190 mm isolering og en indvendig pladebeklædning. Dette svarer omtrent til testhusets opbygning, men er ikke så relevant, da vi primært simulerer i og undersøger tagrummet, dvs. at fugt og varmekorhold simuleres ud fra fugtklassen samt målte værdier.

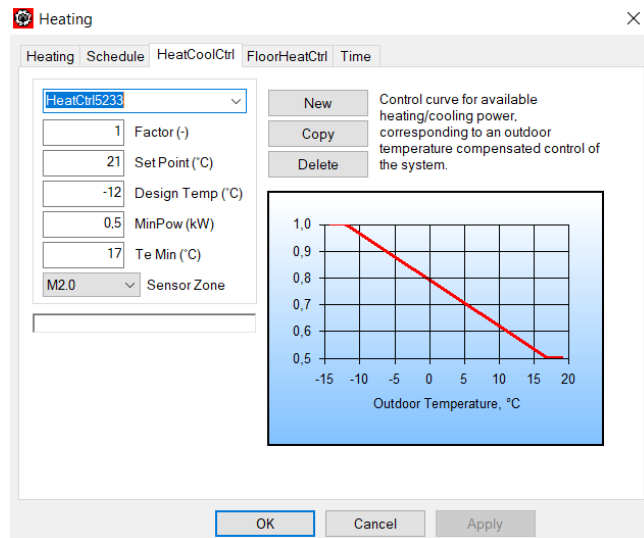
På samme vis er gulvkonstruktionen under stueetagen opbygget som en standard isoleret dækkonstruktion med 300 mm isolering.

Stueetagens temperatur og fugthold styres via to systemer: *Heating* og *Ventilation*.

Heating sættes til at køre *Always* og *HeatCoolCtrl* med faktor på 1, et *set point* på 20°C, en *design temp* på -12°C, *MinPow* på 0,5 og *Te Min* på 17°C (Figur 57). Dertil har selve system en *MaxPow* på 1 kW, *Fixed part* på 0 og *Part to air* på 0,6.

Det vigtige her er dog kun at simuleringen sørger for at holde temperaturen i stueplan konstant nok til at være sammenligneligt med målingerne. Dermed er *set point* og *MaxPow* de vigtigste parametre.

Ventilation sættes til at køre *Always* og *MoistureCtrl*. Via *Schedule* inddeles *MoistureCtrl* i to dele, henholdsvis sommer og vinterforhold, da dette varierer henover året. Opdelingen er simplificeret noget da den kun er delt i to, men dette skyldes at testhuset befugtningsanlæg kører efter samme skema, se Figur 18. "M2_Vinter" holder en relativ luftfugtighed på 50% fra november til og med april. "M2_Sommer" holder en relativ luftfugtighed på 60% fra maj til og med oktober. På selve fanen *Ventilation* bruges standard indstillingerne på nær på *Heating Coil*, hvor *Max Power* er sat om til 10 kW og *Cooling Coil* er



Figur 57: Screenshot der viser et eksempel på styring af et system i BSIm. Her er "HeatCoolCtrl" fanen vist.

¹⁶ Dette skyldes, at BSIm ikke kan beregne den latente varme i meget tynde metallag. "Latant Heat" var optimalt ønsket beregnet i etageadskillelsen, men dette viste sig at ikke at være muligt i BSIm. Den latente varme skønnes dog til at have mindre betydning for resultaternes troværdighed.

sat til -10kW. Begge dele for at sikre at der er nok kraft til rådighed i systemet. Ligeledes er *Humidifier "Max Output"* også sat op til 0,8 kg/h, for at sikre at *MoistureCtrl* har nok fugt til at sikre de 50-60% relativ luftfugtighed hele året.

Der er flere måder at simulere forholdene i tagrummet så de er sammenlignelige med de virkelige forhold. Fra PFT-målingerne, se afsnit 4.1.3 har vi det gennemsnitlige luftskifte, hvilket dermed kan bruges som baseline i simuleringen. Dermed er test model I opbygget med infiltration.

En anden måde at opbygge modellen så det er muligt at simulere de virkelige forhold er at benytte BSims *NatVent* modul, som findes under systemet *Venting*. Dette system er egentlig opbygget til at simulere brugerstyret udluftning ved åbning af et vindue. Her kan tilvælges et *NatVent* modul, som kan indstilles til at anvende modellerede åbninger til beregning af naturlig ventilation. Dermed er test model II opbygget med *Venting*.

Simuleringerne starter 01.01.2019 og løber over et år, til og med 31.12.2019. Dette giver mulighed for at sammenholde simuleringer med målinger, samt vurdering på tagrummets forhold i sommer og efterårs perioden. Vi har i denne opgave fokuseret på de måneder, hvor der er måledata at sammenligne med. I fanen options er samtlige parametre markeret, undtagen *Latent Heat* og *Glazing Heat*. *Glazing Heat*, da glastemperaturen ikke er relevant i denne udregning. *Latent Heat* fungerer ikke når der simuleres med tynde lag, som testhusets tag.

Materialeparametre

De anvendte materialer er som udgangspunkt valgt ud fra BSims standard materialer. Selve stueplanets ydervægge og gulvkonstruktion er ikke interessante for modellens beregning af tagrummet og der er valgt en simpel træfacade og et beton gulv. Dette skyldes at stueplanet kun skal simulere 50% relativ fugt og en konstant temperatur, for at kunne påvirke tagrummet som en bolig i fugtklasse 2. Derimod er de 6 forskellige etageadskillelser ret interessante, idet de ikke alle kan opbygges ved brug af BSims standard katalog af materialer. Cellulose, også kaldet papiruld, er et alternativt materiale, som ikke findes i BSims katalog og dermed må tilføjes så nedenstående bygningsdele kan opbygges og beregnes i BSims:

MX.1: 0,013m plasterboard + 0,15m stonewool 41

MX.2: 0,013m plasterboard + 0,4m stonewool 41

MX.3: 0,013m plasterboard + 0,1m stonewool 41 + 0,3 m cellulose 39, fill*

MX.4: 0,013m plasterboard + 0,4m cellulose 39, fill*

MX.5: 0,013m plasterboard + dampproof membrane + 0,4m stonewool 41

MX.6: 0,013m plasterboard + dampproof membrane + 0,4m cellulose 39, fill*

For at tilføje et materiale, her "Cellulose 39, fill", er der en del parametre der skal udfyldes, såsom lambda-værdi i tør og våd tilstand, adsorptions og desorptionskurver m.v. Disse er fundet i ældre DTU-rapporter, (Sorptionsisotermes, 1999) og (Rode, Carsten; Rasmussen, Niels T. , 1999). Se Figur 53.

Test Model I: Infiltration

Luftskiftet i tagrummet styres via systemet *Infiltration* som kan indstilles med følgende værdier:

TmpFactor 0,1 /h/K, da tagrummet er lille og tæt.

TmpPower 0,5, hvilket er en standard værdi for potensen på temperaturdifferensen

Windfactor 0,3 s/m/h, idet beliggenheden hverken er beskyttet eller direkte udsat.

Basic Airchange blev sat jf. PFT målingens resultater (M1.X:4,04 /h, M2.X: 6,24 /h og M3.X: 3,02 /h), se afsnit 5.1, da vi i første omgang ønsker at validere BSim resultater mod faktiske målinger. Infiltrationen sættes via *schedule* til at køre *Fullload* og *Always*.

Schedule er sat til *Fullload* og *Always*, da tagrummets åbninger og ventilationsstudse aldrig lukkes.

Kalibrering af test model I:

Ved testsimulering viste det sig at det gennemsnitlige simulerede luftskifte lå for højt i forhold til det målte luftskifte. På baggrund af test blev det indtastede luftskifte korrigeret, således at det simulerede gennemsnit svarede bedre til det målte. Altså er de anvendte værdier for M1.X = 2,8 h⁻¹, M2.X = 4,7 h⁻¹ og M3.X = 1,4 h⁻¹.

Test Model II: Venting

Luftskiftet simuleres som naturlig ventilation via BSims *Venting*. For at systemet ved, hvad det skal regne på, er der tilføjet geometriske åbninger i modellen.

M2.X har fået 900 mm x 15 mm spalte i tagfoden på hver side, samt to ventilationsstudser med et geometrisk areal på 50 cm² pr studs, svarende til kravene. M1.X's åbningsareal er reduceret til 600 mm x 15 mm i hver tagfod. Ventilations studsernes areal er reduceret til 2 x 33 cm² dvs. samlet åbningsareal er 66% af M2.X. M3.X's åbningsareal er reduceret to 300 mm x 15 mm i hver tagfod. Ventilations studsernes areal er reduceret til 16,5 cm² dvs. samlet åbningsareal er 33% af M2.X.

Da spalter og ventilationsstudser beregnes via deres udstrømningskoefficient, *C_d* og Indblæsningstemperaturkonstanten *K_a*, er disse defineret forskelligt for de enkelte åbninger. Spalterne er rektangulære, skarpkantede og beregnes¹⁷ dermed til at have en *C_d-værdi* på ca. 0,67 og en *K_a-værdi* på 8,5, 7,9 og 7,3 ud fra de varierende højde/bredde forhold i M1.X (20) = 7,9, M2.X (30) = 7,3 og M3.X (10) = 8,5. Ventilationsstudsernes *K_a-værdi* baseres på åbningernes udformning er cirkulære og lufthastigheden igennem studserne. I BSim mo-

¹⁷ Beregning foretages jf. (SBI 202 - Naturlig ventilation i erhvervsbygninger, 2002) ud fra formel (9.29: $C_v = 1/\sqrt{1+\zeta}$) og (9.30: $C_d = C_v C_k$), ζ er 0,1 for alm. ventilationsåbninger uden kaneler. C_k er 0,7 for skarpkantede åbninger og 0,95 for godt afrundede åbninger.

dellen kan vi konstatere en lav lufthastighed (-2,8 til 3,1 m/s). På denne baggrund anslås *Ka-værdien* til at være 9. *Cd-værdien* for studserne beregnes til at ligge på 0,9.

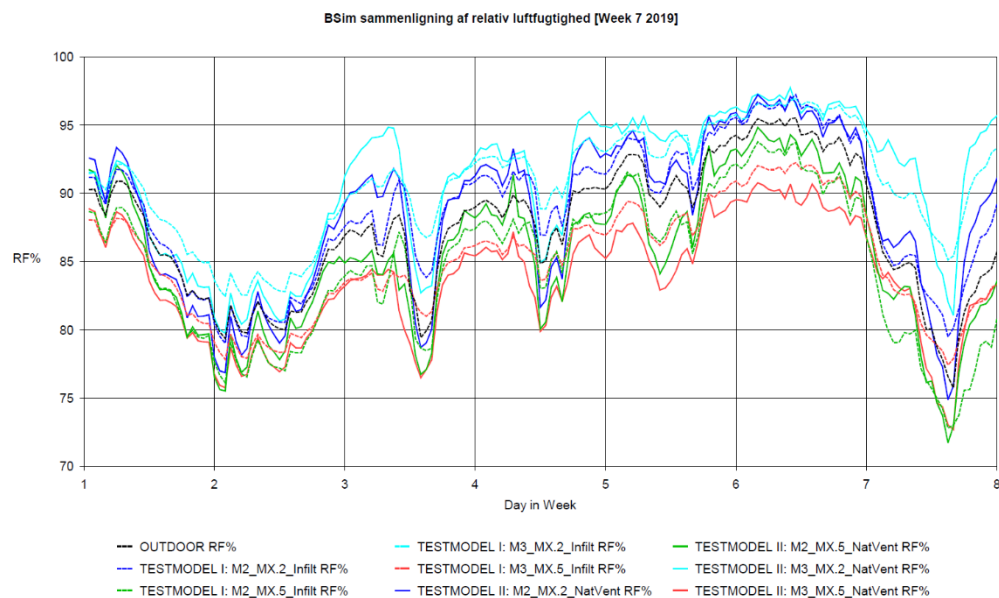
I fanen *Venting* sættes *Max AirChange* til 100 h⁻¹, for at sikre at simuleringen ikke går ind og lukker af for høje luftskifter. *Max Wind* sættes til "0" for at sikre at åbninger ikke regnes som lukkede uanset vindhastighed. *Sensor Zone* sættes til tagrummet (*Current*).

I modulet *NatVent*, stadig på fanen *Venting* vælges systemtypen til *Combined*, da der både er åbninger oppe og nede samt i begge sider.

Schedule sættes til *VentingCtrl* og *Always*, da den naturlige ventilation altid skal køre. På fanen *VentingCtrl* sættes *SetPoint* til -12 grader for at sikre at *VentingCtrl* ikke lukker af ved en given temperatur (da der sjældent ses temperaturer under -12 grader i DRY). *SetPoint* for CO₂ sættes til "0" da dette deaktiverer funktionen. *Factor* sættes til 1 da vi reducerer åbningerne geometrisk.

Valg af model for simulering af tagrum

De to testmodeller simulerede begge MX.2 og MX.5 for at vurdere hvilken der er bedst egnet fremadrettet til at simulere de øvrige tagrum og loftkonstruktioner. Testmodel I, simulerede ud fra et kendt luftskifte i tagrummet, hvor testmodel II simulerede med naturlig ventilation.



Figur 58: M2.2/M2.5/M3.2/M3.5 Infilt (BSim testmodel I) sammenholdt med M2.2/M2.5/M3.2/M3.5 NatVent (BSim testmodel II) samt BSim Outdoor. Temperaturen ligger meget tæt på udetemperaturen i både BSim testmodel I og BSim testmodel II, og derfor er de ikke vist her. Den relative fugt viser mindre forskelle. Dog ligger begge modeller over 80% RF i det meste af ugen. Testmodel II viser generelt større spænd i RF%, hvilket tyder på at Testmodel I bliver begrænset af det angivne luftskifte. Se Bilag 02 for stor version af denne graf og graf med sammenligning af temperatur.

Ved sammenligning ses at testmodel II giver et større spektrum, hvor kurverne både ligger lavere ved dyk i kurven og højere ved peak på kurven end testmodel I. (Se Figur 58 og Bilag 02)

Samtidigt viser det sig, at gennemsnitlige målinger i testmodel II har et luftskifte der ikke ligger langt fra de beregnede værdier, se Tabel 9 herunder, som er grundlag for antagelserne i testmodel I. Denne opdagelse er den primære grund til at vi vælger at benytte testmodel II med naturlig ventilation, til de øvrige simuleringer.

Tabel 9: Luftskifte beregnet ud fra PFT-målinger sammenholdt med simulerede gennemsnitlige luftskifte i BSim (testmodel II med Naturlig Ventilation). Resultaterne er forholdsvis tæt på de gennemsnitlige luftskifter fra PFT-målingerne. Det ses at BSims simulerede luftskifter ved brug NatVent-modulet ligger ret tæt på den ønskede procentvise reduktion ift. M2.2/5 som er ventileret efter kravene i (Brandt, Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave, 2013) og (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019).

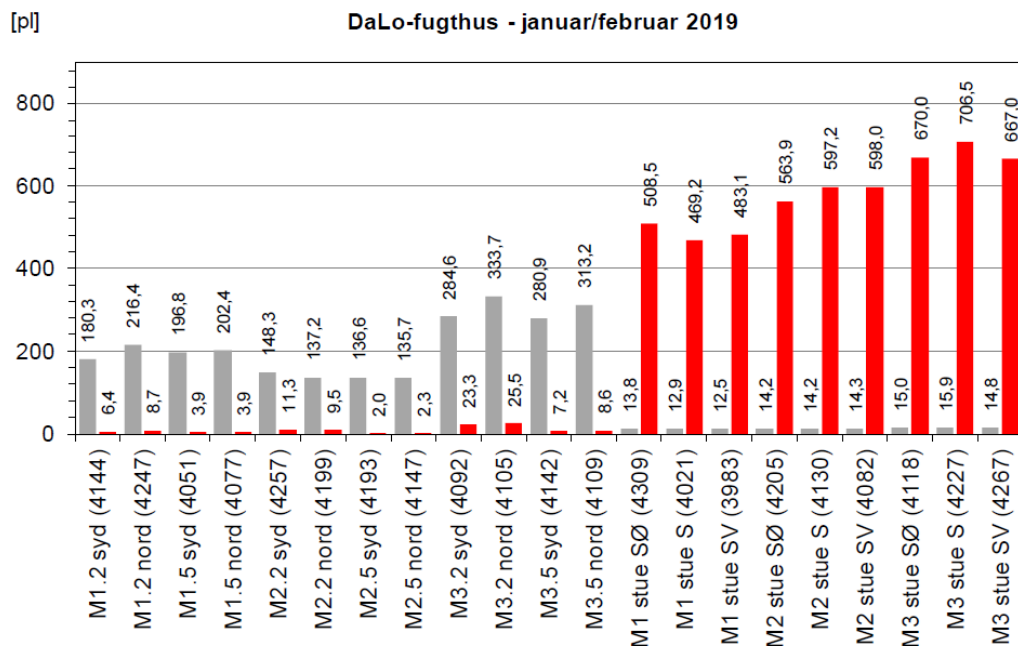
	Ønsket Procentvis reduktion ift. M2.2/5	Beregnet luftskifte (PFT-målin- ger)	Procentvis reduktion ift. M2.2/5 (PFT)	Gennemsnit- ligt luftskifte (BSim Nat- Vent.)	Procentvis reduktion ift. M2.2/5 (BSim)
M1.2/M1.5	33,3%	4,04 h ⁻¹	35,1%	5,18 h ⁻¹	29,0%
M2.2/M2.5	-	6,24 h ⁻¹	-	7,30 h ⁻¹	-
M3.2/M3.5	66,6%	3,02 h ⁻¹	51,5%	2,37 h ⁻¹	67,5%

5 RESULTATER

5.1 PASSIV SPORGASTEST

Ud fra tagrummets indbyggede temperatursensor nr. 5, blev den gennemsnitlige temperatur i sporgas måleperioden målt til 3,1°C. I stueplan blev den målt til 21,9°C

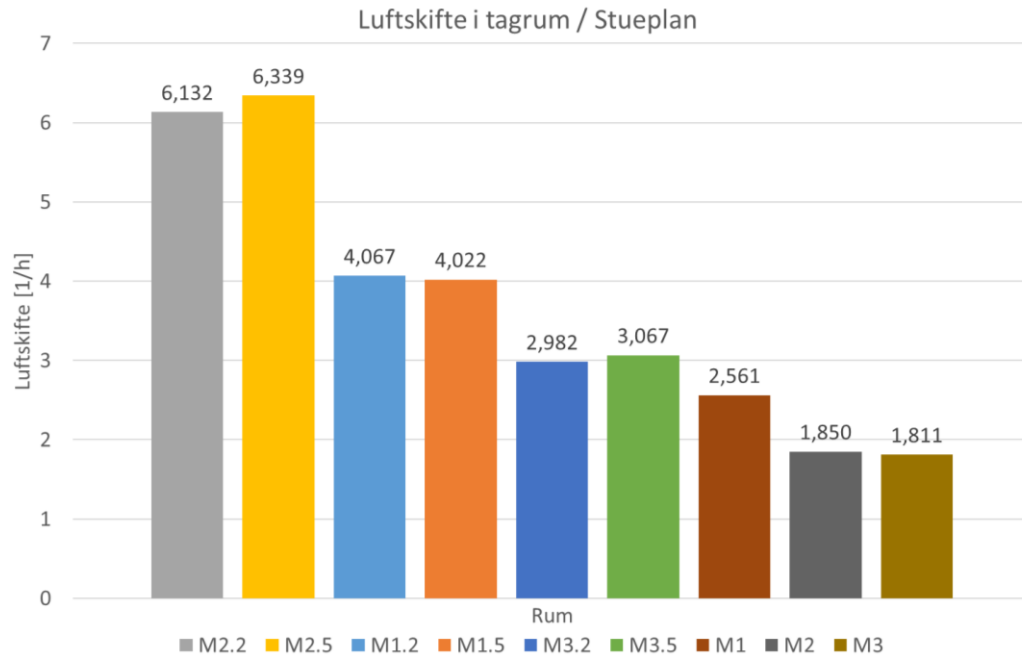
PFT-målingerne viste en forskel i koncentrationerne af sporgas i de enkelte tagrum, som tydeligt angav, at luftskiftet blev reduceret i M1.2/5 og M3.2/5 i forhold til M2.2/5. Se Figur 59 som viser sporgas koncentrationen samt Figur 60, som viser forskellen i luftskiftet i de forskellige tagrum samt i stueplan.



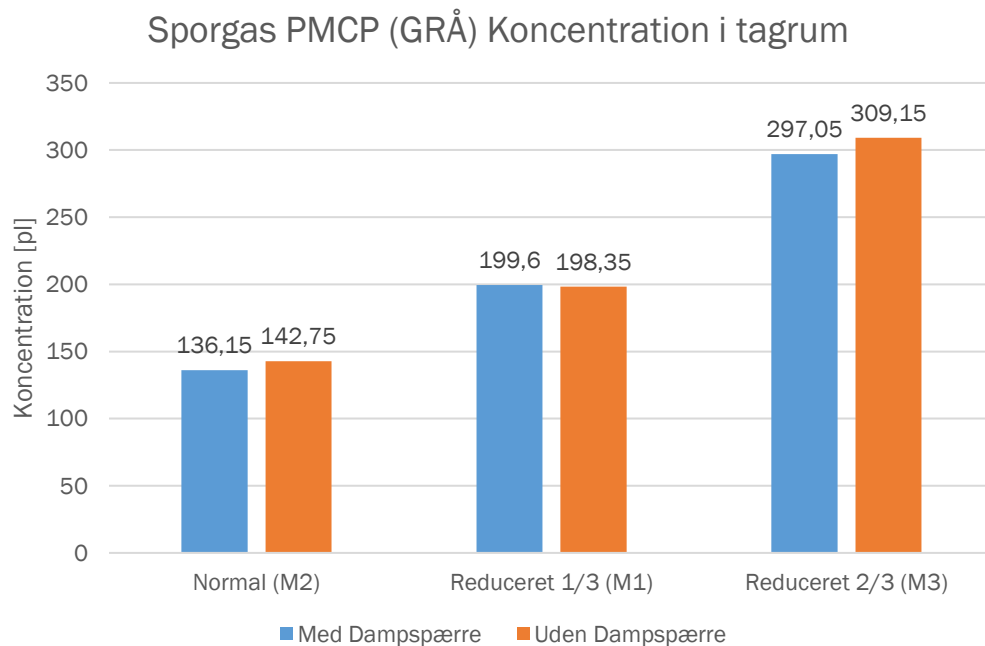
Figur 59: Resultat af PFT-måling i forsøghuset, jf. Bilag 04, fremstillet grafisk i søjlediagram som viser at der er større koncentration i tagrum med lavere ventilationsrate. Måleperioden var 18.01.2019 - 11.02.2019.

Målingerne viser ligeledes at der er en mindre infiltration mellem stueplan og tagrum, men at den tydeligvis er større igennem de loftkonstruktioner der er udført uden dampspærre. Tagrum med dampspærre (M1.5, M2.5 og M3.5) har en lavere koncentration end de tilsvarende tagrum uden dampspærre (henholdsvis M1.2, M2.2 og M3.2).

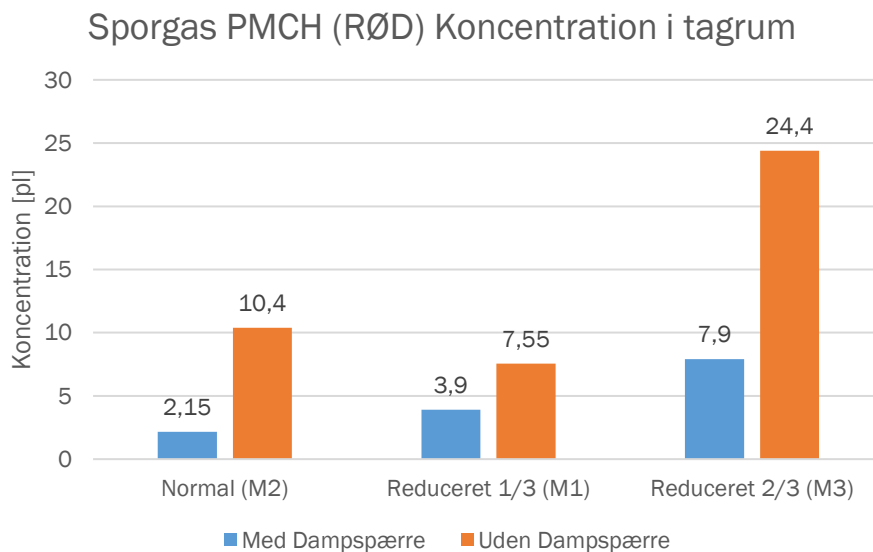
PFT-målingerne blev omregnet til luftskifter, Se Tabel 10, som viser at tagrummene i M3.X har et lavere luftskifte end M2.X og M1.X. Den høje koncentration af sporgas er resultat af lavere luftskifte. I stueplan har M1 det højeste luftskifte, hvilket ses af den lave koncentration. (Figur 59 og Figur 60)



Figur 60: Luftskifte i tagrum, udregnet på baggrund af PFT-målingens værdi, se Figur 59, samt beregning i Bilag 03. Metoden for udregning er beskrevet i (Bergsøe, Niels C. , 1992)



Figur 61: Koncentration af sporgas PMCP i tagrum. Koncentrationen er større i M3.2 og M3.5 hvor luftskiftet er mindst. Kilden er placeret i tagrummet og dampspærren har ingen indflydelse på koncentrationen.



Figur 62: Koncentrationen af PMCH i tagrum. Sporgas kilden er placeret i stueetagen og det er tydeligt at se at dampspærren har en indflydelse på koncentrationen i tagrummet. Det er dog overraskende at koncentrationen i M2.2 uden dampspærre er større end i M1.2, hvor luftskiftet er mindre.

Tabel 10: Procentvis reduktion af luftskiftet i tagrum. Udregnet på baggrund af metode beskrevet i (SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, 1992). Beregning er vedlagt i Bilag 02.

	Reduktion	Luftskifte (gns)
M1.2/M1.5	35,1 %	4,04 h ⁻¹
M2.2/M2.5	0,0 %	6,24 h ⁻¹
M3.2/M3.5	51,5 %	3,02 h ⁻¹

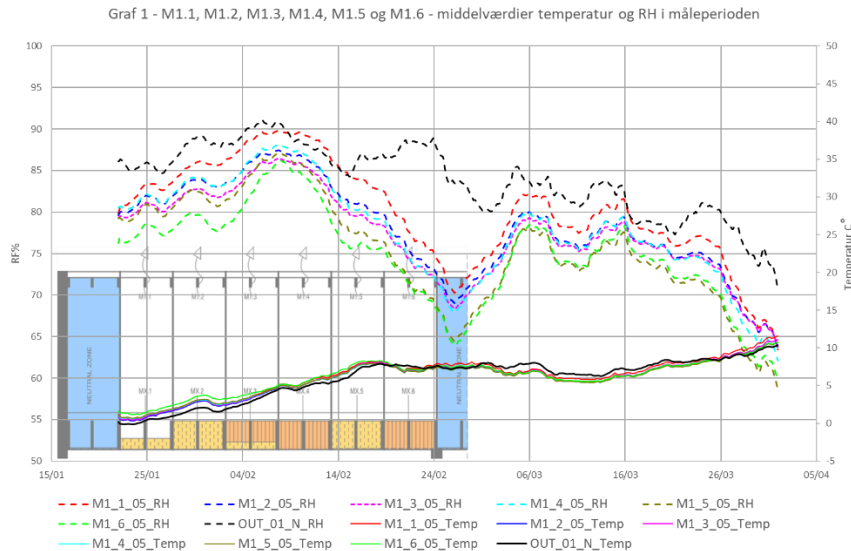
Tabel 11: Luftskifte h⁻¹ kontra l/s pr. m²

Rum		
M1.2	4,067 h ⁻¹	1,032 l/s
M1.5	4,022 h ⁻¹	1,020 l/s
M2.2	6,132 h ⁻¹	1,556 l/s
M2.5	6,339 h ⁻¹	1,608 l/s
M3.2	2,982 h ⁻¹	0,756 l/s
M3.5	3,067 h ⁻¹	0,778 l/s
M1	2,561 h ⁻¹	1,636 l/s
M2	1,850 h ⁻¹	1,182 l/s
M3	1,811 h ⁻¹	1,157 l/s

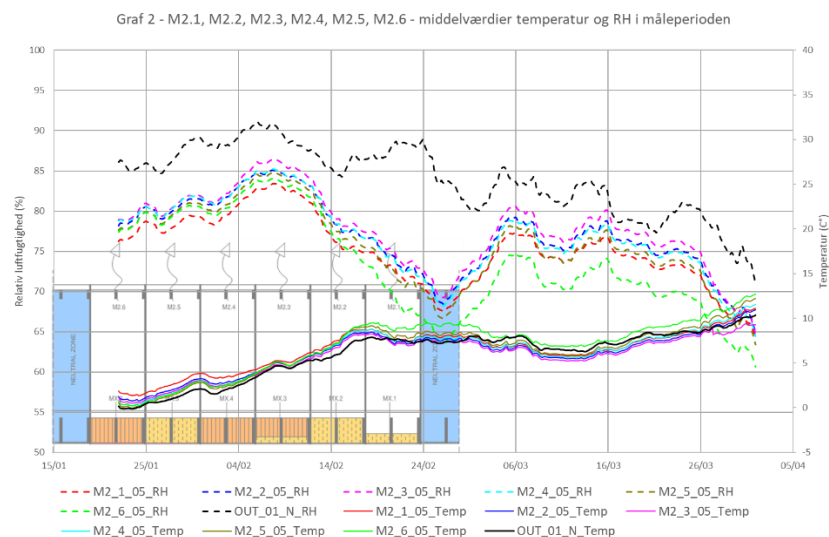
Luftskiftet i M2 er noget mindre end i M1 og M3, når man ser på l/s – hvilket formodentlig skyldes mindre infiltration.

5.2 TEMPERATUR- OG FUGTMÅLINGER

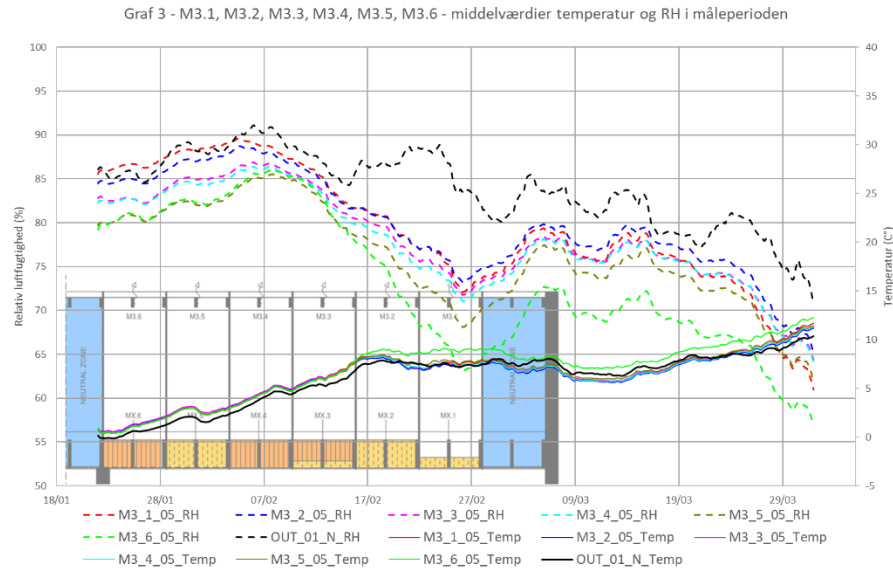
I nærværende afsnit er et uddrag af alle udførte målinger og simuleringer vist. Grafer findes i A4 format i Bilag 01. Medmindre andet er angivet er målingerne vist som middelværdier. Da fugt- og skimmelskader er følge af længere tids påvirkning, giver middelværdier, udover en jævn graf, et mere generelt billede af forholdene i tagrummet, som er nemmere at forholde sig til.



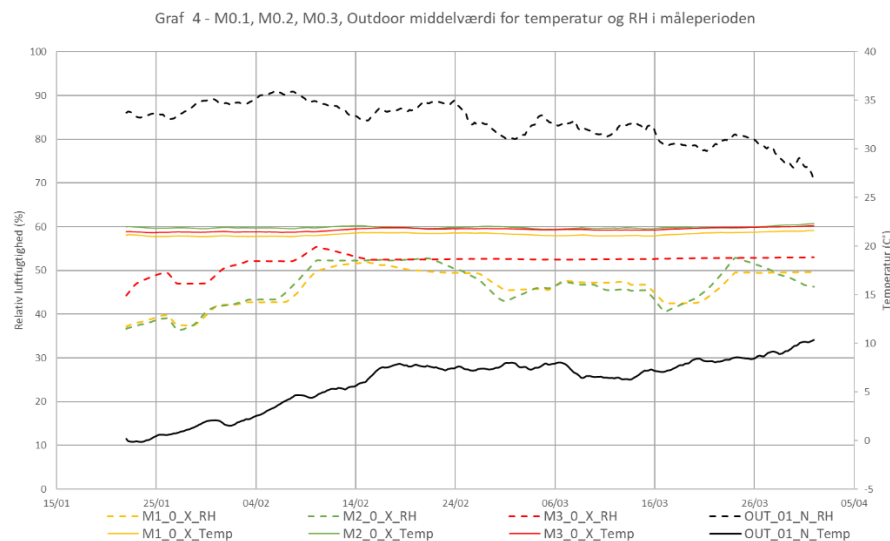
Figur 63: Graf 1 sammenligner M1.1 til M1.6 med udetemperatur og relativ fugt. Temperaturmæssigt følger tagrummene udetemperaturen inden for +/- 2 grader. Det er interessant at se at alle tagrummene har dyk ned til 65-72% RF omkring den 25 februar. Ligeledes bemærkes at M1.5 og M1.6, der begge er udført med dampspærre, har den laveste relative fugtighed i hele måleperioden. M1.1 som har den mindste isolering og er udført uden dampspærre har den højeste fugtighed i måleperioden.



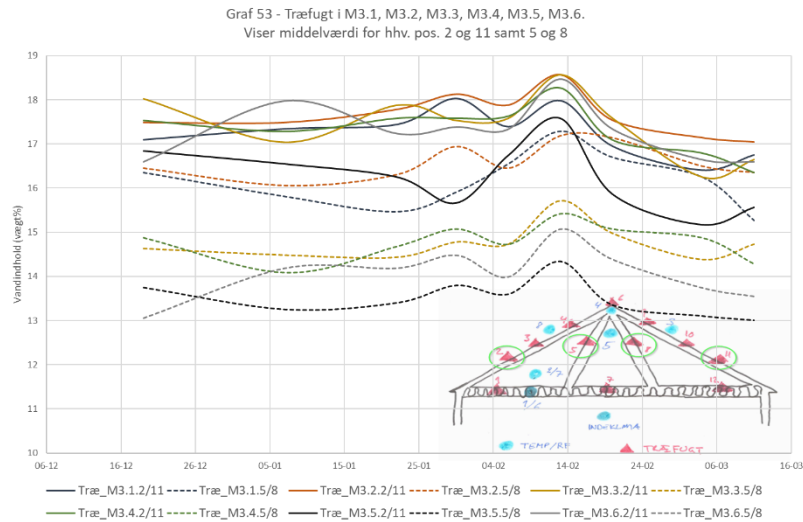
Figur 64: Graf 2 sammenligner M2.1 til M2.6 med udetemperatur og relativ fugt. Temperaturmæssigt følger tagrummene udetemperaturen inden for +/- 2-3 grader. Det er interessant at se at alle tagrummene har dyk ned til 65-69% RF omkring den 25 februar, på samme vis som M1.X, men med lavere RF%. Ligeledes bemærkes at M2.5 og især M2.6, der begge er udført med dampspærre, har den laveste relative fugtighed i hele måleperioden. M2.1 som har den mindste isolering og er udført uden dampspærre ligger næsten ens med M2.5 i fugtighed i måleperioden, mens M2.3 ligger højest mht. relativ fugt.



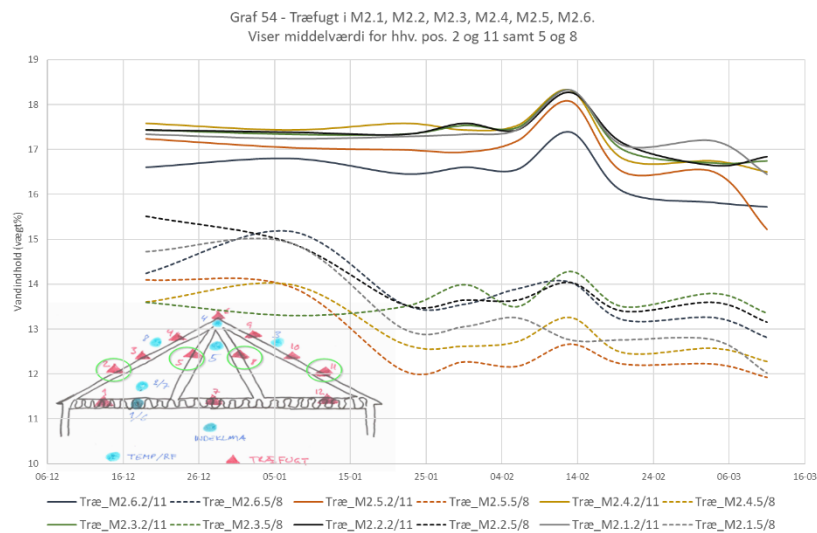
Figur 65: Graf 3 sammenligner M3.1 til M3.6 med udetemperatur og relativ fugt. Temperaturmæssigt følger tagrummene udetemperaturen inden for +/- 2 grader. Det er interessant at se at alle tagrummene har dyk ned til 65-75% RF omkring den 25 februar. Ligeledes bemærkes at M3.5 og M1.6, der begge er udført med dampspærre, har den laveste relative fugtighed i hele måleperioden. M3.2 som har 400 mineralulds isolering og er udført uden dampspærre har den højeste fugtighed i det meste af måleperioden.



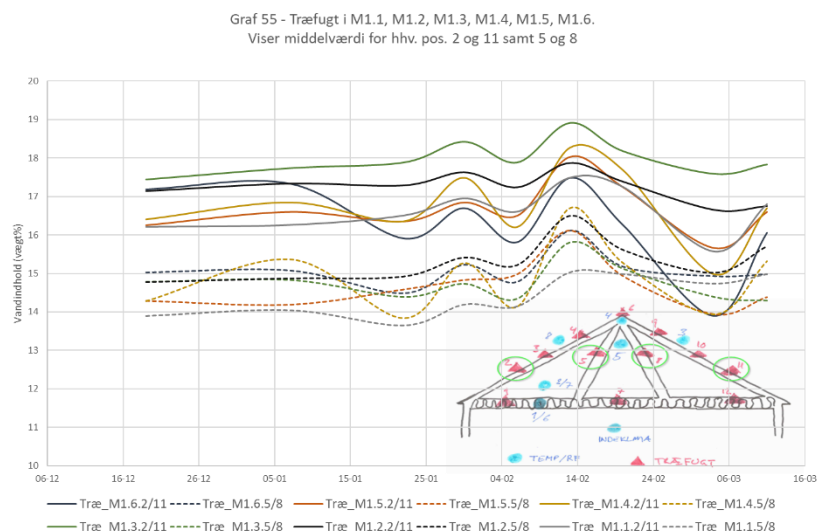
Figur 66: Graf 4 viser den relative fugt og temperatur i stueplan, sammen med udetemperatur og relativ fugt - og dermed påvirkningen af tagrummene nede fra stueplan. Det ses at stueplans temperaturerne ligger rimelig konstant på ca. 20-21 grader. Den relative fugt burde teoretisk have ligget mere stabilt, pga. befugteren, så som M3 ligger fra 22-23 februar og frem. Dette skyldes højst sandsynligt at der ikke altid har været nok vand på vandtanken som befugteren benytter til befugtning af lokalerne. Ideelt set skulle disse tre grafer have været ens. Det kan aflæses af grafen hvornår der har manglet vand på befugteren eks. Ca. d. 27-30 januar og d. 4-6 februar i alle tre sektioner og senere omkring 2-4 marts, ca. d. 9-10 marts og d. 16-19 marts i M1 og M2, hvor M3 har kørt stabilt siden starten af februar.



Figur 67: Graf 53 sammenligner fugtindholdet i spærtræ i tagrum M3.X. Op til forsøgets opstart ligger træfugten jævnt ved anbefalede ventilationsforhold, men også forholdsvis højt, grundet tilskud fra tidligere fugtklasse (afsnit 3.3). Omkring d. 18.01, hvor forsøget sættes i gang, ses der stigende fugtniveau frem mod midt i februar, der igen falder sandsynligvis pga. solpåvirkning.



Figur 68: Graf 54 sammenligner fugtindholdet i spærtræ i tagrum M2.X. Fugtclassen er uændret fra Projekt Dalo (afsnit 3.3). Dermed skyldes udsving i træfugten primært variationer i udeklimaet.



Figur 69: Graf 55 sammenligner fugtindholdet i spærtræ i tagrum M1.X. Op til forsøgets opstart ligger træfugten jævnt ved anbefalede ventilationsforhold. Træfugten ligger lidt under de øvrige sektioner pga. tidligere fugtklasse. (afsnit 3.3) Omkring d. 18.01, hvor forsøget sættes i gang, ses der stigende fugtniveau frem mod midt i februar, der igen falder sandsynligvis pga. solpåvirkning.

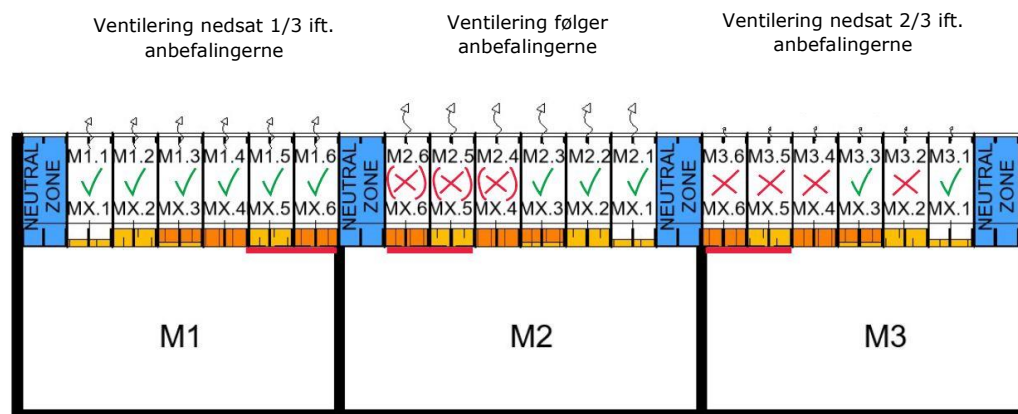
5.3 SKIMMELTEST

Den første del af den udførte tapetest, med henblik på vurdering af skimmel-svampevækst, viste ingen tegn på skimmelvækst i hverken M1.X, M2.X eller M3.X. Dette kan dog ikke udelukke, at der kan forefindes svamp, da prøve-området er meget lille. Testen blev udført samme dag, som forsøget blev sat i gang, d. 18 januar. Alle prøverne blev set igennem ved 40 x zoom i mikroskop. Interessante eller mistænkelige områder blev undersøgt ved 100 x zoom.

Ved forsøgets afslutning, ca. 3 måneder senere, blev der foretaget endnu en tapetest på samme sted som den første test.

I anden tapetest blev der fundet meget begrænset skimmelvækst i M2.4, M2.5, M2.6 og lidt tydeligere, men stadigvæk begrænset vækst i M3.2, M3.4, M3.5 og M3.6. Skimmelvæksten blev først fundet ved minimum 200 x zoom i mikroskop. Normalt anvendes 40 x zoom til vurdering af skimmelvækst i mikroskop. I nærværende test blev der zoomet ind til 200 x til 400 x zoom for at lokalisere skimmelsvampestrukturer, hvilket betyder, at væksten med stor sandsynlighed ikke ville være opdaget ved 40 x zoom.

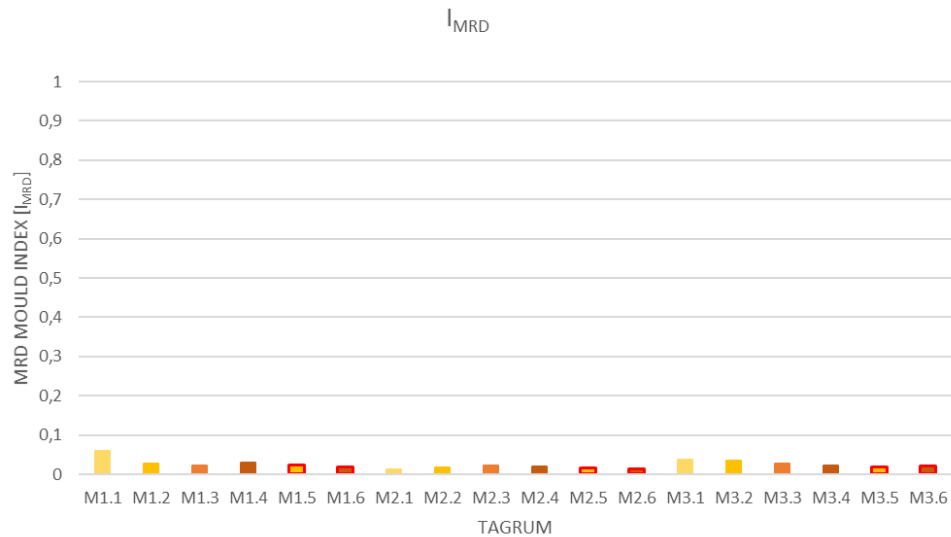
Over M2 sektionen var der mindre vækst, hvilket betød at måtte zoomes mere ind for at lokalisere vækst. Over M3 var væksten større, eller i hvert fald nemmere at finde, hvilket dog skal nævnes med større usikkerhed, da der kun er udført en lille test i hvert tagrum.



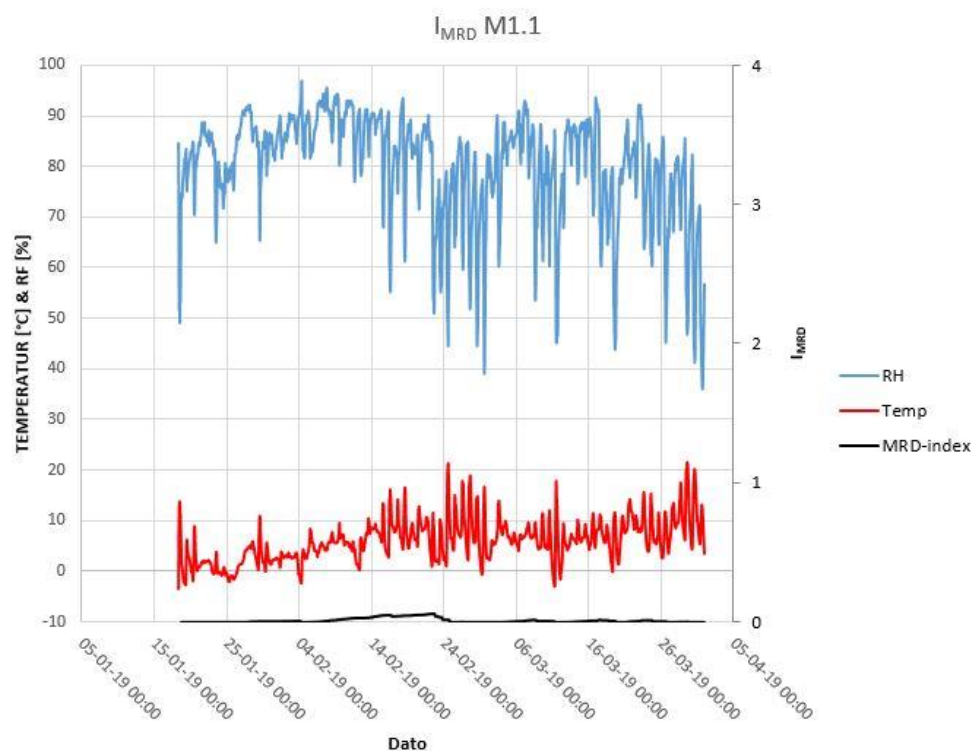
Figur 70: Snit i testhuset med angivelse af i hvilke tagrum der er fundet skimmelsvamp. MX.1 = 100 mm Mineraluld uden dampspærre, MX.2 = 400 mm Mineraluld uden dampspærre, MX.3 = 100 mm Mineraluld + 300 mm Cellulose uden dampspærre, MX.4 = 400 mm Cellulose uden dampspærre, MX.5 = 400 mm Mineraluld med dampspærre og MX.6 = 400 mm Cellulose med dampspærre, jf. afsnit 3.3. Grønt hak angiver ingen fund af skimmelsvamp, rødt kryds med parentes angiver fund af nogen skimmelvækst og rødt kryds angiver fund af tydelig skimmelvækst.

I flere af testene skulle der zoomes længere ind end de definerede 40 x før skimmelvæksten kunne konstateres. Ud fra denne vurdering er skimmelvæksten derfor ikke på niveau 1, iht. Mould Indekset eller I_{MRD} .

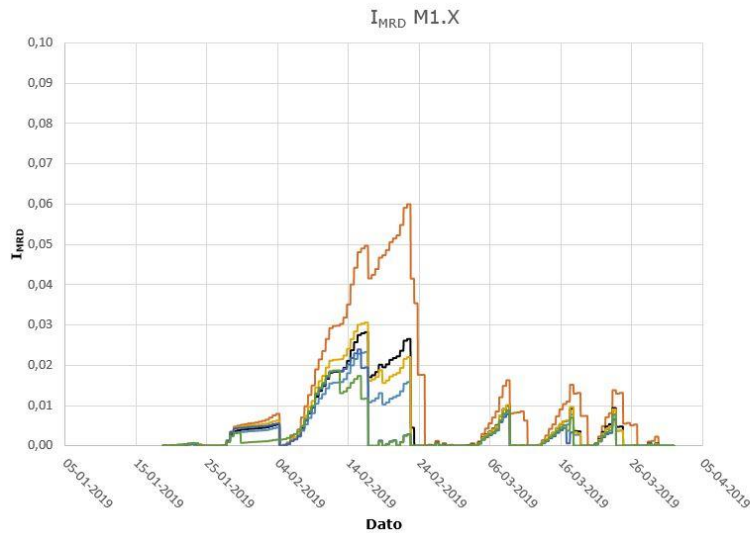
Vi har ud fra MRD-modellen beregnet Mould Indekset I_{MRD} ud fra de målte temperaturer og relative luftfugtigheder i tagrummene (se Figur 71). I M1.1 var der umiddelbart højeste niveau af skimmelvækst, men selvom alle tagrummene havde vækstbetingelser for mikroskopisk vækst, var ingen af dem i nærheden af 1 og dermed kan fundet af skimmel ikke defineres som klar og tydelig skimmelvækst, men nærmere sporadiske sporer.



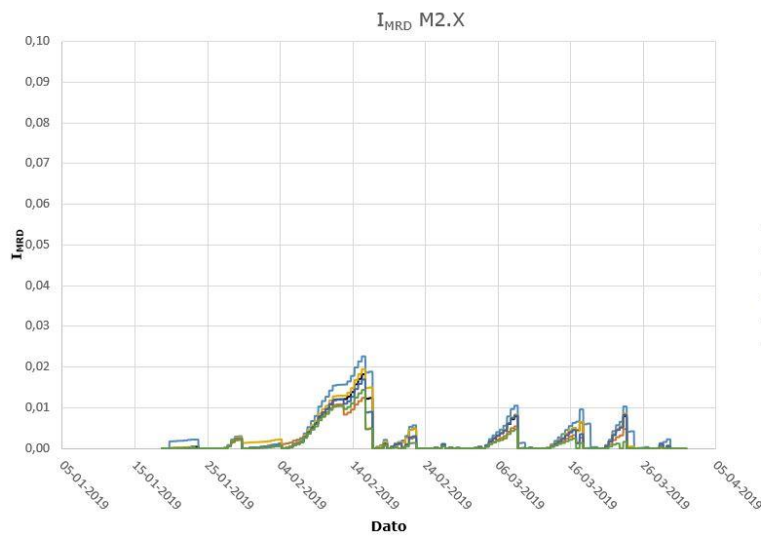
Figur 71: Mould Indeks (Skimmel Indeks) eller Indeks $_{MRD}$ iht. MRD-modellens definition. Bemærk, at I_{MRD} går til 1, hvorefter skimmelvækst er etableret.



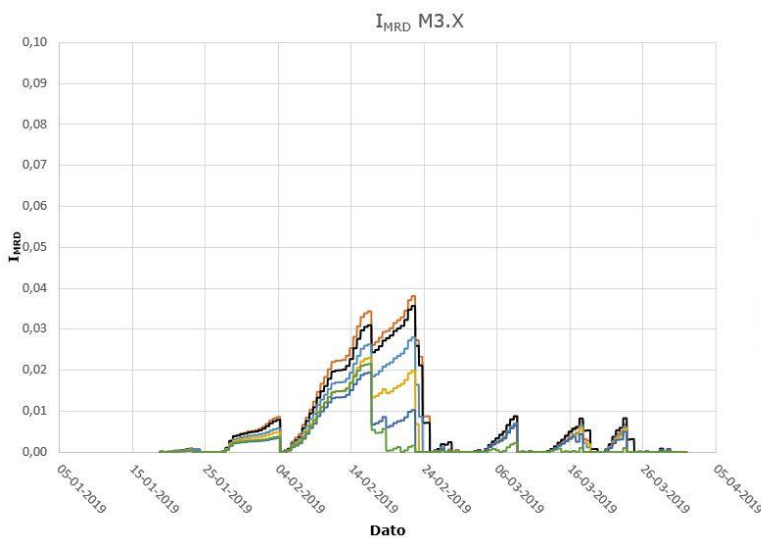
Figur 72: Beregnet I_{MRD} for tagrum M1.1, som er det tagrum med størst MRD-Indeks tal. Det er tydeligt at væksten er i gang allerede omkring d. 04.02.2019 og frem mod d. 24.02.2019, men da den relative luftfugtighed begynder at falder omkring d. 22.02.2019 reduceres væksten og når ikke tilstrækkelige vækstbetingelser igen i måleperioden. Øvrige tagrum findes i Bilag 10.



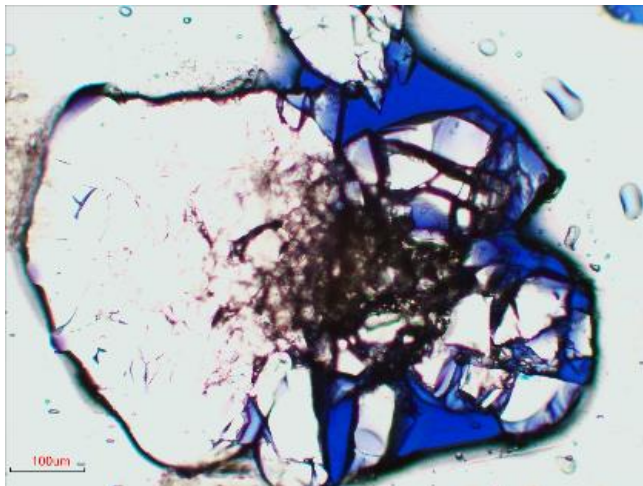
Figur 73: Resultat af I_{MRD} beregning ud fra de faktiske målinger. Det er bemærkelsesværdigt at M1.1 ligger markant højere end de øvrige. Dog er skalaen så lav, at det ikke vurderes at have en signifikant betydning.



Figur 74: Resultat af I_{MRD} beregning ud fra de faktiske målinger. M2.X viser generelt et lavere niveau end øvrige sektioner. Skalaen er dog så lav, at det ikke vurderes at have en signifikant betydning.



Figur 75: Resultat af I_{MRD} beregning ud fra de faktiske målinger. M3.X viser generelt et lidt højere niveau end øvrige sektioner på nær M1.1. Skalaen er dog så lav, at det ikke vurderes at have en signifikant betydning.

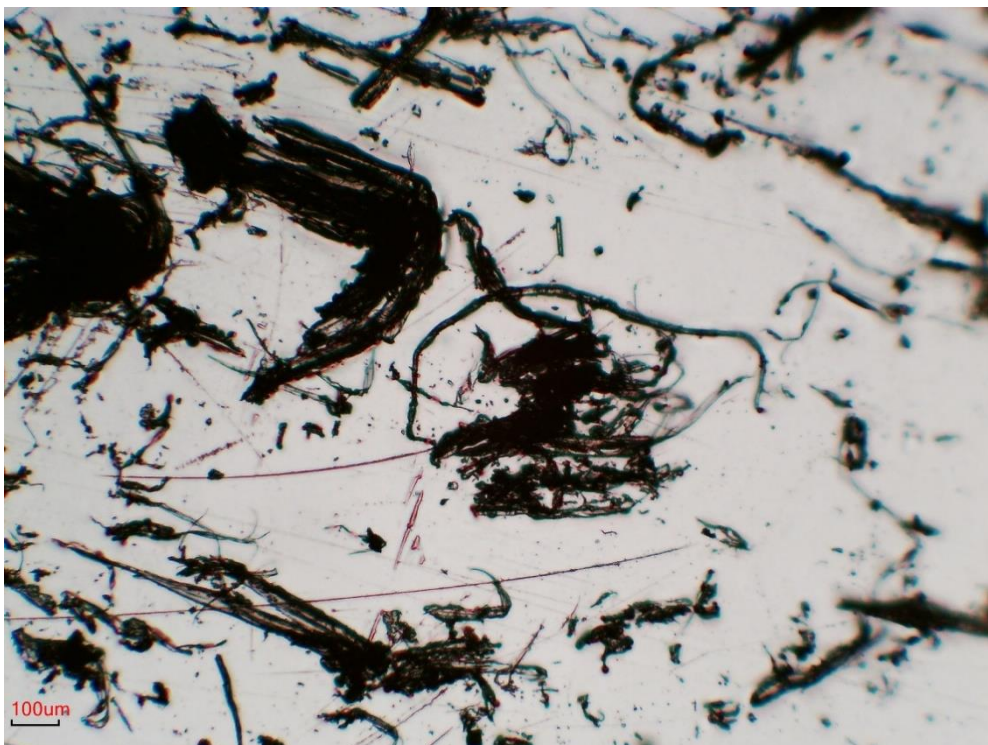


Figur 76: M2.3 efter forsøgsperioden. Der er her dannet krystaller. Det er uklart, hvilken type krystaller der er tale om.

Den eksakte type eller familie af svamp er ikke undersøgt i nærværende master, da væksten endnu ikke er udvokset til et stadie hvor dette kan verificeres entydigt.

Nedenfor er indsat et par sammenlignende billeder fra et par af tagrummene, men de øvrige billeder ligger i Bilag 06, i stor størrelse.

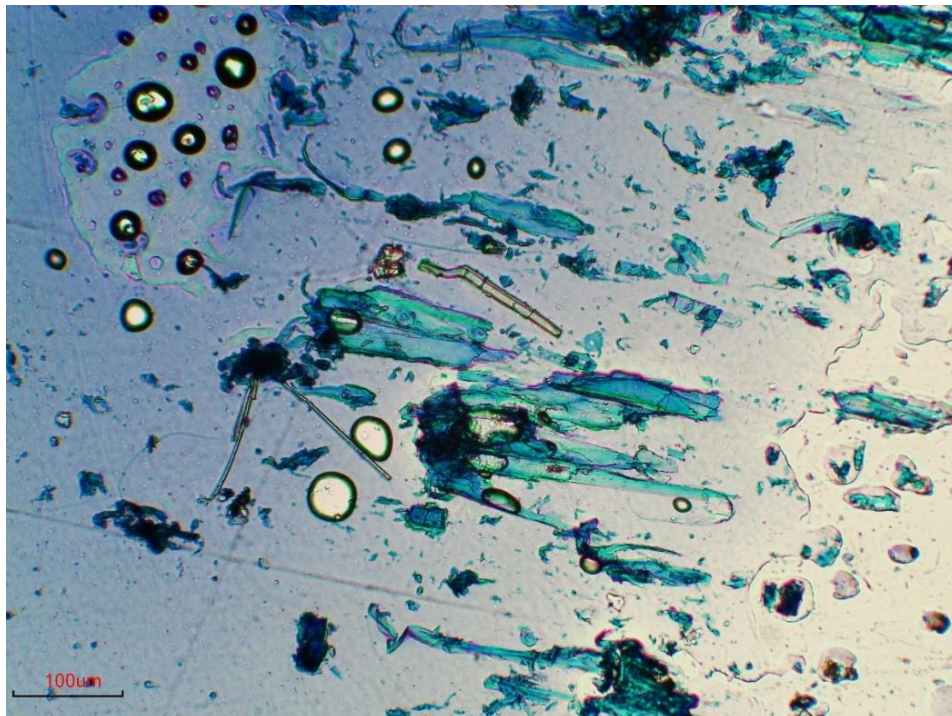
Ud over skimmelvækst blev der fundet krystaller i tagrum M2.3, hvilket dog ikke er skimmelsvampe relateret. Det er muligvis en form for saltkrystaller, men dette er dog kun et forsigtigt gæt og ikke undersøgt nærmere i nærværende rapport.



Figur 77: M2.4 før forsøgsperioden (x40) viser ej heller ingen tegn på skimmelsvampe vækst. Prøve taget d. 18.01.2019



Figur 78: M2.4 Efter forsøgsperioden. (x200). Den blå cirkel angiver skimmelsvampe strukturer. Disse er dog stadig for små til at tyde den præcise type eller svampefamilie. Prøve taget d. 24.04.2019.



Figur 79: M3.5 (x100) viser heller ingen tegn på skimmelsvampevækst. Prøve taget d. 18.01.2019.

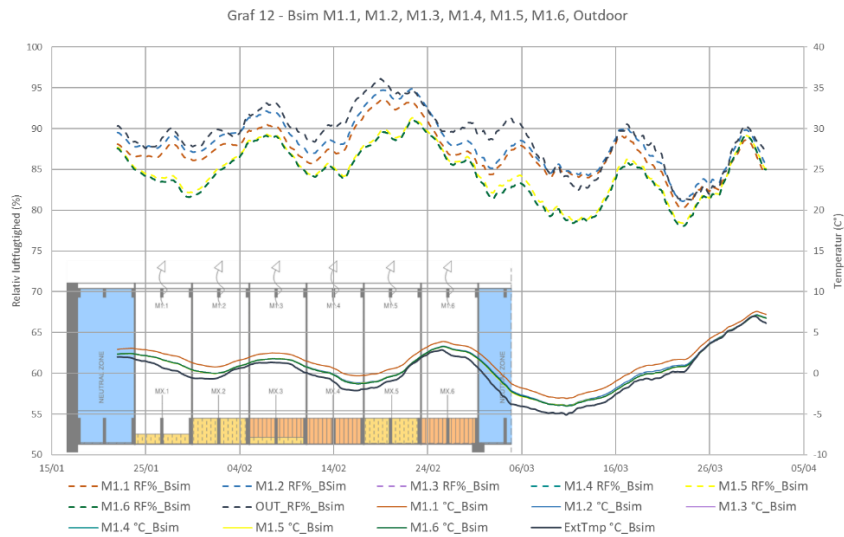


Figur 80: M3.5 efter forsøgsperioden. (x200). Den røde cirkel viser tydeligt skimmelsvampe strukturer. Disse er umiddelbart ikke samme familie som i M2.4, men der er flere strukturer at se. Prøve taget d. 24.04.2019.

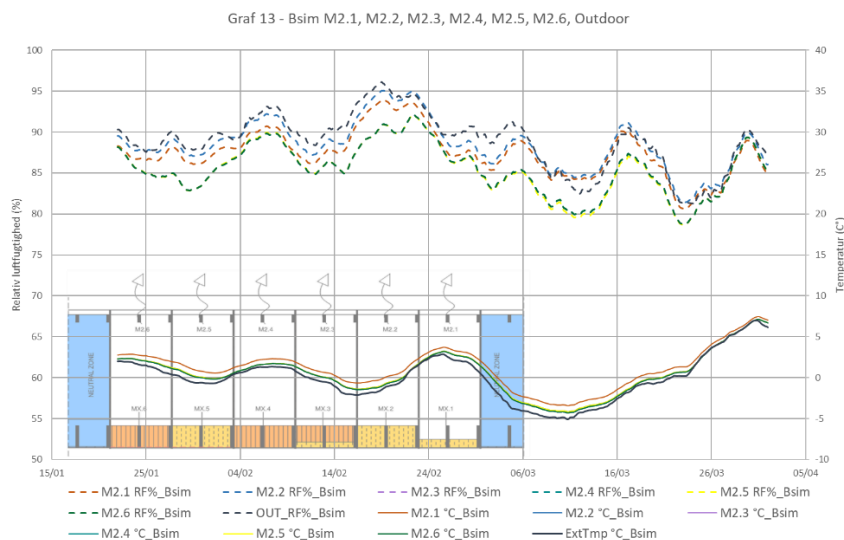
5.4 TEMPERATUR OG FUGT SIMULERINGER

I nærværende afsnit er et uddrag alle udførte målinger og simuleringer vist. Grafer findes i A4 format i Bilag 01.

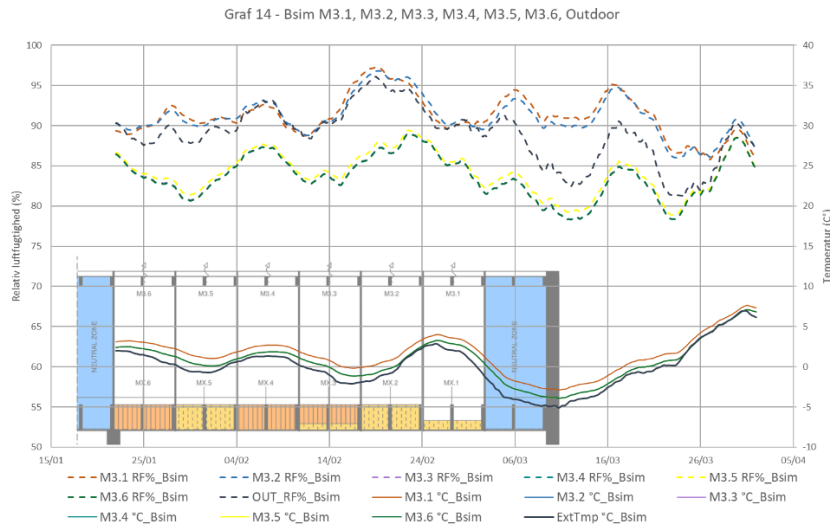
M1, M2 og M3 sektionerne er inddelt i tagrum, som tidligere beskrevet: tagrum uden dampspærre: MX.1 med 150 mm mineraluld, MX.2 med 400 mineraluld, MX.3 med 100 mm mineraluld og 300 mm cellulose. Med dampspærre: MX.5 med 400 mm mineraluld, MX.6 med 400 mm cellulose.



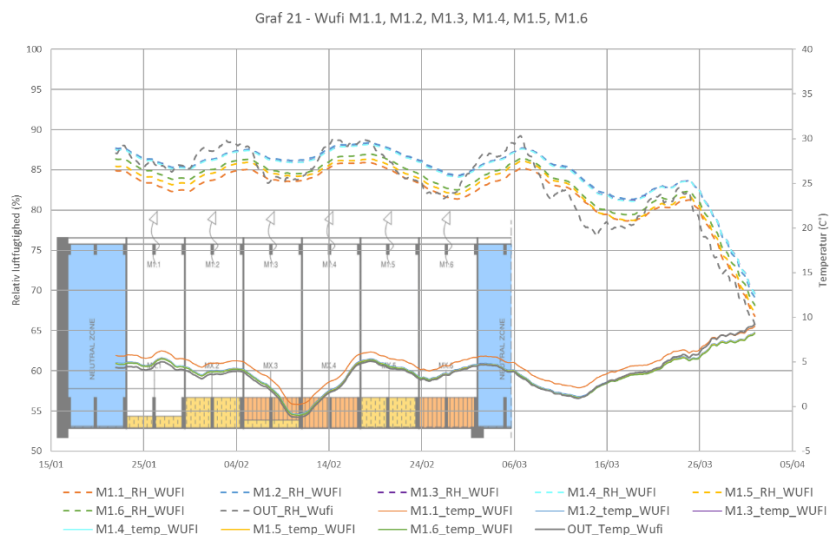
Figur 81: Graf 12 angiver BSim simulering som middelværdier for RF og temperatur i tagrummene over sektion M1 med ca. 29% reduceret ventilation. Som ventet har M1.1 den højeste temperatur, men ikke den laveste RF. M1.2 har den højeste RF efterfulgt af M1.1. Uventet har M1.3 og M1.4 uden dampspærre, den samme RF som de 2 tagrum med dampspærre.



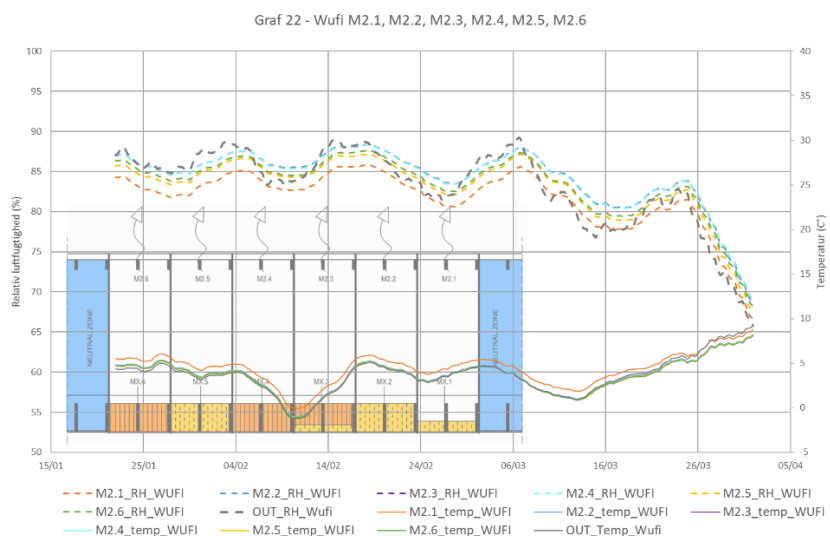
Figur 82: Graf 13 angiver BSim simulering som middelværdier for RF og temperatur i tagrummene over sektion M2 med anbefalet ventilation. Som ventet har M2.1 den højeste temperatur, men ikke den laveste RF. M2.2 har den højeste RF efterfulgt af M2.1. Uventet har M2.3 og M2.4 uden dampspærre, den samme RF som de 2 tagrum med dampspærre



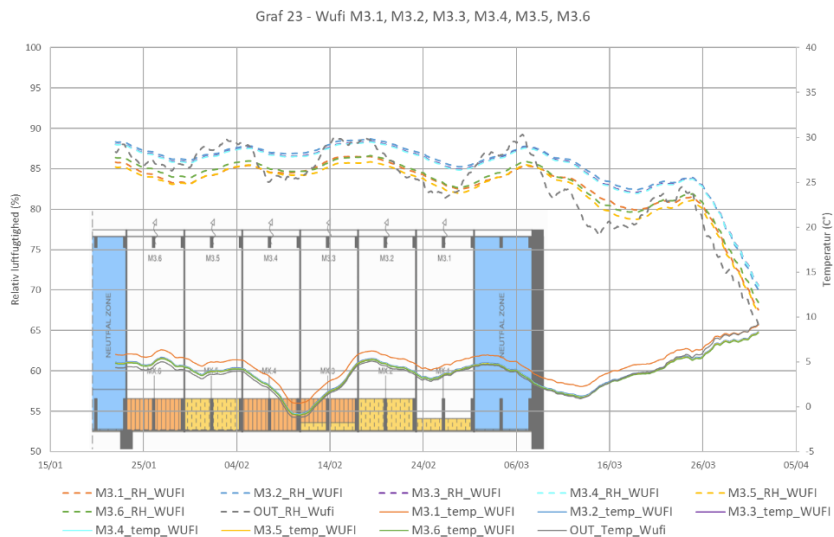
Figur 83: Graf 14 angiver BSim simulering som middelværdier for RF og temperatur i tagrummene over sektion M3 med 67,5% reduceret ventilation. Som ventet har M3.1 den højeste temperatur, men mod forventning også den højeste RF. Uventet har M3.3 og M3.4 uden dampspærre, den samme RF som M3.6 med dampspærre, der ligger lavere end M3.5, der også er med dampspærre. Ligesledes, lader der til at ske en ophobning af fugt i M3.1 og M3.2 i forhold til den udvendige RF.



Figur 84: Graf 21 viser WUFI-simuleringen som middelværdier for RF og temperatur i tagrummene over sektion M1 med ca. 35% reduceret ventilation. M1.1 med mindst isolering har den laveste RF og højeste temperatur, som forventet. M1.2 og M1.3 uden dampspærre har den højeste RF som ventet. Der sker en opfugtning og udtørring i perioden.



Figur 85 Graf 22 viser WUFI-simuleringen som middelværdier for RF og temperatur over sektion M2 med anbefalet ventilation. M2.1 med mindst isolering har den laveste RF og højeste temperatur, som forventet. M2.2 og M1.3 uden dampspærre har den højeste RF som ventet. Der sker en opfugtning og udtørring i perioden.



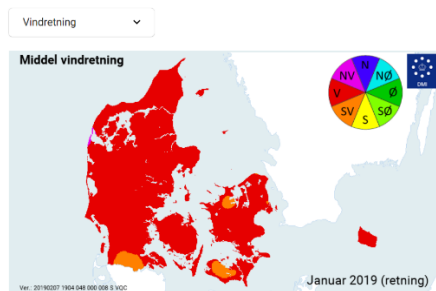
Figur 86: Graf 23 viser WUFI-simuleringen som middelværdier for RF og temperatur i tagrummene over sektion M3 med ca. 51% reduceret ventilation. M3.1 med mindst isolering har den laveste RF og højeste temperatur, som forventet. M3.2 og M3.3 uden dampspærre har den højeste RF som ventet. Der sker en opfugtning og udtørring i perioden.

6 DISKUSSION

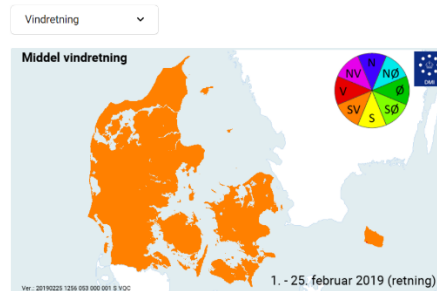
6.1 TESTHUSET – FYSISKE ÆNDRINGER OG PFT-TEST.

Forsøg med ventileret tagrum er afhængige af om testforholdene rent faktisk fungerer efter hensigten. I forsøgshuset blokerede vi ventilationsspalter og studser med ca. 1/3 og 2/3 i henholdsvis M1.2/M1.5 og M3.2/M3.5. I M2.2/M2.5 lod vi ventilationsspalterne og studserne stå uberørte, således at disse følger tidligere udførte målinger¹⁸ og arealet af ventilationsspalter passer til vejledningernes krav. Men for at vurdere om disse tiltag rent faktisk fungerede efter hensigten udførte vi en passiv sporgas test, efter PFT-metoden, hvilket er nærmere beskrevet i afsnit 4.1.3 (SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser, 1992).

Resultaterne viser tydeligt at der er forskel i koncentrationen af sporgas i forhold til M1/M1.X, M2/M2.X og M3/M3.X, uanset om vi ser på tagrum med eller uden dampspærre. I tagrummene er koncentrationen på den sydligt placerede sampler gennemsnitligt en anelse lavere end den nordligt placerede sampler, hvilket antyder at ventilationsraten har været større i den sydlige retning. Dette stemmer nogenlunde med vindretningen, som i perioden har været hovedsageligt i sydvest og vest. Det kunne muligvis også skyldes solpåvirkning.



Figur 87: Gms. vindretning i januar 2019



Figur 88: Gms. vindretning i februar 2019



Figur 89: Daglige vindretninger jf. DMI.dk's vejrarkiv fra 18 januar til 11 februar 2019

Sammenlignes tagrum over M1 og M3 med M2, ses at koncentrationen stiger i takt med at ventilationsarealet blokeres. Således er den gennemsnitlige koncentration i tagrum over M2 139,5 pl, over M1 er den 199,0 pl og over M3 er den 303,1 pl, jf. Figur 59.

Dette tyder på at det er lykkedes os at blokere ventilationsarealet i nogen udstrækning, selvom det kun næsten svarer til de ønskede 33% og 66%. Ved beregning ud fra de gennemsnitlige værdier ses, at vi opnår en reduktion på ca. 35,1% i M1.2/M1.5 og ca. 51,5% i M3.2/M3.5, jf. Tabel 10, hvilket vurderes at være acceptabelt i forhold til at undersøge ventilationens betydning.

Koncentrationen af sporgas fra den røde kilde (PMCH) er synlig i alle tagrum, men generelt i større grad i de tagrum, hvor der ikke er dampspærre i etageadskillelsen. Samtidigt ses også at koncentrationen er større i tagrum over M3. Dette skyldes formodentlig at det mindre luftskifte i det lavt ventilerede

¹⁸ Jf. Projekt Dalo (se afsnit 3.3) som er ventileret efter gældende anvisninger

tagrum har større betydning, og derfor bortventilerer mindre rød sporgas end de to andre grupper tagrum. Dette kan betyde, at vi vil se målinger med større fugtbelastning af tagrum over M3, hvilket svarer til vores forventning. I etageadskillelser med dampspærre stiger koncentrationen ligeledes fra M2.5 til M1.5 og til M3.5. Konstruktionen uden dampspærre ikke viser samme tendens. Dette kan skyldes en utæthed imellem M2.2 og M2, hvor koncentrationen er noget større end i M1.2. (Figur 62)

Ser vi på M1, M2 og M3 i stueplan, så giver de to sporgas kilder en stor koncentration af rød sporgas. Teoretisk burde koncentrationerne være nogenlunde ens i alle tre scenarier. M1 og M2 er sammenhængende og til trods for en lukket dør, og at M2 har en anelse større volumen, kunne man formode at disse ville være i ligevægt, hvilket de ikke er.

Forskellen kan måske forklares ved M1 har en dør til det fri, som åbnes når både M1 og M2 skal tilgås. Døren til M3, som har den højeste koncentration, åbnes kun når træfugt målere skal aflæses, hver 7. til 14. dag, og/eller der skal fyldes vand på befugteren. Testhuset har været adskilt og er flyttet fra Hørsholm og samlet igen, hvilket også kan resultere i utilsigtede utætheder. Infiltrationen fra tagrum og ned til stueetagen er nogenlunde ens i alle tre stuerum.

Luftskiftet i M1, M2 og M3 er tilfredsstillende. I M1 er det lidt højere, hvilket antages at skyldes infiltration gennem hoveddør. Størrelsen på luftskiftet er ikke vigtigt i testhuset, da stueetagens primære formål er at opretholde fugtforholdene.

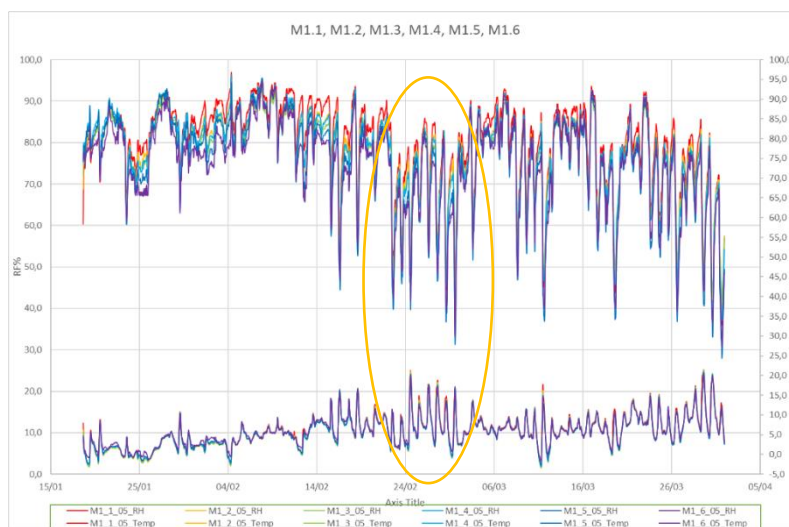
Vi observerede ved målingens afslutning at 3 af vores samplere, se Tabel 8, var faldet ned i måleperioden. Sammenholdes disse tre samplere med øvrige samplere fra samme rum ser det dog ud til at udfaldet ikke har haft større indflydelse på målingen, idet de tre samplere viser nogenlunde samme koncentration som de øvrige samplere i sektionen. Det kan ej heller eftervises hvornår samplerene faldt ned – koncentrationen kunne tyde på at de har hængt der størstedelen af måleperioden.

6.2 TAGRUMMETS OPBYGNING

6.2.1 Luftsiftets betydning for de hygrotermiske forhold.

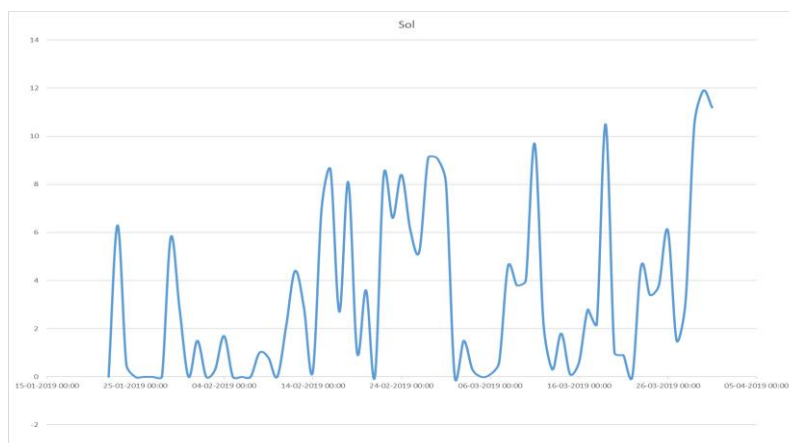
M1.X, M2.X og M3.X

Luftsiftet i M2.X er svarende til anbefalingen (Brandt, Bunch-Nielsen, & Morelli, SBI 273 - Tage, 2019, s. tabel 7), hvorimod M1.X er reduceret med ca. 35% og M3.X er reduceret med ca. 51%, baseret på vores gennemsnitlige PFT-målinger. Ser vi på (Figur 94 til Figur 98), der sammenligner temperatur og relativ luftfugtighed i tagrummene, viser de i de fleste tagrum at reduktionen af luftsiftet giver den forventede effekt – at den relative luftfugtighed er højere i de tagrum med mindre luftsifte end i de tagrum med et luftsifte der svarer til kravene. Dette er dog ikke lige udpræget i alle 6 tagrum.

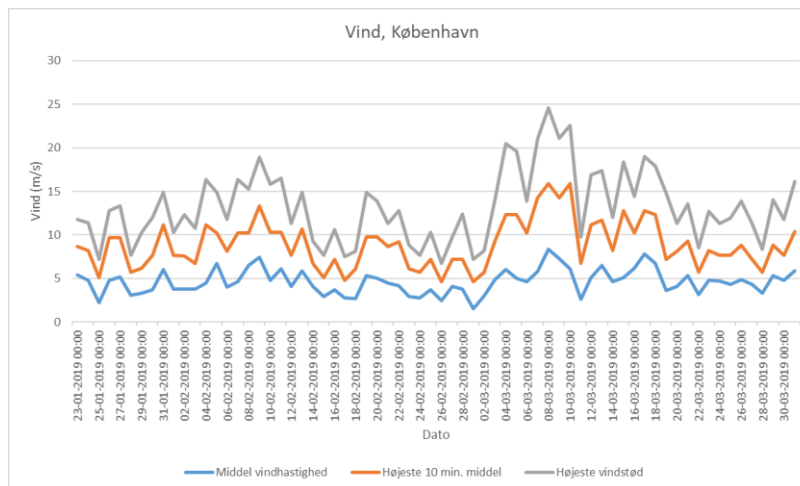


Figur 90: Samtlige tagrum i alle sektioner har store svingninger i både temperatur og relativ luftfugtighed. Dette betyder at det kan være svært at aflæse og vi har derfor præsenteret vores resultater i form af gennemsnitskurver på uge basis, så sammenligning er nemmere. Tendenser som den faldende RF kan dog forklares ud fra de store dyk, hvilket skyldes solindstråling – som resulterer i høje temperatur peaks og store dyk i relativ luftfugtighed – se gul markering

Samtidigt viser gennemsnitsgraferne samlet set en markant faldende relativ luftfugtighed hen mod d. 26.02.2019 hvor kurven begynder at stige igen. Ud fra gennemsnitskurverne ses at temperaturen er nogen lunde konstant i denne periode, hvorfor vi må se på den faktiske kurve. Årsagen til den faldende RF er solindstråling som giver korte, men høje stigninger i temperatur, hvilket giver markante fald i RF, som samlet set sænker den gennemsnitlige RF i tagrummene. (Se Figur 90 og Figur 91)

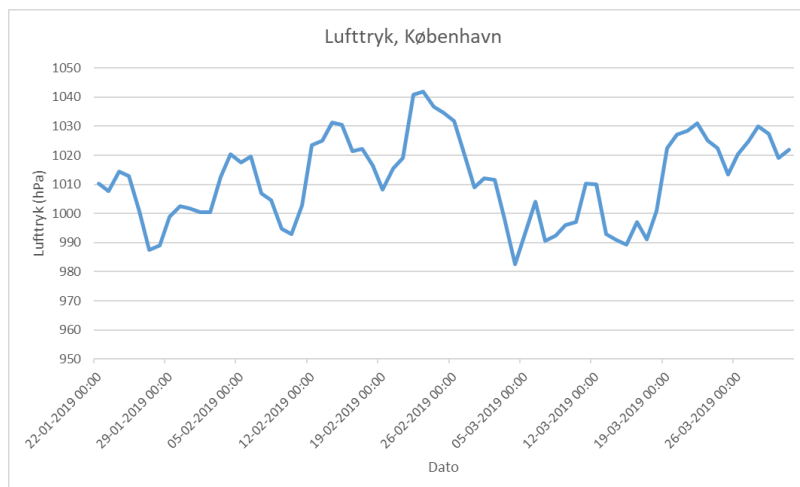


Figur 91: Solindstrålingen, målt i soltimer, for perioden jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019). Det er tydeligt at i perioder med et højt antal soltimer er sammenfaldende med lavere relativ luftfugtighed i tagrummet. Se Figur 90



Figur 92: Vindens døgnmiddel hastighed, samt højeste 10 middel og vindstød i m/s jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019). Umiddelbart er gennemsnitsvind og vindstød ikke direkte betydende for luftskiftet, hvilket skyldes at vindretningen også har en indflydelse på effekten.

Vindretningen har, umiddelbart, en større indflydelse på ventileringen af tagrummene end vindens hastighed i sig selv. På Figur 92 herover, ses at middel hastigheden i snit ligger omkring de 4 m/s +/- 1-2 m/s og kun ved enkelte lejligheder overstiger dette. Vindhastigheden ser dog ikke ud til at have en direkte sammenhæng med tagrummenes fugtniveauer, hvilket formodentlig skyldes at vindretningen er en vigtig faktor for luftskiftet.



Figur 93: Lufttryk over København i måleperioden, jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019). Der er ikke en direkte sammenhæng mellem lufttrykket og de hygrotermiske forhold i tagrummene, andet end at nogen højtryk er sammenfaldende med de perioder hvor der er flest soltimer, jf. Figur 91. Det er dog ikke alle højtryk og soltimer der er sammenfaldende.

Lufttrykket viser ikke direkte sammenfald med kurverne for tagrummene. Der er i nogen grad sammenfald med højtryk og nogen soltimer, men det er ikke konsekvent og der må antages at være flere faktorer i spil her, så som skydække, hvilket DMI's vejrarkiv desværre ikke oplyser noget om.

Stråling til verdensrummet er også afhængigt af skydækket og kan derfor ikke vurderes direkte i sammenhæng med Figur 90, men de lave temperaturer i nattetimerne viser dog i sig selv at der i nogen nætter har været en større udstråling og derfor formodentlig var skyfrit. Omvendt har nogen døgn og nætter højere temperatur, hvilket tyder på at himlen har været overskyet.

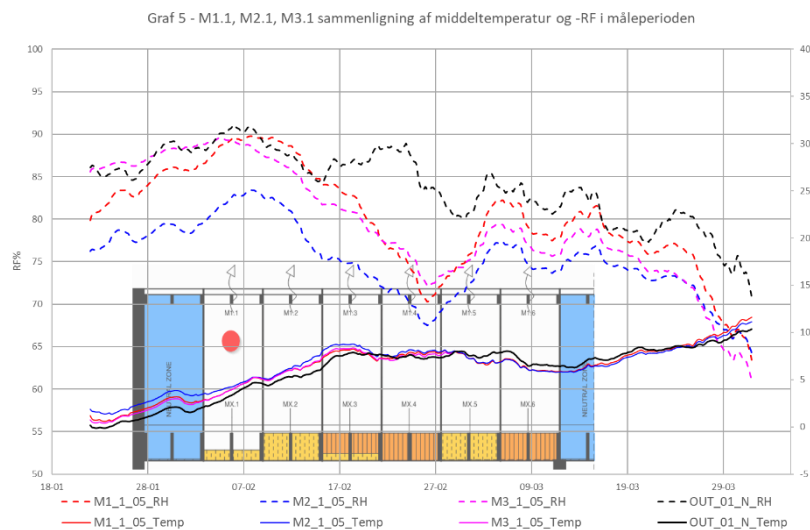
MX.1: 150 mm mineraluld uden dampspærre

I M1.1, M2.1 og M3.1, som vist på Figur 94, ligger RF i M2.1 meget lavere i januar og februar måned, svarende til 5-8 %, hvor M2.1 i marts kun ligger med en lille forskel på 2-3% point under M1.1, hvilket formodentlig skyldes solstrålingen, se Figur 91.

Sidst i marts bliver luftfugtigheden lavere i M1.1 og M3.1 end i M2.1, hvilket højst sandsynligt skyldes luftskiftet er større i M2.1 og dermed er temperaturen en anelse lavere.

Befugteren i M3 sikrer at rummet har en stabil relativ luftfugtighed på ca. 53% med en dagsvariation på omkring +/-2%. Befugtningen i M2 og M1 har udfaldet tre gange i løbet af slut februar og starten af marts. (Se Figur 66 og Figur 113.)

Disse udfald er ikke synlige på den relative luftfugtighed i tagrummene i hverken M1.1, M2.1 og M3.1. Samtidigt følger både temperatur og relativ luftfugtighed udeklimaets forhold, hvilket blot understreger at det er solindstrålingen samt udeklimaet der primært styrer de hygrotermiske forhold i tagrummene.

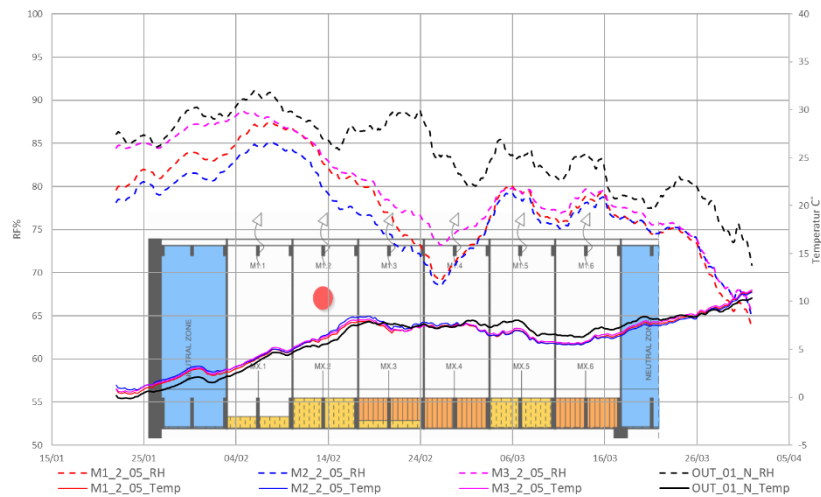


Figur 94: M2.1 ligger tydeligt med laveste relative fugt og i perioder med højeste temperatur af de tre tagrum. En anelse overraskende ligger M1.1 med en højere relativ fugt i dele af perioden, hvilket tyder på at luftskiftet i perioder ikke er tilstrækkeligt i M1.1

MX.2: 400 mm mineraluld uden dampspærre

RF i M2.2 ligger lavere i den første del af måleperioden, hvor M1.2 ligger i midten og M3.2 ligger med den højeste relative luftfugtighed af de tre tagrum. I den sidste del ligger M2.2 umiddelbart også lavest men alle tre tagrum ligger meget samlet, hvilket formodentlig skyldes solindstrålingen og antal soltimer stiger i denne periode. I hele perioden ligger M3.2 øverst, selvom spredningen i starten er omkring 7-8% og mellem 2% og næsten ingenting i slutningen. Kurverne følger i alle tre tilfælde udeklimaets kurve, på nær den midterste periode, hvor RF dykker - hvilket antyder at det er udeklimaet samt solindstrålingen der er betydende i disse tagrum også. Dette gælder også temperaturmæssigt. (Se Figur 95)

Graf 6 - M1.2, M2.2, M3.2 sammenligning af middeltemperatur og -RF i måleperioden

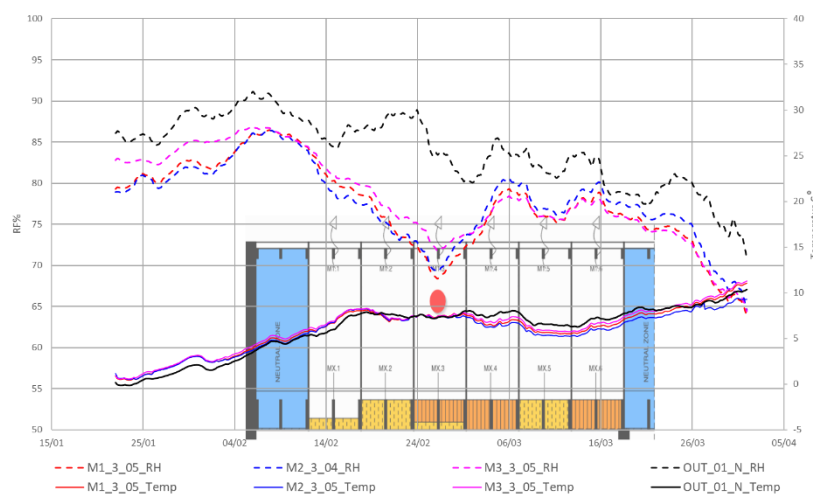


Figur 95: M2.2 ligger med lavest relativ fugt i den første halvdel af måleperioden, men idet den anden halvdel følges den med M1.2. M3.2 ligger dog øverst med højest relativ fugt igennem hele perioden, med et max på ca. 88% og et minimum på ca. 74-75% omkring d. 25 februar.

MX.3: 100 mm Mineraluld+ 300 mm cellulose uden dampspærre

RF i M1.3, M2.3 og M3.3 (Figur 96) ligger igen spredt i den første del og samlet i den sidste del af måleperioden. Temperaturen ligger samlet inden for 2-3 grader og følges pænt ad i hele perioden med en generel stigende tendens, som følger årstiden. M3.3 ligger 7-8% højere i relativ luftfugtighed i den første periode, hvilket følger tesen omkring at et lavere luftskifte kan medføre højere fugtniveau. Solindstrålingen opvarmer dog derefter tagrummet og presser den relative fugtighed ned i den midterste periode, hvilket følger tendensen i de øvrige tagrum, og giver en mindre spredning. Luftskiftets betydning er dog stadig synlig. Derefter begynder M2.3 at ligge over M1.3 og M3.3, som følge af den lavere temperatur. Dette tyder på at luftskiftets betydning skal ses i sammenhæng med udeklima og solindstråling.

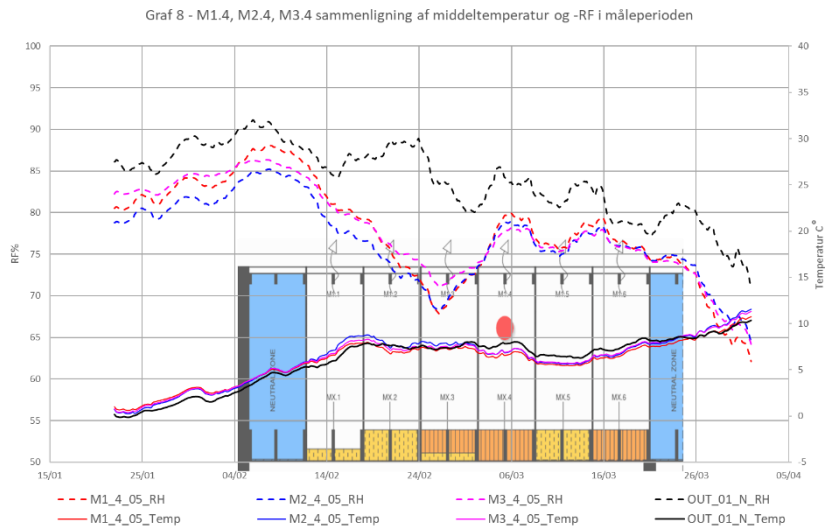
Graf 7 - M1.3, M2.3, M3.3 sammenligning af middeltemperatur og -RF i måleperioden



Figur 96: Temperaturen ligger nogenlunde ens indenfor +/- 1-2 grader. Fugt mæssigt ligger M2.3 med laveste relative fugt i den første halvdel af måleperioden, hvor efter M1.3 overhaler og ligger med mindst relativ fugt indtil ca. d. 5 marts, hvorefter M1.3 og M3.3 ligger ret ens i marts måned, hvor M2.3 har den højeste relative fugt.

MX.4: 400 mm cellulose uden dampspærre

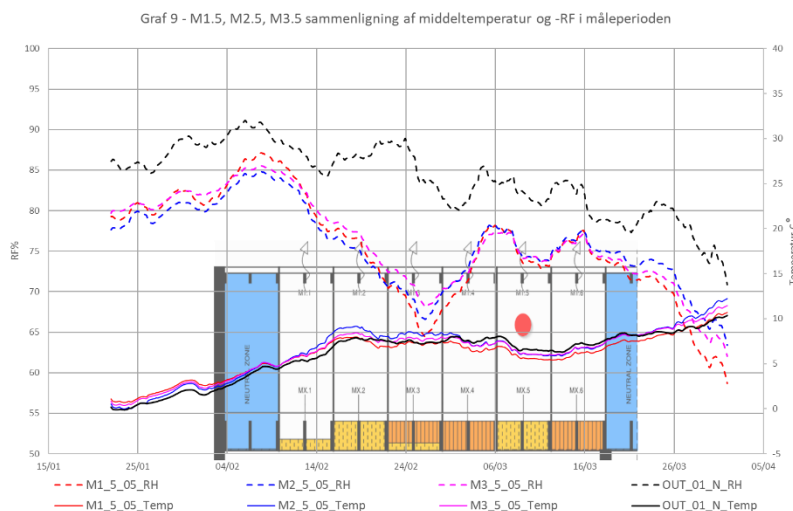
I M1.4, M2.4 og M3.4 (Figur 97) ligger den relative luftfugtighed forholdsvis samlet i perioden, men i starten er der en spredning på 3-4% point fra M2.4 som har det laveste fugt niveau med 78-79% RF og til M3.4 som har det højeste med omkring 83% RF. Tagrummene følger udeklimaet, dog med samme lave relative fugtniveau i den midterste periode som følge af solindstrålingen. Temperaturene ligger samlet inden for 1-2 grader i hele perioden. Luftsiftet har umiddelbart størst betydning i den første del af måleperioden, hvor solindstrålingen er lavere.



Figur 97: Temperaturen ligger inden for +/- 1-2 grader af udendørstemperaturen. Den relative fugt er lavest i M2.4 i den første halvdel af måleperioden, hvorimod de tre tagrum ligger meget tæt i den sidste del af måleperioden.

MX.5: 400 mm Mineraluld med dampspærre

Temperaturmæssigt (Figur 98) ligger tagrummene tæt på hinanden, inden for 2-3 grader, men med en anelse mere spredning end i MX.2. Den relative luftfugtighed ligger her mere samlet med en spredning på 2-4% point og følger udsving i udeklimaet.



Figur 98: Temperaturen ligger inden for +/- 2-3 grader af udendørstemperaturen. Fugtmæssigt følger M1.5, M2.5 og M3.5 meget hinanden, dog med en anelse lavere relativ fugt i M2.5 i den første halvdel af måleperioden, hvorefter M1.5 ligger lavest omkring d. 25 februar hvor M3.5 ligger øverst. I den våde marts følges alle tre tagrum indtil den sidste 1-2 uger hvor M2.5 ligger med højeste relative fugtighed – dog under 75% RF.

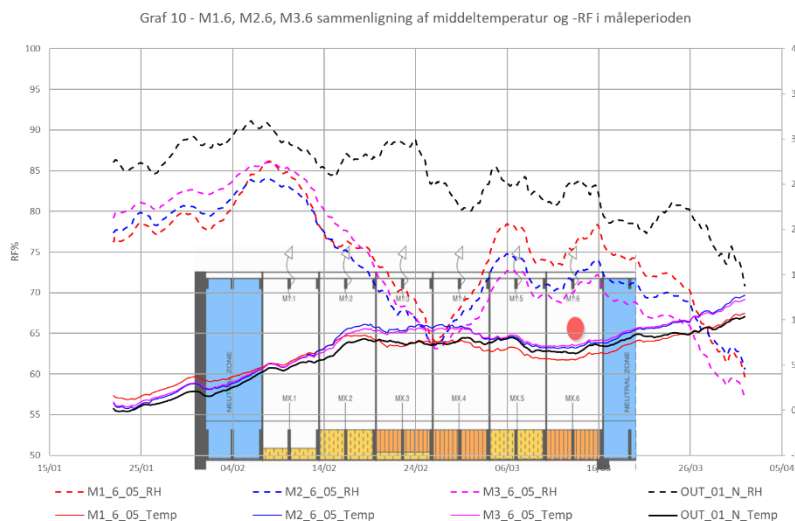
I den første del ligger M2.5 med den laveste fugtniveau, men som følge af solindstrålingen og den faldende relative luftfugtighed skifter M2.5 og M1.5 plads, mens M3.5 stadig ligger med den højeste luftfugtighed. Temperaturen i

M1.5 er et par grader lavere end M2.5 og samtidigt er den relative fugt også lavere, hvilket tyder på at fugtniveauet i M1.5 er markant lavere i den midterste periode. Dette kunne skyldes at dampspærren generelt reducerer fugttilskuddet fra stueplan, hvorved kurvene ligger tættere på M2.5 som har det største luftskifte. I den sidste periode ligger M2.5 over M1.5 og M3.5 hvilket formodentlig skyldes at luftskiftet i M2.5 er større og at tagrummet følger udeklimaet i større grad end de mindre ventilerede tagrum.

MX.6: 400 mm Cellulose med dampspærre

M1.6 ligger lidt atypisk med et lavere fugtniveau, og en højere temperatur, i starten af måleperioden, men M3.6 ligger med det højeste fugtniveau. Efter perioden i midten vender billedet fra ca. d. 26 februar, så M3.6 har det laveste fugtniveau og den højeste temperatur ift. M1.6. Sammenlignes M3.6 med M2.6 ligger temperaturen nogenlunde ens i hele perioden. Her ses at luftskiftet holder M2.6's relative luftfugtighed lavere før ca. d. 22 februar, hvorefter M3.6 faktisk ligger med en 3-4 % point lavere RF. Dermed følger M1.6 ikke tendensen fra de øvrige tagrum (Figur 99)

Alle tre tagrum følger udeklimaets temperatur og relative luftfugtighed, dog med en smule forsinkelse. Perioden fra d. 14 februar og til d. 26 februar følger solindstrålingen rimelig tæt.



Delkonklusion

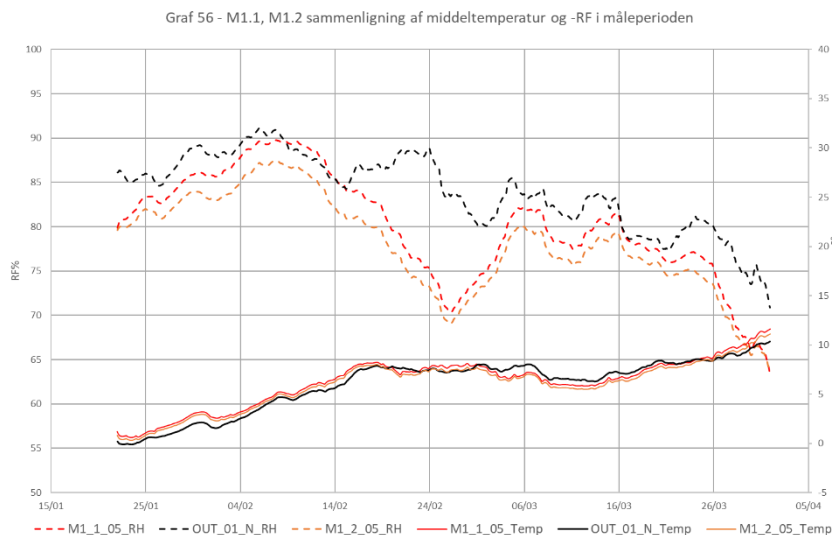
Samlet set giver et reduceret luftskifte en højere relativ luftfugtighed end under godt ventilerede forhold. Tagrummet bliver ventileret med udeluft, hvilket kan medføre at fugt fra udeklimaet introduceres i tagrummet. Dog har især solindstråling en stor indflydelse på både temperatur og relativ luftfugtighed i tagrummene. Et højt antal soltimer, hvilket samtidigt betyder ingen eller begrænset skydække, giver lavere luftfugtighed og højere temperatur.

6.2.2 Isoleringsmaterialets og dampspærrens betydning for de hygroteermiske forhold.

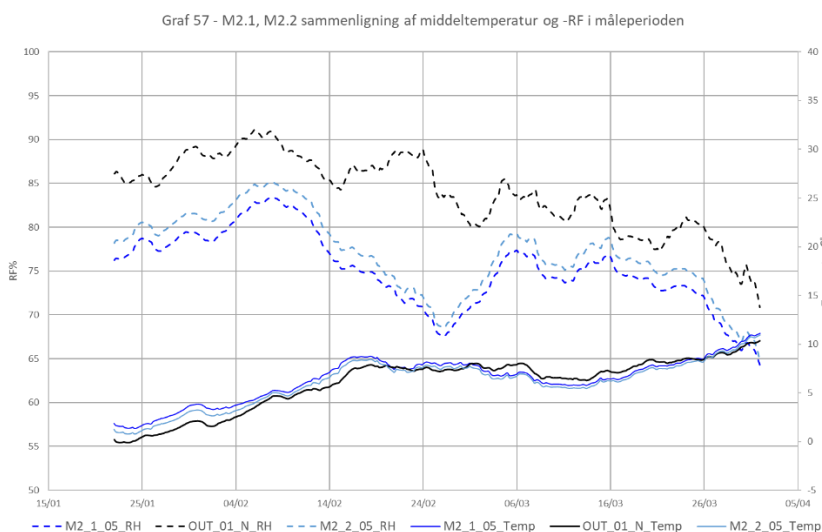
Betydning af isoleringstykkelsen i MX.1 sammenlignet med MX.2

Vi har med resultaterne i Figur 94 til Figur 99 påvist at der er forskellige RF i tagrummene afhængig af om de er placeret over sektion M1, M2 eller M3. Men ifølge Figur 63 til Figur 65, ses der kun små forskelle i RF og temperatur imellem de forskellige isoleringstyper og tykkelser samt med og uden dampspærre.

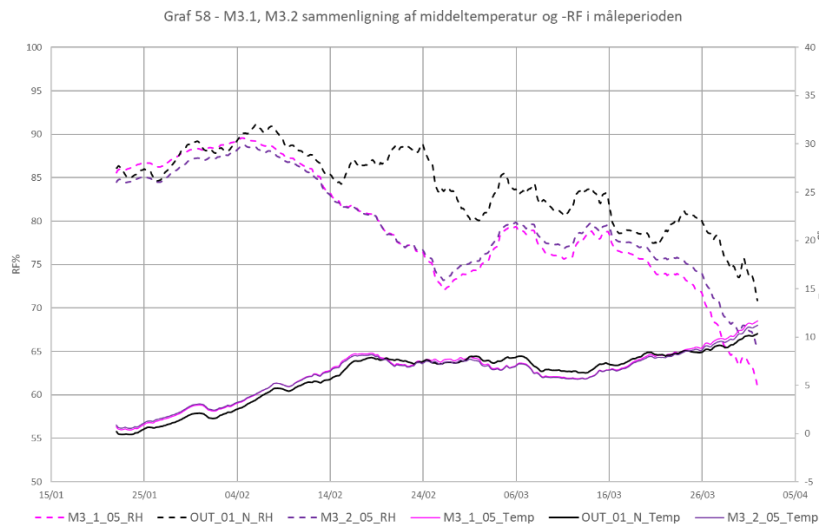
Sammenlignes konstruktionen MX.1 med MX.2, dvs. tagrum med mineraluld og uden dampspærre, hvor den eneste forskel er tykkelsen på hhv. 150 mm og 400 mm, hvor MX.1 erfaringsmæssigt og teoretisk burde have højere temperatur og lavere RF, ses der et blandet billede igen med meget små forskelle, hvor M2.1 (Figur 101) følger teorien, mens M1.1 (Figur 100) og M3.1 (Figur 102) ikke gør.



Figur 100. Graf 56 sammenligner tagrum i M1.1 med 150 mm mineraluld og uden dampspærre med tagrum i M1.2 med 400 mm mineraluld og uden dampspærre. Temperaturen i M1.1 er som ventet lidt højere end M1.2, grundet lavere u-værdi. Mod forventning er dog den højere RF i M1.1. I M1.X er ventilationsåbningerne reduceret med ca. 35%.



Figur 101: Graf 57: Sammenligner tagrum i M2.1 med 150 mm mineraluld og uden dampspærre med tagrum i M2.2 med 400 mm mineraluld og uden dampspærre. Temperaturen i M2.1 er som ventet lidt højere end M2.2. Som forventet er RF i M2.1 lavere. Ventilationsåbningerne er ikke reduceret her.



Figur 102: Graf 58 sammenligner tagrum i M3.1 med 150 mm mineraluld og uden dampspærre med tagrum i M3.2 med 400 mm mineraluld og uden dampspærre. Temperaturen i M3.1 og følger stort set hinanden igennem måleperioden, bortset fra enkelte uger, hvor M3.1 ligger højere. Det samme billede gør sig gældende for RF, hvor M3.1 i starten af måleperioden ligger højere og ca. midtvejs bliver lavere end M3.2. I M3.X er ventilationsåbningerne reduceret med ca. 51%.

Som det ses af Figur 101, er det ringe isolerede tagrum, M2.1 med 150 mm mineraluld, varmere og har en lavere RF end det velisolerede tagrum, M2.2 med 400 mm mineraluld. Den forventede sammenhæng mellem RF i velisolerede og ringe isolerede tagrum, hvor ventilationsforholdene er udført efter forskrifterne, stemmer dermed fint.

Den højere RF i M1.1. og M3.1. kan sandsynligvis forklares med de reducerede ventilationsåbninger, idet dette er eneste parameter, der aktivt er ændret. Selvom fugttilskuddet fra "boligen" i M1 og M2 jf. Figur 113 har varieret, har det ingen betydning for sammenligningen imellem de enkelte tagrum over M1 og M2, da de har været udsat for samme fugttilskud i perioden. Det er overraskende at 150 mm isolering i M.1.1 har en højere RF i tagrummet end M1.2 med 400 mm isolering på trods af en højere temperatur. I teorien burde den bedre isolerede loftskonstruktion give et lavere varmetab til tagrummet og dermed højere RF.

Ligeledes overrasker det at M3.1. og M3.2. stort set har ens temperatur og RF i perioden. Forskellen ville forventeligt have været mere tydelig her, da luftskiftet er mindre i M3.1 og M3.2 end i M2.1 og M2.2. Fugtniveauet er i M3.1 8-9%-point højere end i M2.1 og i M3.2 7-8%-point højere end i M2.2, i den første del af måleperioden, hvor der umiddelbart er mindre direkte solindstråling og mere skyet, og hvor luftskiftet har størst betydning. Umiddelbart stiger temperaturen hurtigere i MX.1 end i MX.2 i perioder med meget sol, hvilket kan være grunden til at kurverne udligner sig i slutningen af måleperioden. Derudover er skorstenseffekten sandsynligvis også reduceret da åbningsarealerne er mindre.

Det er muligt at der er en utæthed i MX.1, som vi ikke er bekendt med da, vi ikke har udført PFT-målinger her. Det er også muligt at årsagen skal findes i den reducerede ventilation. Fugttransporten i MX.1 og MX.2 styres af både diffusion og konvektion igennem mineralulden. Ventilationen tillader luftstrømning (turbulens) henover mineralulden, som skaber øget konvektion i de

øverste lag af mineralulden, der sikrer bortventilering af overskudsfugt. I M1.X og M3.X er overfladeturbulensen potentielt reduceret, hvilket kan være årsagen til der ses højere RF i disse rum.

Ved sammenligningen kan det konstateres, der er meget begrænset forskel på om der anvendes 150 mm eller 400 mm isolering uden dampspærre – forskellen ses primært som følge af den ændrede ventilationsrate.

Usikkerhederne ved RF måleinstrumenterne angivet i afsnit 4.1.2 på +/- 2,5% taget i betragtning er forskellene potentielt endnu mindre. I M1.1/2 og M2.1/2 er RF forskellen mellem 150 og 400 mm mineraluld i gennemsnit ca. 2,4%-point, mens den er ca. 0,9%-point i M3.1/2. Der er altså formentlig ikke tale om en signifikant forskel i de udførte målinger.

Det er muligt, at der ved længere tids måling, hvor tagrummene med de reducerede ventilationsforhold har været udsat for alle årstider og isoleringen har haft tid til blive mættet, vil kunne ses en større forskel på tagrum med 150 mm og 400 mm mineraluld uden dampspærre.

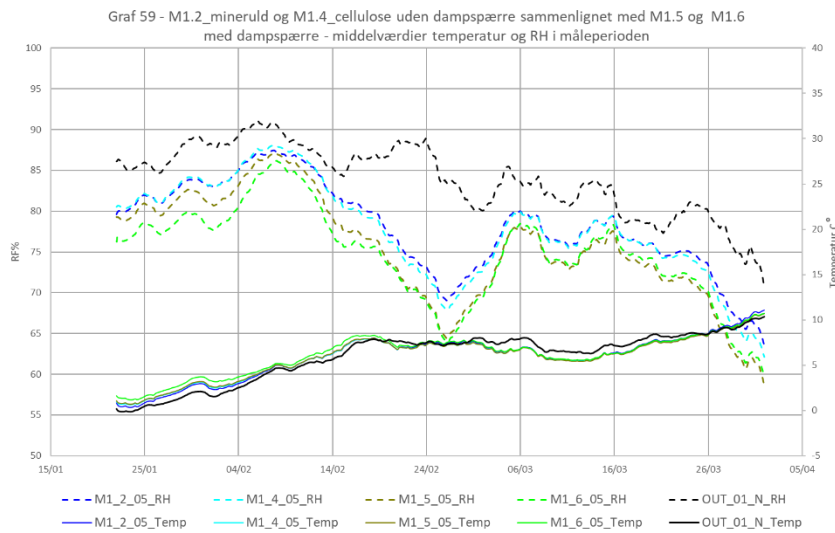
Delkonklusion

I tagrum uden dampspærre viser vores målinger at RF forskellen ved anvendelse af 150 og 400 mm mineraluld tilsyneladende i højere grad afhænger af ventilationen end af isoleringen.

Forskellene er så små at de ikke anses for signifikante.

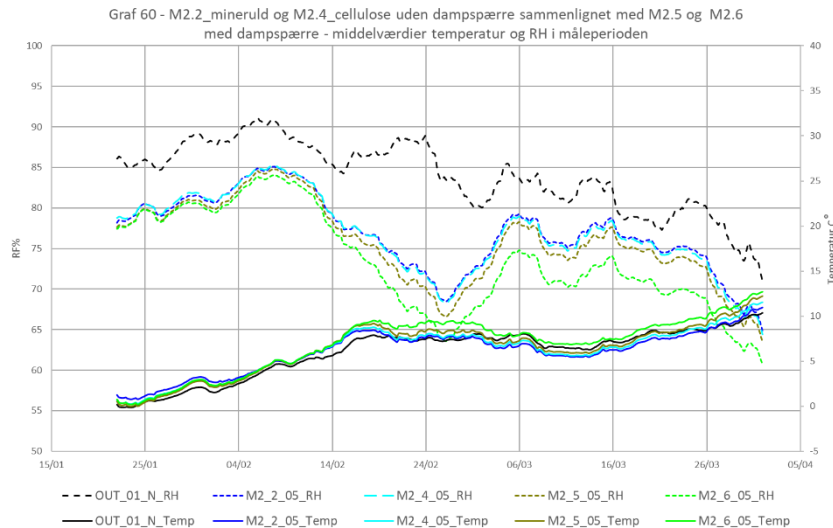
Vurdering af målinger i tagrum med og uden dampspærre

Ifølge celluloseproducenterne har cellulosen en fugtbuffereffekt. Vores resultater viser ikke den store forskel på RF og temperatur i tagrummene afhængig af isoleringstyper (Figur 63, Figur 64 og Figur 65)



Figur 103. Graf 59 viser sammenligningen mellem M1.2 med 400 mm mineraluld uden dampspærre og M1.5 med 400 mm mineraluld med dampspærre og sammenligningen mellem M1.4 med 400 mm cellulose uden dampspærre og M1.6 med 400 mm cellulose med dampspærre. I M1.X er der et 35% reduceret luftskifte i forhold til M2.X. De første ca. 20 dage er temperaturen højest i M1.6, men udlignes til at følge de øvrige tagrum i resten af måleperioden. Med varierende spredning ses det generelt at tagrum med dampspærre har lavere RF end dem uden.

I M1.X ses der ved sammenligning (Figur 103) en større forskel på tagrum med og uden dampspærre end der gør isoleringstyperne imellem. I begyndelsen af måleperioden ligger M1.6 med 400 mm cellulose og dampspærre med den laveste RF og den højeste temperatur. M1.5 der også har dampspærre ligger med den næstlaveste RF i samme periode og med temperatur tilsvarende de tagrum uden dampspærre. Omkring d. 20.02.19 udlignes RF og temperatur, så M1.5 og M1.6 med dampspærre har den laveste RF og tagrummene uden dampspærre har den højeste. Temperaturen er stort set ens for alle tagrum i den resterende periode. Forskellene i M1 vurderes primært at skyldes anvendelsen af dampspærre og ikke en isoleringstypes særlig hygroskopiske egenskaber.

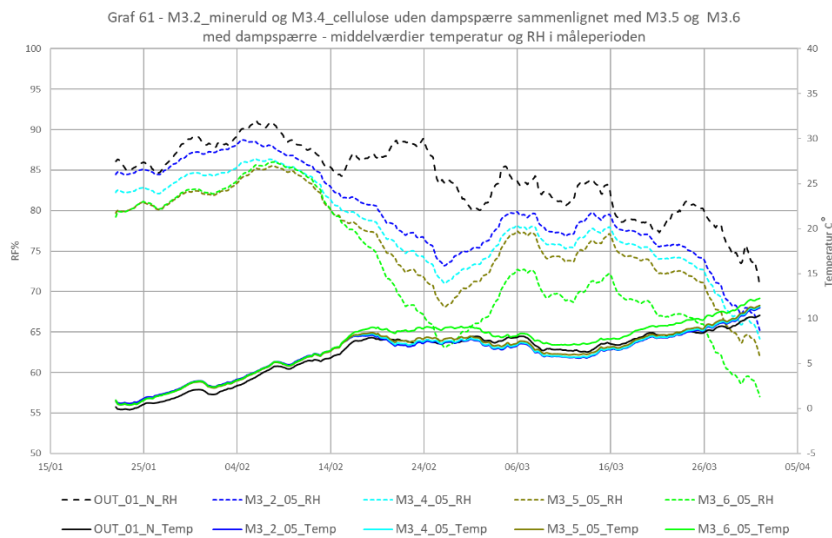


Figur 104: Graf 60 viser sammenligningen mellem M2.2 med 400 mm mineraluld uden dampspærre og M2.5 med 400 mm mineraluld med dampspærre og sammenligningen mellem M2.4 med 400 mm cellulose uden dampspærre og M2.6 med 400 mm cellulose med dampspærre. Over M2 er der et ikke reduceret luftskifte i forhold til anbefalingerne. Frem til ca. d. 18.02.2019 ligger RF for tagrummene meget ens. M2.2 lægger ud med at have højeste temperatur, men ender med at have lavest temperatur fra omkring d. 16.02.2019. Fra ca. d. 20.02.2019 tegner der sig samme tendens som i M1.X, hvor M2.6 har laveste RF og højeste temperatur. I modsætning til M1.X er forskellen dog mere markant. Slutteligt bemærkes det at M2.6 i ca. 20 dage er det eneste tagrum, der har højere temperatur end udetemperaturen.

Når vi ser på M2.2, M2.4, M2.5 og M2.6 ses der i begyndelsen af måleperioden ikke en markant forskel på RF i de sammenlignede tagrum med og uden dampspærre over M2 (Figur 104) som ventet, men omkring d. 14.02.2019 begynder tagrummene med dampspærre at markere sig med de laveste RF, men også de højeste temperaturer sammenlignet med tagrummene uden dampspærre. Mest markant er M2.6 med celluloseisoleringen, der i gennemsnit er op til 3°C varmere med en ca. 5%-point lavere RF end M2.5 med 400 mm mineraluld.

Den manglende forskel på RF i tagrum (Figur 104) frem til d. 14.02.2019 kan skyldes det manglende fugttilskud fra "beboelsen" jf. Figur 113. I denne periode er det kun udeluften der bidrager til RF i tagrummet og da luftskiftet er ens i tagrummene, vurderes det for sandsynligt, at dette er årsagen til at RF er ens. Såfremt denne antagelse er korrekt taler det imod en buffereffekt i cellolusen, da forventningen ville være en lavere RF i både M2.4 og M2.6.

Tagrummene over M2 med dampspærre har begge en væsentlig højere temperatur end deres modstykker uden dampspærre. Det afviger fra tagrummene over M1, hvor temperaturerne er stort set ens uanset anvendelse af dampspærre eller ej.



Figur 105: Graf 61 viser sammenligningen mellem M3.2 med 400 mm mineraluld uden dampspærre og M3.5 med 400 mm mineraluld med dampspærre og sammenligningen mellem M3.4 med 400 mm cellulose uden dampspærre og M3.6 med 400 mm cellulose med dampspærre. Over M3 er der et ca. 51% reduceret luftskifte i forhold til M2.X. Frem til ca. d. 18.02.2019 ligger temperaturen for tagrummene meget ens og ligger over udetemperaturen. Omkring d. 16.02.2019 stiger temperatur i M3.6, mens de øvrige tagrumstemperaturer falder. RF i M3.6 falder i samme periode, formentlig som følge af den højere temperatur. RF i M3.2 ligger generelt højeste i måleperioden.

Over sektion M3 (Figur 105) ligger de 2 tagrum med dampspærre nogenlunde ens hvad angår temperatur og RF i tagrummet frem til ca. d. 14.02.2019. Herefter ses et tilsvarende billede som over M2 (Figur 104), hvor M3.6 har en markant RF fald, som formentlig skyldes den markante temperaturstigning i M3.6 i forhold til de øvrige lofter.

De 2 tagrum uden dampspærre ligger generelt med den højeste RF i måleperioden. M3.2 med 400 mm mineraluld ligger med den højeste RF i hele perioden, hvilket kunne indikere en buffereffekt i M3.4. Det vurderes dog at være en meget begrænset effekt, da M3.2 samtidig har den laveste temperatur af tagrummene i perioden.

Igen ses der en markant forskel i temperatur, denne gang kun i M3.6 med cellulose og dampspærre i modsætning til M2.5/6, hvor det var tagrummene med mineraluld og cellulose og dampspærre.

Vandindhold

I M1.X (Figur 103), hvor ventilationen er reduceret med ca. 35% i forhold til anbefalingerne, er der generelt et højere RF i tagrums uden dampspærre, men stort set ingen forskel på om der anvendt mineraluld eller cellulose.

Til sammenligning er der over M2 synlig forskel på RF i tagrum med dampspærre afhængig af om der er anvendt cellulose eller mineraluld. Over M3, hvor ventilationen er reduceret til ca. 51% af det anbefalede, ligger alle tagrummenes RF som celluloseproducenterne formentlig ville have forventet fordelingen, idet cellulosen med og uden dampspærre har lavere RF end tagrum med mineraluld med og uden dampspærre.

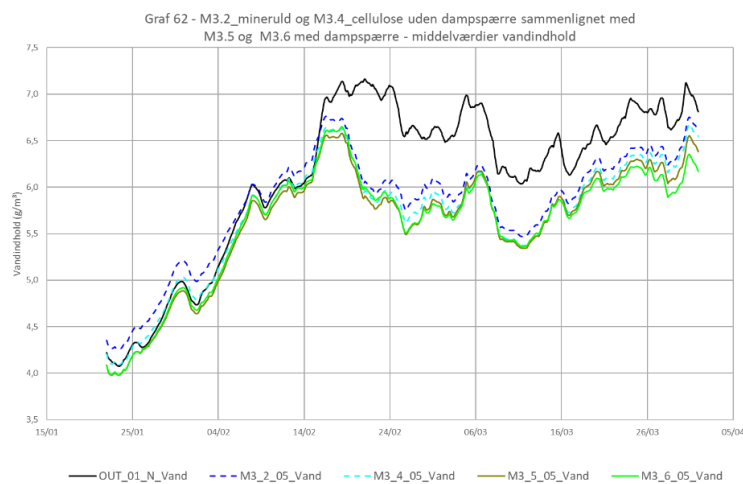
Temperaturspredningen, særligt over M2 (Figur 104) og over M3 (Figur 105) overrasker. Over M2 burde ventilationen have udlignet forskellene og resultere-

ret i en kurve tilsvarende udetemperaturens. Over M3 var forventningen generelt en højere temperatur end over M2, grundet det lavere luftskifte, men der er ikke nogen umiddelbar forskel. Der er heller ikke nogen umiddelbar grund til at M2.6 og M3.6 med 400 cellulose og med dampspærre skulle være markant varmere end de øvrige tagrum.

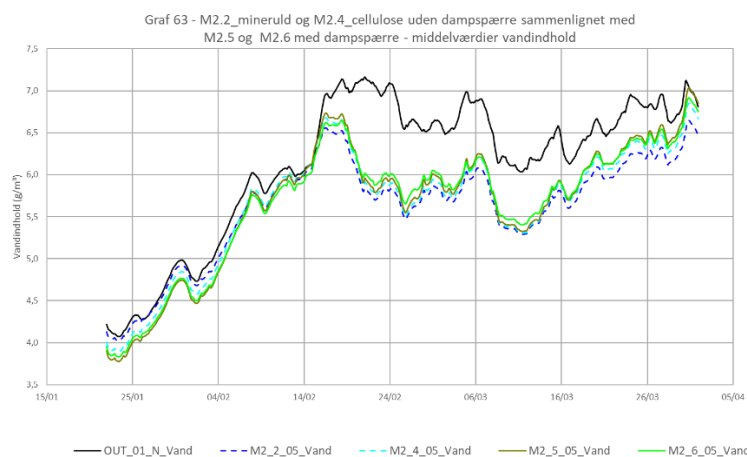
For at komme en årsag nærmere kunne det undersøges om cellulosen i M3.6 og M2.6 er fugtigere end cellulosen i de øvrige tagrum og dermed fastslå om en forøget varmeledning er årsagen den højere temperatur.

For at sikre at temperaturforskellene ikke skyldes konvektion, kunne der også fortages supplerende PFT-målinger af de resterende tagrum.

Spredningen i RF og temperatur i tagrummene over M3 kunne potentielt afspejle en buffereffekt i cellulosen. Det underbygges kun til dels af vandindholdet i tagrummene (Figur 106), hvor tagrummene med cellulose kun i begrænsede perioder har lavere vandindhold i luften og det gælder kun tagrum uden dampspærre. Samme tendens ses over M1 (Bilag 01, graf 64).



Figur 106: Graf 62 viser en sammenligning af vandindholdet i luften i tagrum uden dampspærre, herunder M3.2 med 400 mm mineraluld og M3.4 med 400 mm cellulose og tagrum med dampspærre, herunder M3.5 med 400 mm mineraluld og M3.6 med 400 mm cellulose. Som forventet er der et lavere vandindhold i tagrum med dampspærre end uden.



Figur 107: Graf 63 viser en sammenligning af vandindholdet i luften i tagrum uden dampspærre, herunder M2.2 med 400 mm mineraluld og M2.4 med 400 mm cellulose og tagrum med dampspærre, herunder M2.5 med 400 mm mineraluld og M2.6 med 400 mm cellulose. Det er overraskende, at der er et lavere vandindhold i tagrum uden dampspærre end med dampspærre – særligt, taget i betragtning af at RF og temperaturen (Figur 104), viser det forventede billede, hvor der er lavere RF i tagrum med dampspærren.

Der tegner sig et omvendt billede af vandindholdet i tagrum over M2 (*Figur 107*), hvor tagrummene med dampspærre, der generelt har ligget ca. 3% lavere end tagrummene uden dampspærre omkring d. 14.02.2019 generelt overstiger vandindholdet i tagrummene med ca. 2% i gennemsnit.

Forskellen kan ikke umiddelbart forklares ved sammenligning af målinger fra dette studie. Ventilationen i tagrum over M2 kan forklare et højere vandindhold generelt i tagrummene, men det overrasker alligevel at det er M2.5 og M2.6 med dampspærre, der har højest vandindhold.

Det er muligt, at der har været fejl på sensorerne, da der også ses en markant temperatur svingning i M2.6 (*Figur 104*). Det er muligt at en nærmere undersøgelse af trykforhold i tagrum og isolering, sammenholdt med solpåvirkningen vil kunne afklare forskellen.

Delkonklusion

Generelt er der lavest RF i tagrum med dampspærre. Der er stort set ingen forskel på RF i mellem isoleringstyper, andet end over sektion M3, hvilket ansporer os til at konkludere, at cellulosens fugtbuffereffekt er uden betydning ved anbefalet ventilation eller ved 35% reduceret ventilation. Det kan ikke afvises at der ved 51% reduktion kan være en fugtbuffereffekt, muligvis som følge af mindre bevægelse i luften.

Vandindholdet i tagrummene over M1 og M3 støtter RF målingerne, hvor tagrum med dampspærre har lavest RF. Over M2 har begge tagrum med dampspærre mod forventning højeste vandindhold.

6.3 MÅLINGER VS. SIMULERINGER

6.3.1 BSim simulering

Simuleringen af tagrummet over sektion M1 (*Figur 81*) viser en sammenhæng mellem lavere RF i tagrum, hvor der er anvendt dampspærre. Det er dog overraskende at M1.3 med 100 mm isolering og 300 mm cellulose og M1.4 med 400 mm cellulose - begge uden dampspærre, ligger med samme RF, som M1.6 med cellulose og med dampspærre. M1.5 med dampspærre og mineraluld har en lidt højere RF end tagrummene med cellulose. Det kan muligvis forklares med at cellulosens hygroskopiske materialeegenskaber i BSim er for dominerende ift. virkeligheden. Den højere RF i M1.2 antages at skyldes den lavere temperatur i tagrummet ift. M1.1 i kombination med den reducerede ventilation i tagrummene over sektion M1.

Over sektion M2 (*Figur 82*) er spredningen en smule mindre end over sektion M1 med en generelt højere RF i tagrummene. Dette vurderes at skyldes det større luftskifte og opblanding med udeluften, som stemmer fint overens med det forventede. Igen ses der en uventet lav RF i M2.3 og M2.4 - begge uden dampspærre.

Over sektion M3 (*Figur 94*) ligger RF i tagrum M3.1 og M3.2 over udendørs RF det meste af perioden. Dette stemmer fint overens med at den reducerede ventilation på lofter uden dampspærre medfører en fugtophobning. RF i tag-

rummene med dampspærre og cellulose er stort set upåvirket af den reducerede ventilation og ligger med tilsvarende RF som i tagrummene over sektion M1 og M2. Dette billede anses ikke for at være realistisk, da den reducerede ventilation forventedes at påvirke alle tagrum.

BSim simuleringen af MX.1, MX.2 og MX.5 anses umiddelbart for anvendelige til sammenligning med den målte data. MX.3, MX.4 og MX.6 simuleringer er påvirket af en tilsyneladende overdreven hygroskopisk egenskab, der gør sammenligning med målt data mindre troværdig. I en fremtidig BSim simulering kunne der f.eks. anvendes materialedata fra WUFI, så resultaterne blev mere sammenlignelige og egenskaberne mere realistiske.

6.3.2 WUFI

WUFI simuleringen af tagrummene over sektion M1 (*Figur 84*), vurderes for realistisk, da resultaterne stemmer nogenlunde med forventningerne til de enkelte tagrum. M1.2 og M1.3 har den højeste RF, som kan tilskrives den lavere temperatur i tagrummet, som følge af de velisolerede konstruktioner med 400 mm isolering og uden dampspærre. Det underbygges fint af M1.1 med 150 mm mineraluld, har den højeste temperatur og den laveste RF. Over sektion M1, hvor ventilationen er reduceret med ca. 35%, forventes et øget fugtindhold, hvilket ses afspejlet i tagrummenes RF i perioder ligger over udendørs RF.

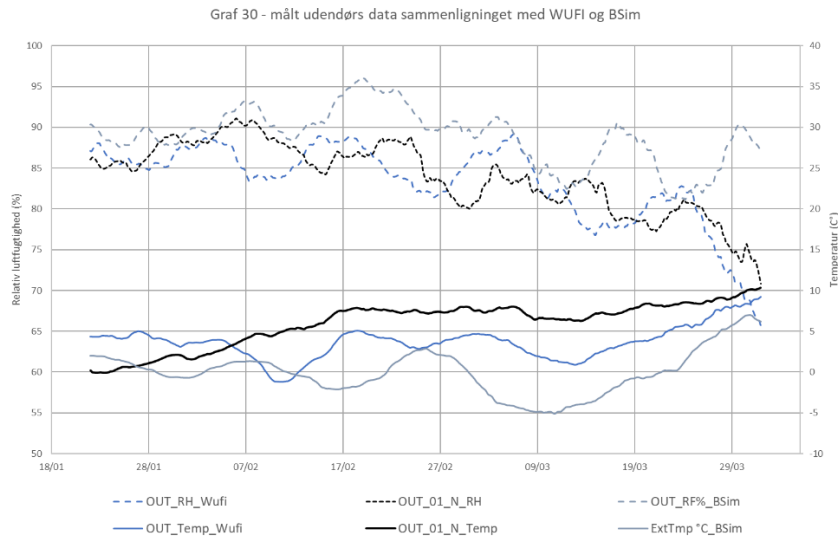
Et tilsvarende forløb ses i tagrummene over sektion M2 (*Figur 85*), dog følger RF kurverne mere udeluftens RF. Dette stemmer fint overens med forventningen om at den større ventilation ift. M1.X sikrer en større opblanding med udeluften. I løbet af perioden er der tegn på at ventilationen ikke når at ventilere overskudfugten bort. Dette vurderes at være et urealistisk scenarie, da dette ses i alle tagrum. En ophobning forventes ikke i tagrummene med dampspærre, hvis de anbefalede krav til ventilation er overholdt. Det mest sandsynlige er at modelluftskiftet er sat for lavt i WUFI simuleringen. Herudover er tendenserne for de enkelte tagrums placering ift. hinanden hvad angår RF og temperatur, som forventet. Resultaterne for M2.X vurderes at kunne anvendes til vurdering af tagrum, der er bedre ventileret end M1.X, men formentlig ikke til vurdering af tagrum med anbefalet ventilation, før at modelluftskiftet er opjusteret.

WUFI simuleringen for M3.X (*Figur 86*) viser markant ophobning af fugt i tagrum M3.2 og M3.3 uden dampspærre i hele perioden, som vurderes at være forventeligt ved reduceret ventilation. De øvrige tagrum ligger lige over udeluftens RF det meste af perioden, hvilket også vurderes at være realistisk ved reduceret ventilation, da ventilationen ikke kan nå at udligne RF inden udeluftens RF og temperatur har ændret sig igen.

Klimadata

Vejret i København i januar til marts 2019 har ikke fulgt de gennemsnitlige værdier, der ligger til grund for DRY eller TRY (se *Tabel 3* og

Figur 108). Dette betyder at der opstår nogen usikkerhed om simuleringernes præcise udfald. Dette faktum skal holdes for øje når simuleringer og målte værdier sammenholdes.



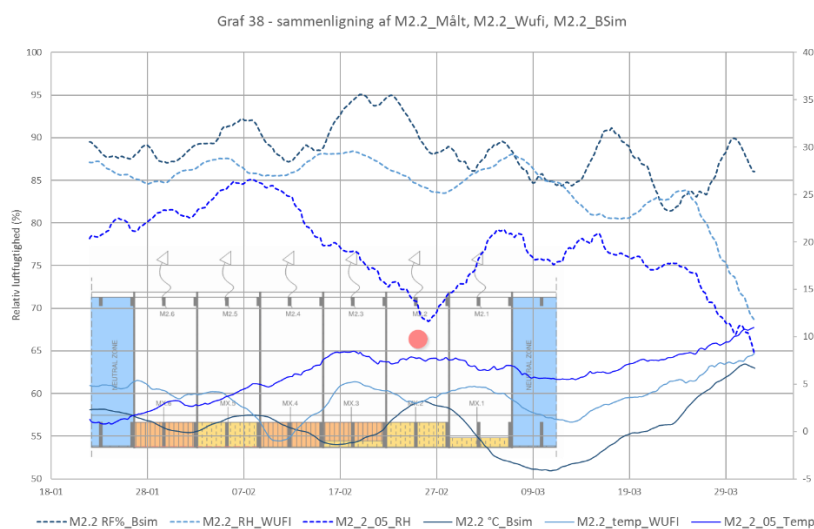
Figur 108: Graf 30 sammenligner den målte udendørs temperatur og RF med DRY (anvendt i BSim) og Lund klimadata (anvendt i WUFI). Generelt ligger de målte RF værdier lavere end BSim, mens middellinjen er tilsvarende WUFI. Dog stiger og falder WUFI's RF i højere grad med temperaturen end de målte værdier. Den målte udendørstemperatur er generelt højere og mere konstant.

Ligeledes er der en usikkerhed i forhold til Lund klimadata anvendt i WUFI. Faktisk er der stort set ingen sammenhæng mellem de målte værdier og klimadata anvendt i BSim og WUFI jf.

Figur 108. Ud fra denne betragtning er en egentlig fremtidsvurdering af testhuset i BSim eller WUFI baseret på målt data, tvivlsom.

WUFI og BSim's udedata er begge "værre" rent fugtteknisk end den målte data, da begge har lavere temperatur og enten tilsvarende eller højere RF, hvilket kan være en fordel, når bygninger eller konstruktioner skal vurderes.

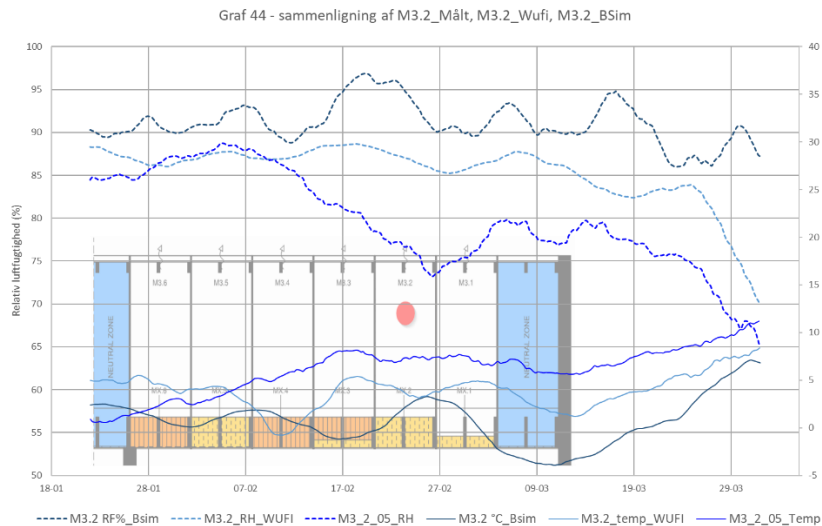
6.3.3 Sammenligning mellem målt data og simuleringsprogrammer



Figur 109: Graf 38 sammenligning af middelværdier for simuleringer og målt data i M2.2. WUFI og BSim's RF følges i starten og i slutningen af perioden, afbrudt af nogle stigninger i BSim. Den målte RF ligger generelt under de simulerede, men har samme tendenser i starten og slutningen af måleperioden. Den målte temperatur ligger generelt højest efterfulgt af WUFI.

Ved en sammenligning af f.eks. M2.2 går forskellen i udvendig målt data og simuleret data igen (Figur 109), dog er den udlignet, så tendenserne er mere ens. Det gør sig generelt gældende for de øvrige sektioner og tagrum som det

ses af Figur 110 og Bilag 01. Der er en markant forskel i den målte periode med meget sol, som tydeligvis ikke er medtaget i WUFI eller BSim klimadata. Det er nærliggende at antage at såfremt vintermånederne havde været koldere, ville RF formentlig have ligget omkring simuleringernes kurver. Da simuleringensprogrammerne begge viser et "værre" scenarie, kan de begge bruges til vurdering af et ventileret tagrum, hvis der ikke havde været målinger til rådighed.



Figur 110: Graf 44 sammenligning af middelværdier for simuleringer og målt data i M3.2. WUFI og BSim's RF følges i starten og i slutningen af perioden, afbrudt af nogle stigninger i BSim. Den målte RF ligger generelt under de simulerede, men har samme tendenser i starten og slutningen af måleperioden. Den målte temperatur ligger generelt højest og dernæst efterfulgt af WUFI.

Middeltemperaturen for BSim og WUFI i M3.2 ligger på ca. 0-5 grader svarende til 2-10 grader lavere end den målte temperatur. Hvis den målte temperatur eksempelvis sænkes til middelværdien af BSim og WUFI temperaturen, hæves RF i tagrummet tilsvarende. Antages det samme vandindhold, vil en temperatur sænkning resultere i kondensering i tagrummet. Dette vurderes dog ikke helt realistisk, da en sænkning af temperaturen i tagrummet vil være forårsaget af en generel sænkning af udendørs temperaturen og dermed også for udendørs RF. Vandindholdet kan altså ikke forudsættes det samme, hvis temperaturen sænkes.

På denne baggrund vurderes det ikke muligt, at simulere resten af året ved hjælp af målt klimadata uden, at der samtidig tages højde for varierende vandindhold i luften, som f.eks. kan undersøges ved at ændre på forudsætningerne i simuleringensprogrammerne klimadata. Hvis januar, februar og marts måned f.eks. har været 5°C varmere end normen, kan amplituden for hele året ændres for udendørs temperaturen og flere scenarier undersøges.

En anden overvejelse er hvilken værdi det skaber, at kunne simulere de præcise forhold for resten af året baseret på 3 måneders klimamålinger, hvis forholdene er bedre end normen? Det er netop formålet med "middelværdier", at vurderinger, af om en konstruktion eller bygning er fugtteknisk robust kan foretages på baggrund af det statistiske mest sandsynlige vejr. Hvis der er behov for at undersøge ekstreme fremtidige vejrforhold, er det nødvendigt at definere hvilke scenarier, der skal undersøges og dermed bliver de målte klimadata mindre relevante.

Studiet her har vist at 3 måneder er for kort tid, hvis målingerne skal anvendes til justering af simuleringensprogrammer. Det vurderes, at der bør være 1 års klimadata som minimum til rådighed for at målingerne kan anvendes til kalibrering af simuleringensprogrammerne.

Anvendelse af luftskiftemålingerne til "kalibrering" af simuleringsprogrammerne vurderes at være en god ide, da de antagne luftskifter ikke altid stemmer overens med virkeligheden. Luftskiftemålingerne bør gentages løbende over året for at få årstidsvariationer med i vurderingen.

Simuleringerne tager heller ikke højde for den potentielt akkumulerede fugt fra Projekt Dalo i konstruktioner. Tagrummene må formodes at have opnået en balance med fugttilskuddet fra de 3 forskellige fugtklasser. Dermed kan fugtindholdet i sektion M3.X's konstruktioner potentielt være højere end i M2.X og M1.X ved opstart af nærværende masterprojekt. Dermed kan der være en forskel på simuleringerne og målt data, der ikke skyldes udeklimaet eller ændret ventilation. Dette skaber en usikkerhed ved sammenligning målt data og simuleringer.

I WUFI har vi valgt at simulere nordsiden af taget for at simulere tagfladen uden solpåvirkning og størst risiko for skimmel - altså det værst tænkelige scenarie. Ses der på RF- og temperaturmålinger mod hhv. nord og syd er tendensen klar. Sydsiden har en gennemsnitlig højere temperatur på ca. $0,3^{\circ}\text{C}$ i forhold til nordsiden. Maks temperaturforskellen ligger ca. $2,5^{\circ}\text{C}$ højere mod syd. Grundet forskellene i temperaturen, er RF-tendensen på nordsiden højere med mellem 0,4 til 2,4%-point. Forskellen underbygger vores valg.

6.4 SKIMMELRISIKO

Vi foretog ved forsøgets begyndelse en tapetest i hvert tagrum for at verificere om der var nogen tegn på skimmelvækst i nogen af tagrummene. Alle test blev foretaget på samme måde og samme sted i alle tagrum, men ingen af de udførte tapeprøver fra første test viste nogen tegn på skimmelvækst. Det antages at dette skyldes at ventilationen indtil videre har været tilstrækkelig og at perioder med optimale forhold for skimmelvækst simpelthen ikke har været lange nok, til at starte væksten. Skimmelvækst er afhængig af både en tilpas høj temperatur, en relativ fugt på over 75-80% (afhængigt af materialet) og et tilpas smudsigt eller organisk materiale er tilgængeligt i en lang nok periode.

Efter forsøgets afslutning foretog vi endnu en tapetest på samme udvalgte steder, som blev undersøgt i første omgang. To enkelte steder blev der udtaget ekstra prøver, men overordnet set var der ingen visuelle tegn på skimmelvækst over de tre måneder forsøget stod på. Det skal nævnes at M3 tagrummene føltes og lugtede mere indelukkede end de øvrige tagrum, til trods for at der visuelt ikke var noget at bemærke.

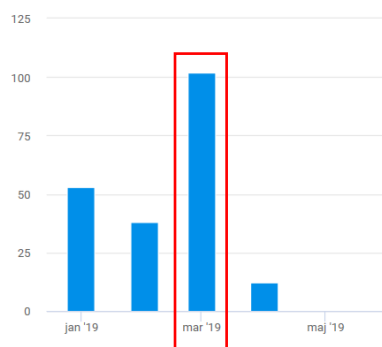
Resultaterne fra den anden test viste at der i M3.2, M3.4, M3.5 og M3.6 var tegn på skimmelsvampe strukturer, ved zoom i mikroskop på 200 x og op til 1000x. Fundet af skimmelsvampesporer svarer nogenlunde til vores forventning, idet den relative luftfugtighed i M3.X var højere end i M2.X og M1.X. Prøverne viste dog også at M2.4, M2.5 og M.6 havde udviklet skimmelsvampe strukturer, umiddelbart i mindre omfang, men stadig synligt i mikroskop ved zoom på 200x til 1000x.

Fundet i tagrum over M2 var overraskende i det M2.X's ventilation var uændret og primært var reference. Der kan være flere grunde til at vi fandt skimmelsvamp i tagrum over M2. En af grundene kan være at de første prøver blev udtaget et sted, hvor der ikke var skimmelsvamp, men at der allerede tidligere har været svamp til stede. Usikkerheden ved testmetoden er stor, i

det prøverne er meget små og kun udtages et sted pr tagrum, hvorved vi kunne have "ramt forbi" skimmelsvampen i første omgang. Den anden prøve blev dog udtaget omtrentligt på samme sted. Væksten var begrænset og den kan i princippet også være introduceret af os selv i forbindelse med prøveudtagningen.

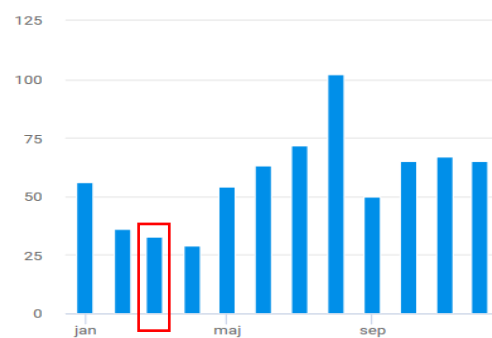
Det skal dog nævnes, at selvom der blev fundet skimmelsvampestrukturer i både normalt ventilerede og meget reduceret ventilerede konstruktioner, blev skimmel ikke fundet ved 40 x zoom i mikroskop og dermed kan det ikke defineres som klar og tydeligt etableret skimmelvækst – jf. MRD og VTT's Mould Indeks definerer det. Vores beregninger af skimmelindekset I_{MRD} viser da også, at der er meget begrænset skimmelvækst i perioden, selvom den er der. Vi måtte zoome ind til 100 x, 200 x og 400 x for at se skimmelsvampestrukturerne. Yderligere er måleperioden meget kort, så den videreudvikling kan ikke måles men kun estimeres via beregninger.

Københavns kommune 2019
Nedbør (mm)



Figur 111: Nedbør i Københavns kommune i de første 4 måneder af 2019, jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019), hvor marts måned ligger på 101,8 mm. Landsgennemsnittet slog alle rekorder med 106,5 mm nedbør i marts

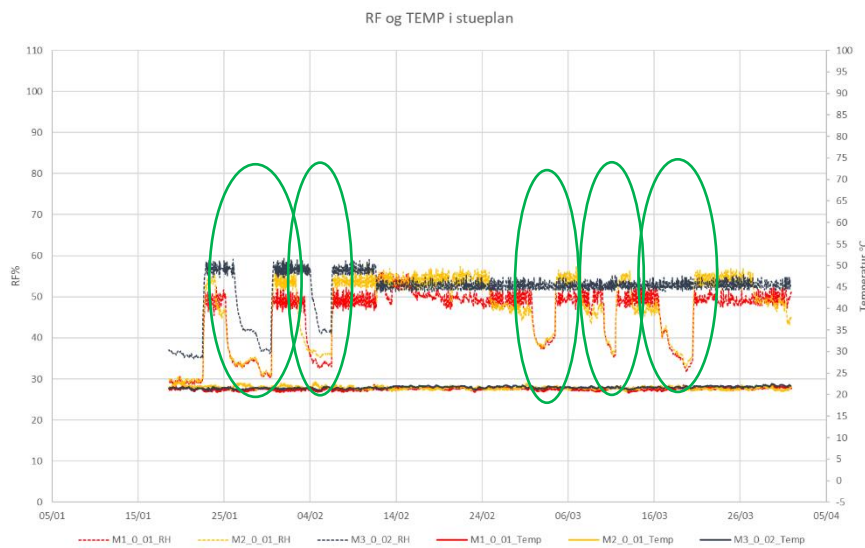
Københavns kommune
Nedbørsum (mm)



Figur 112: Nedbørsumnormalen for 2006-2015, jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019). Normalen for marts måned er ca. 33 mm.

En anden grund kan være vejrforholdene i testperioden, i det at især marts måned 2019 har været en af de vådeste i nyere tid. Både januar og februar ligger nogenlunde på normalen (2006-2015), men marts ligger med rekorden som alle tiders vådeste måned og ca. 3 gange over normalen med 106 mm mod normalens 33 mm. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019).

Dermed kunne det være nærliggende at tro at tagrummene har været udsat for en relativ stor fugtpåvirkning fra udeklimaet. I samme måned var gennemsnits temperaturen 5,8 °C og max lå på 16,7°C, jf. (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019) Flere af de tagrum der er fundet begrænset skimmelsvamp i er udført med dampspærre ned mod stueplan, og det er nærliggende at skyde skylden på vejret. Men selvom marts har været meget fugtig var der kun en mindre tendens til at alle tagrummenes relative fugt steg i marts.



Figur 113:
Temperatur og
relativ luftfugt-
ighed i stue-
plan, korrige-
rede målinger,
men ikke gen-
nemsnit, for at
synliggøre den
relative fugt og
perioder hvor
der har mang-
let vand på be-
fugter anlæg-
get.

Ser vi på graferne 1-3 (Figur 63, Figur 64 og Figur 65) er den relative fugt højere i januar, hvor temperaturen dog også er lavere. Den relative luftfugtighed i udeklimaet er da heller ikke højere end normalt, (DMI.dk/Vejrarkiv, 2019) til trods for den større mængde nedbør.

I samme periode har der været flere udfald i befugtningen af stueplan, hvilket fremgår af graf 4 (se Figur 66). Det er dog endnu tydeligere på nedenstående graf, se Figur 113, hvor der er 5 udfald i M1 og M2 men "kun" 2 udfald i M3.

6.4.1 Vurdering af skimmelrisiko via beregninger og simuleringer

MRD-metoden kan benyttes i WUFI, ligesom WUFI BIO og VTT's modeller, men formlerne kan også benyttes til en vurdering ud fra de faktiske målinger, vi har foretaget.

Vi har derfor beregnet skimmelindekset I_{MRD} for alle tagrummene, hvilke kan findes i Figur 73 til Figur 75 samt Bilag 10. Beregningerne er foretaget ud fra den målte relative luftfugtighed, temperatur og en D_{crit} på 17 dage, svarende til gran. (Se Figur 114)

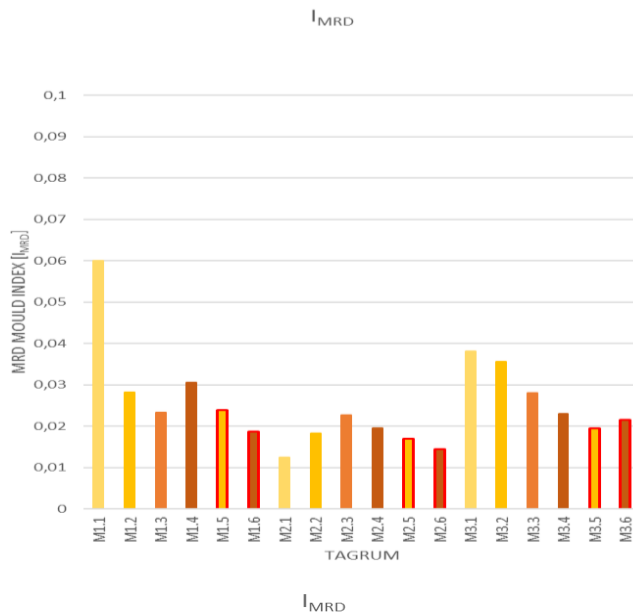
For at vurdere risikoen ved materialet ift. tagrummenes hygrotermiske forhold lavede vi en yderligere beregning af MRD-indekset ud fra en D_{crit} på 10 dage, svarende til fyr, som er mere modtagelig for skimmelvækst. (Se Figur 115)

Beregningerne viser at der i alle tagrum er begyndende vækst, men at niveauet er så lavt at det næsten ikke kan ses på graferne. (Se Figur 72). Dette gælder uanset om vi ser på gran eller fyr.

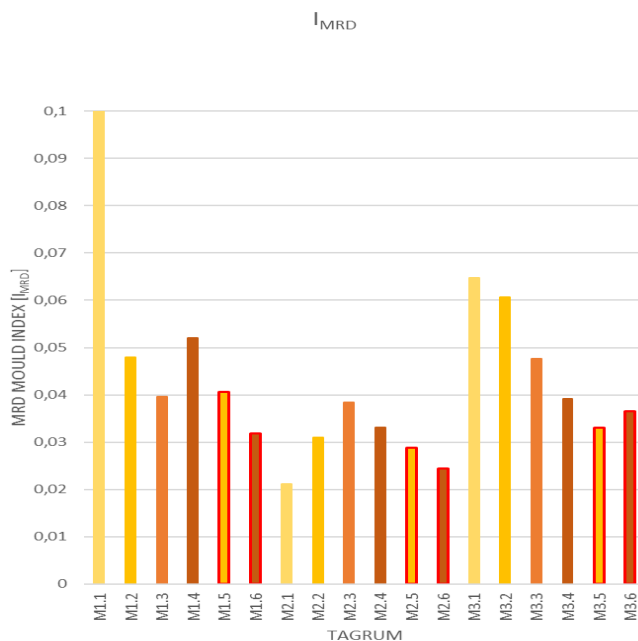
Ser vi på de beregnede størrelser i MRD-indekset, er der ikke en klar sammenhæng med størrelsen på luftskiftet og væksten er generelt så lille, selv i M1.1, at den ikke kan defineres som etableret skimmelvækst jf. skimmelindekset. Faktisk er den 16-70 gange lavere end det niveau, der definerer klar og tydelig skimmelvækst når dette forstørres 40 x gennem et mikroskop. (Se Figur 114 og Figur 115)

Forsøget starter i januar, der er midt i vækstsæsonen for skimmel, da forholdene for skimmelvækst allerede i efteråret bliver gunstige. Dette betyder at vores MRD beregninger, som kun indeholder data fra forsøgsperioden, viser et lavere niveau af skimmelvækst, end der reelt må forventes at være i tagrummene, hvis målingerne var startet i efteråret (Figur 114).

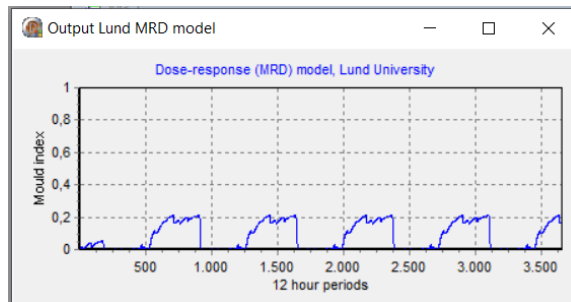
Ligeledes er væksten så lille at der heller ikke kan defineres en klar sammenhæng mellem typen eller tykkelsen af isoleringsmaterialet, til trods for M1.1's indekstal er dobbelt så stort, som øvrige tagrum. M2.1 har det mindste, hvilket det teoretisk set også burde være, da M2.1 er godt ventileret.



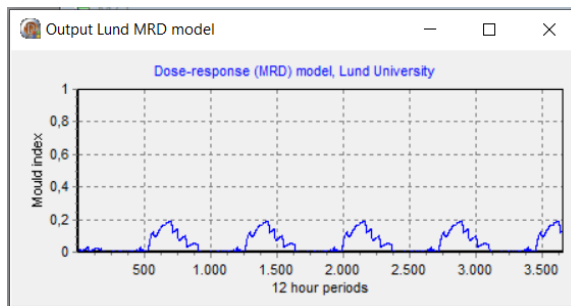
Figur 114: Zoom ind på I_{MRD} -beregningen for tagrummene i måleperioden. Som det ses her er væksten så lille at det er svært at bestemme om der er en sammenhæng med luftskiftet, isoleringsmaterialet eller dampspærren. MRD-Indekset er her beregnet ud fra en $D_{crit} = 17$ dage, svarende til gran, hvilket er træsorten der er benyttet i testhusets spær. MX.1 har størst vækst i M1.1, mens MX.2 følger luftskiftet med M3.2 der har størst vækst. MX.3 er nogenlunde ens, MX.4 og MX.5 er størst i M1.5. MX.6 er en anelse større i M3.6.



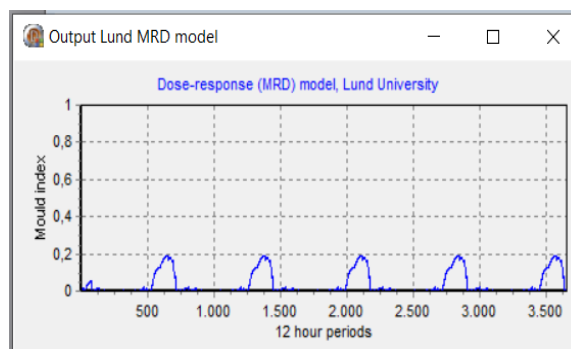
Figur 115: MRD-indekset for en $D_{crit} = 10$ dage, svarende til fyr. Denne er blot til sammenligning af betydningen af træsorten i forhold til de aktuelle målinger. Skimmelvæksten er maksimalt oppe på 0,1, hvilket betyder at der er meget lidt vækst.



Figur 117: I_{MRD} for M3.1 simuleret i 5 år viser vækst i efteråret og henover vinteren, hvorefter væksten brat dør ud. Vækstperioden er dog længere end i de øvrige tagrum.



Figur 116: Simulerede I_{MRD} for 2.1 viser at vækstperioden er lige så lang som i M3.1, men ikke så brat stigende eller faldende, hvilket umiddelbart må tilskrives det højere luftskifte i M2.1.



Figur 118: Simulerede I_{MRD} for M3.5 med 400 mm mineraluld og dampspærre viser en markant kortere periode med gode vækstbetingelser og en forholdsvis hurtig positiv og hurtig negativ vækst.

Generelt ligger MX.1 med vækst hele vinterhalvåret, hvor alle andre tagrum har en kortere periode med vækst. Dette kunne skyldes at tagrummet er en

Til gengæld understøtter I_{MRD} vores skimmelmålinger, som viste at hvis vi zoomer langt nok ind og leder bare lidt, så er det muligt at finde begyndende skimmelvækst. I_{MRD} understøtter også det vi ved fra Projekt DaLo, nemlig at der ikke kommer skimmelvækst i nogen af tagrummene over flere år, hvis ventilationen udføres efter de gældende regler. Væksten er der, men i så små mængder og i så kort tid at den ikke kan nå at etablere sig eller bliver et reelt problem. Sammenlignes Figur 114 med Figur 115, ses det at risikoen for skimmelvækst i tagrummene – under de målte forhold – er forsvindende lille. På Figur 114 antages spærtræet at være udført i gran, som det formodentlig også er, mens det på Figur 115 antages at være udført i fyr, hvilket er et mere modtageligt materiale for skimmelvækst (P. Johansson, 2012) (Thelandersson S. I., 2013).

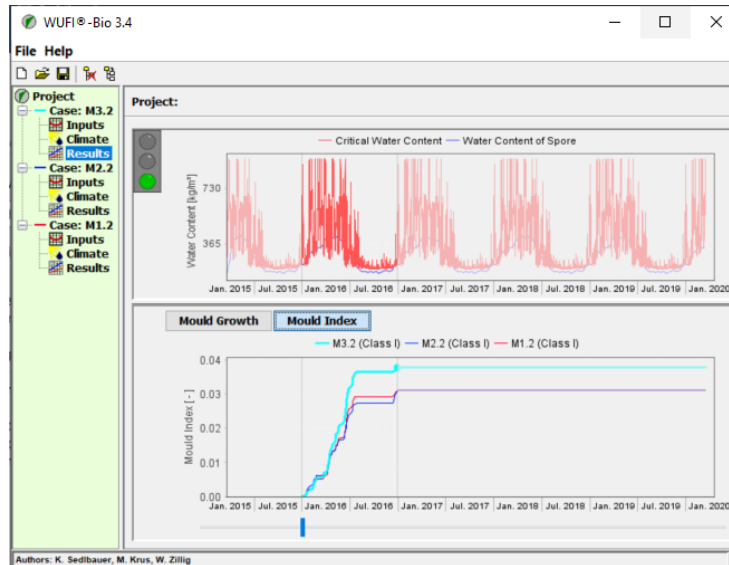
Kigger vi så på vores simuleringer har vi benyttet både skimmelmødelles MRD, WUFI BIO og WUFI VTT.

MRD-simuleringerne viser generelt et lavt niveau på ca. 0,2, dvs. i samme lag som vores MRD beregninger ud fra målingerne viser. Ingen af MRD simuleringerne har et niveau der er markant højere end dette, og max ligger på ca. 0,25-0,3.

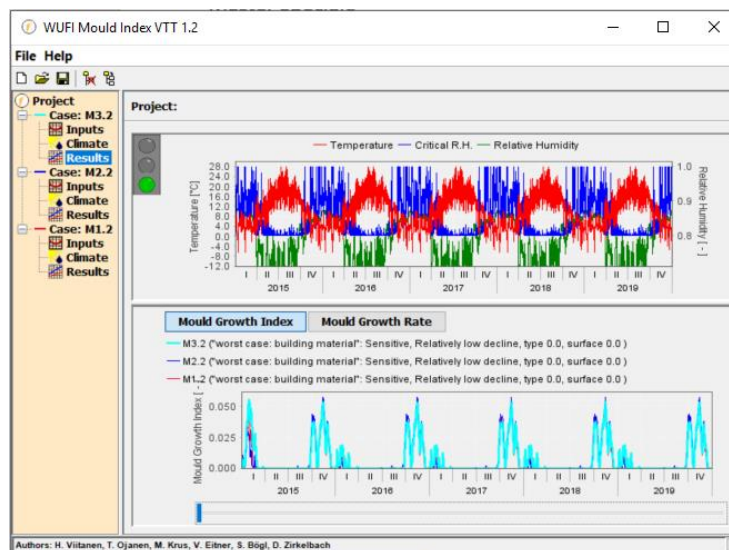
Forskellen imellem tagrummene består primært i længden af perioden med positiv og / eller negativ vækst og hvor hurtig vækst tager til eller aftager.

anelse varmere og at dette, sammen med luftfugtigheden giver bedre vækstbetingelser for skimmelsvampe.

Væksten er dog stadig så lav, at det ikke har nogen reel betydning og den tørrer ud igen i løbet af foråret i alle tagrummene.



Figur 119: Skimmelvurdering i WUFI BIO af MX.2 som viser at væksten er størst i M3.1 og denne vurdering er sammenfaldende med MRD-simuleringen af M3.2 og nogenlunde sammenfaldende med VTT. Se Figur 120. Generelt bemærkes det at niveauet er meget lavt og ikke udgør et problem et i alle tagrummene.



Figur 120: VTT simulering af MX.2 viser nogenlunde samme niveau af skimmelvækst som i WUFI BIO for M3.2, men M2.2 ligger her over M3.2 i toppene. Det bemærkes at niveauet er meget lavt og sammenholdt med "grønt trafiklys", er der ikke noget problem.

Sammenligner vi MRD-simuleringerne med WUFI BIO og VTT, ser vi et sammenfaldende billede af at der er minimal vækst, men at det ikke i nogen af modellerne når op på 1, dvs. at en klart og tydeligt defineret vækst er ikke til stede. I WUFI BIO og VTT har vi sammenholdt de 6 grupper af tagrum i 6 grader for at se dem i sammenhæng. Væksten er dog også her så lille at det i de fleste tilfælde kun giver vage indikationer på luftskiftets betydning.

Sammenligningen mellem skimmelmodellerne, MRD-beregningerne på målingerne og vores fysiske tapetest, er billedet nogenlunde ens. Der er mikroskopisk skimmelvækst i tagrummene, både beregnet, simuleret og i virkeligheden, men den er ikke udbredt eller kraftig nok til at kunne ses med det blotte øje.

Erfaringen fra projekt DaLo var at skimmelen ikke havde gode nok vækstbetingelser i de tre-fire år som testhuset har stået færdigt til at etablere sig og hvor ventilationsåbningerne har fulgt gældende anvisninger.

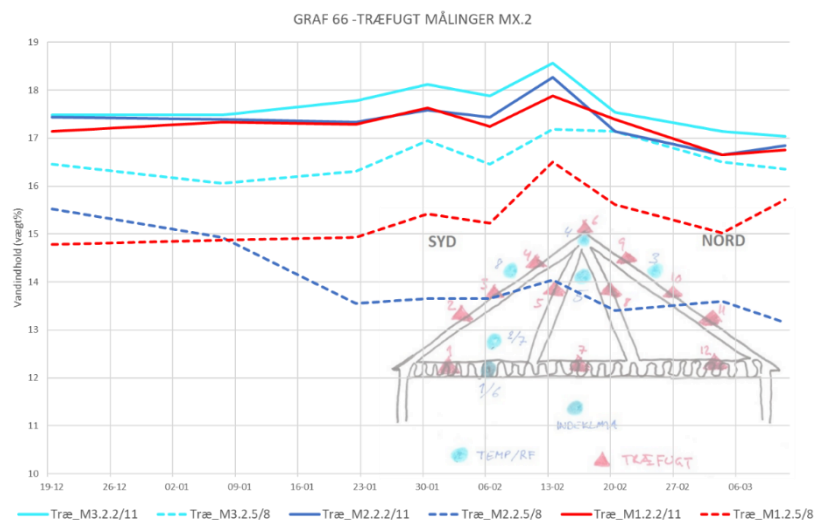
Simuleringerne viser at selv med begrænset luftskifte er der ikke med sikkerhed gode nok vækstbetingelser for skimmelvækst. Dog er risikoen i godt isolerede tagrum mindst ved anvendelse af dampspærre (Figur 118). I tagrum med 150 mm isolering er der størst risiko i tagrum med nedsat ventilation (Figur 116 og Figur 117). (se også Bilag 10)

6.5 TRÆFUGT

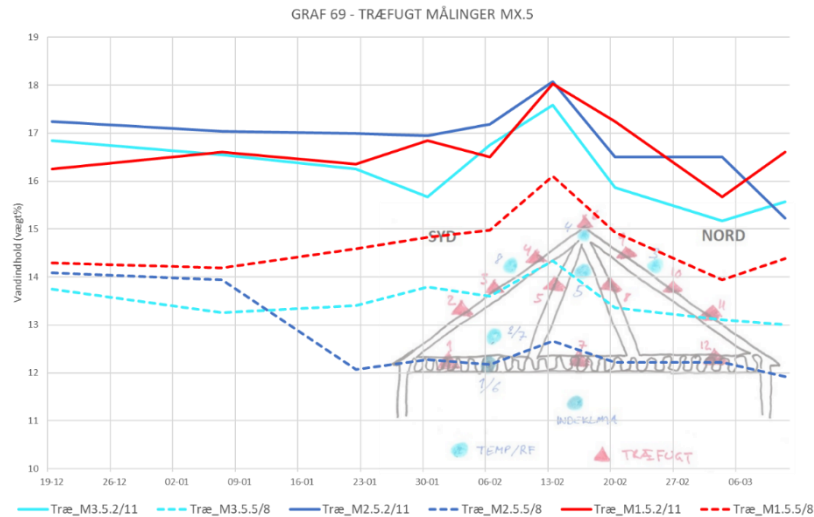
Temperaturerne i tagrummene har i måleperioden ligget over frysepunktet og op til ca. 23°C, dog med enkelte nætter med nattefrost. Generelt anses træfugtmålingerne for brugbare i perioden.

Ser vi på målingerne på konstruktionstræets fugtindhold ligger den forholdsvis stabilt over måleperioden mellem 13-15 vægt-% for målepunkterne 5 og 8 (som ligger centreret i tagrummene). (Se Figur 121 og 122) I målepunkterne 2 og 11, lige under tagfladerne, ligger træet fugtindhold en anelse højere på 16-18 % +/- 1-2%.

Dette er i sig selv ikke et problem henover vinterperioden, men det viser at risikoen for skimmel umiddelbart er lidt større lige på undersiden af undertaget end inde midt i rummet. Dette kunne højst sandsynligt hænge sammen med luftgennemstrømningen og opblandingen af luften fungerer bedre inde i rummet hvor aftrækket fra ventilationsstudserne er placeret. Det ses af Figur 121 at større luftskifte giver lavere fugtindhold i træværket, dog afhængigt af opblanding af luften i forbindelse med luftskiftet.



Figur 121: Træfugt i MX.2 uden dampspærre med 400 mm mineraluld. Træfugt ligger nogenlunde stabilt i det meste af måleperioden men forholdsvis højt ved sensorer langs undersiden af tagfladen (2 og 11). Sensorer midt i tagrummet på spærret (5 og 8) ser ud til at følge luftskiftet, hvor større luftskifte er lig med lavere træfugt.



122: Træfugt i MX.5 med dampspærre og 400 mm mineraluld. Generelt samme billede som i MX.2 hvor sensorer (2 og 11) langs undersiden af taget har markant højere fugtindhold end sensorerne inde i tagrummets midte har (5 og 8). Også her har det største luftskifte betydning for træfugten. Generelt ligger fugtindholdet lavere i MX.5 end i MX.2, hvilket kunne skyldes dampspærren.

På grund af den meget korte måleperiode er det umiddelbart ikke muligt at give et entydigt bud på luftskiftets betydning for træfugten og de små forskelle, der er igennem måleperioden, ikke er så store. Her ville en længere måleperiode have været at foretrække.

Tendensen peger dog i retning af at fugtindholdet er 0,5-2% lavere i MX.5 (med dampspærre) end i MX.2. Desuden ses det at større ventilationsrate fjerner mere fugt og dermed giver lavere fugtindhold i træet.

I MX.5 er det dog ikke konsekvent ift. M3.5 og M1.5, men M2.5 har laveste fugtindhold på sensor 5 og 8 dvs. midt i tagrummet.

Sensor 2 og 11 ligger generelt med et højere fugtindhold, som formentlig skyldes at luftskiftet er mindre på undersiden af undertaget.

7 PERSPEKTIVERING

Vi er igennem arbejdet med dette masterprojekt kommet frem til, at måleperioden har været for kort til, at kunne vurdere flere forhold, tilfredsstillende.

For det første giver den korte måleperiode en stor usikkerhed på validiteten af de målte data. Der er ikke statistisk sikkerhed for, at forholdene vil gentages igen, dels pga. den varme gennemsnitstemperatur og dels fordi vi overtog testhuset fra Projekt DaLo, som havde brugt tre forskellige fugtklasser. Det er uklart om der har været en fugtbuffereffekt, som har påvirket vores målinger.

For det andet starter skimmelvæksten jf. MRD-beregninger og simuleringerne allerede i efteråret og varer frem til begyndelsen af foråret. Her bliver temperaturen i tagrummene så høj at den relative luftfugtighed kommer ned på et niveau, hvor skimmelvæksten stopper. Det vil sige at målingerne optimalt set skulle være startet i efteråret for at give det fulde billede.

For det tredje vil en længere måling kunne undersøge, hvornår træfugten i konstruktionstræet finder sin ligevægt i forhold til den ændrede ventilation.

For at vurdere effekten af de hygrokroskopiske egenskaber i cellulosen ved de ændrede ventilationsforhold, bør der foretages målinger i længere tid. Målingerne kunne suppleres med flere sensorer og systematisk udførelse af vejettørre-veje prøver. Samtidig kunne de markant højere temperaturer i M2.5 med 400 mm mineraluld og dampspærre og M2.6 og M3.6 med 400 mm cellulose og dampspærre undersøges nærmere, da de ikke umiddelbart kan forklares ved udetemperaturen.

8 KONKLUSION

Med nærværende masterprojekt ønskede vi at belyse følgende:

1. *Vil et mindre ventilationsareal resultere i et lavere luftskifte?*
2. *Er ventilationens betydning større end betydningen af dampspærren, isoleringsmaterialet eller isoleringstykkelsen for de hygrotermiske forhold i tagrummet?*
3. *Er der en sammenhæng mellem isoleringstypens hygroskopiske evner og den relative luftfugtighed i tagrummet ved nedsat ventilationsrate?*
4. *Kan der påvises en større risiko for skimmelvækst som følge af en lavere ventilationsrate – og er risikoen større over konstruktioner uden dampspærre?*
5. *Kan der via BSim og WUFI simuleringer, beregnes tilsvarende resultater som målingerne viser?*

8.1

Vores forventning var, at vi kunne nedsætte ventilationsraten med hhv. 33% og 66% i de pågældende sektioner, ved at blokere hhv. ca. 1/3 og ca. 2/3 af ventilationsarealerne.

Vores PFT-målinger i tagrummene viser, at vi opnår en reduktion af ventilationsraten på ca. 35,1% og 51,5% i forhold til M2.X. Sektion M2.X svarer til de anbefalede krav til ventilationsåbninger og svarer dermed til 100%. Det vurderes at de reducerede luftskifter er tæt nok på de ønskede 33% og 66% til, at målingerne kan synliggøre effekten af de ændrede ventilationsforhold.

8.2

Vores forventning var, at et lavere luftskifte ville betyde en højere RF i pågældende tagrum. Ligeledes forventede vi, at isoleringstypen og -tykkelsen samt anvendelse af dampspærre ville have mindre indflydelse på RF end en ændring af ventilationsraten.

Sammenligninger mellem tagrum hvor den eneste forskel er en reduceret ventilationsrate, viser at der i nogen perioder, er en tendens til en højere relativ luftfugtighed i de tagrum med det laveste luftskifte.

I godt ventilerede tagrum 150 mm mineraluld og uden dampspærre er der som ventet en lavere RF og højere temperatur i forhold til tagrum med 400 mm isolering og uden dampspærre.

I sektioner med reduceret ventilation ses der en generel stigning af RF og ændring af temperatur i både det ringe og det velisolerede tagrum. I alle sektioner er forskellene i mellem det ringe og det velisolerede tagrum, så små at forskellene ligeså godt kan skyldes usikkerhederne i måleinstrumenterne.

Måleperioden har generelt ikke være lang nok til at kunne be- eller afkræfte behovet for dampspærre ved anvendelse af cellulose baserede isoleringsmateriale. Målinger viser overordnet større forskelle som følge af ventilationsraten

end grundet isoleringstypen. Der er meget varierende temperaturer i tagrummene, hvilket har indflydelse på RF. Ved sammenligning af vandindhold, er der dog ikke de store forskelle imellem de enkelte tagrum.

Der er generelt en forskel på RF i tagrum med og uden dampspærre, men forskellene er mindre tydelige, når der ses på vandindholdet. Da det er korttidsmålinger er det ikke muligt at lave statistisk vurdering af om det er en generel tendens. Målinger over flere år vil give et generelt billede af tendensen.

Vores hypotese om at luftskiftet har en større indflydelse på tagrummenes hygrotermiske forhold end dampspærren, isoleringsmaterialet eller isoleringens tykkelse, er dermed i nogen grad valideret. Dette skal dog ses i lyset af den usikkerhed, den korte måleperiode medfører.

Forskellene mellem sektioner og deres respektive tagrum, vurderes at være et sammenspil mellem alle ovenstående parametre. Det kan derfor ikke med sikkerhed angives, hvilken eller hvilke parametre der generelt har den største betydning i de enkelte tagrum i alle tilfælde. Tendensen peger i retning af at luftskiftet har en stor betydning for fugtforholdene i måleperioden. Det tyder samtidigt på at dampspærrens betydning for tagrummenes fugtforhold i måleperioden stiger ved lavere luftskifter.

8.3

Vi havde ingen forventning om en synlig buffereffekt, da litteraturen generelt beskriver denne som begrænset.

Cellulosens hygroskopiske egenskab er forsøgt simuleret i BSim og i WUFI. I BSim blev buffereffekten overestimeret, hvilket betød at simuleringerne ikke afspejlede forventningerne eller den målte data. WUFI simuleringen følger teorien og viser en lille buffereffekt, men ikke nogen synlig sammenhæng med de målte data.

Forskellen mellem mineraluld og cellulose er i forsøgsperioden minimal, når fugtforholdene vurderes ud fra vandindhold i luften. Når der vurderes ud fra RF, ses der en markant forskel på tagrum med cellulose og dampspærre ift. mineraluld og dampspærre. Dette skyldes sandsynligvis i højere grad temperaturforskelle i de 2 tagrum end celluloseens hygroskopiske egenskaber.

Det kan ikke afvises at fugtbuffereffekten over længere tid ville kunne ses i tagrum med meget reduceret luftskifte, men vores data giver ikke nogen tydelig indikation af dette.

8.4

Vores forventning var at der kunne være fugttekniske udfordringer med mulighed for skimmelvækst i tagrum med reduceret luftskifte, særligt i velisole-rede tagrum uden dampspærre, grundet en højere RF.

Skimmeltesten viste skimmelvækst, når der blev zoomet langt nok ind i mikroskop og denne begrænsede vækst blev understøttet af vores MRD-indeks både i beregninger over de målte værdier og ved simuleringer i WUFI/MRD.

Simuleringerne i WUFI BIO og VTT viste tilsvarende resultater med begrænset vækst. Ingen af simuleringerne når op på et niveau, hvor der kan defineres

som klar og tydelig skimmelvækst. Der er dermed ingen påvist risiko ved de givne konstruktioner – selv ved lavt luftskifte.

MRD simulerede prognoser angiver en lille forskel på tagrum med og uden dampspærre. Måleperioden er så kort, at der ikke kan konkluderes en klar forskel ved de forskellige ventilationsrater. Ligeledes kan der ikke konkluderes en signifikant forskel på anvendelse af dampspærre. Det kan ikke afvises, at der ved længere tids målinger, vil kunne observeres forskelle i tagrum med og uden dampspærre.

8.5

Forventningen var at vi med BSim og WUFI tilsammen kunne simulere forhold, der var tilsvarende de målte.

BSim og WUFI simuleringerne er dog ikke sammenlignelige dels pga. de beregningsmæssige forskelle, men primært pga. af forskellene i den anvendte vejrdato.

Ved sammenligning af den målte klimadata med simuleringer går samme problemstilling igen, da januar, februar og marts i år ikke har fulgt normen, da de i 2019 har været varmere.

Ethvert fuldskala forsøg er afhængigt af vejret. I måleperioden fra januar til og med marts 2019 har vejret i København været varmere. Den målte temperatur lå op til 8-10 grader over DRY, i nogen perioder, som benytter normalværdierne som grundlag.

BSim og WUFI simulerer gennemsnitlige forhold i tagrummene og kan derfor anvendes til at designe og vurdere bygninger og konstruktioner, som er på den sikre side. Det har dermed ikke været muligt at genskabe de samme forhold i BSim og WUFI ved anvendelse af "standard" klimadata, da der altid vil være en forskel mellem gennemsnitlige og aktuelle vejrhold – særligt ved korttidsmålinger.

9 KILDER OG HENVISNINGER

- Aggerholm, S. og Grau, K. . (2016). *SBI-213 Bygningers energibehov*. København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, N. E., Blach, K., & Christensen, G. (1973). Fugt og kondensation. *Fugt 3*. København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, N. E., Blach, K., & Christensen, G. (1974). Fugt og Tage. *Fugt 8*. København: Statens byggeforskningsinstitut.
- Berger, J. L. (2018). *Analysis and improvement of the VTT mold growth model: Application to bamboo fiber board*. Chambéry, France: Elsevier.
- Bergsøe, Niels C. . (1992). *SBI-rapport 227: Passiv sporgasmetode til ventilationsundersøgelser*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Brandt, E. (2013). *Fugt i bygninger, SBI-anvisning 224, 2. udgave*. 2450 København SV: Statens byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Brandt, E., Bunch-Nielsen, T., & Morelli, M. (2019). *SBI 273 - Tage* (1. udg.). København SV: Statens Byggeforskningsinstitut.
- BYG-ERFA. (2005). Alternative isoleringsmaterialer. *Erfaringsblad* (29) 050929.
- BYG-ERFA. (2013). Konstruktioner med stor taghældning - ventilation af tagrum, hanebåndslofter og skunkrum. *Erfaringsblad* (27) 131105.
- BYG-ERFA. (2015). Efterisolering af vandrette lofter - ventilerede tagrum. *Erfaringsblad* (37) 151230.
- Bygge- og boligstyrelsen. (1961). *Bygningsreglement for købstederne og lander 1961*. København: Boligministeriet.
- Bygge- og boligstyrelsen. (1966). *Bygningsreglement for købstederne og landet 1966*. København: Boligministeriet.
- Bygge- og boligstyrelsen. (1977). *Bygningsreglement 1977*. København: Boligministeriet.
- Cederlund, O., & Josefsson, F. (2015). *An evaluation of two well insulated structures - A Master Thesis*. Lund: Faculty of engineering, Lund University.
- Dansk Standard. (2013). *DS/EN ISO 13788:2013*. København: Dansk Standard.
- De Place Hansen et. al. (2018). *SBI-272 - Anvisning om bygningsreglement 2018*. København: Statens Byggeforskningsinstitut.
- DMI. (22. 04 2019). *DMI.dk/Vejrarkiv*. Hentet fra DMI.dk: <https://www.dmi.dk/vejrarkiv/>
- Energistyrelsen. (februar 2019). *Dansk klimapolitik*. Hentet fra Energistyrelsens hjemmeside: <https://ens.dk/ansvarsomraader/energi-klimapolitik/fakta-om-dansk-energi-klimapolitik/dansk-klimapolitik>
- Falk, J. (2014). *Rendered rainscreen walls*. Lund: Lunds Universitet.

- Forgues, Y. (1985). *THE VENTILATION OF INSULATED ROOFS*. Ottawa, Canada: National Research Council, Canada.
- Fraunhofer IBP. (2019). WUFI Pro 6.3 online help.
- Georgsdottir, T., & Sawirs, E. (2012). *Fuktbelastning i takkonstruktioner med perforerad ångspärr*. Lund: Lund Universitet.
- Geving, S., Holme, J. (2010). *Høyisolerte konstruksjoner og fukt - Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperum og kalde loft*. Oslo: sintef.no.
- Gradeci, K. e. (2018). A probabilistic-based methodology for predicting mould growth in facade constructions. *Build and Environment* 128 , 33-45.
- Greenspan, L. (1976). *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. Washington, DC.: Institute for Basic Standards, National Bureau of Standard.
- Hansen, E. J., & Hansen, K. K. (1999). *Sorptionsisotermer*. Kongens Lyngby: Department of Structural Engineering and Material, DTU.
- Hansen, Ernst Jan de Place; Hansen, Kurt Kielsgaard . (1999). *Sorptionsisotermer*. Lyngby: DTU.
- Iffa, E., & Tariku, F. (2016). A REVIEW OF HEAT AND MOISTURE PERFORMANCE OF ATTIC ROOFS. *NED UNIVERSITY JOURNAL OF RESEARCH - APPLIED SCIENCES, VOL XIII, NO. 2*, s. 1-14.
- Janssen, H. (2011). *Thermal diffusion of water vapour in porous materials - fact or fiction?* Lungby: DTU.
- Krus, M. S. (2010). Comparative evaluation of the predictions of two established mould growth models. *ASHRAE Transactions, Volume 116, part 2*.
- Lstiburek, J. (April 2006). Understanding Attic Ventilation. *ASHRAE Journal*, 48, 4, ProQuest, s. 36.
- Morelli, M. (01. 07 2012). Undervisningsnotat - Fugtenheder omregning. *Master i Bygningsfysik, 2. semester*. København S.
- Morelli, M., Nielsen, A., & Vanhoutteghem, L. (2017). *SBI 2017:20 Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner*. København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Mundt Petersen, S. (2012). *Literature study / state of the art : mould and moisture safety in constructions*. Lund: Lund University.
- Møller, E. B. (2010). *Vejledning om håndtering af fugt i byggeriet*. Hørsholm: SBI/AAU.
- Møller, E. B. (2012). *SBI- anvisning 239 - Efterisolering af småhuse - energibesparelser og planlægning*. 2790 Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Møller, Eva B. (SBI). (marts 2019). *VIF-isolering.dk/nyheder*. Hentet fra Varme IsoleringsForeningen: http://www.vif-isolering.dk/pdfiler/Dalo_orientering.pdf

- Møller, Eva B. (2013). *Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse*. København SV: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg universitet.
- Nielsen, A. (2014). *Dansk udgave af NTNU Brukermanual WUFI Pro 4.1 af oktober 2007 - tilpasset WUFI light version 5.3 og brug af Lund Klima*. SBI.
- P. Johansson, e. A. (2012). *Laboratory study to determine the critical moisture level for mould growth on building materials*. Bords, Sweden: SP Technical Research Institute of Sweden .
- Papiruld Danmark. (2019). *Isolering med dampspærre*. Hentet fra www.papiruld.dk: <https://www.papiruld.dk/isolering-med-dampspaerre>
- Papiruld.dk. (18. 04 2019). *Dampspærre og Papiruld*. Hentet fra Papiruld.dk: <https://www.papiruld.dk/isolering-med-dampspaerre>
- Pedersen, Carsten, et. Al. (2003). *SBI207 - Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer*. Hørsholm: By og Byg.
- Rasmussen, T. V., & Nicolajsen, A. (2013). *SBI-anvisning 214 Klimaskærmens lufttæthed* (2. udg.). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Rockwool kontra Papiruld*. (27. 03 2014). Hentet fra Varmbolig.dk: <https://varmbolig.dk/varme-og-miljo/rockwool-kontra-papiruld/>
- Rode, Carsten; Rasmussen, Niels T. . (1999). *Beregnete fugtforhold i konstruktioner*. Lyngby: DTU.
- Samuelson, I. (Oktober 1998). Hygrothermal Performance of Attics. *J. Thermal Env. & Bldg. Sci. Volume 22*, s. 132-146.
- Sedlbauer, e. A. (2001). *Mold Growth Prediction by Computational Simulation*. Stuttgart: Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Sedlbauer, K. (2001). *Prediction of mould fungus formation on the surface of and inside building components*. Stuttgart: Fraunhofer Institute for Building Physics.
- Teknologisk Institut. (2012). *Videnskupon - efterisolering med papiruld i bygninger*. Taastrup: TI.
- Thelandersson, S. I. (2013). Mould resistance design (MRD) model for evaluation of microbial growth under varying climate conditions. *Building & Environment* 65, 18-25.
- Thelandersson, S., Isaksson, T., & Niklewski, J. (2014). *Fuktsäker utformning av klimatskiljande byggnadsdelar med fuktkänsliga material - Vägledning för projektering och riskvärdering*. Lund: Lunds Tekniska Högskola.
- Trafik-, bygge- og boligministeriet. (2018). *BR18, Kap. 22, Ventilation (§420-§452) vejledning punkt 1.6*. Hentet fra [www.bygningsreglementet.dk](http://byggningsreglementet.dk): http://byggningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/22/Vejledninger/Generel_vejledning/Kap-1_6#1d48dc7b-be02-4974-844a-2f701c45e7fd

- Trafik-, bygge- og boligministeriet. (2018). *Kap. 11 Energiforbrug (§250-§298)*. Hentet fra [www.byggningsreglementet.dk](http://byggningsreglementet.dk):
http://byggningsreglementet.dk/Historisk/BR18_Version1/Tekniske-bestemmelser/11/Krav/261_266
- Trafik-, bygge- og boligministeriet. (2018). *Kap. 14 Fugt og Vådtrum (§334-§339)*. Hentet fra [Byggningsreglementet.dk](http://byggningsreglementet.dk):
http://byggningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/14/Krav/334_338
- Trafik-, bygge- og bolistyrelsen. (01. 01 2006). *Historisk byggningsreglement - 8. Energiforbrug gældende fra 01.01.2006*. Hentet fra historisk.byggningsreglementet.dk:
https://historisk.byggningsreglementet.dk/br95_11_id31/0/42
- Valbjørn, Ole . (2003). *SBI 204 - Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger*. Hørsholm, DK: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Vereecken, E., & Roels, S. (03. 11 2011). Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation. *Building and Environment* 51 (2012), s. 296-310.
- Videnscenter for Energibesparelser i bygninger. (30. 04 2019). *Dampspærreguide*. Hentet fra www.byggeriogenergi.dk:
<https://www.byggeriogenergi.dk/vaerktoej/dampspærreguide/saadan-opnaas-korrekt-materialevalg/z-vaerdier-for-materialer/>
- Wang, Peter Grunnet; Scharling, Mikael; Kern-Hansen, Claus (DMI); Wittchen, Kim Bjarne (SBI). (2013). *DMI Teknisk Rapport 13-18*. København: DMI.
- Wang, Peter Riddersholm; Scharling, Mikael; Nielsen, Kristian Pagh . (2012). *DMI Teknisk Rapport 12-17*. København: DMI.

10 BILAG

Bilag 01	Måle- og simuleringsgrafer
Bilag 02	BSim sammenligning af testmodel I og testmodel II.
Bilag 03	PDF-print af Excel-ark med PFT-målinger og beregninger.
Bilag 04	Resultater_PFT_Thor_DaLo-hus_2019-02-20.pdf
Bilag 05	Isocell cellulose fiber – datablad
Bilag 06	Skimmeltest – billeder.
Bilag 07	Papiruld – ydeevnedeklaration nr. 6
Bilag 08	Granulat PRO datablad
Bilag 09	Varmeisolerings Foreningens Produktoversigt 2018
Bilag 10	MRD-Index beregning for alle tagrum ud fra målinger