



**AALBORG UNIVERSITET**  
KØBENHAVN

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

## *Studenterrapport*

**Uddannelse: Master i bygningsfysik**

**Semester: 4**

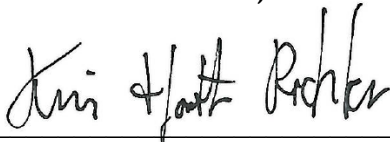
**Titel på masterprojekt:**

**Fugtophobning ved og omkring  
tagvinduer som følge af utæt dampspærre**

**Projektperiode: 01.02.2016-01.06.2016**

**Vejleder: Eva B. Møller**

**Studerende: Kim Hjorth Richter**



---

*Kim Hjorth Richter*

**Antal normalsider: 38**

**Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen**

**Afleveringsdato: 01.06.2016**

### **Resume:**

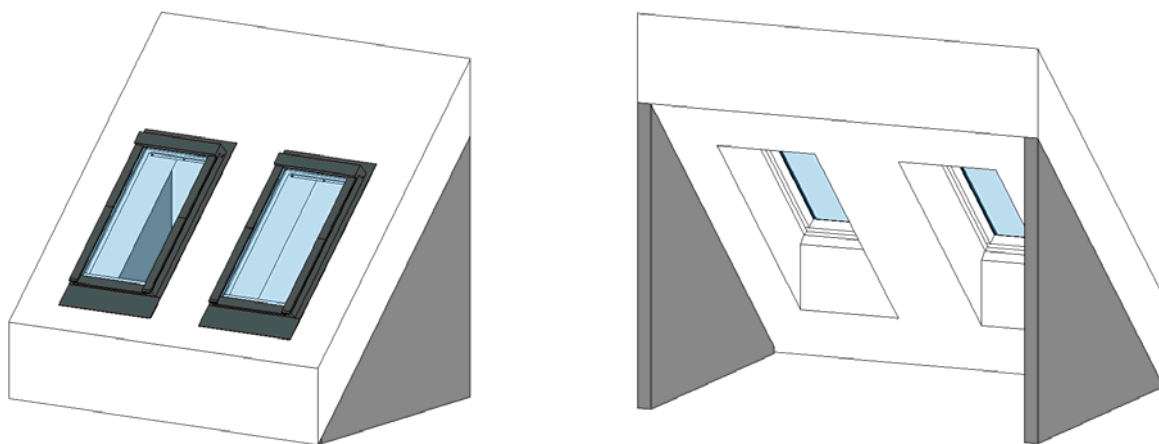
Dette speciale omhandler hygrotermiske undersøgelser af forhold ved og omkring tagvinduer som følge af en utæt dampspærre.

Specialet indeholder analyse og beskrivelse af de gældende fugtforhold baseret på både forsøgsopstilling og ved hjælp simuleringer.

Undersøgelser ved forsøgsopstilling sker udelukkende på baggrund af statiske forhold, mens simuleringer udføres med både statiske og dynamiske forhold.

Resultater viser, at dampspærren skal udføres tæt såfremt råd og nedbrydning skal undgås.

# Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre



**Master i bygningsfysik**

**Aalborg Universitetet, København**

**Speciale juni 2016**

**Af: Kim Hjorth Richter**

**Vejleder: Eva B. Møller**

## Resume

Dette speciale omhandler de termiske og hygrotermiske forhold, der gør sig gældende ved og omkring tagvinduer som følge af en utæt dampspærretilslutning.

Specialets formål er at danne basis for en kvalificeret diskussion af vigtigheden af en tæt tilslutning af dampspærren ved og omkring tagvinduer.

Målgruppen for specialet er udførende og projekterende som håndværkere, ingeniører og arkitekter, der arbejder inden for bygge- og anlægsbranchen.

Specialet præsenterer et fire måneder langt projektforsøg med registrering og opmåling af fugtforhold ved og omkring tagvinduer i en forsøgsopstilling opbygget i et klimakammer hos VELUX testcenter i Østbirk.

Udover at analysere fugtforhold baseret på data fra forsøgsopstillingen, er der udført simuleringer af de hygrotermiske forhold i en konstruktion svarende til forsøgsopstillingen i programmet WUFI 2D.

Mens forsøgsopstillingen udelukkende er baseret på statiske forhold, er der udført simuleringer i WUFI 2D med både statiske og dynamiske forhold.

Specialet indledes med en gennemgang af de relaterede emner inden for fugtteori og fugtmålinger, der indvirker på forsøgsopstillingen og de relaterede simuleringer.

Derefter gennemgås forsøgsopstillingen og dens opbygning, efterfulgt af en beskrivelse af de termiske og hygrotermiske beregninger, der foretages.

Resultaterne fra målingerne af fugtforholdene i forsøgsopstillingen viser, at der ved statiske forhold og en høj indvendig relativ luftfugtighed ses en kraftig fugtophobning ved og omkring både vindues- og spærkonstruktion på de steder, hvor der ikke er en tæt dampspærretilslutning.

Resultaterne af de hygrotermiske beregninger i WUFI 2D viser ved de dynamiske forhold ikke kritiske niveauer af fugt for vinduerne. Men for spærkonstruktionen ses det i store dele af året, at vandindholdet i vægtprocent overstiger 20 %, og at spærkonstruktionen derved er udsat for råd og trænedbrydende svampe.

At medtage effekten fra solstråling har stor betydning for udtørring og reduktion af antal dage med et kritisk fugtniveau i spærkonstruktionen. Dette gælder især for en sydvestlig orientering, hvor perioden med et vandindhold over 20 vægt-% mere end halveres.

Det kan konkluderes, at en tæt dampspærre ved og omkring tagvinduer har stor betydning for de hygrotermiske forhold. En utæt dampspærretilslutning vil kunne afstedkomme betydelige problemer i forhold til råd og nedbrydning.

## Summary

This thesis introduces the thermal and hygrothermal conditions prevailing at and around roof windows caused by an untight vapour barrier connection.

The purpose of the thesis is to serve as the basis for a qualified discussion of the importance of a tight connection of the vapour barrier at and around roof windows.

The target group of the thesis is craftsmen and project planners such as installers, engineers and architects working in the building and construction industry.

The thesis presents a four months' project process registering and measuring the moisture conditions at and around roof windows in a test rig installed in a climatic chamber at VELUX test centre in Østbirk, Denmark.

Besides analysing the moisture conditions based on data from the test rig, simulations of the hygrothermal conditions of a construction similar to the one of the test rig have been run in the program WUFI 2D.

While the test rig is based on static conditions only, the simulations in WUFI 2D have been run with both static and dynamic conditions.

The thesis begins with an examination of the related subjects within moisture theory and moisture measurements affecting the test rig and the related simulations.

Subsequently, the test rig including its construction is described, succeeded by a specification of the thermal and hygrothermal calculations made.

The results of the moisture conditions in the test rig – at static conditions and at a high interior relative humidity – prove a strong moisture accumulation at and around both window and rafter at the places without a tight vapour barrier connection.

The results of the hygrothermal calculations in WUFI 2D – at dynamic conditions – prove no critical moisture levels as regards the windows. However, for much of the year, the rafter construction suffers a water content in percentage by weight exceeding 20 % and is as a result exposed to dry rot and fungal decay.

To include the impact of solar radiation is significant to desiccation and reduction of the number of days with a critical moisture level in the rafter construction. This applies especially to a southwestern orientation, the period with a water content of above 20 % being more than halved.

The conclusion is that a tight vapour barrier at and around roof windows is vital to the hygrothermal conditions. An untight vapour barrier connection might cause considerable problems as to dry rot and decay.

## Indholdsfortegnelse

Resume.....	1
Summary .....	2
1. Indledning .....	5
2. Baggrund.....	6
2.1. Problemformulering.....	6
2.2. Afgrænsning.....	7
3. Fugtteori .....	8
3.1. Luftfugtighed.....	8
3.2. Fugt i materialer .....	11
3.3. Fugtligevægt.....	12
3.4. Kapillarsugning .....	15
3.5. Fugttransport.....	16
3.5.1. Vanddampdiffusion .....	16
3.5.2. Fugttransport ved konvektion .....	18
3.5.3. Kapillartransport .....	19
3.6. Kritisk fugtniveau i træ .....	19
4. Dampspærre.....	20
5. Fugtmåling i materialer.....	21
5.1. Måling af fugtindhold ved modstandsmåling.....	21
5.2. Elektrisk modstand i træ.....	22
6. Forsøgsopstilling .....	23
6.1. Indbyggede tagvinduer.....	23
6.2. Dampspærreindbygning .....	25
6.3. Følere.....	26
7. Simuleringer .....	30
7.1. Termiske simuleringer.....	30
7.2. Hygrotermiske simuleringer.....	31
8. Resultater.....	35
8.1. Termiske simuleringer.....	35
8.2. Fugtforhold i forsøgsopstilling.....	36
8.3. Hygrotermiske simuleringer.....	37
9. Diskussion.....	42
9.1. Forsøgsopstilling.....	42
9.2. Simuleringer.....	44

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

10.	Konklusion .....	48
11.	Litteraturliste .....	50

## 1. Indledning

En væsentlig del af skader og problemer, der forekommer inden for byggeri, skyldes fugt i en eller anden form. (Byggeskadefonden, 2014). For stor fugtbelastning i bygninger og bygningskonstruktioner fører hvert år til omfattende skader og økonomiske problemer, og der ses endvidere helbredsproblemer knyttet til fugt. (Sundhedsstyrelsen, 2006).

Dette har bl.a. medført, at der de seneste år har været sat øget fokus på fugtproblematikker ved projektering og udførelse af bygninger og bygningskonstruktioner, herunder på hvordan et indeklima med høj luftfugtighed kan påvirke bygningen.

Vandindholdet i den omgivende luft er en forudsætning for vores eksistens, men i for store mængder og på de forkerte steder, kan fugten afstedkomme betydelige problemer. Uønsket fugt kan være en medvirkende årsag til råd, korrosion, frostsprængninger og skimmel samt en lang række fænomener, der kan føre til kostbare og ubehagelige skader på bygninger og bygningskonstruktioner, samt have negative indvirkninger på indeklimaet.

Fugtforhold i bygningskonstruktioner og i bygningers indeklima, afhænger af de ude- og indefra kommende fugtpåvirkninger bygningen og bygningskonstruktionerne udsættes for. I bygningsmæssige sammenhænge, regnes normalt med fugtpåvirkninger i form af nedbør, byggefugt, grundfugt samt lækage fra installationer og i konstruktioner, samt fra den generelle luftfugtighed i inde- og udeklimaet.

En stor del af den indefra kommende fugtproduktion og dermed også niveauet af luftfugtigheden i bygninger vil normalt stamme fra de personer, der er til stede og fra de aktiviteter, der foregår. Fugtproduktionen og luftfugtigheden i bygninger vil variere meget fra rum til rum, og være afhængig af antal brugere, af deres aktiviteter og deres vaner, herunder hvor meget, og hvordan de ventilerer.

Fugtproduktion vil komme fra fordampning fra mennesker, dyr og planter, fra madlavning, tøjvask/tøjtørring, samt fra rengøring og badning. For at problemstillinger relateret til fugtbelastning bedst mulig undgås, og for at den relative luftfugtighed af hensyn til indeklimaet holdes på et fornuftigt niveau, stilles der en række krav til korrekt udførte bygningskonstruktioner, til ventilering, dampspærre og til valg af materialer.

Stor fugtbelastning i bygninger kombineret med en dårlig udført dampspærre kan være en direkte medvirkende årsag til bl.a. råd og skimmel i bygningskonstruktioner. I takt med at energiforbruget i bygninger ønskes reduceret, og at bygningerne som følge heraf gøres tættere, accentueres vigtigheden af en korrekt udført og ubeskadiget dampspærre. Denne problemstilling vil blive analyseret nærmere i denne rapport, hvor der kigges specifikt på fejl ved dampspærretilslutninger omkring tagvinduer og afledte konsekvenser af utætheder og defekter.

Undersøgelser og rapportering vil blive foretaget med fokus på et indeklima med høj relativ luftfugtighed, som primær kilde til fugtbelastning af tagkonstruktion og tilslutning omkring tagvinduer.

## 2. Baggrund

Dette kandidatspeciale er afslutningen på en 2 årig masteruddannelse i bygningsfysik hos SBI på Aalborg Universitet København.

Gennem tidligere uddannelse og nuværende stilling som bygningsingeniør, er jeg blevet bekendt med de mange udfordringer og komplikationer, der kan opstå i forbindelse med en utæt dampspærre, og har derfor i specialet valgt at fokusere på dette emne.

Faglitteratur og byggetekniske anbefalinger siger, at der generelt skal etableres en tæt dampspærre på den varme side af en tagkonstruktion.

Erfaringer fra VELUX har vist, at tilslutningen af dampspærren omkring tagvinduer stiller store krav til den udførende, og tit er behæftet med fejl og mangler.

Hvert år installeres og udskiftes der tusindvis af tagvinduer. Dette medfører at tagets klimaskærm gennembrydes, og der opstår dermed et behov for bl.a. at etablere, reparere eller udskifte dampspærren omkring tagvinduerne.

Dette kan udføres på mange forskellige måder, og kan grundet tagvinduernes placering og geometri, være ganske kompliceret at få tilstrækkeligt luft- og damptæt.

Dette projekt ønsker at kaste lys over og eksemplificere fugtophobning ved fejl i dampspærre installationen ved og omkring tagvinduer.

### 2.1. Problemformulering

Da det almindeligvis er vanskeligt at sikre en tæt dampspærre omkring et tagvindue, har VELUX udviklet en dampspærrekrave, der gør montagen lettere, således at der er større sikkerhed for tæthed.

I den aktuelle forsøgsopstilling er der brugt en sådan krave, men i det ene tilfælde er den perforeret.

De to opstillinger kommer dermed til at repræsentere indbygning med specialkrave (tæt dampspærre) og indbygning med mere almindelige midler, hvor det ikke er lykkedes at gøre dampspærren tæt.

På denne måde er det hensigten at belyse, om der reelt er behov for den store omhyggelighed ved dampspærretætning, som der hævdes i faglitteraturen, og om det kan afstedkomme fugtproblemer, såfremt dampspærren ikke er udført tilstrækkelig tæt.



## 2.2. Afgrænsning

Selvom problemstillingen med utæt dampspærre ved gennembrydninger af klimaskærm er af mere generel karakter, har jeg i specialet valgt at koncentrere mig om området omkring tagvinduer, da gennembrydninger af tagets klimaskærm anses for det mest følsomme sted pga. bl.a. termisk opdrift, samt at forholdene for korrekt installation af dampspærre grundet placering og udformning sammenlignet med f.eks. facadevinduer er mere vanskelig.

Af praktiske hensyn er der valgt at opbygge en forsøgsopstilling kun med tagvinduer, og teste på fugtforhold ved og omkring disse. Ved forsøgsopstillingen måles der udelukkende under statiske forhold.

Da specialet i meget høj grad baserer sig på laboratoriearbejde, vil der være dele af specialet, der kun er behandlet overordnet og ikke lige så detaljeret, som hvis det udelukkende var en teoretisk afhandling. Dette gør sig bl.a. gældende i afsnittet om fugtteori, hvori der kun er redegjort for teorien i det omfang, der er nødvendig for at forstå de forskellige fugtmekanismer, der spiller ind på forsøgsopstillingen.

Det er til gengæld prioriteret, at belyse ikke blot de statiske forhold i forsøgsopstillingen, men også foretage simuleringer af statiske og dynamiske forhold.

I projektet er der fokuseret på, om fugtniveauet er på et så højt niveau, at der kan opstå trænedbrydende svampe og råd i konstruktionerne. En lavere grænse kan være aktuel i forbindelse med skimmelsvampevækst, men behandles ikke, da de områder, der forventes opfugtet, sandsynligvis vil være så små, at skimmelvækst ikke vil påvirke indeklimaet.

### 3. Fugtteori

Dette afsnit beskriver og gennemgår de teoretiske områder og begreber inden for fugt, der er essentielle for at forstå de forhold, som der spiller ind, og kan have indvirkning på fugtindholdet i og omkring tagvinduer samt ved utætheder i dampspærre.

#### 3.1. Luftfugtighed

Når man taler om begrebet luftfugtighed, henviser man til hvor meget vanddamp luften indeholder. Der skelnes som udgangspunkt imellem den absolutte luftfugtighed og den relative luftfugtighed. Den absolutte luftfugtighed angiver massen af vanddamp i en given mængde luft, mens den relative luftfugtighed angiver forholdet i procent mellem den mængde vanddamp der er i luften ved en given temperatur, og den maksimale mængde vanddamp luften kan indeholde ved denne temperatur.

Luft indeholder fugt i form af vanddamp, og luftens evne til at optage og afgive fugt, er af hel grundlæggende betydning for behandling af fugtproblemer. Ifølge Brandt (2013), kan man ved normalt tryk og temperatur betragte vanddamp i luften som en idealgas, der kan udtrykkes gennem tilstandsligningen, og angiver at gassens tryk gange dens volumen er proportional med den absolutte temperatur:

$$\rho \cdot V = \frac{m}{M} \cdot RT \quad (1)$$

Her er  $\rho$  gastykket (Pa),  $V$  er volumen af gassen ( $\text{m}^3$ ),  $m$  er gassens masse (kg),  $M$  er gassens molære masse (kg/mol),  $R$  er gaskonstanten 8,314 (J/mol K), og  $T$  er den absolutte temperatur (K).

Indholdet af vanddamp i luften kan angives på forskellige måder:

- Vanddampens partialtryk  $\rho_v$  (Pa = N/m<sup>2</sup>) – angiver alene vanddampens tryk
- Vanddampkoncentrationen  $\nu$  (kg/m<sup>3</sup>) – også kaldet vanddampindholdet eller vanddampdensiteten
- Det absolutte vandindhold  $x$  (kg/kg) – også kaldet vanddampmasse eller fugtgraden

Ved at indsætte vands molære masse – 18,015 g/mol – i tilstandsligningen, kan man få sammenhængen mellem vanddampkoncentrationen og vanddampens partialtryk. Vanddampkoncentrationen  $\nu$ , er altså en funktion af vanddampens partialtryk  $\rho_v$  (Pa) og temperaturen  $T$  (K), og viser at vanddampkoncentrationen reduceres ved opvarmning. Dette kan udtrykkes ved ligningen:

$$\nu = \frac{\rho_v}{461,4 \cdot T} \quad (2)$$

hvor konstanten 461,4 har enheden (Pa\*m<sup>3</sup>/(kg\*K)). Udtrykket kan altså bruges til at beregne det partialtryk, som et specifikt vanddampindhold medfører eller omvendt.

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Det absolutte vandindhold  $x$  beskriver blandingsforholdet mellem luft i form af vanddamp og atmosfærisk luft. Sammenhængen mellem det absolutte vandindhold  $x$  og vanddampkoncentrationen  $v$  kan ved at anvende tilstandsligningen udtrykkes som:

$$x = \frac{m_v}{m_l} = 0,62198 \cdot \frac{\rho_v}{\rho_{tot} - \rho_v} = \frac{v}{\rho_l} \quad (3)$$

Her er  $\rho_l$  den tørre lufts massefylde ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $m_v$  er massen af vand (kg),  $m_l$  er massen af tør luft (kg), og  $\rho_{tot}$  er totaltrykket. (Geving og Thue, 2002)

Afhængig af temperatur vil der være en øvre grænse for hvor meget vanddamp luften kan indeholde. Denne grænse kaldes for mætningsindholdet eller mætningstrykket, såfremt der bruges partialtryk. Når temperaturen øges stiger mætningstrykket, og luften kan indeholde mere vanddamp.

Tabel 1 viser mætningstryk og mætningsindhold for vanddamp ved forskellige temperaturer. Forholdet mellem disse er empirisk bestemt, men der findes også forskellige formler, der forsøger at beskrive dette som en mere analytisk funktion af temperaturen, og gældende inden for et specifikt temperaturinterval.

Følgende formler kan bruges til at beregne en tilnærmet værdi for mætningsdamptrykket:

$$\rho_m = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269\theta}{237,3+\theta}} \text{ for } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (4)$$

$$\rho_m = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875\theta}{265,5+\theta}} \text{ for } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (5)$$

hvor  $\rho_m$  er vanddamps partialtryk ved mætning og  $\theta$  er temperaturen i  $^\circ\text{C}$ . Formlerne er ikke 100 % eksakte, men kan anvendes med god nøjagtighed i temperaturområdet fra 0 til 80  $^\circ\text{C}$ . (Brandt, 2013)

Tabel 1: Eksempler på mætningstryk og mætningsindhold ved forskellige temperaturer. (Brandt, 2013)

Temperatur $^\circ\text{C}$	Mætningstryk Pa	Mætningsindhold $\text{g}/\text{m}^3$
-20	104	0,89
-10	260	2,14
0	611	4,84
10	1228	9,40
20	2337	17,28
30	4240	30,33

Sammenhængen mellem overstående angives normalt også på et vanddampdiagram som vist på figur 1 og luftens fugtindhold beskrives normalt som den relative luftfugtighed (RF).

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Den relative luftfugtighed beskriver forholdet mellem den mængde vanddamp, der er i luften, og den maksimale mængde, der kan være ved samme temperatur:

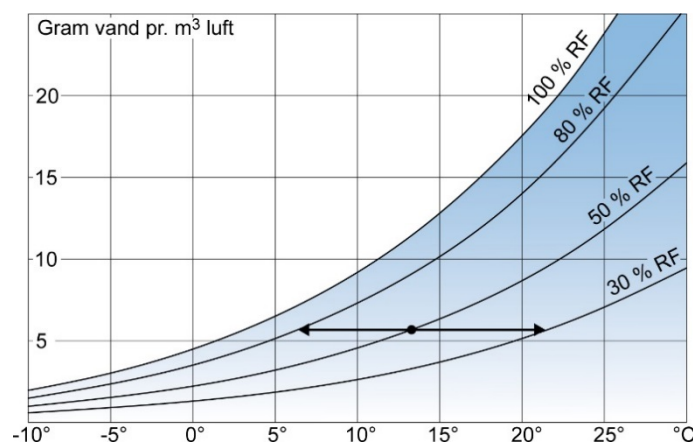
$$\phi = \frac{v}{v_{mæt}} = \frac{\rho}{\rho_{mæt}} \quad (6)$$

hvor  $v$  og  $\rho$  er henholdsvis den/det tilstedeværende vanddampkoncentration/vanddampptryk og  $v_{mæt}$  og  $\rho_{mæt}$  er den/det maksimalt mulige vanddampkoncentration/vanddampptryk ved mætning. (Brandt, 2013)

Den relative luftfugtighed angives typisk i procent:

$$RF = \phi * 100 \%$$

Når luft afkøles til en temperatur, hvor mætningstrykket er det samme som vanddampptrykket, rammer vi en RF på 100 %. Denne temperatur kaldes for luftens dugpunkttemperatur. Ved yderligere afkøling vil noget af luftens vanddamp udfældes som kondens, og i dugpunktet er det derfor givet, at luftens fugtindhold svarer til mætningsindholdet. For det meste angives vanddampindholdet som en relativ luftfugtighed, da det er lettere at måle, og det er endvidere den relative luftfugtighed, der bl.a. bestemmer byggematerialers evne til at optage vanddamp. Hvis der i stedet skal beregnes på fugttransport gennem byggematerialer, tages der udgangspunkt i det absolutte fugtindhold. Dette behandles senere.



Figur 1: Vanddampdiagram, der viser vanddampindholdet ved forskellige temperaturer og relative luftfugtigheder. (Brandt, 2013)

Vanddampdiagrammet på figur 1 giver et godt overblik over hvad der sker når luft enten afkøles eller opvarmes ved forskellige temperaturer. Hvis luft med en given temperatur og relativ luftfugtighed afkøles, vil den relative luftfugtighed stige, svarende til man bevæger sig til venstre i diagrammet. Omvendt vil den relative luftfugtighed falde, hvis luften opvarmes, svarende til man går mod højre i diagrammet. Begge scenarier er forudsat af, at der ikke tilføres yderligere vanddamp. Der er her angivet g vand per m<sup>3</sup> luft på x-aksen i stedet for vanddampptryk. En anden mulighed er at anvende mætningsdampptrykket, til at finde dugpunkttemperatur ved en given temperatur og relativ luftfugtighed.

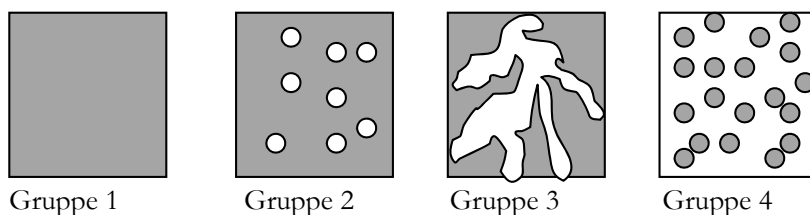
## 3.2. Fugt i materialer

Byggematerialer der kommer i kontakt med fugt på damp eller væskeform, vil kunne optage fugt. Dette er kun undtaget af materialer med helt lukkede porer som metaller og glas, hvor det ikke er muligt for vand at trænge ind i dem. De fleste byggematerialer i konstruktioner vil derfor altid indeholde en vis mængde fugt, der kan være blevet tilført under produktion, gennem kontakt med fugtig luft fra omgivelserne, eller fra direkte påvirkning fra nedbør og lækager. Det præcise fugtindhold i et materiale vil afhænge af materialetypen, poresystemets opbygning og egenskaber samt de fugtbindinger, der opstår.

Porernes størrelse, form og fordeling har stor betydning på et materiales fugtoptagelse og fugttransport. Porernes diameter kan variere fra flere millimeter ned til molekylær størrelse, hvor der i praksis regnes med en nedre værdi på 0,3 nm. Det er forholdsvis simpelt at bestemme volumen af porer i en materialeprøve, f.eks. ved lang tids neddykning i vand. På denne måde er det dog ikke sikkert at det totale volumen findes, men i stedet det aktuelle poreindhold, da der altid vil forekomme lukkede eller meget små porer, der ikke fyldes på denne måde. Rent fugtteknisk er disse porer dog heller ikke interessante, da de ikke kan fyldes med vand under normale omstændigheder. En dybere analyse af disse små porers størrelse og opbygning vil typisk være langt mere kompliceret, og kræve at der anvendes såkaldte suction metoder, hvor væske suges ud af porerne fra en mættet materialeprøve. (Geving og Thue, 2002)

Poresystemet kan defineres ud fra et materiales struktur og kategoriseres på følgende måde:

1. Materialer uden porer som metaller, glas og visse plasttyper, der derved ikke kan binde fugt. Disse materialer betegnes som ikke hygroscopiske.
2. Materialer, hvor det faste stof danner en kontinuerlig struktur og porerne danner en diskontinuerlig struktur. Her vil der altså kun i meget ringe omfang kunne ske fugttransport fra pore til pore. Eksempler på denne type materialer er celleglas, EPS og visse typer af letklinker som f.eks. coatede lecanødder.
3. Materialer hvor både det faste stof og poresystemet danner kontinuerlige strukturer. Denne gruppe dækker bl.a. over materialer som beton, letbeton, træ og tegl.
4. Materialer hvor det faste stof danner diskontinuerlige strukturer, men poresystemet kontinuerlige strukturer. Her hører materialer som mineraluld og sand hjemme.



Figur 2: Illustrationer af kategorisering og opdeling af poresystemer og materialestruktur. (Brandt, 2013)

Mens gruppe 1 betegnes som materialer, der er ikke hygroskopiske, kan alle materialer fra gruppe 2-4 binde fugt, og benævnes derfor som hygroskopiske.

Når der henvises til porernes størrelse, anvendes der ifølge Geving og Thue (2002), følgende gruppering:

- Makroporer: Porer med radius  $r > 0,1$  mm, dvs. synlige med det blotte øje.
- Mikroporer: Porer med radius  $100 \text{ nm} < r < 0,1\text{mm}$ , dvs. porer som kan ses i et almindeligt mikroskop.
- Submikroporer: Porer med radius  $r < 100 \text{ nm}$ , dvs. porer, som ikke kan ses med almindeligt mikroskop.

Porernes størrelse afgør, hvordan og hvor hurtigt et materiale opfugtes. Dette behandles nærmere senere under afsnit 3.4 kapillarsugning.

Et materiales porøsitet  $n$ , afgør hvor meget vand et materiale maksimalt kan indeholde, og angiver hvor stor en andel porevolumen udgør af det totale volumen. Porøsiteten defineres som:

$$n = 1 - \frac{\rho_{tør}}{\rho_{fast}} \quad (7)$$

hvor  $\rho_{tør}$  angiver materialets densitet i tør tilstand, og  $\rho_{fast}$  angiver densiteten af det faste stof uden porer.

Porøsiteten  $n$  har en værdi mellem 0 og 1 og kan angives i en procentværdi mellem 0 og 100.

### 3.3. Fugtligevægt

Når et hygroskopisk materiale anvendes, vil fugtindholdet i materialet over en periode tilpasse sig den relative luftfugtighed, der er tilstede i den omgivende luft.

Såfremt materialet fra start af er tørt og RF langsomt øges, vil der ske en vægtændring af materialet, som i starten går stærkt, men efterhånden mere langsomt. På et tidspunkt vil damptrykket i materialets porer være det samme som i luften omkring, og der sker ikke længere nogen vægtændring.

Når dette sker, har materialet nået sin fugtligevægt. Såfremt den relative luftfugtighed ændres, vil der gå et stykke tid før der opnås en ny fugtligevægt. Afhængig af materiale kan der gå fra uger til måneder, før den endelige fugtligevægt er opnået.

Træ vil sammenlignet med f.eks. mursten, indeholde mere vand ved en given relativ luftfugtighed, da træ både har mange grove og fine porer, mens mursten overvejende består af grove porer.

De mange fine porer i træ giver samlet set en meget stor overflade, som fugten kan bindes til. Træ kan afhængig af densitet have en specifik overflade af porer svarende til ca.  $30.000\text{m}^2/\text{kg}$ . (Brandt, 2013)

Fugtligevægt af materialer kan afbildes ved en sorptionskurve, der viser forholdet mellem den relative luftfugtighed og materialets fugtligevægt. Såfremt temperaturen ændres, vil sorptionskurven rykke sig en lille smule og lægge sig enten lidt højere eller lavere.

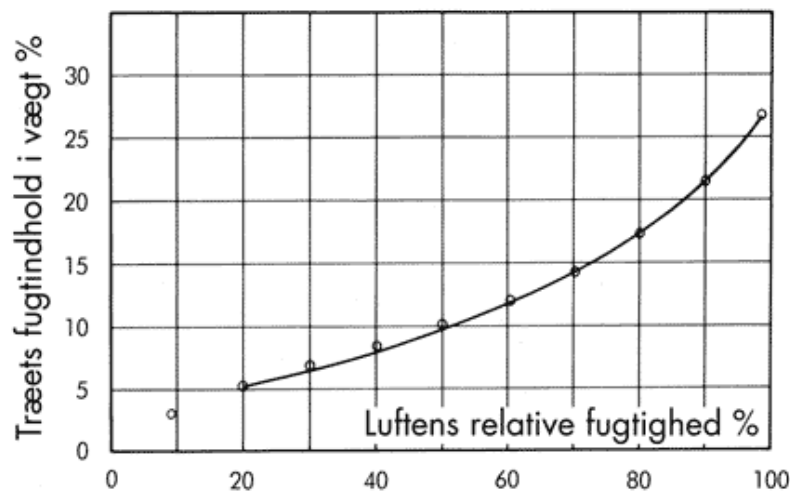
## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Temperaturer i området (-20-+30 °C) hvor sædvanlige bygningsfysiske vurderinger foregår, vurderes dog ikke at have en nævneværdig betydning og kan derfor ofte negligeres.

Ved en meget høj relativ luftfugtighed vil fugtindholdet i et materiale typisk stige meget kraftigt, og teoretisk set vil alle porer kunne blive fyldt. I praksis vælger man dog typisk at definere sorptionskurven op til ca. 98 % RF, som den øverste hygroskopiske grænse. (Geving og Thue, 2002)

Afhængig af materialets densitet og poreopbygning, kan der være store forskelle på den aktuelle sorptionskurve, og det er derfor vigtigt at anvende en retvisende kurve for det specifikke materiale, også inden for samme materialetype.

Sorptionskurver bestemmes som udgangspunkt eksperimentalt og afbildes som på figur 3, der viser forløbet for fyrretræ ved 20 °C.



Figur 3: Sorptionskurve for fyrretræ ved 20 °C, der viser fugtindholdet i vægtprocent afhængig af luftens relative luftfugtighed. (Phonix, 2014)

Hældningen på en sorptionskurve angiver, hvilken fugtkapacitet et materiale har, og fortæller hvor stor en ændring, der sker af fugtindholdet, når den relative luftfugtighed ændres. Med en høj fugtkapacitet kan et materiale optage/afgive en stor fugtmængde ved en øgning/mindskning af den relative luftfugtighed.

Fugtkapaciteten for gængse materialer er størst ved enten lave eller meget høje værdier af relativ luftfugtighed, hvilket også ses på sorptionskurver, der er mest stejle ved disse områder.

Træ sammenlignet med f.eks. tegl, har en langt større fugtkapacitet, og har derfor evnen til at optage eller afgive store mængder fugt ved en ændring af den relative luftfugtighed. (Brandt, 2013)

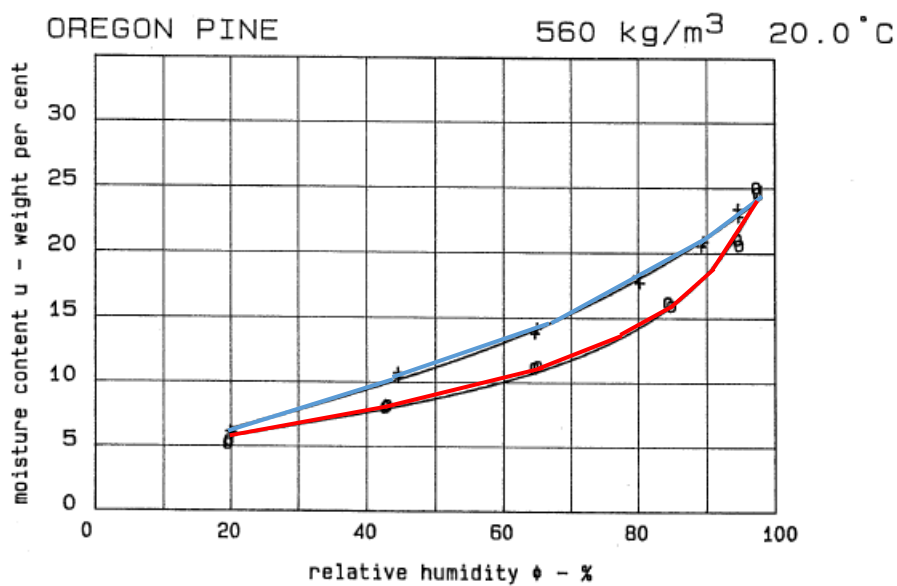
## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Når man undersøger et materiales fugtligevægt ved stigende relativ luftfugtighed, og derefter ændrer processen ved at sænke den relative luftfugtighed, viser resultaterne, at der sker afvigelse eller at udvises såkaldt hysteres.

Dette illustreres ved hjælp af absorptionskurver og desorptionskurver som illustreret på figur 4, der henholdsvis viser opfugtning og udtørring af fyrretræ.

Størrelsen på hysteresen varierer fra materiale til materialer, og er endvidere afhængig af materialets porestruktur.

Ved den samme relative luftfugtighed vil et givent materiale indeholde mere fugt ved udtørring sammenlignet med opfugtning. I praksis ses der dog normalt bort fra denne forskel, og der anvendes i stedet sorptionskurven, der regnes som en middelværdi.



Figur 4: Forskel mellem desorption afbildet med blåt og absorption afbildet med rødt for fyrretræ ved  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . (Hansen, 1986)



### 3.4. Kapillarsugning

Kapillarsugning er i sig selv ikke en proces der betyder noget for hvordan den fugtige indeluft vil kunne påvirke tagvinduer eller de omkringliggende konstruktioner, men det spiller en vis rolle for, hvordan fugt vil kunne sprede sig i de områder, der kommer i kontakt med fugtige overflader og materialer.

Hvis man tager de fleste porøse materialer bortset fra f.eks. coatede lecanødder, og bringer i kontakt med vand, vil der ske en fugtoptagelse ved kapillarsugning. Såfremt vandtilførslen ikke afbrydes, vil der ske en opugning indtil materialet når et fugtindhold, der svarer til en kapillar mætning.

Selve kapillarsugningen skyldes kohæisionskræfter (sammenhængskraft) mellem de forskellige vandmolekyler og adhæisionskræfter (vedhæftningskraft) mellem vandet og det givne materiale. Geving og Thue, (2002) har beskrevet hvilke mekanismer der har betydning for kapillarsugning, og nedenstående afsnit er en kort gengivelse heraf.

Kohæisionskræfterne mellem de forskellige vandmolekyler resulterer i, at der på vandoverfladen opstår en overfladespænding,  $\sigma$ , som der typisk sammenlignes med en hinde på overfladen. Analogt med dette vil vand, der kommer i kontakt med et materiale i fast form, lægge sig på dets overflade og her danne en vinkel,  $\alpha$ , med overfladen. Denne vinkel kaldes kontaktvinklen og er afhængig af den vedhæftningskraft, der er mellem materialet og vandet.

For gængse byggematerialer er kontaktvinklen meget lille og tæt på 0. Vedhæftningskraften mellem vand og et materiale, er altså afgørende for kontaktvinklen og hvordan vandet lægger sig på overfladen. For byggematerialer hvor kontaktvinklen er meget lille, vil vanddråber lægge sig som flade dråber og opfugte materialets porer mere, sammenlignet med en overflade der f.eks. er behandlet med en vandafvisende belægning, der medfører en stor kontaktvinkel mellem vand og materiale, og derfor bryder adhæisionskræfterne.

Så længe adhæisionskræfterne mellem et materiale og vand er store nok, og kontaktvinklen er mindre end  $90^\circ$ , vil der opstå en sugkraft i poresystemet, grundet de overfladespændinger der opstår. Dette gør at vandet kan blive suget ind i materialets porer. Kraften for en cirkulær pore kan beregnes som:

$$p = \frac{2 \cdot \sigma}{r} \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

hvor  $r$  svarer til porens radius.

En anden måde at beskrive et materiales kapillare egenskaber på, er ud fra dets kapillare stighøjde. Den kapillare stighøjde,  $h$ , kan beregnes som:

$$h = \frac{2 \cdot \sigma}{r \cdot \rho_v \cdot g} \cdot \cos \alpha \quad (9)$$

hvor,  $\rho_v$  er vandets densitet og  $g$  er tyngdeaccelerationen. Ud fra formlen kan det ses, at den kapillare stighøjde vokser des mindre porediameter, og betyder at materialer med små porestrukturer har større stighøjde sammenlignet med materialer med større porer.

### 3.5. Fugttransport

Transport af fugt kan ske på mange forskellige måder og med hver sin tilhørende type af drivkraft. De væsentlige former for fugttransport i tilknytning til bygningskonstruktioner, er vanddampdiffusion, kapillartransport og konvektion. Disse transportformer er tilknyttet forskellige drivkræfter (potentialer), som angivet i tabel 2.

Tabel 2: Oversigt over forskellige fugttransportformer

Transportformer		Drivkraft
Transport af vanddamp	Vanddampdiffusion	Forskelle i damptryk
	Konvektion	Forskelle i luftens totaltryk
Transport af væske	Kapillartransport	Forskelle i poretryk

#### 3.5.1. Vanddampdiffusion

Transport af vanddamp sker altså enten ved vanddampdiffusion eller ved fugtkonvektion. Ved vanddampdiffusion sker der en transport af fugt fra et højere til et lavere vanddamptryk/vanddampindhold, hvilket kan udtrykkes som Ficks 1. lov for diffusion, når der ses bort fra temperaturforskelle:

$$g = -D_p \cdot \nabla p_v = -D_v \cdot \nabla v \quad (10)$$

hvor  $g$  er dampfluksen, diffunderet dampmængde per tid ( $\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$ ),  $D_p$  er vanddampens diffusionstal i luft baseret på damptryk ( $\text{kg}/\text{msPa}$ ),  $\nabla p_v$  er gradienten i vanddampens partialtryk ( $\text{Pa}/\text{m}$ ),  $D_v$  er vanddampens diffusionstal i luft baseret på vanddampkoncentrationen ( $\text{m}^2/\text{s}$ ) og  $\nabla v$  er gradienten i vanddampkoncentration ( $\text{kg}/\text{m}^4$ ).  $D_v$  kan ligeledes udtrykkes som:

$$D_v = D_p \cdot R_v \cdot T \quad (11)$$

hvor  $R_v$  er gaskonstanten for vanddamp =  $461,4 \text{ Nm}/\text{kgK}$  og  $T$  er den absolutte temperatur (K).

Ved  $20^\circ \text{ C}$  og normalt lufttryk ( $101325 \text{ Pa}$ ) har  $D_p$  en værdi på ca.  $20 \cdot 10^{-11} \text{ kg}/(\text{msPa})$  og  $D_v$  en værdi på ca.  $26 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ . (Geving og Thue, 2002)

Dette betyder, at ved en konstant temperatur vil dampstrømmen afhænge af vanddampens diffusionstal og ændring i vanddamptryk eller koncentration per længdeenhed.

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Minustegnet foran  $D_p$  betegner blot, at dampstrømmen går fra høj mod lav koncentration/partialtryk. Såfremt der ikke er tale om isoterme forhold, vil det have en ubetydelig indvirkning, og inden for bygningskonstruktioner og normale forhold, kan vanddampkoncentrationen derfor anvendes med rimelig eksakthed.

Udover vanddampdiffusion i luft, vil der også kunne optræde vanddampdiffusion i et materiale, såfremt det er porøst. Hvis et tørt og porøst materiale placeres i fugtige omgivelser, vil vanddamp diffundere ind i materialets porer, og vil med tiden betyde at vanddampkoncentrationen i porerne bliver den samme som i omgivelserne. Fugtindholdet i materialet vil altså komme i ligevægt med den omkringliggende luft. Hvis materialet som udgangspunkt indeholder mere fugt, end hvad der svarer til ligevægt med omgivelserne, vil der ske en modsatrettet diffusion af vanddamp, der nu vil bevæge sig ud af materialet.

Når vanddamp trænger ind i et porøst materiale, vil diffusionstallet blive reduceret, fordi mængden af luft bliver mindre og dampmolekylerne ikke længere kan bevæge sig uhindret. For materialer med relativ grove porer (poreradius større end  $10^{-6}$  m) vil diffusion minde meget om den i luften, og reduktionen vil derfor være lille, da der endnu vil være mulighed for plads til ”store” bevægelser uden at der vil ske sammenstød med porevæggene. De ”store” bevægelser skal ses i sammenhæng til dampmolekylernes frie middelvejlængde, som svarer til den længde et molekyle i gennemsnit bruger mellem to sammenstød.

Den frie middelvejlængde er ca.  $40 \cdot 10^{-9}$  m. For mindre og finere porer vil situationen være anderledes, og der er her større risiko for, at molekylerne rammer porevæggene, fremfor der sker sammenstød imellem dem og andre molekyler. (Gevind og Thue, 2012)

Ficks 1. lov kan også bruges for vanddamptransport i materialer ved hjælp af den dimensionsløse faktor  $\mu$ , der kaldes vanddampdiffusionstallet. Ved anvendelse af  $\mu$  kan nedenstående formel opskrives:

$$\delta_p = \frac{D_p}{\mu} \quad (12)$$

hvor  $\delta_p$  kaldes for diffusionstallet eller vanddamppermeabiliteten (kg/(msPa)).

Dette muliggør, at der kan opskrives et udtryk for fugttransporten  $g$  (kg/(m<sup>2</sup>s)) under isoterme forhold og ved endimensionel strømninger:

$$g = -\delta_v \cdot \frac{dv}{dx} = -\delta_p \cdot \frac{dp_v}{dx} \quad (13)$$

hvor  $\delta$  er materialets vanddamppermeabilitet,  $\delta_v = \delta_p \cdot (R_v \cdot T)$  (m<sup>2</sup>/s) og relateret til koncentrationsgradienten,  $\delta_p = (\text{kg}/(\text{msPa}))$  og relateret til vanddamppræksgradienten og  $x$  er tykkelsen af materialet i (m).

Vanddamppermeabiliteten i et materiale, er derfor defineret som forholdet mellem vanddampstrømmen per fladeenhed (vanddampfluxen) og størrelsen af koncentrations- eller damptryksgradienten i strømningsretningen.

Til beregning af vanddamptransport i bygningskonstruktioner med materialer med faste tykkelser, anvendes normalt dampdiffusionsmodstanden, der ofte går under betegnelsen  $Z$ -værdien, der er defineret som:

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \left( \frac{gPa \cdot s \cdot m^2}{kg} \right) \quad (14)$$

hvor  $d$  er tykkelsen af materialet i strømningsretningen. (Geving og Thue, 2012)

### 3.5.2. Fugttransport ved konvektion

Fugttransport ved konvektion indebærer, at vanddamp transporteres via luften fra et højere lufttryk til et lavere lufttryk. Dette kan i visse situationer betyde, at når der bliver transporteret store mængder luft, kan der også blive transporteret store mængder vanddamp.

I luftfyldte spalter og hulrum isoleret med diffusionsåbne materialer kan der forekomme naturlig konvektion, hvilket kan have indflydelse på selve fugtkoncentrationen, og hvorhenne fugten vil være repræsenteret i den specifikke konstruktion. (Gevind og Thue, 2012)

I en bygning kan forskelle i rumtemperatur medvirke til en luftstrømning mellem de forskellige rum. Dette kan betyde, at varm og fugtig luft kan strømme ind i køligere rum, som f.eks. typisk soveværelse eller loftrum, og her resultere i kondens. De største former for luftstrømninger kan opstå, når der sker en forskel i luftens totaltryk henover en bygningsdel. Dette betegnes også som tvungen konvektion.

Når der ses på bygningskonstruktioner, vil fugtkonvektion forekomme i huller, spalter og porøse materialer, og for at kunne bestemme fugttransporten, skal man kende selve luftstrømmen. Mængden af luft der strømmer igennem et porøst materiale på grund af lufttrykdifferens, kan ifølge Brandt (2013) udregnes med Darcys lov:

$$L = -A \cdot \frac{B_o}{\eta} \cdot \frac{dp_t}{dx} = -A \cdot k_a \cdot \frac{dp_t}{dx} \quad (15)$$

hvor  $L$  er luftmængden ( $m^3/s$ ),  $A$  er arealet vinkelret på strømningsretningen ( $m^2$ ),  $B_o$  er den specifikke permeabilitet ( $m^2$ ),  $\eta$  er luftens dynamiske viskositet (svarende til  $18,1 \cdot 10^{-6}$  Pa s ved  $20^\circ$  C),  $\frac{dp_t}{dx}$  er den totale trykgradient (Pa/m), og  $k_a$  svarer til materialets luftgennemtrængelighed ( $m^2/(Pa \cdot s)$ ).

Luftmængden er derfor proportional afhængig af lufttrykket henover en given konstruktion, det specifikke areal og materialets luftgennemtrængelighed. Minustegnet foran arealet illustrerer at luftstrømmen bevæger sig fra højt til lavt tryk.

(15) gælder kun for en laminar strømning. Såfremt luftmængden skal kendes for ikke laminare strømninger, kan dette beregnes ved hjælp af tilnærmede formler, der primært afhænger af de geometriske forhold for de specifikke sprækker, huller, revner etc.

Når luftmængden  $L$  og luftens vanddampindhold  $v$  kendes, er det muligt at udregne fugtmængden  $G$  (kg/s), som der transporteres gennem enten et materiale eller en konstruktion:

$$G = L \cdot v \quad (16)$$

### 3.5.3. Kapillartransport

Ved kapillartransport sker der en vandtransport i et materialets vandfyldte porer, grundet forskelle i poretryk. Materialets porer vil danne et sammenhængende system, hvor i vandet vil kunne blive transporteret.

Denne form for fugttransport vurderes som mindre relevant for projektet, og der vil derfor ikke gås yderligere i dybden med dette emne og teori.

Kapillartransport vil i dette projekt hovedsagelig optræde fugtfordelende, således at fra områder, der opfugtes af andre grunde end kapillartransport, vil fugt kunne transporteres kapillært videre ind i konstruktionen, således at et større område opfugtes, end blot der hvor skaden befinder sig.

Der henvises til afsnit om kapillarsugning under fugtteori for yderligere.

## 3.6. Kritisk fugtniveau i træ

Træets egenskaber påvirkes og afhænger i høj grad af dets vandindhold. Såfremt træets vandindhold overstiger fibermætningspunktet, er der stor risiko for, at det angribes af råd eller trænedbrydende svampe.

Det kritiske fugtindhold for træ ligger normalt på (Brandt, 2013):

- 20 vægt-% ved nyangreb, hvilket svarer til ligevægt med luft med ca. 87 % RF
- 15 vægt-% i tidligere angrebet træ, hvilket svarer til ligevægt med luft med ca. 73 % RF

Når træfugtigheden aftager til niveauer under de opgivne værdier, nedsættes en eventuel nedbrydning og ophører herefter. Sker det meget langsomt, kan mange svampearter dog overgå i en dvaletilstand og overleve i kortere eller længere tid, nogle gange i op til flere år i træ med kun 7-8 vægt-% fugtindhold.

Udover vandindholdet vil temperaturer ligeledes spille en rolle for en eventuel nedbrydning af træet. Generelt sker nedbrydning hurtigst mellem 20 °C og 35 °C. Ved lavere temperaturer hæmmes væksten og de nedbrydende mekanismer går langsommere. Når temperaturer nærmer sig 0 °C går eventuelle trænedbrydende svampe i dvale, men de dør ikke. (www.træ.dk)

## 4. Dampspærre

En dampspærre har flere forskellige formål i et byggeri. Den skal sammen med vindspærren forhindre, at der opstår generende træk og unødigt varmetab grundet utætheder. En anden meget vigtig funktion er at forhindre, at den varme og fugtige indeluft trænger ud i de omgivne konstruktioner. Såfremt dette sker, vil den under gunstige forhold og perioder kunne kondensere, med risiko for råd og svamp.

Lufttætheden af dampspærren og dens samlinger er derfor den vigtigste funktion, og betyder i praksis at det er meget vigtigt, at samlinger og gennemføringer udføres med stort omhu. Som udgangspunkt bør dampspærren udføres med så få samlinger som muligt, og samles på fast underlag med overlæg på minimum 50 mm, der klæbes eksempelvis med en godkendt tape eller fugemateriale. Herudover kan den klæbede samling også klemmes. (BYG ERFA, 2015)

Udover krav til lufttæthed, skal dampspærren være diffusionstæt og have Z-værdi på minimum 50 GPa m<sup>2</sup> s/kg. Generelt bør den samlede vanddampdiffusionstæthed på den varme side af konstruktionen, være mindst 10 gange større end den samlede vanddampdiffusionstæthed på den kolde side. (Brandt, 2013)

Lufttætheden har større betydning end vanddampdiffusionstætheden, da der under normale omstændigheder kan transporteres langt mere fugt ved konvektion sammenlignet med diffusion. Det betyder, at huller i dampspærren har større betydning, end hvor stor dampspærrens diffusionsmodstand er.

Dampspærre der anvendes i de fleste bygningskonstruktioner består typisk af en polyethylenfolie (PE), der kan fås i forskellige tykkelser fra 0,05 mm til 0,20 mm og med forskellige materiale karakteristika. Det anbefales, at der bruges en tykkelse på minimum 0,2 mm, da en tykkere folie er stærkere og ikke beskadiges så let ved montering. (Brandt, 2013)

Ved at anvende en CE-mærket dampspærre i henhold til DS/EN 13984 (Dansk Standard, 2013), er man sikker på at producenten har skulle tage stilling de krævende egenskaber, og man har derved mulighed for at tjekke dokumentationen og produktets performance inden brug. Det kan være en fordel at anvende dampspærresystemer, hvor man har testet at de forskellige komponenter fungerer sammen, og er sikker på at dampspærren og tape/klæber kan arbejde sammen og f.eks. ikke opløser hinanden.

Dampspærren skal placeres på den varme side af bygningskonstruktionen, hvilket i boliger vil sige så tæt som muligt på de opvarmede rum. Det anbefales dog, at montere den et stykke inde i isoleringsmaterialet, da det herved er muligt at føre diverse installationer uden at gennembryde dampspærren, og derved mindske andelen af potentielle utætheder. Dampspærren må højst placeres 1/3 inde i isoleringsmaterialet regnet fra den varme side af konstruktionen. (BYG ERFA, 2015)

## 5. Fugtmåling i materialer

Overordnet set kan man måle fugt i materialer på 2 forskellige måder:

- Måling af absolut fugtindhold i vægt eller volumen procent
- Måling af relativ luftfugtighed (RF) i materialets porer

Hvilken metode der bedst anvendes, vil afhænge af formålet og hvad der ønskes vurderet. Såfremt der som i specialet ønskes undersøgt risiko for råd i træet, anvendes et opgivet kritisk fugtniveau for det specifikke materiale opgivet i vægtprocent, og man måler derfor på det absolutte fugtindhold i materialet.

Ved vurdering af andre parametre som f.eks. risiko for skimmelvækst, måler man typisk den relative luftfugtighed, da det kritiske fugtniveau normalt er opgivet i RF (%). Når der måles en relativ luftfugtighed, skal det altid kombineres med en temperaturmåling, da man på den måde også får et tal for luftens totale fugtindhold.

Alle former for fugtmålinger er forbundet med forskellige fejlkilder, og de endelige resultater vil derfor altid være behæftet med en vis form for usikkerhed. Fejlkilder og usikkerheder ved fugtmålinger i materialer kan f.eks. være:

- Mangelfuld kalibrering af instrumenter
- Fejl og mangler ved udstyret
- Fejl og mangler ved måleprocedure
- Påvirkning af måleobjekt og måleudstyr fra omgivelserne som fra eksempelvis temperatur og luftfugtighed
- Målepunkter der ikke er repræsentative
- Mangel på ekspertise fra den udførende

Til dette projekt bestemmes fugtindholdet i de forskellige trækonstruktioner ved hjælp af elektrisk modstandsmåling, der herefter muliggør en beregning af det absolutte fugtindhold. Teorien bag dette beskrives nærmere i afsnit 5.1.

### 5.1. Måling af fugtindhold ved modstandsmåling

Elektrisk modstandsmåling baserer sig på princippet, at den elektriske modstand i et givent materiale afhænger af fugtindholdet. Des højere fugtindhold des bedre evne til at lede strømmen, og derved en mindre modstand. Modstanden måles mellem to elektroder, og kan herefter ved hjælp af en kalibreringskurve eller -formel gældende for det aktuelle materiale og temperatur, omregnes til det specifikke fugtindhold. (Geving og Thue, 2002)

Det findes mange forskellige elektriske modstandsmålere. Typisk er de kalibreret for flere forskellige materialer og enten bestående af isolerede eller ikke isolerede elektroder, sådan som det fx ses ved indstiksmålere.

Når der anvendes ikke isolerede elektroder til at måle fugtindholdet i et givent materiale, vil målingen afspejle det højeste fugtindhold mellem elektroderne.

Dette betyder, at hvis overfladen af materialet er fugtig, men det indre tørt, vil målingen vise fugtindholdet for overfladen, og derfor ikke det retvisende tal for fugtniveauet inde i materialet. For at måle fugtindholdet i specifikke dybder i et materiale, skal der i stedet anvendes isolerede elektroder, der kun lige er uisolerede på den yderste spids.

Yderligere detaljer om den specifikke metode der anvendes til projektet, beskrives i afsnit 6 om forsøgsopstilling.

## 5.2. Elektrisk modstand i træ

Den elektriske modstand i træ er udover fugtindholdet afhængig af trætype, trætemperatur, indhold af salte, og om der måles i kerneveddet eller i splintveddet. Generelt gælder der, at hvis der kompenseres for trætype og trætemperatur, fås en god indikation af fugtindholdet i træet.

Måleområdet for fyr og gran, der er de mest anvendte trætyper til bl.a. spær og vindueskonstruktioner, ligger typisk i måleområdet mellem 7-27 vægtprocent. Såfremt der måles højere, er det et udtryk for, at området er helt opfugtet, og at træet har opnået sit fibermætningspunkt. (Geving og Thue, 2002)

Forholdet mellem elektrisk modstand og fugtindhold i fyrretræ, kan beskrives ved hjælp af følgende eksponentialfunktion, der muliggør beregning af den specifikke vægtprocent:

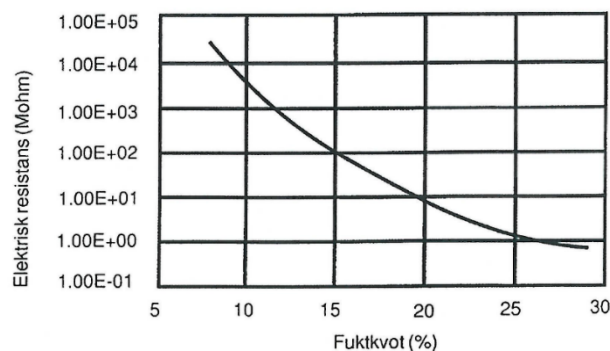
$$F = \frac{1,055 - \log(\log R + 1)}{0,040} \quad (17)$$

hvor  $R$  er modstanden i Mohm og  $F$  er fugtindholdet i vægtprocent.

Da den elektriske modstand i træ falder ved øget temperatur, gælder ligning 18 for denne temperatur korrektion:

$$F_k = \frac{F + 0,567 - 0,026(T + 2,8) + 0,000051(T + 2,8)^2}{0,881 \cdot 1,0056^{(T + 2,8)}} \quad (18)$$

hvor  $F_k$  er det korrigerede fugtindhold i vægtprocent,  $F$  er det beregnede fugtindhold i vægtprocent uden hensyntagen til temperatur og  $T$  er trætemperaturen i (C°). (Geving og Thue, 2002)



Figur 5: Generel sammenhæng mellem elektrisk modstand i Mohm og fugtindhold vægtprocent. (SP, 2013)



## 6. Forsøgsopstilling

Formålet med forsøgsopstillingen er at afspejle en opbygning af en virkelig tagkonstruktion indvendigt som udvendigt med 2 indbyggede tagvinduer. Især grundet tagvinduernes placering i taget og grundet deres gennembrydning af klimaskærmen, ses der typisk store udfordringer med at etablere en tæt dampspærre. Dette gælder især ved hjørner og samlinger af dampspærren langs vinduernes not, lysninger og indvendige vægge, hvor det kan være vanskeligt, at få sikret helt tætte samlinger.

Ved forsøgsopstillingen er der optimale installations forhold tilstede, hvilket muliggør korrekte indbygninger af alle de forskellige komponenter der indgår i tagkonstruktionen, især med fokus på tagvinduene, dampspærren og de mange tilslutninger og samlinger.

Disse forhold gør ligeledes, at det er muligt at påføre kontrollerede perforeringer af dampspærren på udvalgte steder, samt at installere fugtfølere i og omkring tagvinduene, og derved undersøge de forskellige fugtforhold for et tagvindue indbygget med en utæt dampspærre, sammenlignet med et tagvindue indbygget med en tæt dampspærre.

Der er til forsøget ikke tale om en standard opstilling fra laboratoriet, men en forsøgsopstilling der er opbygget fra bunden af, og specifikt til undersøgelser af fugtforhold i forbindelse med dette speciale.

### 6.1. Indbyggede tagvinduer

Forsøget tager udgangspunkt i en tagkonstruktion med to tagvinduer i hvidmalet fyrretræ. Tagkonstruktionen er 3,3 meter med en taghældning på 45°, og opbygget bestående af nedenstående materialer og dimensioner:

- Røde vingetegl
- Taglægter 38\*73 mm
- Afstandslistor 25\*50 mm
- Diffusionsåbent undertag
- Spær 45\*245 mm
- 245 mm Rockwool
- 25\*100 høvlet forskalling
- 0,2 mm dampspærre PE-folie, Z-værdi 450 GPa m<sup>2</sup> s/kg

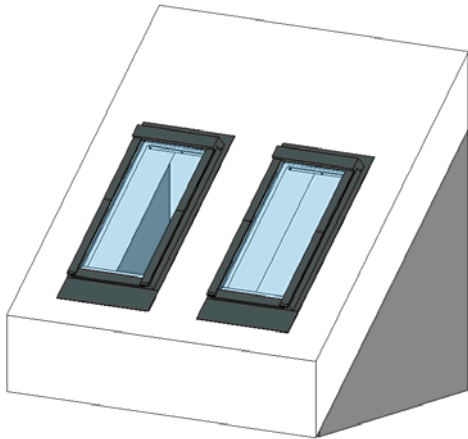
Se bilag 1 for detaljerede snittegninger af tagkonstruktion med indbygget top- bund- og sidesnit af vindue.

Tagkonstruktionen er placeret i et klimakammer, hvor det er muligt at kontrollere og monitorere både inde- og udeklima i form af temperatur, fugt og trykforskel. I klimakammeret sikres der ved konstant måling af trykforskel mellem inde- og udeklima, at der er overtryk på den varme side af konstruktionen.

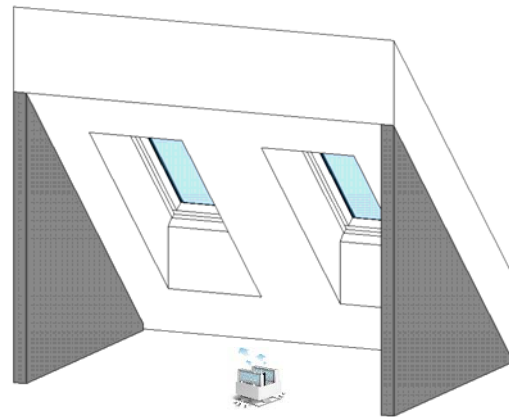
## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

På denne måde er man sikker på at der vil ske konvektion fra indeklima mod udeklima, samtidig befugtes indeklimaet, så der også sker fugttransport mod udeklimaet ved diffusion. Der henvises til bilag 8 for registrering af trykforskel mellem inde- og udeklima.

Inde og udetemperatur i forsøgsopstillingen reguleres henholdsvis ved gulvvarme og køleanlæg, mens fugtbelastningen reguleres ved hjælp af en befugter, opstillet på den varme side af konstruktionen midt mellem de to vinduer.



Figur 6: Model skitse af forsøgsopstilling set udefra



Figur 7: Model skitse af forsøgsopstilling set indefra med befugter til regulering af RF inde og uden afbildning af bagvæg. Opstilling er tætnet mod klimakammerets vægge og gulv.

Forsøget startes med følgende klimatiske parametre:

- Indetemperatur 22 °C
- Relativ luftfugtighed indendørs 70 %
- Udetemperatur -5 °C
- Relativ luftfugtighed udendørs styres ikke
- Start fugtindhold i vinduer og spær målt med indstiksmåler til mellem 10-13,5 vægt-%

Længden på forsøget er ikke fastlagt, men afhænger af hvornår de anbragte elektriske følere placeret i vinduer og spær giver målbare udslag. Hvis det er muligt og såfremt tiden tillader det, planlægges det at udtørre forsøgsopstillingen og starte igen med en indvendig fugtbelastning svarende til 55 % relativ luftfugtighed.

Den relative luftfugtighed er fra start sat højt, for hurtigst muligt at accelerere en eventuel fugtophobning. Der henvises til bilag 7 for overvågning af indeklima i klimakammer.

## 6.2. Dampspærreindbygning

På den indvendige side af tagkonstruktionen monteres og tapes der dampspærre af 0,2 mm PE-folie med 50 mm overlæg på fast underlag i form af forskalling. Der anvendes dampspærretape af fabrikatet RAW.

Ved vinduer og lysninger anvendes en speciel dampspærrekrave fra VELUX i lignende PE-folie, som passer i mål til vinduesstørrelsen, og som er fabrikeret specifikt til dette formål. Dampspærrekraven kræver ikke nogen form for tilskæring og har en pakning for enden, der gør at den kan monteres og slutte tæt i vinduesnoten på tagvinduerne. Pakningen for enden af dampspærrekraven består af en plastkrave, der passer i mål til vinduesnoten. Pakningen sikrer i sig selv en tæt samling, men fastgøres også med skruer, som der er lavet huller til. For detaljer henvises til bilag 2.

Opsætningen af dampspærren udføres så omhyggeligt som muligt, og med stor fokus på at tætne de forskellige tilslutninger og samlinger mellem dampspærrekraven fra VELUX, dampspærren på de indvendige vægge samt til klimakammerets tilstødende vægge, gulv og loft.

Billede 1 viser det ene vindue inden færdig indvendig montering og samling mellem væggen dampspærre og dampspærrekraven fra VELUX, som der anvendes hele vejen rundt i lysningen. Samlingen mellem de to dampspærre fastgøres og tapes som beskrevet på fast underlag i form af høvlede brædder med et overlæg på minimum 50 mm. Der er valgt høvlede brædder frem for almindelig forskalling, så der bedst muligt sikres en plan overflade at fastgøre dampspærren på.

Billede 2 viser den færdige indvendige overflade og de tapede samlinger mellem dampspærrekraven monteret i lysningen og dampspærren anvendt til de indvendige vægge. Tætning langs vægge og gulv illustreres også.



Billede 1: Indvendig konstruktion for færdig monteret dampspærre



Billede 2: Billede af lysning og væg med færdig monteret dampspærre

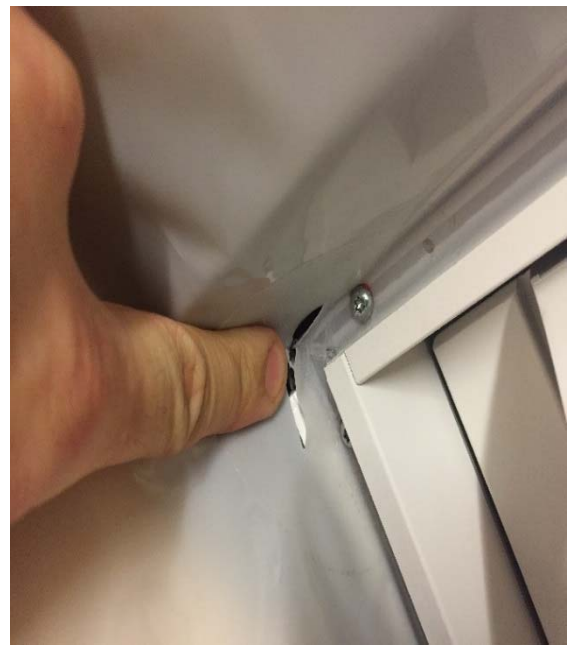
## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

For at fremprovokere en eventuel fugtophobning i vindues- og spærkonstruktioner, perforeres dampspærren efter grundig tætning forskellige steder omkring det ene vindue. Der laves i alt 6 forskellige gennembrydninger, der hver repræsenterer et sårbart sted omkring vinduets tilslutning til dampspærren enten ved vinduesnoten eller af samling ved hjørne mellem lysning og indvendig væg. Der påføres huller i dampspærren ud for i alle 4 hjørner samt på midten af vinduerne.

For placering af de forskellige perforeringer henvises til figur 8 og tabel 3. Størrelsen af de forskellige huller i top og bund svarer alle ca. til hullerne på billede 3 og 4, mens perforeringer midt på ca. er 20 cm lange snit udført med en hobbykniv. For detaljer og billeder af gennembrydninger henvises der endvidere til bilag 3-6.



Billede 3: Illustration af perforering af dampspærre ved samling mellem lysning og væg



Billede 4: Eksempel på perforering af dampspærre ved hjørne vinduesnot

### 6.3. Følere

Måling af fugtindholdet de forskellige steder i konstruktionerne, sker ved at måle den elektriske modstand mellem to fastinstallerede elektroder.

Til forsøget anvendes en metode, som er vel afprøvet og med gode erfaringer fra VELUX testcenter. Først bores et lille hul i den ønskede materialedybde, hvorefter elektroderne placeres i hullet. Efterfølgende sikres det, at de uisolerede elektrodespidser presses helt i bund.

Som ved montering af dampspærren, er det ved montering af elektroderne ligeledes vigtigt, at udførelse sker med stor omhu og nøjagtighed, så flest mulige fejlkilder undgås.

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

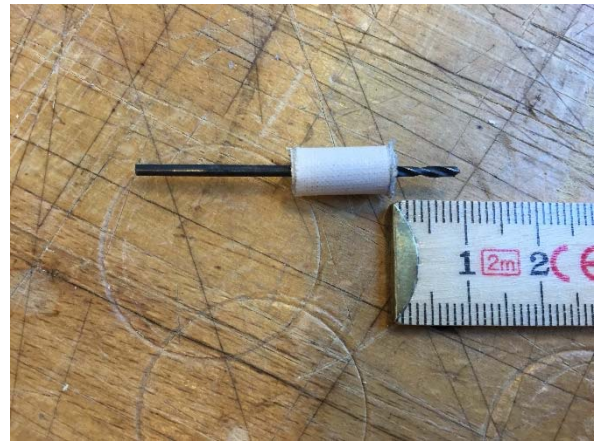
Alle målepunkter nummereres og elektroderne afisoleres i enderne. Herefter ombukkes enderne af elektroderne med en spidstang og trykkes helt i bund i de forskellige huller. Ved at ombukke elektroderne, sikres det at de sidder i spænd i de forskellige huller.

Herefter limes de fast med varm lim, mens de modsatte ender af elektroderne trækkes til en samlingsboks. Efterfølgende kan modstanden mellem de to elektroder måles og omsættes til et fugtindhold, som beskrevet i afsnit 5.2.

For hvert målepunkt er der anvendt en skabelon til afmærkning af afstand mellem hver elektrode samt en boreskabelon til at sikre ens dybde for alle målepunkter. Skabelon til at måle afstand og skabelon til boreddybde illustreres på billede 5 og billede 6.



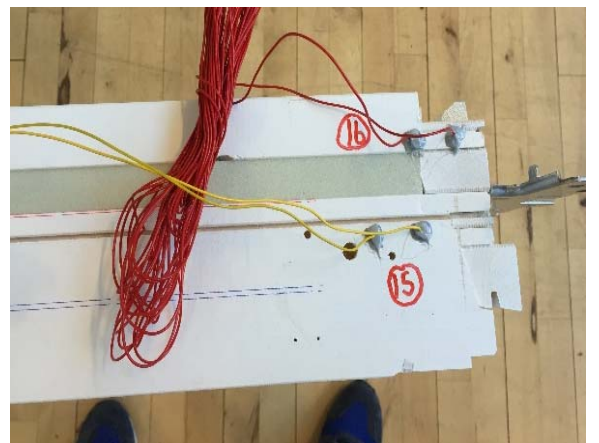
Billede 5: Skabelon til afmærkning af målepunkter så der sikres den samme afstand mellem elektroder



Billede 6: Boreskabelon til sikring af samme boreddybde for alle punkter. Alle målinger sker i en dybde på 10 mm



Billede 7: Eksempel på nummerering og placering af målepunkter på midt sidekarm vindue for kold og varm side



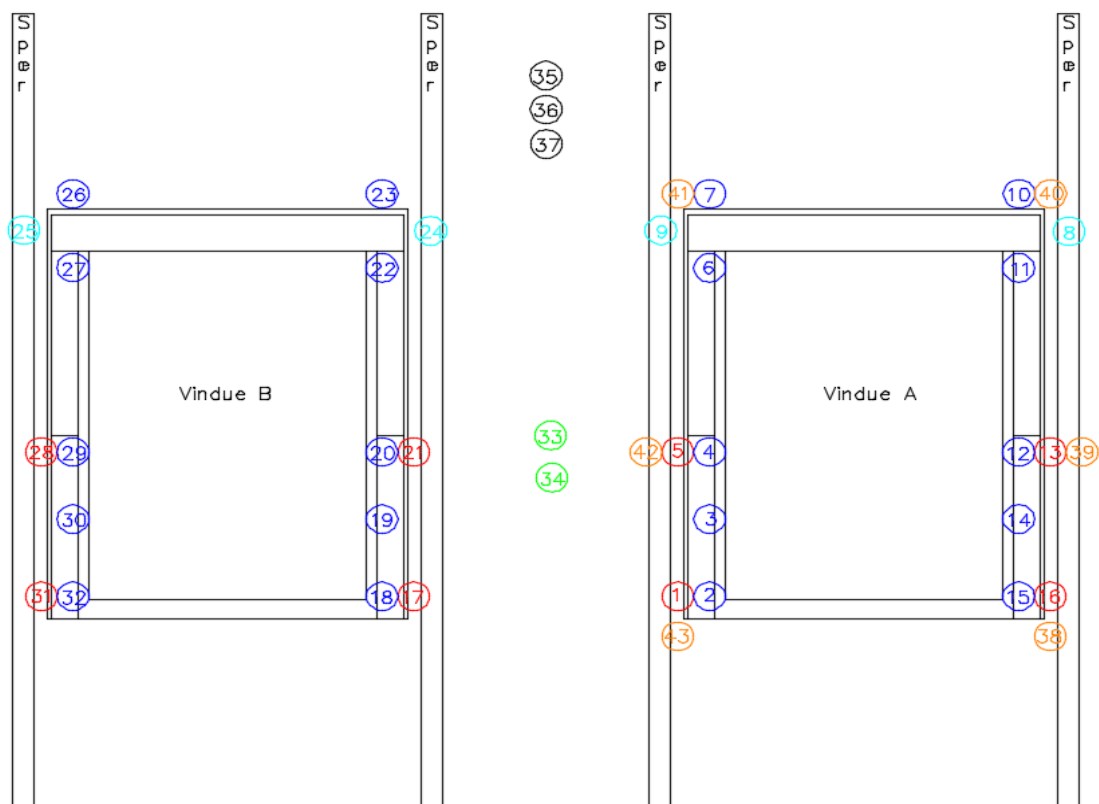
Billede 8: Placering af fugtføler i nedre sidekarm på varm og kold side



## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

For hvert vindue måles der 7 forskellige steder på hver sidekarm, i alt 28 målepunkter. De 7 målepunkter er identiske for hver sidekarm. Der måles endvidere i et enkelt punkt i hvert spær. Af de 7 målepunkter i hver sidekarm, fungerer det ene som et referencepunkt, hvis funktion er at afprøve systemet, og sikre at det virker.

De forskellige målepunkter er placeret som opmærket på figur 8, og markeret med blå og røde farver. Se eventuelt billede 7 og 8 for eksempel på detaljeret placering af følere på vinduerne. De blå målepunkter måler på fugtindholdet på den kolde side af forsøgsopstillingen, mens de røde måler på fugtindholdet på den varme side af konstruktionen. Årsagen til målepunkternes placering er, at de svarer til de områder, hvor der er lavet tilsvarende huller i dampspærren på den indvendige side, og derved vil være direkte eksponeret for den fugtige og varme indeluft.



Figur 8: Forsøgsopstilling set udefra med placering af målepunkter, følere og gennembrydninger af dampspærre. Alle gennembrydninger af dampspærren sker ved vindue A.

Tabel 3: Nummerering og beskrivelse af forskellige følere og målepunkter

Fugtmålinger varm side	1, 5, 13, 16, 17, 21, 28, 31.
Fugtmålinger kold side	2, 4, 6, 7, 10, 11, 12, 15, 18, 20, 22, 23, 26, 27, 29, 32.
Referencepunkter	3, 14, 19, 30.
Fugtmålinger spær	8, 9, 24, 25.
Gennembrydninger af dampspærre	38, 39, 40, 41, 42, 43.
Udetemperatur og trykføler ude	33, 34.
Indetemperatur, trykføler inde og RF måler inde	35, 36, 37.

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Udover de i alt 32 følere der måler på fugtindholdet, tilsluttes der til samlingsboksen endvidere et termoelement til registrering af udetemperaturen, en føler til registrering af trykforskellen mellem inde og udeklima, en føler til måling af indetemperaturen samt en føler til registrering af den indvendige relative luftfugtighed. Der henvises til bilag 9 for placering af termoelement og udvendig trykmåler på tagkonstruktionen.

Samplingsboksen indsættes i en datalogger som afbildet på billede 9, der tilsluttes til en computer og programmet Keysight BenchVue.

Keysight BenchVue er et program der muliggør opsamling af data på en overskuelig og visuel god måde. Programmet opsættes til at måle data på timebasis for alle følere.



Billede 9: Samlingsboks og datalogger af målepunkter og følere



Billede 10: Forsøgsopstillingen set indefra med følere til temperatur/RF måling samt måling af tryk

Efter montering og tilslutning af de forskellige følere, færdiggøres den udvendige tagkonstruktion med etablering af inddækninger og tegl, og forsøget startes op med de angivne klimatiske forhold.



Billede 11: Gennemgang af følere fra klimakammer



Billede 12: Færdig udvendig tagkonstruktion

## 7. Simuleringer

I forbindelse med projektet udføres der både termiske og hygrotermiske simuleringer.

De termiske simuleringer skal bruges for at kunne tage hensyn til temperatur korrigerings fra (18), og er derfor nødvendige, for at kunne beregne de specifikke temperaturer i de placerede målepunkter.

De hygrotermiske simuleringer skal bruges til, at forsøge at genskabe de målte fugtforhold i forsøgsopstillingen. Herefter vil det blive undersøgt, om bidrag fra f.eks. solstråling og orientering under dynamiske forhold kan have en indflydelse på fugtindholdet i og omkring tagvinduer og spær.

### 7.1. Termiske simuleringer

For at kunne beregne på temperatur forhold i målepunkter, udføres der en termisk simulering af tagkonstruktionen med indbygget vindue.

Dette gøres med programmet Flixo ([www.flixo.de](http://www.flixo.de)), der er et akkrediteret program til at udføre termiske beregninger i 2D af vinduer og dørkonstruktioner i henhold til den europæiske standard DS/EN 10077-2 (Dansk Standard, 2012), samt kuldebroer og overfladetemperaturer i henhold til den europæiske standard DS/EN ISO 10211 (Dansk Standard 2008).

Der opbygges først et repræsentativt snit af konstruktionen, svarende til forsøgsopstillingen og med tilsvarende dimensioner og mål.

Opbygning af konstruktionen foregår først i Autocad og gemmes herefter som dxf fil, som er programmets krav til filformat. Herefter importeres filen til Flixo, hvor de forskellige materialer og grænsebetingelser påføres ved en simpel ”drag and drop” metode. Se figur 9 for eksempel på konstruktion optegnet i Flixo.

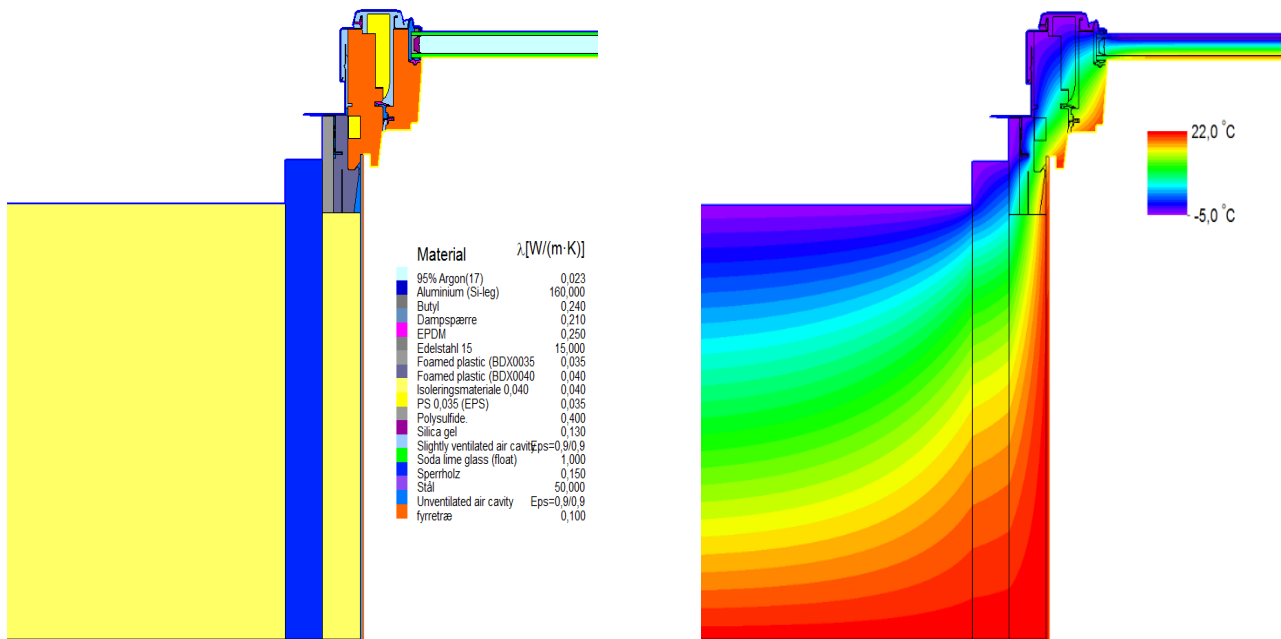
Der simuleres med statiske forhold,  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$  ude og  $22\text{ }^{\circ}\text{C}$  inde svarende til middelværdier fra forsøgsopstillingen, og der beregnes temperaturer i de 8 målepunkter på hver vinduesside som beskrevet i afsnit 6.3, svarende til 6 punkter i hver sidekarm, 1 punkt i overkarm samt 1 punkt i spæret for samme vinduesside. De resterende punkter antages som værende på samme niveau med de beregnede 8 punkter, da de forskellige målepunkter er identiske for alle 4 sidekarme, de 2 overkarme samt de 4 spær. For placering af målepunkter henvises til figur 8 afsnit 6.3.

Der anvendes materialer, grænsebetingelser og egenskaber fra programmets databaser, svarende til de anvendte fra forsøgsopstilling og i henhold til førnævnte europæiske standarder.

Programmet muliggør efter endt simulering en aflæsning af de specifikke temperaturer på de ønskede steder. Resultater kan findes i afsnit 8.



## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre



Figur 9: Eksempel på modelopbygning i FLIXO af snit med tagkonstruktion og tagvindue med påførte materiale egenskaber samt illustration af isotherm forløbet for de simulerede forhold

## 7.2. Hygrotermiske simuleringer

Udover de praktiske målinger udføres der hygrotermiske beregninger af selve tagvinduerne og den omkringliggende konstruktion. Der kigges nærmere på effekten fra solstråling og hvad orientering betyder for konstruktionerne. Til dette anvendes simuleringssprogrammet WUFI ([www.wufi.de](http://www.wufi.de)), der kan udføre dynamiske simuleringer af varme og fugttransport i 2D.

Modsat den mere simple Glaser metode, hvor der udelukkende kigges på fugttransport ved vanddampdiffusion og med månedlige middelværdier og i 1D, kan WUFI også simulere fugt og temperaturforhold med hensyntagen til kapillar transport og regne med fugt- og temperaturafhængige materialeparametre under dynamiske forhold, hvor klimaet ændres på timebasis. Dette gør, at det er muligt at simulere med både påvirkning fra regn og solstråling og se på forskelle afhængig af orientering, hældning og materialers overflade egenskaber.

Ved at udføre en WUFI beregning med statisk inde- og udeklima, svarende til samme forhold som fra forsøgsopstillingen og derefter sammenholde med forsøgene, valideres WUFI modellen, der anvendes til simulering. Ved tilstrækkelig overensstemmelse mellem forsøgsresultater og statisk WUFI model, anses modellen til at være tilstrækkelig præcis til at kunne benyttes til dynamiske beregninger også. Det betyder, at hvis beregninger med den anvendte model med utæt dampspærre kan vise kritiske fugtforhold som i forsøget –

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

svarende til hvad der konstateres ved målinger – må simuleringsmodellen vurderes at være tilstrækkelig præcis til at kunne benyttes til at vurdere andre parametre.

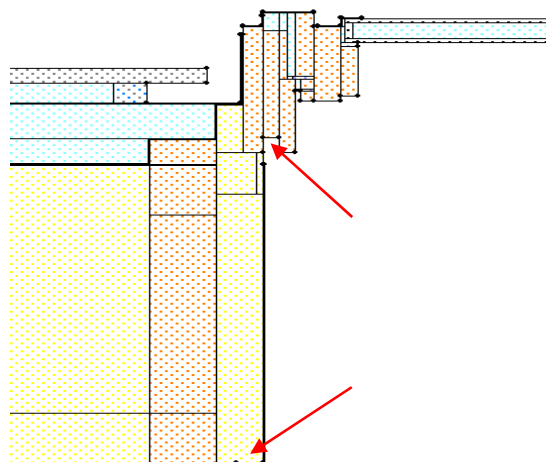
Der opbygges et repræsentativt snit af et tagvindue indbygget i taget som på forsøgsopstillingen. Der vælges at opbygge et snit svarende til sidekarm/ramme konstruktionen indbygget i taget, som afbildet på figur 10, og arbejde videre med analyse af dette specifikke snit i programmet.

Opbygning af konstruktioner i programmet sker ved at definere de forskellige geometrier som tekst form med udgangspunkt i et x-y koordinatsystem. Denne arbejdsproces gør, at det er meget kompliceret og tidskrævende at opbygge komplekse konstruktioner svarende til forsøgsopstillingen, og årsagen til at der udelukkende fokuseres på dette udsnit af konstruktionen i WUFI.

Materialer og grænsebetingelser tages fra programmets databaser. Såfremt et specifikt materiale ikke har været tilgængeligt i en af programmets databaser, er dets egenskaber blevet ændret eller tilføjet manuelt, svarende til de samme værdier anvendt til de termiske simuleringer i FLIXO.

For at kunne analysere på effekten fra gennembrydning af dampspærren, er denne fjernet svarende til et hul på ca. 20 mm ved samling mellem lysning og vinduesnot samt ved samling mellem lysning og væg, som markeret med røde pile på figur 10.

Ved simulering i WUFI, er det valgt at beregne med perforeringer både ved vinduesnot og ved samling mellem lysning og væg for det udvalgte konstruktionssnit samtidigt. På den måde, vil der teoretisk ske en kontaminering fra den ene utæthed i dampspærren til den anden, ligesom det vil kunne foregå i den virkelige verden afspejlet ved forsøgsopstillingen.

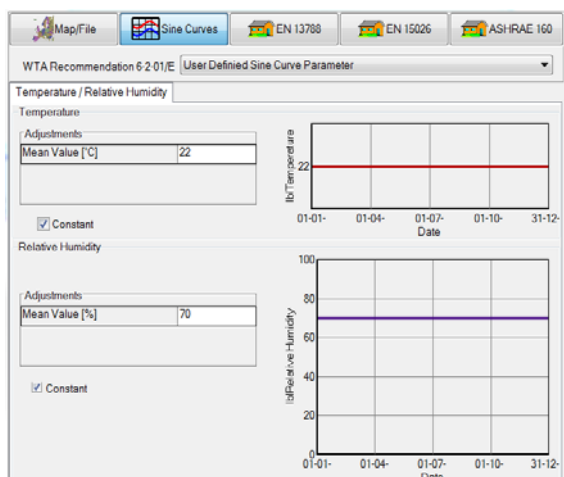


Figur 10: Opbygning af tagkonstruktion med tagvindue i WUFI. Røde pile markerer placering af gennembrydninger af dampspærren

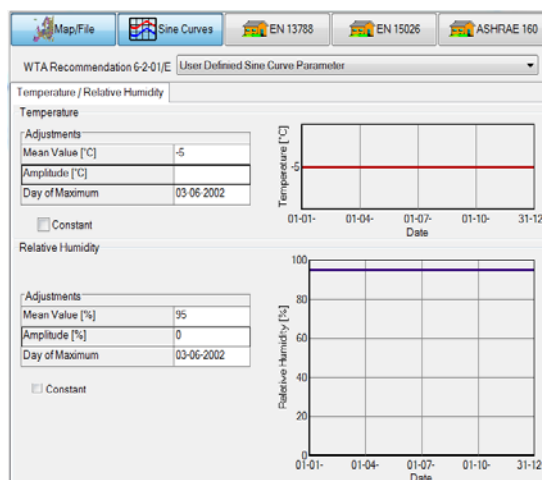
Ved simulering defineres og genskapes indeklimaet som fra forsøgsopstillingen, og der analyseres med en konstant temperatur på 22 °C og en relativ luftfugtighed på 70 %, som afbildet på figur 11. For udeklima bruges samme fremgangsmåde, og der defineres her et udeklima som fra forsøgsopstillingen. Den udvendige relative luftfugtighed styres ikke under forsøget, men antages ved de hygrotermiske simuleringer at have en værdi tæt på

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

100 %, da luften der bruges som udeluft blot er luft fra laboratoriet, der føres ind i klimakammeret som afkølet luft. Se figur 12.



Figur 11: Valg af statisk indeklima ved simulering i WUFI

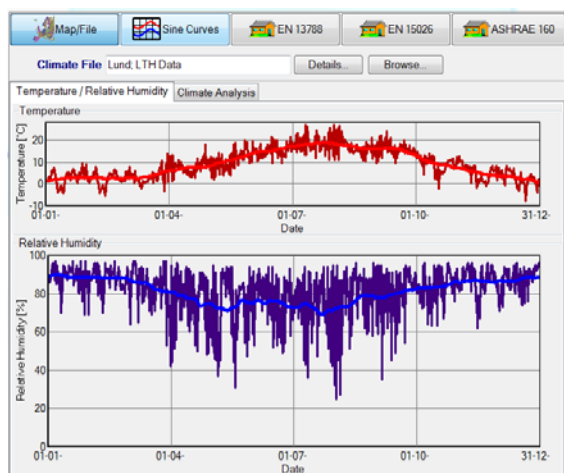


Figur 12: Valg af statisk udeklima ved simulering i WUFI

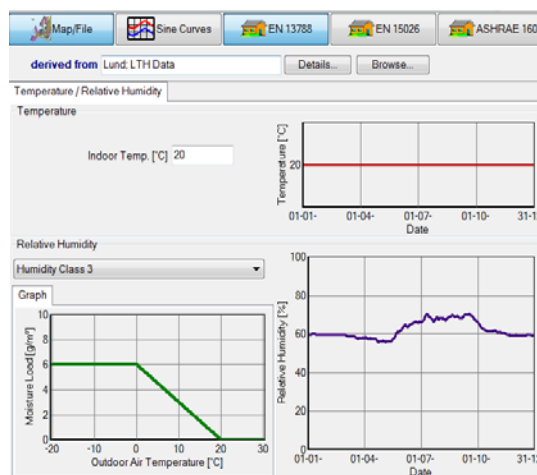
Start-vandindholdet i spær og vinduer tilpasses ved simulering, så det passer med det der blev målt med indstiksmålere inden forsøget blev opstartet.

Efter validering af modellen med de statiske forhold svarende til forsøgsopstilling, kigges der efterfølgende på en række forskellige scenarier, der simuleres under dynamiske forhold med og uden hensyntagen til en eventuel effekt fra de udvendige materials strålingsegenskaber. Her vælges udeklima som fra Lund i Sverige, der svarer bedst til et dansk udeklima med de vejrfiler, der er tilgængelige i WUFI.

Der simuleres i en periode på et år og med en indvendig fugtbelastning svarende til fugtbelastningsklasse 3, der svarer til boliger med ukendt beboelsestæthed. Boliger henføres normalt til fugtbelastningsklasse 2 eller 3. Der vælges at beregne med den største fugtbelastning af de 2 klasser for at være på den sikre side og derved samtidigt afspejle f.eks. etage og lejligheder, hvor beboelsestætheden og ventilationen er ukendt.



Figur 13: Valg af udeklima ved dynamisk simulering i WUFI

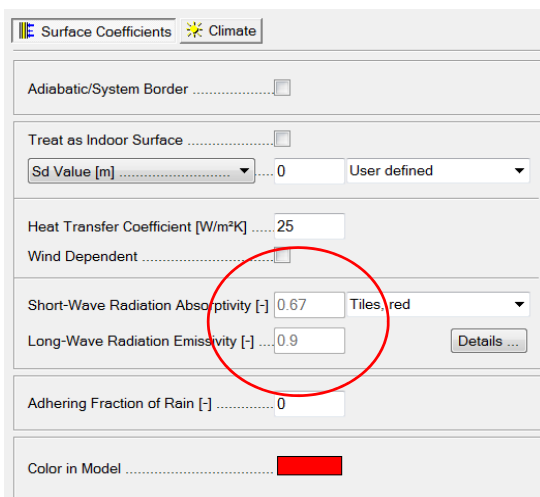


Figur 14: Valg af indvendigt klima ved dynamisk simulering svarende til fugtbelastningsklasse 3

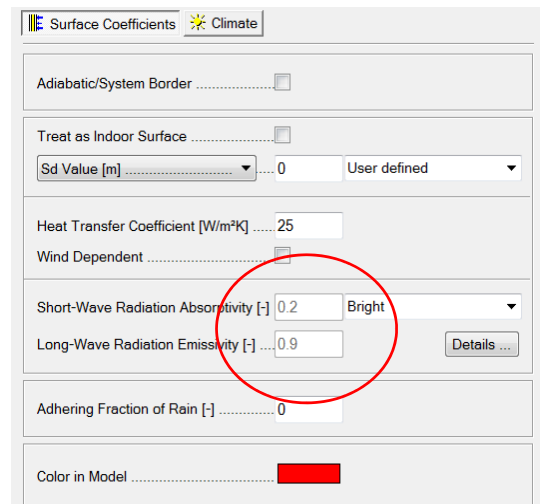
## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

WUFI muliggør bl.a., at vælge overfladeegenskaber for de forskellige udvendige materialer af tagkonstruktionen, så en eventuel effekt fra specielt kortbølget stråling medtages. Dette betyder, at der i WUFI ikke kun regnes med en udeluft temperatur, men også materialers evne til at blive varmere end luften grundet solstråling.

Dette gøres ved at definere de specifikke farver og materialer, der anvendes på henholdsvis tagsten og vinduernes karm/ramme konstruktion.



Figur 15: Overfladeegenskaber i forbindelse med strålingsbidrag. Her ses en højere værdi af effekten fra den kortbølgede solstråling for de røde teglsten (0,67), der anvendes i forsøgsopstillingen, sammenlignet med figur 16, der viser for et lyst tagmateriale (0,2).



Figur 16: Strålingsegenskaber for et lyst tagmateriale

De valgte orienteringer til simulering, er sket på baggrund af, at det antages at effekten fra solstråling fra sydvest, vil være mest markant og have den største indflydelse på en eventuel udtørring af konstruktionerne, sammenlignet med nord, hvor effekten fra solstråling vil være mindst.

Der udføres simuleringer som nedenstående:

- Med utæt dampspærre orienteret sydvest
- Med utæt dampspærre orienteret nord
- Med utæt dampspærre orienteret sydvest og effekt fra strålingsbidrag slået til
- Med utæt dampspærre orienteret nord og effekt fra strålingsbidrag slået til

## 8. Resultater

Dette afsnit vil samle op på forskellige udvalgte resultater og beregninger fra de termiske simuleringer i Flixo og de hygrotermiske simuleringer i WUFI, samt på de forskellige målte fugtforhold fra forsøgsopstillingen.

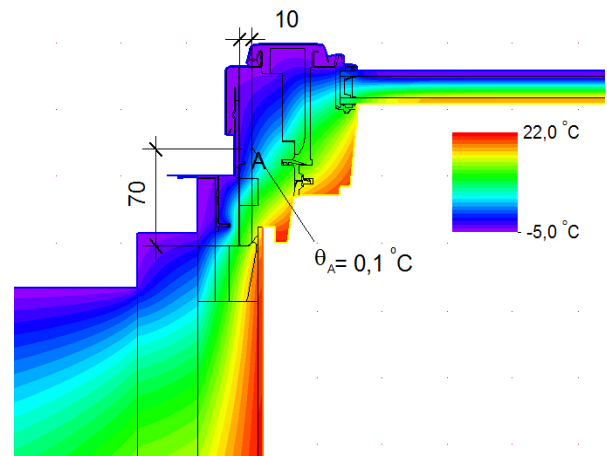
Relevante resultater vil blive diskuteret i afsnit 9.

### 8.1. Termiske simuleringer

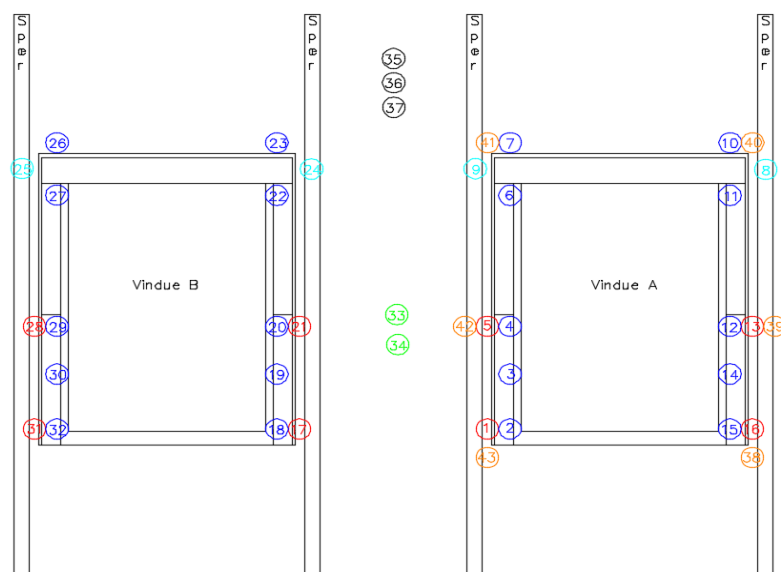
De termiske simuleringer fra programmet Flixo til brug i (18), resulterer i nedenstående temperaturer for de forskellige målepunkter. Da der regnes i 2D, vil flere af de beregnede resultaterne være identiske, da følerne er placeret på samme linje langs med vinduerne, blot forskudt i forhold til bund, midt og top.

Tabel 4: Simulerede temperaturer ved de forskellige målepunkter.

	Målepunkter vindue A	Temperatur °C
1.	Nedre sidekarm varm side.	10,8
2.	Nedre sidekarm kold side	0,1
3.	Reference sidekarm kold side	-2,3
4.	Midt sidekarm kold side	0,1
5.	Midt sidekarm varm side	10,8
6.	Øvre sidekarm kold side	1,3
7.	Overkarm kold side	1,3
9.	Spær	2,8



Figur 17: Eksempel på simulering af temperaturforløb i Flixo og med aflæsning af temperatur svarende til punkt 4 i tabel 4



Figur 18: Forsøgsopstilling med markering og placering af de forskellige målepunkter. Identisk med figur 8

## 8.2. Fugtforhold i forsøgsopstilling

Med de beregnede temperaturer fra tabel 4 i afsnit 8.1 og med (18), er de registrerede modstande omregnet til et fugtindhold i vægtprocent efter en forsøgsperiode på ca. 7 uger. Resultater fremgår af tabel 5 og viser, at der ved en indvendig statisk relativ luftfugtighed på 70 %, ses en markant fugtphobning ved flere målepunkter på og omkring vindue A, hvor der er lavet gennembrydninger af dampspærren.

I tabel 5 er der kun medtaget punkter, hvor modstandsmålingen gav udslag og viste et forhøjet fugtindhold, dvs. højere end målt med indstiksmåler ved start forsøg. Der ses ikke udslag ved nogle af referencepunkterne, hverken for vindue A eller B, så systemet antages at virke efter hensigten.

Flere af punkterne resulterer i målte værdier over en vægtprocent på 27 %, hvilket indikerer at træet er vandmættet og har nået sit fibermætningspunkt. Næsten alle punkter ved perforeringer viser forhøjede fugtforhold, især der hvor perforeringer i dampspærren er sket ved vinduesnoten. De steder hvor hullerne i dampspærren er placeret ved samling mellem lysning og væg, ses der udelukkende udslag i bunden af vinduet svarende til ved punkt 15 og 16.

Der ses generelt udslag og høje fugtniveauer for punkter placeret på både varm og kold side af isolering.

Der er ikke registreret udslag på følere ved og omkring vindue B, hvor der heller ikke er foretaget nogen former for perforeringer af dampspærren. Tabel 5 viser de punkter, som der med (18) og værdier fra tabel 4, har været mulige at beregne fugtforhold for, efter endt forsøg.

Se eventuelt figur 8 af forsøgsopstilling for placering af de forskellige punkter på vinduer og spær.

Tabel 5:  $F_{k,i}$  i vægtprocent % for målepunkter med udslag ved endt forsøg og  $RF = 70\%$ .

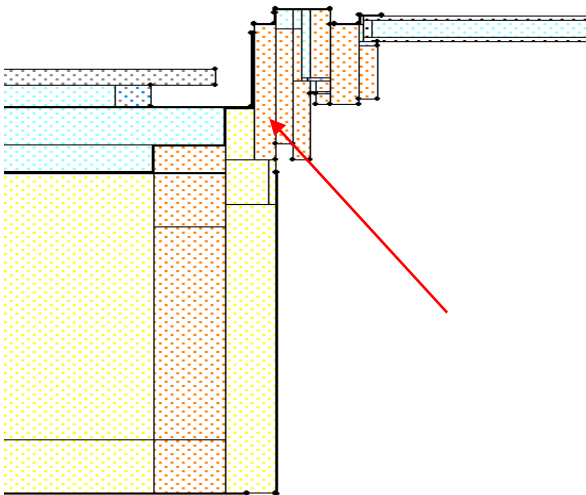
	Målepunkter vindue A	Gennembrydning dampspærre	$F_{k,i}$ vægtprocent %
1.	Nedre sidekarm varm side	Ved vinduesnot	26,4
2.	Nedre sidekarm kold side	Ved vinduesnot	19,6
8.	Spær	Ved vinduesnot	>27*
10.	Overkarm kold side	Ved vinduesnot	>27*
11.	Øvre sidekarm kold side	Ved vinduesnot	16,6
13.	Midt sidekarm varm side	Ved vinduesnot	25,7
15.	Nedre sidekarm kold side	Samling lysning og væg	21,4
16.	Nedre sidekarm varm side	Samling lysning og væg	>27*

\* angiver at træet er vandmættet.

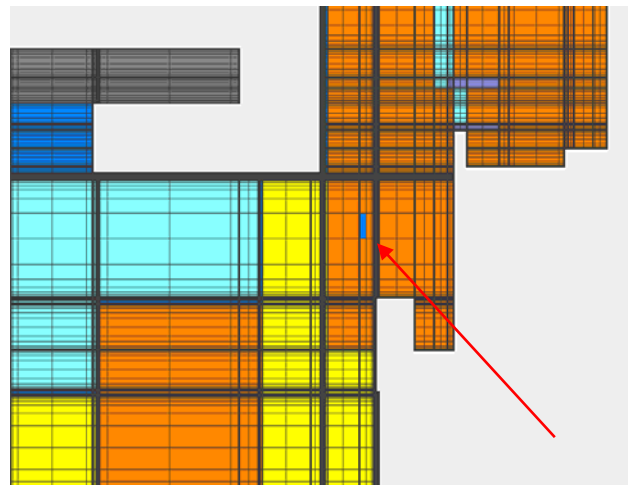
Efter aflæsning af de registrerede modstande og omregning til de forskellige vægtprocenter, er forsøget stoppet og udtørring påbegyndt. Det har af tidsmæssige årsager ikke været muligt at starte forsøgsopstillingen op igen med en lavere indvendig luftfugtighed (RF = 55 %), da alle punkter ikke har kunnet nå at tørre tilstrækkeligt ud.

### 8.3. Hygrotermiske simuleringer

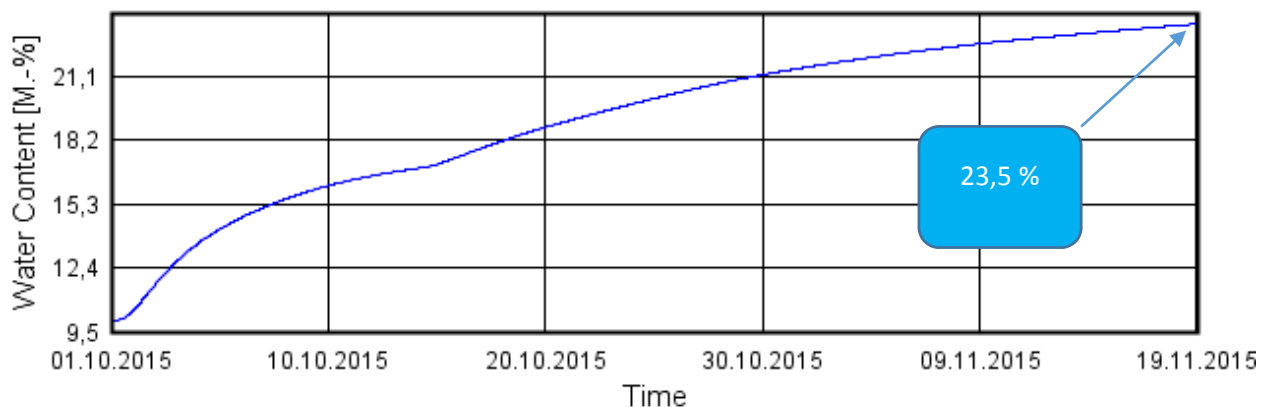
Med udgangspunkt i den simulerede model i WUFI af sidekarm/ramme konstruktionen, er det muligt at sammenligne flere af de samme målepunkter og deres værdier som fra forsøgsopstillingen, og derved se om modellen, der er anvendt kan valideres. De specifikke fugtindhold i WUFI findes ud fra et koordinatsystem svarende til hvor henne i konstruktionen, der kigges og afhængig af valgt "grid". Området markeres som på figur 20, og resultatet kan herefter aflæses enten ved graf som på figur 21 eller ved export til Excel som tal.



Figur 19: Oversigt af modelsnit anvendt i WUFI. Rød pil peger på ca. område for målepunkt svarende til punkt 1 i forsøgsopstilling



Figur 20: Udsnit af modelsnit fra WUFI med valgte "grid" inddeling. Rød pil peger på den koordinat der svarer til målepunkt 1, her markeret ved den blå firkant



Figur 21: Graf der viser vandindhold i vægtprocent af snit i nedre sidekarm på varm side, svarende til punkt 1 i forsøgsopstillingen. Slutværdi for punktet = 23,5 vægtprocent

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Med de målte værdier fra forsøgsopstillingen opsummeret i tabel 5, sammenlignes der i tabel 6 de simulerede og mulige værdier fra modellen anvendt i WUFI, der svarer til samme punkter som fra forsøget. Da modellen er baseret på et snit af sidekarmen i tagkonstruktionen, sammenholdes punkt 10 fra forsøgsopstilling ikke, da det er placeret på overkarmen, og derved ikke direkte sammenligneligt.

Tabel 6: Sammenligning af simulerede og målte værdier til validering af model anvendt i WUFI ved statiske forhold med 70 % RF og 22° C inde, samt -5° C ude og RF tæt på 100 %

	Målepunkter vindue A	WUFI simuleret vægtprocent % vandindhold	Forsøgsopstilling målt vægtprocent % vandindhold	Forskel mellem simuleret og målt vægtprocent % vandindhold
1.	Nedre sidekarm varm side	23,5	26,4	-2,9
2.	Nedre sidekarm kold side	22,9	19,6	+3,3
8.	Spær	19	>27	>8
11.	Øvre sidekarm kold side	21,1	16,6	-4,5
13.	Midt sidekarm varm side	23,5	25,7	+2,2
15.	Nedre sidekarm kold side	22,9	21,4	-1,5
16.	Nedre sidekarm varm side	23,5	>27	>3,5

Baseret på forskellen mellem simuleret og målt vægtprocent, vurderes den anvendte model i WUFI som sandsynliggjort/valideret, og tilstrækkelig nøjagtig til at kunne analysere videre på i forhold til dynamiske forhold. De konkrete forskelle og årsager dertil diskuteres yderligere i afsnit 9.

Resultater fra de dynamiske simuleringer med indeklime svarende til fugtbelastningsklasse 3 og udeklime svarende til Lund i Sverige, viser for de simulerede punkter med gennembrydninger af dampspærren, generelt lavere fugtniveauer, sammenlignet med de statiske forhold. Også i dette tilfælde sker dog generelt en stigning af vandindholdet for både vinduer og spær.

Det kan registreres, at vandindholdet i de forskellige punkter i vinduerne stiger i forhold til deres start fugtindhold, der ved simuleringer er sat til 12 vægt-%.

De kommer dog ikke på noget tidspunkt højere end 17,7 vægt-%, hverken for den sydvestlige eller nordlige orientering, og ligger for alle punkter i området mellem 16,4 – 17,7 vægt-% vandindhold.

For spærkonstruktionen viser forholdene sig at være anderledes. Ved simuleringer er start vandindholdet sat til 13,5 vægt-%. I løbet af året stiger vandindholdet for begge orienteringer for det specifikke målepunkt til værdier mellem 19 – 21,3 vægt-%, og ligger derfor i perioder over det kritiske fugtindhold på 20 vægt-%.



## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Tabel 7 viser de beregnede værdier for de forskellige punkter og konstruktioner. Det kan registreres, at slut og max værdier af vandindholdet for både vinduer og spær for begge orienteringer ligger nærmest identiske og kun viser minimale afvigelser fra hinanden.

Tabel 7: Vægtprocent vandindhold for de forskellige punkter for vinduer og spær ved dynamisk simulering afhængig af orientering

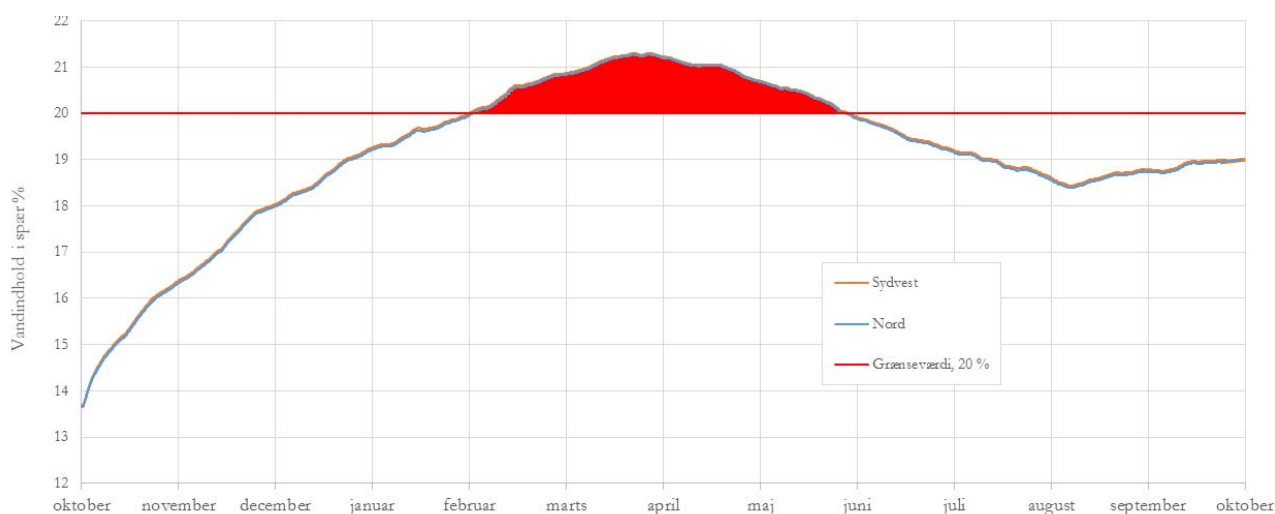
Vægtprocent % vandindhold ved fugtbelastningsklasse 3 orientering sydvest	Punkt 1-13-16	Punkt 2-15	Punkt 11	Spær
Start-værdi i %	12	12	12	13,5
Max-værdi i %	17,3	17,4	17,6	21,3
Slut-værdi i %	16,4	16,4	16,4	19
Vægtprocent % vandindhold ved fugtbelastningsklasse 3 orientering nord	Punkt 1-13-16	Punkt 2-15	Punkt 11	Spær
Start-værdi i %	12	12	12	13,5
Max-værdi i %	17,3	17,4	17,7	21,3
Slut-værdi i %	16,4	16,4	16,5	19

Når antallet af timer med over 20 vægt-% vandindhold i spæret sammentælles, viser det sig, at der samlet set henover året er 2901 timer med over 20 vægt-% vandindhold for den sydvestlige orientering af tagkonstruktionen, mens der for den nordlige orientering af tagkonstruktionen er 2834 timer med over 20 vægt-% vandindhold.

Dette svarer ca. for begge orienteringer til godt og vel 4 måneder af året, hvor niveauet overstiger den kritiske grænse for råd og svampevækst i træ.

Figur 22 viser vandindholdet i spærkonstruktionen henover året, og illustrerer at perioden, hvor der sker en stigning til over 20 vægt-% vandindhold ligger mellem februar og juni måned for begge orienteringer.

De specifikke værdier er meget identiske for de to orienteringer, hvilket gør at forskellen er svær at se på grafen, da linjerne ligger næsten oven i hinanden.



Figur 22: Illustration af vandindholdet i vægtprocent for spær konstruktionen henover året for sydvest og nordlig orientering. Rød streg markerer kritisk fugtniveau svarende til 20 vægt-% træfugt, mens det røde område svarer til perioden over 20 vægt-% vandindhold

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Resultaterne af simuleringer med hensyntagen til effekt fra stråling, viser et lidt andet billede sammenlignet med dem fra tabel 7. Der ses for max-værdier ikke den store forskel for hverken vinduer eller spær, når de sammenlignes med værdier uden hensyntagen til effekt fra stråling.

For slut-værdierne i den simulerede periode er fugtniveauet dog faldet for både vinduer og spær, og der ses forskelle på mellem 1-3 vægt-% mindre vandindhold sammenlignet med simuleringer uden stråling slået til. Se tabel 8 for detaljer.

Tabel 8: Vægtprocent vandindhold for de forskellige punkter for vinduer og spær ved dynamisk simulering afhængig af orientering og medtaget effekt fra stråling

Vægtprocent % vandindhold ved fugtbelastningsklasse 3 orientering sydvest med effekt fra stråling	Punkt 1-13-16	Punkt 2-15	Punkt 11	Spær
Start-værdi i %	12	12	12	13,5
Max-værdi i %	17,0	16,9	17,0	20,6
Slut-værdi i %	15,0	14,9	14,5	16,2
Vægtprocent % vandindhold ved fugtbelastningsklasse 3 orientering nord med effekt fra stråling	Punkt 1-13-16	Punkt 2-15	Punkt 11	Spær
Start-værdi i %	12	12	12	13,5
Max-værdi i %	17,1	17,1	17,3	20,9
Slut-værdi i %	15,7	15,6	15,6	17,5

Når der sammenlignes på resultater for de to orienteringen og med effekt fra stråling medtaget, ses der generelt et højere vandindhold for både vinduer og spær for nordlig orientering sammenlignet med den sydvestlige orientering.

Dette gælder for både slut og max-værdier. Der henvises til bilag 10 for eksempel på graf for dynamisk WUFI simulering af målepunkter i vindue og spær.

Det samme gør sig gældende for antallet af timer med et vandindhold på over 20 vægt-% i spæret, der her ligeledes for sydlig orientering er mindre end for den nordlige orientering.

Der ses for begge orienteringer en markant reduktion af antal timer over 20 vægt-% vandindhold i spæret, når effekten fra stråling medtages.

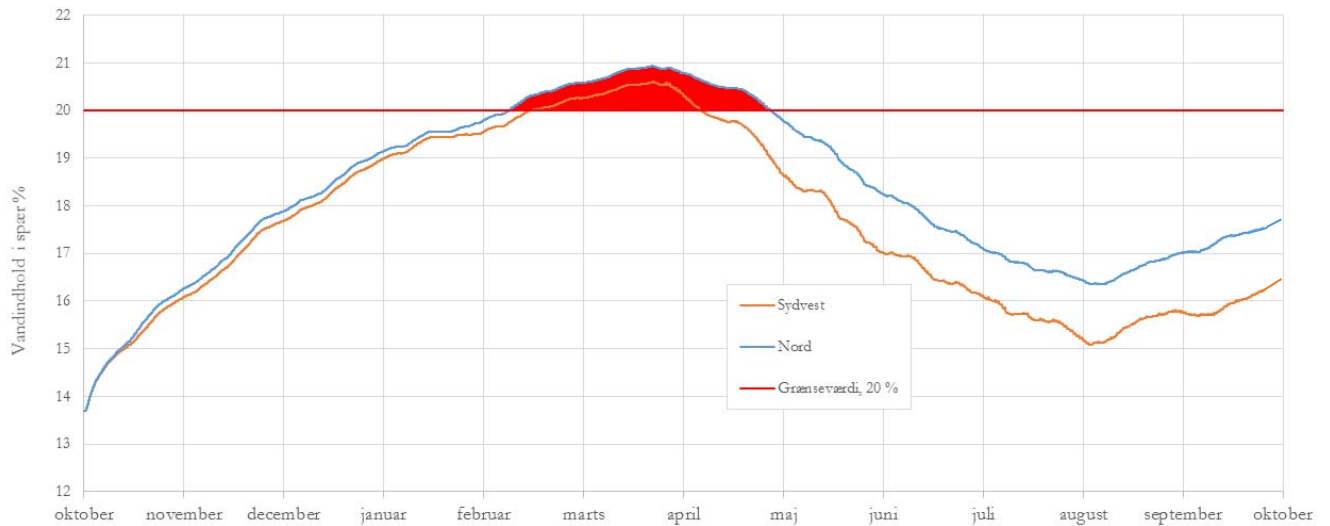
For nordlig orientering falder antallet af dage fra ca. 118 dage til 80 dage, mens antallet af dage for sydlig orientering falder fra ca. 120 dage til 52 dage.

Figur 23 viser forløbet af vandindhold over året, der her sammenlignet med figur 22 tydelig fremhæver den store forskel mellem sydvest og nordlig orientering.

## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Resultater viser, at perioden med et vandindhold højere end 20 vægt-% for nordlig orientering ligger fra ca. start februar til og med ca. slut april måned.

For sydlig orientering kommer vandindholdet over 20 vægt-% i perioden mellem ca. medio februar til og med ca. start april måned.



Figur 23: Illustration af vandindholdet i vægtprocent for spær konstruktionen henover året for sydvest og nordlig orientering med effekt fra stråling medtaget. Rød streg markerer kritisk fugtniveau svarende til 20 vægt-% træfugt, mens det røde område svarer til den periode, hvor vægtprocenten overstiger 20 vægt-%

## 9. Diskussion

Projektet omhandler både forsøgsopstilling og simuleringer, og begge dele vurderes i dette afsnit.

Forsøgsopstillingen skal afspejle en virkelig tagkonstruktion, mens simuleringer anvendes til at vurdere de forhold, der ikke har været mulige at undersøge ved forsøgsopstillingen.

Derfor indeholder dette afsnit en vurdering af om forholdene i forsøgsopstillingen er realistiske i forhold til den virkelige verden, samt om resultater fra simuleringer og forsøgsopstilling stemmer overens, og hvilke forhold der kan udledes fra simuleringer, der ikke er undersøgt ved forsøg.

### 9.1. Forsøgsopstilling

Som forventet ses der ved forsøgsopstillingen en markant fugtphobning og risiko for råd og trænedbrydende svampe ved og omkring de målepunkter på vinduer og spær, hvor der er lavet perforeringer i dampspærren. Flere af målepunkterne viser et vandindhold i vægtprocent på over 27 %, hvilket betyder at træet er vandmættet. Dette giver også god mening, da tagkonstruktionen under hele forsøgsperioden har været påvirket af en konstant høj relativ fugtbelastning. Resultaterne fra forsøgsopstillingen understøtter dermed faglitteraturens fokusering og pointering af en tæt dampspærre såfremt kritiske fugtforhold skal undgås.

Det kan diskuteres om de statiske fugt- og temperaturforhold under forsøget er realistiske sammenlignet med den virkelige verden. Lignende ”ekstreme” forhold vil sandsynligvis sjældent finde sted, men der kan være situationer, der vil kunne afspejle et tilsvarende scenarie.

Et tænkt eksempel kunne være en vinterperiode på et badeværelse der dagligt bliver brugt af mange personer i forbindelse med badning, og som derved udsættes for en høj fugtbelastning løbende gennem dagen, kombineret med dårlig eller ikke eksisterende ventilering af rummet. Hvis badeværelset endvidere ligger orienteret mod nord eller i konstant skygge fra omgivelserne, vil udeforhold kunne afspejle de statiske udeforhold ved forsøgsopstillingen, da solen heller ikke her vil have en effekt på udtørring af konstruktionerne.

I forsøgsopstillingen anvendes der ikke noget lysnings- eller indvendigt vægmateriale, hvilket betyder, at der sker en mere direkte eksponering af vanddamp fra det fugtige indeklima ud igennem de huller der er i dampspærren, sammenlignet med hvis der var en færdig indvendig vægoverflade.

Dette vil alt andet lige forsinke fugten lidt, men vurderes dog ikke til at have væsentlig betydning for de målte værdier af fugtindhold, medmindre den færdige overflade udføres 100 % lufttæt og er bestående af et materiale med diffusionsbremsende egenskaber.

Da forsøgsopstillingen ikke har kunnet nå at tørre tilstrækkeligt ud efter første forsøgsrække, kan der ikke med sikkerhed siges noget om, hvorvidt en reduktion af den indvendige relative luftfugtighed fra 70 % til 55 %, vil kunne have ændret på fugtforholdene i konstruktionerne. Umiddelbart vurderes det, baseret på de høje

## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

fugtregistreringer fra forsøgsopstillingen, at der med tiden stadig vil kunne opstå kritisk fugtophobning, også ved lavere relativ luftfugtighed, bare ikke lige så hurtigt som ved den høje fugtbelastning.

Det kan diskuteres, om der skulle være startet med en indvendig relativ luftfugtighed på 55 % i stedet for 70 %. Planen havde fra start af været, at gentage forsøget med 55 % RF, men dette var desværre ikke muligt, da forsøgsopstillingen ikke nåede at tørre tilstrækkeligt ud. Det blev prioriteret at få målelige resultater ved en høj luftfugtighed, frem for at risikere, at stå i en situation uden nogen former for udslag.

Der ses fugtophobning ved og omkring alle de områder af forsøgsopstillingen, hvor perforeringen i dampspærren er sket ved lysningsnoten af vinduerne. Sammenlignet med de steder hvor dampspærren er ”defekt” ved samling mellem lysning og væg, kan der kun registreres forhøjede fugtniveauer i bunden af vinduerne. Dette billede kunne potentielt ændre sig over tid, så alle målepunkter, hvor dampspærren er utæt ved samling mellem væg og lysning også vil vise høje og kritiske niveauer af fugt i konstruktionerne.

Årsagen til, at der ikke ses udslag alle steder, hvor der er huller i dampspærren ved samling mellem lysning og væg kan være, at afstanden som fugten skal transporteres ud i konstruktionerne på, er længere fra samling mellem lysning og væg sammenlignet med afstanden fra de huller, der er i dampspærren ved vinduesnoten. Udover at afstanden er større, er der også et langt større volumen, som fugten gennem både diffusion, konvektion og kapillartransport, vil kunne sprede sig i, og derved forsinke processen. Denne fordeling og forskel i hastighed af udbredelse af fugten svarer godt overens med, hvad der kan forventes.

Den generelle tætning af dampspærren og de mange samlinger vurderes at være udført tæt, hvilket understøttes af, at der ikke kan registreres forhøjede fugtforhold ved og omkring vindue B, hvor dampspærren er intakt og uden defekter. Det kunne godt tænkes, at der på sigt på samme måde som beskrevet i ovenstående, vil kunne ske en transport og fordeling af fugt gennem utætheder i vindue A over til områder ved og omkring vindue B og spær, såfremt der måles i en længere periode.

Det kan diskuteres, om størrelsen på de udførte perforeringer i dampspærren svarer til en virkelig situation, da dette vil være meget forskelligt fra sted til sted. De påførte ”defekter” i forsøgsopstillingens dampspærre er baseret på de steder og tilslutninger, som erfaringer har vist, at der typisk opstår utætheder i forbindelse med etablering af tagvinduer og indvendigt beklædningsarbejde. Størrelse og andel vurderes til at kunne være endnu større ved mange scenarier, hvilket blot vil øge risikoen for, at der vil kunne opstå kritiske fugtforhold, der vil kunne føre til råd og nedbrydning af de forskellige konstruktioner.

## 9.2. Simuleringer

Ved validering af simuleringssmodellen i programmet WUFI 2D ses et vandindhold i de forskellige punkter svarende godt overens med de målte værdier fra forsøgsopstillingen. Der registreres afvigelser for vinduerne mellem målte og simulerede værdier på 1,5-4,5 vægtprocent vandindhold. For spærkonstruktionen viser forskellen sig mellem målte og simulerede værdier at være på >8 vægtprocent vandindhold.

Årsagen til de konkrete forskelle kan være, at den anvendte model er begrænset i dimensioner i forhold til forsøgsopstillingen. Hvor modellen der bliver brugt til at simulere arbejder i 2D, er forsøgsopstillingen tredimensional, hvilket gør sammenligningen mere kompleks og ikke lige så præcis, som hvis man sammenlignede på mere simple konstruktioner.

Dette betyder bl.a., at modellen anvendt til simuleringer i WUFI 2D, ikke på samme måde kan tage effekten fra f.eks. de geometriske og konstruktive ændringer i materialer og konstruktioner, og heller ikke vise hvordan det påvirker de hygrotermiske forhold ved og omkring konstruktionerne, på samme måde som i forsøget.

Forskelle i materialeegenskaber og de forskellige materials placering vurderes også at kunne influere på forskelle i fugtforhold mellem simuleringer og forsøg. Ved simuleringer støder de anvendte materialer som udgangspunkt op til hinanden, mens der i forsøgsopstillingen kan være områder i og mellem konstruktionerne, hvor der kan opstå luftspalter, og derved potentielt øge mængden af vanddamp, der kan transporteres.

Når der sammenlignes specifikke resultater og punkter mellem målte og simulerede værdier, sker det på baggrund af et valgt "grid" i simuleringssmodellen. Dette "grid" defineres fra start i programmet WUFI 2D, og bestemmer efterfølgende hvor præcist og hvor i konstruktionen man specifikt kan aflæse og beregne en given værdi. Dette betyder, at et givent punkt i forsøgsopstillingen sammenlignet med et givent punkt i simuleringssmodellen kan være fejlbehæftet grundet de geometriske forskelle ved aflæsning på simuleringssmodellen i forhold til forsøgsopstillingen.

Ved at udføre flere simuleringer og ændre i størrelse af "grid", vil det være muligt at beregne værdier, der muligt svarer endnu bedre overens, når der sammenlignes mellem resultater fra forsøg og simulering. Dette er dog blevet fravalgt, da de fundne og sammenlignelige værdier er vurderet som tilstrækkelig tæt på hinanden til at validere modellen. Et andet aspekt er beregningstiden det tager at udføre en simulering, der stiger betydeligt, såfremt der vælges et større "grid".

En anden og vigtig forskel er arealet og antallet af huller i dampspærren ved forsøg sammenlignet med simulering. Modellen anvendt til simuleringer er et udsnit af vinduets sidekarm/ramme og den omkringliggende tagkonstruktionen, hvor dampspærren er perforeret to steder. Grunden til at simuleringssmodellen er perforeret to steder, er som tidligere beskrevet gjort for at simulere den teoretiske kontaminering med fugt, der vil kunne forekomme fra en utæthed i dampspærren og herefter videre til andre områder i konstruktionerne.

## Fugtophobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

I forsøget er der derimod, perforeringer i dampspærren seks forskellige steder, hvilket kan øge udbredelsen af fugt fra den ene utæthed til andre områder, sammenlignet med hvad der kan ses ved simuleringer og det ene sidesnit, der analyseres på.

Den største afvigelse af fugtindhold mellem målte og simulerede værdier ses ved fugtmålinger i spæret. Dette vurderes også at kunne skyldes de geometriske forhold og antallet af gennembrydninger i dampspærren, der gør sig gældende ved sammenligning af forsøg og simuleringer. Samtidigt er der for spærets vedkommende flere forskellige materialer og større afstand, som fugten skal transporteres igennem, i forhold til vinduerne, der mere eller mindre er i direkte kontakt med den fugtige indeluft. Da fugten derved skal gennem en længere "vej" og flere materialeovergange for at nå spæret, vil betydningen af dette afspejles forskelligt i simuleringen sammenlignet med forsøgsopstillingen.

Såfremt der yderligere i forsøgsopstillingen har været luftspalter til stede mellem de forskellige materialer ved og omkring spæret, vil dette endvidere være med til at skabe en forskel mellem simulering og forsøg. Områder hvor vanddampen fra indeklimaet vil kunne transporteres ved diffusion og konvektion, vil deraf være større i forsøg sammenlignet med simulering, hvilket også vil kunne ses i det konkrete vandindhold i spæret.

Afvielser mellem resultater af fugtindhold fra målinger i forsøgsopstilling og simuleringer i WUFI 2D kan ud over de ovennævnte afsnit, ligeledes skyldes fejl og mangler ved det benyttede udstyr til at måle og registrere på de mange forhold i forsøgsopstillingen. Dette vurderes umiddelbart ikke som en stor fejlkilde, da det anvendte udstyr og instrumenter løbende vedligeholdes og kalibreres i VELUX testcenter, men kan have en indflydelse, når der sammenlignes mellem forsøg og simulering.

Som forventet viser resultater af de dynamiske simuleringer et lavere vandindhold sammenlignet med den statiske forsøgsopstilling og den statiske simulering. De dynamiske simuleringer i WUFI ved fugtbelastningsklasse 3 og det valgte udeklima viser, at der forekommer en fugtophobning i både vinduer og spær i løbet af året.

Fugtindholdet i vinduerne bliver dog aldrig kritisk, og der opnås max-værdier på ca. 18 vægt-%, hvilket er lavere end 20-vægt %, der er grænsen for råd og trænedbrydende svampe. Dette er dog ikke ensbetydende med, at der aldrig vil kunne opstå kritiske situationer. I tilfælde af tidligere "skadet" og angrebet træ, vil der kunne ske råd og dannelse af trænedbrydende svampe allerede ved 15 vægt-% vandindhold.

Som registreret ved de statiske forhold, hvor vandindholdet for spæret var meget højt, viser de dynamiske simuleringer af spæret også, at vandindholdet kommer over det kritiske fugtindhold på 20 vægt-%. Hen over året kommer vandindholdet op på 21,3 vægt-%, og ligger i en periode omkring 4 måneder over 20 vægt-%.

Spæret er derved massivt eksponeret for mulig råd og nedbrydning, som i værste fald kan resultere i, at spæret mister sin bæreevne og funktion. Såfremt situationen var omvendt, og hvis det var i vinduerne at man konstaterede samme høje værdier af vandindhold, ville det ikke have de samme konsekvenser.

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Vinduerne ville langt lettere kunne udskiftes i forhold til spæret, og ville ikke kræve en ligeså kompliceret og kostbar arbejdsproces.

Umiddelbart ville man mene, at der ville være større forskel på vandindholdet i konstruktionerne afhængig af orienteringen, da en eventuel udtørring fra solen, vurderes at have en større virkning fra en sydvestlig orientering sammenlignet med en nordlig orientering. Simuleringerne viser derimod ikke nogen nævneværdig forskel, hvilket kan hænge sammen med, at effekten fra de udvendige materials overfladeegenskaber og evne til at absorbere solstråling, i første omgang ikke regnes med i WUFI 2D simuleringerne.

De dynamiske simuleringer hvor effekten fra stråling er medtaget viser derimod, at orienteringen har en betydning for vandindholdet i både vindues- og spærkonstruktionen. Der ses endvidere et generelt lavere vandindhold i de forskellige konstruktioner, når effekt fra stråling er medtaget, sammenlignet med de første dynamiske simuleringer uden.

Det maksimale vandindhold i både vindues- og spærkonstruktionen reduceres som forventet, samtidigt med at perioden med over 20 vægt-% vandindhold markant formindskes, især for den sydvestlige orientering af tagkonstruktionen, hvor antallet af dage over 20 vægt-% reduceres fra ca. 120 dage til ca. 50 dage. Antallet af dage over 20 vægt-% vandindhold for den nordlige orientering går fra ca. 120 dage til 80 dage.

Dette bekræfter forventningen om, at solens påvirkning og indvirkning på udtørring er størst for en sydvestlig orientering sammenlignet med en nordlig orientering.

Hvis der i stedet var valgt et andet tagmateriale og med andre overfladeegenskaber end den røde tegl som anvendt ved forsøgsopstilling og simuleringer, vurderes fugtforholdene at kunne se anderledes ud, og have påvirket udtørring anderledes. Det er svært at vurdere om det betyder, at man bør tage stilling til farve og andre overfladeegenskaber ved etablering af nyt tag udover bl.a. at kigge på det arkitektoniske aspekt, men det er i hvert fald interessant at tage med i sine overvejelser, både ved nybyggeri og reovering.

En mørk tagoverflade der bedre muliggør absorption af solstråling sammenlignet med f.eks. en lys og reflekterende tagoverflade, vurderes derfor potentielt at kunne øge tagkonstruktionens robusthed over for fugt.

Overordnet set, vurderes simuleringer i WUFI 2D som tilstrækkeligt realistiske til at kunne analysere fugtforhold, ud over dem forsøgsopstillingen afspejler. Der er dog nogle begrænsninger og usikkerheder, hvilket også ses, når de forskellige resultater mellem forsøg og simuleringer sammenlignes.

WUFI 2D muliggør gennem en udvidet version (WUFI Plus), at simulere på 3D konstruktioner, hvilket vurderes at kunne udelukke nogle af de beskrevne fejlkilder, og derved bl.a. bedre at kunne tage hensyn til geometriske og konstruktive forskelle mellem forsøg og simulering, der er med til at påvirke de hygrotermiske forhold. WUFI Plus vil altså kunne tilføje simuleringerne den dimension der mangler, når man sammenligner WUFI 2D med forsøgsopstillingen.



## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

Både forsøgsopstilling og simuleringer vurderes at underbygge faglitteraturens og egne forventninger om betydningen af en tæt dampspærre, såfremt råd og trænedbrydende svampe skal undgås.

Simuleringer i WUFI 2D kan hurtigere give en indikation af de konkrete fugtforhold, og lettere vise hvad det betyder, når forskellige parametre ændres i opsætningen. Forsøgsopstillingen vurderes dog stadig som den mest retvisende, også selvom den har fungeret statisk i hele forsøgsperioden.

En dynamisk forsøgsopstilling med mulighed for ændringer af både ude- og indeklima vil være den optimale løsning, men vil også kræve et helt andet setup, eller nødvendiggøre, at der i stedet f.eks. testes på et virkeligt hus eller en virkelig bygning.

## 10. Konklusion

Er der så et reelt behov for stor omhyggelighed ved dampspærretætning omkring tagvinduer?

Ja, det er der såfremt kritiske fugtforhold og fugtophobning skal undgås.

Både forsøg i klimakammer og simuleringer udført i WUFI 2D viser, at der sker en fugtophobning ved og omkring vinduer og spær mange af de steder, hvor dampspærren er defekt og ikke udført tæt.

De statiske forhold i forsøgsopstillingen medfører efter forsøgsperioden en kraftig stigning af vandindholdet i både vindues- og spærkonstruktionen, hvilket udelukkende registreres de steder, hvor der er huller i dampspærren. Der ses ikke nogen fugtophobning de steder hvor dampspærren er intakt.

De statiske simuleringer i WUFI 2D bekræfter stigningen af vandindholdet i og omkring de tilsvarende målepunkter fra forsøgsopstillingen. Der ses forskelle i værdierne for vandindholdet mellem 1,5->8 vægtprocent vandindhold, når målepunkterne sammenlignes ved statiske forhold mellem simuleringer i WUFI 2D og forsøgsopstillingen.

Forskellen mellem målte og simulerede værdier vurderes bl.a. at skyldes de geometriske, konstruktive og materialemæssige forskelle, der er ved sammenligning af en tredimensional forsøgsopstilling med en todimensional simulering.

Afvigelserne mellem målte og simulerede værdier antages at afhænge af hvor i konstruktionerne man specifikt aflæser værdien af vandindholdet. I simuleringsmodellen afhænger dette af det valgte "grid", hvilket derfor kan være fejlbehæftet i forhold til tilsvarende punkt ved forsøgsopstillingen.

Det samme gør sig ligeledes gældende for placering af huller i dampspærren, og for hvordan disse sammenlignes ved forsøg og simulering. Udover placeringen, vurderes antallet af perforeringer og forskellen i areal, at influere på resultaterne af vandindholdet.

De dynamiske simuleringer i WUFI 2D viser som ved de statiske forhold et forøget vandindhold i både vindues- og spærkonstruktionen.

De specifikke værdier for målepunkter i vindueskonstruktionen kommer ikke over 20 vægt-% vandindhold, men ligger stadig på et niveau, hvor der vil kunne opstå råd og nedbrydning, hvis området tidligere har været angrebet eller beskadiget af fugt.

Fugtindholdet i spærkonstruktionen kommer i en periode på 4 måneder over 20 vægt-% vandindhold, hvilket er grænseværdien for råd og dannelse af trænedbrydende svampe.

De dynamiske simuleringer uden hensyntagen til effekt fra stråling viser ikke nogen forskel på vandindholdet i de forskellige målepunkter, når der sammenlignes mellem nordlig og sydvestlig orientering. Orienteringen viser sig

## Fugtphobning ved og omkring tagvinduer som følge af utæt dampspærre

dog at have en markant betydning når effekten fra solstråling medtages, og er med til en reducere det generelle vandindhold i både vindues- og spærkonstruktionen.

Dette ses tydeligst for den sydvestlige orientering, hvor antallet af dage med over 20 vægt-% vandindhold i spæret reduceres fra ca. 120 dage til ca. 50 dage. For nordlig orientering reduceres antallet af dage over 20 vægt-% fra ca. 120 dage til 80 dage.

Det kan konkluderes på baggrund af resultaterne fra specialet, at der vil kunne opstå høje og kritiske niveauer af vandindholdet ved og omkring tagvinduer som følge af en utæt dampspærre, hvilket underbygger tesen om nødvendigheden af en tæt dampspærretilslutning.

## 11. Litteraturliste

Erik Brandt m. fl.: Fugt i bygninger – SBI-anvisning 224, 2. udgave. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitetet 2013.

Stig Geving og Jan Vincent Thue: Håndbok 50 – Fukt i bygninger. Norges byggforskningsinstitut, Oslo 2002

Roger Anneling og Bo Carlsson: Målningsbehandling av träfasader. Swedish National Testing and Research Institute, Borås 1993.

Byggeskadefonden: Guide til kvalitet i boligbyggeriet, 3. reviderede udgave 2014

Sundhedsstyrelsen: Helbredsproblemer ved fugt og skimmelsvampe i bygninger, version 1.1, 2006

Kurt Kielsgaard Hansen: Sorption isotherms, 1. udgave. The Technical University of Denmark, Copenhagen 1986.

BYG-ERFA: Dampspærre – monteringsdetaljer. Erfaringsblad (39) 15 12 29

Dansk Standard: DS/EN 13984 - Fleksible membraner til fugtisolerung - Dampspærre af plast og gummi - Definitioner og karakteristika. Dansk Standard, 2013

Dansk Standard: DS/EN 10077-2 - Termisk ydeevne for vinduer, døre og skodder - Beregning af varmetransmissionskoefficient - Del 2: Numerisk metode vedrørende rammer. Dansk Standard, 2012

Dansk Standard: DS/EN ISO 10211 - Kuldebroer i bygningskonstruktioner - Varmestrømme og overfladetemperaturer - Detaljerede beregninger. Dansk Standard, 2008

<http://www.phonixtagmaterialer.dk/losninger/fugt-og-materialer>

<http://www.trae.dk/leksika/>

<http://www.flixo.de/de/>

<https://wufi.de/en/>