

Fugthætten i praksis

Masteropgave

Master i bygningsfysik

v. Aalborg Universitet København



af

Casper Roland Norling
Studienummer: 20137693

Vejledere:
Eva Møller og
Martin Morelli



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

Studiesekretær: Julie Kastoft-Christensen
Telefon: 9940 2321
jkc@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse: Master i bygningsfysik

Semester: 4. semester

Titel på masterprojekt: Fugthætten i praksis

Projektperiode: 1. februar til 1. juni 2015

Vejleder: Eva B. Møller og co-vejleder Martin Morelli

Studerende:


Casper Roland Norling

Antal normalsider: 57 plus bilag

Afleveringsdato: 1. juni 2015

Sammenfatning

Ved fugtmålinger på eksisterende konstruktioner findes der umiddelbart ingen enkle og billige løsninger til direkte bestemmelse af fugtindholdet. De kendte løsninger har signifikante fejlkilder, og det er ikke altid helt entydigt, hvor højt et fugtindhold, en konstruktion fremstår med.

Derfor er der udviklet en fugthætte, der ved hjælp af et lille lukket kammer, der påklæbes en konstruktion, kan bestemme porefugtindholdet i konstruktionens overflade. Løsningen udnytter, at luften i hættens inden for et vist tidsinterval vil indstille sig i en ligevægt med porefugtindholdet.

Formålet med dette projekt var at teste fugthætten af i praksis på eksisterende konstruktioner. Dette er hovedsageligt sket på ubehandlede betonkonstruktioner med forskellige variationer af opfugtning. Dertil var formålet også, at vurdere "hukommelsen" af forskellige bygningsmaterialer samt at diskutere forhold som f.eks. overfladebehandlinger og diffusionstæthed.

I projektet er det vist, at stigningen af fugtindholdet i fugthætten efter opsætning på en konstruktion er forholdsvis forskelligt, hvilket i nogen grad afhænger af konstruktionens overfladebehandling. Derfor har det ikke været muligt at opstille en algoritme til bestemmelse af fugtindholdet i konstruktionen ud fra målinger inden for de første timer. Der har dog vist sig en sammenhæng mellem udviklingen i målingerne inden for de første 2 timer og så det endelige fugtindhold i fugthætten når der har indstillet sig en ligevægt. Denne sammenhæng er forklaret via et fremskrivningsskema, som er opstillet ud fra resultaterne i undersøgelserne.

Udtørringsforsøg er benyttet til at illustrere forskellen mellem de forskellige materials "hukommelse", hvor det viste sig, at mursten har en kortere udtørringstid end betonfliser. Resultaterne har dog også vist, at gipspladerne, der er benyttet i disse forsøg har haft en længere udtørringstid end murstenene, men dette skyldes det betydeligt højere indledende fugtindhold inden udtørringen i gipsen end i murstenene.

Endeligt er det vurderet, at diffusionstætheden af fugthætten spiller en ringe betydning i forhold til de resterende fejlkilder, såsom overfladens tilstand samt tilslutningsevnen mellem konstruktionerne og selve fugthætten.

Alt i alt er fugthætten et interessant og bestemt brugbart supplement til eksisterende anerkendte målemetoder, om end der fortsat er behov for videreudvikling og yderligere afprøvning. Mulighederne for praksis anvendelse vurderes særdeles gode, hvis forhold omkring specielt intern lagring løses.

Summary

There are numerous methods for measuring the moisture content in buildings and building materials. However, there are no easy and cheap methods for direct measurements of the moisture content. Furthermore the existing methods have various significant sources of error with respect to the actual determination of moisture content in a given material.

To meet this need for moisture measuring, the moisture hood has been developed. In general, it consists of an enclosed chamber, which is attached to a building material. When equilibrium between the moisture content in the material pores and the moisture content in the chamber is obtained and the moisture content in the pores can be measured.

The main focus in this project was to test the moisture hoods practical application on in existing buildings. This has mainly been on raw concrete walls with various amounts of moisture contents. Furthermore, it was the objective that the “memory” of different building materials should be investigated. Finally different wall coverings and water vapour resistance is discussed.

In this study it is shown that the increase in moisture content in the moisture hood when applied to different building material is rather diverse, mainly due to the condition of the surface. Due to these differences, it has not been possible to complete an algorithm for determination of the final moisture content based on short term measurements. However, a correlation between the first measurement and measurements after 2 hours have shown, that it is possible way to predict the moisture content in the material. This has resulted in a prediction scheme, which is presented in this report.

To illustrate the differences in “memory” as a function of building material, desiccation experiments have been performed. Here it is seen, that bricks have a shorter drying time than concrete tiles. The results also show, that gypsum boards have a longer drying time than bricks. This however, is caused by a much higher initial moisture content in the gypsum board study when compared to the study with bricks and concrete tiles.

Finally it is assessed, that the water vapour resistance of the moisture hood is of subordinate importance when compared to other error sources, such as the condition of the surface and the adhesion between the building material and the moisture hood.

In conclusion, the moisture hood is a fully applicable addition to existing moisture measurement methods, however, further experiments and testing is needed. At present the possibilities for use of the moisture hood needs to be complemented, especially with loggers with internal storage for optimal use.

Indholdsfortegnelse

1.	Indledning.....	5
1.1.	Problemformulering.....	5
1.2.	Afgrænsning	6
2.	Teori.....	7
2.1.	Fugt i bygninger.....	7
2.2.	Tilstandsformer og molekylær ladning	7
2.3.	Byggematerialer og fugt.....	9
2.4.	Sorptionskurver	12
2.5.	Målemetoder	15
2.5.1.	Kapacitive fugtmålere	15
2.5.2.	Elektriske modstandsmålere (indstiksmålere)	17
2.5.3.	Indbyggede træsensorer	18
2.5.4.	Fugtmålinger i borehuller.....	19
2.5.5.	Dataloggere	21
2.5.6.	Højfrekvensmålere	22
2.5.7.	Neutronkildemålere	23
2.5.8.	"Veje-tørre-veje" metoden	24
2.5.9.	Fugthætten.....	25
3.	Materialer og metoder	27
3.1.	Instrumenter og materialer.....	27
3.2.	Metodebeskrivelse	27
4.	Resultater	30
4.1.	Opfugtede konstruktioner.....	30
4.2.	Sammenligning af fugthætten med andre målemetoder	32
4.2.1.	Veje-tørre-veje-prøver	35
4.3.	Materialernes "hukommelse"	36
5.	Diskussion	38
5.1.	Opfugtede konstruktioner.....	38
5.2.	Materialernes "hukommelse"	42
5.3.	Vurdering ift. andre målemetoder	47
5.3.1.	Veje-tørre-veje-prøver	48
5.4.	Fejlkilder.....	50
5.5.	Fugthættens tæthed	51
5.6.	Funktion af hætten.....	52
6.	Konklusion og perspektivering	53
6.1.	Konklusion	53
6.2.	Perspektivering.....	55
7.	Kildehenvisninger	56

1. Indledning

Dette projekt er en del af uddannelsen ”Master i bygningsfysik” ved Aalborg Universitet København. Uddannelsen er taget over 2 år fra august 2013 til juni 2015. Nærværende afslutningsprojekt, svarende til 15 ECTS-point, er udarbejdet af Casper Roland Norling, indeklimatechef hos Skandinavisk Bio-Medicinsk Institut A/S (SBMI) i Hørsholm.

I forbindelse med projektet skal der ydes en stor tak til:

Vejleder Eva B. Møller, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København
Co-vejleder Martin Morelli, Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet København
SBMI A/S, herunder direktør Claus Lundsgaard,
Personalet på Hedegårdsskolen, Ballerup, og
Ejendomskontoret i Islevvænge, Rødovre.

1.1. Problemformulering

Fugthætten har til formål at give et hurtigt billede af fugtindholdet i en udvalgt bygningsdel i en eksisterende bygning. Oprindeligt var det tanken, at metoden skal benyttes i forbindelse med Huseftersynsordningen. Målinger er dog for ganske nyligt er blevet fravalgt i ordningen. Metoden kan dog generelt være nyttig, hvis der ønskes en hurtig og ikke-destruktiv måling af fugtigheden i overfladen af et byggemateriale. Det er endnu ikke helt fastlagt, hvordan metoden skal benyttes i praksis, og derfor behøves flere tests og analyser af resultater for at give en brugbar målemetode, som kan give et retvisende billede.

Metoden fungerer i praksis ved at en plastichætte med en datalogger placeres direkte på et byggemateriale, hvor fugtindholdet ønskes målt. Ved at måle temperatur og luftfugtighed i hættens, kan fugtindholdet i materialets poreluft i overfladen af materialet findes.

I projektet vil der blandt andet blive diskuteret overfladebehandlinger, behov for indledende eller supplerende målinger, fejlkilder, måleperiode samt andre fugtmålemetoder.

Der vil i projektet ligeledes blive redegjort for, hvilke forhold der spiller ind når placeringen af fugthætten skal udvælges. Herunder om denne skal placeres på en bygningsdel i opholdsrum, mest fugtbelastede rum, mest kritiske rum eller et helt fjerde sted.

Ved afprøvning af udstyret skal der analyseres på måletiden. De hygrotermiske forhold inde i hættten ændrer sig over tid fra opsætning og i timerne derefter. Der er vigtigt at kunne estimere slutresultatet indenfor en overskuelig tidsperiode, da det ved den endelige udførelse i forbindelse med en besigtigelse/undersøgelse ikke vil være muligt at måle over længere tid (i praksis nok ikke længere end 1½-2 timer). Det er derfor vigtigt at få fastlagt hvordan udviklingen af fugtforholdene i hættten ville udvikle sig i timerne efter nedtagning af måleudstyret.

Tætheden af plasthættten er måske afgørende for, om resultatet er retvisende. Forholdene udenfor hættten er derfor vigtige, da det skal klarlægges, om disse har indflydelse på det målte resultat. Er der for eksempel risiko for "tab" af fugt til omgivelserne, hvis plasthættten sidder på en opfugtet bygningsdel i et rum med lav relativ luftfugtighed?

1.2. Afgrænsning

I denne opgave er der hovedsageligt målt på eksisterende (ubehandlede) betonkonstruktioner, da sådanne konstruktioner er hyppigt forekommende i kældre og andre steder, hvor der er høj fugtbelastning. Samtidig er konstruktionen enkel og desuden uden overfladebehandlinger samt udefrakommende påvirkninger som ændret adfærd/udluftningsmønstre osv.

Der har i prøveperioden været adgang til en kælder/krybekælder under Hedegårdsskolen i Ballerup, hvor der også har været mulighed for at foretage supplerende målinger med andet måleudstyr, herunder udtagning af prøver til veje-tørre-veje forsøg. Derfor er målinger på betonkonstruktioner rimelig godt undersøgt, hvorimod der ikke er foretaget målinger på murværk og kun i begrænset omfang på gipsplader. Andre materialer såsom porebetonvægge, vægge med forskellige overfladebeklædninger og lette vægge er ikke undersøgt i denne rapport.

I forbindelse med beslutningstagen om, hvornår en bygningsdel er opfugtet, kræves en politisk stillingtagen til, hvad man kan forvente af bygningerne i forhold til byggeperiode og byggestil. Hvornår betragtes en bygningsdel som "opfugtet udover det acceptable". Forhold omkring dette samt ansvar i forbindelse med hussalg og påvisning af opfugtede konstruktioner er ikke behandlet i denne opgave.

Eftersom alle målinger i denne rapport er udført ved temperaturer omkring 20-23 °C (selv i kælderen under Hedegårdsskolen), er der ikke foretaget korrektion for temperaturvariationer i denne rapport. Temperaturafhængigheden er derfor ikke behandlet nærmere.

2. Teori

2.1. Fugt i bygninger

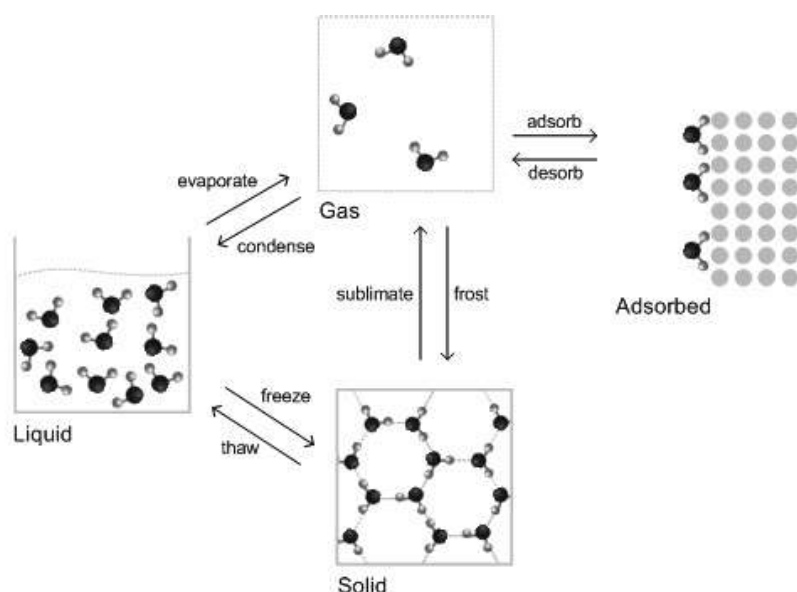
Bygningerne i Danmark påvirkes hele tiden af både temperatur, fugt, vind, laster og meget andet. En af de vigtigste parametre, når det handler om menneskers sundhed, er fugten. Der er således i lægefaglig litteratur langt større sammenhæng mellem fugtige bygninger og sundhedsgener end der er mellem skimmelsvamp og sundhedsgener (Sundhedsstyrelsen, 2009).

Vores bygningskonstruktioner optager og afgiver hele tiden fugt til eller fra omgivelserne, hvilket i visse tilfælde kan vise sig problematisk. Fugtindholdet i en konstruktion eller et materiale er bl.a. medvirkende til at definere konstruktionens/materialets holdbarhed, levetid, isoleringsevne, udseende, modstandsdygtighed overfor svamp (og råd) og meget andet. For at undgå disse problemer, kræves forståelse for fugtteknik, fugttransport og materialesammensætning.

Enhver bygningsdel består af et eller flere materialer. Hvert materiale har forskellige evner til at optage eller afgive fugt. Når et materiale kommer i kontakt med fugtholdig luft, vil materialet optage fugt fra luften for at indfinde en ligevægtstilstand mellem fugtindholdet i materialet og den omgivende luft, kaldet absorption. Det samme gør sig gældende, hvis et fugtholdigt materiale kommer i kontakt med en tør luft. Så vil materialet afgive fugt til luften, igen for at indfinde sig i en ligevægt, i dette tilfælde desorption. Undtaget fra dette er metaller, glas og andre materialer, som er så tætte, at der ikke kan trænge vanddamp ind i dem. Hastigheden af opfugtning eller affugtning af konstruktionen afhænger i høj grad af byggematerialets fysiske opbygning, for størstedelen materialets porøsitet.

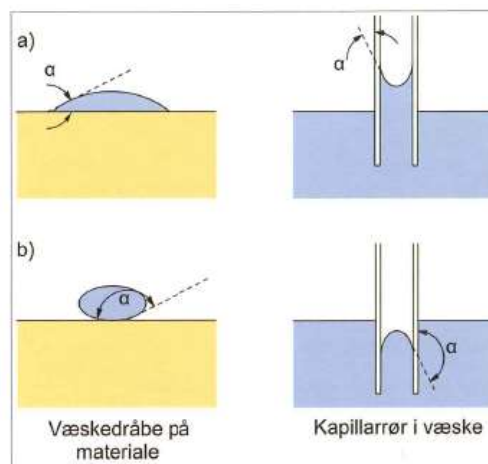
2.2. Tilstandsformer og molekylær ladning

Fugt (vand) kan, ligesom de fleste andre materialer, optræde i forskellige tilstande. Det kan således antage flydende form (vand), fast form (is) og på gasniveau (damp). Derudover er der forskellige former for absorberede tilstande eller faser (se Figur 1). Inden for det normale temperaturniveau her på jorden, oplever vi relativt ofte vand i alle tilstandsformer, hvor de absorberede faser nok er dem, der lægges mindst mærke til i dagligdagen. Absorption (og desorption) foregår i forbindelse med den fase, hvor vand optræder som gasart (damp).



Figur 1. Tilstandsformer for vand samt processerne ved faseændringer (Straube, 2006).

Som udgangspunkt består vand i alle faser af et molekyle med to positivt ladede hydrogenatomer og et negativt ladet oxygenatom og har en størrelse på 0,3 nanometer i diameter (Straube, 2006). Opbygningen af H_2O -molekylet gør, at det fungerer som en slags magnet pga. dets ladning. Det er også derfor, at vanddråber kan "hænge fast" på huden når man sveder eller efter et brusebad (kaldet adhæsion). Denne adhæsion gør også, at vandet kan suges op i kapillarer/porer i forskellige materialer, hvor også kræfterne mellem de enkelte vandmolekyler kommer i spil (kaldet kohæsion). Kohæsiionskræfterne er skyld i, at overfladespænding kan forekomme. Omvendt gør adhæsionen også, at vandet frastødes, hvis det kommer på en flade med modsat ladede molekyler. Vand, der kommer i kontakt med en overflade, vil altid lægge sig i en specifik vinkel alt efter, hvilken adhæsion, der er mellem vandmolekylerne og materialet. Denne er kaldet kontaktvinklen. Ved de fleste byggematerialer er kontaktvinklen meget lille, tæt på 0, hvilket gør at vanddråben bliver meget stor og fugter overfladen (se eksempel på Figur 2). Overfladespændingen er i dette tilfælde også skyld i, at en væske vil suges op i et kapillarrør, hvis det stikkes ned i væsken (Brandt et al., 2009). Disse kræfter er også i spil når det handler om vandtæthed og damppermeabilitet, hvilket i praksis oftest ses i forbindelse med vandafvisende overfladebehandlinger, som er vandtætte, men åndbare (Straube, 2006). Her bliver kontaktvinklen mellem vanddråben og materialet meget stor, og overfladen på materialet bliver ikke fugtet. I tilfældet med kapillarrøret i en væske, vil overfladespændingen resultere i, at væsken bliver trykket ned i røret (Brandt et al., 2009).

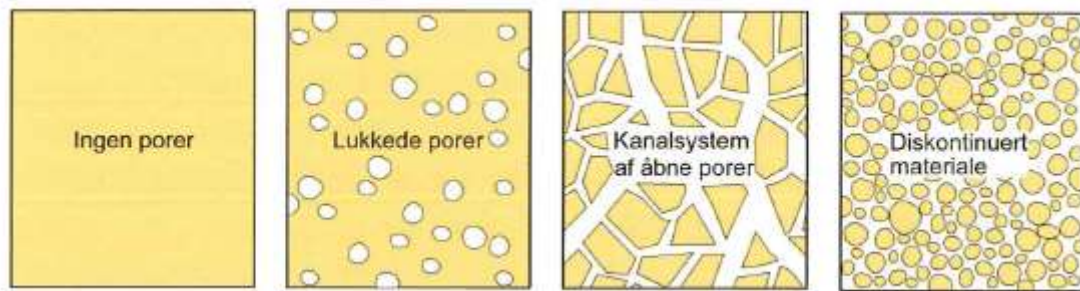


Figur 2. Adhæsion mellem vækst og underlag. Ladningen af molekylerne afgør, hvordan en dråbe aflejres på overfladen, men også hvordan overfladespændingen påvirker kapillarsugning (Brandt et al., 2009).

2.3. Byggematerialer og fugt

Et byggemateriale er i de fleste tilfælde produceret med en hvis mængde fugt, der er tilført ved fremstillingen. Denne fugt kan enten være bundet kemisk i materialets molekylestruktur eller det kan være aflejret i materialets porestruktur. Kemisk bundet vand kan ikke fjernes ved almindelig absorption eller desorption, hvorfor dette normalt ikke regnes som fugt.

Ud over fugt, der er tilført ved fremstillingen af materialet, kan der være tilført (eller fjernet) fugt fra tilstødende materialer eller som følge af direkte påvirkning fra utætheder, nedbør eller lækager. Størrelsen af porerne i materialet er afgørende for, hvor store mængder fugt, der kan optages i materialet. Porestørrelsen er også afgørende for, hvor hurtigt materialet optager og afgiver fugt. Ligeledes afgør porestørrelsen, i hvor stor grad materialet har kapillære evner. Der er mange forskellige måder at inddеле materialer i grupper. For eksempel kan materialerne inddeles alt efter deres molekylesammensætning, hvor organiske materialer er baseret på molekyler af kul- og hydrogenatomer, mens mineralbaserede materialer er baseret på molekyler af silikat og calcium. Materialer kan også opdeles i enten hygroskopiske eller ikke-hygroskopiske materialer, baseret på deres porestruktur. De ikke-hygroskopiske omfatter bl.a. metaller, glas og visse plastdele, som ikke er porøse, og umiddelbart ikke kan optage fugt. De hygroskopiske kan igen inddeles i 3 underkategorier, hvor materialets struktur er afgørende for, hvordan det kategoriseres og samtidig dets evne til at optage og afgive fugt. Inddelingen i de forskellige materialeklasser ud fra poresammensætningen kan ses i Figur 3. (Brandt et al., 2009)



Figur 3. Poreopbygning i forskellige byggematerialer. Materialet til venstre er ikke-hygroskopisk, mens de resterende tre materialer er hygroskopiske (Brandt et al., 2009).

Materialernes hygroskopiske egenskaber er således bestemt af materialets porestruktur.

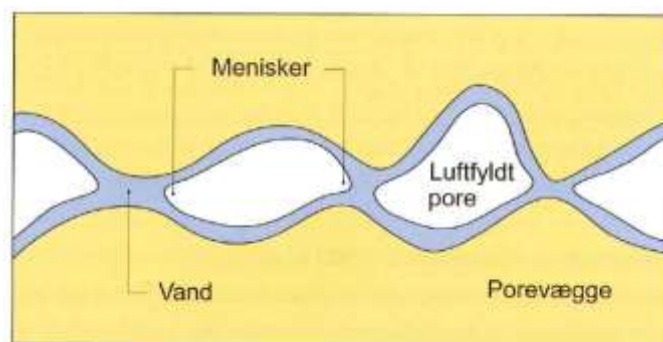
Porestrukturen og porestørrelsen er samtidig afgørende for, hvordan et materiale optager og afgiver fugt, f.eks. ved kapillarsugning. Ved grove porer i materialet, vil optagelsen af vand ske hurtigt. Det samme er gældende for afgivelsen af vand, hvis materialet efterfølgende lægges et tørt sted. De grove porer gør imidlertid også, at vandet ikke kan suges så langt op i materialet. Kapillarsugningen er således begrænset. I et materiale med et kanalsystem af fine porer, er kapillarsugningen til gengæld meget højere, hvorfor opstigning af fugt i f.eks. støbte betonkonstruktioner eller murede konstruktioner med pudslag kan være flere meter, hvis fugtkilden af en vis størrelse eller konstant.

Når et materiale absorberer fugt, vil det både lagres på porernes overflade (adsorption), men også i selve poresystemet og ved hjælp af kapillarkondensation eller osmotiske kræfter. Først og fremmest vil et materiale adsorbere alt det fugt, det kan. Når dette er sket, kan der oplagres yderligere fugt ved kapillarkondensation og til sidst ved materialets osmotiske kræfter.

Mængden af fugt, der kan bindes ved adsorption afhænger i høj grad af materialets specifikke overflade. Det vil sige overfladen af materialet inkl. overfladen af porer i materialets struktur. Denne specifikke overflade kan være mange tusind gange større end materialets udvendige overflade. Når materialet udsættes for en fugtpåvirkning, vil der først og fremmest ske adsorption, hvor fugten "lagres" på overfladen i porerne. Ved fortsat fugtpåvirkning, vil resultere i en fortsat stigning i de adsorberede molekyllag, mens den luftfyldte del af porerne konstant bliver mindre. Der regnes med, at der normalt kan adsorberes op til 30 molekyllag i et materiale. For eksempel vil træ kunne optage omkring 25 til 30 vægt-% fugt fra luften som adsorption, hvis det lægges i et klima med 98 % relativ luftfugtighed. Fuldt opfugtet træ kan imidlertid indeholde 2-3 gange så meget fugt, hvis det udsættes direkte for flydende vandtilførsel. Teoretisk set kan selv de allerstørste porer fyldes med vand, men alligevel regner der med en praksis grænse omkring 98 %

RF for hygroskopisk bundet vand. Når træet er mættet, vil det ikke være i stand til at optage mere fugt. Hvis det fortsat udsættes for massiv fugtpåvirkning, vil det blive over-mættet, og drænmekanismer i materialerne vil begynde at fjerne den overskydende fugt.

Efter der ikke kan optages mere vand i materialet ved adsorption begynder en kapillarkondensation. Dette skyldes sekundære virkninger af adhæsiionskræfterne i materialet. Det er de almindelige fysiske love, der styrer kapillarkondensationen på trods af materialernes forskellige porestørrelse og -form. Ved tilstrækkelig fugtpåvirkning, vil molekyllagene på hver side af porerne på et tidspunkt nå hinanden flere steder. Herved fyldes porerne lokalt helt med vand, og der opstår luftfyldte lommer i materialets porestruktur, se Figur 4. I hver ende af de luftfyldte lommer bliver der dannet en konkav overflade, som betegnes menisker. Når frie vandmolekyler nærmer sig disse menisker, sker der en kraftigere tiltrækning end hvis det havde været en plan overflade. Dette gør, at de frie vandmolekyler derfor kan indfanges. Det sker simpelthen en kondensering til trods for, at den relative luftfugtighed endnu ikke har nået 100 %, også kaldet kapillarkondensation. Kapillarkondensation er ubetydelig ved lave relative luftfugtigheder, men ved 80-90 % relativ luftfugtighed og derover begynder kapillarkondensation at få mere og mere betydning.

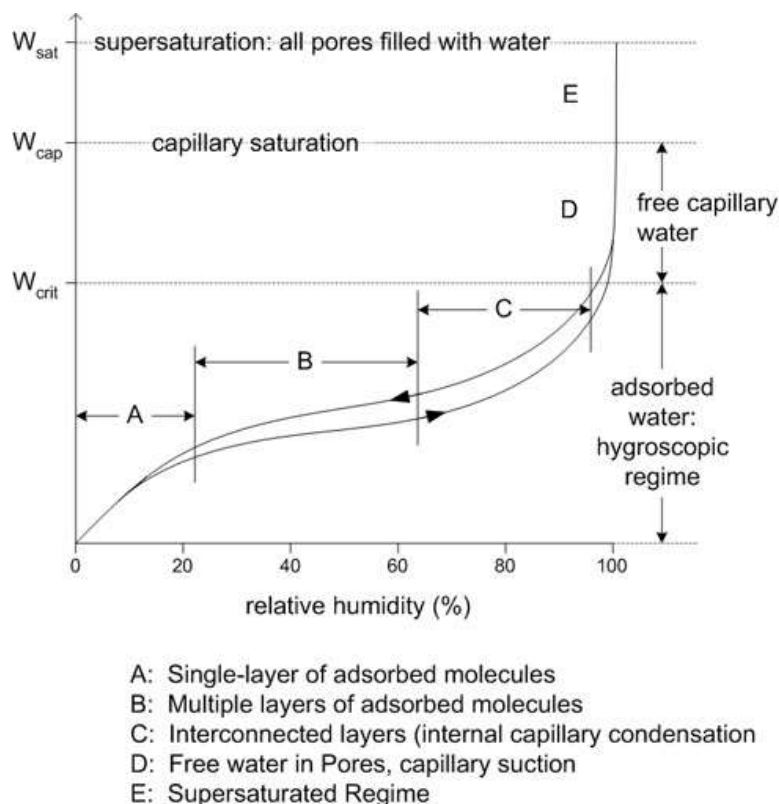


Figur 4. Fugtlagenes tykkelse stiger som konsekvens af fortsat fugttilførsel. Ved tilstrækkelig fugtmængde, vil de to modstående sider på et tidspunkt nå hinanden og skabe luftfyldte hulrum i porestrukturen (Brandt et al., 2009).

Mange materialer indeholder salte, hvilket påvirker vanddamptrykket i materialet. Dette kan medføre, at der optages vand ved osmotiske kræfter. Normalt regnes der ikke med osmotisk bundet vand, da det kan være svært at skelne fra adsorberet vand.

På Figur 5 herunder, kan de forskellige sorptionsområder ses. I område A-C foregår sorption i først ét molekyllag, hvorefter det foregår et flere molekyllag. Når der er adsorberet tilstrækkeligt fugt i

flere molekyllad, opnås område D, som er kapillærkondensations-området. Område E er overmættet, og således området, hvor der skal fjernes fugt inden nyt kan tilføres.



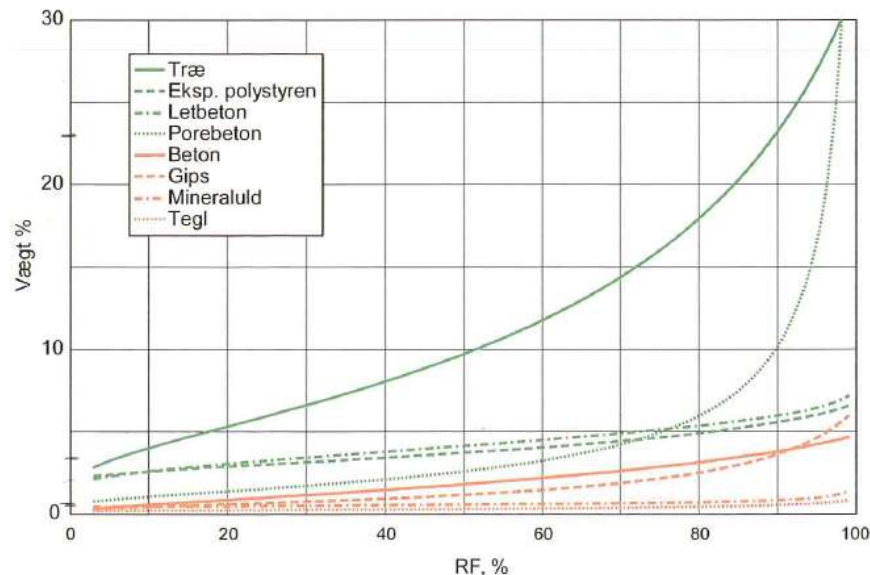
Figur 5. Fugtoptagelse i et hygroskopisk, porøst materiale (Straube, 2006).

2.4. Sorptionskurver

Et materiale vil altid forsøge at opnå en ligevægt med sine omgivelser, når det handler om fugtindholdet. Det vil sige, at materialet udveksler fugt med luften indtil der opnås en fugtligevægt. Fugtligevægten opgives normalt i enten vægtprocent eller kg/m^3 . Hvis den relative luftfugtighed, som materialet er udsat for ændres, vil der foregå en fugtvandring enten til eller fra materialet. Dette vil så medføre en vægtændring af materialet. I begyndelsen vil ændringen foregå hurtigt, mens den vil foregå stadigt langsommere, jo tættere på den nye fugtligevægt, materialet kommer. Det afsluttes med, at der indfindes en ny fugtligevægt.

Sammenhængen mellem et materiales vandindhold, som er i ligevægt med luftens forskellige relative luftfugtigheder, beskrives bedst ved kurver, kaldet sorptionskurver (eller fugtligevægtskurver). Hvert materiale har sin specifikke sorptionskurve, som oftest udledes eksperimentelt. Sorptionskurver for de mest almindelige byggematerialer kan ses i Figur 6. Desuden er der for enkelte materials vedkommende udledt formeludtryk, som beskriver

sorptionskurven, på baggrund af eksperimentelle data, f.eks. (Hansen, 1986). Sorptionskurven er temperaturafhængig, så hvis temperaturen i et materiale ændres, vil den tilsvarende sorptionskurve ligge højere (ved lavere temperatur) eller lavere (ved højere temperatur) i forhold til kurverne på Figur 6 (Nielsen, 1997).



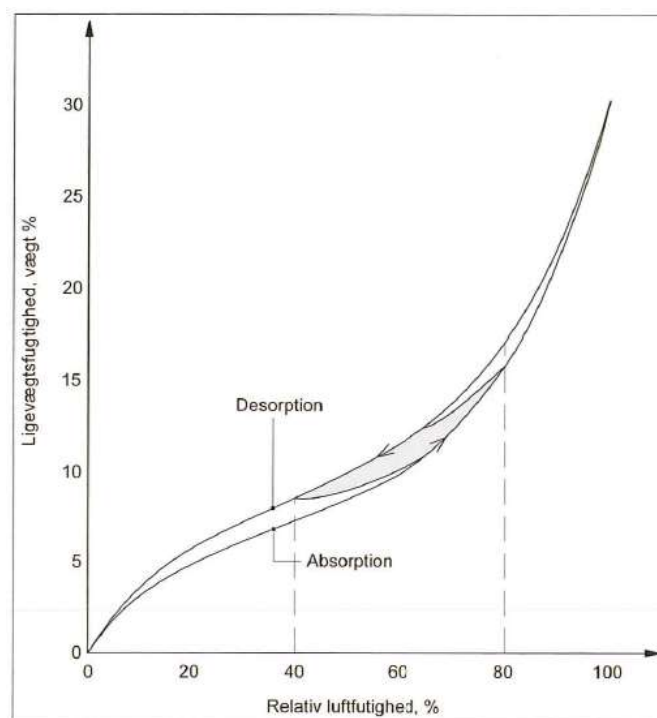
Figur 6. Sorptionskurver for almindelige byggematerialer (Brandt et al., 2009).

Sorptionskurven består, som vist i Figur 5, af tre områder (A-C, D og E) med hver deres karakteristika. Ligeledes kan sorptionskurver være meget forskellige, selv inden for ellers tilsyneladende ens byggematerialer. Kurven afhænger i høj grad af materialets densitet og porestruktur.

Når der arbejdes med fugtoptagelse eller fugtafgivelse i et materiale findes én sorptionskurve for opfugtning (absorptionskurve) og én sorptionskurve for udtørring (desorptionskurve), hvor afvigelsen mellem disse betegnes hysteres (se Figur 7). I praksis befinder de fleste materialer sig oftest et sted mellem de to sorptionskurver, hvilket vil sige, at ved materialer, der skiftevis er udsat for opfugtning eller udtørring, så ligger fugtindholdet et sted på en linje mellem de to sorptionskurver. Det er porestrukturen i materialet der afgør, hvor stor forskellen mellem de to kurver er. Normalt ses der bort fra hysteres, og der anvendes i stedet en middelkurve, som blot betegnes "sorptionskurven".

Som tidligere nævnt, så vil fugtindholdet i et materiale øges, hvis den omgivende luftfugtighed øges. I mange byggematerialer (med undtagelse af træ), er der dog ringe stigning af fugtindholdet

(i vægt-%) i materialet i forhold til stigende luftfugtighed. Dette er gældende for f.eks. murværk, beton og tilsvarende uorganiske materialer. Der er således ikke direkte sammenhæng mellem den relative luftfugtighed og et materiales fugtindhold, hvorfor omregning mellem de to forhold er forbundet med stor usikkerhed, især for materialer som beton og murværk. Der findes mange forskellige måder at måle fugtindholdet i et materiale, hvor de mest almindelige er beskrevet i næste afsnit.



Figur 7. Desorptionskurve og absorptionskurve.
 Området mellem kurverne betegnes som hysteresis (Brandt et al., 2009).

2.5. Målemetoder

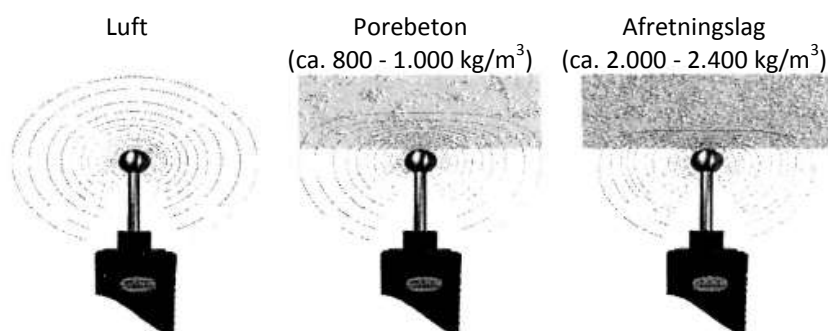
Når fugtindholdet i et materiale skal bestemmes, er der mange forskellige metoder at gøre dette på. De fleste metoder er relative og giver ikke et direkte mål for fugtindholdet i materialet ligger på. Nedenfor er de mest anvendte og anerkendte målemetoder beskrevet nærmere.

2.5.1. Kapacitive fugtmålere

Den mest almindelige og lettest tilgængelige målemetode er ved anvendelse af en kapacitiv fugtmåler. Denne angiver f.eks. på en arbitrær skala et tal, som kan henledes til et kendt område, som indikerer enten tørt eller opfugtet. Alternativt kan kapacitive fugtmålere også være udstyret med en skala, som indikerer om et materiale er tørt eller fugtigt. Dette er imidlertid yderst usikkert, da sådanne skalaer er meget materialeafhængige.

Metoden er umiddelbart hurtig og ikke-destruktiv, hvilket er de største fordele ved brug af en sådan målemetode. Ligeledes kan metoden benyttes til måling gennem overfladebeklædninger, såfremt man er opmærksom på eventuelle forstyrrende materialeg. Ved målinger med en kapacitiv fugtmåler, kan der således hurtigt skabes et overblik over, hvordan fugtdistributionen er i en konstruktion (f.eks. en kældervæg). Det er dog oftest nødvendigt at verificere målemetoden med andre målinger, hvis der er behov for mere præcise resultater.

Det er dog vigtigt at tage højde for, at målingen kun sker i de yderste centimeter af den overflade, der måles på. Måledybden er afhængig af materialets densitet og eventuelle tilsætningsstoffer (f.eks. salte). Princippet kan ses på Figur 8. Dette gør også, at det ikke kan identificeres *hvor* i det målte materialeg, det fugtigste område optræder. F.eks. kan overfladen i en bruseniche godt fremstå med et detekterbart fugtindhold i flisebeklædningen/vægbeklædningen, mens den bagvedliggende murværk/beton kan være relativt tør. Omvendt kan også det yderste afretningslag og flisebeklædning på et kældergulv være tørt, mens det underliggende betonlag kan være opfugtet. Dette kan ikke identificeres nærmere ved en kapacitiv måling.



Figur 8. Princippet ved fugtmåling med kapacitiv fugtscanner. Måledybden er meget afhængig af materialets densitet (Gann, 2011).

Den capacitive fugtmåler er udstyret med en ledende føler, som f.eks. kan udgøres af en kugle, plade eller bøjle (se Figur 9). Ved placering af føleren på et materiale, bliver der påtrykt en spændingsforskel, hvorved kapacitansen bestemmes ved at benytte vands dielektricitet (Brandt, 1990). Føleren bliver presset mod den flade, der ønskes undersøgt, hvorefter den angiver måle"resultatet" på enten en visuel skala, med opgivelse af et tal på en arbitrær skala eller med en angivelse af det absolutte fugtindhold. I det sidste tilfælde er det vigtigt, at der er kendskab til den præcise kalibrering af instrumentet samt korrekte materialespecifikationer på det materiale, der undersøges.



Figur 9. Eksempler på kapacitive fugtscannere. Til venstre en Tramex fugtscanner med pladeføler (Amazon, 2015), i midten en Gann fugtscanner med kugleføler (Svenskatermoinstrument, 2015) og til højre en Testo fugtscanner med bøjleføler (Bønsøe, 2015).

Samtidig er der også risiko for, at forskellige fremmedobjekter eller tilsætningsstoffer kan påvirke målingerne. En kapacitiv fugtmåler vil således give udslag, hvis der måles i områder, hvor der er lagt vandrør eller elledninger ind i materialet, der måles i. Ligeledes vil armeringsjern i betonkonstruktioner kunne give "falsk" udslag på en kapacitiv fugtmåler. Også andre ledende materialer, som alukraft eller lignende, vil give udslag i målingen. Endeligt kan også saltindholdet i f.eks. en betonkonstruktion påvirke målingen.

2.5.2. Elektriske modstandsmålere (indstiksmålere)

Indstiksmålere eller stikbensmålere benyttes oftest til måling i trækonstruktioner. Ved måling i beton, porebeton, murværk eller gips er det usikkert, om materialet slutter tæt nok til elektroderne til, at måleresultatet ikke bliver påvirket. Derfor er indstiksmålere uegnet til måling i sådanne materialer.

Metoden tager udgangspunkt i, at den elektriske modstand i et materiale (træ) afhænger af materialets fugtindhold. Selve målingen foregår ved, at materialets overflade brydes af to elektroder (stikben), som stikkes ind i materialet. Derefter måles modstanden gennem de træ, der ligger mellem elektroderne og omsættes til fugtindhold i vægt-%. Også træets densitet, indhold af f.eks. harpiks og temperaturen er afgørende for den målte modstand. Ved træfugtmålinger med indstiksmåler er temperaturintervallet, der måles i, normalt meget lille, hvorfor der ofte ses bort fra temperaturafhængigheden. Normalt er målerne kalibreret til fyr eller gran, som er mest almindeligt ved byggeri i Danmark, men der kan også fås indstiksmålere med forskellige kalibreringsskalaer, hvis der f.eks. måles i hårde træsorter som rød/hvid eg eller teak. Alternativt kan producenten af måleren oftest levere en omregningstabel til brug ved målinger i andre træsorter end den, som måleren er kalibreret til.

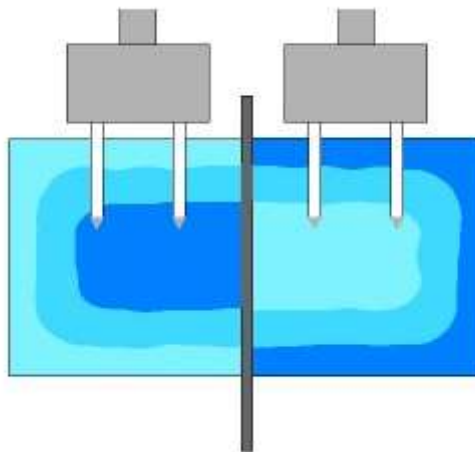
Ved praktisk måling med indstiksmålere opnås det mest retvisende resultat, hvis der måles på langs med fibrene i materialet. Måling i f.eks. endetræ eller knaster kan desuden give fejlbehæftede resultater. Dette er også gældende for trykimprægneret træ.

Måling med indstiksmålere efterlader normalt ubetydelige, men dog synlige, huller efter elektroderne.

Måleområdet ligger for de fleste indstiksmålere på 7-25 % fugtindhold og med en usikkerhed på omkring ± 1 %, hvilket er dækkende for målinger af træfugt i indeklimaet. Måles der værdier på over 25-28 % er dette en indikation for, at træets fibermætningspunkt er nået, og at der befinder sig frit vand i træets porer, hvorfor resultatet ikke kan betragtes som retvisende. Dog er det en indikation af, at der er over 28 % træfugtindhold i den undersøgte trækonstruktion.

Stikbensmålere fås i to udformninger. Med isolerede ben og med ikke-isolerede ben. Den uisolerede måler kan påvirkes i hele benenes længde, mens den isolerede måler kun måler på spidsen af stikbenene. Dette kan ses i illustrationen på Figur 10. På figuren ses to scenarier, hvor der foretages fugtmåling i et stykke træ. Til venstre er træet under udtørring, mens der i scenariet

til højre foregår opfugtning af materialet. Hvis der til målingen benyttes en indstiksmåler med uisolerede ben, vil der i begge tilfælde måles opfugtning, da den uisolerede del af benene i begge tilfælde vil være i kontakt med det opfugtede område. Hvis der i stedet benyttes en indstiksmåler med isolerede ben, vil der i scenariet til venstre kunne måles fugt, mens der i scenariet til højre ikke vil detekteres fugt i materialet. Derfor kan måling med indstiksmålere af begge typer med fordel benyttes ved fugtmålinger i træ.



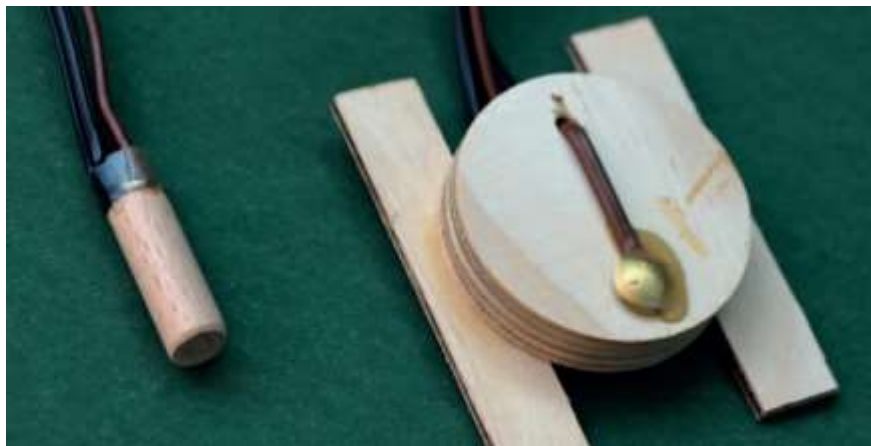
Figur 10. To forskellige situationer ved fugtmåling med indstiksmåler. Til venstre med fugt i midten af materialet (typisk under udtørring) og til højre med fugt i yderkanten af materialet (typisk under opfugtning). Mørke områder er med højest fugtindhold (Byg-Erfa, 141004).

2.5.3. Indbyggede træsensorer

Hvis der er behov for at følge fugtindholdet i en konstruktion gennem længere tid kan der benyttes træsensorer til indbygning i konstruktionen. Umiddelbart bliver der i Danmark benyttet to typer af træsensorer, som er beregnet til fugtmålinger i konstruktioner. Disse er fugtmålerondeller eller fugtmåledyvler (se Figur 11). Princippet med træsensorerne er som ved indstiksmåleren/stikbensmåleren, at to elektroder er indbygget i et træstykke, som indbygges i det materiale, som skal undersøges nærmere. Lige som med stikbensmåleren er det den elektriske modstand mellem elektroderne, der kan omregnes til det absolutte fugtindhold. For både rondellernes og dyvlernes vedkommende gælder, at modstanden måles med et ohmmeter. I forbindelse med målinger i træsensorer er det nødvendigt også at måle temperaturen, da modstandsmålinger er meget afhængige af temperaturen. I modsætning til måling med indstiksmålere, benyttes indbygningssensorer oftest ved større temperaturudsving, hvorfor dette får betydning her. Ved måling i materialer, der er i kontakt med indeklimaet er

temperaturvariationen ikke så stor, men i lukkede konstruktioner som f.eks. tagkonstruktioner, kan der være store forskelle på minimum og maksimum temperaturen. Til måling af temperaturen kan der være indbygget et termoelement i føleren, som kan aflæses samtidig med modstandsmålingen foretages. Modstanden og temperaturen kan herefter benyttes til at bestemme fugtindholdet ved hjælp af en kalibreringskurve eller ved omregning på formelbasis.

Ved fugtmåling med træsensorer kan der måles fugtindhold op til træets fibermætningspunkt på 28 % træfugtindhold. Målinger herover medfører, at fugtindholdet ikke kan bestemmes, men blot viser, at det er højt. Usikkerheden ved målemetoden er ± 1 %.



Figur 11. Til venstre en fugtdyvel og til højre en fugtrondel (Byg-Erfa, 141005).

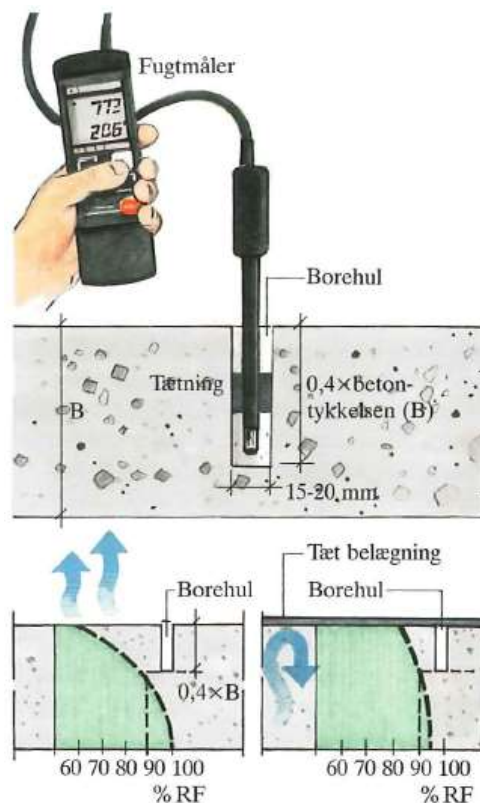
2.5.4. Fugtmålinger i borehuller

Fugtindholdet i f.eks. en betonkonstruktion kan også bestemmes ved at måle den relative luftfugtighed i borehuller, som er forseglet med en prop eller lignende. Denne metode bruges især i forbindelse med lægning af trægulve, der kræver, at fugtigheden i det underliggende betondæk kommer ned på et vist niveau, hvis ikke trægulvet i fremtiden skal få skader af forhøjet fugtindhold. Dog er metoden også velegnet til måling i andre materialer såsom porebeton og murværk.

Selve målingen foretages ved at der udvælges et vist antal steder på konstruktionen, hvor der skal foretages målinger. Herefter bores huller i konstruktionen med en diameter på 15 til 20 mm. Det er vigtigt, at der er fri luft omkring måleapparatets hoved, så dette ikke er i kontakt med betonen (eller andet materiale, hvor fugtindholdet skal bestemmes). Måledybden kan frit vælges, men hvis der måles i en betonkonstruktion med en tæt belægning er det vigtigt, at der måles i den

nogenlunde korrekte højde, da fugtdistributionen i betonen er afhængig af muligheden for afdampning til omgivelserne (se evt. Figur 12).

Ved fugtmålinger i betondæk er det vigtigt at huske, at der kan gå forholdsvis lang tid før der opstår en ligevægt mellem betonfugten og fugten i borehullet. Derfor er metoden langsommelig, da der ofte kan gå flere døgn før der har indfundet sig en ligevægt. Samtidig er det vigtigt, at borehullet er rent for borestøv og lignende inden målingerne foretages.



Figur 12. Måling af fugt i beton ved borehuller. Alt efter gulvbelægningen er fugtdistributionen i betondækket forskelligt. Hvis der imidlertid måles i en dybde på ca. $0,4 \times$ betontykkelsen, opnås et nogenlunde ens resultat, uanset gulvbelægning (Johansen, 2005).

2.5.5. Dataloggere

Ved længerevarende kontinuerlig måling af fugtindholdet i en lukket konstruktion eller i indeklimaet, kan der benyttes dataloggere. Mest udbredt er det, at dataloggerne benyttes til monitorering af indeklimaet. Her kan de være med til at afdække mange ting, f.eks.:

- Relativ luftfugtighed, som kan medføre problemer med kondensdannelse og/eller risiko for skimmelvækst på overflader.
- Beboervaner såsom udluftningsintervaller, generelt temperaturniveau og fugtmæssig adfærd (tørring af vasketøj indendørs, madlavning, badevaner osv.).
- Udefrakommende påvirkninger (ved placering af følere flere steder i en bolig, f.eks. under gulve).

En datalogger programmeres via computer til at måle temperatur og relativ luftfugtighed i et forudvalgt interval. Dette kan være alt fra minutter mellem målingerne til timer eller dage. Det afhænger meget af, hvilke forhold målingerne skal være med til at afdække. Det kan f.eks. være svært at "overvåge" udluftningsvaner, hvis der kun foretages logning hver time. Til dette er der behov for meget mere intensiv logning, hvor der ikke bør være med mere end 2-3 minutter mellem hver måling. Længden af måleperioden afhænger i lige så høj grad af, hvad det er for forhold, der ønskes undersøgt. Skal der måles sæsonvariationer i relation til opfugtning under gulve i en bolig kræves naturligvis en lang måleperiode, og kan klares med længerevarende måleintervaller (hver halve eller hele dag), mens målinger i indeklimaet bør foretages over 14 dage til 1 måned. Logning i indeklimaet i relation til brugeradfærd kræver oftest målinger over ca. 1 måned, da opstilling af loggere *kan* være med til kortvarigt at ændre adfærd hos beboerne. Denne adfærdsændring aftager med tiden, typisk efter 1-2 uger, hvorefter den "rigtige" adfærd hos beboere afspejler sig i målingerne.

En datalogger skal placeres centralt i det rum, der måles i. Optimalt skal den hænges ned midt i rummet, så den hænger i opholdszonen (1,5-2 meter over gulv). Dette er dog ikke altid optimalt i praksis, hvorfor loggerne typisk placeres andre steder. Det er vigtigt, at der tages højde for, at loggeren placeres væk fra vinduer og døre, ikke direkte over en radiator og ikke med risiko for direkte solpåvirkning eller lignende. Den skal således repræsentere rummet uden disse påvirkninger.

Når målingerne er færdiggjort, kan data aflæses fra loggeren/loggerne, og der kan foretages forskellige beregninger og analyser af resultatet. Som tidligere nævnt, kan det være vurdering af beboeres udluftningsvaner, fugttilskuddet i boligen i forhold til udendørs, temperaturniveauet generelt i boligen eller påvirkninger fra vind, vejr, bygningsskader og lignende.

Specielle dataloggere kan, udover temperatur og relativ luftfugtighed, også registrere f.eks. CO₂-koncentration og støj samt flere andre ting.

Nyere forsøg har vist, at dataloggere kan bruges til at måle materialefugt i et byggemateriale, hvis der sørges for, at loggeren har tæt kontakt til overfladen på materialet samt afskærmes effektivt fra den omgivende luft. Dette princip benyttes bl.a. ved målemetoden, der er behandlet i denne rapport.



Figur 13. Eksempel på datalogger.
Her af typen Tinytag.

2.5.6. Højfrekvensmålere

Mange af de målemetoder, der er omtalt i denne rapport, som bruges til ikke-destruktive målinger er behæftet med en del fejlkilder, som kan få indflydelse på måleresultatet. Dette er specielt når det kommer til saltindholdet i betonkonstruktioner, hvor de kapacitive målere eksempelvis kan give et falsk udslag. Højfrekvensmålere reagerer ikke på salte i de undersøgte materialer, men der kan stadig komme falsk udslag pga. skjulte armeringsjern, el- eller vandledninger i materialet.

Målerne er baseret på, at et højfrekvensfelt kan bringe vandmolekylerne i et materiale i svingninger. Det er samme princip, som benyttes i mikrobølgeovne, dog med den forskel af en højfrekvensmåler ikke varmer materialerne op.

På Figur 14 ses måling med en højfrekvensmåler af typen HF-sensor. Denne måler er kalibreret til forskellige byggematerialer og kan fra producentens side kalibreres til yderligere ønskede materialetyper. Alt efter følerhoved kan måledybden variere fra 20-30 mm og helt op til 800 mm. Det er dog vigtigt, at de materialer, der måles i er homogent, hvorfor forskellige lagdelte konstruktioner ikke er optimale at måle i. Eventuelle luftfyldte hulrum skal også undgås, da målingen ikke vil give en korrekt resultat.

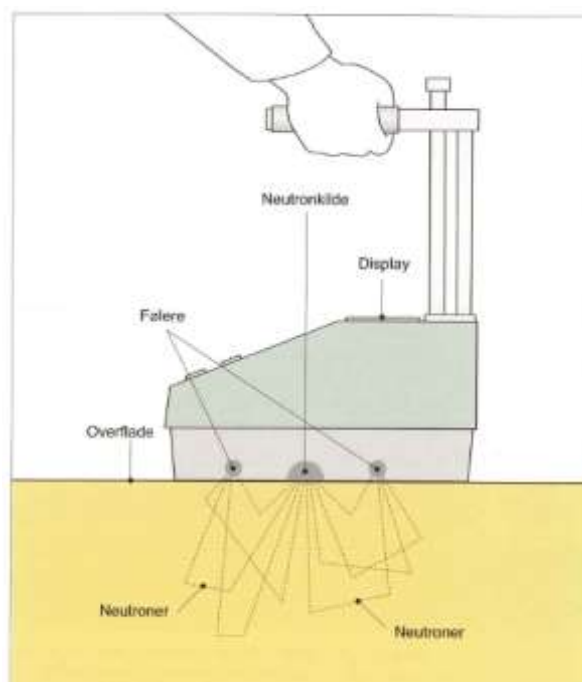
HF-sensor angiver fugtindholdet i det undersøgte materiale i vægt-procent. I praksis kan det dog være rigtig svært at finde en kalibreringsenhed i måleren, som passer præcist med det materiale, der undersøges. Derfor er det ved undersøgelser i felten relative målinger medmindre der kalibreres ud fra andre målemetoder, som f.eks. veje-tørre-veje-metoden.



Figur 14. Måling med HF sensor på betonklaplag.

2.5.7. Neutronkildemålere

Ligesom med højfrekvente målere, er måling med neutronkildeudstyr, f.eks. af typen Troxler, forskånet for nogle af de forstyrrende elementer, som ofte optræder i vores konstruktioner. Neutronkildeudstyr bliver ikke påvirket af eksempelvis salte i konstruktionen, som f.eks. kapacitive fugtmålere gør. Neutronkildeudstyr er imidlertid dyrt i anskaffelsespris, og da udstyret anvender en radioaktiv kilde, kræves desuden specialuddannet personale til håndtering af måleudstyret. Dette gør, at neutronkildemålere ikke er specielt udbredt i Danmark. Selve princippet i målingen tager udgangspunkt i, at de stråler, som apparatet udsender, reflekteres af brintatomer i undersøgelsesmaterialet. Styrken af den reflekterede stråle er således et udtryk for fugtindholdet i materialet. Princippet kan ses på Figur 15.



Figur 15. Princippet ved måling med Troxler-neutronkildemåler (Brandt et al., 2009).

Fugtmålingen med neutronkildedstyr kræver, at undersøgelsesmaterialet er forholdsvis ensartet og desuden, at der udtages referenceprøver, f.eks. ved veje-tørre-veje-metoden, til at kalibrere målerens visning.

2.5.8. "Vej-tørre-veje" metoden

En af de mest præcise metoder til bestemmelse af fugtindhold i en konstruktion eller et materiale, er ved at fortage en veje-tørre-veje-analyse af en del af materialet. Det største minus ved denne metode er imidlertid, at det kræver destruktiv udtagelse af en fysisk prøve, som oven i købet kan tage lang tid at tørre ud.

Først og fremmest skal prøvelegemet udtages uden vand- eller varmepåvirkning. Derfor er det oftest ved hjælp af udhugning i beton eller murværk, at prøvelegemer udtages. Hvis man, som det traditionelt gøres, udborer prøver, vil legemet blive opvarmet under udtagningen og vandindholdet mindskes. Vælger man at vandkøle sin ud boring opfugtes prøvelegemet.

Når prøvelegemet er udtaget vejes dette og sættes derefter i varmeskab. Normalt benyttes varmeskab med en temperatur på 103-105 °C. Prøvelegemet varmes indtil det ved kontrolvejning med 1 times mellemrum ikke ændrer vægt med en forskel på mere end 0,1 %. Når dette er

opnået kan fugtindholdet beregnes vha. følgende formel, hvor fugtindholdet er defineret som vægten af det vand, der er i prøvelegemet, i forhold til vægten af det tørre materiale:

$$\frac{(\text{Vægt af fugtigt materiale} - \text{vægt af tørt materiale}) \cdot 100}{\text{Vægt af tørt materiale}}$$

Til veje-tørre-veje-metoden er det nødvendigt at have en vægt med god nøjagtighed, og ønskes der stor nøjagtighed er det nødvendigt at nedkøle prøvelegemet i en eksikator inden der foretages en vejning.

Metoden er relativ enkel at udføre, men kræver som sagt, at der kan udtages en destruktiv prøve. Dertil kommer, at der normalt skal bruges 1-3 dage for at udtørre prøvelegemet i ovnen.

2.5.9. Fugthætten

Dataloggere, som er nærmere beskrevet i afsnit 2.5.5, bliver også brugt i forbindelse med en ny form for fugtmålinger, som er ved at vinde indpas.

Ved bygningsundersøgelser kan fugtindholdet i den indendørs luft hurtigt og nemt bestemmes. Fugtindholdet i luften er dog nemt at påvirke, hvis man af en eller anden grund kan have interesse deri. Grundig udluftning eller opvarmning kan være med til at hindre, at der opnås en korrekt måling. Derfor er der ikke tilstrækkeligt, kun at måle relativ luftfugtighed kombineret med en overfladetemperatur, hvis der ønskes et retvisende billede for fugtforholdene i konstruktionerne.

Byggematerialer er længere tid om at indstille sig i en ligevægt med omgivelserne end luft, hvorfor måling af fugtindholdet i disse, kan være med til at give et bedre indblik i, hvordan fugtforholdene har været i bygningen gennem længere tid. Alt efter, hvor fugten i materialerne stammer fra, kan det også vise sig at være umuligt at fjerne fugten ved udluftning og opvarmning.

Derfor er det nødvendigt med en hurtig, ikke-destruktiv målemetode, som er nem at benytte i praksis. Da det samtidig er i den høje ende af det hygroskopiske område, målingerne er interessante, er det vigtigt, at denne målemetode er pålidelig og kan måle det absolutte fugtindhold, eller den tilhørende relative luftfugtighed, i materialets overflade, i modsætning til andre kendte målemetoder, som kun angiver målinger relativt (Møller et al., 2014).

Fugthætten tager udgangspunkt i, at et materiale vil påvirke klimaet i en lukket "beholder", hvis denne placeres tætsluttende til materialet, der ønskes undersøgt og er afskærmet fra klimaet, der

er udenom. I fugthætten placeres en datalogger i en lukket plastic petriskål, som er fastgjort til prøvematerialet med klæbegummi. I det isolerede klima, som plastichætten udgør, vil luften efter et stykke tid indstille sig i en ligevægt med poreluften. Dette vil give et mål for, hvordan forholdene er i den yderste del af materialet, hvor hætten er monteret.

Efter et kort tidsinterval (få timer) er det muligt at bestemme den relative luftfugtighed i prøvematerialet med en vis nøjagtighed, og derfra omregne til absolut fugtindhold ved hjælp af en sorptionskurve for det specifikke materiale.

3. Materialer og metoder

Ved brug af fugthætten i praksis er der visse forhold, der er nødvendige at undersøge nærmere indledningsvist. Fugthætten er i denne rapport stort set kun testet på bygningsdele af beton, hvorfor beskrivelserne i den resterende del af denne rapport for det meste gælder for betonkonstruktioner.

3.1. Instrumenter og materialer

Fugthætte-systemet består i al enkelhed af en ClimaSpot sensor, en plastic petriskål og klæbegummi, som f.eks. Bantex Tack-All klæbegummi (se evt. også Figur 16).

Selve måleenheden i fugthætten er en trådløs ClimaSpot sensor. Denne sensor registrerer temperatur og relativ luftfugtighed ca. hvert 4. minut og sender data til en Profort Dataopsamler. I dataopsamleren bliver målingerne modtaget, nogle gange fra flere forskellige sensorer, og sendt til PC-programmet Piccolo, hvor grafer for hhv. temperatur og relativ luftfugtighed for hver enkelt sensor registreres og kan opstilles grafisk. Samtidig gemmes data på harddisken. Data kan derefter skrives til en .csv-fil, som efterfølgende kan behandles i f.eks. Microsoft Excel.

Til sammenligning af målemetoder er i denne rapport foretaget målinger på konstruktioner med kapacitiv måler, højfrekvent måler samt udtaget materialeprøver til veje-tørre-veje-forsøg. Materialeprøverne er udtaget med enten tapetskraber, som kun tager de yderste millimeter af overfladen eller ved hammer og mejsel, hvor der er forsøgt kun at få de yderste millimeter materiale med.

3.2. Metodebeskrivelse

Ved den indledende (visuelle) besigtigelse af bygningen, udvælges enkelte fugtkritiske konstruktionsdele til nærmere undersøgelse. Når disse er fundet, foretages scanning af bygningsdelene med en kapacitiv fugtscanner for at lokalisere de mest opfugtede områder, som er interessante for målingerne. I disse forsøg er der på betonkonstruktioner foretaget indledende målinger med Gann Hydromette Compact LB fugtscanner. Konstruktionerne, der er målt på, er med forskellige grader af opfugtning. Med Gann-scanneren er det vurderet, at opfugtede konstruktioner fremstod med over 100 digits (skala fra 1-199). I denne rapport er der dog både målt på områder med 60-100 digits samt områder over 100 digits. Det/de mest fugtige område(r)

af bygningsdelen, målt med kapacitiv måler, markeres, og udvælges til videre målinger med fugthætten.

Fugthætten skal derefter klargøres. Til opsætning af hver sensor skal der benyttes lidt over et halvt stykke klæbegummi.



Figur 16. Klargøring af Climaspot sensor. Til dette benyttes plastic petriskål og klæbegummi.

Climaspot sensoren sættes fast i petriskålen med klæbegummi, så den ikke kommer i direkte kontakt med den bygningsdel, der skal undersøges. Når dette er klargjort, skal den resterende del af klæbegummiet rulles til en tynd pølse, som er ca. 29 cm, hvilket svarer til omkredsen af petriskålen. Dette ses på Figur 17.



Figur 17. Påsætning af Climaspot sensor med klæbegummi og klæbegummi på petriskål.

Når det nødvendige antal petriskåle med påsat Climaspot sensorer er klargjort, foretages fugtscanning af væggen med en kapacitiv fugtscanner. Herved registreres de mest opfugtede

områder (eller de områder der vælges som interessante at undersøge), og fugthætten placeres som vist på Figur 18.



Figur 18. Opsætning af fugthætten forskellige steder på en kældervæg. Her på Knudsbølvej 76 i Rødovre.

Fugthætten placeres nu på det/de udvalgte områder, hvorefter programmet startes på computeren. Herefter måles fugtniveauet i (den yderste del af) væggen over 2-7 døgn. Nu kan det relative fugtindhold i den yderste del af væggen aflæses løbende i computerprogrammet, da der registreres en måling for hver fugthætte ca. hvert fjerde minut. Ønskes den registrerede relative luftfugtighed omregnet til absolut fugtindhold, skal konstruktionsmaterialet kendes, da der skal benyttes den korrekte sorptionskurve ved omregningen. Det er dog ikke til at vide, hvor i hysteresen, materialet befinder sig, men dette må der ses bort fra i praksis, da en usikkerhed på 1-2 procentpoint er acceptabel.

4. Resultater

Der er i forbindelse med denne rapport foretaget måling på betonvægge i lejemålet på Knudsbølvej 76 i Rødovre samt i kælderen under Hedegårdsskolen i Ballerup. Der er således foretaget måling på 59 betonlokationer, hvor 11 har været på Knudsbølvej og 48 på Hedegårdsskolen. Dertil kommer 24 gipsstykker, der har været placeret i kælderen på Hedegårdsskolen, hvor der er meget fugtigt.

Knudsbølvej 76 er et fraflyttet lejemål. Det er et rækkehus med kælder, hvor den ene væg i kælderen er beklædt med træpaneler, mens de andre vægge fremstår med malerbehandlet beton. Væggene bærer præg af manglende vedligehold, hvilket giver sig udtryk i en del afskalninger samt saltudfældninger.

På Hedegårdsskolen er kældervæggene ubehandlet og fremstår umiddelbart uskadte med undtagelse af, at de står i et miljø med høj relativ luftfugtighed og i en kælder som i øvrigt er meget utæt.

4.1. Opfugtede konstruktioner

Som nævnt ovenfor, er der foretaget målinger på forskellige betonlokationer. I resultatoversigten i bilag 1 (tabel 1 til tabel 7) kan udvalgte målinger med fugthætten ses. Der er foretaget aflæsning af loggernes registrering ved begyndelsen af måleperioden og derefter efter hhv. 2, 6, 12 og 24 timer. For en fuld oversigt over målingerne henvises til det vedlagte Excel-ark "Måleresultater.xlsx", hvor der også er aflæst efter 48 timers logning. I kolonnen med "samlet stigning" indgår aflæsningen for de 48 timer også.

Tabel 1, bilag 1.1, viser et overblik over udvalgte målinger for fugthætten, opsat på Knudsbølvej 76 i Rødovre. Her er overfladen malet betonvægge med puds. Af målingerne ses det, at ca. 2/3 af stigningen i relativ luftfugtighed i hætten forekommer indenfor de første 2 timer af måleperioden. Derefter er stigningen stødt aftagende. Af bilag 2.1 kan det ses, at der indstiller sig en ligevægt efter ca. 18-20 timer (hvorefter der kun sker døgnvariationer). For 2 af målingerne (de to med højest fugtindhold) sker der umiddelbart en svag stigning i måleperioden indtil der først efter 5-6 døgn indstiller sig en ligevægt for disse.

I tabel 2, bilag 1.2, er udvalgte resultater fra målingerne for opsætning spredt i kælderen under Hedegårdsskolen, vist. I dette tilfælde, hvor der er varierende grader af opfugtning ses det, at

langt størstedelen (ca. 9/10) af stigningen i fugtindholdet i fugthætten foregår i de første 2 timer af måleperioden. Herefter sker der kun en ganske svag stigning. På bilag 2.2 er målingerne opstillet grafisk for et overblik.

I næste måleperiode blev der identificeret et område, der betegnes som "tørt" med kapacitiv fugtscanner (Gann). Dette var med målinger under 83 digits. I denne måleperiode kan det af de udvalgte resultater i tabel 3, bilag 1.3 ses, at den samlede stigning i fugtindholdet i fugthætterne ikke er så udtalt som i de forrige målinger. Det ses igen, at den største stigning i fugtindhold sker inden for de første 2 timer (ca. 9/10). Af bilag 2.3 kan det ses, at stigningen efter de 2 første timer er begrænset.

Tabel 4, bilag 1.4 viser udvalgte målinger for opsætning på en væg, der med den kapacitive fugtscanner viste høje fugtindhold (103-135 digits). Det ses, at kun ca. 3/4 af stigningen i relativ luftfugtighed i hætten foregår i de første 2 timer. Herefter er der en støt, men dog aftagende, stigning i resten af måleperioden. På bilag 2.4 kan samme tendens ses grafisk.

I tabel 5, bilag 1.5, som er den sidste måleperiode på betonkonstruktioner ses det igen, at ca. 3/4 af stigningen foregår inden for de første 2 timer af måleperioden. Herefter foregår en stigning henover de næste 2-3 døgn, hvor de fugthætter, der opnår det laveste relativt fugtindhold første stabiliserer sig, mens de fugthætter, der når de højeste fugtindhold ikke opnår en konstant ligevægt med overfladen der måles på indenfor måleperioden.

Tabel 6, bilag 1.6 viser udvalgte resultater for målinger på en gipsplade, der efter montering af fugthætterne er blevet placeret i kælderen på Hedegårdsskolen, hvor der er højt fugtindhold. Af målingerne kan det ses, at de fugthætter, der har været monteret nederst, først registrerer en opfugtning af gipspladen, mens de næste fugthætter registrerer stigningen i fugtindhold efter ca. 12 timer. Efter ca. 2 døgn når opstigningen af fugtindhold op til den tredje række af fugthætter (se evt. Figur 29 for billede af opsætningen). Den fjerde række af fugthætter opnår ikke en direkte påvirkning af den opstigende fugt i pladen indenfor måleperioden. Det høje begyndelsesniveau registreres derimod inden for de første 7-8 timer. Det samme kan ses af bilag 2.6.

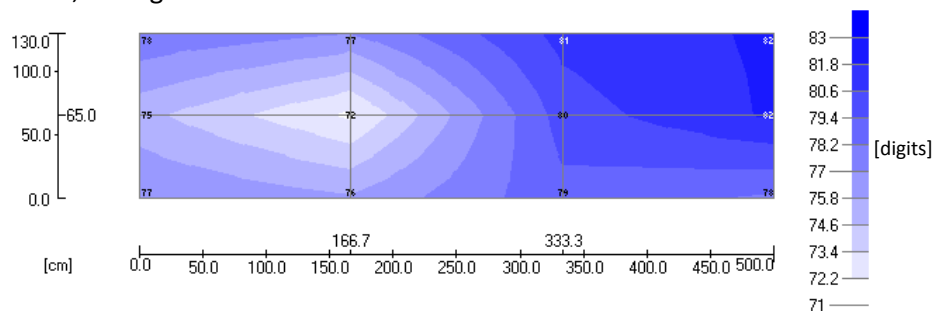
De sidste målinger på gipspladen, der har været opfugtet over flere uger, kan ses som udvalgte resultater i tabel 7, bilag 1.7. Af disse resultater ses det, at størstedelen (knap 9/10) foregår indenfor de første 2 timer. Af bilag 2.7 kan det ligeledes ses, at fugtfordelingen i gipspladen er ret jævn i forhold til den måde, gipspladen har været placeret på i kælderen på Hedegårdsskolen.

4.2. Sammenligning af fugthætten med andre målemetoder

Til sammenligning af målinger med fugthætten og andre målemetoder, er der benyttet 3 kendte målemetoder udover fugthætten. Disse er fugtscanning ved Gann Hydromette Compact LB (kapacitiv måler), fugtmåling med HF-sensor (højfrekvent måler) og veje-tørre-veje-metoden (destruktiv analyse). Ved måling på 2 forskellige betonvægge (svarende til målinger i tabel 3, bilag 1.3 og tabel 4, bilag 1.4) er der opstillet fugtprofiler med programmet MoistAnalyze 3.21, som er leveret af HF-sensor i Leipzig. Dertil er der også opstillet fugtprofiler for en enkelt gipsplade (målinger i tabel 6, bilag 1.6) med hhv. veje-tørre-veje-metoden samt med fugthætten.

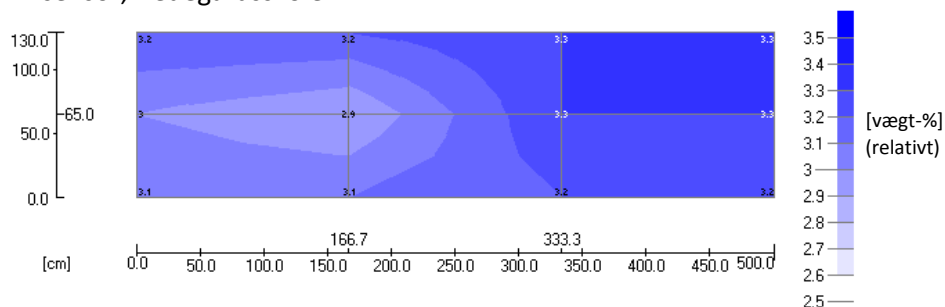
Fugtprofilerne for væggene ser ud som følger:

Betonvæg #1, Gann, Hedegårdsskolen:



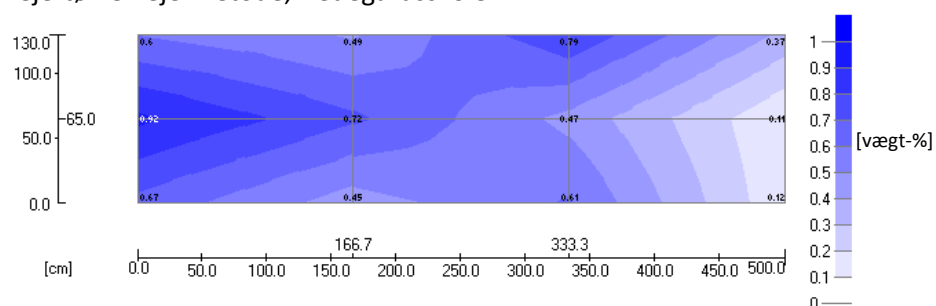
Figur 19. Fugtprofil for betonvæg #1, Hedegårdsskolen, målt med kapacitiv fugtscanner.

Betonvæg #1, HF-sensor, Hedegårdsskolen:



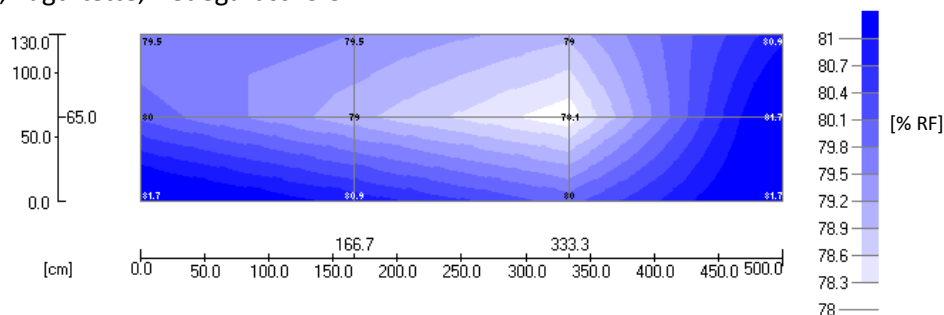
Figur 20. Fugtprofil for betonvæg #1, Hedegårdsskolen, målt med HF-sensor.

Betonvæg #1, Veje-tørre-veje-metode, Hedegårdsskolen:



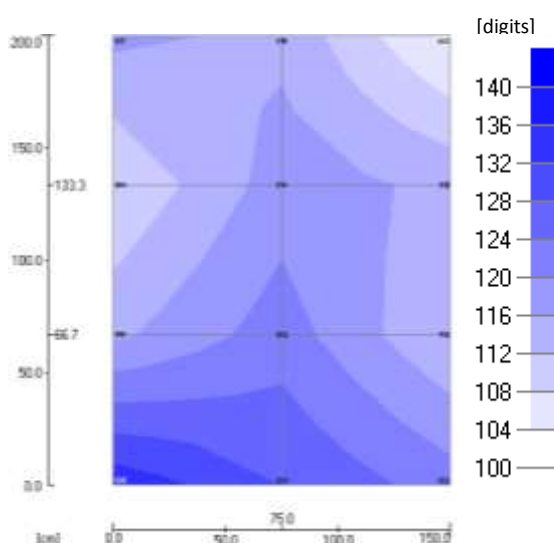
Figur 21. Fugtprofil for betonvæg #1, Hedegårdsskolen, målt ved veje-tørre-veje-metoden.

Betonvæg #1, Fugthætte, Hedegårdsskolen:



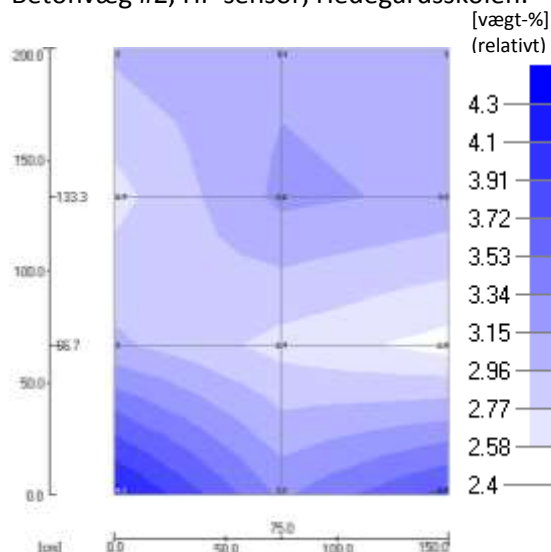
Figur 22. Fugtprofil for betonvæg #1, Hedegårdsskolen, målt med fugthætten.

Betonvæg #2, Gann, Hedegårdsskolen:



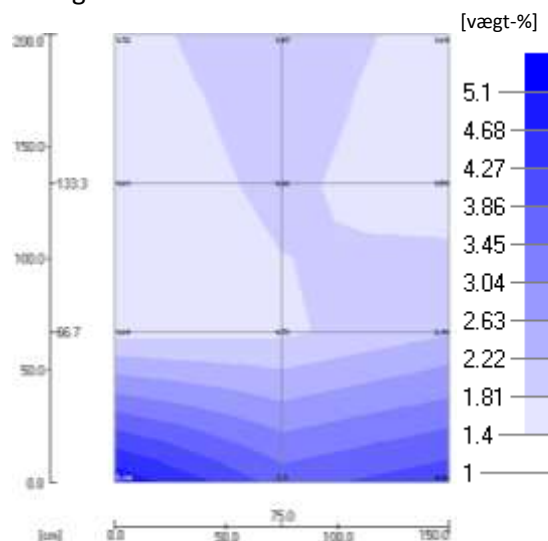
Figur 23. Fugtprofil for betonvæg #2, Hedegårdsskolen, målt med kapacitiv fugtscanner.

Betonvæg #2, HF-sensor, Hedegårdsskolen:



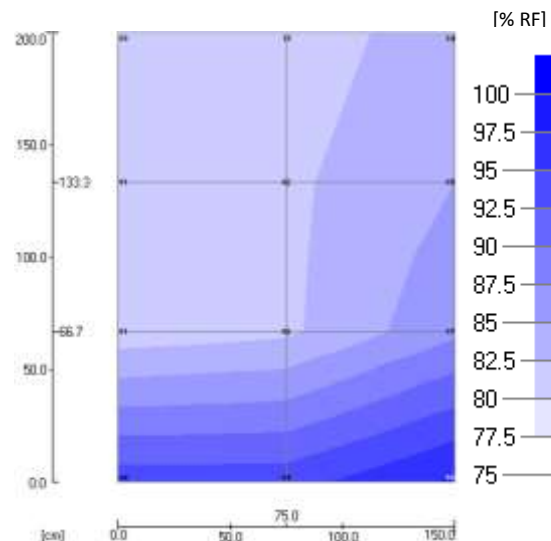
Figur 24. Fugtprofil for betonvæg #2, Hedegårdsskolen, målt med HF-sensor.

Betonvæg #2, Veje-tørre-veje-metode, Hedegårdsskolen:



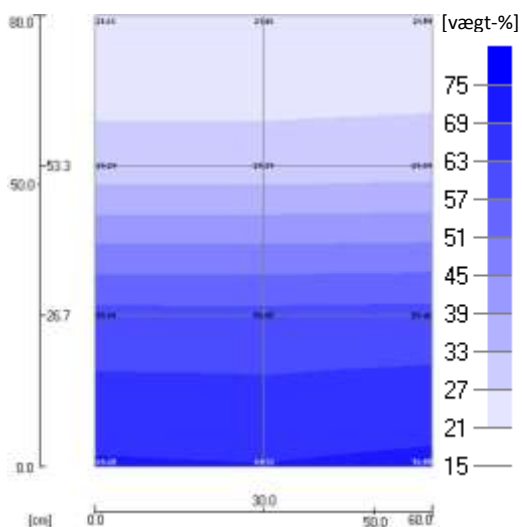
Figur 25. Fugtprofil for betonvæg #2, Hedegårdsskolen, målt ved veje-tørre-veje-metoden.

Betonvæg #2, Fugthætte, Hedegårdsskolen:



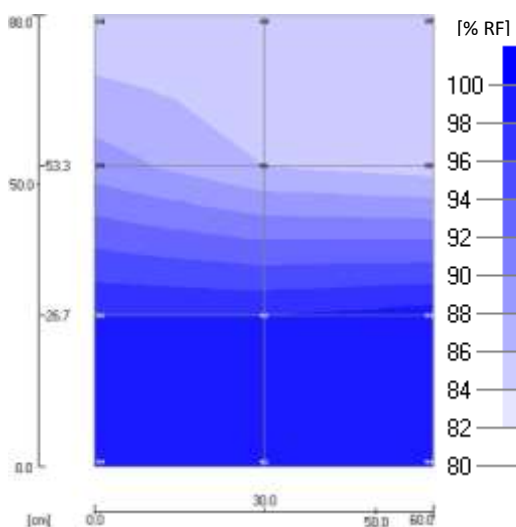
Figur 26. Fugtprofil for betonvæg #2, Hedegårdsskolen, målt med fugthætten.

Gipsvæg, Veje-tørre-veje-metoden, Hedegårdsskolen:



Figur 27. Fugtprofil for gipsvæg, Hedegårdsskolen, målt ved veje-tørre-veje-metoden.

Gipsvæg, fugthætten, Hedegårdsskolen:



Figur 28. Fugtprofil for betonvæg #2, Hedegårdsskolen, målt med fugthætten.

Af ovenstående fugtprofiler kan det ses, at målingerne, der er foretaget med hhv. kapacitiv måler (Figur 19) og HF-sensor (Figur 20), på væg #1, ser relativt ensartet ud. Her ses det, at der i den venstre del af væggen tilsyneladende er et område på midten, der har et lidt mindre fugtindhold (relativt) i forhold til den resterende del af væggen. Samme billede er ikke gældende for de andre målemetoder, eftersom fugtprofilerne i Figur 21 (veje-tørre-veje-metoden) og Figur 22 (fugthætten) ser markant anderledes ud. I Figur 21 ser det ud til, at fugtniveauet i den højre del af væggen er med det laveste fugtindhold, mens Figur 22 viser, at der er et område midt på væggen lidt til højre for midten, der fremstod med et lavere fugtindhold end resten af væggen. Fugtniveauerne ligger generelt for målingerne på denne væg indenfor et lille interval, og uden den store spredning.

Forskellen mellem fugtprofilerne ved forskellige målemetoder er ikke udtalt på samme måde for væg #2. Her er fugtprofilerne med kapacitiv måler (Figur 23), HF-sensor (Figur 24), veje-tørre-veje-metoden (Figur 25) og fugthætten (Figur 26) forholdsvis ensartet, hvor det tydeligt ses, at fugtniveauet er højest (relativt) i bunden af væggen, hvilket alle 4 fugtprofiler indikerer.

De sidste fugtprofiler er kun lavet ud fra målinger ved veje-tørre-veje-metoden (Figur 27) og fugthætten (Figur 28). Dette skyldes, at den kapacitive måler samt HF-sensoren ikke er egnet til målinger på gipsplader. De to fugtprofiler er meget ensartet, hvilket tyder på en markant forskel i opfugtning mellem den øverste og den nederste del af gipspladen.

4.2.1. Veje-tørre-veje-prøver

For kalibrering af målinger med fugthætten kan veje-tørre-veje-metoden som nævnt benyttes. I dette projekt er der derfor foretaget destruktiv prøveudtagning for sammenligning mellem målinger med fugthætten og veje-tørre-veje-metoden. Der er udtaget 5 prøver fra Knudsbølvej 76 samt i alt 27 prøver fra Hedegårdsskolen. Dertil kommer 12 prøver fra gipsvæg #1.

Som det kan ses af samtlige resultater i bilag 3 er der stor forskel på, hvilken sorptionskurve der benyttes ved omregning mellem det absolutte fugtindhold og det tilhørende relative fugtindhold. Der er således benyttet forskellige sorptionskurver fra (Hansen, 1986), (Masea, 2015) og (Lund-Hansen, 1967), som alle er relateret til materialer med specifikke egenskaber (f.eks. vand/cement-tal samt densitet).

Som det kan ses af bilag 3.1 er der ikke den store overensstemmelse mellem fugtindholdet bestemt ved veje-tørre-veje-forsøgene og målinger med fugthætten. Kun måling #2 med højt fugtindhold stemmer overens. I forsøget er der udtaget ca. 10-32 gram materiale fra overfladen af konstruktionen ved afskrabning med tapetskraber.

I bilag 3.2 er der langt bedre overensstemmelse mellem veje-tørre-veje-forsøgene og målingerne med fugthætten. Her er der udtaget relativt små materialeprøver (2-4 gram), men disse er udtaget ved udbankning af overfladen med hammer og mejsel.

På væg #1 (bilag 3.3) ses igen en stor afvigelse mellem veje-tørre-veje-forsøgene og målingerne med fugthætten. Her er prøvestørrelsen forsøgt at ligge omkring de 10 gram materiale, og prøverne er alle udtaget med tapetskraber.

Væg #2 (bilag 3.4) er med en noget mindre afvigelse mellem de to forsøgsmetoder, men alligevel ligger målingerne med en vis forskydning. Veje-tørre-veje-forsøgene har generelt resulteret i et mindre fugtindhold end målinger med fugthætten. Prøverne er her udtaget med hammer og mejsel.

Veje-tørre-veje-forsøgene med gipspladen ligger helt skævt i forhold til målinger med fugthætten. Dette skyldes, at gipspladerne har været udtørret med 105 °C, hvilket har resulteret i frigivelse af en del af det kemisk bundne vand i pladerne. Normalt skal gipsplader udtørres ved 70 °C

4.3. Materialernes ”hukommelse”

Den første ”gipsvæg”, der blev målt på, var ikke i ligevægt med omgivelserne ved start af måleperioden. Dette kan ses af grafen i bilag 2.6, hvor målingerne er opstillet grafisk. Den anden ”gipsvæg” har opnået en høj fugtighed efter at have været placeret i den fugtige kælder i ca. 2 uger (Figur 29). Den relative luftfugtighed i overfladen af gipspladerne er målt med fugthætten, som det også kan ses senere i dette afsnit. Målinger med fugthætten i løbet af udtørningsperioden kan ses på Figur 31.



Figur 29. Opfugtning af gipsplade i kælder.

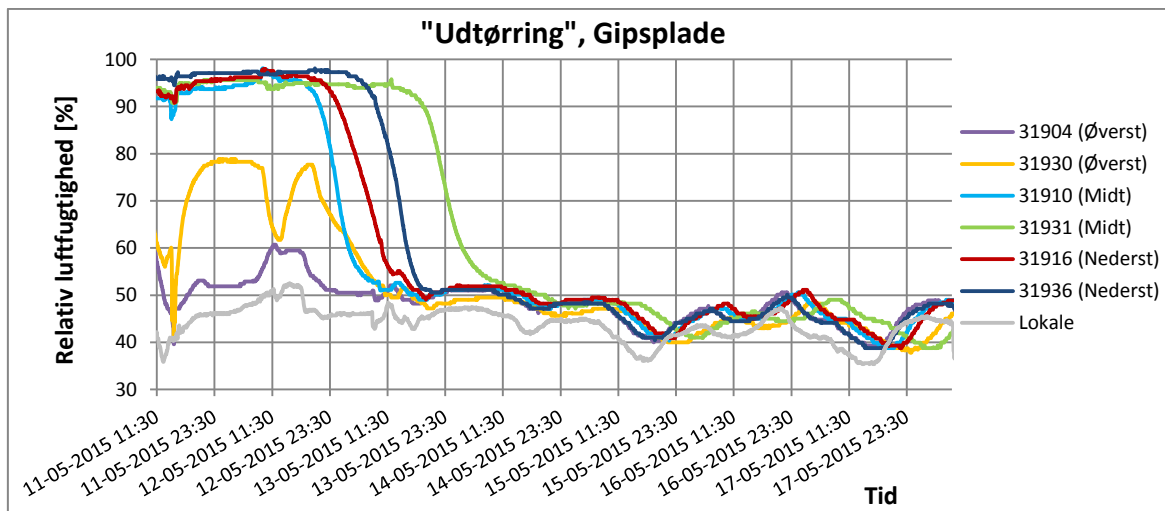


Figur 30. Gipsplade med 6 fugthætter, placeret i laboratorium hos SBMI A/S i Hørsholm.

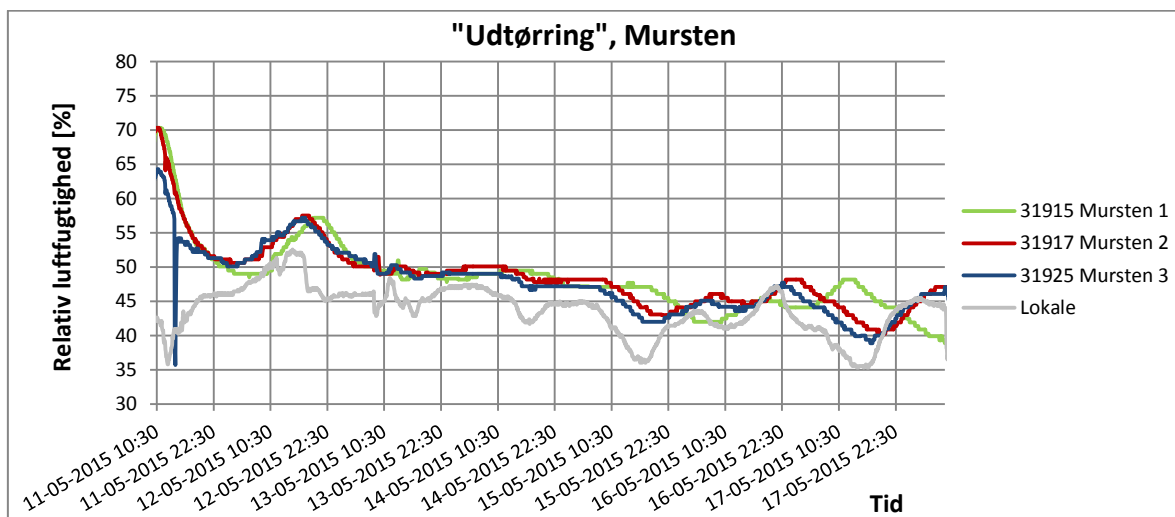
I Figur 31 ses, at udtørringen af pladen ved gipspladens placering i laboratoriet (Figur 30) har taget 1½-3 dage pga. den store mængde fugt, der har skullet udtørre fra gipspladen (se bl.a. veje-tørre-veje-forsøget med gips i tabel 7, bilag 1.7). Når først størstedelen af fugtindholdet i gipspladen er fjernet ses det, at udtørringen af overfladen foregår relativt hurtigt, på kun 12-16 timer.

For murstenenes vedkommende kan det af Figur 32 ses, at udtørringen tager ca. 15 timer fra murstenene bliver placeret i laboratoriet til de har opnået en nogenlunde ligevægt med indeklimaet.

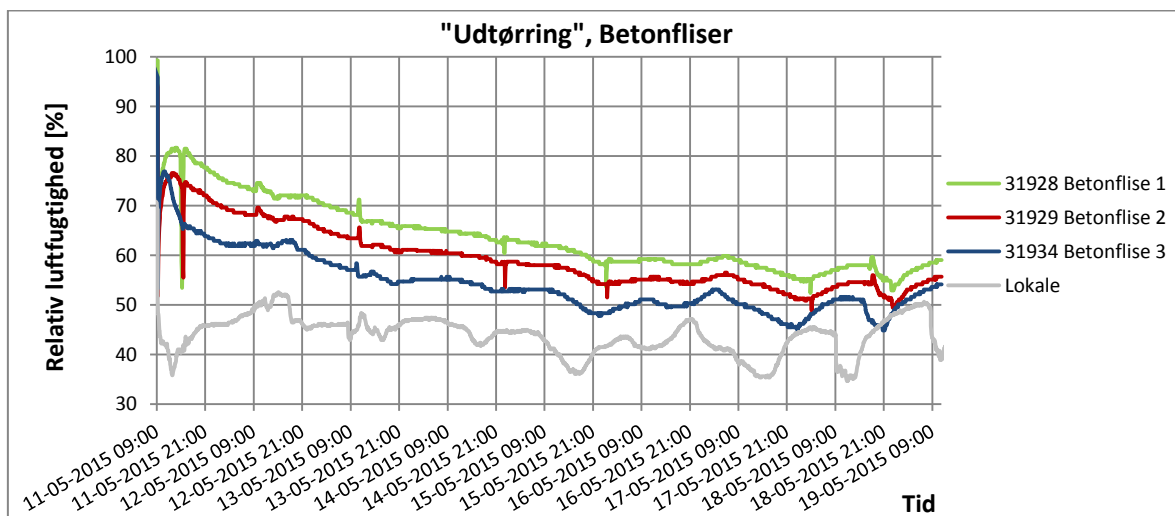
Ved udtørring af betonfliser, som ligeledes har været placeret udendørs gennem længere tid, og derved opnået en ligevægt med det udendørs klima, ses det (Figur 33), at udtørringstiden er betydeligt længere end i tilfældet for både gips og mursten, nemlig omkring 5 døgn.



Figur 31. Udtørring af gipsstykker med forskellige fugtindhold som udgangspunkt.



Figur 32. Udtørring af mursten, der har været placeret udendørs gennem længere tid.



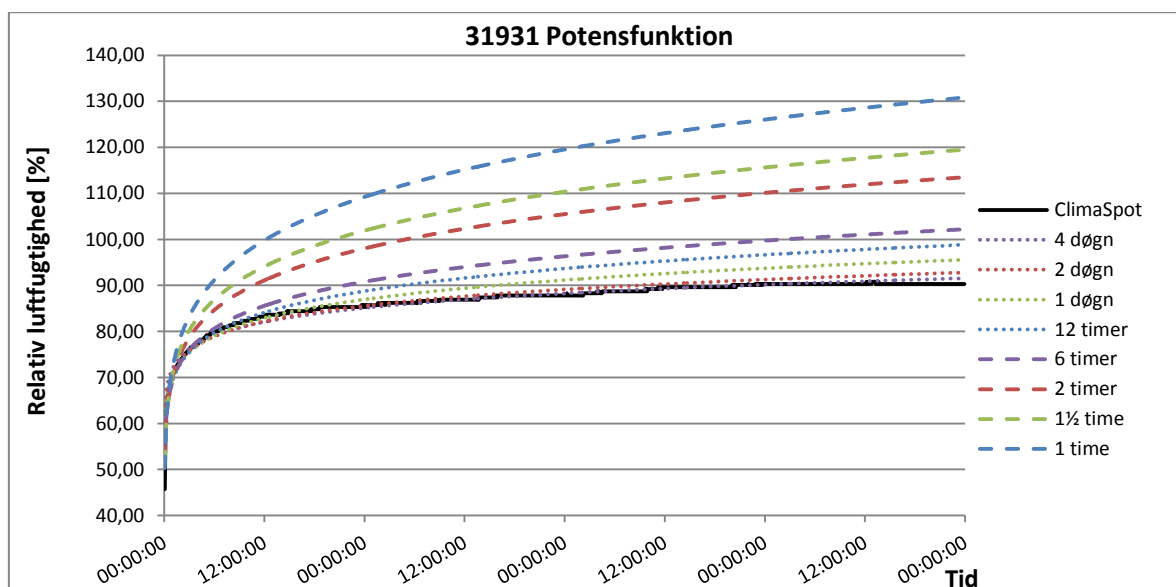
Figur 33. Udtørring af betonfliser, der har været placeret udendørs gennem længere tid.

5. Diskussion

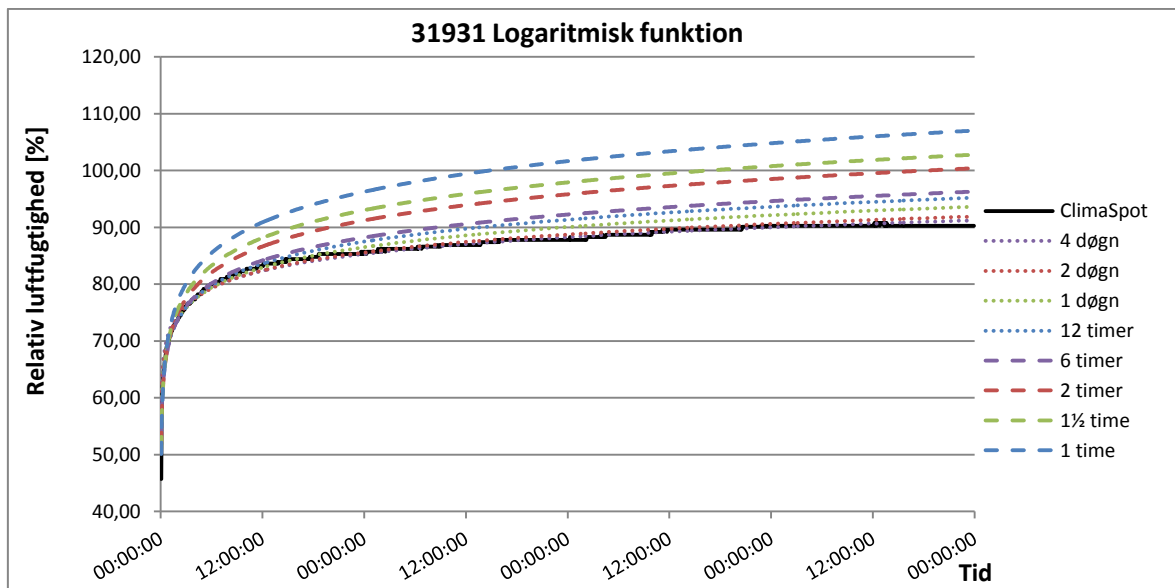
5.1. Opfugtede konstruktioner

Af resultattabellerne (bilag 1) samt graferne (bilag 2) ses det tydeligt, at der ved starten af hver måleperiode er der en kraftig stigning i fugtindhold når fugthætten placeres på den fugtige flade. Dette var forventeligt, da der er et forholdsvis lille volumen i hætten, som skal indstille sig i en ligevægt med den flade, hætten er opsat på. Som tiden går, flader kurven ud, og der indstilles først en regulær ligevægt efter mange timer. Dette forhold er beskrevet nærmere i afsnit 2.4 Sorptionskurver. Det er ligeledes illustreret i tabel 1 til tabel 7, bilag 1, hvordan og hvor hurtigt fugtindholdet i hætterne stiger ved forskellige niveauer af opfugtning i konstruktionerne, der måles på.

Af graferne i bilag 2 kan kurver for samtlige målinger ses. Kurverne har et udseende, der ligner en potens- eller en logaritmisk funktion. For at teste, hvilken funktion, kurverne ligger tættest op af, er der foretaget plot af målingerne samt en tendenslinje med udgangspunkt i hele den enkelte måling. Dette kan ses i Figur 34 (potensfunktion) og Figur 35 (logaritmisk funktion). I figurerne er der også indlagt tendenslinjer, som er opstillet med udgangspunkt i måledata, der er opnået inden for hhv. 1 time, 1½ time, 2 timer, 6 timer, 12 timer, 1 døgn, 2 døgn og 4 døgn.

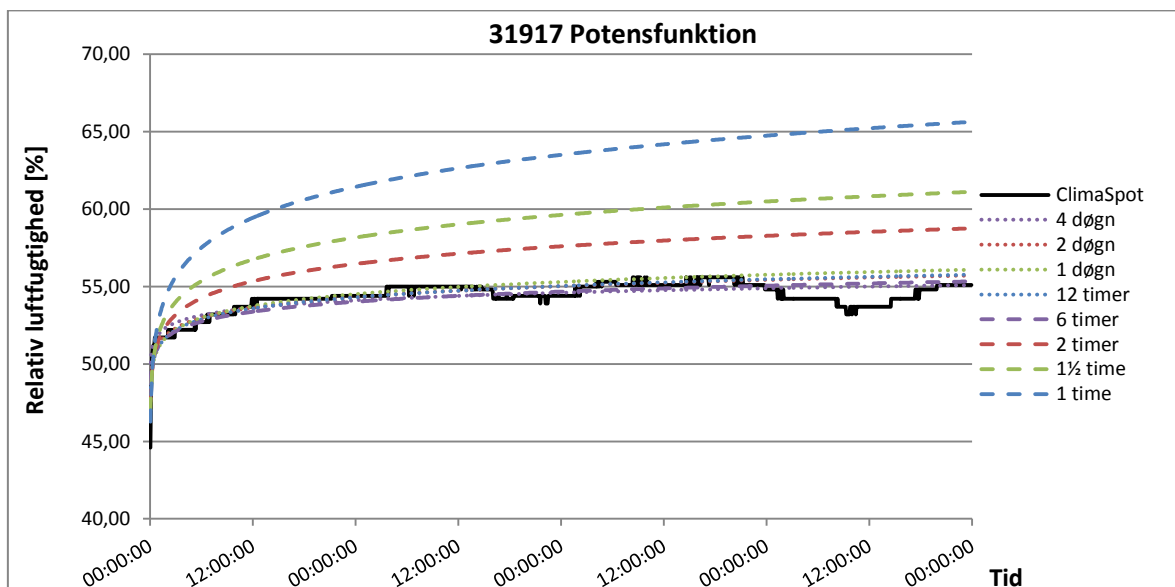


Figur 34. Forsøg med tendenslinjer (potensformel) for en repræsentativ måling med fugthætten. Målingerne er for fugthætte 31931, placeret i kælderen på Knudsbølvej 76 i Rødovre.

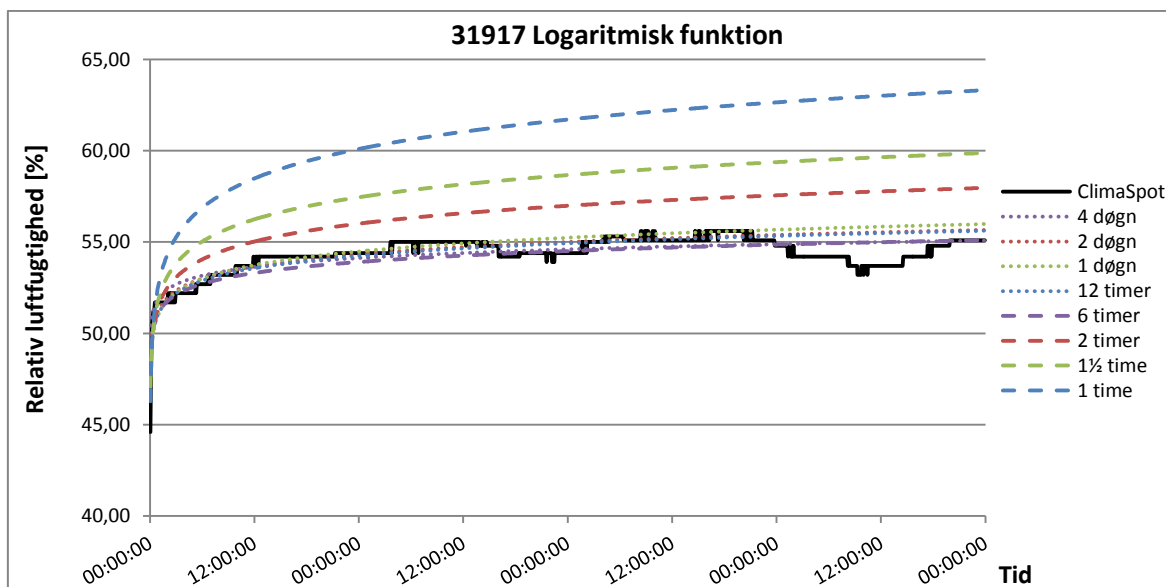


Figur 35. Forsøg med tendenslinjer (logaritmisk formel) for en repræsentativ måling med fugthætten. Målingerne er for fugthætte 31931, placeret i kælderen på Knudsbølvej 76 i Rødovre.

Naturligt nok ligger kurverne for målingerne efter 4 døgn tættest på den aktuelle måling, der er foretaget med fugthætten, men der er alligevel en forskydning fra få %-point for kurverne for 4-døgns målingen og op til 30 %-point for potensfunktionen og 20 %-point for den logaritmiske funktion. Den største forskydning er for tendenslinjen for målinger på 1 time. Denne forskydning er gældende for målinger med høj fugtighed, mens der for målinger med lavere fugtighed (se Figur 36 (potensfunktion) og Figur 37 (logaritmisk funktion)) ses en noget lavere afvigelse på 10 %-point for potensfunktionen og 7-8 %-point for den logaritmiske funktion (ved måling på 1 time).

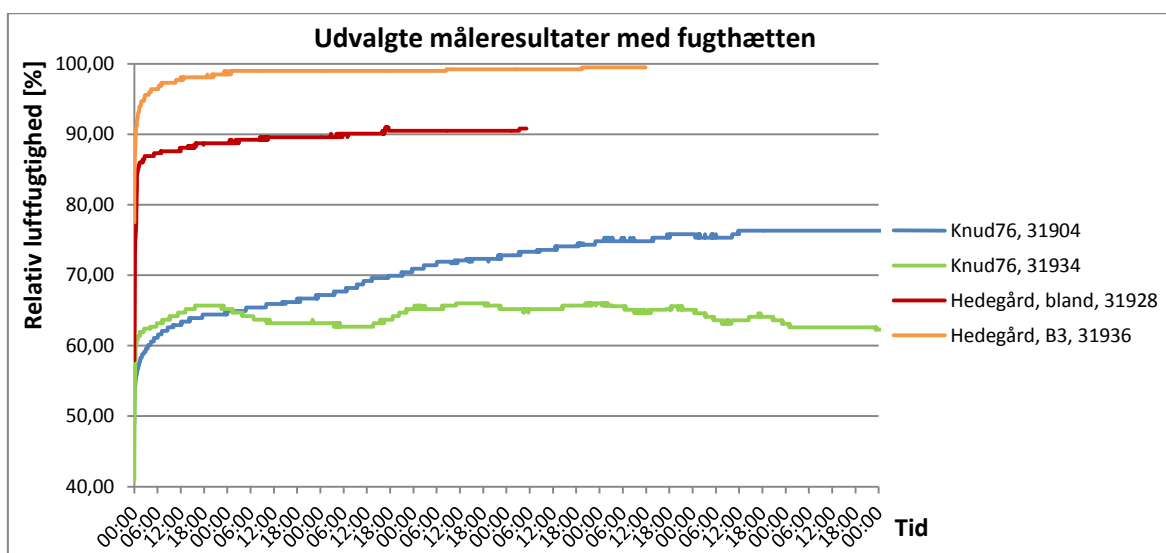


Figur 36. Forsøg med tendenslinjer (potensformel) for en udvalgt måling med fugthætten. Målingerne er for fugthætte 31917, placeret i kælderen på Knudsbølvej 76 i Rødovre.



Figur 37. Forsøg med tendenslinjer (logaritmisk formel) for en udvalgt måling med fugthætten. Målingerne er for fugthætte 31917, placeret i kælderen på Knudsbølvej 76 i Rødovre.

Der er i denne rapport ikke vedlagt grafer for samtlige målinger i forsøget, men langt de fleste målinger ligner disse. Enkelte afviger, da de enten stiger støt gennem hele måleperioden eller svinger meget efter en ligevægt (dette er mest udtalt for målinger i det "tørre" område, på 40-60 %RF). Se udvalgte måleresultater og kurvernes forskellige udseende på Figur 38.



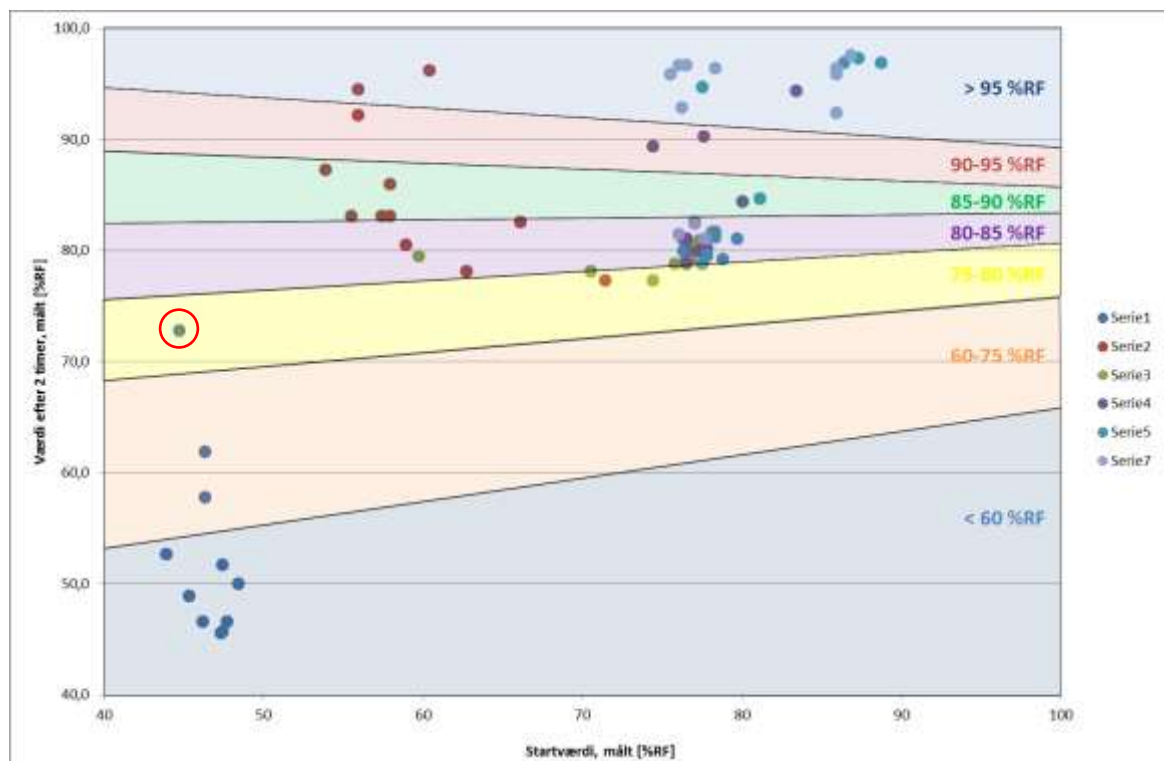
Figur 38. Udvalgte resultater fra målinger med fugthætten for at illustrere forskellige kurveforløb.

På grund af de forskellige forløb af kurverne har det ikke været muligt at opstille en ligning eller funktion, hverken ud fra tendenslinjerne eller måledata, til bestemmelse af fugtindholdet ved ligevægt med udgangspunkt i målinger efter hverken 1, 1½ eller 2 timer. Dette skyldes at der er

for stor afvigelse mellem stigningen på kurverne indbyrdes samt hvor hurtigt kurverne flader ud. Tilmed er der kurver, der lynhurtigt indstiller sig i en ligevægt og stort set bliver vandrette, mens andre kurver fortsætter en svag stigning gennem flere timer.

Derfor er der i stedet opstillet et "fremskrivningsskema" for målinger. Skemaet kan ses i Figur 39. Ved brug af skemaet skal der foretages aflæsning af den første måling efter fugthætten er sat op på den konstruktion, der måles på. Denne måling findes på x-aksen, hvorefter målingen efter 2 timer findes på y-aksen. Herefter vil punktet (x,y) ligge i et af farveområderne, der indikerer, hvor måling af fugtindholdet højst sandsynligt vil ligge når der har indfundet sig en ligevægt mellem fugtindholdet i overfladen af konstruktionen/materialet og luften i fugthætten. Et større fremskrivningsskema kan ses i bilag 4.

For langt de fleste målinger på betonkonstruktioner (serie 1 til 5 på Figur 39) og for gipsvæg 2 (serie 7) stemmer disse farveområder overens. Dette er gældende for ca. 9 af 10 punkter. De punkter, der falder uden for disse inddelinger er punkter lige i overgangen mellem to farveområder samt det ene punkt, der er markeret med rød ring. Der bør dog foretages yderligere målinger for at underbygge dette skema.



Figur 39. "Fremskrivningsskema". Der tages udgangspunkt i den første måling efter opsætning af fugthætten samt en måling efter 2 timer. Herefter kan der af farveskemaet aflæses, hvor fugtniveauet højst sandsynligt vil ende når der har indstillet sig en ligevægt mellem luften i fugthætten og fugtindholdet i overfladen af materialet.

5.2. Materialernes ”hukommelse”

Når der foretages målinger på en eksisterende konstruktion er det vigtigt at vide, hvilken ”hukommelse” konstruktionen besidder. Det kan være vanskeligt at vurdere, hvor lang tid tilbage, en konstruktions fugtindhold vil være repræsentativt for konstruktionen. Pludselige ændringer i nedbør, vindforhold, beboeradfærd, bygningsskader og lignende kan muligvis få indflydelse på resultatet af målingerne. Og kan måleresultaterne påvirkes?

I forbindelse med vurdering af fugtindholdet i en konstruktion er det nødvendigt med kendskab til de materialer, konstruktionen består af. Eksempelvis har en betonkonstruktion betydeligt længere ”hukommelse” end en let konstruktion af stål og gips. Til indikation af forskellen, er der foretaget et simpelt udtørningsforsøg, hvor 3 forskellige opfugtede materialer udsættes for en udtørring ved almindelig stuetemperatur samt en normal relativ luftfugtighed. Der er i forsøget foretaget målinger på en gipsplade med varierende grad af fugtindhold (hhv. 85 % og 95 %), 3 mursten med 65-70 % og 3 betonfliser, ligeledes med 65-70 %. Disse indledende fugtindhold er målt ved hjælp af fugthætten.

I forsøget er der mulighed for fri udtørring til alle sider af gipspladen, murstenen og betonflisen. Dette vil ikke forekomme i praksis, da en konstruktion er en sammenbygning af ét eller flere forskellige materialer. Derfor vil der oftest kun foregå en en-sidet udtørring eller en udtørring, hvor fugten enten skal transporteres eller diffundere gennem andre materialer, hvilket vil være med til at reducere udtørningsmulighederne og dermed udtørningshastigheden.

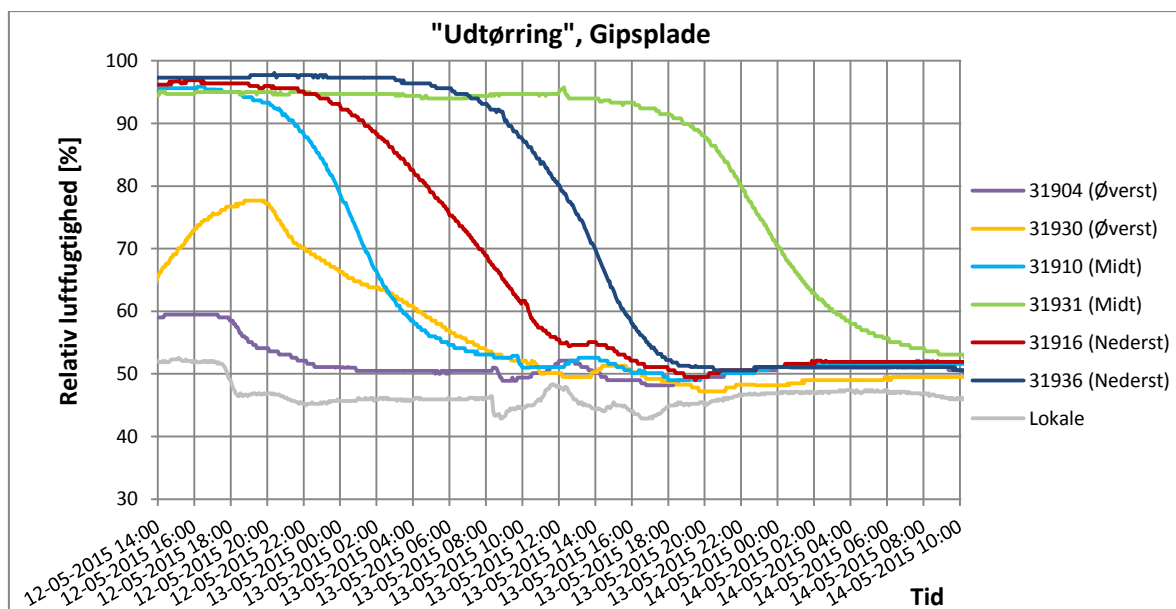
Gipsplader

I forhold til opfugtning af gipspladerne, så har de gennem flere uger været placeret i kælderen under Hedegårdsskolen, hvor der har været omkring 80 % relativ luftfugtighed gennem mange måneder. Disse plader er herefter blevet placeret i et område, hvor de frit har kunnet suge vand fra bunden, se evt. Figur 29.

Efter ca. 2 ugers opfugtning, har pladerne opnået en høj fugtighed. Den relative luftfugtighed i overfladen af gipspladerne er hele tiden målt med fugthætten, som det også kan ses i afsnit 0.

Herefter er pladerne placeret i laboratoriet hos SBMI A/S i Hørsholm (Figur 30). Her har pladerne stået ved ca. 20 °C og 40-50 % relativ luftfugtighed samt med mulighed for udtørring til alle sider. Målinger med fugthætten i løbet af udtørningsperioden kan ses på Figur 31.

Af Figur 31 kan det ses, at de to fugthætter (nr. 31904 og 31930), der har været placeret øverst på gipspladen svinger meget i fugtindhold i løbet af den første måletid. Dette skyldes, at fugtindholdet i denne del af gipspladen ikke har været i fuldstændig ligevægt med de omgivelser, som pladerne har stået i. Derfor er denne del af gipspladen også meget påvirkelig overfor svingninger i temperatur og relativ luftfugtighed. De første store udsving (første store fald) skyldes påvirkning under transporten af gipspladen, som desværre ikke kunne undgås. Dertil kommer, at gipspladen har været udsat for direkte solpåvirkning (det store fald i relativ luftfugtighed omkring kl. 11:30 den 12/5-2015). Efterfølgende er solpåvirkning samt kraftig ventilering af laboratoriet forsøgt undgået, så denne fejlkilde ikke påvirker målingerne.



Figur 40. Udtørring af gipsstykker med forskellige fugtindhold som udgangspunkt, forstørret.

Ovenstående graf, Figur 40, viser et forstørret udsnit af den tid, hvor selv udtørringen foregår på gipspladen. Af denne ses, at udtørringen af de to nederste fugthætter (nr. 31916 og 31936), hvor fugtindholdet burde være højest, ligger mellem de to mellemste fugthætter (nr. 31910 og 31931). Rent målemæssigt burde de mellemste fugthætter fremstå med et mindre fugtindhold end de to nederste fugthætter, og derved tørre ud hurtigere. Dette er imidlertid ikke tilfældet, hvilket kan skyldes, at fugtfordelingen i pladen ikke har været helt jævn. Det kan også være en medvirkende faktor, at gipspladen har været placeret vandret på et bord, hvor siden med fugthætte 31930, 31931 og 31936 har været placeret tættest på en væg, mens de resterende fugthætter (nr. 31904, 31910 og 31916) har været placeret mod den centrale del af laboratoriet (og mod den dør, hvor der blev foretaget ventilering af lokalet).

Af tabellen ses, at udtørringen af pladen ved den givne placering i laboratoriet har taget 1½-3 dage i henhold til Figur 31 pga. den store mængde fugt, der har skullet udtørre fra gipspladen (se bl.a. veje-tørre-veje-forsøget med gips i tabel 6, bilag 1.6). Når først størstedelen af fugtindholdet i gipspladen er udtørret ses det, at udtørringen af overfladen foregår relativt hurtigt på kun 12-16 timer.

Det skal nævnes, at der har været foretaget en systematisk fejl i veje-tørre-veje-forsøget, hvor der er foretaget udtørring af gipspladen. I dette tilfælde er gipspladen blevet udtørret ved 105 °C, hvilket har resulteret i, at en del af det kemisk bundne vand i pladen er blevet fjernet ved udtørringen. Derfor er den andel af fugt, der er fjernet fra gipspladerne ikke retvisende. Normalt bør gipsplader udtørres ved 70 °C.

Mursten

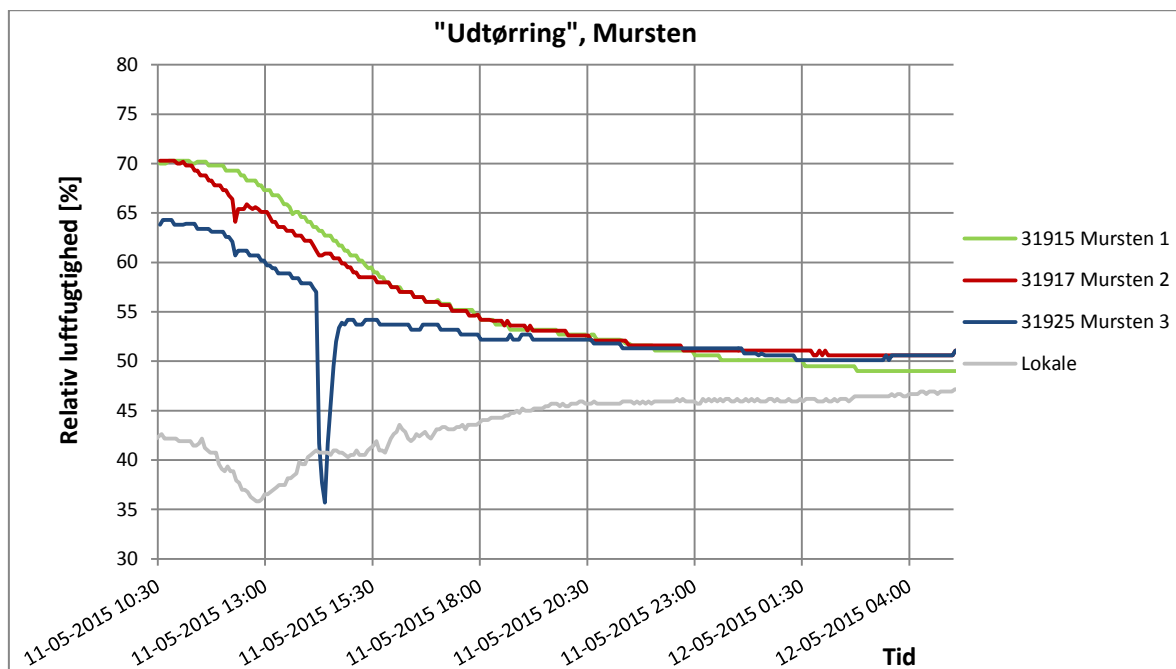
Ved udtørring af mursten, har udgangspunktet været et andet. Grundet måletid og tilgængelighed, er der foretaget måling på gulve teglsten, der har ligget udendørs i mange måneder. Disse burde derfor fremstå i nogenlunde ligevægt med det udendørs klima. Indledende måling med fugthætter har vist, at murstenene fremstår med et fugtindhold på ca. 65-70 % relativ luftfugtighed i overfladen (se Figur 32).



Figur 41. Udtørringsforsøg med 3 mursten.

Af Figur 32 kan det ses, at udtørringen af murstenene sker forholdsvis hurtigt, og slet ikke tager lige så lang tid som i forsøget med gipspladen. Dette skyldes imidlertid, at fugtindholdet i gipspladen var betydeligt større end fugtindholdet i murstenen, eftersom gipspladens porer var tæt på vandmættet, hvilket ikke er tilfældet i murstenen. Derfor foregår udtørringen af denne også væsentlig hurtigere. Af nedenstående Figur 42 ses det, at udtørringen tager ca. 15 timer fra murstenene bliver placeret i laboratoriet. Derefter følger murstenene (med en forsinkelse på 3-4 timer) det indendørs klima i laboratoriet.

Det må formodes, at hvis murstenene havde været placeret i samme klima som gipspladen, at de ville have optaget en væsentlig større mængde fugt, hvilket ville afspejle sig i udtørningsforsøget, hvor murstenene ville have været længere tid om at afgive fugten end gipspladen, hvilket ville have medført en større "hukommelse" for murstenene i forhold til gipspladen. Det pludselige fald i relativ luftfugtighed for "Mursten 3" skyldes direkte solpåvirkning.



Figur 42. Udtørring af mursten, forstørret.

Beton(fliser)

Udtørring af beton har ikke været praktisk muligt i forbindelse med denne opgave. I stedet er der foretaget måling på 3 betonfliser, som udgør målingerne på beton i dette tilfælde. Betonfliserne har været placeret udendørs på samme måde som murstenene. Disse er således også i ligevægt med det udendørs klima. De indledende målinger med fugthæfter har vist, at de tre betonfliser fremstod med et udgangspunkt i overfladerne på ca. 75-80 %.



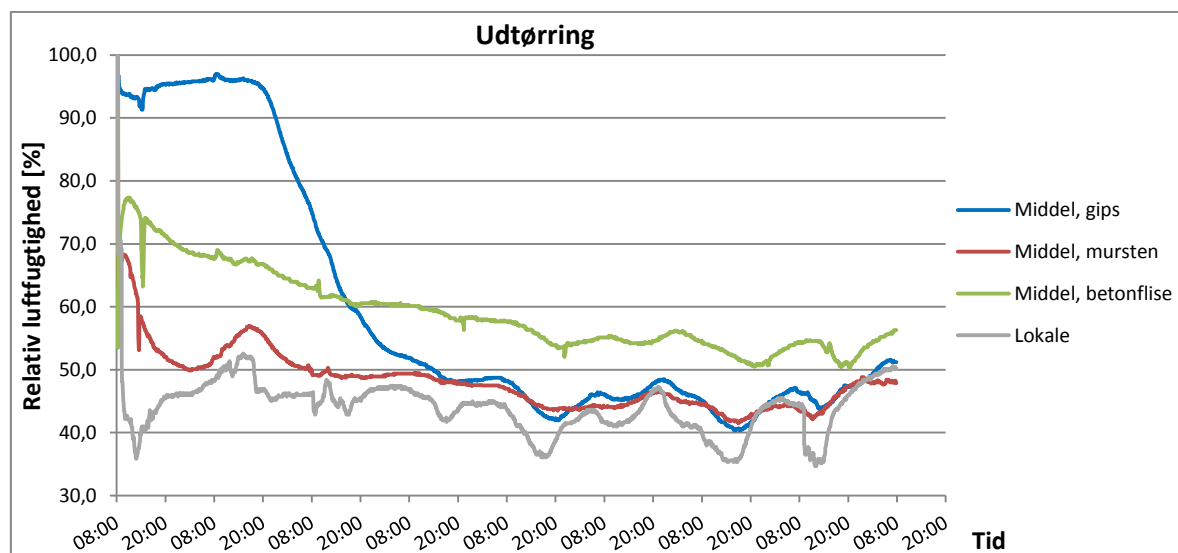
Figur 43. Udtørningsforsøg med 3 betonfliser.

På Figur 33 kan udtørringen af betonfliserne følges og her ses det, at udtørringen tager noget længere tid end udtørring for hhv. gipspladen og murstenene. Både hvad angår hastigheden for den egentlige

udtørring (hældningen på kurven) samt den samlede tid, hvorover udtørringen foregår. Den samlede udtørringstid kan af grafen aflæses til ca. 7-8 dage, hvilket indikerer, at beton (og betonkonstruktioner) har en lang "hukommelsestid" og således kan afspejle fugtindholdet i en konstruktion længere tilbage end konstruktioner af gips og mursten.

Sammenligning

Ovenstående viser, at der er en sammenhæng mellem materialernes densitet og udtørringstiden af materialet. Et materiale med høj densitet har ofte mindre og meget fine porer, hvor fugten er svært tilgængelig, mens et materiale med lav densitet har større og grovere porer, hvilket gør fugten lettere tilgængelig i forhold til udtørring (og for den sags skyld også opfugtning). I Figur 44 nedenfor er middelværdier for de tre udtørringsperioder indsat på samme graf. Heraf ses det, at når først udtørring af den ekstra fugt, der er ophobet i gipspladen er udtørret, sker faldet i relativ luftfugtighed i overfladen ganske hurtigt (ca. 1 døgn). Udtørring af murstenen tager ca. 15 timer, men er så også et resultat af, at murstenen desværre ikke har haft samme udgangspunkt i fugtindhold som gipspladen. Dette havde naturligt forlænget udtørringen af murstenen, så denne havde ligget et sted mellem gipspladernes og betonflisernes udtørringstid.



Figur 44. Sammenligning mellem gennemsnitlig udtørringstid for hhv. gips, mursten og betonfliser.

5.3. Vurdering ift. andre målemetoder

Som nævnt i afsnit 2.5.9 er der ingen af de målemetoder, der bruges i dag, der kan give en direkte måling for det absolutte fugtindhold i en konstruktion. Derfor er fugthætten bestemt brugbar, da den kan give et forholdsvist præcist og hurtigt billede af fugtindholdet i en konstruktion gennem den seneste tid.

I forhold til de gængse ikke-destruktive målemetoder, måler fugthætten det absolutte fugtindhold i overfladen af materialet, der måles på. Kapacitive målere, højfrekvente målere og neutronmålere, som ellers benyttes til måling af tunge konstruktioner angiver fugtindholdet i de yderste 20-30 millimeter af konstruktionen (alt efter målehoved på HF-sensoren kan denne angive fugtindholdet endnu dybere). Der er dog som nævnt en del forhold, der spiller ind på målinger med disse metoder. Her er fugthætten ikke sensitiv i samme grad overfor salte, armering, vand- og elinstallationer. Til gengæld er fugthætten så sensitiv overfor andre forhold, som f.eks. vægbeklædningernes tilstand. Derfor er det ved udvælgelse af målemetode yderst vigtigt, at alle disse forhold vurderes, så den/de bedst mulige målemetode(r) kan vælges.

Af fugtprofilerne i afsnit 4.2 ses det, at der er en vis uoverensstemmelse mellem de forskellige målemetoder. Fugtprofilerne på betonvæg #1 er forholdsvis ensartet for Gann scanneren (Figur 19) og HF-sensoren (Figur 20). Disse to metoder måler i nogenlunde samme dybde, hvilket altså giver sig udslag i fugtprofilet. Profilet siger dog ikke noget om, om fugten befinder sig i de yderste millimeter af konstruktionen eller ligger dybere inde. Dette burde afspejle sig bedre i prøvetagningen med veje-tørre-veje-metoden samt med fugthætten. Teoretisk burde fugtprofilerne, der er fundet ved brug af disse metoder (Figur 21 og Figur 22) ligne hinanden, hvilket dog ikke er tilfældet. Dette skyldes højst sandsynligt den måde, prøverne til veje-tørre-veje-metoden er udtaget. For at sikre, at det kun var de yderste millimeter af konstruktionen, der blev foretaget vejning og tørring af, blev prøverne udtaget vha. en tapetskraber, som blev skrabet af overfladen. Eftersom der kun blev udtaget ganske fint støv ved denne metode er det sandsynligt, at den varme, der er skabt ved udtagning af prøverne har gjort, at den forholdsvis lille fugtmængde, der har været i materialet, er blevet fjernet ved fordampning. Dette underbygges også af, at fugtindholdet ved beregning efter vejning og tørring ligger meget lavt. Derfor må veje-tørre-veje-metoden i denne sammenligning tillægges mindre betydning.

Hvis de 4 fugtprofiler havde lignet hinanden kunne det konkluderes, at fugtindholdet var nogenlunde ensartet gennem konstruktionen, men i dette tilfælde tyder det på, at fugten midt på væggen har bedre mulighed for afdampning til kælderluften end omkring bunden og i siderne. Dette passer meget godt med forholdene i kælderen, hvor det må antages, at der er områder i hjørner og bund af vægge, hvor der er mindre luftturbulens end midt på væggene.

For betonvæg #2 ser fugtprofilerne anderledes ensartet ud. De to profiler, der er udtaget med hhv. Gann scanneren (Figur 23) og HF-sensor (Figur 24) viser opfugtning i bunden samt en antydning af højere fugtindhold midt på væggen i forhold til i siderne. Den samme opfugtning i bunden af væggen kan også konstateres i fugtprofilerne fra veje-tørre-veje-metoden (Figur 25) samt fugthætten (Figur 26). Det højere fugtindhold, der kunne ses midt på væggen med den kapacitive måler samt med HF-sensoren kan ikke genkendes i samme grad med veje-tørre-veje-metoden eller med fugthætten, hvilket formentlig skyldes samme årsag som på betonvæg #1, nemlig den øgede ventilation af den midterste del af overfladen i forhold til yderhjørnerne.

De 2 sidste fugtprofiler er foretaget i gipspladen, som kan ses i Figur 29, er kun udført for veje-tørre-veje-metoden (Figur 27) og fugthætten (Figur 28), da den kapacitive måler og HF-sensoren ikke er egnet til målinger i gipsplader. Af denne ses, at der er en ganske markant fugtdistribution i pladen, hvilket er ganske naturligt, placeringen taget i betragtning. Det er i denne forbindelse vigtigt at huske, at fugtindholdet, der er bestemt ved veje-tørre-veje-metoden ikke er retvisende, da der som nævnt er udtørret ved 105 °C i stedet for 70 °C, og en del af det kemiske bundne vand er fjernet fra gipsen.

5.3.1. Veje-tørre-veje-prøver

Den klart største forskel i resultaterne fra veje-tørre-veje-forsøgene og målinger med fugthætten ses for de materialeprøver, der er udtaget med tapetskraber. Dette indikerer, at der ved udtagning af prøverne foregår en fordampning af fugtindholdet i prøvematerialet, formentlig pga. opvarmning under prøveudtagningen.

Det kan ses af de prøver, der er udtaget ved udbankning med hammer og mejsel, at resultaterne fra veje-tørre-veje-forsøgene ligger en del tættere på målingerne med fugthætten. Det er dog mere usikkert, hvor stor en dybde, der måles i ved udbankning af materiale, for det er svært at kontrollere, hvor store materialestykker, der bliver udtaget. Dog er det forsøgt kun at udtage prøver fra de yderste millimeter af konstruktionerne, der er målt på.

En anden stor variation i veje-tørre-veje-forsøgene er ved omsætning fra absolut fugtindhold til den tilhørende relative luftfugtighed. Resultatet af dette er meget afhængig af et indgående kendskab til det respektive prøvemateriale, da udvælgelse af en korrekt sorptionskurve er afgørende for, hvor godt målingerne stemmer overens.

Af resultaterne i bilag 3.1 (veje-tørre-veje-forsøg fra Knudsbølvej 76) ses det, at sorptionskurver fra (Hansen, 1986) og (Masea, 2015) ikke stemmer særlig godt overens med resultatet fra veje-tørre-veje-forsøgene. De udvalgte sorptionskurver kan aflæses i noterne til hver enkel tabel i bilag 3. Til gengæld ligger resultatet, bestemt ved sorptionskurven fra (Lund-Hansen, 1967) relativt tæt på de fleste af målingerne med fugthætten, om end der fortsat er en afvigelse på over 10 %-point på 2 af 5 prøver (prøve 3 og 5).

Af de indledende forsøg på Hedegårdsskolen (bilag 3.2) ses det, at de tre valgte sorptionskurver ligger noget tættere på målingerne med fugthætten, hvor betonen med vand/cementindhold på 0,65 fra (Hansen, 1986) stemmer bedst overens.

Bilag 3.3, som er prøver udtaget fra væg # 1, viser absolut ingen sammenhæng mellem målinger og veje-tørre-veje-forsøg. Dette må tilskrives udtagningsmetoden (tapetskraber), som har influeret kraftigt på fugtindholdet i prøverne.

For målingerne på væg #2 (bilag 3.4) er der en nogenlunde overensstemmelse mellem den samme sorptionskurve i (Hansen, 1986) ($v/c = 0,65$) ved prøver med højt fugtindhold på over 90 %RF. For de prøver, der ligger omkring 80-85 %RF med fugthætten, ligger fugtindholdet ifølge veje-tørre-veje-forsøgene en del lavere, omkring 47-67 %RF. Dette kunne tyde på, at sorptionskurven alligevel ikke er korrekt for dette materiale, hvilket ellers blev indikeret af de indledende forsøg (bilag 3.2).

I veje-tørre-veje-forsøget med gipspladen blev der som nævnt foretaget udtørring ved 105 °C i stedet for 70 °C, hvilket har gjort, at forsøgene ikke kan overføres til relativ luftfugtighed. Dette ses også af, at der i bilag 3.5 opnås et fugtindhold på 100 % i gipspladerne ved veje-tørre-veje-forsøget uanset hvilken sorptionskurve, der benyttes. Derfor kan resultatet fra veje-tørre-veje-forsøget udelukkende benyttes som relativt til at indikere fugtdistributionen i gipspladen.

Valg af sorptionsisoterm har ud fra ovenstående vist sig at være yderst vanskeligt medmindre der kan opnås et indgående kendskab til det materiale, der måles på. Samtidig er udtagning af prøver en kritisk faktor, som der bør være stor omhyggelighed med.

5.4. Fejkilder

Ved måling af fugt i konstruktioner og materialer er det vigtigt, at tage højde for de usikkerheder der er ved hver enkelt målemetode. Første og fremmest er det gældende, at brugeren har kendskab til udstyret, herunder dets muligheder, begrænsninger og fejkilder, samt grundlæggende viden om bygge- og fugtteknik, hvis der skal opnås retvisende og dermed pålidelige målinger.

Det vil sige, at brugeren skal anvende sit eget kendte udstyr, være fortrolig med måleudstyret og målemetoden, foretager flere målinger for at afdække eventuelle variationer i konstruktionen, tager hensyn til sæsonvariationer, har viden om eventuelt indhold af armeringsjern, salte, vand- og elinstallationer i det undersøgte materiale, måler tilstrækkeligt længe (indtil der er sikkerhed for ligevægt) samt har den tilstrækkelige viden for tolkning af resultaterne.

Erfaringsmæssigt (egen) vides, at det ikke altid er samtlige ovenstående forhold, der er opfyldt ved fugtmålinger i praksis. Mange steder (f.eks. på byggepladser) foretages fugtmålinger af ikke-fugtskyndigt personale, som eksempelvis er blevet udstyret med en indstiksmåler uden at være instrueret i brug og fejkilder ved denne. Dette kan skabe problemer i byggeprocessen, hvis der bygges fugt ind i en konstruktion, som senere kan give sig udtryk i råd- og svampeskader eller misfarvning af områder og materialer.

Ved måling af eksisterende bygninger må det som udgangspunkt være fugtskyndigt personale, der foretager undersøgelserne og målingerne. Alligevel er det ikke altid, der er fokus nok på uddannelse og vejledning af teknikere, hvorfor der også i den professionelle fugtbranche bliver foretaget undersøgelser og målinger, hvor der ikke er tilstrækkeligt fokus på måleudstyr, fejkilder, kalibrering m.m.

I betonkonstruktioner er det hovedsageligt ikke-synlige forhold i konstruktionen, som udgør de største fejkilder. Saltindholdet i betonen kan påvirke målinger med capacitive målere, mens indbygget armering samt vand- og elinstallationer kan påvirke både de capacitive målere, højfrekvente målere og neutronkildemålere.

De mange forskellige fejkilder der er ved diverse måleudstyr gør, at det kan være risikofyldt, hvis man kun benytter sig af én metode ved bestemmelse af fugtindhold i en konstruktion eller konstruktionsdel. Der skal hvert fald ligge grundige overvejelser til grund for valg af målemetode,

og hvis det er muligt bør der suppleres med flere forskellige metoder. En kombination af f.eks. kapacitiv måler og fugthætten kan være et godt valg til bestemmelse af såvel fugtdistribution samt fugtindhold i en konstruktion. Alternativt kan enten HF-sensor eller neutronkildemåler i kombination med destruktiv prøvetagning til veje-tørre-veje-måling af fugtindholdet og dermed kalibrering af målingerne, der er foretaget med andre målemetoder. Herved foretages også en form for indbyrdes kalibrering af instrumenter og metoder, da disse bliver afprøvet direkte mod hinanden på samme konstruktion/bygningsdel. Veje-tørre-veje-målingen kræver dog den destruktive udtagelse af prøver som ikke altid er velegnet i eksisterende bygninger. Dertil kommer udtagelsesmetoden, som i denne opgave har vist sig at være afgørende for fugtindholdet i prøverne, eftersom det vurderes, at der blev fjernet den smule fugt, der var i materialet, ved udtagning af prøven med tapetskraber. Dertil kommer de gængse udtagningsmetoder, som enten kan forårsage opvarmning af emnet (ved udboring) eller opfugtning af emnet (ved køling med vand), som begge påvirker måleresultatet.

5.5. Fugthættens tæthed

I forbindelse med målingerne på de forskellige konstruktioner, er det overvejet, om fugthættens tæthed har betydning for måleresultatet. Umiddelbart tyder det på, at det har mindre betydning om hættens er helt tæt, da den er tiltænkt at være opsat på det materiale, der skal måles i, i relativt kort tid. Den største usikkerhed omkring tæthed er derfor tætningen mellem selve plastichætten og den overflade, der måles på. Nogle slidte eller meget porøse overflader har ringe vedhæftning, og selv den relativt lille vægt af fugthætten kan være nok til at den enten slipper helt eller delvist. En kraftigt opfugtet puds eller tapet har ringe tilslutning til klæbemidlet, og der kan også være tidspunkter, hvor en evt. vægbeklædning (som tapet, filt eller væv) har sluppet den bagvedliggende konstruktion. Dette vil skabe et luftrum bag vægbeklædningen, som kan være i forbindelse med luftområder uden for hættens. Derfor er det vigtigt, at der forsøges at identificere områder, hvor vægbeklædningen/overfladebehandlingen på konstruktionerne er nogenlunde intakte.

Eftersom fugthætten er tiltænkt opfugtede materialer, som oftest vil fremstå med et betydeligt højere fugtindhold end den indendørs luft, der støder op til konstruktionen, har den højere fugtighed i materialet klart mere indflydelse på forholdene inden i fugthætten end de omgivende forhold. Således kan der accepteres en lille diffusion gennem hættens, da langt størstedelen af den

fugt, der er i luften i hætten bliver tilbageholdt. Diffusionen gennem de yderste lag af materialet vurderes tilmed større end evt. diffusion gennem plastichætten.

Ovenstående forhold gør også, at fugtindholdet i indeluften i det rum, hvor fugthætten er opsat, har ringe betydning for målesikkerheden. Luftmængden i hætten er så lille, at det relativt hurtigt vil indstille sig i en ligevægt med overfladen af konstruktionen, og ikke vil påvirkes voldsomt af de ydre forhold. Der kan dog opstå forhold, hvor forholdene i hætten kan blive påvirket, hvilket f.eks. kan være ved direkte solstråling på fugthætten.

5.6. Funktion af hætten

Selve fugthætten er ganske enkel at benytte. Samtidig er materialerne billige og let tilgængelige. Når først der er valgt en måle- og loggeenhed, kræver det ikke lang forberedelsestid, og der er intet der hindrer en hurtig opsættelse. Det er dog nødvendigt at foretage en anden form for systematisk undersøgelse af fugtdistributionen i væggen(e), inden det bedste sted for opsætning af fugthætten kan findes. Dette kan f.eks. gøres ved en kapacitiv scanner. Der bør derefter udvælges et fugtigt område, som illustrerer fugtindholdet i konstruktionen, til måling med fugthætten. Måling på "tørre" områder uden uhensigtsmæssigt højt fugtindhold vurderes at være unødvendige, så hvis der ikke konstateres opfugtede konstruktioner i den bygning der undersøges, vurderes det ikke nødvendigt at foretage målinger med fugthætten.

Den største ulempe ved fugthætten er indtil nu er, at der skal opstilles en dataopsamler, som skal være tilknyttet en computer. Denne opstilling kræver plads, og er ikke specielt anvendelig ved "hurtige" målinger. Derfor bør der overvejes/undersøges at finde dataloggere, der kan logge og lagre oplysningerne internt i fugthætten, så der undgås eksternt måle- og opsamlingsudstyr.

6. Konklusion og perspektivering

6.1. Konklusion

Fugthætten er en alternativ målemetode til bestemmelse af fugtindholdet i en konstruktion og/eller bygningsdel. Den forholdsvis enkle metode gør, at den er let anvendelig i praksis. Dog bør løsningen med dataopsamler og computer til løbende registrering af fugtindholdet kunne udskiftes til en datalogger med indbygget hukommelse til lagring af målingerne.

I denne opgave er der foretaget målinger gennem længere tid (ofte over 2 døgn). Målingerne er sidenhen blevet analyseret efter forskellige tidsperioder efter indledning af måleperioden. Det har vist sig, at den bedste indikation af fugtindholdet i konstruktionen naturligt nok opnås efter den længst mulige måletid. Af resultaterne er det dog vist, at langt den største stigning af fugtindholdet i fugthætten sker inden for de første 1½-2 timer. Efter denne måletid kan et rimeligt skøn for, hvor det endelige fugtindhold i konstruktionen ligger.

Da det ikke altid er praktisk muligt at foretage målinger over flere døgn, er der i denne opgave udarbejdet et fremskrivningsskema. Dette skema tager udgangspunkt i den første måling efter fugthætten er opsat og derefter måling efter 2 timer. Ved aflæsning i skemaet kan et forventet fugtindhold i fugthætten når der er opnået en ligevægt med fugtindholdet i poreluften aflæses. Skemaet er indtil videre kun vejledende, og kræver yderligere målinger, men det giver en rimelig indikation af, hvilket fugtindhold konstruktionen fremstår med.

En af de store fordele ved fugthætten er, at nogle af de fejlkilder og påvirkninger, der har indflydelse på flere af de eksisterende målemetoder (såsom f.eks. armering, salte, menneskelige påvirkninger og lignende), ikke influerer i samme grad på fugthætten. Der er dog andre fejlkilder ved fugthætten (f.eks. vedhæftning til konstruktionen, kendskab til materialet (valg af sorptionskurve)) der gør, at hverken fugthætten eller de øvrige fugtmetoder bør benyttes uden indbyrdes kalibrering med andre målemetoder.

Ved sammenligning af målinger med fugthætten og målinger med kapacitiv fugtmåler, højfrekvent fugtmåler samt veje-tørre-veje-metoden er det vist, at fugthættens målinger stemmer bedst overens med fugtindhold bestemt ved veje-tørre-veje-metoden. Dette skyldes, at der ved veje-tørre-veje-metoden er udtaget materialeprøve af de yderste millimeter af konstruktionen, hvilket er samstemmende med det område, som fugthætten måler i. På samme

måde er resultaterne fra målinger med den kapacitive måler og den højfrekvente måler samstemmende, eftersom disse også måler i nogenlunde samme dybde af konstruktionen (20-30 mm). Derfor kan det give god mening ved fugtmålinger at benytte en kombination af ovennævnte målemetoder, så både overfladeforhold, men også dybdeforhold i relation til opfugtning af konstruktionen kan bestemmes. Dette er lidt i samme stil med de resultater der kan opnås, ved at kombinere målinger med indstiksmålere med og uden isolerede elektroder.

Til trods for, at målinger med fugthætten ligger tættest på veje-tørre-veje-forsøgene i forhold til målinger med kapacitiv måler og højfrekvent måler er det vist, at valg af sorptionskurver kan være yderst vanskeligt med mindre der er indgående kendskab til materialet, der måles. Udvalget af sorptionskurver er stort, og der er fejlkilder af betydning både ved valg af sorptionskurve, udtagning af prøven samt håndtering i laboratoriet. Dette underbygger igen, at én målemetode sjældent bør stå alene.

Det har også vist sig, at metoden til udtagning af veje-tørre-veje-prøverne var afgørende for det resulterende fugtindhold i prøvematerialet. Udtagning med tapetskraber medførte således, at det fugt, der var i materialet tilsyneladende blev fjernet ved udtagning af prøven.

I denne opgave er der også foretaget forsøg i relation til udtørringstider af forskellige byggematerialer. Dette har været for at illustrere materialernes "hukommelse" i forhold til opfugtning. Forsøget har været med et forholdsvis lille prøveomfang og fri fordampning til alle sider. Det viste sig, at mursten generelt var hurtigere til at afgive fugt i forhold til f.eks. en betonflise, hvilket formentlig også er gældende i en eksisterende konstruktion. Murstenens forholdsvis porøse struktur i forhold til betonen gør, at fugten langt hurtigere vil fordampe fra stenen. Det samme gør sig gældende ved opfugtning, hvor mursten også hurtigere vil indstille sig i en ligevægt med omgivelserne end en betonkonstruktion. Ved forsøget blev det illustreret, at gipspladers udtørring lå mellem murstenene og betonfliserne, hvilket ikke er tilfældet i praksis. Årsagen til dette er, at gipspladen som udgangspunkt havde optaget betydeligt mere fugt end murstenen og betonfliserne. Havde disse to materialetyper været placeret i samme omgivelser og med samme mulighed for opfugtning, havde gipspladen hurtigere afgivet den optagne fugt i forhold til murstenene og betonfliserne.

Det har vist sig nødvendigt at foretage indledende måling af fugtdistributionen i en konstruktion inden opsætning af fugthætten. Dette er både fordi målinger med fugthætten ved lave

fugtindhold er irrelevante og fordi der bør udvælges det eller de mest opfugtede områder for yderligere måling med fugthætten.

I projektet er det blevet diskuteret, hvorvidt diffusionstætheden af selve plastichætten har en indflydelse på måleresultatet. Eftersom det i fremtiden er hensigten, at der skal foretages kortvarige målinger, vurderes det, at tætheden af hætten er af mindre betydning. Langt større betydning har tilslutningsevnen mellem fugthætten og det materiale, der måles på. Ved meget porøse eller skadede vægoverflader samt overflader, hvor eventuel vægbeklædning har sluppet vedhæftningen til den bagvedliggende overflade, kan der vise sig at være ganske betydelige fejlkilder ved målinger med fugthætten. Derfor er en indledende inspektion samt vurdering af overfladerne, der måles på, nødvendige.

6.2. Perspektivering

Resultaterne i denne rapport indikerer, at fugthætten kan være et yderst interessant supplement til de eksisterende fugtmålemetoder, fordi den kan afdække et område, som der ikke findes måleudstyr til pt. Samtidig er den ikke sensitiv overfor de samme fejlkilder som mange af de andre metoder er. Der kræves dog fortsat en del udvikling og afprøvning af fugthætten inden den kan inkluderes i et almindeligt måleprogram.

For det første er det vigtigt, at opsamlingen af data forenkles. Det bør være muligt at finde en loggertype, hvor data kan lagres internt i hætten, så behovet for en ekstern dataopsamler samt kontinuerlig lagring af data på en tilsluttet computer undgås.

Dertil kommer, at fremskrivningsskemaet, der er opstillet på baggrund af måledata i denne rapport bør suppleres yderligere. Det mest optimale vil være, hvis der kan opstilles en algoritme for fremskrivning af fugtindholdet i en konstruktion på baggrund af måledata over 1½-2 timer.

Det er også nødvendigt, at foretage målinger med fugthætte på yderligere materialetyper, så også disse kan afdækkes. Det er måske nødvendigt at opstille et fremskrivningsskema eller fremskrivningsalgoritme til hvert af de mest almindeligt forekommende byggematerialer.

For yderligere fastlæggelse af, hvor lang "hukommelsen" af de forskellige byggematerialer har, bør der udføres yderligere, kontrollerede, udtørningsforsøg. Dette kan både foregå på materialer i laboratorium, hvor der kan foretages fri fordampning til alle sider eller foretages fordampning til én eller to sider. Derudover bør der udføres forsøg, hvor forskellige materialer er bygget sammen, på samme måde som det ville tage sig ud i en eksisterende bygning.

7. Kildehenvisninger

Litteratur:

- (Brandt, 1990) Brandt, E., 1990. *SBi-anvisning 170 Målemetoder til bygningsundersøgelser*. 1. red. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- (Brandt et al., 2009) Brandt et al., E., 2009. *SBi-anvisning 224. Fugt i bygninger*. 1. red. s.l.: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- (Johansen, 2005) Johansen, B. L., 2005. *Trægulve 1 - lægning og reparation*. s.l.: Træbranchens Oplysningsråd.
- (Nielsen, 1997) Nielsen, G. o., 1997. *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber*. 1. red. Lyngby: Polyteknisk Forlag.

Andre udgivelser:

- (Byg-Erfa, 141004) Byg-Erfa, B. E., 141004. Fugtindhold i træ - måleudstyr, metoder og vurdering. *Erfaringsblad 141004 (sfb 99)*.
- (Byg-Erfa, 050505) Byg-Erfa, B. e. a., 050505. Fugtindhold i beton og murværk - måling og fejlkilder. *Erfaringsblad 050505, Sfb (99)*.
- (Byg-Erfa, 141005) Byg-Erfa, B. e. a., 141005. Langtidsmåling af fugtindhold - i bygninger og bygningskonstruktioner. *Erfaringsblad 141005 (sfb 99)*.
- (Hansen, 1986) Hansen, K. K., 1986. *Sorption Isotherms - A Catalogue*, København: Den Polytekniske Lærestalt.
- (Lund-Hansen, 1967) Lund-Hansen, P., 1967. *Fugttransport i byggematerialer*, København: Den Polytekniske Lærestalt.
- (Møller et al., 2014) Møller et al., E. B., 2014. Moisture assessment by fast and non-destructive in-situ measurements. *10th Nordic Symposium on Building Physics*, 15-19. juni, pp. 1124-1131.

Websider:

- (Amazon, 2015) Amazon, 2015. *www.amazon.com*. [Online]
Available at: <http://www.amazon.com/MEP-Tramex-Destructive-Encounter-Measuring/dp/B0052P49B4>
[Senest hentet eller vist den 10. maj 2015].
- (Bønsøe, 2015) Bønsøe, B. &., 2015. *www.buhl-bonsoe.dk*. [Online]
Available at: http://www.buhl-bonsoe.dk/Produkter/Produkter/Fugt/dugpunkt/Fugtm%C3%A5lere.aspx?ProductID=PROD11197&M=ecom_catalog
[Senest hentet eller vist den 10. maj 2015].
- (Gann, 2011) Gann, M.-. U. R. G., 2011. *www.gann.de*. [Online]
Available at:
http://www.gann.de/Portals/0/Attachments/BA_2070_V11.08_GB.pdf
[Senest hentet eller vist den 10. maj 2015].
- (Masea, 2015) Masea Datenbank, 2015. *www.masea-ensan.de/* [Online]
Available at: <http://www.masea-ensan.de/>
[Senest hentet eller vist den 30. maj 2015]
- (Straube, 2006) Straube, J., 2006. *Building Science Corporation*. [Online]
Available at:
<http://www.buildingscience.com/documents/digests/bsd-138-moisture-and-materials>
[Senest hentet eller vist den 4. maj 2015].
- (Sundhedsstyrelsen, 2009) Sundhedsstyrelsen, 2009. *www.sundhedsstyrelsen.dk*. [Online]
Available at:
http://sundhedsstyrelsen.dk/publ/Publ2009/CFF/skimmelsvamp/Skimmelsvamp_bygn_anbef_jun09.pdf
[Senest hentet eller vist den 21. maj 2015].
- (Svensktermoinstrument, 2015) Svensktermoinstrument, 2015.
www.svensktermoinstrument.se. [Online]
Available at:
<http://www.svensktermoinstrument.se/sortiment/handinstrument-byggfuktmaetare/uni-1-gann-fuktmaetare.html>
[Senest hentet eller vist den 10. maj 2015].