



## Indvendig isolering

med StoTherm In Comfort i ældre murstenshuse

Søren G Johansen – Thomas W Krogsgaard | Master i Bygningfysik |

10.06.2021



**AALBORG UNIVERSITET**  
KØBENHAVN

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

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

**Studenterrapport**

**Uddannelse:**

Master i Bygningsfysik

**Semester:**

04

**Titel på projekt:**

Indvendig isolering med 'StoTherm In Comfort' i ældre murstenshuse

**Projektperiode:**

1. feb. 2021 – 10. juni 2021

**Vejleder:**

Ernst Jan de Place Hansen  
Tessa Kvist Hansen

**Medlemmer:**

Søren Gudiksen Johansen  
Thomas Wulff Krogsgaard

**Antal normalsider:**

78 normalsider

**Afleveringsdato:**

10. juni 2021

**Resumé:**

Nærværende rapport belyser to specifikke metoder til indvendig efterisolering af ydervægge. Den ene metode består af en traditionel indvendig forsatsvæg med mineraluld, og den anden metode består af et efterisoleringssystem med en kapillaraktiv isolering belagt med et pudssystem. Systemet benævnes 'StoTherm In Comfort'. Efterisoleringssystemet 'StoTherm In Comfort' belyses ved en minimal samt en maximal isoleringstykkelse. Den traditionelle forsatsvæg belyses med en isoleringstykkelse, der isoleringsmæssigt modsvarer den minimale tykkelse i det undersøgte 'StoTherm In Comfort' system.

Med rapporten ønskes følgende fugttekniske problemstillinger ved indvendig isolering belyst:

Er 'StoTherm In Comfort' en fugtteknisk robust løsning i fugtbelastningsklasse 2 og 3 med isoleringstykkelse 50-200 mm?

Er 'StoTherm In Comfort' en mere fugtteknisk robust løsning end en traditionel forsatsvæg?

Hvordan påvirkes varmetabet igennem konstruktionen af valget mellem 'StoTherm In Comfort' og en traditionel forsatsvæg?

Er 'StoTherm In Comfort' en fugtteknisk robust løsning ved de forventede fremtidige udvendige klimatiske forhold?

Til at afdække disse spørgsmål er der anvendt dynamiske simuleringer inkl. et parameter studie af teglsten, samt måleresultater fra et udført feltstudie.

'StoTherm In Comfort' viser sig generelt som en fugtteknisk robust løsning ved såvel 50 som 200 mm isoleringstykkelse. Dog er der specifikke opmærksomhedspunkter, der skal varetages. En traditionel forsatsvæg viser sig at være udfordret fugtteknisk ved visse af de detaljer, man kan forvente at finde i en ældre muret ydervæg. I forhold til fremtidigt klima er indvendig isolering generelt udfordret. Dog kan visse tiltag forbedre chancen for en funktionsduelig konstruktion.

## Indholdsfortegnelse

|     |                                                           |    |
|-----|-----------------------------------------------------------|----|
| 1   | Forord .....                                              | 1  |
| 2   | Abstract .....                                            | 2  |
| 3   | Indledning.....                                           | 3  |
| 3.1 | Baggrund .....                                            | 3  |
| 3.2 | Problemformulering.....                                   | 7  |
| 3.3 | Afgrænsning .....                                         | 7  |
| 3.4 | Læsevejledning.....                                       | 8  |
| 4   | Teori.....                                                | 10 |
| 4.1 | Varmeteori .....                                          | 10 |
| 4.2 | Fugtteori.....                                            | 14 |
| 4.3 | Skadesmekanismer .....                                    | 23 |
| 5   | Efterisoleringsmetoder – fordele og ulemper.....          | 28 |
| 5.2 | Metoder til indvendig isolering.....                      | 30 |
| 6   | Præsentation af feltstudie .....                          | 33 |
| 6.1 | Bygningen som den står .....                              | 33 |
| 6.2 | Tegningsmateriale og registrering af konstruktioner ..... | 34 |
| 6.3 | Nuværende forhold.....                                    | 36 |
| 6.4 | Isoleringstiltag ved oprindelig konstruktion .....        | 37 |
| 7   | Metode .....                                              | 42 |
| 7.1 | Bygningsundersøgelse Præstebakken 12A, Tårs .....         | 42 |
| 7.2 | Målinger med USB Loggere.....                             | 45 |
| 7.3 | Bestemmelse af materialeegenskaber.....                   | 47 |
| 7.4 | Dynamiske simuleringer.....                               | 50 |
| 7.5 | Bestemmelse materialetyper til simuleringer .....         | 54 |
| 7.6 | Fremtidigt klimascenarie.....                             | 57 |
| 7.7 | Beregningsmetode U-værdier.....                           | 58 |
| 8   | Resultater .....                                          | 59 |
| 8.1 | Forundersøgelse feltstudie .....                          | 59 |
| 8.2 | Efterundersøgelse .....                                   | 63 |
| 8.3 | Teglstens materialeegenskaber .....                       | 64 |
| 8.4 | Simulerede og monitorerede forhold .....                  | 67 |

|      |                                                         |     |
|------|---------------------------------------------------------|-----|
| 8.5  | Fremtidigt klimascenarie A1B ved simuleringstype 1..... | 84  |
| 8.6  | U-værdi beregninger .....                               | 87  |
| 9    | Diskussion .....                                        | 88  |
| 9.1  | For- og efterundersøgelse.....                          | 88  |
| 9.2  | Bestemmelse af teglstens egenskaber .....               | 90  |
| 9.3  | WUFI 2D simuleringer og målinger .....                  | 90  |
| 9.4  | Fremskrevet klima A1B for simuleringstype 1 .....       | 107 |
| 9.5  | Målinger kontra simuleringer .....                      | 111 |
| 9.6  | U-værdier .....                                         | 113 |
| 10   | Konklusion .....                                        | 115 |
| 10.1 | Fugtteknisk robusthed .....                             | 115 |
| 10.2 | Varmetab.....                                           | 116 |
| 10.3 | Fremskrevet klima.....                                  | 116 |
| 11   | Perspektivering.....                                    | 117 |
| 12   | Referencer .....                                        | 118 |
| 13   | Bilag .....                                             | 122 |

## 1 Forord

Nærværende rapport er den afsluttende del af uddannelsen Master i Bygningsfysik fra Aalborg Universitet. Rapporten omhandler indvendig isolering med udgangspunkt i to specifikke isoleringssystemer. Inspirationen til emnet stammer fra renoveringskurset, der er en del af 3. semester i masteruddannelsen.

Rapporten er udarbejdet sideløbende med vores arbejde hos hhv. Vendi Huset samt Sto Danmark. Vi vil i den sammenhæng gerne takke vores respektive arbejdspladser for denne uddannelsesmulighed, samt for at afgive arbejdstid.

Vi vil gerne takke vores familier og særligt Anja og Lene for forståelse og ikke mindst tålmodighed i processen. Særligt når vi er rejst, enten fysisk væk for at skrive i det skønne sommerhus i Sæby, eller bare ind i vores lille boble åndeligt.

Tak til Andreas og Nikoline for lån af hus til vores feltstudie.

En stor tak skylder vi vores kompetente og hurtigt-reagerende vejledere Ernst Jan de Place Hansen og Tessa Kvist Hansen. I har været en inspiration, og vi ved at jeres tålmodighed har været sat på prøve. Især i forhold til at begrænse os.

## 2 Abstract

This report highlights two specific methods of internal insulation of external brick walls. One method consists of a traditional internal wooden light-frame wall with mineral wool and the other method consists of an insulation-system with a capillary-active insulation, coated with a plaster system. The system is referred to as 'StoTherm In Comfort'. The insulation-system 'StoTherm In Comfort' is examined at a minimum and a maximum insulation thickness. The traditional wooden light-frame wall is examined with an insulation value that corresponds to the minimum value of the examined 'StoTherm In Comfort' system.

In this report the following questions regarding moisture technical issues by internal insulation of external brick-walls will be discussed:

Is 'StoTherm In Comfort' a moisture safe solution in moisture-class 2 and 3 with insulation thickness 50-200 mm?

Is 'StoTherm In Comfort' a better solution than a traditional internal wooden light-frame wall in terms of moisture-safety?

How is the heat loss affected by the choice between 'StoTherm In Comfort' and a traditional internal wooden light-frame wall?

Is 'StoTherm In Comfort' a robust solution regarding the expected future climatic conditions?

To uncover these questions, dynamic simulations including a parameter study of bricks have been performed, as well as measurements in a case building.

'StoTherm In Comfort' is generally a robust solution at both 50 and 200-mm insulation thickness in terms of moisture safety. However, there are specific key points to be taken into consideration. A traditional wooden light-frame wall turns out to be challenged by some of the details you can expect to find in an older brick wall. In relation to future climate, internal insulation is generally challenged, however, certain actions can improve the possibility to make the construction work.

### **3 Indledning**

Nærværende rapport er den afsluttende projektrapport på Master uddannelsen i bygningsfysik på Aalborg Universitet. Derudover skal rapporten danne grundlag for at beslutte om det indvendige isoleringssystem 'StoTherm In Comfort', skal markedsføres i Danmark af Sto Danmark.

Rapporten henvender sig altså både til faglige bedømmere af eksamensopgaven tilknyttet Aalborg universitet samt beslutningstagere i Sto Danmark.

Rapportens overordnede formål er at beskrive 'StoTherm In Comfort's tekniske egenskaber med særlig vægt på konstruktionsfugt og varmetab. Rapporten vil belyse isoleringssystemets funktionalitet selvstændigt, samt sammenligne det med en forsatsvæg, som fremstår som en mere traditionel indvendig efterisoleringsmetode.

Rapporten inkluderer både teoretisk simulering samt målinger i en feltstudie-bygning, med USB-loggere placeret i punkter af særlig interesse.

#### **3.1 Baggrund**

##### **3.1.1 Et klimaneutralt samfund**

I 2018 besluttede et samlet folketing, at Danmark i 2050 skal være et klimaneutralt samfund. Et klimaneutralt samfund er defineret som et samfund, hvor der ikke udledes mere drivhusgas end der optages. I dag findes der metoder, der kan optage drivhusgasser. F.eks. kan CO<sub>2</sub> renses fra udledningssgasser og anvendes til produktion af syntetiske brændstoffer. Det ændrer dog ikke på, at 2050 målet kræver en kraftig reduktion af drivhusgasudledning baseret på vores forbrug.

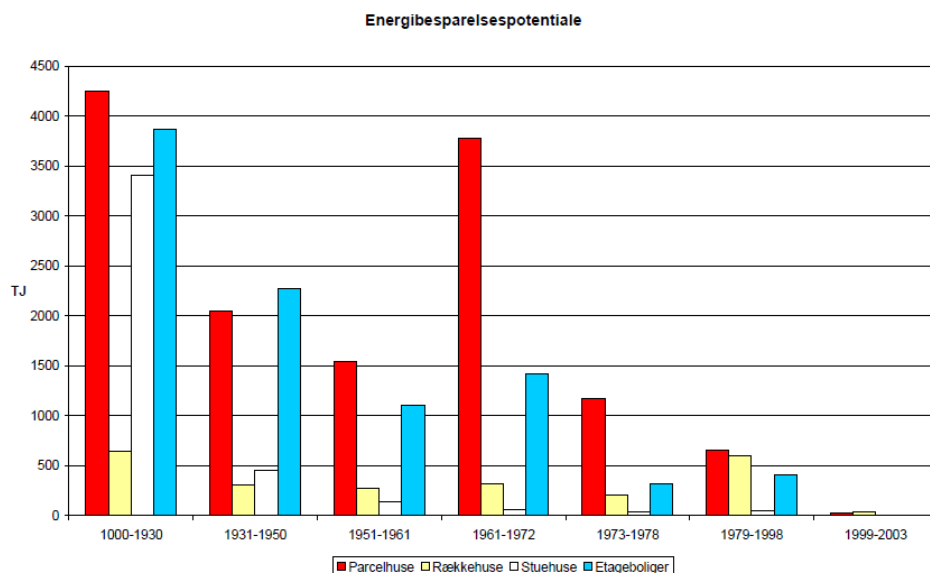
I 2017 forårsagede driften af danske bygninger ca. 23% af den samlede udledning af CO<sub>2</sub> ækvivalenter fra energiproduktion (1 s. 21). Derfor er det nødvendigt at fokusere på at nedbringe den drift-energi der anvendes i vores bygninger, for at målet om klimaneutralitet i 2050 kan opnås.

##### **3.1.2 Energibesparelser i byggeindustrien**

I de seneste bygningsreglementer er kravene til isolering og tæthed skærpet markant til klimaskærmen for nyopførte bygninger. Dette i et sådant omfang, at de indlejrede påvirkninger af byggematerialer i visse tilfælde har større påvirkning end selve driften i bygningens levetid (2 s. 4). I forhold til at nedbringe udledningen af CO<sub>2</sub> ækvivalenter fra nye bygninger, vil det altså være mere meningsgivende at rettet fokus mod materialer med en lav miljøpåvirkning ved produktion, end på yderligere energioptimering af klimaskærmen.

Det er derfor nærliggende at antage, at den største effekt i forhold udledningen af CO<sub>2</sub> ækvivalenter fra bygningsdrift kan opnås ved at energioptimere klimaskærmen i den store eksisterende boligmasse. Udledningen kan dog også reduceres ved øget opmærksomhed på bl.a. anvendelse af energibesparende husholdningsapparater, samt generelt et øget forbrug af vedvarende energi.

Den eksisterende boligmasse er en meget uhomogen størrelse. Skiftende tiders byggeskik og tilgængelighed af materialer har resulteret i forskelligartede klimaskærmsopbygninger. Da bygninger typisk er dimensioneret til en lang levetid, består store dele af vores eksisterende boligmasse af relativt gamle bygninger. De gamle bygninger har ofte utilstrækkeligt isolerede klimaskærm, der medfører et højt varmetab og energibehov. Figur 1 viser potentialet for energibesparelser fordelt på bygningsalder og -type.

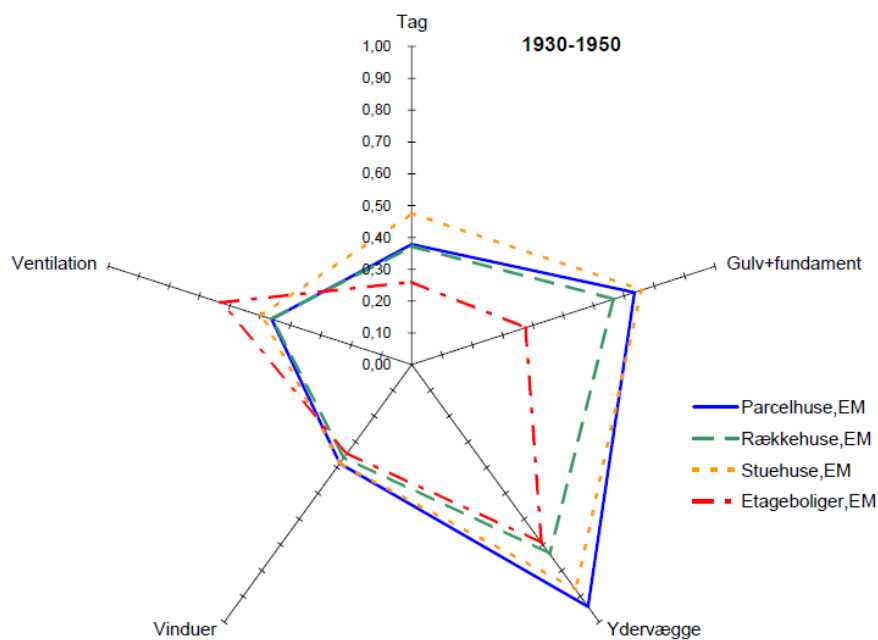


Figur 1. Potentialet for energioptimering fordelt på bygningens alder samt bygningstype. (3 s. 1) Energiforbrug og besparelser, notat)

Figur 1 viser tydeligt, at der er et stort potentiale for energibesparelser og dermed reduktion af ækvivalent CO<sub>2</sub> udledning for stort set alle typer af bygninger, bygget før 1930. Efterfølgende er billedet mere ujævnt fordelt på bygningstyper, men fra 1960 frem til 1972 ses der igen et meget stort potentiale for energibesparelser i parcelhuse. I denne periode blev drømmen om eget hus mere bredt økonomisk realistisk i befolkningen. Det resulterede i et boom i opførelsen af parcelhuse.

I bygninger bygget før 1960 har ydervægskonstruktionen generelt en relativ høj varmetransmissionsevne (U-værdi) (3 s. 3). I sammenhæng med et ofte stort transmissionsareal, gør det netop denne del af klimaskærmen til et oplagt fokusområde for at mindske varmetabet. Se Figur 2 som eksempel på bygningsdeles U-værdi baseret på perioden 1930-50.





Figur 2 De forskellige bygningsdeles varmetab for bygninger bygget i perioden 1930-1950 ( 3 s. 3) Energiforbrug og besparelser, Notat)

Det er tydeligt i figuren at ydervæggen generelt har en relativ høj U-værdi og dermed et højt varmetab.

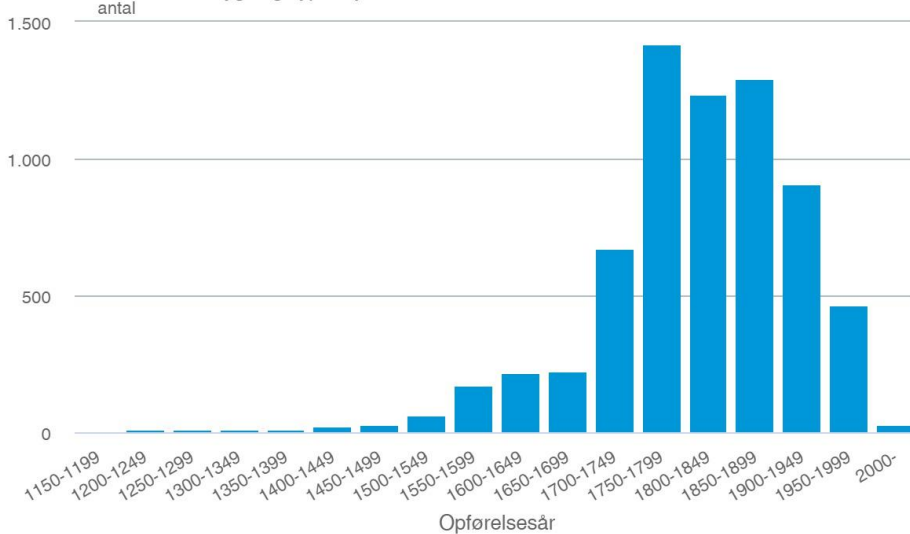
### 3.1.3 Potentialet ved indvendig isolering af ydervæggen

I Danmark har vi ca. 9000 fredede bygninger, og ca. 350.000 bygninger er blevet vurderet iht. Survey of Architectural Values in the Environment (SAVE modellen). Hovedparten af disse bygninger er belagt med restriktioner, der umuliggør ændringer i facadeudtrykket og dermed forhindrer en udvendig isolering. Hultursisolering er i visse tilfælde en mulighed, men langt fra altid.

En søgning på Danmarks statistik på aldersfordelingen over fredede bygninger giver et billede af, hvor mange fredede bygninger der er bygget i en periode hvor efterisolering af ydervæggen er ønskværdig, samtidigt med at en udvendig isolering i de fleste tilfælde ikke er mulig. Figur 3 viser aldersfordelingen over antal fredede bygninger i Danmark fordelt på byggeår.

### Fredede bygninger

Område: Hele landet | Bygningstype: Ejendomme i alt | Tid: 2019:



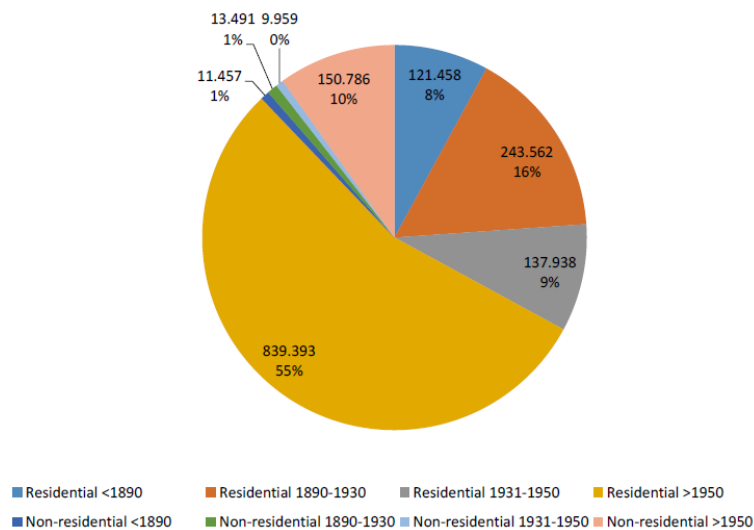
Figur 3. Antal af fredede bygninger i DK opdelt efter opførelsesår (4) [www.statistikbanken.dk](http://www.statistikbanken.dk)

Hulmursisolering er som nævnt en mulighed for ydervægsisolering i visse tilfælde, men da hule mure ikke blev benyttet før i det 20. århundrede vil dette ikke være en mulighed i bygninger fra før 1899. Som Figur 3 viser, er hovedparten af de nuværende fredede bygninger opført i en periode, hvor hule mure ikke blev benyttet.

Ved at isolere en ydervægskonstruktion indvendigt, kan det eksisterende facadeudtryk bibeholdes, hvor det enten ønskes eller hvor det er direkte krævet, samtidigt med at varmetabet igennem konstruktionen kan reduceres.

Udover fredede eller bevaringsværdige bygninger, er der generelt et stort energioptimeringspotentiale i den ældre eksisterende bygningsmasse. Eksempelvis er bygningen, som behandles i nærværende rapports feltstudie, hverken klassificeret som fredet eller bevaringsværdig. Trods det, antages der et stort energioptimeringspotentiale ved at efterisolere ydervæggen. I dag består ca. 35% af den eksisterende opvarmede bygningsmasse af bygninger bygget før 1950, svarende til over 500.000 bygninger (5 s. 29). Figur 4 viser aldersfordelingen af den nuværende opvarmede bygningsmasse i Danmark.

**Number of buildings of heated building stock**



Figur 4. Aldersfordelingen af eksisterende opvarmede bygninger i Danmark. I opvarmede bygninger bygget før 1950 må der, baseret på Figur 2, forventes et betragteligt varmetab. ( (5 s. 31) RI-Build)

### 3.2 Problemformulering

I afsnit 3.1.3 beskrives et potentiale for indvendig isolering af ydervægge. I alment teknisk fælleseje udtrykkes bygningsfysiske og særligt fugttekniske bekymringer ved de nuværende metoder til indvendig isolering af ydervægge.

Formålet med denne rapport er at afdække de bygningsfysiske aspekter ved nedenstående spørgsmål:

- Er StoTherm In Comfort en fugtteknisk robust løsning fra 50 - 200 mm isolering ved den nuværende anvendelse (fugtblastningsklasse 2)?
- Er StoTherm In Comfort en fugtteknisk robust løsning fra 50 - 200 mm isolering ved en anvendelse der øger fugtblastningsklassen i bygningen?
- Er StoTherm In Comfort en mere eller mindre fugtteknisk robust løsning end en traditionel forsatsvæg?
- Hvordan påvirkes varmetabet igennem konstruktionen i valget mellem StoTherm In Comfort og en traditionel forsatsvæg?
- Er StoTherm In Comfort en fugtteknisk robust løsning ved de forventede fremtidige klimatiske forhold?

### 3.3 Afgrænsning

Nærværende rapport fokuserer udelukkende på de bygningsfysiske aspekter af indvendig isolering med særlig vægt på fugt.

Vendingen, *Fugtteknisk robust*, er anvendt i ovenstående problemformulering. Med denne vending menes i nærværende rapport, at konstruktionen ikke er i risiko for, at der opstår fugtniveauer, der kan resultere i nedbrydning af materialer eller skimmelvækst, hvor det kan være sundhedsskadeligt for beboerne.

Måleperioden for de praktisk udførte testvægge begrænser sig til 3 måneder. Det havde været optimalt med en måleperiode på min. 12 måneder, som dermed ville inkludere alle fire årstider og disses påvirkninger på konstruktionen. Det har desværre ikke været muligt med en længere måleperiode i forbindelse med denne rapport.

Nedenstående relevante emner behandles ikke i rapporten:

- Miljøpåvirkning ved produktion af byggematerialer. Man kan argumentere for at det er omsonst at efterisolere, for at nedbringe udledning, såfremt produktionen af de indgående komponenter til efterisoleringen udleder store mængder CO<sub>2</sub> ækvivalenter.
- Indeklima forhold, eksempelvis overophedning, som i ovenstående punkt. Det vil det ikke være meningsgivende at efterisolere, såfremt en efterisolering resulterer i en overophedning, der skal håndteres ved en energimæssig tung nedkøling.
- Økonomi i forbindelse med tiltagene.

### **3.4 Læsevejledning**

Rapporten har specifikke modtagere, som beskrevet indledningsvis i afsnit 3. Dog er det forfatterens ambition at skrive rapporten i et sprog der gør den bredt forståelig. Nedenfor findes en kort læsevejledning, der beskriver indholdet af de specifikke afsnit i rapporten.

**I afsnit 4** beskrives almen teknisk teori, der berører emner af relevans for indvendig isolering.

**I afsnit 5** præsenteres fordele og ulemper ved forskellige efterisoleringsmetoder til ydervægge.

**I afsnit 6** præsenteres det udførte feltstudie. Her vil såvel den oprindelige bygning blive præsenteret, samt de udførte tiltag.

**I afsnit 7** beskrives den anvendte metode ved teoretiske simuleringer og beregninger samt ved de praktisk udførte målinger i testvægge.

**I afsnit 8** præsenteres resultaterne fra såvel de teoretiske simuleringer og beregninger samt fra målingerne i de udførte testvægge.

**I afsnit 9** diskuteres relevante resultater fra afsnit 8. I diskussionsafsnittet vil der være fokus på kritiske- samt potentielt kritiske resultater.

**I afsnit 10** præsenteres konklusionen, der er baseret på diskussionen.

I **afsnit 11** findes en perspektivering over problematikken med isolering samt beskyttelse af historistiske bygninger.

I **afsnit 12** ses referenceliste.

I **afsnit 13** fremgår rapportens bilag.

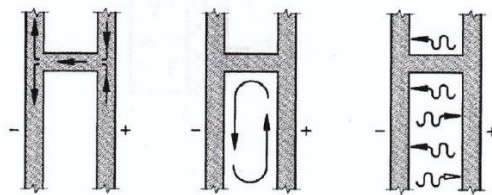
## 4 Teori

Relevante aspekter fra bygningsfysikken i forhold til indvendig efterisolering behandles i dette afsnit. I afsnit 4.1 behandles almen varmeteori. Der inddrages også varmeteoretiske aspekter som er benyttet i forbindelse med en materialeparameterundersøgelse på tegl, som beskrives senere i rapporten. Afsnit 4.2 beskriver den relevante almene fugtteori. I afsnit 4.3 og 4.4 beskrives hhv. fugtbetingede skadesmekanismer, og fordele og ulemper ved kendte metoder for indvendig efterisolering af ydervægge.

### 4.1 Varmeteori

Drivkraften i varmetransport igennem en konstruktion, er en forskel i temperatur på hver side af konstruktionen.

Varmetransport kan foregå på tre måder, enten ved konvektion, ved stråling eller ved ledning. De tre forskellige mekanismer illustreres i Figur 5. I denne rapport behandles homogene konstruktioner uden hulrum, derfor behandles primært varmetransport ved ledning.



Figur 5. De tre mulige måder for varmetransport, ledning, konvektion og stråling ( (6 s. 2). Master i Bygningsfysik - Varmelære teori)

#### 4.1.1 Konvektion

Varmetransport ved konvektion foregår i luft eller væsker. Det kan eksempelvis ske i et luftfyldt hulrum i en ydervæg med en temperaturforskel på begge sider (6 s. 2).

#### 4.1.2 Stråling

Varmetransport ved stråling kan foregå mellem 2 flader i et hulrum med forskellige temperaturer. Eksempelvis vil der foregå varmetransport mellem glasflader i en flerlags rude (6 s. 2).

#### 4.1.3 Varmeledning

Varmetransport ved ledning foregår ved, at molekyler med høj bevægelsesenergi (varme) ved stød overfører energi til molekyler med lav bevægelsesenergi (kolde).

## U-værdi

Et materiales evne til at lede varme (varmeledningsevne) udtrykkes ved dets lambda-værdi. Herefter beskrevet ved  $\lambda$ -værdi.  $\lambda$ -værdien opgives i W/(m K). Et materiale med en høj  $\lambda$ -værdi transporterer altså varmen bedre end et materiale med en lav  $\lambda$ -værdi. Dermed isolerer et materiale med en lav  $\lambda$ -værdi bedre end et materiale med en høj  $\lambda$ -værdi. Et materiale med en stor andel af stillestående luft og dermed minimal molekylebevægelse, som eksempelvis EPS, vil have en lav  $\lambda$ -værdi i størrelsesordenen 0,033-0,036 W/(m K) (7), mens et tungere og mere åbent materiale som tegl vil have  $\lambda$ -værdi på 0,3-0,84 W/(m K) (8 s. 243).

Oftest består en konstruktion af flere forskellige lag, og det er derfor interessant at bestemme den samlede konstruktions varmeledningsevne (U-værdi). Ved at kende komponenternes tykkelse, deres  $\lambda$ -værdi samt de ind- og udvendige overgangsisolanser, kan U-værdien bestemmes i henhold til Ligning 1.

*Ligning 1*

$$R=d/\lambda\text{-værdi}, U=1/(\text{sum } R)$$

$$R: \text{isolans } [(m^2 K)/W]$$

$$d: \text{tykkelse } [m]$$

$$\lambda\text{-værdi: varmeledning } [W/(m K)]$$

En U-værdi opgives i W/(m<sup>2</sup> K). En U-værdi korrigeres evt. for kuldebroer, som eksempelvis spalter i isoleringslaget (9 s. 23). bindere eller andre gennembrydninger af det isolerende lag (9 s. 60). En sådan korrektion vil eksempelvis være nødvendig ved en fast binder, der gennembryder hulmursisoleringen. Korrektionen bestemmes via Ligning 2 (9 s. 60).

*Ligning 2*

$$\Delta U_f = \alpha * \frac{\lambda_f A_f n_f \left( \frac{R_1}{R_T} \right)}{d_1}$$

$$\alpha = \text{Koefficient angivet i DS418 til } 0,8$$

$$\lambda_f = \text{Varmeledningsevnen for binderen}$$

$$A_f = \text{Tværsnittetsarealet af binderen i } m^2$$

$$n_f = \text{Antal af bindere pr } /m^2$$

$$R_1 = \text{Isolansen af isoleringslaget med bindere } ((m^2 K)/W)$$

$$R_T = \text{Konstruktionens samlede isolanse } ((m^2 K)/W)$$

$$d_1 = \text{Tykkelse af isolering indeholdende bindere i } m$$

Bygningsreglementet angiver specifikke krav til U-værdien for klimaskærmen ved en ombygning af en bygningsdel. En efterisolering af en

ydervæg må regnes som en ombygning af bygningsdelen. I et sådan tilfælde skal der opnås en U-værdi på min. 0,18 W/(m<sup>2</sup> K) (10 s. 314).

U-værdi kravet kan dog fraviges, såfremt tiltaget ikke er rentabelt eller udgør en risiko for fugtskader. Alternativt kan bygningsreglementet efterleves iht. renoveringsklasserne for eksisterende bygninger (10 s. 305).

#### Linjetab

Udover tab igennem selve klimaskærmens flade, er der i BR18 krav til varmetab i klimaskærmens lineære konstruktioner. Da der er tale om et lineært tab (linjetab) er enheden ikke W/(m<sup>2</sup> K) men W/(m K). Tabel 1 viser linjetabskravene, der er relevante ved en ydervægskonstruktion jf. BR18 (10 s. 314).

*Tabel 1 Relevante linjetab krav for en ydervægskonstruktion jf. BR18 (10 s. 314)*

| Bygningsdel                                   | Linjetab (W/(m K)) |
|-----------------------------------------------|--------------------|
| Fundamenter                                   | 0,12               |
| Samling mellem ydervæg og vinduer eller lign. | 0,03               |

Typisk bestemmes linjetabet ved tabelopslag i eksempelvis DS 418, men linjetabet kan også beregnes mere specifikt (9 s. 63).

#### Transmissionstab

Når U-værdien er bestemt, kan den varmemængde, der strømmer igennem en konstruktion fastlægges (transmissionstab) ved at benytte Ligning 3.

*Ligning 3*

$$\phi_t = U * A * \Delta T$$

$\phi_t$ : Transmissionstab i W

U: U-værdi i W/(m<sup>2</sup> K)

A: Areal af fladen i m<sup>2</sup>

$\Delta T$ : Temperaturforskellen mellem bygningsdelens to sider.

Et samlet transmissionstab via U-værdi og linjetab igennem bygningens klimaskærm samt bygningens tab ved ventilation, anvendes til at dimensionere den nødvendige effekt, som varmekilden i bygningen skal kunne yde.

#### 4.1.4 Bestemmelse af varmekapacitet

Et materiales specifikke varmekapacitet kan bestemmes ved at inddrage varmeteorien 1. hovedsætning. I dagligt sprog siger man ofte at et varmt legeme indeholder termisk energi. Tilføres energi til et materiale, forøger man molekylerne bevægelse i materialet. Dette vil medføre en



temperaturstigning i materialet, og man siger, at man har forøget materialets termiske energi. Dette beskrives også ofte som materialets indre energi. (11 s. 3).

Når man ændrer et materiales temperatur, gælder det for faste stoffer, at den energi man tilføjer et materiale ved fast tryk, for at opnå en temperaturstigning, er næsten uafhængig af, hvor på temperaturskalaen man befinder sig. Det gælder dog kun hvis der ikke sker faseændringer, som der eksempelvis sker ved vands omdannelse til is ved 0 °C eller ved kogepunktet 100 °C. Energien tilført er proportional med massen af materialet og temperaturstigningen den tilførte energi medfører. Dette kan udtrykkes ved en generel ligning:

*Ligning 4*

$$\Delta E = c * m * \Delta T$$

*$\Delta E$ : Energi tilført i J*

*$c$ : Materialets specifikke varmekapacitet i J/(kg K)*

*$m$ : Massen af materialet i kg*

*$\Delta T$ : Temperaturforskellen energitilførslen medfører.*

Den generelle ligning (ligning 4) er udledt af varmeteoriens 1. hovedsætning (11 s. 9). hvor energitilførsel også er afhængig af materialets volumenudvidelse ( $\Delta V$ ) og påvirkning af det ydre tryk ( $\Delta P$ ) ved ændring af materialets temperatur. Opvarmning af faste stoffer og væsker i 'åbne' systemer, vil medføre forsvindende lille volumenforøgelse og lille påvirkning af det ydre tryk (atmosfæren). Til simple (køkkenbords-)forsøg kan man derfor tillade sig at se bort fra disse to led. Formlen kan så benyttes til at opstille en ligning for varmeenergimåling eller en såkaldt kalorimetri. Her kan man udnytte, at der i et system ikke udveksles energi til omgivelserne via det man kalder 'arbejde eller "gnidning", men at energien udelukkende bliver i systemet. (11 s. 11). Dvs.

*Ligning 5*

$$\Delta E = 0$$

Varmekapaciteten af et givet materiale kan bestemmes via Ligning 5. Konstanten  $c$  (ligning 6). kan bestemmes ved at betragte varmeoverførsel fra en opvarmet materialeprøve (f.eks af tegl) til en given mængde vand i en beholder, som det ses i Ligning 6, hvor varmekapacitet for vand og beholder er kendte.

*Ligning 6*

$$\Delta E = \Delta E_{\text{beholder}} + \Delta E_{\text{vand}} + \Delta E_{\text{tegl}} = 0$$

*hvor*

$$\Delta E_{\text{beholder}} = c_{\text{beh}} * m_{\text{beh}} * (t_{\text{slut,beh}} - t_{\text{start,beh}})$$

$$\Delta E_{vand} = c_v * m_v * (t_{slut,v} - t_{start,v})$$

$$\Delta E_{tegl} = c_{tegl} * m_{tegl} * (t_{slut,tegl} - t_{start,tegl})$$

I disse udtryk vil eneste ubekendte være teglens varmekapacitet hvor følgende udtryk så kan opstilles:

Ligning 7

$$c_{tegl} = - \frac{c_{beh} * m_{beh} (t_{slut,beh} - t_{start,beh}) + c_v * m_v * (t_{slut,v} - t_{start,v})}{m_{tegl} * (t_{slut,tegl} - t_{start,tegl})}$$

## 4.2 Fugtteori

### 4.2.1 Fugtkilder

I forhold til at vurdere om en renoverings- eller efterisoleringsmetode er fugtteknisk robust, er det vigtigt at bestemme de specifikke fugtkilder, der kan påvirke konstruktionen. Fugt kan stamme fra flere kilder. Bygningens udformning, placering samt brug er vigtige parametre til bestemmelse af bygnings fugtpåvirkning. I dette afsnit behandles fugtkilderne nedbør, grundfugt samt luftfugtighed dybere.

#### Nedbør

Nedbør i form af regn, sne eller hagl påvirker bygningers udvendige overflader. På vindstille dage påvirkes primært vandrette eller skrå overflader, som tage eller altaner. I Danmark optræder nedbør ofte i kombination med vind, kaldet slagregn, og derved kan nedbøren træffe lodrette overflader, som eksempelvis en ydervæg. Hvor stor en mængde slagregn der træffer en lodret bygningsdel, påvirkes af andre forhold end blot vindstyrke og regnintensitet. Bl.a. spiller regndråbens størrelse, områdets topografi samt bygningens placering og orientering en rolle. I forhold til geografisk placering kan det nævnes, at en bygning placeret på Fanø udsættes for ca. den dobbelte slagregnsbelastning, som en tilsvarende bygning placeret i København. I Danmark er en udvendig overflade vendt mod sydvest mest udsat for slagregn (8 s. 54-55).

#### Grundfugt

Grundfugt består af fugt der fra jorden påvirker en bygningsdel. En bygningsdel der er placeret under grundvandsspejlet, vil blive påvirket af et vandtryk. Vandtrykket på en sådan bygningsdel stiger, desto dybere den bygges under grundvandsspejlet. Grundvandsspejlet varierer hen over året, typisk med et maksimum i april måned. Variationerne er afhængige af jordtypens permeabilitet for vand (8 s. 56). Særligt ved fine jordtyper kan den kapillære stighøjde være høj. I visse tilfælde kan grundvand suges helt op til 10 m fra grundvandsspejlet. Kommer det her i berøring med bygningsdele med høj kapillarsugeevne, vil disse konstruktioner opfuges. Overfladevand stammer fra nedbør og kan påvirke bygningen. Både ved direkte kontakt med bygningsdele, samt ved nedsivning langs

bygningsdele (8 s. 57). Denne fugtkilde antages at øges i takt med de forventede fremtidige klimaændringer (12). Jorden omkring en bygning indeholder altid vanddamp. Normalt regnes der med en relativ fugtighed i jorden på 100% eller tæt derpå. Det vil sige at man skal forvente at jorden omkring bygningsdele som kældervægge, kældergulve samt terrændæk altid er fugtmættet (8 s. 57).

### Luftfugtighed

Luft indeholder altid en vis mængde fugt. Der er dog store variationer i fugtindholdet afhængigt af, om man betragter luften ude eller inde og på hvilken årstid, man betragter luften i.

Udeluftens vanddampindhold svinger fra ca. 5 g/m<sup>3</sup> om vinteren til ca. 10 g/m<sup>3</sup> om sommeren. Der kan dog være relativt store variationer. Eksempelvis kan der på en varm og fugtig sommerdag være et vanddampindhold i luften på op til 15 g/m<sup>3</sup> (8 s. 58). Den resulterende relative luftfugtighed afhænger af temperaturen. Jo højere temperatur jo mere fugt i g/m<sup>3</sup> kan luften indeholde.

Indvendigt i bygninger tilføres der yderligere fugt til den udeluft bygningen ventileres med. Tilførslen kan ske igennem forskellige typer af aktiviteter. Eksempler er vist i Tabel 2.

*Tabel 2. Fugtproduktion ved forskellige indendørs aktiviteter (8 s. 61). SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger)*

| Fugtkilde                      | Fugtproduktion (kg/dag) |
|--------------------------------|-------------------------|
| Mennesker (ånding og sved)     | 3,5                     |
| Tøjtørring (ophængt indendørs) | 1,8                     |
| Personlig hygiejne             | 1,3                     |
| Madlavning                     | 0,9                     |
| Opvask                         | 0,4                     |
| Rengøring af bolig             | 0,2                     |
| Planter                        | 0,2                     |
| Diverse                        | 0,2                     |

Som i udeluften, er der ligeledes i indeluften variationer hen over året. Man kan forvente den største relative luftfugtighed inde fra august til oktober (8 s. 60). Det skyldes bl.a. at udeluften, der anvendes til ventilation, har et højt vandindhold (g/m<sup>3</sup>) i denne periode. Perioden er samtidig udenfor fyringssæsonen. Opvarmet indeluft vil kunne indeholde mere fugt i g/m<sup>3</sup> med lavere RF som konsekvens.

Da en bygnings brug giver store variationer i luftfugtigheden i indeluften, har man kategoriseret bygninger iht. fugtbelastningsklasser. En given fugtbelastningsklasse kan anvendes til at bestemme hvilken forventelig indvendig luftfugtighed, en bygningsdel udsættes for. Der er 5 fugtbelastningsklasser. Se Tabel 3 for forklaring af klasserne.

Tabel 3. De 5 fugtbelastningsklasser (SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger).

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

<sup>1</sup> I Danmark anses en bolig for at have normal ventilation, hvis bygningsreglementets krav om ventilation er opfyldt.

<sup>2</sup> Beboelsestætheden kan fx være ukendt i lejeboliger.

<sup>3</sup> I Danmark henregnes idrætshaller med mange tilskuere til fugtbelastningsklasse 3.

I Tabel 4 kan man se hvilken forventelig max. relativ luftfugtighed man kan finde i en bygning, baseret på bygningens fugtbelastningsklasse samt måned.

Tabel 4. Variationer over året i de forskellige fugtbelastningsklasser ( 8 s. 66). SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger med egne markeringer)

| Måned     | Luft-temperatur | RF <sub>ude</sub> | 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  |

Af Tabel 4 kan man udlede, at man i januar måned kan forvente en indvendig max. relativ luftfugtighed i fugtbelastningsklasse 2 på 46% i sammenhæng med en temperatur på 20°C. Se røde markeringer i Tabel 4.

#### 4.2.2 Fugttransport

Fugttransport sker på grund af en drivkraft, en såkaldt potentialeforskel. F.eks. vil der ske en fugttransport igennem en konstruktion med porøse materialer ved en forskel i vanddampindhold i ude- og indeluften på hver side af en ydervægskonstruktion. Fænomenet er meget analog til varmetransport, der beskrives i afsnit 4.1.3. Fugt kan transporteres i såvel væske som dampform (8 s. 40-41). Herunder beskrives kort de tre

primære transportmetoder: diffusion, konvektion samt kapillartransport.

### Diffusion

Bevægelse af vandmolekyler sker fra et område med stor koncentration til et område med mindre koncentration (8 s. 42). Der søges altså fugtligevægt. Denne molekyletransport kaldes diffusion. Fugttransport ved diffusion sker i såvel luft som ind og ud af porøse materialer. Hastigheden af diffusionen bestemmes af, hvor god plads molekylerne har til at røre sig. I luft sker diffusion hurtigt, dog langsommere ved lave temperaturer end ved høje (8 s. 42). Diffusionen ind og ud af porøse materialer er betinget af materialets porestruktur (8 s. 43). Eksempelvis er reduktionen i diffusionen begrænset ved et materiale med meget store porer, mens reduktionen er større i et materiale med en finere porestruktur. Dette skyldes, der ganske enkelt er større risiko for sammenstød med porevægge og med andre molekyler, hvorved bevægelsesfriheden for molekylerne nedsættes.

### Konvektion

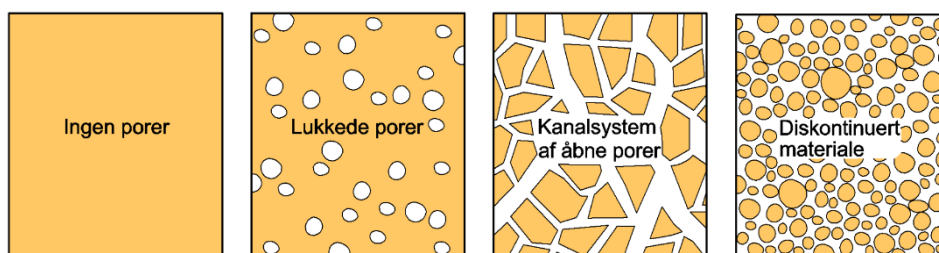
Ved konvektion sker fugttransporten ved luftstrømninger, der transporterer fugtig luft med sig. Luftstrømningen er forårsaget af en lufttrykforskel, enten på grund af vindtryk, mekanisk ventilation eller temperaturforskelle (8 s. 46). Fugttransport ved konvektion kan ske igennem meget porøse materialer, som eksempelvis mineraluld, eller ved utætheder i klimaskærmen. Da der er stor fokus på at opbygge konstruktioner således at fugttransport ved konvektion undgås, samt at denne transportform kun forekommer ved meget porøse materialer, samler interessen sig typisk om fugttransport ved konvektion igennem utætheder (8 s. 50). Eksempelvis kan der på en blæsende dag opstå en lufttrykforskel mellem inde og ude på læsiden af en bygning. I denne situation vil lufttrykforskellen kunne resultere i en betragtelig fugttransport ved konvektion fra den indvendige side af konstruktionen til den udvendige side igennem en utæthed.

Fugttransport ved diffusion er den dominerende faktor ved små utætheder, men vokser utæthederne til over 0,1 mm, bliver fugttransport ved konvektion den dominerende faktor (8 s. 51).

### Kapillartransport

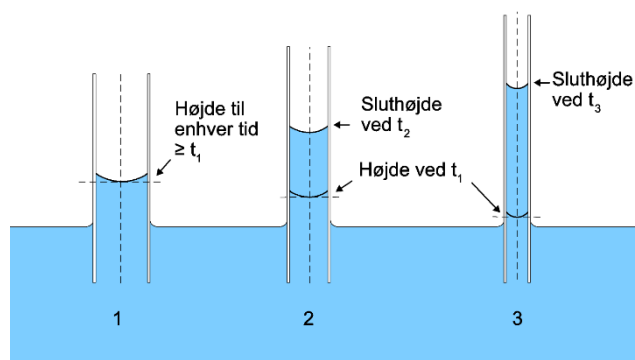
Kapillar fugttransport sker altid fra våd mod tør og kan ske i alle retninger.

De fleste materialer der anvendes i byggeriet, har en porestruktur der i varierende grad kan optage fugt via enten vanddamp, eller i væskeform. Undtagelser herfor er metaller, og glas som er helt tætte (8 s. 23). Figur 6 viser eksempler på porestrukturopbygninger i forskellige materialer.



Figur 6. Porestruktur i typiske byggematerialer ( (8 s. 25) SBI-anvisning 224, Fugt i Bygninger).

Et materiale uden porer optager ikke fugt. I et materiale med lukkede porer optages der ingen eller yderst begrænsede mængder fugt. I materialer med kanalsystemer af åbne porer og i et diskontinuert materiale vil der optages fugt i varierende grad. Til disse kategorier tilhører mange almindeligt anvendte byggematerialer, som eksempelvis tegl, porebeton og mineraluld (8 s. 29). Porernes størrelse og form har stor betydning for et materiales fugtoptagelse. Eksempelvis vil en teglsten med en ret grov porestruktur meget hurtigt optage fugt, såfremt den nedsænkes i vand, trods en relativ lav kapilær stighøjde. Derimod vil et materiale med en finere porestruktur langsommere opfugtes, men den kapilære stighøjde vil være større (8 s. 25-26). Se Figur 7 for en illustration af stighøjde afhængig af porestørrelse.

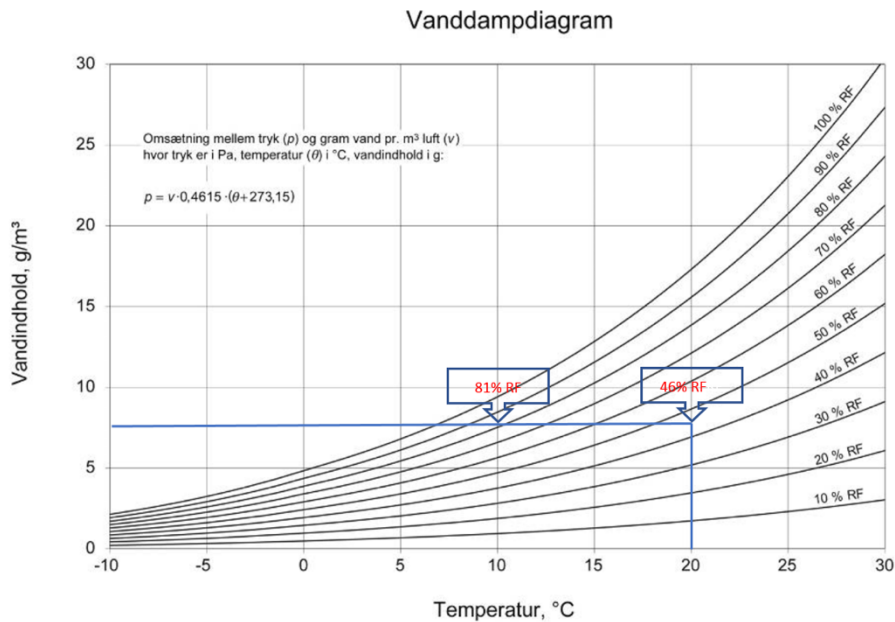


Figur 7. Stighøjden ved forskellige porer størrelser ( (8 s. 26). SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger)

#### 4.2.3 Relativ fugtighed

Fugt i dampform beskrives ofte som relativ fugtighed (RF). RF beskriver i % hvor fugtmættet omgivelserne er i forhold til den maximale fugtmængde, der kan indeholdes ved en given temperatur. Desto højere temperatur, desto mere absolut fugt kan materialet indeholde. Derfor falder RF ved den samme absolutte fugtmængde i et materiale, når temperaturen stiger, og modsat stiger RF, når temperaturen i et materiale falder ved samme absolutte fugtmængde. I fugtbelastningsklasse 2 kan der indvendigt antages en max. relativ luftfugtighed på ca. 46 % ved en indvendig temperatur på ca. 20 °C (ca. 7,5 g/m<sup>3</sup> absolut fugtmængde) i januar måned (8 s. 66). Antager man, at temperaturen falder til 10 °C, vil

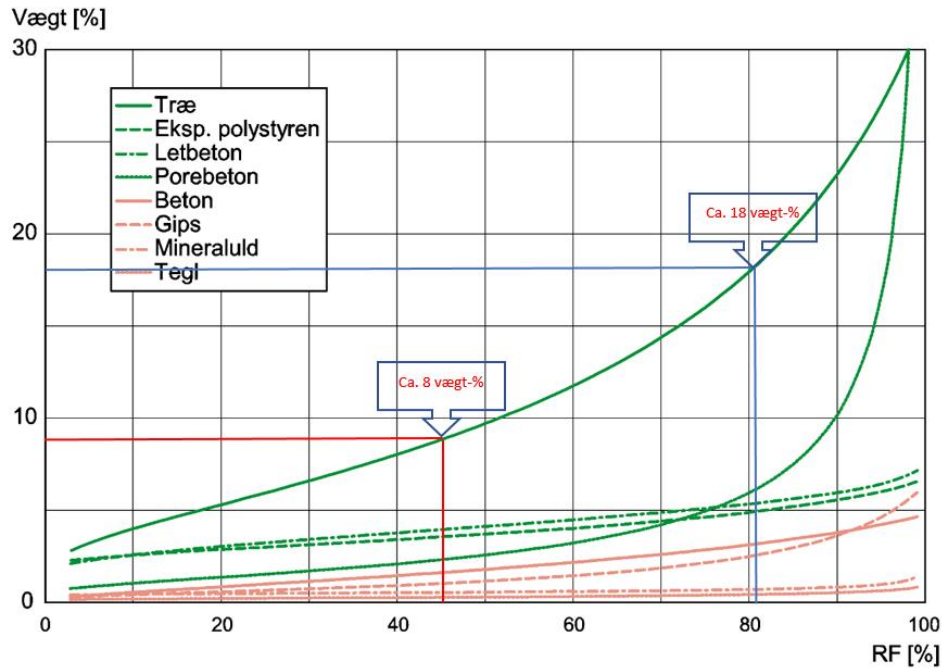
faldet resultere i en stigning i den relative luftfugtighed til ca. 81 %, som afbildet på Figur 8.



Figur 8. Ved egne påtegninger vises, hvorledes den relative fugtighed, ved et ensartet absolut vandindhold, påvirkes af temperatur ændringer ( 8 s. omslag) SBI Anvisning 224, Fugt i bygnin-ger).

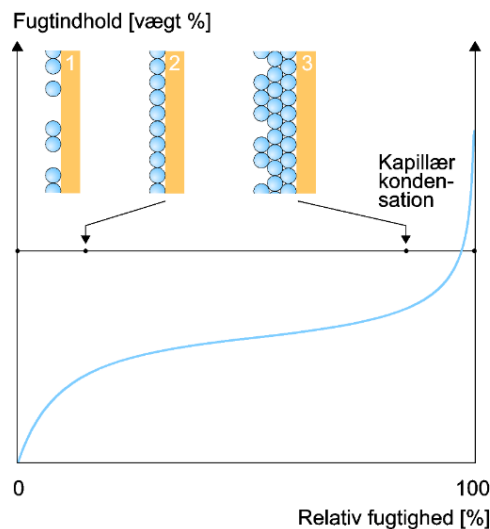
#### 4.2.4 Absolut vandindhold

Det absolutte vandindhold i et materiale eller i luften er ikke afhængig af temperaturen. Den absolutte fugtighed, eller det absolutte vandindhold er et mål for hvor meget faktisk fugt eller vand, der er i et materiale eller i luften. Da fugt søger ligevægt, vil der være sammenhæng mellem eksempelvis den relative luftfugtighed og et materiales absolutte fugtighed. Ved RF-niveauer på op til 100 %, kan denne sammenhæng findes ved hjælp af sorptionskurver, som vist i Figur 9. Det kan konstateres, at ved en relativ luftfugtighed på 46 % vil træfugten for et stykke tømmer i tilknytning til et rum være ca. 8 vægt-%. Såfremt den relative luftfugtighed stiger til 81 %, stiger træfugten i det samme stykke tømmer stige til 18 vægt-%. Som det ses i Figur 9, er der ikke tale om et lineært forhold mellem stigningen i RF og stigningen i vægt-% fugt. Derfor vil en stigning i RF til ca. 76 %, resultere i en stigning i vægt-% fugt til 12,5 % for det specifikke stykke tømmer.



Figur 9. Sammenhængen, ved egne påtegninger, mellem RF på hhv. 46 % (rød linje) og 81 % (blå linjer) og træfugten i vægt-% ( 8 s. omslag). SBI Anvisning 224, Fugt i bygninger).

Sorptionskurvens form afhænger af det specifikke materiales porestrukturs evne til at optage og afgive fugt. I Figur 10 ses hvorledes porevæggene i et tørt materiale hurtigt optager vandmolekyler, hvorefter hastigheden sænkes når porevæggene er dækket af vandmolekyler for at stige igen grundet kapillarkondensation ved de allerhøjeste RF-værdier (8 s. 32).



Figur 10. Fremstilling af et unavngivet materials sorptionskurve ( 8 s. 32). SBI-anvisning 224 Fugt i bygninger).

Som det ses i Figur 9, er der stor forskel på forskellige materials sorptionsevne. Eksempelvis accelererer et materiale som porebeton voldsomt i vægt % fugt ved en RF på ca. 90 % og kurven bliver derefter nærmest



lodret. Forskellen afhænger i høj grad af materialernes porestruktur (8 s. 30).

#### 4.2.5 Fugtligevægt for materiale i parameterstudie

De basale fugtteorier beskrevet i afsnit 4.2.4 kan benyttes i et simpelt materialeparameterstudie. I nærværende rapport ønskes det at bestemme sorptionskurven for et specifikt materiale. Kendes denne kurve, vil man bedre kunne vælge et tilsvarende materiale med tilnærmet samme materialeparametre fra en database i et givet simuleringsprogram.

Placeres to forskellige materialetyper i et lukket system, vil de over tid gå i fugtligevægt med hinanden. (8 s. 34). Som det ses i Figur 9, gælder det for de fleste materialetyper, at det er ved høj RF at sker den største acceleration af materialets vandoptag. Det er derfor interessant at fastlægge et givet materiales vandoptag i denne del af kurven. En fast høj relativ luftfugtighed kan sikres via saltopløsninger, placeret i en lukket beholder med forholdsvis lille volumen. Et studie fra 1976 påviser mættede saltopløsningers påvirkning af RF i lukkede systemer. Eksempelvis påvises, at natriumklorid (almindeligt salt) ved 20 °C kan fastholde en RF på ca. 75,5 % i et lukket system (13 s. 92). Tilsvarende vil en mættet saltopløsning af kaliumklorid ved 20 °C kunne fastholde en RF på 85,1 % (13 s. 93). Luftfugtigheden, som disse to mættede saltopløsninger kan opretholde ved forskellige temperaturer, fremgår af Figur 11.

| T<br>°C | Sodium<br>Chloride | Potassium<br>Chloride |
|---------|--------------------|-----------------------|
| 0       | 75.51 ± 0.34       | 88.61 ± 0.53          |
| 5       | 75.65 ± 0.27       | 87.67 ± 0.45          |
| 10      | 75.67 ± 0.22       | 86.77 ± 0.39          |
| 15      | 75.61 ± 0.18       | 85.92 ± 0.33          |
| 20      | 75.47 ± 0.14       | 85.11 ± 0.29          |
| 25      | 75.29 ± 0.12       | 84.34 ± 0.26          |
| 30      | 75.09 ± 0.11       | 83.62 ± 0.25          |

Figur 11 Sammenstilling af tabeller for de to mættede saltopløsninger natriumklorid (Sodium Chloride) og kaliumklorid (Potassium Chloride). Egen påtegning af rød linje viser eksperimentel bestemmelse af RF i lukket system ved brug af given saltopløsning ved 20 °C. Resultater er udklip fra rapporten: "Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions". (13).

Placeres et prøveemne af et bestemt materiale i en lukket beholder med mættet saltopløsning som beskrevet, vil der over tid indtræffe fugtlige-vægt mellem emnet og luften i beholderen med den givne RF. Når dette punkt indtræffer, kan massen af emnet i opfugtet tilstand ved given RF bestemmes ved simpel vejning. Herudover skal volumen af emnet bestemmes.

Inden forsøgsopstart bestemmes densitet af materialet i tør tilstand.

Ligning 8

$$\rho_{\text{tør}} = \frac{\text{masse}_{\text{tør}}}{\text{volumen}}$$

Når prøveemnet er gået i fugtligevægt med luften med den respektive saltopløsning, bestemmes densitet af materiale i opfugtet tilstand.

Ligning 9

$$\rho_{\text{våd}} = \frac{\text{masse}_{\text{våd}}}{\text{volumen}}$$

Fugtindholdet i materialet kan nu bestemmes ved den givne RF.

Ligning 10

*Fugtmængde i materiale*<sub>given RF</sub> =  $\rho_{\text{våd materiale}} - \rho_{\text{tør materiale}}$ , hvor

$\rho_{\text{tør materiale}}$ : Densitet udtørret materiale i  $\text{kg/m}^3$

$\rho_{\text{våd materiale}}$ : Densitet 100% opfugtet materiale i  $\text{kg/m}^3$

Fugtmængden i materialet angives i  $\text{kg/m}^3$ . Når punkterne ved hhv. 0 % RF, 75 % RF, 85 % RF samt 100 % RF er bestemt, kan sorptionskurven optegnes.

#### 4.2.6 Kapilær fugttransport i materiale i parameterstudie

Den præsenterede teori omkring kapilær fugttransport i afsnit 4.2.2 kan bruges eksperimentelt til at undersøge porøse bygningsmaterialers kapillaritet. Ved at gøre et prøveemne af et materiale diffusionstæt på alle flader, så der ikke afgives fugt til omgivelserne, med undtagelse af en plan skarpt defineret sugeflade, kan et porøst bygningsmateriales kapillaritet beregnes ved at registrere opsuget fugt over tid. Opsugningsmålingerne omregnes til opsuget masse pr. arealenhed med følgende udtryk:

Ligning 11

$$Q_v = \frac{m_t - m_{50}}{A}, \text{ hvor}$$

$Q_v$ : masse af opsuget vand pr  $\text{m}^2$  sugeflade i  $\text{kg/m}^2$

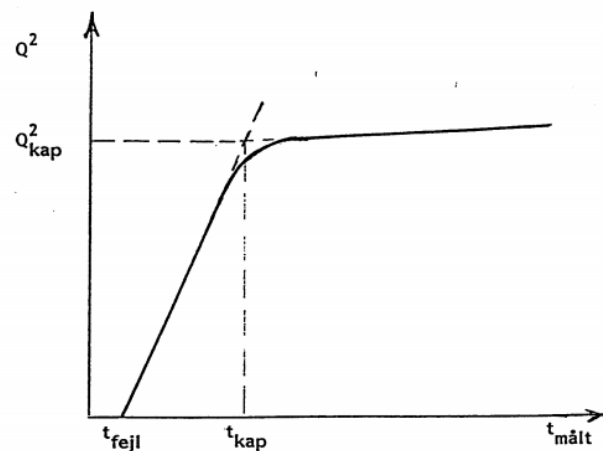
$m_t$ : masse af materiale efter sugning til tiden  $t$  i sekunder  $s$

$m_{50}$ : masse af materiale efter tørring v. 50 °C i kg

$A$ : areal af materialets sugeflade i  $\text{m}^2$

$Q^2$  beregnes og afsættes i et diagram  $Q^2 = f(t)$ . Fra dette diagram kan knæpunktabsorption  $Q_{\text{kap}}$  og  $t_{\text{kap}}$  bestemmes. Hælningskoefficienten i kurvens start angiver kvadratet på kapillaritetstallet,  $k$ . De 2 retlinjede

dele af opsuigningskurven forlænges til skæring, hvorved tiden til knæk-punktsabsorption  $t_{kap}$ , og den tilhørende værdi  $Q_{kap}$ , kan bestemmes. (14 s. 3). Eksempel på optegnet fugtabsorptionskurve fremgår af Figur 12.



Figur 12 Eksempel på optegning af kurve for et materiales fugtabsorption i 2. potens plottet ind i forhold til tiden.

Via den optegnede kurve kan kapillaritetstallet,  $k$ , beregnes som:

Ligning 12

$$k = Q_{kap} \div \sqrt{(t_{kap} - t_{fejl})} \text{ hvor}$$

$k$ : kapillaritetstal i  $\text{kg/m}^2\sqrt{s}$

$Q_{kap}$ : masse opsuget vand til tiden  $t_{kap}$  i sekunder  $s$

$t_{kap}$ : tiden til knækpunktsabsorptionen i  $s$

$t_{fejl}$ : elimineringsværdi for fejl i tidtagning i  $s$

### 4.3 Skadesmekanismer

Fugt anses normalt for en hovedårsag til skader i vores bygninger. Fugt i længere perioder og/eller i større mængder kan forårsage skader på bygningsdele i form af eksempelvis deformationer, materialenedbrydning og skimmelvækst (8 s. 11). Denne rapport fokuserer på de to sidstnævnte, fordi de indgående bygningskomponenter ikke forventes påvirket af deformationer i skadelig grad. Risikoen for fugtbetingede skader afhænger af bl.a. fugtmængde, eksponeringsperiode samt af materialsammensætningen af den specifikke bygningsdel. En bygningsdel der udelukkende består af mineralske komponenter, som eksempelvis beton og tegl, er mindre udsat for fugtbetingede skader end en bygningsdel, der består af organiske komponenter som eksempelvis træ og gipskartonplader (15).

#### 4.3.1 Materialenedbrydning

##### Biologisk nedbrydning

Biologisk nedbrydning kan forekomme ved, at skadedyr og svampe finder næring i organiske byggematerialer, eller ved at planter gror i revner, og derved fysisk udvider dem med en accelererende skadesudvikling til følge (16 s. 7).

En meget almindelige årsag til biologisk nedbrydning af byggematerialer er trænedbrydende svampe. Der findes ca. 30 forskellige trænedbrydende svampe, der angriber træværk i bygninger i Danmark. Trænedbrydende svampe kan spire i træ, såfremt træfugten overstiger ca. 20 vægt-% træfugt i en længere periode, hvilket modsvarer en fugtligevægt med en relativ luftfugtighed på ca. 87 % (8 s. 95). For at genstarte et tidligere angreb, kræves dog kun 15 vægt-% træfugt (16 s. 8). 15 vægt-% træfugt modsvarer en fugtligevægt med en relativ luftfugtighed på ca. 73 % (8 s. 95). Et eksempel på resultatet af trænedbrydende svampe kan ses i Figur 13.



Figur 13. Resultat af trænedbrydende svampe i en tagkonstruktion ( (17) BYG-ERFA (99)141213).

Udover fugt er også gunstige temperaturforhold vigtige for evt. vækst af trænedbrydende svampe. De fleste trænedbrydende svampe trives bedst ved temperaturer mellem 15-25 °C. Ved temperaturer under 5 °C er kun meget få arter aktive (18).

##### Frost

Skader, der er betinget af frost, forekommer når vand trænger ind i porøse materialer og samtidigt udsættes for så lave temperaturer, at det fryser. Typisk ses dette fænomen i materialer som tegl, mørtel, beton og porebeton. Vand udvider sig 9 % ved faseændringen til is. Såfremt et materiales porer er fyldt med vand, således at der ikke er plads til denne udvidelse, sprænger udvidelsen materialet i stykker (16 s. 14). Et eksempel på en frostbetinget skade ses i Figur 14.



Figur 14. Eksempel på frostskaadet murværk ( (19) BYG-ERFA (21) 011001).

Er mindst 9 % af porevolumen i et stenmateriale, som de ovennævnte, luftfyldt ved indtrædelse af frost, er det rimeligt at antage at der ikke vil forekomme frostskaader, da der så er plads til volumenforøgelsen af vandet (16 s. 15).

#### 4.3.2 Skimmelsvampevækst

Skimmelsvampevækst nedbryder ikke materialer væsentligt, men mistænkes for at udgøre et markant helbredsmæssigt problem. Der er fundet tilstrækkelig evidens for en sammenhæng mellem skimmelsvampevækst og luftvejssymptomer (som f.eks. irritation af slimhinder og hoste) samt luftvejsinfektioner. Ligeledes er der fundet tilstrækkelig evidens for, at skimmelsvampevækst forværrer astma. Særligt hos børn antages der at være en sikker årsagssammenhæng (16 s. 11).

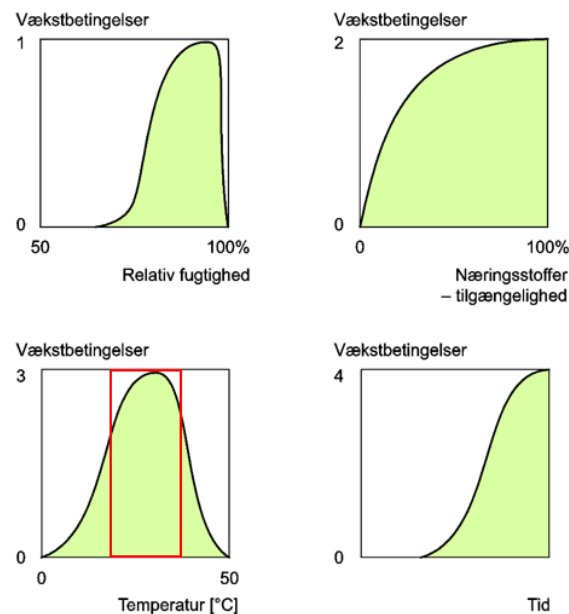
Skimmelsvampe vokser på materialers overflader. Et eksempel på en overflade, der er angrebet af skimmelvækst ses på Figur 15.



Figur 15. En overflade der er angrebet af skimmelvækst ( (20) BYG-ERFA (31)151115).

Væksten der ses i Figur 15 skyldes fugtig indelufts uhindrede passage igennem en indvendig isoleret forsatsvæg, til en kold ydervæg. Som beskrevet i afsnit 4.2.3, stiger den relative fugtighed ved faldende temperaturer.

Fugt, overstigende et vist niveau, er en betingelse for skimmelvækst. Andre nødvendige betingelser er gunstig temperatur samt næring til skimmelsvampene. Næring til skimmelsvampene kan stamme fra såvel smudsede overflader, som fra selve materialet. Perioden et givent materiale udsættes for gunstige vækstbetingelser for skimmelsvampevækst spiller ligeledes en rolle i risikoen. I værste fald kan der ske vækst efter 2-3 døgn med optimale vækstbetingelser (8 s. 96). Forenklet opfattet er risikoen for skimmelvækst elimineret ved en relativ fugtighed under 75 % (8 s. 98). Dog er de forskellige bidragende faktorer til vækstbetingelser lidt mere nuancerede. Figur 16 viser ved hvilken betingelse væksten er optimal i de forskellige bidragende faktorer.



Figur 16. Betingelser væksten af skimmelsvampe, baseret på de nævnte faktorer ( (8 s. 96) SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger med egne antegninger).

Eksempelvis kan det udledes af Figur 16, at den optimale temperatur for skimmelvækst ligger mellem ca. 20-35 °C. Se rød markering i Figur 16.

I forhold til næringsstoffer finder skimmelvækst lettere næring på organiske materialer som eksempelvis træbaserede materialer end på et mineralsk materiale som eksempelvis beton. I Tabel 5 belyses ved hvilken relativ fugtighed, der er risiko for skimmelvækst i et givent materiale.

Tabel 5. Ved hvilken relativ fugtighed der er risiko for skimmelsvampe vækst på forskellige materialer ( (8 s. 97) SBI-anvisning 224 Fugt i Bygninger).

| Materiale                                                   | Kritisk RF for<br>skimmelsvampevækst,<br>% |
|-------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Træ og træbaserede materialer                               | 75-80                                      |
| Karton på gipskartonplader                                  | 80-85                                      |
| Mineraluld                                                  | 90-95                                      |
| Ekspanderet polystyren (EPS)                                | 90-95                                      |
| Beton                                                       | 90-95                                      |
| Forurenede materialer, fx<br>forurenede med jord eller støv | 75                                         |

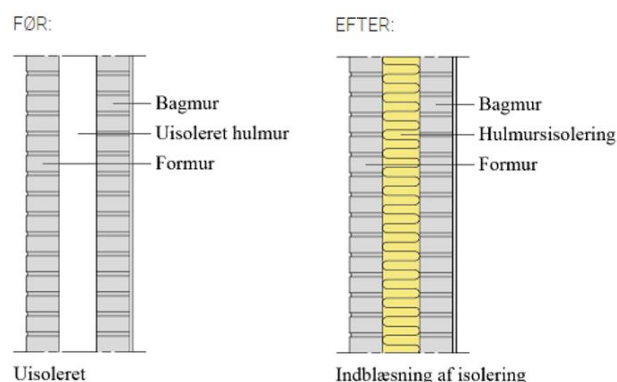
Bemærk særligt den nederste linje vedr. forurenede materialer. Altså kan skimmelvækst forekomme ved en relativ fugtighed på 75% såfremt et ellers mere skimmelrobust materiale, som eksempelvis beton, nedsmudses.

## 5 Efterisoleringsmetoder – fordele og ulemper

I afsnit 3.1 beskrives det store energibesparelspotentiale ved energioptimering af eksisterende ydervægge i form af efterisolering. Der kan vælges mellem tre hovedmetoder, hulumursisolering (når muligt), udvendig isolering og indvendig isolering.

### 5.1.1 Hulumursisolering

Hule mure begyndte for alvor at vinde indpas i byggeriet af småhuse fra ca. 1920 (21 s. 76). Først efter 1961 blev det almindeligt med hule mure i flere etager i etagebyggeriet (22 s. 23). Hvor der kan konstateres en hulumur, kan denne hulumursisoleres med forskellige typer af egnet granulat af isolering. Princippet illustreres i Figur 17 ved et før/efter eksempel.



Figur 17. Ydervæg, før og efter indblæsning af isoleringsgranulat ( (23) [www.spareenergi.dk](http://www.spareenergi.dk)).

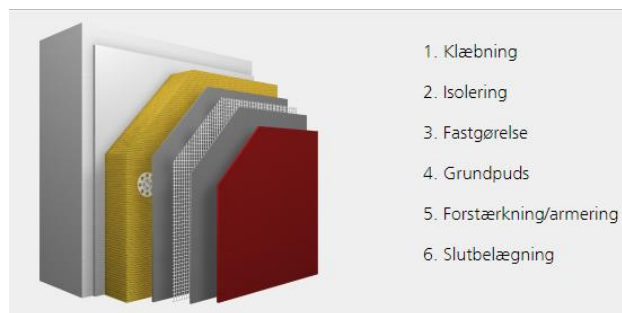
Hulumursisolering er en relativt enkel efterisoleringsmetode, der ikke umiddelbart påvirker bygningens udseende, bortset fra farveforskelle ved evt. udhuggede mursten og fuger. Ligeledes vil selve processen ikke påvirke beboerne i særlig høj grad, og det er sjældent nødvendigt at genhuse dem. Der er ofte områder med massivt murværk ved facadeåbninger, gesimser og lignende. Ligeledes blev der oftest anvendt faste bindere af mursten gennem hulrummet. Disse områder vil resultere i kuldebroer med punktvise fugtkritiske og kolde indvendige overflader til følge. Ved hulumursisolering er det vigtigt at den eksisterende facade undersøges. Ved at isolere hulrummet bag facaden nedbringes det indefra kommende tilskud af energi til facaden; et tilskud, der bidrager til udtørring. Der er risiko for fugt- og frostskaader i en eksisterende facade, der ikke er intakt, eller generelt ikke er egnet til den øgede belastning (24). Da der er tale om en ofte rentabel og enkel måde at energioptimere en ydervægskonstruktion på, vil hule mure ofte allerede være blevet isoleret (21 s. 77). Dog kan kvaliteten være meget varierende.



### 5.1.2 Udvendig isolering

Udvendig isolering er ofte den fugtteknisk mest robuste løsning, da der er mulighed for at undgå kuldebroer stort set fuldstændigt (22 s. 22). Ligeledes beskyttes den eksisterende konstruktion mod nedbrydninger, forårsaget af udeklimaets påvirkninger, og vil efterfølgende stå mere tør og varm end tidligere. I mange tilfælde består den eksisterende konstruktion af massivt murværk eller andre massive tunge konstruktioner. Når murværk isoleres udvendigt, opnås en indvendig væg med en udmærket varmekapacitet, hvorved den indvendige rumtemperaturs svingninger minimeres, og komforten i rummet forbedres. Udvendig isolering optager ikke plads indvendigt, og beboerne skal ikke nødvendigvis genhuses i løbet af processen.

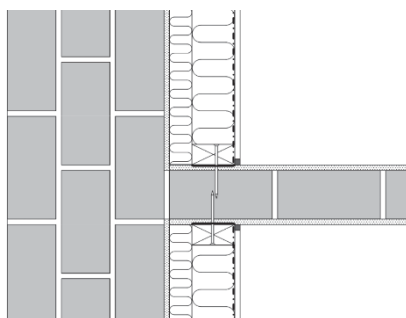
En udvendig isolering vil i de fleste tilfælde ændre facadens udseende. Dette kan være en udfordring ved fredede eller bevaringsværdige bygninger, eller i situationer, hvor man ønsker at fastholde det eksisterende facadeudtryk. Lysindfaldet ind i bygningen igennem vinduer kan ligeledes påvirkes negativt af den øgede konstruktions tykkelse. Figur 18 illustrerer et eksempel på en udvendig isolering.



Figur 18. Et udvendigt monteret etics system ( (25) [www.sto.dk](http://www.sto.dk)).

### 5.1.3 Indvendig isolering

Indvendig isolering er en teknisk set mere udfordrende løsning at tilgå end de to foregående. Det er nærmest umuligt at undgå kuldebroer ved dæk, etageadskillelser og de indvendige vægge, der støder mod ydervæggen. Figur 19 illustrerer en mulig kuldebro i samling mellem yder- og skillevæg.



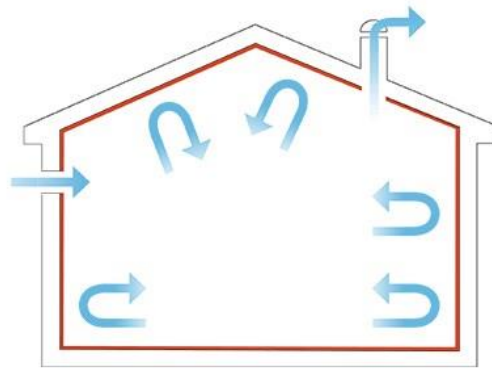
Figur 19. Vandret snit viser kuldebro ved samling mellem skillevæg og ydervæg i forbindelse med indvendig isolering ( 22 s. 51) Efterisolering af etageboliger).

Der er i alment teknisk fælleseje udtrykt bekymring for fugtmæssige problematikker i forbindelse med indvendig isolering. Eksempelvis vil en utæt dampspærre i en indvendigt isoleret forsatsvæg, kunne resultere i indtrængning af fugtig indeluft i konstruktionen. Desto tættere indeluften kommer på den kolde yderside og dermed nedkøles, desto højere bliver den relative fugtighed med deraf øget risiko for skimmelvækst eller kondens. Risikoen for skimmelvækst vil i en sådan konstruktion øges markant, såfremt den oprindelige indvendige overflade ikke renses omhyggeligt for organiske dele, der kan skabe udmærkede vækstbetingelser for skimmel (21 s. 58). Ligeledes skal man være opmærksom på at have en intakt facadeoverflade, således at fugt ikke ledes udefra og ind i en nu, betydeligt koldere konstruktion. Dette kan lede til bl.a. frostska-der (21 s. 86). Løsningen optager plads fra det indvendige boligareal, li-gesom installationer skal flyttes, og man må forvente at beboere, i de fleste tilfælde, skal genhuses under processen. Metoden har en del ulemper, men har den indlysende fordel at det oprindelige facadeudtryk kan bibeholdes, samtidig med at varmetabet gennem væggen reduceres og komforten øges.

## 5.2 Metoder til indvendig isolering

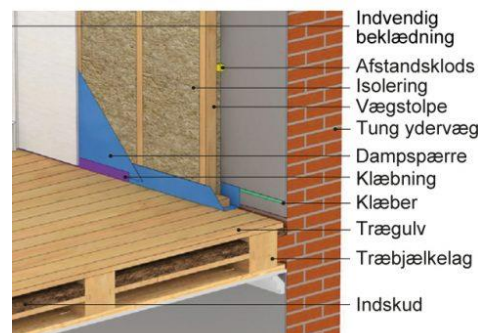
### 5.2.1 Den traditionelle metode (forsatsvæg med mineraluld)

Traditionelt er indvendig isolering af ydervæggen i Danmark udført med en forsatsvæg bestående af: mineraluld, et bærende skelet i enten træ eller stål, dampspærre og en indvendig beklædning, typisk i form af gips-plader. Udover isoleringens bidrag til at nedbringe varmetransporten i konstruktionen, er dampspærrens funktion i forhold til at hindre fugt-transport ved diffusion og konvektion vigtig for konstruktionens fugttek-niske funktion. Som det beskrives i afsnit 4.2.3, stiger den relative fugtig-hed når temperaturen falder ved en uændret absolut luftfugtighed. Er dampspærren ikke intakt, vil fugtig indeluft kunne trænge ud i konstruk-tionen, hvor den nedkøles med en stigende RF til følge. Figur 20 viser dampspærrens funktion.



Figur 20. Dampspærrens funktion i forhold til at undgå at fugtig indeluft trænger uhindret ud i konstruktionen. Den røde linje illustrerer dampspærren, de blå pile illustrerer luftens forsøg på at trænge ind i konstruktionen udover de styrede luftstrømme fra tilluft og fraluft. ( (26). [www.byggeriogenergi.dk](http://www.byggeriogenergi.dk))

Figur 21 illustrerer opbygningen af en traditionel indvendig isoleret forsatsvæg.



Figur 21. En traditionel indvendig forsatsvæg opbygges ( (20) BYG-ERFA (31)151115).

I alment teknisk fælleseje frarådes det at isolere med mere end 100 mm ved en forsatsvæg som ovenstående, af fugttekniske årsager (20).

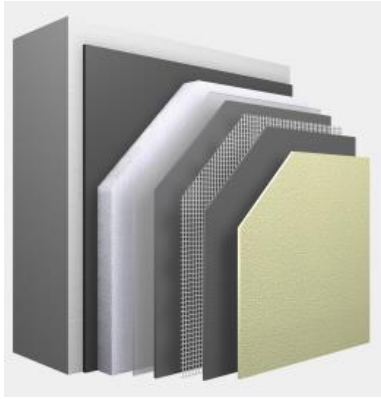
Typisk afsluttes en traditionel forsatsvæg med tapet/glasfilt og maling.

En sådan konstruktion er relativt enkel at udføre og langt de fleste tømrerfirmaer har erfaring med det.

### 5.2.2 Nyere metoder (kapillaraktiv isolering)

I den senere tid er andre indvendige isoleringsmetoder begyndt at vinde indpas på det danske marked, hvor der anvendes en kapillaraktiv isolering, der kan optage og afgive fugt fra omgivelserne. Konstruktionen indeholder således ikke en dampspærre, som en traditionel forsatsvæg. Mere om funktionen findes i afsnit 6.4.

Isoleringen indgår typisk i et isoleringssystem, der er afpasset efter og testet i sammenhæng med andre indgående systemkomponenter. Systemet afsluttes med en pudset overflade. Se Figur 22 for eksempel på opbygning af et sådant system.



1. Klæber
2. Kapillaraktiv isolering
3. Grundpuds
4. Armeringsvæv
5. Overfladebehandling

*Figur 22. Opbygningen af et Indvendigt isoleringssystem baseret på en kapillaraktiv isolering.  
( 27) [www.sto.de](http://www.sto.de)).*

## 6 Præsentation af feltstudie

I dette afsnit beskrives den bygning, der udgør feltstudiet, de eksisterende konstruktioner, og de efterisoleringstiltag, der er foretaget.

En ældre beboelsesbygning fra 1923 er blevet stillet til rådighed til formålet. Nuværende ejer bor i bygningen i en del af måleperioden, indtil nyopført stuehus står klar til indflytning. Herefter nedrives den gamle beboelsesbygning.

### 6.1 Bygningen som den står

Fra 1899 og frem til ca. 1960 blev der bygget ca. 32.000 statshusmandsbrug i de danske landkommuner. Disse små familiebrug skulle sikre, at der, trods en generel vandring mod de større bysamfund, vedblev at være kvalificeret arbejdskraft på landet. En lov af 1899, om såkaldte statshusmænd, betød, at der kunne ydes statslån til etablering af et husmandsbrug, dog under forudsætning af statslig kontrol. I tillæg til statslånet blev der ydet velment rådgivning (28). Et husmandsbrug blev ofte bygget med sammenhængende avls- og boligbygning, evt. i en vinkel eller bare i en længe. Dog kunne det også ses, at avls- og boligbygning var separate bygninger. Konstruktionerne i bygningerne var oftest udført iht. principperne fra den samtidige forening, Bedre Byggeskiks idealer (28 s. 8).

En bygning fra denne periode med de beskrevne karakteristika, er blevet stillet til rådighed, for i praksis at undersøge de bygningsfysiske aspekter ved udførelse af indvendig efterisolering. Bygningen er opført i 1923 som et tidstypisk husmandsbrug. Husmandsbruget er registreret med et beboelsesareal på 63 m<sup>2</sup> i stueetagen samt 15 m<sup>2</sup> udnyttet areal af tagetagen. BBR kan ses i bilag 6.1. Stedet er nu overtaget af familiens 3. generation.



*Figur 23 viser 2 ældre luftfotos af bygningen benyttet i feltstudiet (Fotos udlånt af familien)*

Som det ses ved sammenligning af billeder i Figur 23 med billede af facade mod syd i Figur 24, har bygningen gennem tiden gennemgået løbende renoveringer. Bl.a. ses en udskiftning af tagdækningen fra tegl til

eternit. Vindueshuller er udvidet, flyttet eller ligefrem slettet og tilbygninger på udhusdelen er kommet til.



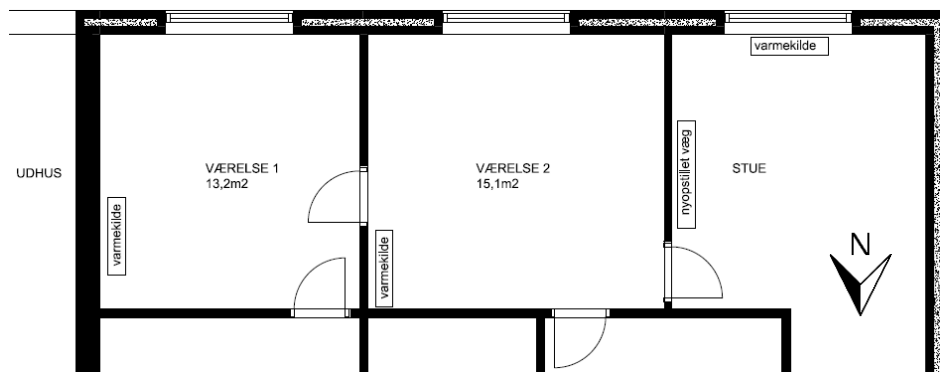
Figur 24 Facade mod syd. Fra venstre de 2 vinduer i stue og længst til højre vindue i værelse. (Eget foto)

Familien oplyser at: "...1. generation af Familien Nielsen overtog ejendommen i 1955. Tag blev udskiftet i 1984. Vinduerne blev udskiftet i beboelsesdelen i 2010 hvor der i samme renoveringsomgang blev hulmurs-isoleret med rockwoolgranulat. Indvendigt blev bagmure beklædt med celotex plader i ca. 1970. Ellers fremstår beboelsesdelen stort set som oprindelig uden større ændringer..." (2. generation: Henrik Nielsen, Tårs).

## 6.2 Tegningsmateriale og registrering af konstruktioner

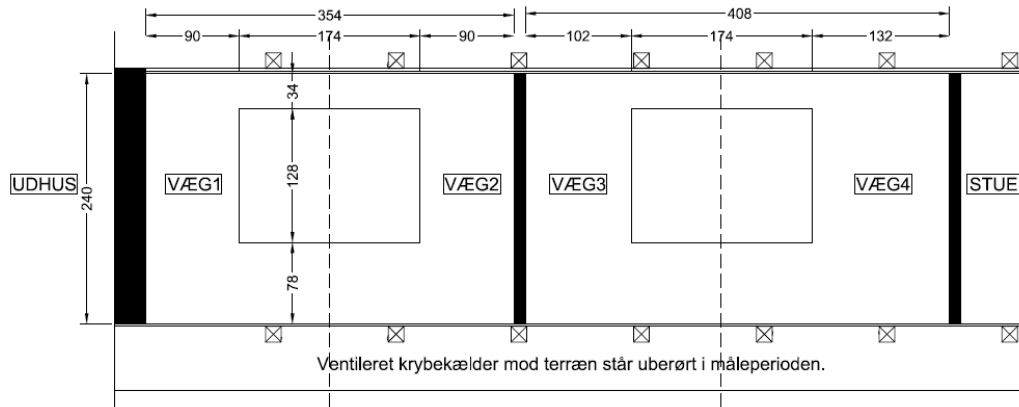
I december 2020 er der udført en bygningsundersøgelse. Undersøgelsen har haft til hensigt at bestemme bygningens nuværende konstruktionsopbygning, samt at fastlægge de potentielle vægfelter som vil give mening at inddrage i feltstudiet omhandlende indvendig efterisolering. Resultater af bygningsundersøgelsen fremgår af bilag 8.1.

Beboelsesdelens indretning mod syd i stueetagen giver mulighed for at lave to rum med stort set samme størrelse, med samme inde- og udeklimapåvirkninger. Værelse 1 fremstår i sin oprindelige størrelse, hvor værelse 2 fremkommer via en opdeling af stue med ny skillevæg. Rumopdelingen fremgår af Figur 25.



Figur 25 Grundplan over beboelsesdel i stueetagen vendende mod syd.

Værelse 2 fremstår med hulmurskonstruktion i ca. 32 cm tykkelse mod syd. Skillevæg mod omkringliggende rum er af samme teglstensmateriale som benyttet i hulmurskonstruktionen. Varmekilden i værelse 2 udgøres af en traditionel ribberadiator, varmforsynet fra husets oliefyr.



Betragtes opstalten af de to værelses sydvendte ydervæg i Figur 26, ser man den mulige opdeling af væggene i fire testvægsarealer, som konstruktionsmæssigt fremstår ens. Endda med bjælkeende i etageadskillelse, placeret over vindueshul ved hvert testvægsareal.

Side 35 af 122

Tabel 6. Beskrivelse af de nuværende konstruktioner.

| ID | Konstruktion         | Materialer og opbygning                                                                                                                                                                             | Konstruktionssnit |
|----|----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| 1  | Fundament            | Ca. 34 cm støbt fundament. Der er konstateret fugtspærre mellem fundament og ydervæg.                                                                                                               |                   |
| 2  | Strøgulvkonstruktion | Ventileret krybekælder. Strøgulvkonstruktion afsluttet med 32 mm gulvbrædder. Uisoleret.                                                                                                            |                   |
| 3  | Tung ydervæg         | Traditionel hulmur i ca. 32 cm tykkelse. 12 cm teglsten som bagmur. Hulrum fyldt med indblæsningsuld. Facade i 12 cm teglsten.                                                                      |                   |
| 4  | Tag og loft          | Hanebåndskonstruktion udført i 15x15 cm tømmer. 45 graders hældning. Oprindelig loft fuldforskallet. Herpå er der yderligere forskallet og udført panellofter. Etageadskillelse fremstår uisoleret. |                   |
| 5  | Døre og Vinduer      | Plastdøre og -vinduer med 2-lags glas                                                                                                                                                               |                   |

### 6.3 Nuværende forhold

Forventningerne til konstruktionerne i det specifikke hus var baseret på de konstruktioner man ville forvente i et hus bygget efter principperne for bedre byggeskikhusene (jf. afsnit 6.1), beskrevet i hustypebeskrivelsen fra Sikkerhedsstyrelsen (29).

Konstruktionerne er blevet renoveret igennem bygningens levetid. Bl.a. er der udført hulmursisolering, taget er skiftet og ombygget, og ligeledes er vinduerne skiftet. Lidt overraskende er det, at et relativt billigt tiltag, som at isolere loftet over stueplan, ikke er blevet udført. I forhold til de oprindelige konstruktioner ville man forvente at finde en ydervæg bestående af en hulmur med faste bindere. I den specifikke hulmurskonstruktion fandtes der, lidt overraskende, ingen faste bindere. Generelt beskrives faste bindere anvendt op til ca. midten af 1930'erne (29). Altså noget senere end byggeåret (1923) for det specifikke hus. To faste bindere pr. m<sup>2</sup> blev etableret i forbindelse med feltstudiet for at undersøge konsekvenserne ved sådanne bindere. Placering eller omfang af evt. trådbindere har ikke kunnet fastslås og de er ikke undersøgt. Antallet af faste



bindere udført i byggeperioden som et stabiliserende tiltag mellem de to teglvægge, har været markant højere.

I de fattigere egne af landet, hvor til Nordjylland i denne periode må regnes, forsøgte man at optimere konstruktionerne økonomisk. Bl.a. blev der i perioden omkring byggeåret for det specifikke husmandsbrug, ofte anvendt billigere cementmursten støbt på stedet (30 s. 18). Da facaden konstateres berappet, havde det været naturligt at finde denne type mursten, men det er ikke tilfældet. Ydervæggene er opført i en traditionel teglmursten, både i for- og bagmur. Overvejende lever konstruktionerne dog op til hvad man vil forvente, baseret på byggeår samt hus-type.

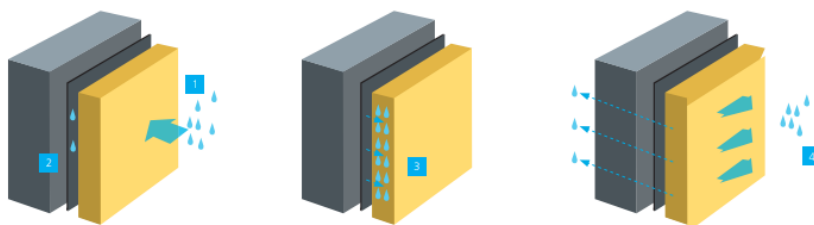
## 6.4 Isoleringstiltag ved oprindelig konstruktion

### 6.4.1 Anvendte isoleringssystemer

De to anvendte isoleringssystemer fungerer fugtteknisk på forskellige måder. I dette afsnit beskrives systemernes opbygning samt funktion specifikt.

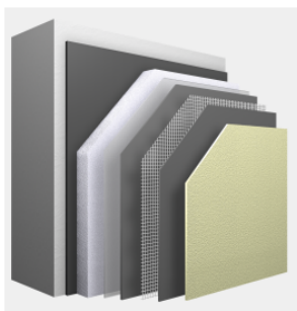
#### StoTherm in Comfort

'StoTherm In Comfort' er baseret på en kapillaraktiv isolering, altså en isolering der kan modtage og afgive fugt fra omgivelserne. Figur 27 viser hvorledes princippet ved en kapillaraktiv isolering fungerer.



Figur 27. Kapillaraktiv isolering absorberer fugt ved en høj indvendig luftfugtighed. Fugten fordeles i isoleringen og afgives igen til omgivelserne, når luftfugtigheden er faldet. Lys grå = ydervægskonstruktion – Mørk grå = klæbelag – Gul = kapillaraktiv isolering (31) [www.sto.de](http://www.sto.de).

Skal en kapillaraktiv isolering fungere, er det essentielt at den indvendige overflade af isoleringssystemet er diffusionsåben, således at fugten kan trænge uhindret ind i den kapillaraktive isolering. Ligeledes er det væsentligt, at den udvendige overflade er intakt, således at der ikke optages uhensigtsmæssigt meget fugt igennem revner og lignende fra slagregn. I systemet 'StoTherm In Comfort' består den indvendige overflade af et mineralsk armeret pudssystem, afsluttet med enten en silikat- eller kalkbaseret overfladebehandling. I det specifikke tilfælde er systemet afsluttet med en indvendig silikatmaling. I Figur 28 ses den produktspecifikke opbygning af 'StoTherm In Comfort'.



- Eksisterende konstruktion
- StoLevell In Mineral (klæber)
- Sto Internal Insulation (kapillaraktiv isolering)
- StoLevell In Mineral (grundpuds)
- StoGlasfiber Væv Fin (armeringsvæv)
- StoColor Sil In (overfladebehandling)

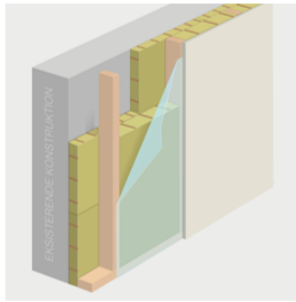
Figur 28. Produktspecifik beskrivelse af opbygningen af StoTherm In Comfort ( (27) [www.sto.de](http://www.sto.de) med egne påtegninger).

Udover at isoleringen er kapillaraktiv, skal den naturligvis også medvirke til at nedbringe varmetabet igennem ydervægskonstruktionen. Som beskrevet i afsnit 4.1.3 beskriver varmeledningsevnen ( $\lambda$ ) et produkts evne til at lede varme. Isoleringen anvendt 'i StoTherm In Comfort' har en varmeledningsevne på  $0,040 \text{ W}/(\text{m K})$ . Der er udført to testvægge med hhv. den minimale tilgængelige tykkelse på 50 mm samt med den maksimale tilgængelige tykkelse på 200 mm kapillaraktiv isolering. Udover isoleringstykkelserne er systemopbygningerne identiske. Som false isolering er anvendt 10 mm StoAvero Innendämmplatte (materiale baseret på aerogel) med en varmeledningsevne på  $0,017 \text{ W}/(\text{m K})$ . Som tilfældet er med den kapillaraktive isolering, indpudses false isoleringen også.

I bilag 6.4 findes en engelsksproget arbejdsbeskrivelse af det udførte system samt engelsk/dansk/tysksprogede tekniske faktablade på alle indgående produkter.

#### Forsatsvæg

Forsatsvæggen består i det specifikke tilfælde af et bærende skelet bygget i træ, 70 mm mineraluld i form af en glasuld med en varmeledningsevne på  $0,037 \text{ W}/(\text{m K})$ , et sammenhængende testet dampspærresystem med en folie i 0,2 mm tykkelse, en 12,5 mm gipsplade samt den samme indvendige silikatmaling, der er anvendt på 'StoTherm In Comfort'. 70 mm isolering i forsatsvæggen er valgt da en U-værdi tilsvarende væggen med 50 mm kapillaraktiv isolering dermed opnås. Se bilag 8.6 vedrørende U-værdi beregning. Falseisoleringen er udført som beskrevet ovenstående, dog kun med 25 mm mineraluld. Et overblik over opbygningen af forsatsvæggen kan findes i Figur 29.



- Eksisterende konstruktion
- 70 mm. ISOVER Formstykker (isolering)
- Træregler 38x70 mm. (bærende træskelet)
- RAW 0,2 mm dampspærresystem (dampspærre)
- 12,5 mm. Classic 1 Board Knauf (beklædning)
- StoColor Sil In (overfladebehandling)

Figur 29. Skitse der viser opbygning af forsatsvæggen ( (32) [www.rockwool.dk](http://www.rockwool.dk) med egne påtegninger).

I en forsatsvæg som den illustrerede i Figur 29 er isoleringen naturligvis vigtig i forhold til at nedbringe varmetabet igennem konstruktionen. For at konstruktionen skal være fugtteknisk robust, er en intakt dampspærre essentiel som det beskrives i afsnit 5.2.1.

Den specifikke konstruktion indeholder organiske dele, som træ. Her er det særligt vigtigt at bygge med opmærksomhed på fugt og dermed på dampspærrens funktion. Skimmelvækst vil have udmærkede vækstbetingelser på træ fra en RF på 75 %, se Tabel 5.

#### Referencevæg (baseline)

Ved referencevæggen er der ikke foretaget ændringer ved den eksisterende konstruktion. Dog er loftet over ydervæggen efterisoleret som det også er tilfældet over ydervæggene, som efterisoleret med såvel 'Sto-Therm In Comfort' som forsatsvæggen.

#### Loftisolering

Da det antages, at man i forbindelse med en efterisolering af ydervæggen ligeledes vil efterisolere loftet over rummene, er loftet både isoleret og tætnet i forbindelse med udførelse af testvægge. På undersiden af det eksisterende loft er der monteret et dampspærresystem med en folie i 0,2 mm tykkelse. Dampspærren er udført sammenhængende med enten dampspærre i forsatsvæggen iht. den specifikke anvisning (33 s. 28) eller som beskrevet af Sto i arbejdsvejledningen for det specifikke isoleringssystem i bilag 6.4, side 10. For at begrænse varmetabet igennem loftkonstruktionen til det uopvarmede loftsrum, er der monteret 240 mm Isover ruller, fordelt i to lag med en varmeledningsevne på 0,037 W/(m K). Figur 30 illustrerer hvorledes isoleringen er udført mellem bjælker i etageadskillelse og efterfølgende fuldt dækkende over hele fladen.

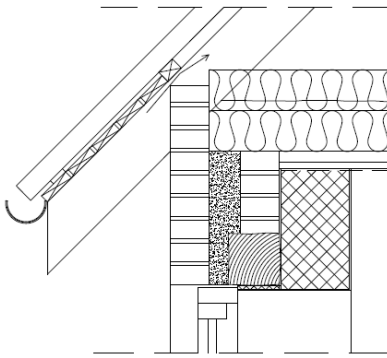


Figur 30 Efterisolering af loft som det specifikt udførte i to lag, set fra loftrummet. (Eget billede af udført loftisolering halvvejs i processen)

#### 6.4.2 Konstruktionsopbygninger

Konstruktionsopbygningen for de undersøgte indvendigt isolerede vægge præsenteres grafisk og med konstruktionsbeskrivelse på Figur 31-35.

##### Væg 1 (200 mm StoTherm In Comfort)

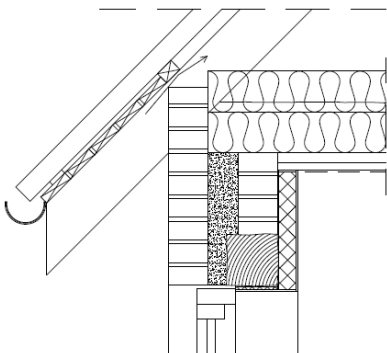


Udefra og ind (Figur 31)

- 120 mm udvendigt berappet tegl
- Ca. 80 mm indblæsningsuld
- 120 mm indvendigt pudset tegl
- 'StoTherm In Comfort' med 200 mm isolering
- Loftisolering som beskrevet i afsnit 6.4.1
- 10 mm StoTherm In Averø v. falser

Figur 31 Opbygning væg 1.

##### Væg 2 (50 mm StoTherm In Comfort)

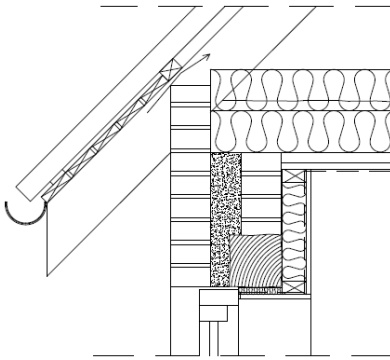


Udefra og ind (Figur 32)

- 120 mm udvendigt berappet tegl
- Ca. 80 mm indblæsningsuld
- 120 mm indvendigt pudset tegl
- 'StoTherm In Comfort' med 50 mm isolering
- Loftisolering som beskrevet i afsnit 6.4.1
- 10 mm StoTherm In Averø v. falser

Figur 32 Opbygning væg 2.

### Væg 3 (70 mm forsatsvæg)

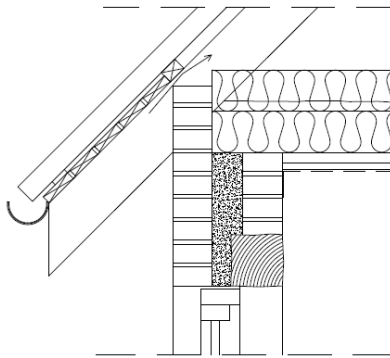


Udefra og ind (Figur 33)

- 120 mm udvendigt berappet tegl
- Ca. 80 mm indblæsningsuld
- 120 mm indvendigt pudset tegl
- Forsatsvæg med 70 mm isolering, og afsluttet med 13mm gips
- Loftisolering som beskrevet i afsnit 6.4.1
- 25 mm mineraluld kl. 37 v. falser

Figur 33 Opbygning væg 3.

### Væg 4 (uden efterisolering af ydervæg)

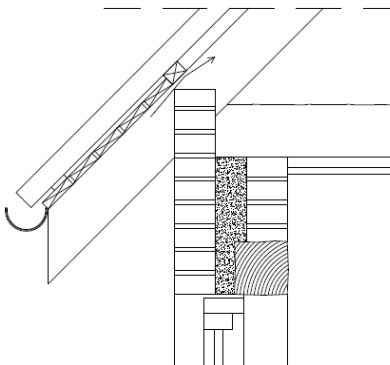


Udefra og ind (Figur 34)

- 120 mm udvendigt berappet tegl
- Ca. 80 mm indblæsningsuld
- 120 mm indvendigt pudset tegl
- Loftisolering som beskrevet i afsnit 6.4.1

Figur 34 Opbygning væg 4.

### Væg 5 (uden efterisolering og uden loftisolering)



Udefra og ind (Figur 35)

- 120 mm udvendigt berappet tegl
- Ca. 80 mm indblæsningsuld
- 120 mm indvendigt pudset tegl

Figur 35 Eksisterende opbygning.

## 7 Metode

I nærværende afsnit beskrives de metoder, der er anvendt til at undersøge de beskrevne indvendige isoleringsmetoders varme- og fugttekniske funktionsduelighed i den specifikke bygning, såvel i det nuværende som i et antaget fremtidigt klima. De beskrevne metoder består af:

- For- og efterundersøgelse af bygningen med div. instrumenter (afsnit 7.1).
- Målinger med USB-loggere i specifikke punkter i og ved ydervægs-konstruktionerne (afsnit 7.2).
- Parameterundersøgelse af eksisterende teglsten til bestemmelse af tekniske egenskaber der bruges i simuleringerne (afsnit 7.3).
- Simuleringer i WUFI 2D samt, når de antages kritiske, i WUFI VTT i både nuværende og fremtidigt klima (afsnit 7.4 samt 7.6).
- Bestemmelse af materialetyper til simuleringer (afsnit 7.5).
- Beregninger af U-Værdier iht. DS 418 (afsnit 7.7).

### 7.1 Bygningsundersøgelse Præstebakken 12A, Tårs

I forbindelse med registrering af bygningens konstruktionsopbygning i december måned 2020, registreredes samtidig konstruktionernes nuværende tilstand. Detaljer fremgår af bilag 8.1. Ligeledes blev der foretaget en kort bygningsundersøgelse af tilgængelige detaljer i forbindelse med de-montagen af USB-loggerne, beskrevet i afsnit 8.2, i april måned 2021. Bilag 8.2 beskriver efterundersøgelsen. Udstyret brugt til undersøgelserne beskrives i følgende afsnit.

#### 7.1.1 Udstyr

##### Kapacitiv fugtmåler

Til kapacitive fugtmålinger er anvendt en GANN HYDROMETTE COMPACT B.



Figur 36. Billede af GANN HYDROMETTE COMPACT B fugtmåler. ( (34) [www.gann.de](http://www.gann.de)).

Kapacitiv fugtmåling med en GANN HYDROMETTE COMPACT B fugtmåler er i dette tilfælde anvendt som instrument til at måle fugt i materialer af beton, puds og mursten. Instrumentet måler fugt i en dybde fra overfladen og ned til ca. 20-40 mm i materialet. Metoden er baseret på, at fugtige materialer har en større ledningskapacitet end tørre materialer. Den benyttede kapacitive fugtmåler er vist på Figur 36.

Den anvendte kapacitive fugtmåler viser ved en angivelse af digits i målerdisplayet, en indikation af, om det område der undersøges, er fugtigt eller ej. Det er ikke muligt at få eksakte værdier fra en undersøgelse med en fugtmåler som denne. Dog er det muligt, ved gentagne målinger forskellige steder, at danne sig et indtryk af, om et specifikt område er mere fugtigt end et andet, ved at konstatere forskellige angivne digits. Præcisionen af en kapacitiv fugtmåling, kan blive forstyrret af evt. salte eller metaller i det underlag, der undersøges.

### Stikbensmåler

Til måling af fugt i træ er der benyttet en stikbensmåler af typen Storch HPM-3000. Stikbensmåleren omsætter modstanden mellem de to elektroder (stikben) til fugt i vægtprocent. Der bør altid måles på langs af fibre og ikke i nærheden af søm, skruer eller revner (35). Målingen skal helst foretages i temperaturinterval 15-20 °C, da træets modstand ændres med temperaturen. Stikbensmåleren fra Storch er en uisoleret indstiksmåler, der viser den højeste målte fugtighed, uanset om denne er på overfladen eller inde i træmaterialet. Usikkerheden ved en stikbensmåler er normalt ca. 10 % af den målte værdi. Stikbensmåleren er blevet kalibreret inden brug, ved at sætte elektroderne på et testfelt i hættten, som efter brugsanvisningen bør vise 19 % RF  $\pm$  1 %. Den benyttede stikbensmåler er vist på Figur 37.



Figur 37 Billede fra bygningsgennemgang viser den benyttede stikbensmåler fra Storch (Eget foto)

### Termografisk kamera

Til termografering er benyttet FLIR ONE til Iphone. Figur 38 viser FLIR ONE kameraet.

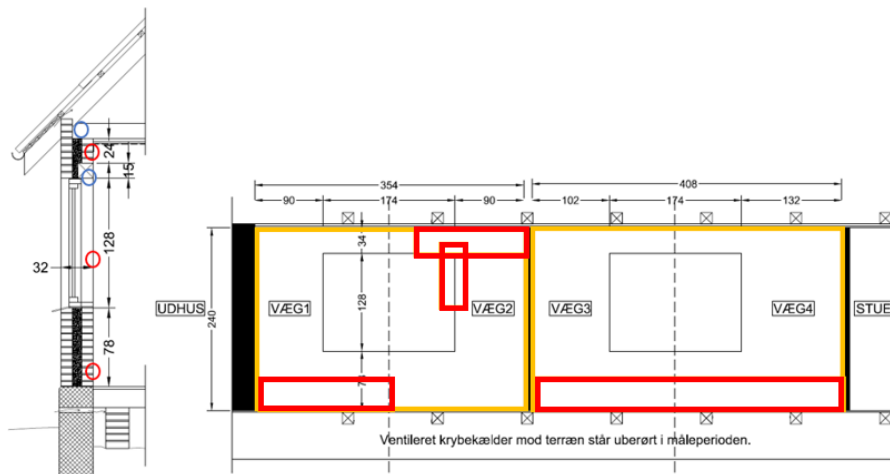


Figur 38. FLIR ONE termisk kamera til Iphone ( (36) [www.flir.eu](http://www.flir.eu)).

Termografiudstyr måler infrarød stråling, som omsættes til overfladetemperaturer. Termisk fotografering fungerer bedst ved en temperaturforskel mellem ude og inde på min. 10 °C (37 s. 3). Et termografisk billede viser ved farvegengivelse temperaturforskelle på en overflade. Her ved kan evt. kuldebroer eller utætheder i en konstruktion identificeres. Ved termografering skal man være opmærksom på at opvarmning ved direkte solpåvirkning, eller nedkøling ved regn eller vind af en udvendig bygningsdel, vil kunne give misvisende resultater.

#### Oversigt over målepunkter

Figur 39 viser en oversigt over målepunkter foretaget i forbindelse med bygningsundersøgelsen. Udover de indvendige termografiske billeder, er der ligeledes taget et termografisk billede af facaden, hvor begge værelser er dækket. Dette billede er ikke vist i Figur 39.



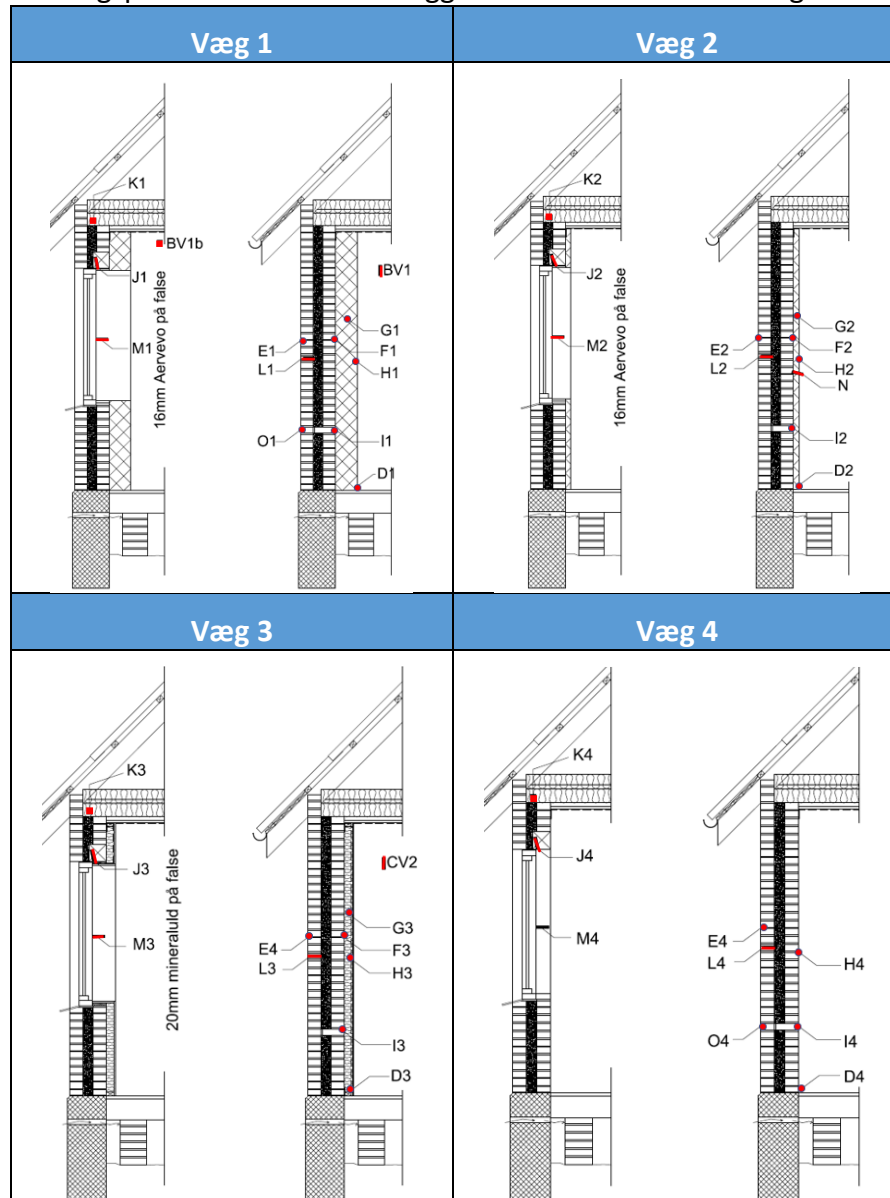
Figur 39 Oversigt over målepunkter fra bygningsundersøgelsen. Blå markeringer i snittegningen viser hvor der omtrentlig er foretaget stikbømsmålinger. Røde markeringer i snittegningen viser, hvor der er foretaget capacitive målinger. På opstalttegningen viser de gule og røde markeringer, hvor der er taget termografiske billeder indvendigt. Røde felter viser hvor der er foretaget detaljerede billeder og store gule felter viser hvor der er taget mere overordnede billeder.



## 7.2 Målinger med USB Loggere

### 7.2.1 Placering af USB Loggere i feltstudie

De lokalt udpegede punkter, fundet via bygningsundersøgelsen, monitoreres i tre måneder via målinger. Der indbygges fugtloggere i de fastlagte punkter med timeregistrering af temperatur og relativ luftfugtighed. Indbygning af dataloggere i punkterne er beskrevet detaljeret mht. placering, navngivning og billedokumentation i bilag 7.2. Loggernes nummerering fremgår af samme bilag. De monitorerede punkter i registreringsperioden for de fire vægge skitseres overordnet i Figur 40.



Figur 40 Placering af loggere ved de fire vægtyper. Placering og billedokumentation beskrives detaljeret i bilag 7.2. Nummeringen af specifikke loggere skal læses således: Bogstavet henviser til hvilken detalje iht. Tabel 10 og tallet henviser til hvilken væg. Eksempelvis punktet J3: J er detaljen ved træoverliggeren over vinduet, 3 beskriver at det er i væg 3.

Bogstavet ved hvert punkt henviser til detalje iht. Tabel 10 og nummer henviser til væg nr. Efter afsluttet måleperiode kan de respektive målinger sammenlignes på tværs af efterisoleringsmetoderne for vurdering af ydeevne i forhold til tykkelser samt type. Ligeledes kan målingerne sammenlignes med resultaterne fra simuleringer i de samme punkter i samme periode.

### 7.2.2 USB og Bluetooth Loggere

#### USB Data-logger

Dataloggere kan anvendes til målinger over tid og programmeres via PC til at opsamle målinger over en given tidsperiode. Tidsintervallet for hver logning fastlægges i forhold til længden af den samlede måleperiode.

Dataloggere indsamler måledata for klimaet, hvori den er placeret, f.eks. temperatur og RF i luften. De måler luften omkring udstyret og ikke på overfladen.

#### Bluetooth Smart-logger

Smartloggeren er en lille kompakt enhed uden display, som registrerer temperatur og RF i luften på samme vis som USB data-loggeren. Data udlæses via Bluetooth på smartphone i op til 50 meters afstand, hvilket gør den velegnet til bygningsundersøgelser ved indbygning i konstruktioner eller i lukkede rum. Data kan tilgås uanset tidspunkt, uden at loggeren fjernes fra sit målepunkt.

USB-logger og Bluetooth Smart-logger er vist på Figur 41.



Figur 41 Billede af forprogrammeret USB-datalogger samt Bluetooth Smart-logger. (Eget billede USB-logger samt billede af smart-logger fra (38) [www.fugtmaalere.dk](http://www.fugtmaalere.dk)).

### 7.2.3 Databehandling af målinger Præstebakken 12A

Testvægge i feltstudiet og indbygning af USB-loggere blev udført i tidsrummet 21.-23. december 2020. Testperiode afsluttes den 17. april 2021, hvor loggere udtages. De første ugers målinger elimineres, da det er hér, den største udtørring af byggefugt pågår. Udtørring tilskyndes via kraftig opvarmning samt hyppig daglig udluftning. Måleperioden fastlægges derfor til 15. januar 2021 til 15. april 2021. Boligen står ubeboet i

perioden 15. januar til 19. februar 2021. Herefter flytter familie på to voksne og to små børn ind i resten af måleperioden. Fra denne dato antages betingelser for fugtbelastningsklasse 2 for opfyldt som beskrevet i Tabel 3. I perioden inden familien flytter ind, må det antages at fugtbelastningen er mindre end fugtbelastningsklasse 2.

De registrerede datasæt i de fastlagte monitorpunkter, bestemt via bygningsundersøgelsen beskrevet i afsnit 7.1, indlæses i oprettede excel-ark til den videre behandling. Data samles, så det i måleperioden bliver muligt at sammenstille resultater for alle fire vægtyper i samme graf i et specifikt monitorpunkt.

De sammenstillede målinger opstilles i bilag. Opsummering af grafvurderingerne vedrørende forløbet af RF i de specifikke punkter redegøres der for i rapporten via et 'trafiklys-princip', som beskrevet i afsnit 8.4.

### **7.3 Bestemmelse af materialeegenskaber**

Den oprindelige teglsten i bygningen fra 1923 er den dominerende materialetype i ydervæggen, der efterisoleres indvendigt. Materialeegenskaberne kan variere markant fra teglsten til teglsten, hvorfor en parameterundersøgelse på den specifikt benyttede teglsten bør foretages. Der findes forskellige standardbeskrivelser for parameterbestemmelse af bl.a. densitet (39), varmekapacitet (40), total vandmætning og kapillarsugning (41) samt teglstenens sorptionskurve (42). Laboratorieforholdene og forsøgsbeskrivelserne for parameterundersøgelser beskrevet i standarderne har ikke været tilgængelige under udarbejdelse af denne rapport, men forsøgsopstillinger, der tilnærmelsesvis ligner, er benyttet til simplificerede 'køkkenbordsforsøg', som har til formål at bestemme omtrentlige parameterværdier tilhørende stentypen.

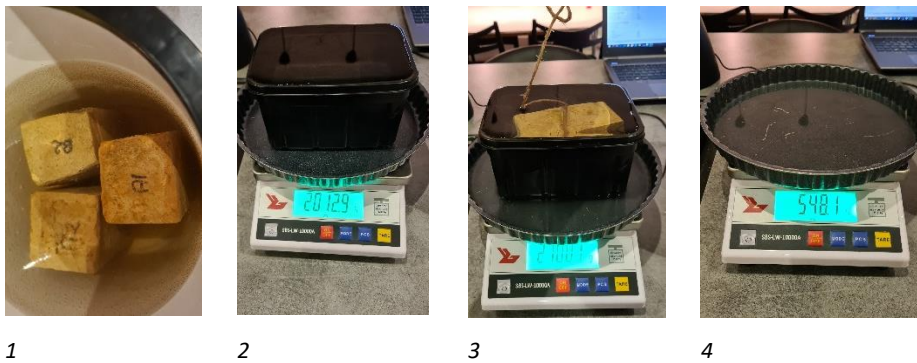
Der er udtaget to tilfældige teglsten i husets facade i forbindelse med bygningsundersøgelsen. Hver teglsten er brudt op i fire ensartede stykker, som ligner petringer i ca. størrelsen 5,5x5x12 cm. Petringer omtales efterfølgende som 'emner'. Emnerne kombineres i følgende materialeanalyser, så der så vidt muligt indgår to forskellige teglstensprøver til sammenligning.

#### Densitet for teglsten samt mættet fugtindhold

Tre emner udtørres i ovn ved ca. 105 °C, til vægtkonstans. Emnerne vejes og massen i tør tilstand registreres. Emnerne lægges nu i vand i mindst 24 timer, (Figur 42.1) til de ikke absorberer mere vand, hvorefter deres masse i våd tilstand vejes og registreres.

De våde emner lægges nu ad tre omgange i vandfyldt bøtte (Figur 42.2). Vandmængden, der løber over (Figur 42.3), opsamles, vejes og registreres som emnets respektive volumen, hvor 1 kg vand = 1 liter vand = 0,001 m<sup>3</sup> (Figur 42.4).

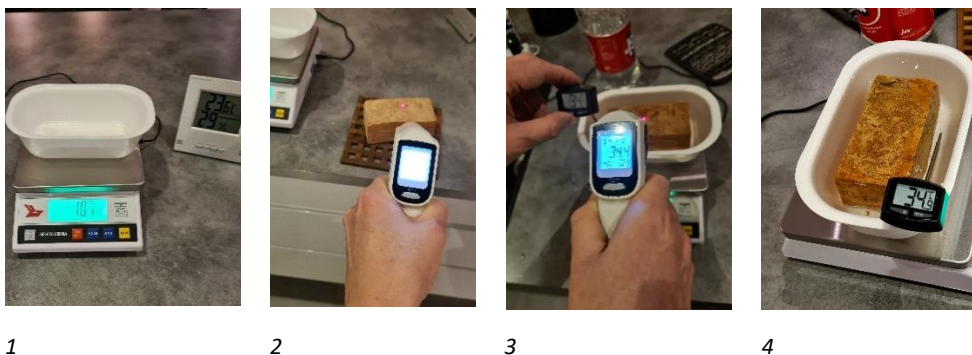
Teglstenens volumen, masse, densitet og maksimale fugtindhold ud fra ovennævnte data kan nu fastlægges. Forsøgsopstillingen fremgår af Figur 42.



Figur 42 Forsøgsopstilling for bestemmelse af teglstens densitet og maksimale fugtindhold. Herunder densitet i både våd og tør tilstand samt volumen via 'vandfortrængning'. (Egne billeder)

### Teglstens specifikke varmekapacitet

Tre emner udtørres ved 105 °C, til vægskonstans. Emnernes masse ved tør tilstand registreres. Varmekapacitet for emnerne bestemmes nu via kalorimetrligningen angivet i Ligning 7. Emnerne opvarmes til ca. 100 °C i ovn. Samtidig klargøres lille flamingokasse, (Figur 43.1) hvori der hældes vand med kendt masse ved stuetemperatur. Vandets temperatur registreres, og flamingokasses masse og vandets masse registreres. Efterfølgende registreres det opvarmede emnes temperatur med infrarød termistemperaturmåler, (Figur 43.2) lige inden det tages ud af ovn og puttes i vandet. Der røres rundt, og temperatur registreres i det øjeblik, temperaturstigning ikke bliver højere (Figur 43.3). Forsøget gentages tre gange med tre forskellige emner. Data er nu indsamlet til at kunne bestemme teglstensens varmekapacitet via kalorimetrligningen (Figur 43.4). Forsøgsopstillingen fremgår af Figur 43.



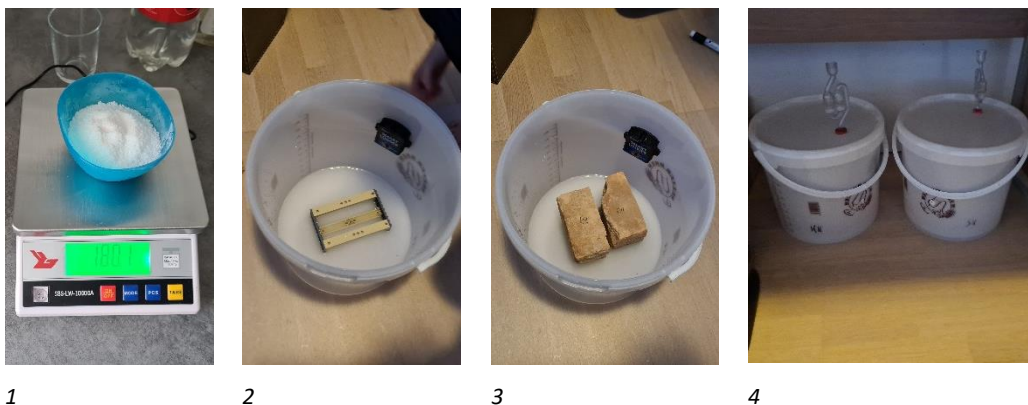
Figur 43 Forsøgsopstilling for bestemmelse af teglstens varmekapacitet. (Egne billeder.)

### Sorptionskurve for teglsten

Sorptionskurven for tegl er karakteristisk ved, at tegl opsuger ganske lidt fugt indtil en relativt høj relativ luftfugtighed (RF) opnås, jf. Figur 9, afsnit 4.2.4. Kurven, også kaldet sorptionsisotermen, kan bestemmes eksperimentelt ved brug af mættede saltopløsninger i konstant temperatur. To emner af teglsten placeres i en lukket beholder med en luftvolumen på ca. 13 liter. En rigelig mængde salt vejes op, så der sikres en mættet saltopløsning i en halv liter vand (Figur 44.1). I bunden af beholder hældes en halv liter af den mættede saltopløsning op (Figur 44.2). Emnerne klodses op i beholder, så de ikke kommer i direkte kontakt med den mættede saltopløsning (Figur 44.3). Beholderen forsegles, så den fremstår så diffusionstæt som overhovedet muligt. Den benyttede saltopløsning vil sikre en given luftfugtighed i beholderen, som monitoreres via Bluetooth fugtlogger (Figur 44.4).

Når emnerne går i fugtligevægt med luften i beholderen, som beskrevet i afsnit 4.2.5, vejes de, og deres fugtindhold pr. volumenenhed bestemmes ved den givne luftfugtighed. Forsøget udføres for saltopløsningerne natriumklorid og kaliumklorid, som forventes at kunne opretholde relative luftfugtigheder i de lukkede beholdere på hhv. 75 % og 85 %. Jf. Figur 11 i afsnit 4.2.5. Fire punkter ved 0, 75, 85 og 100 % luftfugtighed foreligger nu ved de gennemførte forsøg. Sorptionskurven for den pågældende teglsten kan nu optegnes til sammenligning med typiske sten fra WUFI's materialedatabase.

I den konkrete opstilling registreres 90 % RF for saltopløsningen kaliumklorid. I forbindelse med optegning af sorptionskurven registreres fugtindhold i emner derfor ved 90 % RF i stedet for 85 %. Forsøgsopstillingen er vist i Figur 44.



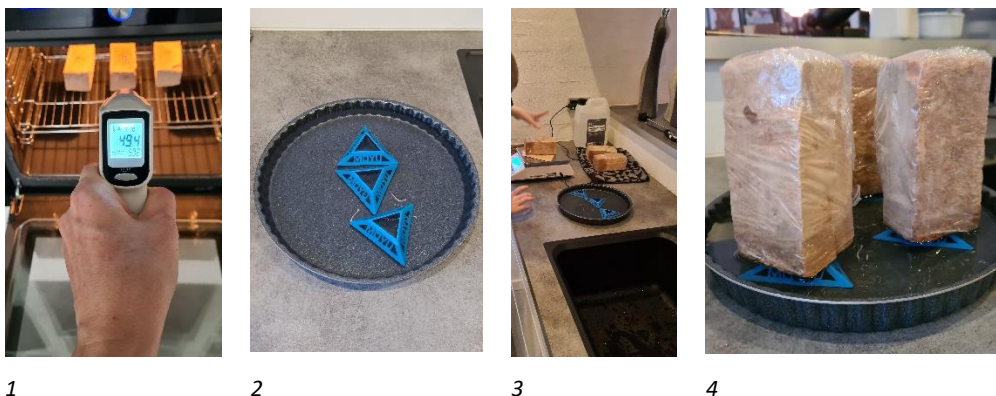
Figur 44 Forsøgsopstilling for bestemmelse af teglstens sorptionskurve via de mættede saltopløsninger natriumklorid og kaliumklorid. (Egne billeder.)

### Teglstens kapillarsugningsevne

Til undersøgelsen benyttes metoden beskrevet som LBM-prøvemetode 1. (14)

Tre emner udtages og vejes ved opstart af forsøg. Emnerne udtørres herefter ved 50 °C i ovn i mindst to døgn for at anvende en standardiseret udgangssituation (baseline) (Figur 45.1). Emnerne køles herefter til stuetemperatur, og emnernes vægt efter udtørring registreres. Der klargøres en mindre bakke, der udgør et kar med vandspejl (Figur 45.2). De-mineraliseret vand hældes i bakke, som emnerne suger fra. Emner indpakkes i plast, så kun én sugeflade fremstår, og fordampning fra emner til omgivelser derved minimeres. Emner vejes igen for at fastlægge massen af den benyttede plast (Figur 45.3).

Sugeflade af emnerne opklodses i vandet, så vand går 1-3mm op ad kanten på emnets sugeflade (Figur 45.4). Temperatur i vand skal ligge omkring 20 °C. Sugetid registreres i tidsintervaller, bestemt inden forsøgsopstart. Tidsinterval er gældende i perioden, emnet har kontakt med vandet. Efter udløb af hvert tidsinterval aftørres sugeflade med en opvredet klud, og emnet vejes. Processen fortsættes, indtil emne ikke op-suger mere vand. Herefter kan kapillaritetstallet (k-værdi) bestemmes som beskrevet i afsnit 4.2.6. Forsøgsopstillingen fremgår af billedfremstilling vist i Figur 45.



Figur 45 Forsøgsopstilling for bestemmelse af teglstens vandabsorptionskoefficient (Egne billeder.)

## **7.4 Dynamiske simuleringer**

Med en måleperiode for testvæggene i feltstudiets bygning på tre måneder, kan resultaterne ikke direkte vurderes via WUFI VTT mht. skimmelrisiko, da dette vil kræve mere end et års måleresultater. Der opbygges derfor teoretiske modeller af de belyste efterisoleringskonstruktioner, der tilnærmet underbygger de målte resultater, for at få mulighed for vurdering af risici for af skimmel-, råd- og frostskeer over en længere årrække.



WUFI 2D er benyttet til dynamiske simuleringer for efterfølgende bearbejdning af resultatfiler mht. vurdering af fugtforhold efter udført indvendig efterisolering. Den eksisterende konstruktion simuleres uden isoleringstiltag for at have en referencevæg som baseline. Som udgangspunkt simuleres der i fugtbelastningsklasse 3, da denne klasse anses som en realistisk 'worst case'. Registreres der potentielle fugtrelaterede problemer, belyses disse også ved tilsvarende simuleringer i fugtbelastningsklasse 2. Målingerne fra boligen i feltstudiet vurderes separat, men kan tillige sammenlignes med de simulerede resultater i fugtbelastningsklasse 2.

Hvordan isoleringsmetoderne responderer på klimaforandringer, belyses via simulering med fremskrevne klimafile for perioden 2030-2050.

#### 7.4.1 WUFI 2D - Input

WUFI-programmerne er udviklet af Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), og er en forkortelse for Wärme- und Feuchtetransport in stationär. Programmet benytter koblede varme- og fugt-differentialligninger til at bestemme bygningsfysiske forhold i konstruktioner, bestående af enkelte eller flere lag. Konstruktioner kan dog være så komplekse, at simuleringer i 1 dimension ikke er tilstrækkelig. Det er derfor muligt via WUFI 2D, at lave simuleringer i 2 dimensioner af eksempelvis samlinger, tilslutninger og hjørnedetaljer.

WUFI 2D benyttes i nærværende rapport til at simulere modeller af de forskellige vægkonstruktioner med tilføjelse af de efterisoleringstiltag, der undersøges. Der kan opstilles en række fællesbetingelser for de dynamiske simuleringer, som angivet i Tabel 7.

Tabel 7. Fællesparametre benyttet i alle WUFI 2D simuleringerne angående facaden. Bemærk valget af klimafilen Göteborg, som ligger i stort set samme horisontale linje som testbygningen, placeret i Tårs, Nordjylland.

| FÆLLESPARAMETRE WUFI 2D                     |                                                                                                                              |                                                                                                         |
|---------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Udvendigt                                   | Udeklimadata, herunder lufttemperatur (°C), relativ luftfugtighed (%), vind, regn og stråling hentes fra den samme klimafil. | Göteborg, LTH Data                                                                                      |
|                                             | Fugtkoefficient udv. overflade SD-værdi 0,3                                                                                  | Gældende for "acrylic façade paint".                                                                    |
|                                             | Jordfugt                                                                                                                     | Holzkirchen 1991                                                                                        |
| Indvendigt                                  | Lufttemperatur (°C)                                                                                                          | Konstant 20 °C                                                                                          |
|                                             | Relativ luftfugtighed (%) (ISO13788)                                                                                         | Varierende iht fugtbelastningsklasse 2 og 3.                                                            |
|                                             | Fugtkoefficient indv. overflade vægge SD-værdi 0,01                                                                          | Gældende for "Silicate paint"                                                                           |
|                                             | Andre overflader ingen behandling.                                                                                           | Gælder eksempelvis gulv, loft mv.                                                                       |
| Overfladekoefficienter                      | U-værdi iht. omgivelser                                                                                                      | 17 W/m <sup>2</sup> K                                                                                   |
|                                             | Kortbølgestråling, absorption (-)                                                                                            | 0,2 (hvid overflade)                                                                                    |
|                                             | Langbølgestråling, emission (-)                                                                                              | 0,9 (standardværdi)                                                                                     |
|                                             | Jordoverflades kortbølgerefl. (-)                                                                                            | 0,2 (standardværdi)                                                                                     |
| Regnvandspåvirkning bygning under 10m højde | R1 (-) = 0                                                                                                                   | Vertikal flade                                                                                          |
|                                             | R2 (m/s) = 0,07                                                                                                              | Standardværdi                                                                                           |
|                                             | Adhering Fraction of Rain (-) 0,1                                                                                            | Nedskrives væsentligt pga. nævnte overfladebehandlede facade med akrylmaling.                           |
|                                             |                                                                                                                              |                                                                                                         |
| Initiale værdier                            | Temp. (°C) W.C (kg/m <sup>3</sup> ) RF (%)                                                                                   | Standardværdier                                                                                         |
| Verdenshjørne                               | Syd                                                                                                                          | Lodret                                                                                                  |
| Simuleringsperiode                          | 01.10.2020-01.10.2025 eller 01.10.2020-01.10.2030                                                                            | Viser simulering ikke ligevægt efter 5 år på en given konstruktion vurderes i stedet en 10-års periode. |
|                                             | Fremtidsscenario: 01.01.2030-01.01.2050                                                                                      | Simuleret efter A1B.                                                                                    |
|                                             |                                                                                                                              |                                                                                                         |

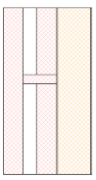
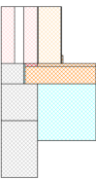
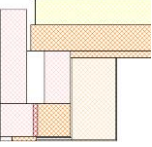
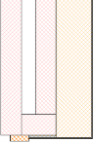
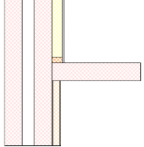


Udover fastlæggelse af fællesparametrene, skal forskellige materialeparametre bestemmes. For at få det mest retvisende billede af de eksisterende materials egenskaber til brug i simuleringerne, sammenlignes konstruktionssammensætningerne registreret ved bygningsgennemgangen med WUFI's materialedatabase. De primære materialetyper for eksisterende konstruktioner, der skal bestemmes til brug i simuleringerne, er tegltypen i for- og bagmur, hulmursisoleringstypen samt fastlæggelse af typen af konstruktionstræ, der oprindeligt er benyttet.

For tegl vælges den type i databasen med flest fællestræk med resultaterne fra parameterundersøgelsen, beskrevet i afsnit 7.3, med hovedvægt på sammenlignelige fugtparametre. Resterende materialer, benyttes i de efterisolerede vægge, fastlægges via tilhørende datablade på de produkter, der er benyttet. Fremgår produktet direkte i WUFI's database vælges dette. Alternativt vælges tilsvarende produkter med samme egenskaber.

#### 7.4.2 WUFI 2D - Konstruktionsopbygning

På baggrund af fællesparametre og fastlagte materialeparametre på de eksisterende konstruktioner, samt efterisoleringstyperne, opbygges modeller i WUFI 2D. Konstruktionsopbygningerne i WUFI 2D beskrives i forskellige simuleringstyper, som dækker de fokuspunkter der er blevet registreret under bygningsundersøgelsen, beskrevet i afsnit 8.17.1. Modellerne opbygges i 6 forskellige simuleringstyper, som beskrives detaljeret i bilag 7.4. For at beskrive forskellen mellem de seks forskellige simuleringstyper, opstilles hver type for væg 1 i Figur 46.

| Simuleringstype 1                                                                   | Simuleringstype 2                                                                   | Simuleringstype 3                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
|  |  |  |
| <i>Lodret snit gennem den ydervægskonstruktion.</i>                                 | <i>Lodret snit gennem ydervægskonstruktion ved placering af fast binder.</i>        | <i>Lodret snit ved ydervæg og krybekælders tilslutning til sokkel.</i>               |
| Simuleringstype 4                                                                   | Simuleringstype 5                                                                   | Simuleringstype 6                                                                    |
|  |  |  |
| <i>Lodret snit gennem etagedæk og træbjælke over vindueshuller.</i>                 | <i>Vandret snit gennem vinduesfalse.</i>                                            | <i>Vandret snit skillevægs tilslutning til ydervæg mellem væg 2 og væg 3.</i>        |

Figur 46 WUFI 2D simuleringstyperne 1-6, der opbygningsmæssigt dækker fokuspunkter registreret under bygningsundersøgelsen.

## 7.5 Bestemmelse materialetyper til simuleringer

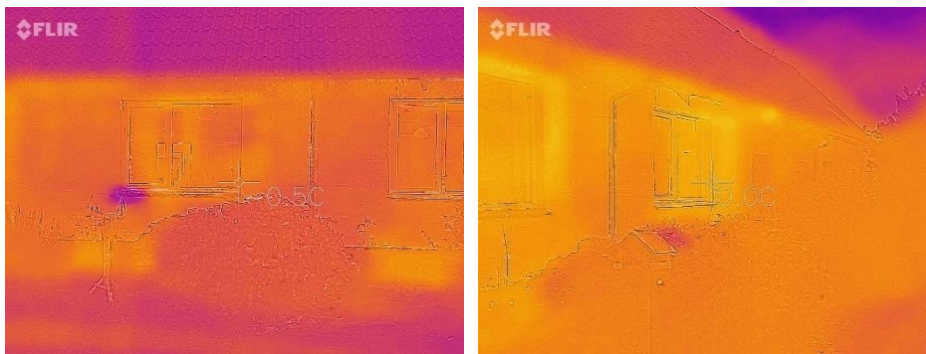
### 7.5.1 Materialeinput

#### Teglsten

På baggrund af parameterstudiet, præsenteret i afsnit 7.3, er teglsten Solid Brick Extruded (Vienna) valgt til simuleringerne.

#### Hulmursisolering

Type af isoleringsmateriale samt dennes tilstand har ikke kunnet undersøges nærmere. Dog viser en termografering af de berørte ydervægsfelter fra bygningsundersøgelsen, beskrevet i bilag 8.1, at hulmursisolering synes intakt og uden iøjnefaldende synlige sammenfald i ulden. De kuldebroer der antydes, er omkring vindueshuller og må formodes at være massivt murværk. Termograferingsbilleder af den oprindelige ydervægskonstruktion fremgår af Figur 47. Den mørke 'klat' i forgrund af begge billeder er tag af et fuglehus. Desuden anes konturen af en busk.



Figur 47 Termografering af den oprindelige ydervæg ved begge forsøgsrum set udefra. TV ses værelse 2. TH ses værelse 1.

Med udgangspunkt i disse observationer vælges 'Isover Integra Einblaswolle' fra WUFI materialedatabasen som hulmursisoleringsmateriale i simuleringerne. Ulden har materialeegenskaber som eksempelvis en almindelig indblæsningsuld fra Rockwool med en  $\lambda$ -værdi på 0,042.

#### Trætype

Bærende træbjælker i etageadskillelse, gulvadskeillelse og ved overligger over vinduer registreres udført i skovfyr. Fyrretræ var i 1900-tallet et hyppigt brugt byggemateriale, hvor kerneveddet i tørre miljøer har meget lang holdbarhed uden større tab af materialeegenskaber. Fyrretræ fremgår i WUFI databasen med horisontal- og vertikalværdier, og vælges direkte i de opstillede simuleringsmodeller med værdi svarende til den åreretning i træet, der simuleres.

#### Dampspærre

Den udførte dampspærre på loftet i begge forsøgsrum er en standard membran fra trælastbutikken Stark af typen RAW PRO Standard i tykkel-

sen 0,2 mm. Se datablad i bilag 7.5. Dampspærren har en oplyst diffusionsmodstand på  $Z > 400$  GPa. En PE-membran i 0,2 mm tykkelse fremgår i WUFI databasen med en Sd-værdi på 87 m. Omregnet svarer en Sd-værdi på 87 m til en Z-værdi på ca. 494 GPa. Denne membran i databasen vælges som dampspærre til de videre simuleringer.

#### Gips

Forsatsvæg ved væg 3 beklædes med gips. Fra WUFI materialedatabasen vælges materialet 'Gypsum Board', som har de samme materialegenskaber som en almindelig 13 mm gipsplade fra Knauf danogips.

#### Mineraluld

Som isolering i forsatsvæggen er der i simuleringerne anvendt ISOVER GW Intergra ZKF med en  $\lambda$ -værdi ændret fra 0,035 W/(m K), til en, i Danmark, mere almindeligt anvendt 0,037 W/(m K).

#### Kappilaraktiv isolering

I 'StoTherm In Comfort' anvendes Dennart mineral foam insulating board. Netop denne isolering er mulig at vælge i WUFI 2D materialedatabasen, hvorfor denne er anvendt til simuleringerne.

#### Klæber og puds

Til 'StoTherm In Comfort' anvendes StoLevell In Mineral til klæber og puds. Dette specifikke materiale findes i WUFI 2D materialedatabasen, hvorfor denne er anvendt til simuleringerne.

#### False isolering

Som falseisolering til 'StoTherm In Comfort' er valgt Aspen Aerogel. Materialeegenskaberne til denne isolering er analog til den systemgodkendte Sto-Aevero isolering. Dermed anvendes Aspen Aerogel i WUFI 2D simuleringerne.

### 7.5.2 WUFI Graph - Resultatbehandling

Efter hver simulering opgøres vandindholdet i den samlede konstruktion over tid. Der oprettes et 'trafiklys-princip', der illustrerer om fugtforholdet i konstruktionen er kritisk. Efterfølgende belyses teoretiske fugt- og temperaturforhold lokalt i kritiske punkter fastlagt under bygningsundersøgelsen. Punkterne kan følges i en længere årrække simuleringsmæssigt, med henblik på at vurdere, om et givet isoleringstiltag kan udføres uden risiko for fugtrelaterede skader i konstruktionen eller uhenigtsmæssig forringelse af indeklimaet.

Disse data sammenlignes efterfølgende via visualiseringsprogrammet WUFI Graph, hvor samme dataudtræk kan sammenstilles i samme tidsperiode for alle fire vægtyper. I vurderingsøjemed opstilles graferne for relativ luftfugtighed samt vægt-% fugt over tid. Overskrides kritiske niveauer over en længere tidsperiode, udtages punktet til nærmere undersøgelse.

### 7.5.3 WUFI VTT

WUFI VTT er en model baseret på en stor mængde af laboratorieprøver med skimmelvækst på primært træ under forskellige temperaturer og RF, hvis udfald danner basis for modellens forudsigelser. Modellen er udviklet til at kunne dække andre byggematerialer end træ (43).

Ud over valg af materialetype skal der også tages stilling til, hvor i konstruktionen man kigger, hvor sensitiv overfladen er for skimmelbegroning, samt i hvor høj grad overfladen er tilsmudset eller ej. Input i WUFI VTT, der benyttes i denne rapport til specifikke områder, er illustreret i Tabel 8.

Tabel 8 Inputdata gældende for de tre overfladetyper der er belyst via WUFI VTT.

| Surface                   | Between original surface and capillary-active insulation           | Between original surface and traditional light-frame wall          | Surface on wooden beams above windows   |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------|
| INPUT VTT                 |                                                                    |                                                                    |                                         |
| Occupant exposition class | Surfaces inside constructions without direct contact to indoor air | Surfaces inside constructions without direct contact to indoor air | Indoor surface in contact to indoor air |
| Material                  | Aerated autoclaved concrete                                        | Untreated pine or spruce                                           | Untreated pine or spruce                |
| Sensitivity Class         | Medium resistant                                                   | Sensitive                                                          | Sensitive                               |
| Material Class            | Relevant decline                                                   | Relevant decline                                                   | Relevant decline                        |
| Type of surface           | Cleaned                                                            | Cleaned                                                            | Cleaned                                 |

Modellens formler er indrettet sådan, at når skimmelvækst hæmmes under tørre og kolde forhold, vil dette for den tilhørende skimmelindekskurve blive registreret som et fald (44 s. 21). Den kritiske RF er i beregningsmodellen fastsat via en formel baseret på eksperimentelle forsøg, hvor  $RF_{kritisk}$  er sat til 80% for temperatur  $> 20\text{ °C}$ . Ved temperatur under  $20\text{ °C}$  beregner programmet  $RF_{kritisk}$  ved følgende formel:

Ligning 13 (hentet fra WUFI VTT hjælpeetekst)

$$RF_{kritisk} = -0,00267T^3 + 0,160T^2 - 3,13T + 100, \text{ hvor}$$

$T$ : Grader Celcius, ( $^{\circ}\text{C}$ )

Vejen til WUFI VTT-analysen går igen over WUFI Graph, hvor isopleth for punktet der kigges på, kan udtrækkes. Allerede hér vil man få en idé om mængden af resultater, der overskrider de indlagte grænselag for laveste fugtforhold, hvor der stadig kan opstå skimmel. Grænselagene be-

skrives ved LIM I for organiske materialer og LIM II for uorganiske materialer (16 s. 12). Den genererede isopleth-model kan efterfølgende eksporteres fra WUFI Graph direkte til WUFI VTT.

#### 7.5.4 Vurdering af målinger, skimmelvækst

Til vurdering af målinger benyttes trafiklys-princippet, beskrevet i afsnit 8.4. Perioden for de udførte målinger er under 12 måneder, hvilket udelukker benyttelse af WUFI VTT. Dermed vurderes risikoen for skimmelvækst på baggrund af tabel 9 i SBI-anvisning 224 Fugt i bygninger. Grænsebetingelserne præsenteres også i afsnit 8.4.

#### 7.5.5 Vurdering af målinger, materialenedbrydning

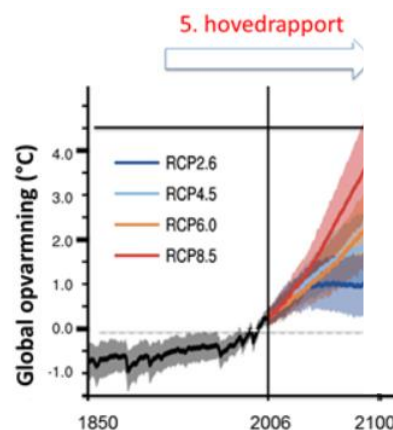
Risikoen for materialenedbrydning i konstruktionsdele i træ vises ved trafiklys. Da målinger viser temperatur og RF, sammenholdes disse værdier med sorptionskurven for træ, der præsenteres i afsnit 4.2.4. Grænsebetingelserne præsenteres i afsnit 8.4.

#### 7.5.6 Vurdering målinger, frostskeer

Risikoen for frostskeer vises ved trafiklys. Vurderingen baseret på sammenfald mellem perioder med RF overstigende 100 % og frost. Grænsebetingelserne præsenteres i afsnit 8.4.

### 7.6 Fremtidigt klimascenarie

Et klimascenarie er en beregning af, hvordan det går med udslippet af drivhusgasser - og dermed med klimaet - under forskellige forudsætninger omkring befolkningstilvækst, økonomi og teknologisk udvikling. FN har opstillet fire hovedscenarier, A1(RCP8.5), A2(RCP6.0), B1(RCP4.5) og B2(RCP2.6), der tilsammen giver et billede af de mulige udviklingsforløb. (45). Udviklingsforløbene samles i hovedrapporter, udgivet af FN, hvor spredningen mellem de fire scenarier vises for 5. hovedrapport i Figur 48.



Figur 48 IPCC's vurderinger som grafer, der viser spredningen af de fire scenarier for den fremtidige globale temperaturudvikling fra den 5. hovedrapport (45).

DMI har beregnet et A1B-scenarie for Danmark for perioden 2021-2050. I denne periode er det på grund af det hidtidige udslip og naturlige variationer i klimasystemet i praksis umuligt at skelne mellem de forskellige scenarier. A1B kan derfor repræsentere alle scenarierne i denne periode (45). BUILD har stillet en WAC-fil for perioden 2020-2050 til rådighed til brug i WUFI 2D. Den rene konstruktion fra Figur 46, beskrevet som simuleringstype 1, belyses i fugtbelastningsklasse 2 og 3 i perioden 2030-2050 i fremskrevet klimascenarie A1B. Derved tegnes et billede af det forventede fremtidige klimas indflydelse på de indvendige efterisoleringsmetoder, der kigges på. WAC-filen, der er benyttet i nærværende rapport, er oprettet i koordinatpunktet 56°52'52.0"N 8°31'02.0"E, placering 'Snedsted' ca. 30km syd for Hanstholm. 'Snedsted' er det punkt, der ligger tættest på bygningen i feltstudiet af de klimafilere, der er stillet til rådighed via BUILD.

### **7.7 Beregningsmetode U-værdier**

U-værdierne er beregnet med udgangspunkt i beskrivelsen i afsnit 4.1.3. For at finde den rene U-Værdi er der benyttet et excel-ark udviklet af ekstern lektor på Aalborg Universitet Anker Nielsen specifikt til formålet.

De nødvendige korrektioner i U-værdierne, grundet gennembrydninger af isoleringen, er beregnet via Ligning 2, der er begrundet i DS 418 (9 s. 60). Når korrektionerne er beregnet, er denne værdi tillagt den rene ydervægskonstruktion's U-værdi.

$\lambda$ -værdier til U-værdi beregningerne er fundet i de specifikke materialers datablade. Hvor dette ikke har været muligt, er generiske  $\lambda$ -værdier fundet via opslag i bl.a. DS 418 eller SBI-anvisning 224.

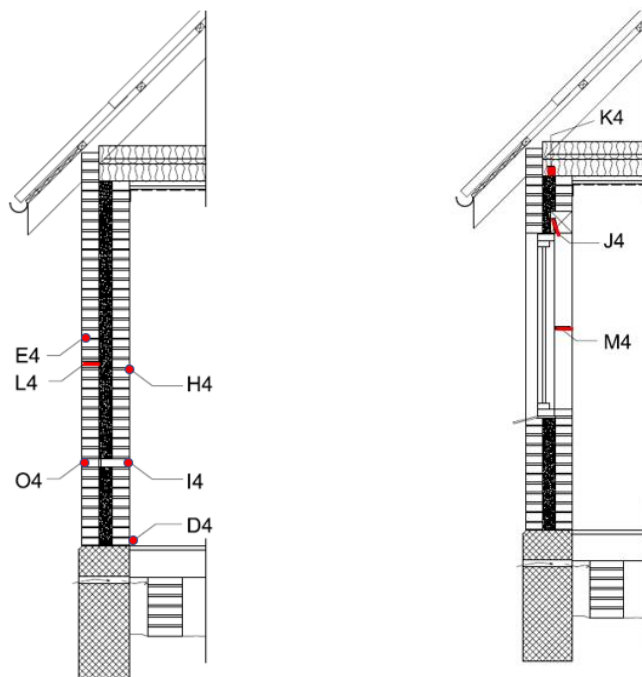
## 8 Resultater

Resultaterne er opdelt i følgende:

- Resultater fra bygningens forundersøgelse, der benyttes til at fastlægge særligt fugtkritiske punkter, til placering af sensor og simuleringer (afsnit 8.1).
- Resultater fra efterundersøgelse (afsnit 8.2).
- Resultater for bestemmelse af materialeparametre for tegl anvendt i feltstudiets ydervægge (afsnit 8.3).
- Simuleringer og målinger af hygrotermiske forhold (afsnit 8.4). Resultaterne præsenteres opdelt efter skadesmekanisme.
- Simuleringer af hygrotermiske forhold baseret på fremskrivning klimascenarie A1B (afsnit 8.5).
- U-værdiberegninger for de udførte isoleringstiltag (afsnit 8.6).

### 8.1 Forundersøgelse feltstudie

Et kig på et snit gennem ydervæggen fra feltstudiet viser en del punkter, som vil få ændrede klimabetingelser ved udførelse af indvendig efterisolering. Punkterne er markeret med rødt i Figur 49.



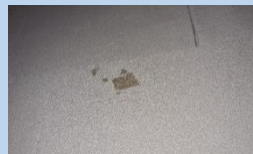
Figur 49 Konstruktionssnit gennem ydervæggen, hvor bogstav henviser til problemområde, og tal den pågældende vægtype (her vægtype 4).

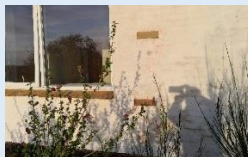
Der refereres med bogstavbenævnelse til det område, der angives i Figur 49. Punkterne er bestemt via bygningsundersøgelsen beskrevet i bilag 8.1. Samme bilag indeholder en mere udførlig beskrivelse af kommentarfeltet tilhørende det specifikke punkt. Tabel 9 præsenterer et kort resume af bilag 8.1.

Tabel 9 Resumé af bygningsundersøgelse, beskrevet i bilag 8.1

| Monitorområder                       | Kommentar                                                                                                                                       | Problemområder                                                                                                                                               | Billeddokumentation                                                                   |
|--------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| (D) Sokkeltilslutning væg            | <i>Krybekælder ventileret med udeluft som betyder lav temp. og høj RF til følge. Underbygget ved termografering.</i>                            | <i>Bag fodliste. Skimmelrisiko.<br/>Gulvbjælkeender. Materialenedbrydning.<br/>Oprindelig indv. Overflade. Skimmelrisiko</i>                                 |    |
| (E) Udv. facadeoverflade             | <i>Pudset teglsten malet i hvid akryl facademaling. Facade beskyttet ved udhæng. Smårevner i facadeoverflade.</i>                               | <i>Frostsprængning<br/>Algedannelse<br/>Vandindtrængning</i>                                                                                                 |    |
| (F) Oprindelig indv. overflade       | <i>Temperatur sænkes v. efterisolering=høj RF.</i>                                                                                              | <i>Skimmelrisiko generelt på hele overfladen.</i>                                                                                                            |    |
| (G) Midt isolering, isoleringstiltag | <i>Området overvåges for at se hvor meget betydning isoleringsmaterialets tykkelse har i forhold til at kunne fordele den fugt der ophobes.</i> | <i>Jo tyndere kapillaraktiv isoleringslag jo mindre masse er til stede at fordele fugten i.<br/>For traditionel forsatsvæg. Betydning af tæt dampspærre.</i> |  |



| Monitorområder                     | Kommentar                                                                                                           | Problemområder                                                                                                                                                  | Billedokumentation                                                                   |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| (H) Isoleret overflade mod rum     | <i>Ved overflade vendende mod opholdsrum forventes der ikke de store problemer, såfremt: -&gt;</i>                  | <i>Indvendig temperatur sikres omkring de 20 °C.<br/><br/>Konvektionen af indeluften skal være til stede, møbleringsmæssig skærmning. Ellers skimmelrisiko.</i> |   |
| (I) Fast binder v. indv. overflade | <i>Der er udført fast binder i ca. 50cm højde ved alle 4 vægtyper.</i>                                              | <i>Skimmelrisiko i området omkring den faste binder.</i>                                                                                                        |   |
| (J) Træoverligger vindueshul       | <i>Overliggeren fremstår i fin stand uden tegn på råd. Område tættest på vindue har større træfugt end mod rum.</i> | <i>Risiko for råd ved efterisolering.<br/><br/>Skimmelrisiko</i>                                                                                                |   |
| (K) Bjælkeender                    | <i>Over hver vægfelt ligger tagbjælke som kan observeres. Virker opfugtet.</i>                                      | <i>Risiko for råd ved efterisolering.</i>                                                                                                                       |  |

| Monitorområder                           | Kommentar                                                                                                                           | Problemområder                                                                                                                                          | Billeddokumentation                                                                  |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| (L) eksist. granulat ved den kolde side. | <i>Indvendig efterisolering medfører mindre varme-transport gennem konstruktionen.</i>                                              | <i>Risiko for kondensdannelse i granulat.</i>                                                                                                           |   |
| (M) Falser i vinduer                     | <i>Massivt murværk omkring døre- og vindueshuller.</i>                                                                              | <i>Falsens indpakning i indvendig isolering sænker eksisterende overfladetemperatur = større RF. Konvektion forsvinder.</i><br><br><i>Skimmelrisiko</i> |   |
| (N) V. skillevæg mellem vær 2 & vær 3    | <i>Skillevæggen passerer gennem de to isoleringssystemer v. væg 2 og væg 3 og tilsluttes den koldere oprindelige bagmur.</i>        | <i>skimmelrisiko</i>                                                                                                                                    |   |
| (O) Fast binder v. udv. overflade        | <i>Der forventes ikke problemer da binder bør være varmere end omkringliggende overflader. `Kort-sluttet` til indvendigt klima.</i> | <i>Kuldebroen gennem for- og bagmur har måske et højere fugtindhold lokalt i stenen.</i><br><br><i>Risiko frostsprængning.</i>                          |  |

Tabel 10 giver en oversigt over de konstruktionsdetaljer, der som resultat af ovenstående beskrivelse ønskes undersøgt nærmere.

Tabel 10. Oversigt over områder der ønskes simuleret og monitoreret ved alle 4 vægtyper.

| Monitorområder                        | Væg 1 | Væg2 | Væg3 | Væg4 |
|---------------------------------------|-------|------|------|------|
| (D) Sokkeltilslutning væg/krybekælder | •     | •    | •    | •    |
| (E) Udv. facadeoverflade              | •     | •    | •    | •    |
| (F) Oprindelig indv. overflade        | •     | •    | •    | •    |
| (G) Midt isolering, isoleringstiltag  | •     | •    | •    |      |
| (H) Isoleret overflade mod rum        | •     | •    | •    |      |
| (I) Fast binder v. indv. overflade    | •     | •    | •    | •    |
| (J) Træoverligger vindueshul          | •     | •    | •    | •    |
| (K) Bjælkeender                       | •     | •    | •    | •    |
| (L) eksist. granulat ved udv. flade   | •     | •    | •    | •    |
| (M) Falser i vinduer                  | •     | •    | •    | •    |
| (N) V. skillevæg mellem vær.1 & vær.2 |       | •    | •    |      |
| (O) Fast binder v. udv. overflade     | •     |      |      | •    |

I Tabel 10 præsenteres mange punkter. En mere selektiv tilgang, baseret på præudførte WUFI-simuleringer, med færre punkter, kunne være valgt. Ved tilblivelsen af denne rapport har det været nødvendigt at opbygge testvæggene med USB-Loggerne inden simuleringerne, for at få så lang en måleperiode som muligt. For at undgå ærgrelser i forhold til en evt. manglende monteret USB-Logger, er der valgt at montere relativt mange, velvidende at visse måske ikke har været nødvendige.

## 8.2 Efterundersøgelse

I forbindelse med de-montage af USB-loggere, blev der gennemført her-og-nu fugtmålinger af tilgængelige detaljer. Tabel 11 viser resultaterne. Bilag 8.2 viser resultaterne i sin helhed inkl. billeder af målinger.

Tabel 11 Resultatet af her-og-nu fugtmålinger foretaget ved efterundersøgelsen

|                                      | Væg 1 | Væg 2 | Væg 3 | Væg 4 |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| <b>Kapacitiv fugtmåling i digits</b> |       |       |       |       |
| Facade, midt højde                   | 099   | 088   | 073   | 047   |
| <b>Stikbens måling i % træfugt</b>   |       |       |       |       |
| Træoverligger, ved sidefalse         | 20%   | 30%   | 15%   | 16%   |
| Bjælkeender, over rum                | 14%   | 12%   | 12%   | 23%   |

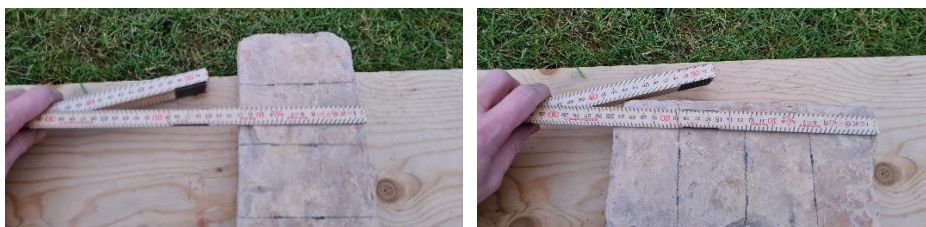
Kapacitive fugtmålinger i facadeoverfladerne viser, at væg 1 er mest fugtig, og væg 4 er mindst fugtig.

Stikbensmålinger i træoverliggerne, tæt ved sidefalsen viser, at væg 2 havde det højeste fugtindhold.

Stikbensmålinger så tæt ved bjælkeenderne som det var fysisk muligt i loftrummet over hver væg, viser at det højeste fugtindhold er over væg 4.

### 8.3 Teglstens materialeegenskaber

Den oprindelige teglstens densitet, varmekapacitet, sorption samt kapillarsugning er undersøgt via små 'køkkenbordsforsøg', beskrevet i afsnit 7.3. Alle registrerede målinger der har ført frem til resultater, angivet i nedenstående, fremgår af bilag 8.3. Figur 50 viser billeder af dimensioner på de udtagne teglsten til forsøgene.



Figur 50 Egne billeder af dimensioner på teglstensprøveemnerne A og B. Begge sten registreres med en bredde på 120 mm, en længde på 240 mm og en højde på 55 mm.

#### Teglstens basisoplysninger

De målte basisparametre på emner tilhørende teglsten A og B fremgår af Tabel 12.

Tabel 12 Basis materialeparametre på oprindelig teglsten. Der er udført forsøg på tre testemner i petringstørrelse (55x50x120 mm), navngivet A1, A2 og B2. Bogstav henviser til en specifik udtaget sten fra facaden i boligen fra feltstudiet (55x120x240 mm), hvor nummer angiver emnedelen af den specifikke sten. Se bilag 8.3 for beregninger.

| Type               | A1   | A2   | B2   | Gennemsnit  | Enhed             |
|--------------------|------|------|------|-------------|-------------------|
| Densitet, tør      | 1910 | 1932 | 1868 | <b>1903</b> | Kg/m <sup>3</sup> |
| Fugtindhold 100%RF | 362  | 365  | 353  | <b>360</b>  | Kg/m <sup>3</sup> |
| Varmekapacitet     | 649  | 660  | 653  | <b>654</b>  | J/kg°C            |

#### Oprindelig teglstens sorptionskurve

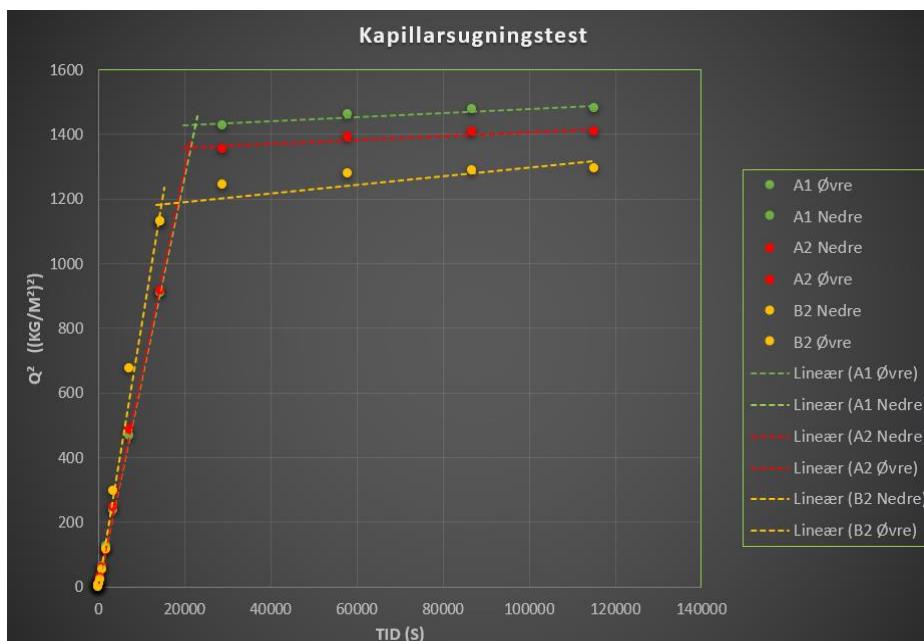
Emnerne A3 og B3 er placeret i lukket miljø ved gennemsnitlig 74 % luftfugtighed. Emnets fugtindhold er bestemt efter 54 dage, hvor den forventes at være gået i fugtligevægt med luften i det lukkede miljø. Emnerne A4 og B4 er placeret i lukket miljø ved gennemsnitlig 90 % luftfugtighed. Dvs. en RF ca. 5 % højere end forventet ved brug af saltopløsningen Kaliumklorid. Emnets fugtindhold er bestemt efter 54 dage, hvor det forventes at være gået i fugtligevægt med luften i det lukkede miljø. Alle fire emners fugtindhold ved disse niveauer af luftfugtighed fremgår af Tabel 13. Den optegnede sorptionskurve præsenteres senere i Tabel 15.

Tabel 13 Teglstensemners fugtindhold ved forskellig RF efter fugtligevægt. Der er udført forsøg på fire testemner i petringstørrelse (55x50x120 mm), navngivet A3, B3 og A4, B4. Bogstav henviser til en specifik udtaget sten fra facaden i boligen fra feltstudiet (50x120x240 mm), hvor nummer angiver emnedelen af den specifikke sten. Se bilag 8.3 for beregninger.

| Type:             | A3   | B3   | A4   | B4   | Gennemsnit  | Enhed             |
|-------------------|------|------|------|------|-------------|-------------------|
| Fugtindh. 0 %RF   | 0    | 0    | 0    | 0    | <b>0</b>    | kg/m <sup>3</sup> |
| Fugtindh. 75 % RF | 19,2 | 30,3 |      |      | <b>24,8</b> | kg/m <sup>3</sup> |
| Fugtindh. 90 % RF |      |      | 41,9 | 43,8 | <b>42,9</b> | kg/m <sup>3</sup> |
| Fugtindh. 100% RF | 353  | 333  | 369  | 332  | <b>347</b>  | kg/m <sup>3</sup> |

#### Oprindelig teglstens kapillarsugningsevne

Skæringspunkterne for henholdsvis øvre og nedre tendenslinje for prøveemnes sugsevne over tid aflæses i Figur 51. Emnets kapillaritetstal,  $k$ , beregnes efter formel angivet i Ligning 12, beskrevet i afsnit 4.2.6.



Figur 51 Teglstenenes sugeevne, angivet som opsuget vandmængde pr.  $m^2$  sugeflade opløftet i 2. potens, i forhold til tiden angivet i sekunder. Der er udført forsøg på 3 testemner i petringstørrelse (55x50x120 mm), navngivet A1, A2 og B2. Bogstav henviser til en specifik udtaget sten fra facaden i boligen fra feltstudiet (50x120x240 mm), hvor nummer angiver emnedelen af den specifikke sten. Se bilag 8.3 for beregninger.

Tabel 14 angiver de beregnede kapillaritetstal, tilhørende de benyttede emner i forsøget.

Tabel 14 Kapillaritetstallet,  $k$  for prøveemnerne A1, A2 og B2. Se bilag 8.3 for beregninger.

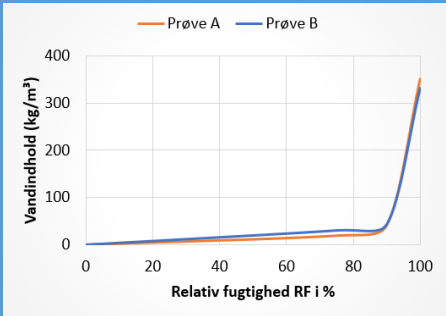
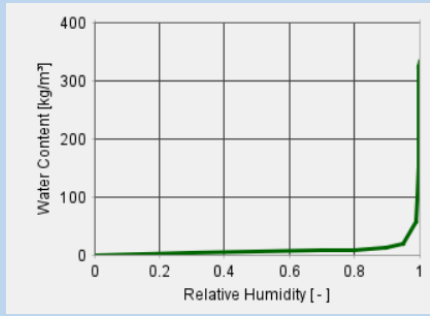
| Type:                 | A1   | A2   | B2   | Enhed                |
|-----------------------|------|------|------|----------------------|
| Kapillaritetstal, $k$ | 0,25 | 0,26 | 0,27 | Kg/m <sup>2</sup> Vs |

#### Valg af teglstenstype fra database

Kapillaritetstallet  $k$  kan sammenlignes med samme værdi for teglstenstyper angivet i WUFI materialedatabasen. Her angives tallet som materialets "Water-absorption-Coefficient."

Teglsten Solid Brick Extruded (Vienna) angivet i Tabel 15 er fundet i WUFI materialedatabasen og udvælges til de simuleringer, der er udført på de fire testvægge.

Tabel 15 Sammenligning af materialedata mellem oprindelig teglsten og valgt teglsten i WUFI materialedatabasen.

| Type                                                                                                                                                                              | Oprindelig tegl | Solid Brick Extruded (Vienna)                   |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------|
| Densitet, (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                                                                                    | 1903            | 1630                                            |
| Fugtindh. (kg/m <sup>3</sup> )                                                                                                                                                    | 360 (100 % RF)  | 333 (100 % RF)                                  |
| Varmekap. (J/kg°C)                                                                                                                                                                | 654             | 850                                             |
| Kap.tal, k (kg/m <sup>2</sup> vs)                                                                                                                                                 | 0,26            | 0,267                                           |
| <div>   </div> |                 |                                                 |
| Sorptionskurve eksisterende Tegl<br>Præstebakken 12A                                                                                                                              |                 | Sorptionskurve Solid Brick Extruded<br>(Vienna) |

Valget af den angivne sten fra databasen begrundes primært med ensartethed i de to typer teglstens fugttekniske egenskaber, da det primært er fugt der bearbejdes i nærværende rapport.

## 8.4 Simulerede og monitorerede forhold

### 8.4.1 Baggrund for præsentation af resultater

I dette afsnit præsenteres resultater dels fra simuleringer med WUFI 2D og den evt. tilhørende vurdering i WUFI VTT, dels fra målinger i feltstudiet. Resultater opsummeres baseret på 'trafiklys-princip' for udvalgte detaljer i de fire vægkonstruktioner. Der præsenteres kun detaljer, hvor der optræder kritiske eller potentielt kritiske resultater. Dokumentation for resultatvurderinger fremgår af bilag 8.4.

Grænsebetingelserne for trafiklysmarkeringen vedr. WUFI GRAPH samt målinger fremgår af Tabel 16, hvor grøn, gul og rød beskriver henholdsvis ukritiske, potentielt kritiske og kritiske fugtforhold.

Tabel 16 Grænsebetingelserne der ligger til grundlag for trafiklysvurderingerne iht. WUFI Graph og de målte resultater. Grøn markering viser et ukritisk resultat. Gul markering viser et potentielt kritisk resultat. Rød markering viser et kritisk resultat.

| Grænsebetingelser præsenteret ved trafiklys               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
|-----------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                           |  |  |  |
| Total vandophobning                                       |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
| Forløb                                                    | Stabilt fald                                                                      | Ujævn                                                                             | Stigende                                                                            |
| Skimmelvækst                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
| RF i uorganiske materialer (tegl/porebeton)               | < 90 %                                                                            | 90-95 %                                                                           | > 95 %                                                                              |
| RF i organiske materialer (træ og træbaserede materialer) | < 75 %                                                                            | 75-80 %                                                                           | > 80 %                                                                              |
| Biologisk vækst (Materialenedbrydning)                    |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
| RF ved tidligere angreb                                   | < 80 %                                                                            | 80-85 %                                                                           | > 85 %                                                                              |
| RF ved Ikke tidligere angreb                              | < 70 %                                                                            | 70-73 %                                                                           | > 73 %                                                                              |
| Frostskader                                               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                     |
| Sammenhæng RF og temperatur                               | < 95 % og > 3 °C                                                                  | 95-100 % og < 3 °C                                                                | > 100 % og < 0 °C                                                                   |

Grænsebetingelser for skimmelvækst præsenteret i Tabel 16 er baseret på tabel 9 i SBI-anvisning 224 Fugt i bygninger (8 s. 97). Grænseværdier for biologisk vækst er baseret på notat vedr. materialenedbrydning udgave 1 (16 s. 8). og figur 12 i SBI-anvisning 224 (8 s. 30). Grænseværdier for frost er baseret på eget skøn over sammenhængen mellem temperatur og fugt.

Forløbet af den totale vandophobning i konstruktionen, simuleret i WUFI 2D og præsenteret i WUFI GRAPH, markeres som et ukritisk resultat (grøn) ved en stabil og faldende tendens i simuleringsperioden. Et potentielt kritisk resultat (markeret som gul) gives ved en ujævn, men dog faldende/stabil tendens. Et kritisk resultat (markeret som rød) gives ved en stigende tendens i simuleringsperioden.

#### Skimmelvækst

De detaljer, der viser sig kritiske eller potentielt kritiske i forhold til skimmelvækst, simuleres i WUFI VTT iht. afsnit 7.5.3. Herved fremkommer ligeledes et 'trafiklys-resultat', der præsenteres ved detaljen.

Til vurdering af, om den forudsagte skimmelvækst er kritisk eller ej, har WUFI-VTT også en hjælpefunktion via 'trafiklys'. Grøn vil fremgå ved Mouldindeks 0-1 og gul fra 1-2, gældende for indvendige overflader. Rød



farve dækker 2-6 på Mould Indeks-skalaen. I Figur 52 ses tilhørende beskrivelser til trinene indeholdt i WUFI VTT's Mould indeks.

| Index | Growth rate                                                                        | Description              | Microscopic level | Visually detectable |
|-------|------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------|-------------------|---------------------|
| 0     | No mould growth                                                                    | Spores not activated     |                   |                     |
| 1     | Small amounts of mould on surface                                                  | Initial stages of growth |                   |                     |
| 2     | <10% coverage of mould on surface                                                  |                          |                   |                     |
| 3     | 10-30% coverage of mould on surface,<br>or < 50% coverage of mould<br>(microscope) | New spores produced      |                   |                     |
| 4     | 30-70% coverage of mould on surface,<br>or > 50% coverage of mould<br>(microscope) | Moderate growth          |                   |                     |
| 5     | >70% coverage of mould on surface                                                  | Plenty of growth         |                   |                     |
| 6     | Very heavy, dense mould growth covers<br>nearly 100% of the surface                | Coverage around 100%     |                   |                     |



Figur 52 Mould Indeks klassificering fra trinene 0-6 med beskrivelse. (Hentet fra WUFI VTT hjælpe-tekst). Til højre vises WUFI VTT's illustration af grønt 'trafiklys'.

Når WUFI VTT er anvendt til vurdering, markeres det i tabellen med <sup>(2)</sup>.

### Materialenedbrydning

Materialenedbrydning i bygningsdele i træ i form af biologisk vækst vurderes iht. nedenstående:

Kritisk niveau råd, intakt træ = 20 vægt % (16 s. 8).

Kritisk niveau råd, tid. angrebet træ = 15 vægt % (16 s. 8).

Målingerne fra feltstudiet viser kun RF og temperatur. Derfor anvendes sorptionskurven vist i Figur 9, til at give en indikation af den resulterende RF for ovenstående værdier i vægt % træfugt. I sorptionskurven Figur 9 kan man aflæse ved hvilken RF de kritiske vægt % træfugt er opnået. 20 vægt % = ca. 85% RF og 15 vægt % = ca. 73 % RF. Grænsebetingelser i Tabel 16 er begrundet i dette.

Frostskader er afhængige af, at RF er over 100 % samt at temperaturen er under 0 °C. Der er i Tabel 16 opstillet grænseværdier, der tager hensyn til dette med en rimelig margin.

ND anvendes i følgende tabeller og betyder 'Not Determined'. Eksempelvis vil et ukritisk resultat i fugtbelastningsklasse 3 også være ukritisk i fugtbelastningsklasse 2. Dette angives med ND. Ligeledes kan et punkt, der antages ukritisk baseret på andre tilsvarende forhold, beskrives med ND i tabellerne.

### 8.4.2 Resultater væg 1

#### Udvikling i totalt vandindhold

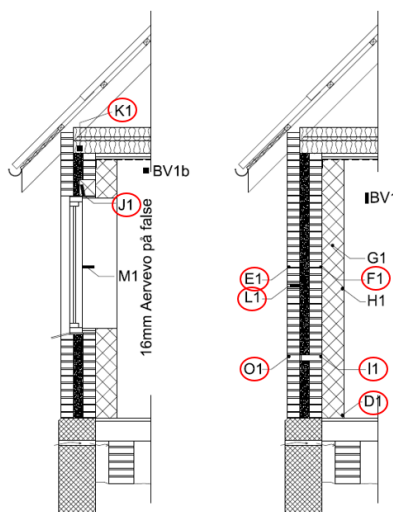
Tabel 17 viser en opsummering af simuleringresultaterne, illustreret ved trafiklys, for forløbet af det totale vandindhold i væg 1 i hele simuleringperioden. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 17.

Tabel 17 Forløbet af det totale vandindhold i væg 1 i hele simuleringsperioden. Grøn markering beskriver et ukritisk forløb af det totale vandindhold (stabilt fald over perioden), gul markering beskriver et potentielt kritisk forløb af det totale vandindhold (ujævn forløb) og rød markering beskriver et kritisk forløb af det totale vandindhold (stigende vandindhold). Tallet angivet i () henviser til konkret simuleringstype, beskrevet i bilag 7.4.

| Forløbet af det totale vandindhold i væg 1 |                       |    |
|--------------------------------------------|-----------------------|----|
|                                            | Fugtbelastningsklasse |    |
|                                            | 2                     | 3  |
| (2) Ved faste bindere                      | ●                     | ●  |
| (3) Ved Sokkeltilslutning                  | ●                     | ND |
| (4) Ved tagfod                             | ●                     | ●  |
| (5) Ved Vinduesfalsler                     | ●                     | ●  |
| (4) Ved træoverligger                      | ●                     | ●  |

I fugtbelastningsklasse 3 viser Tabel 17 kritiske resultater ved tagfod samt ved træoverliggeren. Potentielt kritiske resultater vises ved de faste bindere samt ved vinduesfalsler. I fugtbelastningsklasse 2 vises i potentielt kritisk resultat ved sokkeltilslutningen.

Figur 53 viser et snit i væg 1. De punkter der er behandlet i nærværende resultatafsnit som værende kritiske eller potentielt kritiske, er markeret med en rød ring.



Figur 53 Vertikalt snit i væg 1 med rød markering af punkter der er fundet kritiske eller potentielt kritiske ved hhv. simulering eller målinger. (Se bilag 8.4).

### Vurdering af risiko for skimmelvækst

Tabel 18 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 1 vedr. risiko for skimmelvækst, baseret på resultatvurderingerne angivet i bilag 8.4.

*Tabel 18 Resultater af simuleringer og målinger i væg 1. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes i Figur 53. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.*

| Specifikke monitorområder i væg 1                     |                       |                  |                        |
|-------------------------------------------------------|-----------------------|------------------|------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Skimmelvækst</b>         | Teoretisk             |                  | Målinger               |
|                                                       | Fugtbelastningsklasse |                  | Periode 15/1-15/4 2021 |
|                                                       | 2                     | 3                | Forventet FBK2         |
| (F1) Kun konstruktion. Indvendig oprindelig overflade | ND                    | ● <sup>(2)</sup> | ●                      |
| (I1) Fast binder. Indvendig oprindelig overflade      | ● <sup>(2)</sup>      | ● <sup>(2)</sup> | ●                      |
| (J1) Træoverligger. Udvendig overflade                | ● <sup>(2)</sup>      | ● <sup>(2)</sup> | ●                      |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. <sup>(2)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI VTT. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

I fugtbelastningsklasse 3 ses der i Tabel 18 et potentielt kritisk forhold ved den oprindelige indvendige overflade ud for den faste binder (I1), samt et decideret kritisk forhold ved den udvendige side af træoverliggeren over vinduet (J1) ved simulering. Begge kritiske forhold er vurderet på baggrund af WUFI VTT-simuleringer. Ved målingerne ses der et kritisk resultat ved den oprindelige indvendige overflade (F1), samt et potentielt kritisk resultat ved træoverliggerens udvendige side (J1).

### Vurdering af risiko for materialenedbrydning

Tabel 19 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 1 vedr. risiko for materialenedbrydning. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 19.

Tabel 19 Resultater af simuleringer og målinger i væg 1. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes i Figur 53. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 1                     |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Materialenedbrydning</b> | Teoretisk                                                                                        |                                                                                                  | Målinger                                                                            |
|                                                       | Fugtbelastningsklasse                                                                            |                                                                                                  | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                                       | 2                                                                                                | 3                                                                                                | Forventet FBK2                                                                      |
| (D1) Sokkeltilslutning. Gulvbjælkeender               |  <sup>(1)</sup> | ND                                                                                               | ND                                                                                  |
| (K1) Tagfod. Bjælkeender tidligere angrebet           |  <sup>(1)</sup> |  <sup>(1)</sup> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 19 viser simulerede kritiske forhold ved bjælkeender over krybekælder i fugtbelastningsklasse 2 (D1) samt ved en bjælkeende i tagfoden der tidligere har været angrebet af trænedbrydende svampe i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 (K1). Målingerne viser et potentielt kritisk resultat ved en bjælkeende i tagfoden, der tidligere har været udsat for materialenedbrydning (K1).

#### Vurdering af risiko for frostskafer

Tabel 20 opsummerer simulering- og måleresultaterne ved væg 1 vedr. risiko for frostskafer. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 20.

Tabel 20 Resultater af simuleringer og målinger i væg 1. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes i Figur 53. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 1            |                                                                                                  |                                                                                                  |                                                                                     |
|----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Frostskader</b> | Teoretisk                                                                                        |                                                                                                  | Målinger                                                                            |
|                                              | Fugtbelastningsklasse                                                                            |                                                                                                  | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                              | 2                                                                                                | 3                                                                                                | Forventet FBK2                                                                      |
| (E1) Kun konstruktion. Udvendig overflade    | ND                                                                                               |  <sup>(1)</sup> |  |
| (O1) Fast binder. Udvendig overflade         |  <sup>(1)</sup> |  <sup>(1)</sup> |  |
| (L1) Kun konstruktion. yderside granulat     |  <sup>(1)</sup> |  <sup>(1)</sup> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 20 viser simulerede ukritiske forhold iht. frostska-der i facadeoverfladen fugtbelastningsklasse 3. Derfor foretages der ingen vurdering i fugtbelastningsklasse 2 (E1). Ved den kolde side af hulmursisoleringen i den oprindelige hulmur og ved den udvendige side af den faste binder vises et potentielt kritisk resultat ved simulering (L1) og (O1). Modsat vises resultatet af målingerne kritiske resultater ved facadeoverfladen, både ved den faste binder (O1) og ved den rene konstruktion (E1). Ved den kolde side af eksisterende hulmursisolering præsenteres et ukritisk resultat ved måling (L1).

#### 8.4.3 Resultater væg 2

##### Udvikling i totalt vandindhold

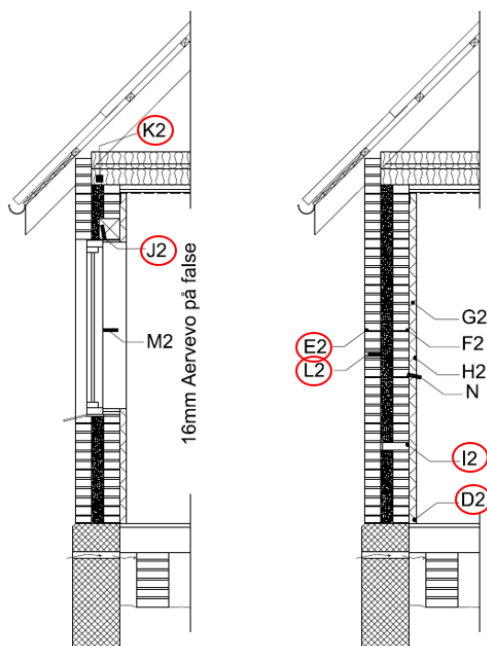
Tabel 21 viser en opsummering af simuleringresultaterne, illustreret ved trafiklys, for forløbet af det totale vandindhold i væg 2 i hele simuleringsperioden. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 21.

Tabel 21 Forløbet af det totale vandindhold i væg 2 i hele simuleringsperioden. Grøn markering beskriver et ukritisk forløb af det totale vandindhold (stabilt fald over perioden), gul markering beskriver et potentielt kritisk forløb af det totale vandindhold (ujævn forløb) og rød markering beskriver et kritisk forløb af det totale vandindhold (stigende vandindhold). Tallet angivet i () henviser til konkret simuleringstype, beskrevet i bilag 7.4.

| Forløbet af det totale vandindhold i væg 2 |                       |    |
|--------------------------------------------|-----------------------|----|
|                                            | Fugtbelastningsklasse |    |
|                                            | 2                     | 3  |
| (2) Ved faste bindere                      | ●                     | ●  |
| (3) Ved sokkeltilslutning                  | ●                     | ND |
| (5) Ved vinduesfalsler                     | ●                     | ●  |

I fugtbelastningsklasse 3 viser Tabel 21 potentielt kritiske resultater ved de faste bindere samt ved vinduesfalsler. I fugtbelastningsklasse 2 vises et potentielt kritisk resultat ved sokkeltilslutningen.

Figur 54 viser et snit i væg 2. De punkter der er behandlet i nærværende resultatafsnit som værende kritiske eller potentielt kritiske, er markeret med en rød ring.



Figur 54 Vertikalt snit i væg 2 med rød markering af punkter der er fundet kritiske eller potentielt kritiske ved hhv. simulering eller målinger. (Se bilag 8.4).

### Vurdering af risiko for skimmelvækst

Tabel 22 opsummerer simulering- og måleresultaterne ved væg 2 vedr. risiko for skimmelvækst, baseret på resultatvurderingerne angivet i bilag 8.4.

*Tabel 22 Resultater af simuleringer og målinger i væg 2. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 54. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.*

| Specifikke monitorområder i væg 2                |                                                                                         |                                                                                         |                                                                                       |
|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Skimmelvækst</b>    | Teoretisk                                                                               |                                                                                         | Målinger                                                                              |
|                                                  | Fugtbelastningsklasse                                                                   |                                                                                         | Periode 15/1-15/4 2021                                                                |
|                                                  | 2                                                                                       | 3                                                                                       | Forventet FBK2                                                                        |
| (I2) Fast binder. Indvendig oprindelig overflade | ND                                                                                      | (2)    |    |
| (D2) Sokkeltilslutning. Bag fodliste             | (1)    | ND                                                                                      |    |
| (J2) Træoverligger. Udvendig overflade           | (2)  | (2)  |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. <sup>(2)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI VTT. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

I fugtbelastningsklasse 3 ses der i Tabel 22 et decideret kritisk forhold ved den udvendige side af træoverliggeren over vinduet (J2). Den kritiske vurdering er foretaget på baggrund af WUFI VTT-simuleringer. Ved målinger ses der et potentielt kritisk resultat med den oprindelige indvendige overflade ved den faste binder (I2), samt kritiske resultater ved tilslutningen bag fodlisten (D2) og ved træoverliggerens udvendige side (J2).

### Vurdering af risiko for materialenedbrydning

Tabel 23 opsummerer simulering- og måleresultaterne ved væg 2 vedr. risiko for materialenedbrydning. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 23.

Tabel 23 Resultater af simuleringer og målinger i væg 2. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i ( ) henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 54. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 2                     |                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Materialenedbrydning</b> | Teoretisk                                                                                           |                                                                                                     | Målinger                                                                            |
|                                                       | Fugtbelastningsklasse                                                                               |                                                                                                     | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                                       | 2                                                                                                   | 3                                                                                                   | Forventet FBK2                                                                      |
| (D2) Sokkeltilslutning. Bjælkeender                   | <sup>(1)</sup><br> | ND                                                                                                  | ND                                                                                  |
| (K2) Tagfod. Bjælkeender intakt                       | ND                                                                                                  | <sup>(1)</sup><br> |  |
| (K2) Tagfod. Bjælkeender tidligere angrebet           | <sup>(1)</sup><br> | <sup>(1)</sup><br> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 23 viser simulerede kritiske forhold ved bjælkeender over krybekælder i fugtbelastningsklasse 2 (D2), samt ved en bjælkeende i tagfoden, der tidligere har været angrebet af trænedbrydende svampe i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 (K2). Målingerne viser et potentielt kritisk resultat ved en intakt bjælkeende, samt et kritisk resultat ved en bjælkeende i tagfoden, der tidligere har været angrebet af materialenedbrydning (K2).

#### Vurdering af risiko for frostskaader

Tabel 24 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 2 vedr. risiko for frostskaader. Bilag 8.4 samt danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 24.



Tabel 24 Resultater af simuleringer og målinger i væg 2. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes i Figur 54. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 2            |                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                     |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Frostskader</b> | Teoretisk                                                                                           |                                                                                                     | Målinger                                                                            |
|                                              | Fugtbelastningsklasse                                                                               |                                                                                                     | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                              | 2                                                                                                   | 3                                                                                                   | Forventet FBK2                                                                      |
| (E2) Kun konstruktion. Udvendig overflade    | ND                                                                                                  | <sup>(1)</sup><br> |  |
| (L2) Kun konstruktion. Yderside granulat     | <sup>(1)</sup><br> | <sup>(1)</sup><br> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 24 viser simulerede ukritiske forhold iht. frostska-der i facadeoverfladen i fugtbelastningsklasse 3. Derfor foretages ingen vurdering i fugtbelastningsklasse 2 (E2). Ved den kolde side af hulmursisoleringen i den oprindelige hulmur vises potentielt kritiske resultater i begge fugtbelastningsklasser ved simulering (L2). Modsat viser resultatet af målingerne kritiske resultater ved facadeoverflade (E2) og ved den kolde side af hulmursisoleringen (L2).

#### 8.4.4 Resultater væg 3

##### Udvikling i totalt vandindhold

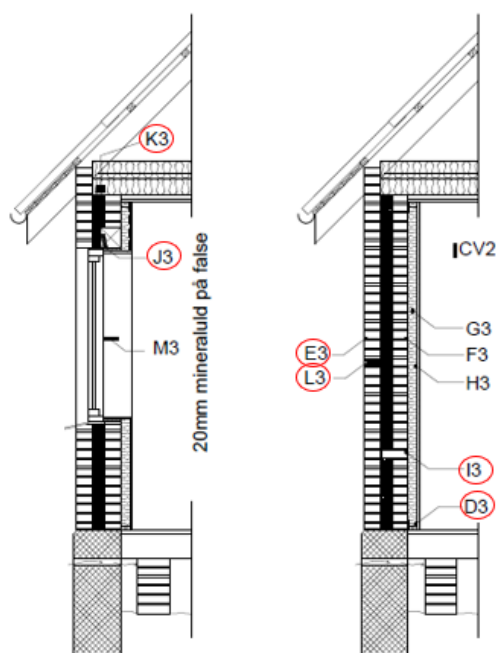
Tabel 25 viser en opsummering af simuleringsresultaterne illustreret ved trafiklys for forløbet af det totale vandindhold i væg 3 i hele simuleringsperioden. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 25.

Tabel 25 Forløbet af det totale vandindhold i væg 3 i simuleringsperioden. Grøn markering beskriver et ukritisk forløb af det totale vandindhold (stabilt fald over perioden), gul markering beskriver et potentielt kritisk forløb af det totale vandindhold (ujævnt forløb) og rød markering beskriver et kritisk forløb af det totale vandindhold (stigende vandindhold). Tallet angivet i ( ) henviser til konkret simuleringstype, beskrevet i bilag 7.4.

| Forløbet af det totale vandindhold i væg 3 |                       |    |
|--------------------------------------------|-----------------------|----|
|                                            | Fugtbelastningsklasse |    |
|                                            | 2                     | 3  |
| (2) Ved faste bindere                      | ●                     | ●  |
| (3) Ved sokkeltilslutning                  | ●                     | ND |
| (4) Ved tagfod                             | ●                     | ●  |
| (4) Ved træoverligger                      | ●                     | ●  |

I fugtbelastningsklasse 3 viser Tabel 25 potentielle kritiske resultater ved de faste bindere, ved tagfoden samt ved træoverligger. I fugtbelastningsklasse 2 ses potentielt kritiske resultater ved sokkeltilslutning, ved tagfod samt ved træoverligger.

Figur 55 viser et snit i væg 3. De punkter der er behandlet i nærværende resultatafsnit som værende kritiske eller potentielt kritiske, er markeret med en rød ring.



Figur 55 Vertikalt snit i væg 3 med rød markering af punkter der er fundet kritiske eller potentielt kritiske ved hhv. simulering eller målinger. (Se bilag 8.4).

### Vurdering af risiko for skimmelvækst

Tabel 26 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 3 vedr. risiko for skimmelvækst, baseret på resultatvurderingerne angivet i bilag 8.4.

*Tabel 26. Resultater af simuleringer og målinger i væg 3. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 55. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.*

| Specifikke monitorområder i væg 3                |                                                                                          |                                                                                          |                                                                                     |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Skimmelvækst</b>    | Teoretisk                                                                                |                                                                                          | Målinger                                                                            |
|                                                  | Fugtbelastningsklasse                                                                    |                                                                                          | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                                  | 2                                                                                        | 3                                                                                        | Forventet FBK2                                                                      |
| (I3) Fast binder. Indvendig oprindelig overflade | (2)<br> | (2)<br> |  |
| (J3) Træoverligger. Udvendig overflade           | (2)<br> | (2)<br> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. <sup>(2)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI VTT. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 26 viser kritiske forhold ved den oprindelige indvendige overflade ved faste bindere (I3), samt ved den udvendige side af træoverliggeren over vinduet (J3) i fugtbelastningsklasse 3 ved simulering. Begge kritiske forhold er vurderet på baggrund af WUFI VTT-simuleringer. Ved målingerne ses der et kritisk resultat ved den oprindelige indvendige overflade ved faste bindere (I3) samt ved den udvendige side af træoverliggeren (J3).

### Vurdering af risiko for materialenedbrydning

Tabel 27 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 3 vedr. risiko for materialenedbrydning. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 27.

Tabel 27 Resultater af simuleringer og målinger i væg 3. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i ( ) henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 55. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 3                     |                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Materialenedbrydning</b> | Teoretisk                                                                                           |                                                                                                     | Målinger                                                                            |
|                                                       | Fugtbelastningsklasse                                                                               |                                                                                                     | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                                       | 2                                                                                                   | 3                                                                                                   | Forventet FBK2                                                                      |
| (D3) Sokkeltilslutning. Bjælkeender                   | <sup>(1)</sup><br> | ND                                                                                                  | ND                                                                                  |
| (K3) Tagfod. Bjælkeender intakt                       | ND                                                                                                  | <sup>(1)</sup><br> |  |
| (K3) Tagfod. Bjælkeender tidligere angrebet           | <sup>(1)</sup><br> | <sup>(1)</sup><br> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 27 viser simulerede kritiske forhold ved bjælkeender over krybekælder i fugtbelastningsklasse 2 (D3) samt ved en bjælkeende i tagfoden, der tidligere har været angrebet af trænedbrydende svampe i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 (K3). Målinger viser et potentielt kritisk resultat ved en bjælkeende i tagfoden, der ikke tidligere har været angrebet af materialenedbrydning, samt et kritisk resultat ved en bjælkeende der tidligere har været udsat for et angreb (K3).

#### Vurdering af risiko for frostskafer

Tabel 28 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 3 vedr. risiko for frostskafer. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 28.

Tabel 28 Resultater af simuleringer og målinger i væg 3. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i ( ) henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 55. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 3            |                                                                                                     |                                                                                                     |                                                                                     |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Frostskader</b> | Teoretisk                                                                                           |                                                                                                     | Målinger                                                                            |
|                                              | Fugtbelastningsklasse                                                                               |                                                                                                     | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                              | 2                                                                                                   | 3                                                                                                   | Forventet FBK2                                                                      |
| (E3) Kun konstruktion. Udvendig overflade    | ND                                                                                                  | <sup>(1)</sup><br> |  |
| (L3) Kun konstruktion. Yderside granulat     | <sup>(1)</sup><br> | <sup>(1)</sup><br> |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 28 viser simulerede ukritiske forhold iht. frostska-der i facadeoverfladen i fugtbelastningsklasse 3. Derfor foretages der ingen vurdering i fugtbelastningsklasse 2 (E3). Ved den kolde side af hulmursisoleringen i den oprindelige hulmur vises potentielt kritiske resultater i begge fugtbelastningsklasser ved simulering (L3). Modsat viser resultatet af målin-gerne kritiske resultater ved facadeoverfladen (E3) samt ved den kolde side af hulmursisoleringen (L3).

#### 8.4.5 Resultater væg 4

##### Udvikling i totalt vandindhold

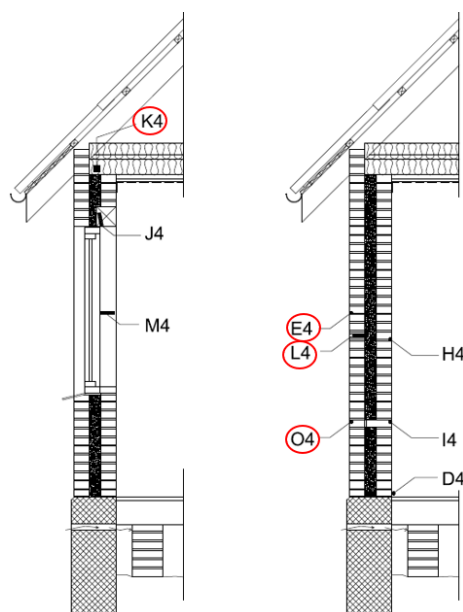
Tabel 29 viser en opsummering af simuleringresultaterne, illustreret ved trafiklys, af forløbet af det totale vandindhold i væg 4 i hele simule-ringsperioden. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 29.

Tabel 29 Forløbet af det totale vandindhold i væg 4 i simuleringsperioden. Grøn markering beskriver et ukritisk forløb af det totale vandindhold (stabilt over hele perioden), gul markering beskriver et potentielt kritisk forløb af det totale vandindhold (ujævnt forløb) og rød markering beskriver et kritisk forløb af det totale vandindhold (stigende vandindhold). Tallet angivet i () henviser til konkret simuleringstype, beskrevet i bilag 7.4.

| Forløbet af det totale vandindhold i væg 4 |                       |    |
|--------------------------------------------|-----------------------|----|
|                                            | Fugtbelastningsklasse |    |
|                                            | 2                     | 3  |
| (2) Ved faste bindere                      | ●                     | ●  |
| (3) Ved sokkeltilslutning                  | ●                     | ND |
| (5) Ved vinduesfalsler                     | ●                     | ●  |

I fugtbelastningsklasse 3 viser Tabel 29 potentielt kritiske forhold ved de faste bindere samt ved vinduesfalsler. I fugtbelastningsklasse 2 ses der et potentielt kritisk resultat ved sokkeltilslutningen.

Figur 56 viser et snit i væg 4. De punkter der er behandlet i nærværende resultatafsnit som værende kritiske eller potentielt kritiske, er markeret med en rød ring.



Figur 56 Vertikalt snit i væg 4 med rød markering af punkter der er fundet kritiske eller potentielt kritiske ved hhv. simulering eller målinger. (Se bilag 8.4)

#### Vurdering af risiko for materialenedbrydning

Tabel 30 opsummerer simulerings- og måleresultaterne ved væg 4 vedr. risiko for materialenedbrydning. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 30.

Tabel 30 Resultater af simuleringer og målinger i væg 4. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i () henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 56. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 4                     |                                                                                                  |                                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Materialenedbrydning</b> | Teoretisk                                                                                        |                                                                                                     | Målinger                                                                            |
|                                                       | Fugtbelastningsklasse                                                                            |                                                                                                     | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                                       | 2                                                                                                | 3                                                                                                   | Forventet FBK2                                                                      |
| (K4) Tagfod. Bjælkeender intakt                       | ND                                                                                               | <sup>(1)</sup><br> |  |
| (K4) Tagfod. Bjælkeender tidligere angrebet           |  <sup>(1)</sup> |  <sup>(1)</sup>    |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

Tabel 30 viser simulerede kritiske forhold ved en bjælkeende i tagfoden der tidligere har været angrebet af materialenedbrydning i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 (K4). Målingerne viser kritiske resultater ved bjælkeender, uanset om den tidligere har været angrebet materialenedbrydning eller ej (K4).

#### Vurdering af risiko for frostskafer

Tabel 31 opsummerer simulering- og måleresultaterne ved væg 4 vedr. risiko for frostskafer. Bilag 8.4 danner baggrund for opsummeringen af resultaterne i Tabel 31.

Tabel 31 Resultater af simuleringer og målinger i væg 4. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav og tal angivet i ( ) henviser til måle/simuleringspunkt samt væg nr. Punktet kan findes Figur 56. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Specifikke monitorområder i væg 4            |                                                                                       |                                                                                       |                                                                                     |
|----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tema for undersøgelse:<br><b>Frostskader</b> | Teoretisk                                                                             |                                                                                       | Målinger                                                                            |
|                                              | Fugtbelastningsklasse                                                                 |                                                                                       | Periode 15/1-15/4 2021                                                              |
|                                              | 2                                                                                     | 3                                                                                     | Forventet FBK2                                                                      |
| (E4) Ren væg. Udvendig overflade             | (1)  | (1)  |  |
| (O4) Fast binder. Udvendig overflade         | (1)  | (1)  |  |
| (L4) Kun konstruktion. Yderside granulat     | (1)  | (1)  |  |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

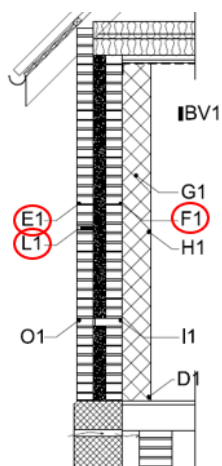
Tabel 31 viser simulerede potentielt kritiske forhold iht. frostskaeder i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 ved alle tre undersøgte detaljer (E4, O4, L4). Modsat viser målingerne kritiske resultater ved alle tre detaljer (E4, O4, L4).

## 8.5 Fremtidigt klimascenarie A1B ved simuleringstype 1

I nærværende afsnit kigges der på fremtidigt klima i perioden 2030-2050, simuleret efter klimascenariet A1B, beskrevet i afsnit 7.6.

Figur 57 viser et snit i væg 1. Resultater fra WUFI Graph vedr. simuleringstype 1 'ren konstruktion' for alle fire vægtyper præsenteres som eneste fokusområde for klimascenariet A1B. Se bilag 7.4 for opbygning af simuleringstype 1. I simuleringstype 1 indgår der ikke konstruktionsdele i træ og materialenedbrydning indgår derfor ikke i de præsenterede resultater. De punkter der er behandlet i nærværende resultatafsnit som værende kritiske eller potentielt kritiske, er principielt markeret med en rød ring, hvor de markerede punkter gentager sig på alle 4 vægtyper.





Figur 57 Vertikalt snit i væg 1 med rød markering af punkter der er fundet kritiske eller potentielt kritiske ved simulering i fremskrevet klima A1B. Markeringer er principielle og gentager sig på alle fire vægtyper. (Se bilag 8.5 for vurderingsgrafer)

### Udvikling af totalt vandindhold

Tabel 32 viser en opsummering af simuleringseresultaterne, illustreret ved trafiklys, for forløbet af det totale vandindhold i væg 1, 2, 3 og 4 i simuleringssperioden 2030-2050. Bilag 8.5 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 32.

Tabel 32 Forløbet af det totale vandindhold i alle fire vægtyper i simuleringssperioden 2030-2050. Grøn markering beskriver et ukritisk forløb af det totale vandindhold (stabilt fald over perioden), gul markering beskriver et potentielt kritisk forløb af det totale vandindhold (ujævn forløb) og rød markering beskriver et kritisk forløb af det totale vandindhold (Stigende vandindhold). Opbygning af simuleringstype 1 er angivet i bilag 7.4.

| Monitorområde kun konstruktion i fugtbelastningsklasse 3 |       |       |      |      |
|----------------------------------------------------------|-------|-------|------|------|
|                                                          | Væg 1 | Væg 2 | Væg3 | Væg4 |
| Vandophobning                                            | ●     | ●     | ●    | ●    |
| Monitorområde kun konstruktion i fugtbelastningsklasse 2 |       |       |      |      |
|                                                          | Væg 1 | Væg 2 | Væg3 | Væg4 |
| Vandophobning                                            | ●     | ●     | ●    | ●    |

I fugtbelastningsklasse 3 viser Tabel 32 kritiske resultater i hele simuleringssperioden ved væg 1, væg 2 og væg 4. Potentielt kritisk resultat vises ved væg 3. I fugtbelastningsklasse 2 vises et kritisk resultat ved væg 1. Potentielt kritisk resultat vises ved væg 2, 3 og 4.

### Vurdering af risiko for skimmelvækst

Tabel 33 opsummerer resultater for væg 1, 2, 3 og 4 vedr. risiko for skimmelvækst efter simulering i fremskrevet klimascenarie A1B, baseret på resultatvurderingerne angivet i bilag 8.5.

Tabel 33 Resultater af simuleringer og målinger i væg 1, 2, 3 og 4. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et potentielt kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav angivet i ( ) henviser til simuleringspunkt. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Tema: A1B klima-<br>fremskrivning  | Væg 1                                                                                    |                                                                                          | Væg 2 |                                                                                          | Væg 3                                                                                    |                                                                                          | Væg 4 |                                                                                            |
|------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                    | FBK                                                                                      |                                                                                          | FBK   |                                                                                          | FBK                                                                                      |                                                                                          |       |                                                                                            |
|                                    | 2                                                                                        | 3                                                                                        | 2     | 3                                                                                        | 2                                                                                        | 3                                                                                        | 2     | 3                                                                                          |
| Skimmelvækst                       |                                                                                          |                                                                                          |       |                                                                                          |                                                                                          |                                                                                          |       |                                                                                            |
| (F) Oprindelig indvendig overflade | (2)<br> | (2)<br> | ND    | (2)<br> | (2)<br> | (2)<br> | ND    | (2)<br> |

<sup>(2)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI VTT. ND betyder at resultatet ikke er fundet relevant for den specifikke detalje, eller at den er fundet ukritisk ved samme detalje ved simulering i en højere fugtbelastningsklasse.

I Tabel 33 ses et potentielt kritisk forhold ved den oprindelige indvendige overflade ved væg 1 og væg 3 i fugtbelastningsklasse 3 samt ved væg 3 i fugtbelastningsklasse 2. Alle potentielt kritiske forhold er vurderet på baggrund af WUFI VTT-simuleringer som kan ses i bilag 8.5.

#### Vurdering af risiko for frostskafer

Tabel 34 opsummerer simuleringresultaterne ved væg 1, 2, 3 og 4 vedr. risiko for frostskafer. Bilag 8.5 danner baggrund for opsummeringen i Tabel 34 .

Tabel 34 Opsummering af specifikke simuleringresultater vedr. frostskafer i væg 1, 2, 3 og 4. Grænsebetingelserne for trafiklys markeringerne findes i afsnit 7.4. Grøn markering betyder ukritisk forhold, gul markering betyder et muligvis kritisk forhold og rød markering betyder et kritisk forhold. Bogstav angivet i ( ) henviser til simuleringspunkt. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Tema: A1B klima-<br>fremskrivning    | Væg 1                                                                                      |                                                                                            | Væg 2                                                                                      |                                                                                            | Væg 3                                                                                      |                                                                                            | Væg 4                                                                                        |                                                                                              |
|--------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                      | FBK                                                                                        |                                                                                            | FBK                                                                                        |                                                                                            | FBK                                                                                        |                                                                                            |                                                                                              |                                                                                              |
|                                      | 2                                                                                          | 3                                                                                          | 2                                                                                          | 3                                                                                          | 2                                                                                          | 3                                                                                          | 2                                                                                            | 3                                                                                            |
| Frostskafer                          |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                            |                                                                                              |                                                                                              |
| (E) Udvendig facadeoverflade         | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> |
| (L) Eksisterende granulat kold side. | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> | (1)<br> |

<sup>(1)</sup> Betyder resultatet er bedømt på baggrund af WUFI Graph.

Tabel 34 viser simulerede potentielt kritiske forhold iht. frostskafer i både fugtbelastningsklasse 2 og 3 ved de to simulerede detaljer (E-L) i alle fire vægtyper.

## 8.6 U-værdi beregninger

Energioptimeringerne præsenteres i nærværende afsnit ved resultater af de beregnede U-værdier for de fire vægge. Alle beregninger fremgår af bilag 8.6.

Tabel 35 præsenterer de beregnede basis U-værdier, korrektionen der skal tillægges ved gennembrydninger af det isolerende lag og den resulterende korrigerede U-værdi.

*Tabel 35 U-værdier for alle fire behandlede vægkonstruktioner, inklusive korrektioner for gennembrydninger af det isolerende lag.*

| U-værdi angivet i $W/(m^2 K)$   | Væg 1 | Væg 2 | Væg 3 | Væg 4 |
|---------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Basis beregning                 | 0,14  | 0,27  | 0,23  | 0,42  |
| Korrektion ved gennembrydninger | 0,02  | 0,04  | 0,08  | 0,07  |
| korrigeret U-Værdi              | 0,16  | 0,31  | 0,31  | 0,49  |

Gennembrydninger, der indregnes i Tabel 35, skyldes faste bindere igennem hulmursisoleringen i den eksisterende hulmur, samt de træreglar der udgør det bærende skelet i forsatsvæggen ved væg 3.

## 9 Diskussion

I nærværende afsnit diskuteres relevante resultater fra afsnit 8. Afsnittet er emneopdelt som følger:

- Resultater fra for- og efterundersøgelsen diskuteres med særlig vægt på materialenedbrydning, samt på udviklingen fra for- til efterundersøgelse (afsnit 9.1).
- Parameterstudiet der ligger til grund for valg af teglsten til WUFI 2D simulering (afsnit 9.2).
- Diskussion af kritiske samt potentielt kritiske resultater fra WUFI-simuleringerne og målinger baseret på skadestyper (afsnit 9.3).
- Diskussion af simuleringsresultaterne i forhold til indvendig isolering i et forventet fremtidigt klima (afsnit 9.4).
- Forskelle mellem målinger og simuleringer i en tilsvarende periode (afsnit 9.5).
- Diskussion af varmetabet igennem de forskellige konstruktioner (afsnit 9.6).

### 9.1 For- og efterundersøgelse

Forundersøgelsen beskrives som en integreret del af afsnit 8.1 samt i bilag 8.1. Efterundersøgelse beskrives i afsnit 8.2 samt i bilag 8.2.

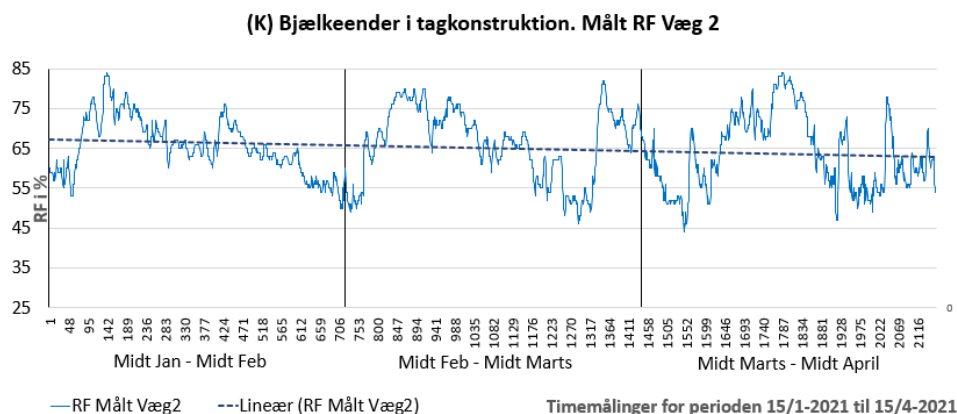
Efter at isoleringssystemerne er monteret, er der ikke længere samme tilgængelighed til områder i konstruktionerne, som før monteringen. Efterundersøgelsens omfang er dermed begrænset i forhold til forundersøgelsen. I dette afsnit diskuteres kun de steder der har været tilgængelige ved efterundersøgelsen.

Ved den udvendige facadeoverflade viser Tabel 11, ved kapacitive fugtmålinger, at væg 1 er mest fugtig. Det giver god mening, da den er isoleret bedst og dermed får mindst tilskud af energi til udtørring indefra. I tillæg viser indvendigt udførte kapacitive fugtmålinger i væg 1 i forbindelse med forundersøgelsen, at den i udgangspunkt var mest fugtig. Efterundersøgelsen indikerer dermed, at risikoen for frostskafer i facaden er størst i væg 1.

Ved træoverliggeren over vinduer i væg 1 og væg 2 måles med stikbensmåling et fugtindhold i efterundersøgelsen, der indikerer, at der kan opstå materialenedbrydning, selv ved ikke tidligere angrebet træværk. Dog skal det bemærkes at målingen ved væg 2 er urealistisk høj. Ved væg 3 og væg 4 ses der værdier, der indikerer, at der kan opstå materialenedbrydning, såfremt træet har været angrebet tidligere, se Tabel 11. Vurderingerne er foretaget på baggrund af grænseværdierne angivet i afsnit 8.4.1. I alle tilfælde er det en stigning i forhold til udgangspunktet i forundersøgelsen. Målingerne foretaget i efterundersøgelsen samt udviklingen i den relativt korte tid fra forundersøgelsen indikerer, at evt.

træoverligger over åbninger bør udskiftes til et mere fugtteknisk robust materiale i forbindelse med en indvendig isolering, eksempelvis en tegl-overligger.

Ved bjælkeenderne over de efterisolerede vægge viser stikbensmålingerne, præsenteret i Tabel 11, at der ikke er træfugt % til stede, som kan resultere i materialenedbrydning, omend væg 1 kommer tæt på. Man kan forestille sig at en måling længere ude i bjælkeenden over væg 1 havde resulteret i en kritisk måling i forhold til træværk der tidligere har været angrebet. Det har desværre ikke været praktisk muligt at måle helt ude ved bjælkeenden. Målingen over væg 4 i efterundersøgelsen virker ikke troværdig hvilket kan skyldes at netop den måling blev foretaget i en stærkt akavet stilling. Udviklingen fra for- til efterundersøgelsen er overraskende, hvor der generelt ses et fald i den målte træfugt (bortset fra væg 4). Vi havde ventet det modsatte. Forholdet antages at skyldes den isolering, der er lagt på- og omkring bjælkeenderne i forbindelse med feltstudiet. Isoleringen over målepunktet har øget temperaturen omkring den del af bjælken, det har været muligt at måle i. Ligeledes er der monteret en dampspærre på loftet, hvilket har minimeret tilstrømningen af fugtig luft nedefra til tagrummet. Begge dele har medvirket til at nedbringe RF ved målepunkterne i bjælken, og betyder samtidig nedbringelse af træfugten i bjælken. Betragter man, som eksempel, grafen for den målte RF ved bjælkeenden over væg 2, se Figur 58, kan det konstateres at midten af den stiplede tendenslinje ligger på ca. 65 % RF.



Figur 58 Målt RF ved bjælkeenden over væg 2, præsenteret både ved de målinger i en ubrudt linje, samt ved en tendens der vises som en stiplede linje. (Se bilag 8.4)

Overføres de 65 % RF fra midten af tendenslinjen i Figur 58 til sorptionskurven vist i Figur 9, kan man på Y-aksen aflæse et resultat på ca. 12,5 % træfugt, hvilket er tæt på det målte resultat ved efterundersøgelsen på 12 %. Dette kan anvendes til at validere de udførte målinger i en vis grad.

Med udgangspunkt i for- og efterundersøgelserne ved den specifikke situation, vurderes der ikke nogen stor risiko for materialenedbrydning i

træværket over væg 2 og 3. Ved væg 1 anbefales det at undersøge om træværket tidligere har været angrebet af materialenedbrydning, og i bekræftende fald, at udskifte/forstærke de yderste dele hvor temperaturen er lavest og dermed fugtpåvirkningen kan forventes at være størst.

## **9.2 Bestemmelse af teglstens egenskaber**

I nærværende afsnit diskuteres resultaterne fra afsnit 8.3 vedr. valg af materialer, benyttet i dynamiske simuleringer.

Afsnit 8.3 viser resultater fra parameterundersøgelsen for den eksisterende teglsten. Et specifikt materiales andel og dets egenskaber har stor betydning for varme- og fugtforhold i en konstruktion. Forsøgsresultaterne for den eksisterende teglsten understreger sværhedsgraden i at ramme en 1:1 simuleringsmodel svarende til de reelle forhold. Via forsøg kan man eksempelvis bestemme fugtegenskaber der rammer tilsvarende parametre fra databasen spot on, hvor samme stens varmeegenskaber rammer langt forbi i forhold til tilsvarende værdier i databasen. Forsøgene under 'køkkenbordsforhold' rummer i sig selv potentielle fejlmarginer i forhold til fastholdelse af temperatur i materiale og omgivelser, hjælpematerialers renhed og egnethed, samt kalibrering af diverse måleredskaber. Den udførendes omhyggelighed er også af stor betydning - både i laboratorier og ved køkkenborde.

Fastlæggelsen af materialetype fra en specifik materialedatabase er samtidig udfordret af forskelle i fremstillingsmetoder på tværs af landegrænser, der giver forskelle i materialeegenskaber. En dansk produceret tegl fra 1920'erne synes derfor ikke direkte sammenlignelig med en ekstruderet type fra Wien, men kan alligevel have ensartede egenskaber for eksempelvis fugt men ikke for varme. Man bør derfor være omhyggelig i sin bygningsundersøgelse for at få fastlagt eksakte materialetyper, og altid afveje egenskaberne mellem registrerede materialer og tilsvarende typer i specifik simuleringsdatabase, i forhold til hvad man ønsker at undersøge. Kan der laves en parameterundersøgelse bør dette altid udføres. Konsekvensen af de valgte materialetyper i en specifik materialedatabase bør derfor altid inddrages, når man vurderer på sine simuleringsresultater.

## **9.3 WUFI 2D simuleringer og målinger**

Afsnit 8.4 viser resultater fra de 4 vægkonstruktioner fra såvel simuleringer som målinger. I nærværende afsnit diskuteres de kritiske resultater opdelt på skadesmekanismerne beskrevet i afsnit 4.3.

### 9.3.1 Skimmelvækst

Tabel 36 opsummerer de kritiske samt potentielt kritiske resultater fra afsnit 8.4 vedr. mulig skimmelvækst.

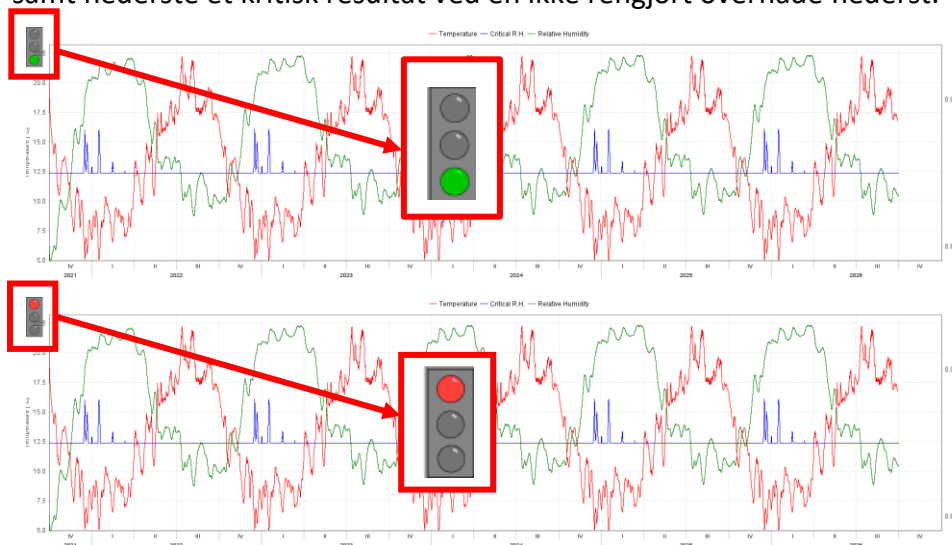
Tabel 36 Kritiske og potentielt kritiske punkter i væg 1, 2, 3 og 4 i forhold til risiko for skimmelvækst. Rødt lys betyder et kritisk forhold, gult lys betyder et potentielt kritisk forhold og et grønt lys betyder et ukritisk forhold. Navngivningen i parentes henviser til røde markeringer på konstruktionsnit. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Væg 1                                           |                                                 |    |      | Væg 2 |    |      |       |    |      |       |    |      |
|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|----|------|-------|----|------|-------|----|------|-------|----|------|
|                                                 |                                                 |    |      |       |    |      |       |    |      |       |    |      |
| Væg 3                                           |                                                 |    |      | Væg 4 |    |      |       |    |      |       |    |      |
|                                                 |                                                 |    |      |       |    |      |       |    |      |       |    |      |
| Tema:<br>Skimmelvækst                           | Væg 1                                           |    |      | Væg 2 |    |      | Væg 3 |    |      | Væg 4 |    |      |
|                                                 | FBK                                             |    | Målt | FBK   |    | Målt | FBK   |    | Målt | FBK   |    | Målt |
|                                                 | 2                                               | 3  |      | 2     | 3  |      | 2     | 3  |      | 2     | 3  |      |
|                                                 | (F) Oprindelig indvendig overflade              | ●  | ●    | ●     | ●  | ●    | ●     | ●  | ●    | ND    | ●  | ●    |
|                                                 | (I) Fast binder. Oprindelig indvendig overflade | ●  | ●    | ●     | ●  | ●    | ●     | ●  | ●    | ND    | ●  | ●    |
| (D) Sokkeltilslutning krybekælder. Bag fodliste | ●                                               | ND | ●    | ●     | ND | ●    | ●     | ND | ●    | ●     | ND | ●    |
| (I) Træoverligger. Udvendig overflade           | ●                                               | ●  | ●    | ●     | ●  | ●    | ●     | ●  | ND   | ●     | ●  | ●    |

## (F) Oprindelig indvendig overflade

Den oprindelige indvendige overflade af væg 1 viser et kritisk resultat ved målinger. I bygningsundersøgelsen, der præsenteres i bilag 8.1, kan det ses, at væg 1 i udgangspunkt er mest fugtig. Det, i sammenhæng med den store isoleringstykkelse i væg 1 med minimalt energitilskud til udtørring, antages at forårsage det kritiske niveau. Såfremt den udvendige facadeoverflade forbliver intakt, forventes RF i detaljen som minimum at falde til et niveau, som er sammenligneligt med den udførte WUFI VTT simulering for den samme detalje i fugtbelastningsklasse 3. Forventningen baseres på det totale vandindhold i konstruktionen ved fugtbelastningsklasse 3, der simuleringsmæssigt ifølge bilag 8.4 har et jævnt forløb i hele simuleringsperioden. Dermed bliver detaljen ukritisk.

Som det beskrives i alment teknisk fælleseje (21 s. 58). er det vigtigt, at den eksisterende indvendige overflade renses omhyggeligt for organisk materiale hvor skimmel kan finde vækstbetingelser ved lave RF-niveauer. Det kan eksempelvis være gamle tapetrester. Dette understøttes af Figur 59 hvor der ses et ukritisk WUFI VTT-resultat for den oprindelige indvendige overflade af væg 1 ved en rengjort overflade øverst, samt nederste et kritisk resultat ved en ikke rengjort overflade nederst.



Figur 59 Øverst vises et ukritisk resultat fra WUFI VTT vedr. den oprindelige indvendige overflade for væg 1 ved en rengjort oprindelig indvendig overflade. Nederst vises et kritisk resultat ved den samme vægkonstruktion ved en ikke rengjort overflade. (Bilag 8.4)

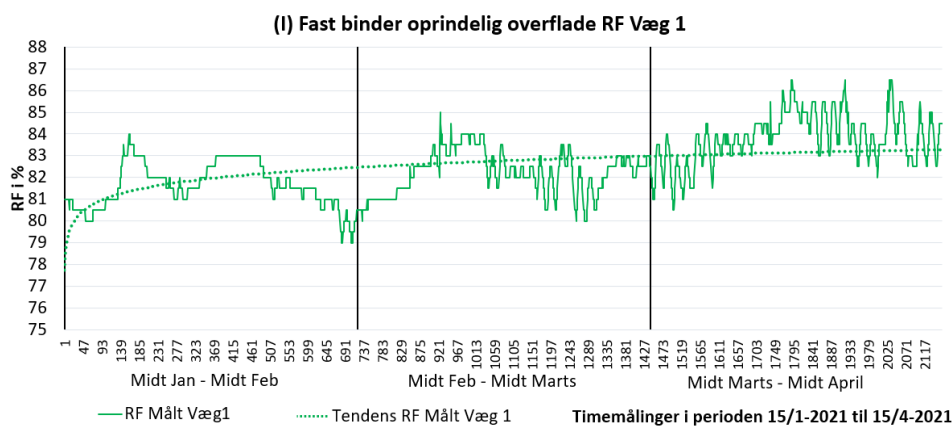
## (I) Fast binder ved den oprindelige indvendige overflade

Ved den indvendige oprindelige overflade ved de faste bindere præsenterer Tabel 36 potentielt kritiske resultater ved væg 1 simuleret i fugtbelastningsklasse 3 og ved væg 2 ved målinger. I væg 3 præsenteres ved såvel simuleringen i fugtbelastningsklasse 3 samt målingen et kritisk resultat.



Den faste binder udgør en kuldebro, og der kan forventes en lavere temperatur i dette punkt end på overfladen i øvrigt. Som det forklares i afsnit 4.2.3, afhænger RF af temperatur og absolut fugtighed. Derfor er det ikke overraskende, at RF ved den punktvis koldere overflade er højere end på overfladen i øvrigt.

Det er overraskende at målingerne vedr. væg 1 viser, at der er mindre risiko for skimmelvækst i den oprindelige indvendige overflade ved en fast binder end ellers. Dette forhold kan skyldes, at der er indmuret en helt tør teglsten, som fast binder i forbindelse med feltstudiet. Dette er i kontrast til den i øvrigt relativt høje fugtighed der blev målt i væg 1 inden isoleringssystemet blev monteret. Argumentet understøttes af, at RF i punktet er svagt stigende, dog med aftagende stigning, i den korte måleperiode, mod en relativt stabil vandret kurve for det samme punkt uden fast binder. Det kan indikere, at den tørre faste binder søger fugtlige vægt med de omkringliggende fugtigere vægarealer. Figur 60 viser målingen i RF ved den faste binder i væg 1, både ved målinger som en ubrudt linje og ved en stigende stiple tendens linje.

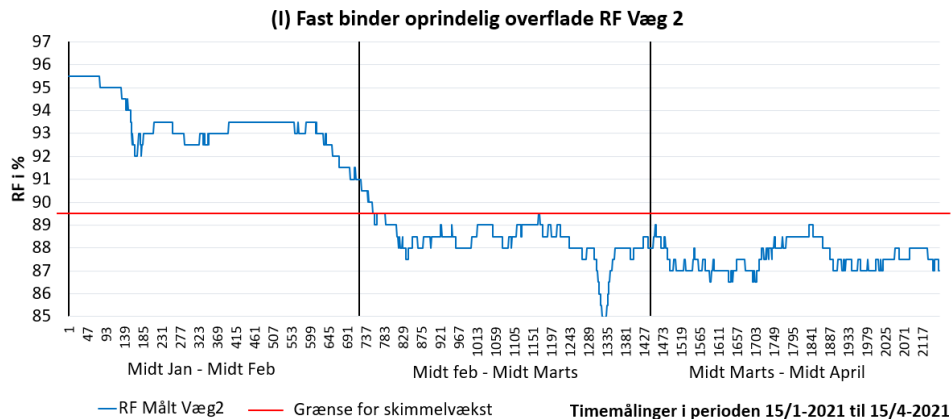


Figur 60 RF målt ved oprindelig indvendig overflade ved den faste binder i væg 1. Den optrukne grønne linje viser målingerne og den stiplede en stigende tendens linje. Dette indikerer at den tørre faste binder søger ligevægt med de fugtigere omgivelser. De vertikale sorte linjer opdeler timemålingerne i måneder. (Udtræk fra bilag 8.4.)

Skal der udføres et 'StoTherm In Comfort' system på en tilsvarende ydervægskonstruktion i fugtbelastningsklasse 3, bør man overveje at reducere isoleringstykkelsen fra 200 mm. Ved at anvende en mindre tykkelse øges tilskuddet af indefra kommende energi til den oprindelige indvendige overflade, således at temperaturen øges med et fald i RF til følge.

Ved væg 2 er det overraskende, at der opnås et potentielt kritisk resultat ved målingen, særligt med tanke på at målingen ved væg 1 viser et ukritisk resultat. Ved at nærstudere forløbet af RF, viser det sig at punktet kun er kritisk i starten af perioden, hvor der har været særligt koldt ude, og efter ca. 1 måned bliver punktet ukritisk iht. grænseværdierne

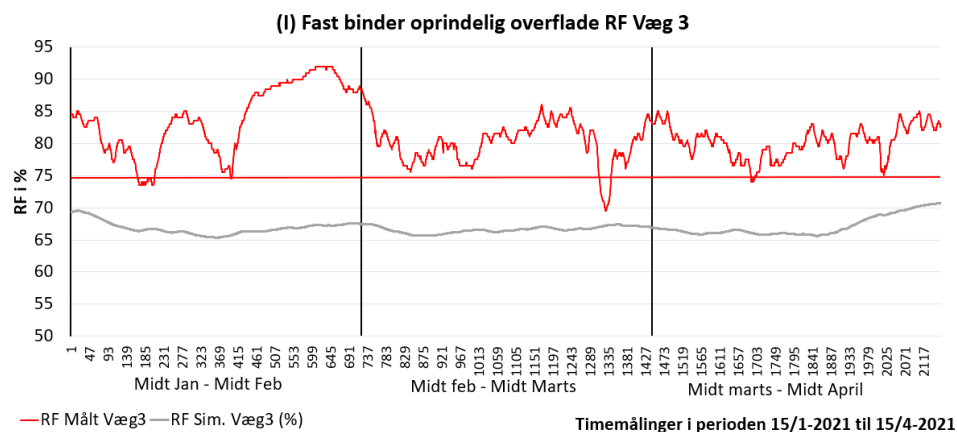
beskrevet i afsnit 8.4.1. Den eksisterende indvendige overflade er relativ ujævn. Det kan være nærliggende at antage at i netop punktet hvor loggeren blev placeret, har været særligt ujævnt og derfor er der anvendt meget klæber her. Den fugtige klæber har så påvirket målingsresultatet indtil den er tørret ud. Figur 61 viser hvorledes RF falder efter ca. en måneds forløb af måleperioden, og forbliver på et niveau under det potentielt kritiske i ca. 2/3-dele af måleperioden.



Figur 61 Forløbet af RF ved den oprindelige indvendige overflade kombineret med en fast binder. Den blå linje markerer målinger. Den røde horisontale linje markerer grænsen for skimmelvækst ved de specifikke materialer iht. afsnit 8.4.1. (Udtræk fra bilag 8.4.)

Baseret på ovenstående antages det, at den indvendige oprindelige overflade ved en fast binder i det undersøgte tilfælde er ukritisk i forhold til skimmelvækst.

Ved væg 3 anvendes der organiske materialer, i form af træreglar, op mod den faste binder. I fugtbelastningsklasse 3 viser simuleringen i WUFI VTT et kritisk resultat. Ligeledes viser målinger et kritisk resultat. Baseret på disse resultater må man konkludere, at en isoleret forsatsvæg opbygget som den specifikke, ikke bør anvendes i fugtbelastningsklasse 3. Særligt når man betænker risikoen for en utæt dampspærre, der enten kan opstå i løbet af montagen, eller ved perforering af de senere brugere. I fugtbelastningsklasse 2 viser simuleringen i WUFI VTT et ukritisk resultat, mens målinger, i hvad der antages som samme fugtbelastningsklasse, viser et kritisk resultat. I afsnit 8.4.1 fastsættes skimmelrisiko grænser til 75 % RF. Målingerne viser, at den oprindelige indvendige overflade kun kortvarigt er under denne grænse ved den faste binder. Derimod viser simuleringen, at RF konstant er under skimmelrisiko grænsen. I Figur 62 illustreres såvel målinger, simuleringer samt grænse niveauet for skimmelvækst ved de specifikke materialer.



Figur 62 Forløbet af RF ved målinger og simulering i væg 3. Rød ujævn linje viser målinger. Rød vertikal linje viser grænse niveauet for skimmelvækst. Grå linje viser de simulerede værdier. De sorte vertikale linjer opdeler tidemålingerne i måneder. (Udtræk fra bilag 8.4)

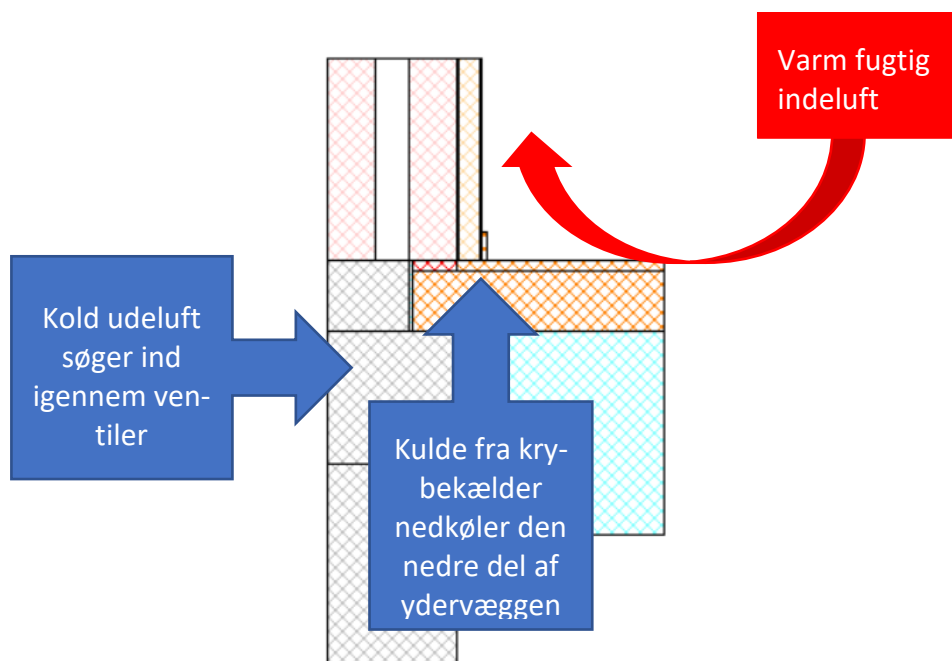
Figur 62 viser en markant forskel mellem det simulerede og det målte resultat. Hvad kan man så stole på?

Generelt har særligt den første del af måleperioden været kold, i forhold til hvad simuleringsprogrammet forudsætter. Dette er underbygget i afsnit 9.5. Dog ikke så kold at det ikke kan optræde jævnlige. I tillæg til temperaturen, kan ligeledes fugten i væggen inden forsatsvæggen blev monteret, have betydning for forskellen mellem det målte og det simulerede resultat. Væg 2 og væg 3 viser sig ved bygningsundersøgelsen, præsenteret i bilag 8.1, at have relativt ensartede fugtniveauer. Derfor kan man sammenligne Figur 61 og Figur 62. Her er det tydeligt at Væg 3 modsat Væg 2 ikke kommer trykt under den fastsatte grænsebetingelse.

Baseret på det, vurderes det som en fugtteknisk risikabel løsning at anvende en indvendig forsats væg, opbygget som den specifikke i forbindelse med en hulmur med faste bindere, eller lign. kuldebroer, som den undersøgte i fugtbelastningsklasse 2.

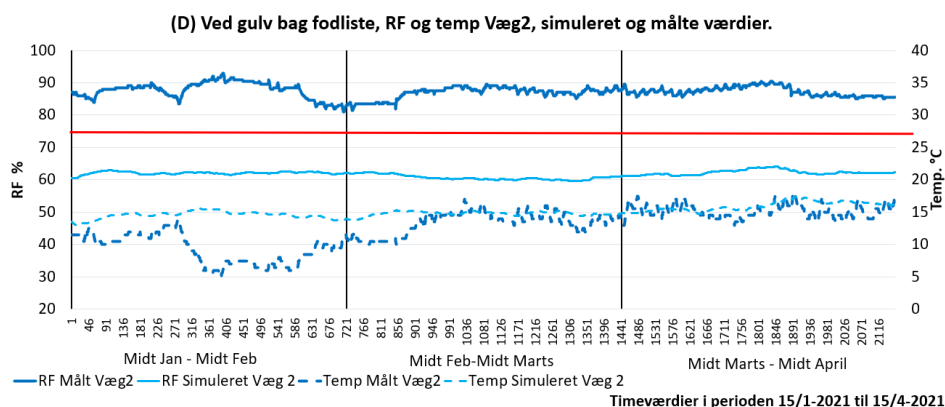
#### (D) Sokkeltilslutning bag fodliste

Ved væg 2 viser Tabel 36 et kritisk resultat ved måling i området bag fodlisten. Med tanke på den teori vedr. sammenhængen mellem RF og temperatur der præsenteres i afsnit 4.2.3, er det ikke så overraskende at netop denne detalje ved en fodliste i træ, kombineret med en kold ventileret krybekælder, kan være kritisk. Figur 63 illustrerer hvorledes kold udeluft strømmer ind igennem ventiler og dermed nedkøler den nederste del af ydervæggens indvendige side. Denne nedkøling, kombineret med den indvendige RF i øvrigt, medvirker til det kritiske resultat, der ses for detaljen i Tabel 36.



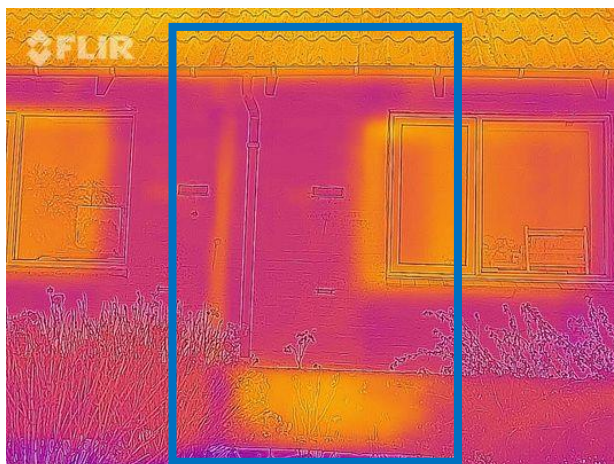
Figur 63 Kold udeluft illustreret ved blå pile nedkøler området bag fodlisten, samtidigt med at fugtig indeluft påvirker detaljen, med øget RF til følge. (Skitse fra bilag 7.4 med egne påtegninger)

Som det fremgår af Figur 64, viser målingen, at RF i punktet ved fodlisten konstant er over grænseværdien på 75 % (rød horisontal linje) ved organiske materialer. Det står i kontrast til simuleringen hvor RF i hele perioden ligger i tryk afstand til 75 %. Der er ligeledes stor forskel på den målte og simulerede temperatur i punktet. Særligt i den første tredjedel af måleperioden er temperaturen op til ca. 10 °C højere ved simuleringen end ved målingen. Det øger RF i punktet.



Figur 64 Forskellen mellem de simulerede og målte resultater både i forhold til RF og temperatur ved detaljen bag fodlisten ved væg 2. Den røde lige horisontale linje viser grænseværdien på 75 % RF (bilag 8.4)

Figur 65 viser ved et termisk billede taget d. 19. februar 2021, at soklen under væg 2 har et større varmetab end de omkringliggende sokler under væg 1 og væg 3. Forskellen er primært synlig ved soklen og i markant mindre grad (næsten ikke) synligt på selve facadeoverfladen.



Figur 65 Termisk billede taget d. 19. feb. af facaden. Indramningen viser væg 2. Gule farver viser overflader ved højere temperaturer end rødlige farver. (egne billeder med påtegninger)

Figur 65 antyder, at det kritiske resultat, vist ved målingen bag fodlisten ved netop væg 2, er betinget af lokale uhensigtsmæssige konstruktionsforhold. Det kan evt. være et manglende let isolerende indskud i dækket under væg 2 i forhold til under væg 1 og væg 3. Forholdet der er beskrevet her, understreger vigtigheden af en grundig bygningsundersøgelse før der foretages simulering i et program som f.eks. WUFI 2D. Indtastes der ukorrekte forudsætninger, bliver resultatet af simuleringen ikke retvisende.

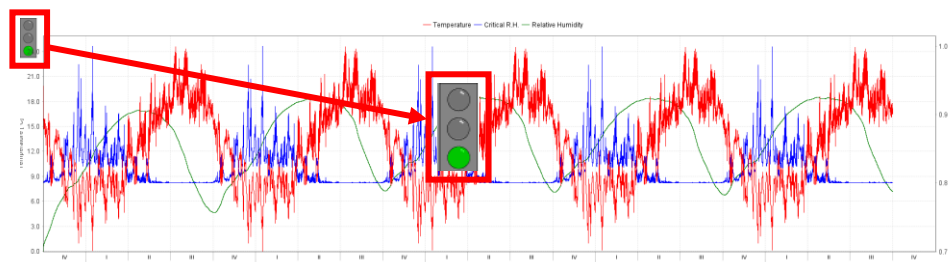
Det vil altid være hensigtsmæssigt, at en eksisterende kold krybekælder med lav højde, som denne, omdannes til traditionelt velisoleret terrændæk. Ved eksisterende krybekældre med større højde kan en sådan evt. omdannes til en varm krybekælder (21 s. 133). Et sådan tiltag vil hæve temperaturen ved fodlisten og dermed sænke RF, antageligvis til et ukritisk niveau, også ved målingerne. Et traditionelt terrændæk eller en varm krybekælder kan udføres uden at facadearkitekturen påvirkes, og vil tillige have en yderst gavnlig indvirkning på både energiforbrug og indeklima i bygningen.

#### (J) Træoverliggerens udvendige overflade

Ved træoverliggerens udvendige overflade vises der i Tabel 36 kritiske resultater ved simulering i fugtbelastningsklasse 3 for alle efterisolerede konstruktioner, samt ved de målte resultater ved væg 2 og 3. Ved det målte resultat for væg 1 ses et potentielt kritisk resultat.

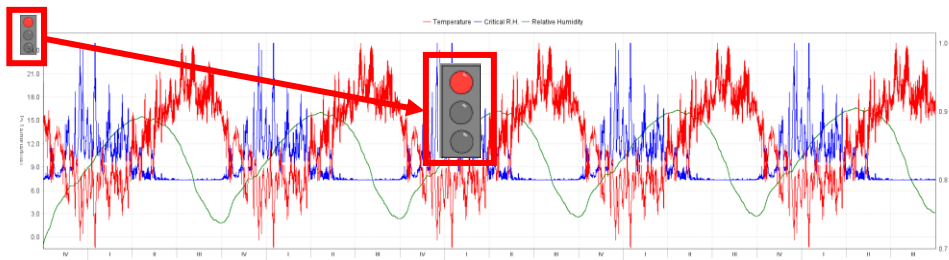
Kombinationen af den øgede indvendige relative luftfugtighed i fugtbelastningsklasse 3 og den lave temperatur på den udvendige side af træoverliggeren bevirker, at det ikke kan anses som fugtteknisk robust at efterisolere indvendigt med nogle af de systemer, der danner baggrund for denne rapport. Såfremt man ønsker at efterisolere indvendigt i fugtbelastningsklasse 3 med et af disse efterisoleringssystemer, bør

overliggeren byttes til en traditionel tegloverligger eller lign. I givet fald denne ændring udføres, vil der opnås et grønt trafiklys i WUFI VTT. Figur 66 viser som eksempel resultatet af en WUFI VTT-simulering af væg 2 i fugtbelastningsklasse 3 med en tegloverligger.



Figur 66 WUFI VTT-resultat vedr. den udvendige side af en evt. tegloverligger over vinduet i væg 2. (Bilag 8.4)

Simuleringerne i måleperioden i fugtbelastningsklasse 2, viser modsat målingerne ukritiske resultater. WUFI 2D og dermed WUFI VTT er, som tidligere nævnt, afhængig af de forudsætninger programmet fyldes med. Det kan være vanskeligt at føle sig tryk ved at angive en trætype der er indbygget for ca. 100 år siden, medmindre der udføres en decideret parameterundersøgelse i kombination med bygningsundersøgelsen. Figur 67 viser som eksempel væg 3 i fugtbelastningsklasse 2 med en træoverligger fra WUFI VTT's materialebibliotek med en rå og nedsmudset overflade, angivet som 'worst case'. Som figuren viser, opnås nu et kritisk resultat.



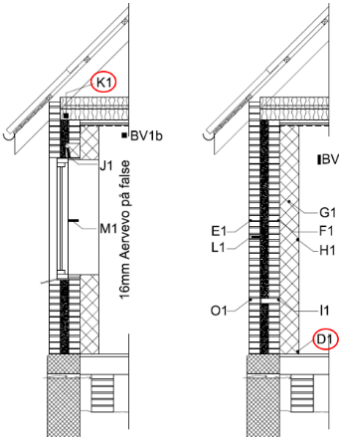
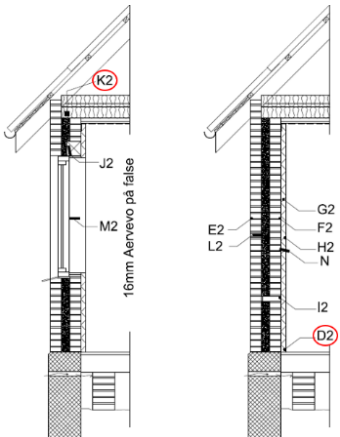
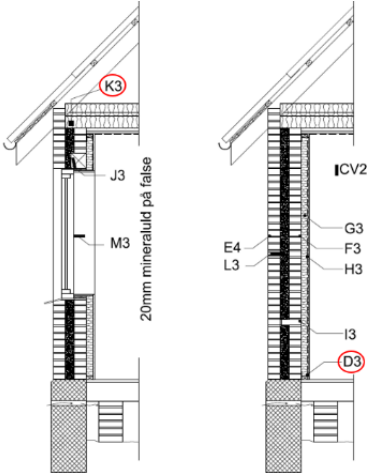
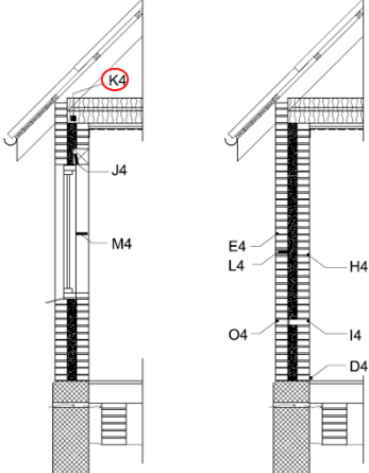
Figur 67 WUFI VTT-simulering ved den udvendige side af træoverliggeren i fugtbelastningsklasse 2 for væg 3 såfremt træoverliggeren antages at have en rå og smudsige overflade = worst case træmaterialer i WUFI VTT. (Bilag 8.4)

Vurderingen af den fugttekniske robusthed af detaljen med en træoverligger ved de specifikke situationer baseres på de kritiske og potentielt kritiske resultater ved simulering i fugtbelastningsklasse 3 og ved målingerne i hvad der skal modsvare fugtbelastningsklasse 2. Det tages i betragtning, at det ikke er muligt at besigtige træoverliggeren løbende, efter isoleringssystemet er monteret. På den baggrund vurderes det som tilrådeligt, at den relativt enkle proces, der består i at udskifte træoverliggerne til et mere fugtteknisk robust materiale, som f.eks. en tegloverligger, gennemføres inden ydervæggen efterisoleres indvendigt, også i fugtbelastningsklasse 2.

### 9.3.2 Materialenedbrydning

Tabel 37 opsummerer de kritiske samt potentielt kritiske resultater fra afsnit 8.4 vedr. mulig materialenedbrydning.

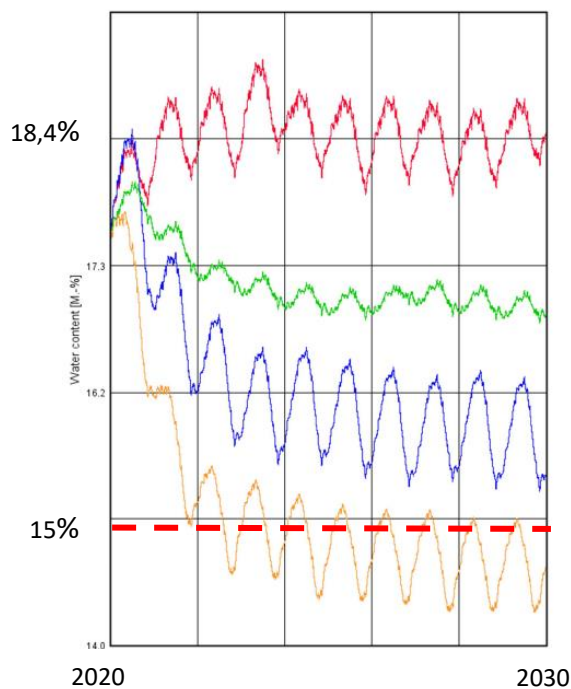
Tabel 37 viser Kritiske og potentielt kritiske punkter i væg 1-2-3 og 4 i forhold til risiko for materialenedbrydning. Rødt lys betyder et kritisk forhold, gult lys betyder et potentielt kritisk forhold og et grønt lys betyder et ukritisk forhold. Navngivningen i parentes henviser til røde markeringer på konstruktionssnit. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

|                                                      | Væg 1                                                                              |    |      | Væg 2                                                                               |    |      | Væg 3                                                                               |    |      | Væg 4                                                                                |    |      |
|------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|------|-------------------------------------------------------------------------------------|----|------|--------------------------------------------------------------------------------------|----|------|
|                                                      |  |    |      |  |    |      |  |    |      |  |    |      |
| Tema:                                                | Væg 1                                                                              |    |      | Væg 2                                                                               |    |      | Væg 3                                                                               |    |      | Væg 4                                                                                |    |      |
| Materialenedbrydning                                 | FBK                                                                                |    | Målt | FBK                                                                                 |    | Målt | FBK                                                                                 |    | Målt | FBK                                                                                  |    | Målt |
|                                                      | 2                                                                                  | 3  |      | 2                                                                                   | 3  |      | 2                                                                                   | 3  |      | 2                                                                                    | 3  |      |
| (D) Sokkeltilslutning gulvbjælkeender                | ●                                                                                  | ND | ND   | ●                                                                                   | ND | ND   | ●                                                                                   | ND | ND   | ●                                                                                    | ND | ND   |
| (K) Tagfod. Bjælkeender intakt uden tidligere angreb | ND                                                                                 | ●  | ●    | ND                                                                                  | ●  | ●    | ND                                                                                  | ●  | ●    | ND                                                                                   | ●  | ●    |
| (K) Tagfod. Bjælkeender tidligere angrebet           | ●                                                                                  | ●  | ●    | ●                                                                                   | ●  | ●    | ●                                                                                   | ●  | ●    | ●                                                                                    | ●  | ●    |



#### (D) Sokkeltilslutning gulvbjælkeender

Det har ikke været muligt at udføre målinger eller besigtige gulvbjælkeender indbygget i sokkel til sammenligning med simuleringer. Simuleringer er kun udført i fugtbelastningsklasse 2, da det antages en krybekælder af denne type, ikke forefindes i byggeri med højere fugtbelastningsklasser. Det må antages, alder og selve konstruktionen taget i betragtning, at gulvbjælkeender er tidligere angrebet, hvorfor grænseværdien 15 % træfugt er vurderingskriteriet, som angivet i afsnit 8.4.1. I Figur 68 ses simuleringsresultaterne for gulvbjælkeenderne for alle 4 vægtyper, hvor kun væg 4 holder sig under den indsatte grænseværdi på 15 % træfugt. Dog ses en klar tendens til, at den kapillaraktive isolering bedre håndterer det forøgede vandindhold omkring konstruktionen i forhold til en traditionel forsatsvæg. Sandsynligvis via dens evne til bedre at optage og afgive fugten, som holder den samlede fugtmængde i et lavere niveau.



Figur 68 Simuleringsresultater i FBK 2 fra 10-års periode for området omkring gulvbjælkeender. Rød stiplede linje er egen påtegning som markering af grænseværdien på 15 % træfugt. Grøn linje = vægt % træfugt væg 1. Blå linje = vægt % træfugt væg 2. Rød linje = vægt % træfugt væg 3. Gul linje = vægt % træfugt væg 4.

Som konsekvens af simuleringsresultaterne gælder de samme anbefalinger, som beskrevet i afsnit 9.3.1 omkring udførelse af varm krybekælder eller udskiftning af gulvkonstruktionen til et traditionelt terrændæk med energibesparelser til følge, såfremt der skal udføres en indvendig efterisolering.

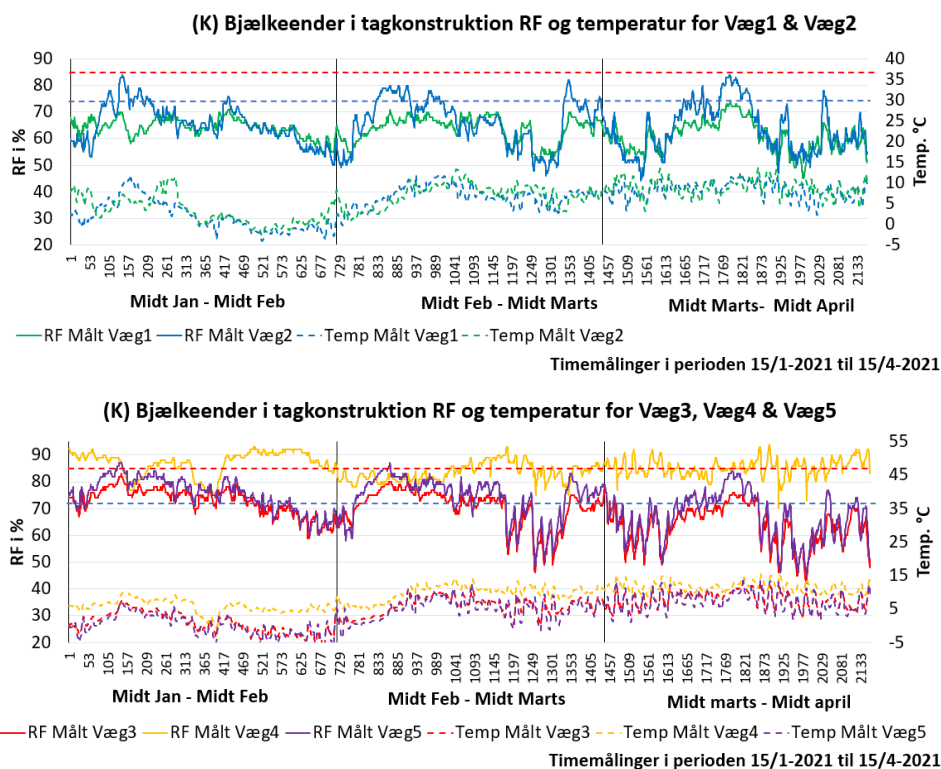


### (K) Tagfod, bjælkeender intakt

Ved bjælkeender over de efterisolerede vægge underbygger simuleringer i fugtbelastningsklasse 2 og 3 de stikbensmålinger, som er udført i efterundersøgelsen, hvor træfugt ikke overstiger 20 %. Derved udelukker resultater materialenedbrydning, såfremt bjælkeender ikke har været angrebet i forvejen. Forholdet antages at skyldes den indregnede isolering der er lagt på og omkring bjælkeenderne i forbindelse med feltstudiet, samt den udførte dampspærre på loft.

Grænseværdien for materialenedbrydning 20 % træfugt svarer til RF højere end ca. 85 %, jf. afsnit 8.4.1.

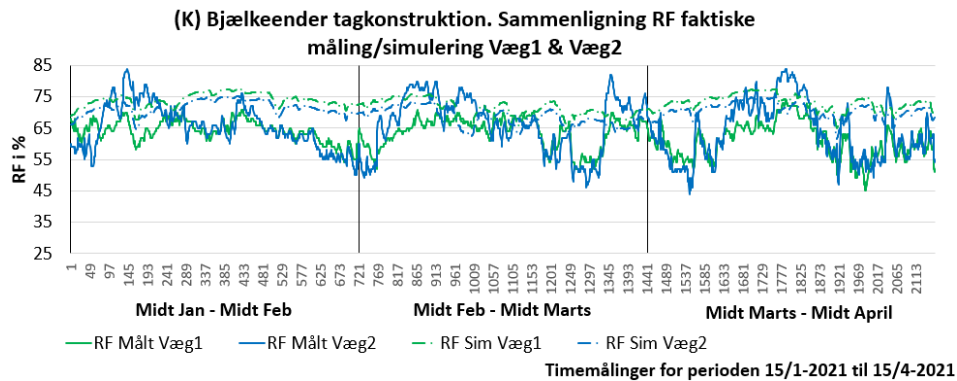
Betragtes målingerne, har der i ganske korte tidsrum været overskridelse af grænseværdien når man betragter den indlagte røde stiplede linje i Figur 69, der er indlagt ved RF 85 %.



Figur 69 Graf over RF og temperaturforhold ved bjælkeender i måleperioden 15/1-2021 til 15/4-2021. Væg 5 fremstår uden dampspærre og isoleringstiltag overhovedet og er medtaget til sammenligning. Rød og blå stiplede streg viser grænseværdier for træfugt på hhv. 20 % og 15 % omregnet via sorptionskurven angivet i Figur 9.

Overskridelserne er dog af så kort varighed og ved så lav temperatur, at konstruktionen ikke vurderes som kritisk, såfremt bjælkeenderne ikke har været angrebet i forvejen. Væg 4 er i feltstudiet kun medtaget som baseline, men det bør bemærkes den høje målte RF i perioden underbygger den overraskende høje stikbensmåling på 23 % træfugt ved efterundersøgelsen. Jf. afsnit 8.2. Sammenligner man de målte værdier med den samme periode fra simuleringerne i samme punkt, ser man det

forventede parallelle forløb i simuleringerne for RF for væg 1 og væg 2, hvor RF ligger højest for væg 1. Dette indikerer via målingerne, at der må være en form for lækage i tagkonstruktionen eller anden form for fugttilførsel til bjælken over væg 2, som sandsynligvis vil fremkomme ved en mere dybdegående bygningsundersøgelse. Sammenligning af RF ved målinger kontra simulerede ved bjælkeender over væg 1 og væg 2 fremgår af Figur 70.



Figur 70 Sammenligning af RF ved bjælkeender over væg 1 og væg 2 mellem målinger og simulerede resultater i samme periode fra 15/1-2021 til 15/4-2021. Optrukne linjer angiver målingerne. Stiplede linjer angiver simuleringer i samme periode.

Med udgangspunkt i for- og efterundersøgelserne samt målinger og simuleringresultaterne, vurderes der ikke nogen stor risiko for materialenedbrydning i tagkonstruktionens træværk over alle fire vægtyper, såfremt bjælkeenderne ikke har været angrebet af materialenedbrydning i forvejen. Grafer benyttet til vurdering af materialenedbrydning i tagkonstruktionen fremgår af bilag 8.4.

#### (K) Tagfod, bjælkeender tidligere angrebet

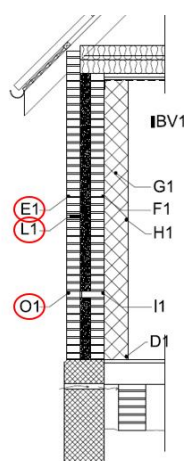
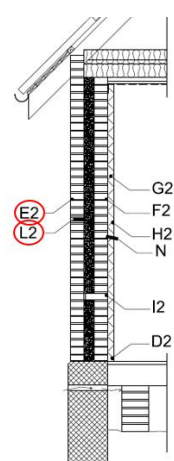
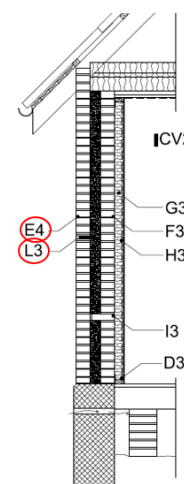
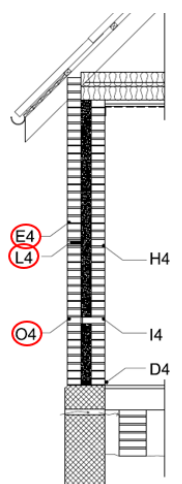
Alle vægtyper overskrider grænseværdien på 15 % træfugt i længere perioder både ved simuleringer i fugtbelastningsklasse 2 og 3 og ved målinger. Overskridelse er dog af begrænset varighed for væg 1 ved målinger, når man betragter kurverne i Figur 69 i forhold til den stiplede blå linje som beskriver 15 % træfugt. Dette må tilskrives kombinationen af begrænset tilstrømning af varm fugtig luft fra beboelsesrum via udført dampspærre, og ved en hævet bjælketemperatur via isoleringen i etageadskillelsen. Ved væg 2 og væg 3 er overskridelsen af grænseværdien 15 % træfugt ved tidligere angrebet træ af en sådan varighed, både ved målinger og ved simuleringer, at det må forventes bjælkeender skal forstærkes eller erstattes ved en indvendig efterisolering. Grafer benyttet til vurdering af materialenedbrydning i tagkonstruktionen fremgår af bilag 8.4.

Generelt gælder det for bjælkeender, at de skal undersøges nøje inden en efterisolering iværksættes. Evt. beskadiget træværk skal forstærkes, eller om muligt udskiftes. Dette gør sig gældende uanfægtet fugtbelastningsklasse.

### 9.3.3 Frostska-der

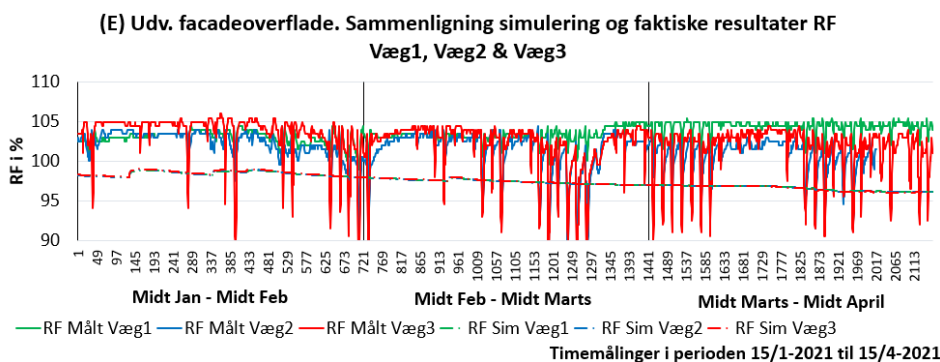
Tabel 38 opsummerer de kritiske samt potentielt kritiske resultater fra afsnit 8.4 vedr. mulige frostska-der.

Tabel 38 viser kritiske og potentielt kritiske punkter i væg 1-2-3 og 4 i forhold til risiko for frostska-der. Rødt lys betyder et kritisk forhold, gult lys betyder et potentielt kritisk forhold og et grønt lys betyder et ukritisk forhold. Navngivningen i parentes henviser til røde markeringer på konstrukti-onssnit. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.

| Væg 1                                                                               |       |   |      | Væg 2                                                                                |   |      |       |   |      |       |   |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|---|------|--------------------------------------------------------------------------------------|---|------|-------|---|------|-------|---|------|
|   |       |   |      |   |   |      |       |   |      |       |   |      |
| Væg 3                                                                               |       |   |      | Væg 4                                                                                |   |      |       |   |      |       |   |      |
|  |       |   |      |  |   |      |       |   |      |       |   |      |
| Tema:                                                                               | Væg 1 |   |      | Væg 2                                                                                |   |      | Væg 3 |   |      | Væg 4 |   |      |
| Frostskader                                                                         | FBK   |   | Målt | FBK                                                                                  |   | Målt | FBK   |   | Målt | FBK   |   | Målt |
|                                                                                     | 2     | 3 |      | 2                                                                                    | 3 |      | 2     | 3 |      | 2     | 3 |      |
| (E) Kun konstruktion, udvendig overflade.                                           | ND    |   |      | ND                                                                                   |   |      | ND    |   |      |       |   |      |
| (O) Fast binder. Udvendig overflade.                                                |       |   |      | ND                                                                                   |   | ND   | ND    |   | ND   |       |   |      |
| (L) Eksisterende granulat, udvendig overflade.                                      |       |   |      |                                                                                      |   |      |       |   |      |       |   |      |

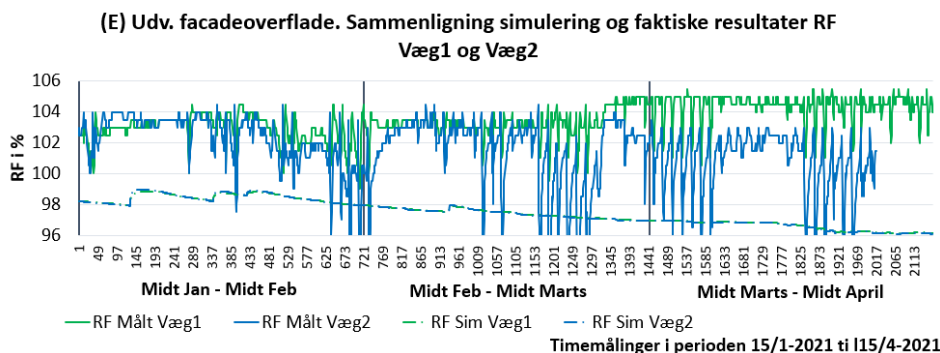
### (E) Kun konstruktion, udvendig overflade

Som det ses i Tabel 38, er det kun for de målte resultater, der registreres kritiske niveauer for fugt i den udvendige facadeoverflade. Umiddelbart synes de målte resultater ikke realistiske, da der er registreret niveauer for RF over 100 % i stort set hele perioden for alle tre vægtyper i forhold til simuleringer i samme periode. Såfremt væggene er så opfugtede, som målinger i Figur 71 viser, antydes det, at den benyttede logger har svært ved at håndtere en rigtig registrering af RF tæt på 100 % eller ved påvirkning af decideret kondens. Dog synes registrerede temperatursæt pålidelige med målinger svingende mellem -8 °C og 20 °C.



Figur 71 Målt RF og temperatur i den udvendige overflade ved væg 1, væg 2 og væg 3. RF fremstår i optrukket linje. Temperaturer er angivet med stiplede kurver. (Bilag 8.4)

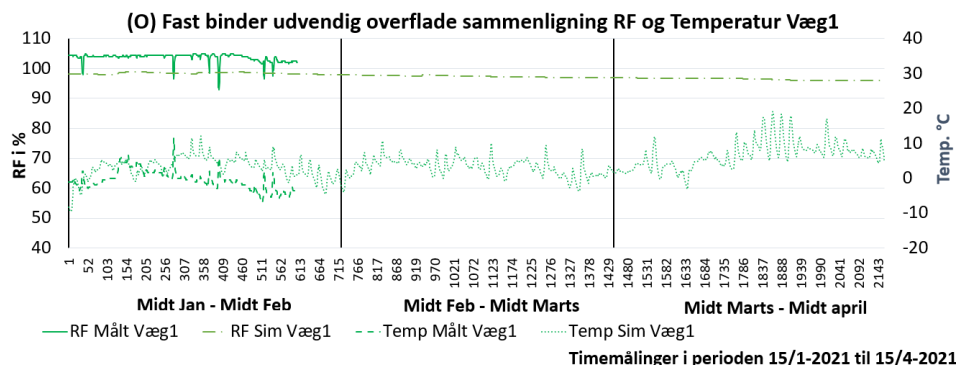
Ved at zoome ind på skalaen for RF fra 90-110 % fornemmer man bedre de differentierede forløb for væg 1 og væg 2 trods det faktum, at forløbet stadig befinder sig over 100 % RF. Kurverne for de målte værdier følges tilnærmelsesvis ad de første halvanden måned, hvorefter væg 1 fremstår mere fugtig end væg 2 som forventet, da varmestrømmen gennem væg 2 er størst. Dette underbygges af udvendige kapacitive målinger fra efterundersøgelsen, beskrevet i afsnit 8.2, der på samme vis indikerer at væg 1 fremstår mere fugtig end væg 2. Forskellen i fugtniveau fremstår dog mere udpræget ved målinger end ved tilsvarende simuleringer i samme periode som det ses i Figur 72. Dog stadig med den konklusion, at der er et fugtrelateret problem ved den udvendige facadeoverflade i sit nuværende udtryk ved brug af indvendig efterisolering. En facadehydrofobering kan derfor være anbefalelsesværdig at overveje for at bremse fugttilskuddet til facadeteglen fra slagregn, og derved minimere risikoen for frostskaader. Argumentet for denne anbefaling beskrives nærmere i afsnit 9.4.3.



Figur 72 Sammenligning af RF mellem simuleringer og målinger i samme punkt i den udvendige facade ved væg1 og væg2. Målinger er angivet med optrukket streg. Simulerede resultater er angivet med stiplede streg.

### (O) Fast binder. Udvendig overflade

Overfladen ved den faste binder udvendigt har de samme problematikker, som beskrevet for den udvendige facadeoverflade uden nævneværdig forskel. Som det kan ses i Figur 73, ophører målinger efter en lille måned, men dog målinger nok til at registre at de kritiske betingelser for mulige frostskafer er til stede.

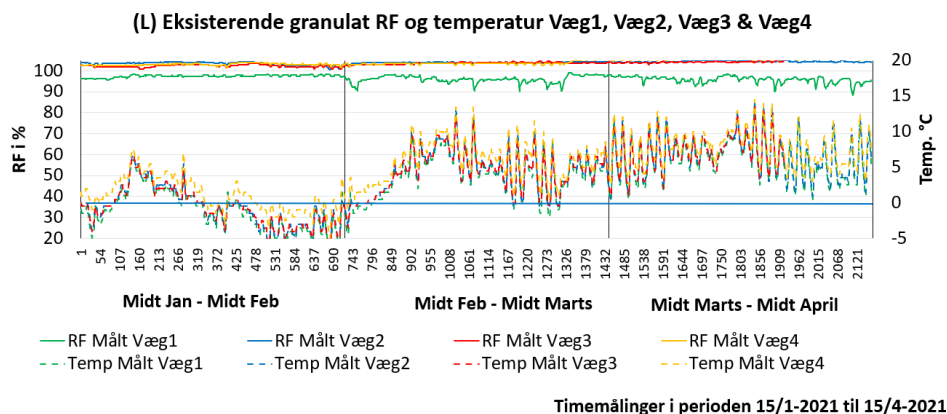


Figur 73 Sammenligning af RF og temperatur mellem simuleringer og målinger i samme punkt udvendigt ved den faste binder væg 1. (Bilag 8.4)

### (L) Eksisterende granulat, udvendig overflade

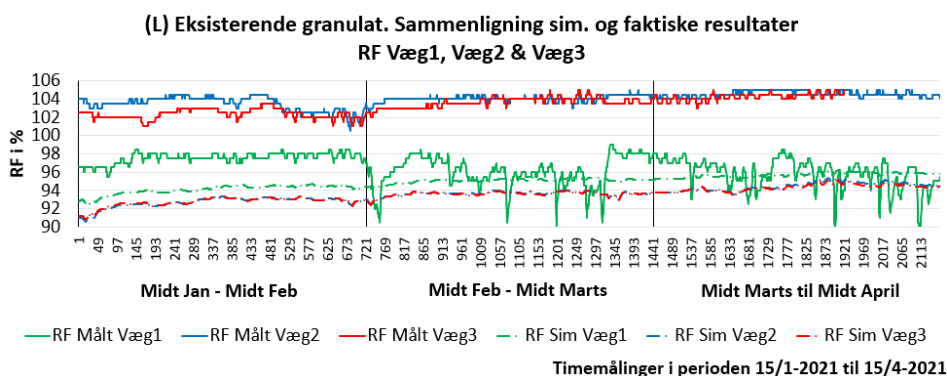
Kun fugtbelastningsklasse 2 diskuteres her, da samme problematikker vil være gældende for fugtbelastningsklasse 3. Der er udført registrering af RF og temperatur ved den kolde side af den eksisterende granulat i hulmuren. Ved alle fire vægtyper registreres en RF over 100 % med undtagelse af væg 1. RF over 100 % er ikke realistisk, men indikerer ekstrem fugtighed i områderne. I områder der periodisk har været så fugtige, risikeres at loggere "låser" i højt niveau. At væg 1 med mindste varme-strøm gennem konstruktionen af alle vægtyper er mindst fugtig, er ikke plausibelt og må skyldes lokale forhold omkring- eller i selve loggeren. Som det ses af Figur 74 har der været en længere sammenhængende

periode, hvor temperaturen har været under 0 °C samtidig med høj RF i punktet, hvilket medfører risiko for både frost og kondens i hulmuren.



Figur 74 RF og temperatur ved den kolde side af den eksisterende granulat. Blå vandret streg er egen påtegning for temperatur 0 °C.

Sammenlignes RF for alle fire vægtyper, både ved målte og simulerede resultater, som vist i Figur 75, er der ikke umiddelbart noget der indikerer bedre egenskaber for den kapillaraktive isolering i forhold til en traditionel forsatsvæg. Dette ses b.l.a. via de simulerede resultater for væg 2 og væg 3, der har ens forløb i punktet, sandsynligvis grundet de identiske U-værdier.



Figur 75 Sammenligning af RF mellem simuleringer og målinger i samme punkt ved den kolde side af den eksisterende granulat, ved væg 1, væg 2 og væg 3. Målte resultater er angivet med optrukket streg. Simulerede resultater er angivet med stiplet streg.

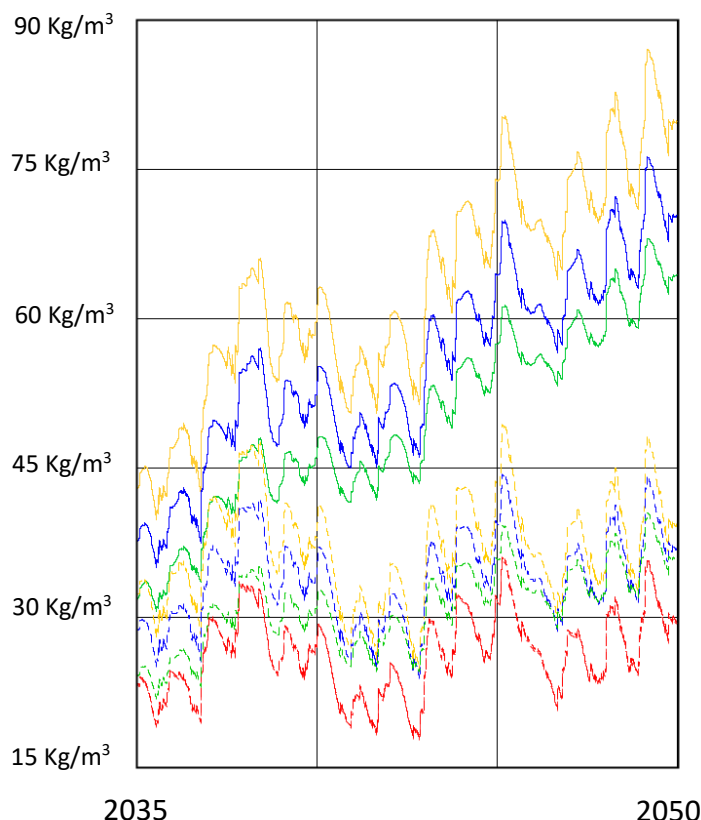
Som det beskrives i afsnit 5.1.3 er en intakt facadeoverflade essentielt for at undgå frostskaer ved indvendig isolering generelt. I det omfang det er muligt vil det ligeledes være tilrådeligt at hydrofobere facadeoverfladen. Særligt ved en høj eksponeringsklasse (46), således at så lidt fugt som muligt optages i facadeoverfladen. En hydrofobering, som eksempelvis en imprægnering, skal dog foretages med omtanke på den eksisterende konstruktion. Særligt i forhold til mørteltypen, skal der vælges en egnet imprægneringstype, dette kan begrænse muligheden for imprægnering af ældre bygninger (47).

## 9.4 Fremskrevet klima A1B for simuleringstype 1

Konsekvenserne af forventet fremtidigt udeklima er kun belyst for de konstruktioner, der indgår i simuleringstype 1 (den rene konstruktion), som er beskrevet i bilag 7.4. Målet er at få en fornemmelse af konsekvensen af varmere og mere fugtigt udeklima. Der kan derfor lokalt godt være konstruktionsområder, der påvirkes i højere grad, men som ikke inddrages i nærværende rapport. Der diskuteres derfor kun det totale vandindhold, risiko for skimmelvækst på den oprindelige indvendige overflade samt kondensrisiko(frost) i den udvendige overflade. Dette belyses ved alle fire vægtyper.

### 9.4.1 Udvikling i totalt vandindhold

Generelt ses der et stigende forløb i det totale vandindhold i alle fire vægtyper i simulationsperioden for fugtbelastningsklasse 3, med undtagelse af væg 3, som stabiliserer sig til et jævnt forløb de sidste 8 år. Det samme gør sig gældende i fugtbelastningsklasse 2, hvor der dog sker en stabilisering i de sidste 8 år for alle vægtyper med undtagelse af væg 1. Grafer over forløb for vægkonstruktionernes vandindhold i fugtbelastningsklasse 2 og 3 kan ses i Figur 76.



Figur 76 Grafer over forløb for det totale vandindhold i alle 4 vægtyper simuleret i klimascenarie A1B i perioden 2035 til 2050. Grafer vist i stiplet streg viser forløb i fugtbelastningsklasse 2. Optrukket streg viser forløb i fugtbelastningsklasse 3. Grøn linje = væg 1. Blå linje = væg 2. Rød linje = væg 3. Gul linje = væg 4.



Det bør bemærkes, at væg 1 har samme forløb som væg 2 og 4, dog med mindre vandmængde pr. m<sup>3</sup> konstruktion. Dette skønnes at kunne tilskrives den kapillaraktive plades evne til at optage og afgive fugt til omgivelserne, via materialets egenskaber og større tykkelse, i forhold til de 2 andre typer. Det skal yderligere bemærkes at forløbet for væg 3 er ens i fugtbelastningsklasse 2 og 3 hvor grafer ligger oven i hinanden. Dette skal tilskrives antagelsen af tæt og veludført dampspærre i konstruktionen.

#### 9.4.2 Skimmelvækst

Tabel 39 opsummerer de kritiske samt potentielt kritiske resultater fra afsnit 8.5 vedr. mulig skimmelvækst.

*Tabel 39 Kritiske og potentielt kritiske punkter i væg 1,2,3 og 4 i forhold til risiko for skimmel simuleret iht klimascenarie A1B for perioden 2030-2050. Rødt lys betyder et kritisk forhold, gult lys betyder et potentielt kritisk forhold og et grønt lys betyder et ukritisk forhold. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.*

| Tema: A1B klimafremskrivning<br>Skimmelvækst | Væg 1                                                                               |                                                                                     | Væg 2 |                                                                                     | Væg 3                                                                               |                                                                                      | Væg 4 |                                                                                       |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|---------------------------------------------------------------------------------------|
|                                              | FBK                                                                                 |                                                                                     | FBK   |                                                                                     | FBK                                                                                 |                                                                                      |       |                                                                                       |
|                                              | 2                                                                                   | 3                                                                                   | 2     | 3                                                                                   | 2                                                                                   | 3                                                                                    | 2     | 3                                                                                     |
| (F) Oprindelig indvendig overflade           |  |  | ND    |  |  |  | ND    |  |

#### (F) oprindelig indvendig overflade

Via graferne i Figur 76 kan man se stigende vandindhold i konstruktionen i fugtbelastningsklasse 2 og 3. Trods dette er det kun væg 1 og væg 3 i fugtbelastningsklasse 3, som viser potentielt kritiske forhold via simuleringer foretaget i WUFI VTT. WUFI VTT-analyserne viser dog stadig potentielt kritisk forhold for væg 3 i fugtbelastningsklasse 2, grundet de indbyggede organiske materialer i form af træreglar. Udskiftes disse til stålreglar vil konstruktionen teoretisk kunne eftervises som en fugtteknisk robust løsning via WUFI VTT iht. klimafremskrivning A1B, med fokus på den veludførte dampspærre. Vurderingsgrafer vedr. dette ses i bilag 8.5.

Det stigende vandindhold i konstruktionen i fugtbelastningsklasse 3 for den kapillaraktive isolering antyder, at løsningen ikke er fugtteknisk robust i denne fugtbelastningsklasse. Dog bør man inddrage konstruktionens forventede restlevetid og vurdere på om vandindholdet i konstruktionen når en kritisk mængde inden udløb. I det konkrete tilfælde er der antaget en forventet levetid på 40 år for begge løsninger, med en simuleringsperiode belyst i perioden 2030 til 2050. Antagelsen er begrundet i levetidstabellerne for ombygninger og udskiftninger af bygningsdele (10 s. 308).



### 9.4.3 Frostskader

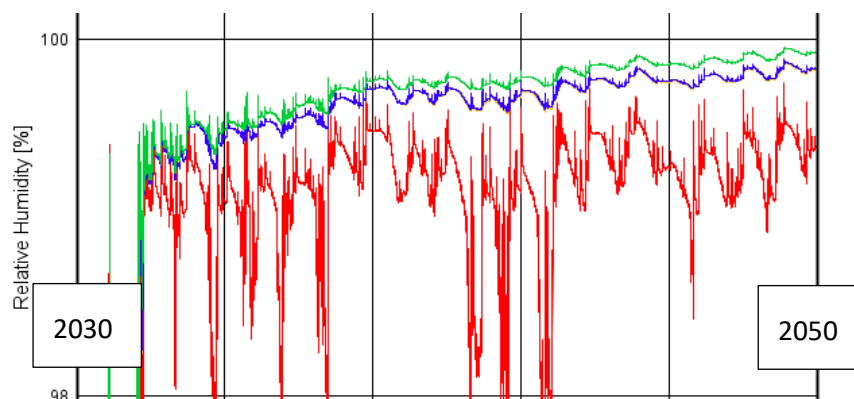
Tabel 40 opsummerer de kritiske samt potentielt kritiske resultater fra afsnit 8.5 vedr. mulige frostskader.

*Tabel 40 Kritiske og potentielt kritiske punkter i væg 1-2-3 og 4 i forhold til risiko for frostskader simuleret iht klimascenarie A1B for perioden 2030-2050. Rødt lys betyder et kritisk forhold, gult lys betyder et potentielt kritisk forhold og et grønt lys betyder et ukritisk forhold. De opstillede grænsekriterier for 'trafiklys'-markeringer fremgår af Tabel 16.*

| Tema: A1B klima-<br>fremskrivning<br><br>Frostskader | Væg 1 |   | Væg 2 |   | Væg 3 |   | Væg 4 |   |
|------------------------------------------------------|-------|---|-------|---|-------|---|-------|---|
|                                                      | FBK   |   | FBK   |   | FBK   |   | FBK   |   |
|                                                      | 2     | 3 | 2     | 3 | 2     | 3 | 2     | 3 |
| (E) Udvendig facade-<br>overflade                    | ●     | ● | ●     | ● | ●     | ● | ●     | ● |
| (L) Eksisterende granu-<br>lat kold side.            | ●     | ● | ●     | ● | ●     | ● | ●     | ● |

#### (E) Udvendig facadeoverflade og (L) eksisterende granulat

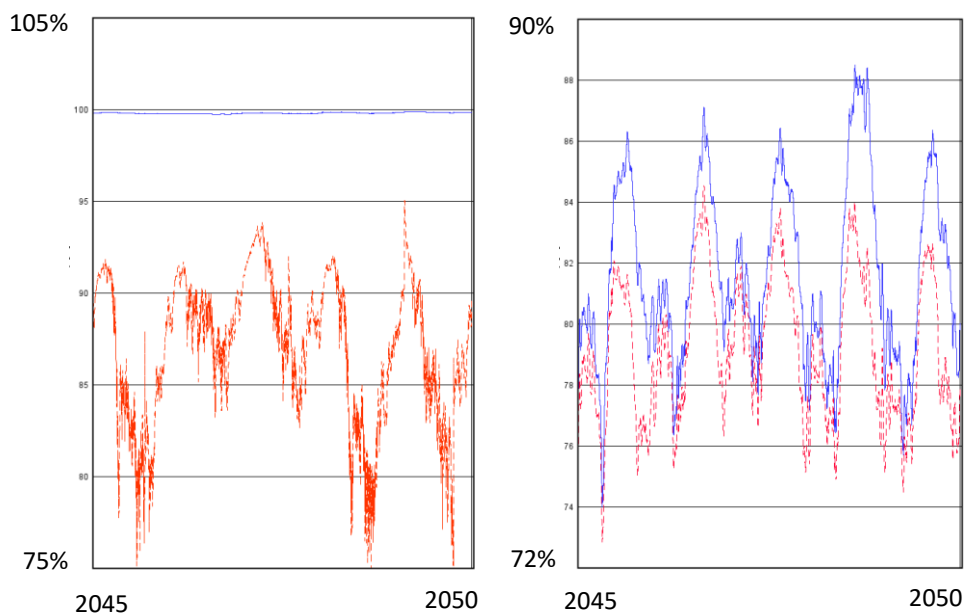
Som det ses i Tabel 40, er der vurderet potentiel risiko for frostskader ved alle belyste kombinationer mellem vægtyper og fugtbelastningsklasser. Problemstillingerne er ens for både udvendig facadeoverflade (E) og den kolde side af eksisterende granulat (L), som derfor diskuteres samlet. Grafer for RF ved den kolde side af granulat har samme forløb, som det man ser for den udvendige facadeoverflade, vist i Figur 77, og kan ses i bilag 8.5. Betragtes graferne i Figur 77, viser simuleringseresultaterne RF så tæt på 100% for alle vægtyper i fugtbelastningsklasse 3, at der ikke umiddelbart kan udledes, at den ene indvendige efterisoleringstype håndterer forventet fremtidigt klima bedre end en anden. Derimod understreger graferne behov for en nærmere analyse af, om en evt. facadehydrofobering kan være tilstrækkelig til at sænke konstruktionernes vandindhold til et ikke-kritisk niveau i forhold til frostskader.



Figur 77 RF simuleret for alle 3 vægtyper med fremskrevet klimafil A1B i perioden 2030-2050 ved den udvendige overflade. Graferne illustrerer forløb i fugtbelastningsklasse 3. Grøn kurve viser forløb for væg 1, blå kurve viser forløb for væg 2, rød kurve viser forløb for væg 3.

I simuleringerne tilhørende denne rapport, er der benyttet en faktor for 'Adhering Fraction of Rain' (regnfaktor) på 10 %, som angivet i afsnit 7.4.1. Benyttes denne værdi i simulering for fremtidigt klima efter A1B vil RF i den udvendige overflade ved væg 2 i fugtbelastningsklasse 3 ligge konstant omkring 99 % som det ses på den blå kurve i Figur 78.1. Laves den samme simulering, men med en regnfaktor på 3 %, som skal beskrive en facadehydrofobering, så vil RF forløb ved væg 2 i fugtbelastningsklasse 3 have et relativt mere cyklisk forløb. Her svinger RF mellem 75 – 93 % i den udvendige overflade, hvis man betragter perioden 2045-2050.

Ud fra dette eksempel kan det udledes, at der ved det fremtidige klima oftest vil være nødvendigt med en facadehydrofobering, såfremt der skal efterisoleres indvendigt, for at sikre den udvendige overflade mod potentielle frostskafer. Som minimum bør der arbejdes med at holde sine efterisolerede konstruktioner mere under observation, eventuelt ved brug af indbyggede loggere, så der kan måles fugt uden destruktive indgreb. På markedet findes i dag tynde passive fugtfølere der ikke begrænses af batterilevetid man med fordel kan indbygge strategiske steder. (48). Tiltag som synes nødvendigt i særdeleshed, når man betragter simuleringer af fremtidigt klima.



*Simuleringsresultater i den udvendige overflade ved væg 2 i FBK3 i perioden 2045-2050. Y-aksen indeles fra 75-105 % RF. Blå linje viser forløb ved regnfaktor 10 %. Rød stiple linje viser forløb ved regnfaktor 3 %.*

*Simuleringsresultater i den oprindelige indvendige overflade ved væg 2 i FBK3 i perioden 2045-2050. Y-aksen indeles fra 72-90 % RF. Blå linje viser forløb ved regnfaktor 10%. Rød stiple linje viser forløb ved regnfaktor 3 %.*

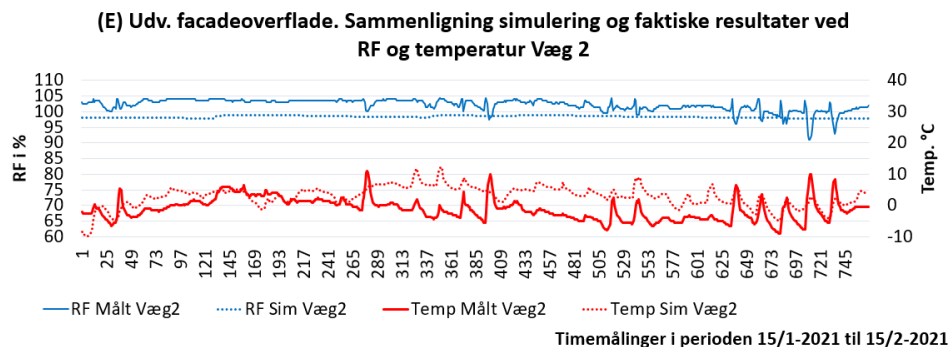
*Figur 78 Væg 2 i FBK3 er simuleret i WUFI 2D i perioden 2045-2050 efter fremtidig klima A1B. Den udvendige facadeoverflade og den oprindelige indvendige overflade er undersøgt ved en regnfaktor på hhv. 10 % og 3 %. Regnfaktor 3 % beskriver brug af en facadehydrofobering.*

Kigger man på samme vis ved den oprindelige indvendige overflade i perioden 2045-2050, har en facadehydrofobering ikke en større indvirkning på RF i dette område. Her vil det mere være indeklimaets fremtidige fugtindhold som vil påvirke konstruktionen. Figur 78.2 viser med blå linje forløbet for RF i punktet ved regnfaktor 10 %, med værdier svingende mellem 75 – 88 % RF. Rød stiple linje viser forløb i perioden ved regnfaktor 3 % med værdier svingende mellem 75-84 % RF. Selv om der er en forskel på den maksimale RF på omkring 4 %, holder begge kurver sig fint under de opstillede grænsekriterier for potentiel skimmelrisiko. Af dette kan det udledes, at fokus ved fremtidens boliger ved brug af indvendig efterisolering også bør ligge i at sikre, at der ventileres med, så tør udeluft, som muligt, for at holde RF i indeklima på så lavt et niveau som muligt. Dette kan eventuelt sikres via mekanisk ventilation, hvor udeluften kan opvarmes med mindre RF i ventilationsluften til følge.

## 9.5 Målinger kontra simuleringer

I afsnit 8.4 samt i bilag 8.4 sammenlignes resultaterne fra målingerne med simuleringer fra en tilsvarende periode.

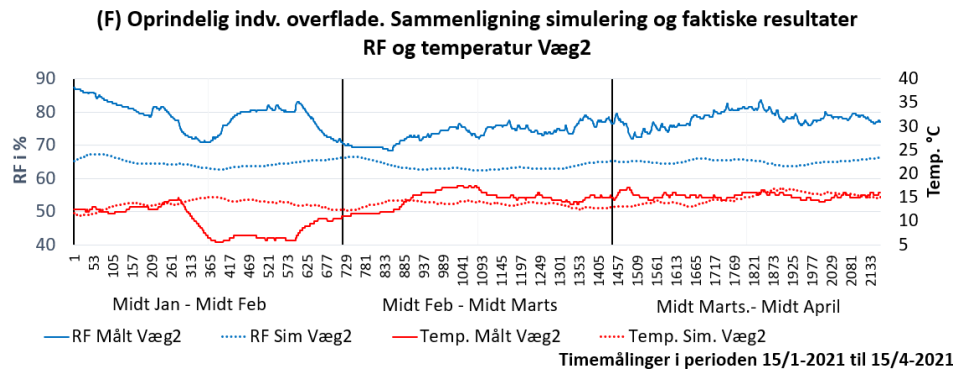
Særligt i den første tredjedel af måleperioden har der været koldere ude, end der forudsættes ved simuleringerne. Dette illustreres ved eksemplet på den udvendige facadeoverflade ved væg 2, der vises i Figur 79. Her ses måleresultaterne for den første måned, præsenteret ved en ubrudt rød linje, generelt at ligge under de simulerede resultater, der er præsenteret ved en stiple rød linje.



Figur 79 sammenligning mellem målt og simuleret RF og temperatur for facadeoverfladen ved væg 2 fra midt jan. til midt feb. (Bilag 8.4)

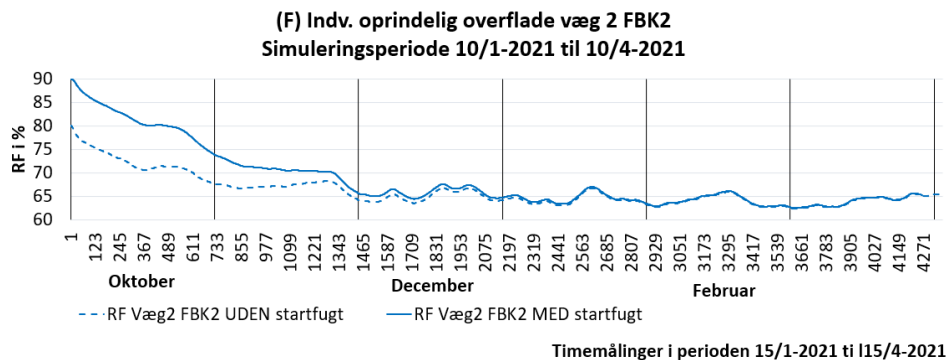
Sammenhængen mellem RF og temperatur er forklaret i afsnit 4.2.3. Dermed er det naturligt, at den målte RF i perioden er højere end den simulerede. Temperaturen udvendigt er et eksempel på en faktor, der kan besværliggøre en sammenligning mellem et målt og et simuleret resultat. Særligt i så kort en periode, som der her er tale om. Et andet eksempel er sammenhængen mellem de materialer man indbygger i simuleringen og de materialer, der er i konstruktionen. Generelt viser målinger større RF-niveauer, end der præsenteres i simuleringerne. Dette ses selv

i perioder med mere ensartede temperaturer mellem de målte og simulerede værdier som det præsenteres i eksemplet i Figur 80.



Figur 80 sammenligning mellem simulerede og målte resultater af RF og temperatur ved den oprindelige indvendige overflade på væg 2 i hele måleperioden. (Bilag 8.4)

Det kan være begrundet i, at væggene i forvejen har været relativt fugtige i forhold til WUFI 2D's udgangspunkt for simuleringen. For at underbygge dette argument, er der udført en WUFI 2D simulering med en startfugt i den eksisterende konstruktion på +10% RF i forhold til det prædefinerede udgangspunkt i WUFI 2D. Der tages udgangspunkt i den samme konstruktion og samme punkt som præsenteres i Figur 80. I Figur 81 præsenteres en sammenligning af WUFI 2D simuleringerne over 6 måneder. Som det ses, kan man forvente at den højere startfugt har en stor påvirkning i de første måneder, hvorefter RF i punktet er ensartet.



Figur 81 Simulering af væg 2 i FBK2 med 10 % højere startfugt ved simuleringens start ved kurven vist med optrukket linje.

Målinger, der skal tjene til validering af en simulering, bør foretages over en længere periode end der har været til rådighed for denne rapport. Dog har målinger tjent som understøttelse til visse af de konklusioner, der er draget i diskussionen.

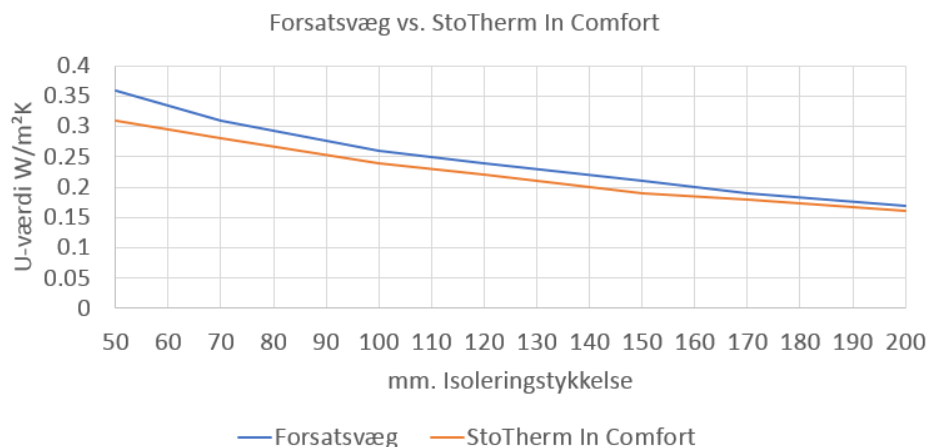
## 9.6 U-værdier

I afsnit 8.6 præsenteres resultaterne af de fire vægkonstruktioners U-værdier inkl. korrektioner for diverse gennembrydninger af de isolerende lag.

Væg 1 opnår den laveste U-værdi med  $0,16 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ . Som tilsigtet opnår væg 2 og 3 samme U-værdi ved  $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , trods en mindre forskel i tykkelse. Den oprindelige konstruktion, inkl. den tidligere udførte hulmurs isolering, beregnes til en U-værdi på  $0,42 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ .

Kun væg 1 efterlever U-værdi kravet til en ombygget bygningsdel iht. afsnit 4.1.3. Dog beskriver BR18 ligeledes, at en mindre isoleringstykkelse, som eksempelvis i væg 2 og 3, kan anvendes, såfremt det er behæftet med risiko for fugtskader at efterleve det specifikke U-værdi krav (10 s. 314). I øvrigt kan der ligeledes ses bort fra kravet, såfremt at det kan dokumenteres at være økonomisk urentabelt at efterleve det. Netop ved væg 1 er det bevist i afsnit 9.3, at der ved visse detaljer kan opstå fugtbetingende skader som følge af efterisolering med 200 mm kapillaraktiv isolering. Det vil ikke være nødvendigt at hæve U-værdien til  $0,31 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ , som der er beregnet for væg 2 ved 50 mm kapillaraktiv isolering, for at opnå en fugtteknisk robust vægkonstruktion. Selv ved særligt kritiske detaljer kan en større isoleringstykkelse end 50 mm sandsynligvis anvendes, uden at fugtskader risikeres.

Kravet på samlet  $0,18 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$  opnås ved at tilføje 170 mm kapillaraktiv isolering på en konstruktion som den der bearbejdes i denne rapport. Se bilag 8.6. En ændring som denne vil mindske risikoen for fugtskader i et vist omfang, men næppe i så høj grad, at fugtskader som optræder i fugtbelastningsklasse 3, ved eksempelvis en træoverligger, kan udelukkes. Figur 82 illustrerer hvordan isoleringstykkelsen påvirker den korrigerede U-værdi. Bemærk, at de forholdsmæssige største fald i U-værdien ses ved de små isoleringstykkelser, hvorimod yderligere øgningen i isoleringstykkelsen ikke giver samme effekt. Bemærk ligeledes, at afstanden mellem kurverne er faldende ved øget isoleringstykkelse. Det skyldes, at  $\lambda$ -værdien i isoleringen i forsatsvæggen er ca. 8 % bedre end i den kapillaraktive isolering. Det betyder at forsatsvæggen henter ind på 'Sto-Therm In Comfort' ved større isoleringstykkelser, trods de gennembrydninger der indregnes ved forsatsvæggens bærende træreglar.



Figur 82 Udvikling i korrigerede U-værdi i sammenhæng med isoleringstykkelse. (Bilag 8.6)

I alment teknisk fælles eje frarådes en isolering med mere end 100 mm ved en traditionel forsatsvæg af fugttekniske årsager (20). Sammenlignes hvilken U-værdi der kan opnås ved netop denne tykkelse, ses det i Figur 82, at man ved en forsatsvæg kan opnå en U-værdi på ca. 0,26 W/(m² K), og ved 'StoTherm In Comfort' opnår 0,24 W/(m² K) i det specifikke tilfælde. Derudover fylder en 'StoTherm In Comfort' løsning ca. 15 mm mindre end en forsatsvæg ved samme isoleringstykkelse, grundet pudsens tykkelse på ca. 10 mm mod 2 lag gips med en samlet tykkelse på ca. 25 mm. Plads er typisk en udfordring ved indvendig isolering, og det vurderes at 'StoTherm In Comfort' generelt giver en bedre isolerende væg og samtidigt optager mindre plads end en traditionel forsatsvæg.

## 10 Konklusion

Med udgangspunkt i diskussionen i afsnit 9, vil nærværende afsnit af-dække de spørgsmål, der er stillet i problemformuleringen i afsnit 3.2.

### 10.1 Fugtteknisk robusthed

Via simuleringer og målinger eftervises, at 'StoTherm In Comfort' er en fugtteknisk robust løsning i såvel fugtbelastningsklasse 2 som fugtbelastningsklasse 3 ved 50-200 mm kapillaraktiv indvendig isolering.

Dog forudsætter det fokus på indbyggede organiske bygningsdele. Eksempelvis bør overliggere i træ udskiftes med mere robuste materialer, som beton eller tegl. Et andet eksempel er træværk i tagkonstruktionen. Her skal man være opmærksom på, om træværket har været nedbrudt tidligere. I givet fald bør det skiftes eller forstærkes.

Ligeledes forudsættes en evt. kold krybekælder at blive omdannet til en varm krybekælder, eller alternativt til et traditionelt velisoleret terrændæk.

Ved ydervægskonstruktioner med faste bindere, eller lign. i fugtbelastningsklasse 3, anbefales en reduceret maximal isoleringstykkelse i forhold til væg 1. Den aktuelle maximale tykkelse bestemmes af de specifikke forhold.

En intakt og gerne hydrofob facadeoverflade er en forudsætning for at undgå frostskafer i facaden ved indvendig isolering generelt.

En traditionel forsatsvæg opbygget i bl.a. organiske materialer er i mange tilfælde mindre modstandsdygtig mod fugtrelaterede skader, end et isoleringssystem, opbygget med en kapillaraktiv isolering. Baseret på hvilke detaljer, der kan forventes i en ældre ydervægskonstruktion, samt på risikoen for en defekt dampspærre, bør indvendig isolering ved forsatsvægge opbygget i træregler undgås i fugtbelastningsklasse 3. Selv i fugtbelastningsklasse 2 bør løsningen kun anvendes efter grundig overvejelse. En forsatsvæg opbygget i uorganiske materialer, som eksempelvis stålreglar, vil være mere modstandsdygtig.

Uanset metode, vil en fugtteknisk robust indvendig efterisolering altid kræve:

- En grundig bygningsundersøgelse, der afdækker eksisterende forhold
- En rengjort oprindelig indvendig overflade
- En intakt facadeoverflade, der ikke lader uhensigtsmæssigt meget vand trænge ind

## **10.2 Varmetab**

I en forsatsvæg vil der typisk anvendes et isoleringsmateriale med en lavere  $\lambda$ -værdi end der pt. er mulighed for i et system med en kapillaraktiv isolering. Dette til trods opnås der en lavere U-værdi, særligt ved mindre tykkelser, med en kapillaraktiv isolering i system, end en forsatsvæg. Baseret på afsnit 10.1 kan der opnås en fugtteknisk robust konstruktion ved en lavere U-værdi med 'StoTherm In Comfort' end det er muligt med en traditionel forsatsvæg, som den der behandles i denne rapport.

## **10.3 Fremskrevet klima**

Ved de undersøgte fremskrevne klimatiske forhold viser det sig generelt, at indvendig isolering er problematisk, særligt i fugtbelastningsklasse 3. Som det også er tilfældet i dag, vil valg af robuste materialer i det forventede fremtidige klima være af stor vigtighed. Da udfordringerne af det fremtidige klima ikke er endeligt bekendt, anbefales det, at der indbygges muligheder for løbende observationer af indbyggede konstruktionsdele, særligt organiske konstruktionsdele ved indvendig efterisolering af ydervægge.



## 11 Perspektivering

Det er en pligt at bevare dele af den historiske bygningsmasse til eftertiden. Samtidigt er det et udtalt mål for vores samfund at nedbringe CO<sub>2</sub> udslippet fra opvarmning af vores bygninger. Nedbringelse af CO<sub>2</sub> udslippet kan opnås på mange måder. I forhold til at isolere en ydervæg, er der en indbygget konflikt. Konflikten består i at man, for at bevare facadeudtrykket, kun kan vælge indvendig isolering. Indvendig isolering anses typisk som en teknisk mindre god løsning end udvendig isolering.

I denne rapport beskrives det, at indvendig isolering i visse tilfælde kan anvendes som en løsning, men det beskrives også, at der er mange fælder, man kan falde i rent fugtteknisk. Falder man i nogle af disse fælder kan det have katastrofale følger for en ældre bygning. Derved risikerer man at ødelægge bygningsværker med stor historisk værdi for de kommende generationer, for at beholde deres facadearkitektur for samtiden og nedbringe CO<sub>2</sub> udslippet til opvarmning.

Udvendig isolering vil beskytte de gamle konstruktioner, samtidigt med at det vil nedbringe CO<sub>2</sub> udslippet og sikre et bedre indeklima for beboerne. Det vil naturligvis ændre facadearkitekturen for samtiden at isolere udefra, og det vil være kontroversielt, samt skabe stor debat. Et hovedargument for at isolere gamle, ofte bevaringsværdige, bygninger udefra er, at de på denne måde faktisk vil blive bevaret. Ikke bare i samtiden, men også for fremtiden på en fugtteknisk meget mere robust måde.

Følges denne tankegang, skal der udvikles facadeisoleringssystemer, der er såvel teknisk trygge, samt kræver så lille en indvirkning som muligt i den underliggende konstruktion, som man forsøger at beskytte. Det vil kræve at systemerne kan demonteres enkelt, samt have et acceptabelt facadedesign for samtiden.

Udviklingen af grøn energi accelererer og når vi kan producere energi med ingen, eller med et meget lavt CO<sub>2</sub> udslip til følge, kan der, med god samvittighed, skrues op for varmen i vores gamle bygninger igen og efterisoleringen bliver mindre væsentlig. Herefter kan den gamle bygning findes frem under 'dynen', og vi får igen visuel glæde af den oprindelige bygningskrop.

Naturligvis er denne tankegang ikke universelt brugbar. Det er svært at forestille sig en fredet bygning som Børgholm kloster pakket ind i et udvendigt isoleringssystem. Dog er det vores vurdering, at det kunne være relevant i forhold til mange beboede bevaringsværdige bygninger.

## 12 Referencer

1. **Klima-, Energi- og Forsyningsministeriet.** *Anbefalinger til regeringen fra klimapartnerskabet for bygge og anlægsektoren.* København : Klima, Energi og Forsyningsudvalget, 2019.
2. **Birgisdottir, Harpa og Madsen, Sussie Stenholt.** *Bygningers indlejrede energi og miljøpåvirkninger.* Lyngby : Polyteknisk Boghandel og Forlag ApS, 2017.
3. **Thomsen, Kirsten Engelund og Wittchen, Kim B.** *Energiforbrug og besparelser.* København : Statens Byggeforskningsinstitut, 2007. Journal nr. 731-001.
4. **Danmarks statistik.** Statistik banken. *www.statistikbanken.dk.* [Online] [Citeret: 18. 02 2021.] [https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/Graphics/MakeGraph.asp?interactive=true&menu=y&maintable=KFRED1&pxfile=2021218104920315168744KFRED1.px&gr\\_type=1&PLanguage=0](https://www.statistikbanken.dk/statbank5a/Graphics/MakeGraph.asp?interactive=true&menu=y&maintable=KFRED1&pxfile=2021218104920315168744KFRED1.px&gr_type=1&PLanguage=0).
5. **RIBuild.** Report on historical building type and combinations of structural solutions. *www.ribuild.eu.* [Online] 31. 12 2019. [Citeret: 01. 06 2021.] [https://static1.squarespace.com/static/5e8c2889b5462512e400d1e2/t/5e9db7f24592231ec3a72345/1587394572959/RIBuild\\_D1.1\\_2.0.pdf](https://static1.squarespace.com/static/5e8c2889b5462512e400d1e2/t/5e9db7f24592231ec3a72345/1587394572959/RIBuild_D1.1_2.0.pdf).
6. **Nielsen, Anker og Møller, Eva B.** *MASTER I BYGNINGSFYSIK - VARMELERE TEORI.* København : Aalborg Universitet, 2018.
7. **Geyer, Lone F. og Svendsen, Michael C.** Boliu. *www.boliu.dk.* [Online] 15. 06 2018. [Citeret: 21. 02 2021.] <https://www.boliu.dk/isolering-og-varmetab-17834>.
8. **Brandt, Erik.** *SBI-ANVISNING 224, Fugt i bygninger.* København SV : Statens Byggeforskningsinstitut, 2013. 224.
9. **Dansk Standard.** *DS 418 Beregning af bygningers varmetab.* København : Dansk Standard, 2011.
10. **Hansen, Ernst Jan de Place.** *SBI-ANVISNING 272, Anvisning om Bygningsreglement 2018.* København SV : Statens Byggeforskningsinstitut, 2018.
11. **Hansen, Ole Witt.** Ole Witt Hansen. *Elementær termodynamik og Kalorimetri.* [Online] [Citeret: 20. 02 2021.] [http://olewitthansen.dk/Fysik/Elementaer\\_termodynamik\\_og\\_kalorimetri.pdf](http://olewitthansen.dk/Fysik/Elementaer_termodynamik_og_kalorimetri.pdf).

12. **Olsen, Martin.** Klimatilpasning. [www.klimatilpasning.dk](http://www.klimatilpasning.dk). [Online] 01. 08 2020. [Citeret: 09. 02 2021.] <https://www.klimatilpasning.dk/viden-om/fremtidens-klima/klimaaendringeridanmark/>.
13. **Greenspan, Lewis.** *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. Washington D.C. : Institute for Basic Standards, Oktober 22, 1976.
14. **LBM.** *KAPILLARSUGNING LBM-prøvemetode 1*. Taastrup : Bearbejdet udgave af oprindelig metode TI-B-25 fra Teknologisk Institut, 1983.
15. **Brandt, Erik og Hansen, Morten Hjorslev.** *Fugtindhold i beton og murværk – måling og fejlkilder BYG-ERFA (99)050505*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2005.
16. **Møller, Eva.** *Materialenedbrydning, mekanismer og forebyggelse*. København SV : Statens Byggeforskningsinstitut, 2013.
17. **BYG-ERFA.** (99)141213 *Trækonstruktioner – udbedring efter svampe- og insektangreb*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2014.
18. **Kock, Anne Pia.** (29) 99 04 21 *Nedbrydning af træ i bygninger*. København K : Fonden BYG-ERFA, 1999.
19. **BYG-ERFA.** (21) 011001 *Afskalninger fra mørtelfuger*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2001.
20. **BYG-ERFA.** (31)151115 *Indvendig efterisolering – ældre ydervægge af murværk*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2015.
21. **Møller, Eva B.** *SBI-ANVISNING 240, Efterisolering af småhuse - byggetekniske løsninger*. Hørsholm : Statens Byggeforskningsinstitut, 2012.
22. **Andersen, Jørgen Munch.** *Efter isolering af etageboliger*. Hørsholm : Statens Byggeforskningsinstitut, 2008.
23. **Energistyrelsen.** Spar energi. [www.spareenergi.dk](http://www.spareenergi.dk). [Online] 06. 11 2019. [Citeret: 21. 02 2021.] <https://spareenergi.dk/forbruger/boligen/bygningsreglementets-energikrav/renovering-ydervaeg>.
24. **BYG-ERFA.** (21) 11 12 27 *Efterisolering af hulmur – forundersøgelser og forudsætninger*. København K : Fonden BYG-ERFA, 2011.
25. **Sto Danmark.** Sto Danmark. [www.sto.dk](http://www.sto.dk). [Online] [Citeret: 21. 02 2021.] [https://www.sto.dk/da/produkter\\_systemer/facade/facadesystem/stot-herm-classic-lmw.html](https://www.sto.dk/da/produkter_systemer/facade/facadesystem/stot-herm-classic-lmw.html).

26. **Videncenter for energibesparelser i bygninger.** byggeri og energi. [www.byggeriogenergi.dk](http://www.byggeriogenergi.dk). [Online] [Citeret: 24. 02 2021.] <https://byggeriogenergi.dk/vaerktoej/dampspaerreguide/dampspaerrens-funktion-og-placering/funktion/>.
27. **Sto AG.** Sto. [www.sto.de](http://www.sto.de). [Online] [Citeret: 18. 02 2021.] [https://www.sto.de/de/produkte/innendaemmsysteme/sto\\_therm\\_in\\_4.html](https://www.sto.de/de/produkte/innendaemmsysteme/sto_therm_in_4.html).
28. **Kulturstyrelsen.** Husmandsstedets historie 1899-1960. <https://slks.dk/>. [Online] 29. 01 2015. [Citeret: 29. 01 2021.] [http://bygningsskultur2015.dk/typeblade/landbrug/husmandsstedets\\_historie\\_1899\\_1960/](http://bygningsskultur2015.dk/typeblade/landbrug/husmandsstedets_historie_1899_1960/).
29. **Sikkerhedsstyrelsen.** Sikkerhedsstyrelsen. [www.sik.dk](http://www.sik.dk). [Online] [Citeret: 06. 03 2021.] <https://www.sik.dk/sites/default/files/2020-03/5murermesterhus1910-1940.pdf>.
30. **Realdania Byg.** *Stathusmandbrug - mellem udvikling og bevaring*. Odense : Realdania Byg, 2012.
31. **Sto AG.** Sto. [www.sto.de](http://www.sto.de). [Online] 04. 06 2014. [Citeret: 18. 02 2021.] [https://www.sto.de/media/documents/download\\_broschuere/innenraum/Systembroschuere\\_StoTherm\\_In\\_Comfort-09661-299.pdf](https://www.sto.de/media/documents/download_broschuere/innenraum/Systembroschuere_StoTherm_In_Comfort-09661-299.pdf).
32. **Rockwool.** Rockwool. [www.rockwool.dk](http://www.rockwool.dk). [Online] [Citeret: 24. 02 2021.] <https://info.rockwool.dk/da/guide-til-efterisolering/ydervaeg/ydervaeg-indvendigt-med-let-forsatsvaeg/>.
33. **Rasmussen, Torben Valbjørn og Nicolajsen, Asta.** *SBI-anvisning 214 Klimaskærmens lufttæthed*. Hørsholm : Statens Byggeforskningsinstitut, 2007.
34. **GANN.** GANN. [www.gann.de](http://www.gann.de). [Online] [Citeret: 18. 02 2020.] <https://www.gann.de/de/produkte/handmessgeraete/elektronische-messgeraete/compact-serie/compact-b>.
35. **BYG-ERFA.** (99) 141004 *Fugtindhold i træ*. s.l. : BYG-ERFA, 99.
36. **FLIR.** FLIR. [www.flir.eu](http://www.flir.eu). [Online] [Citeret: 06. 03 2021.] <https://www.flir.eu/products/flir-one-gen-3/>.
37. **Videncenter for energibesparelser i bygninger.** *Gode råd om termografering*. s.l. : Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2010.
38. **Nexttool.** fugtmåler.dk. [www.fugtmaaler.dk](http://www.fugtmaaler.dk). [Online] [Citeret: 18. 02 2021.] <https://fugtmaalere.dk/?s=smart-logger>.
39. **Standard, Dansk.** *Prøvningsmetoder for byggesten til murværk*. København : Dansk Standard, 2002. DS/EN 772-13:2002.

40. **ISO.** *Differential Scanning Calorimetry (DSC)*. Geneve : ISO, 2021. WN 11357-4:2021.
41. **Dansk Standard.** *Hygrotermisk ydeevne for byggematerialer og produkter*. Geneve : ISO, 2002. ISO 15148:2002.
42. **Standard, Dansk.** *Bestemmelse af hygroskopiske sorptionsegenskaber*. København : Dansk Standard, 2013. DS/EN ISO 12571:2013.
43. **WUFI Mould Index VTT 2.1** Hjælpetekst Topic 1. [Softwareprogram VTT] Stuttgart : WUFI.
44. **Morelli, Martin.** *Undervisning Skimmel Uge2 MMO*. København : SBI, 2019.
45. **Miljøministeriet. Klimatilpasning.** *Klimatilpasning.dk*. [Online] [Citeret: Torsdag. April 2021.] <https://www.klimatilpasning.dk/viden-om/fremtidens-klima/klimascenarier/>.
46. **BYG-ERFA.** (21)190903 *Eksponeringsklasser - bestemmelse i projekteringsfasen*. København : Fonden BYG-ERFA, 2019.
47. **BYG-ERFA.** (41)200925 *Overfladeimprægnering af murværk*. København : Fonden BYG-ERFA, 2020.
48. **Garplind, Björn.** *Mål fugt uden destruktiv prøveudtagning*. [<https://invisense.se/technology/>] Lindköping : InviSense.

## **13 Bilag**

|           |                                              |
|-----------|----------------------------------------------|
| Bilag 6.1 | BBR Præstebakke 12A                          |
| Bilag 6.4 | Fakta om StoTherm In Comfort                 |
| Bilag 7.2 | Placering af dataloggere                     |
| Bilag 7.4 | Simuleringstyper WUFI 2D                     |
| Bilag 7.5 | RAW damspærre datablad                       |
| Bilag 8.1 | Bygningsundersøgelse før                     |
| Bilag 8.2 | Bygningsundersøgelse efter                   |
| Bilag 8.3 | Parameterundersøgelse eksisterende tegl      |
| Bilag 8.4 | Resultatvurderinger for simulering og måling |
| Bilag 8.5 | Klimascenarie A1B 2030-2050                  |
| Bilag 8.6 | U-værdi beregninger                          |