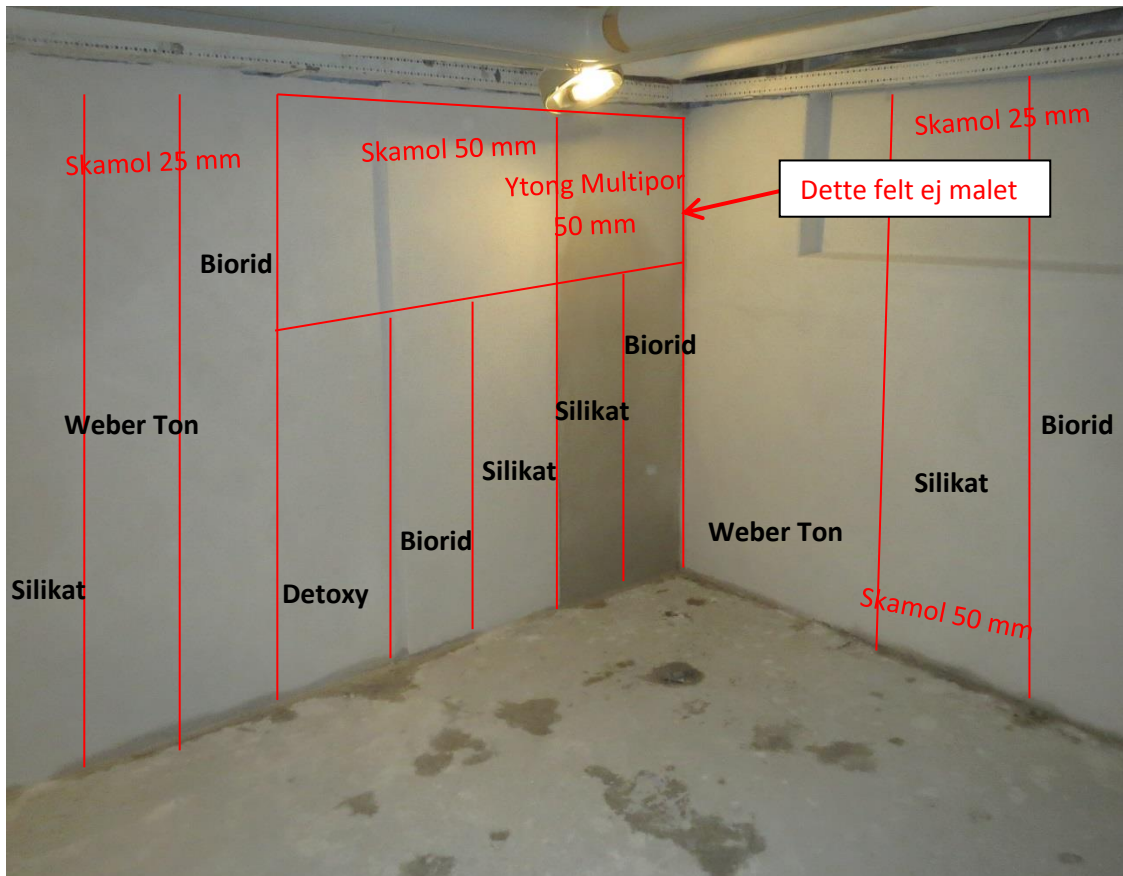


Indvendig fugtisolering af ældre grundmuret kælder

-Casestudie og teoretisk analyse af mineralske isoleringsplader

Hovedrapport



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

Af: Gitte Røhrmann Olsen

Afgangsspeciale

Master i Bygningsfysik 2015



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

Studiesekretær: Silpa Pinto
Telefon: 9940 2321
ssp@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: 4. semester, forår 2015

Titel på masterprojekt: Indvendig fugtisolering af ældre grundmuret kælder –
Casestudie og teoretisk analyse af mineralske isoleringsplader

Projektperiode: 01.02.2015 – 01.06.2015

Vejleder: Ernst Jan de Place Hansen

Eva B. Møller

Studerende:

[Underskrift]

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Gitte Røhrmann Olsen', written over a horizontal line.

Gitte Røhrmann Olsen

[Underskrift]

A solid horizontal line intended for a signature.

Ernst Jan de Place Hansen

Antal normalsider:

Afleveringsdato: 01.06.2015

Forord

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med det afsluttende eksamensspeciale på uddannelsen Master i Bygningsfysik ved AAU, Aalborg Universitet. Specialet er udarbejdet hen over forårssemesteret 2015 løbende fra d. 1. februar til 1. juni, og forudsætningerne for udarbejdelsen er de forudgående 1½ års kurser omhandlende bygningsfysikkens forskellige parametre som indeklima, energioptimering, fugtforhold og klimatilpasninger.

Baggrunden for specialet er en case, hvor en kælder i et typisk københavnerbyggeri fra 1901 har store fugt- og skimmelproblemer, der er søgt udbedret af flere omgange. Et forsøg med opsætning af tre forskellige typer mineralske isoleringsplader på kælderydervæggene har været iværksat for at løse problemerne med fugt og skimmelvækst. Formålet med specialet har derfor været at analysere og undersøge, om de forskellige typer af mineralske isoleringsplader fungerer efter hensigten, så de sikrer en tilstrækkelig tør overflade samt hindre skimmelvækst, når de opsættes under ekstreme forhold som den pågældende fugtige kælder.

Specialet omfatter derfor praktiske forsøg i form af fugtmålinger i materialerne løbende på stedet og forsøgsvis udtagning af plademateriale for nærmere undersøgelse i forhold til fugt samt eventuel skimmelvækst på og bag ved pladerne. Endvidere indgår teoretisk analyse og beregninger af materialernes egenskaber ved hjælp af blandt andet beregningsprogrammet WUFI, samt bygningens og sagens historik.

I forbindelse med udarbejdelsen af dette speciale vil jeg gerne takke Mikkel Larsen, Østergaard Bygge & Indeklimateknik, Steen Knudsen, ABVAC samt Klaus Richter Gydesen og personalet i Arbejdernes Landsbank, Enghave Plads for, at jeg måtte være en del af dette forsøg og undersøgelse.

En tak skal også lyde til mine vejledere Ernst Jan de Place Hansen og Eva B. Møller, som har været behjælpelige med god vejledning og opmuntring under hele processen, samt har givet mig ideer og hjælp til at finde frem til de forskellige relevante aspekter af den teoretiske baggrund.

Jeg vil også gerne sige tak til de leverandører/producenter, der har vist projektet stor interesse og ikke bare har indvilliget i at stille materialer til rådighed, men også beredvilligt har været klar med sparring i forhold til information og viden omkring de pågældende problemstillinger og materialernes egenskaber.

Til slut skal lyde en tak til min arbejdsgiver, der har givet mig muligheden og al den nødvendige tid for at kunne gennemføre denne uddannelse. Jeg ser frem til at kunne anvende min fornyede viden og inspiration i mit daglige virke.

Indholdsfortegnelse

Forord	3
1. Indledning	5
1.1 Problemformulering	8
1.2 Rapportens indhold	8
2. Sammenfatning (resume)	5
3. English Summary	6
4.1 Fugt og luft.....	10
4.2 Byggematerialer og fugttransport	11
4.2.1 Fugtligevægt	11
4.2.2 Transportformer	12
4.3 Kældre og fugt	14
4.4 Måleprincipper til fugtmålinger	17
5. Beregningsprogrammet WUFI	19
6. Casestudie – Enghave Plads 5.....	20
6.1 Bygningshistorik.....	20
6.2 Sags historie.....	21
6.3 Materialer & Målemetoder	23
6.3.1 Materialerne og deres forventede egenskaber.....	23
6.3.2 Målemetoder – Instrumenter, og arbejdsmetode	26
6.4 Undersøgelse og måleresultater	29
6.4.1 Visuelt og overflademålinger.....	29
6.4.2 Borehuller	30
6.4.3 Udtagning af materialeprøver	31
6.4.4 Udtagne skimmelpilprøver	34
6.5 Diskussion/delkonklusion på de målte resultater	34

1. Sammenfatning

Der findes i Danmark et stort antal bygninger af ældre dato med store fugtproblemer i form af indtrængende grundfugt og overfladekondens. Som alternativ løsning til de udvendige ofte omkostningstunge renoveringsløsninger og de traditionelle indvendige efterisoleringsløsninger findes der de såkaldte kapillaraktive isoleringsmaterialer. De mest anvendte typer af disse produkter er mineralske isoleringsplader af kalciumsilikat eller gasbeton. Der findes forskellige undersøgelser omkring disse pladers kapillaraktive egenskaber, og de anvendes i stigende grad som indvendige løsninger ved renoveringsopgaver. Dog findes der endnu ikke meget viden, om de er anvendelige som fugtisolering i kraftigt fugtpåvirkede miljøer som i en ældre grundmuret og grundfugtig kælder.

De kapillaraktive egenskaber i pladerne skal i henhold til den fugtteoretiske viden fungere på den måde, at vanddamp kan diffundere ind i materialet gennem de grove porer via damptryksforskellen. Inde i materialet kan der herefter ske en kapillarkondensation, når RF er nået en vis størrelse. Kondens bliver herefter transporteret tilbage gennem de finere porer ved kapillarsugning. Kapillarsugning finder også sted, når fugt fra det bagvedliggende materiale bliver transporteret frem til overfladen, hvor det fordamper til rumluften.

Gennem projektet er der foretaget dels et case studie med opsætning af tre forskellige typer mineralske kapillaraktive isoleringsplader i en grundfugtig kælder, og dels er der foretaget beregninger på de opbyggede konstruktioner. Resultaterne viste i både praksis og forsøgssimuleringer, at de opsatte isoleringsplader i perioden alle mindskede risikoen for fugtpåvirkninger og skimmelvækst på overfladen. I det praktiske forsøg var dette endda også tilfældet trods forskelligt anvendte overfladebehandlinger.

Ved måling inde i materialerne samt simulering af fugtindholdet i disse ses der dog forskel på, hvordan de enkelte materialer håndterer fugtpåvirkningerne over forsøgsperioden. Hvor de to kalciumsilikat baserede pladematerialer viste en tendens til udtørring af den samlede konstruktion, viste den sidste pladetype af kalk/sand-baseret gasbeton en tendens til at have svært ved at kunne transportere fugten til overfladen via kapillarsugning. De kapillaraktive egenskaber for de kalciumsilikat baserede plader vurderes umiddelbart derfor til bedst at kunne håndtere fugtpåvirkningerne.

Ved etablering af forsøgsåbninger i materialerne kunne der i nogle tilfælde konstateres stærkt forhøjede forekomster af skimmelsporer bag pladerne. Der var dog på undersøgelsestidspunktet ingen skimmelvækst og heller ikke nogen umiddelbar påvirkning af skimmelsporeniveauet i indeklimaet. På sigt må det dog vurderes, at der kan være en øget risiko for skimmelvækst med det fundne skimmelsporeniveau. Dette også som følge af, at der er opstået revnedannelser og manglende vedhæftning i forskelligt omfang på alle pladerne, hvor ilt og støv kan trænge igennem og give vækstbetingelser for skimmel. Hvad der er den reelle årsag til disse revnedannelser kunne ikke umiddelbart konkluderes, ligesom den konkrete vurdering af pladernes egnethed til så ekstreme forhold også har været svær at give grundet en relativ kort forsøgsperiode, og netop pladernes lidt atypiske opførsel med revnedannelser/manglende vedhæftning, som dermed ikke gav det fulde billede af pladernes egenskaber.

2. English Summary

In Denmark there are a large number of old buildings with moisture problems from entering ground moisture and condensation on the inner surfaces. As an alternative to the expensive external renovating solutions and the traditional interior insulation solutions there are the so-called capillary active interior insulation systems. The most recommended of these solutions consists of mineral calcium silicates or gas concrete. There are several studies of these so-called capillary active insulations boards and their qualities, and they are used increasingly in renovating works. However there is not much knowledge about whether they are useful as moisture insulation in environments where the moisture load is heavy. For example an old brick-built basement with a big amount of entering ground moisture.

According to theoretical literature the capillary active qualities found in these boards are supposed to work in the way, that water vapour is transported into the boards due to the vapour open system. The capillary forces avoid interstitial condensation by forcing the moisture back through the pit system. The capillary forces are also used to allowing an inward drying from the original wall.

This project is made both by a case study where three different types of mineral capillary active insulation boards are put up on the walls of a wet basement, and by simulating what is happening through the constructions in a simulating program called WUFI. The results both from the case study and the simulations showed that the insulation boards during the experimental period decreased the risk of moisture influences and mould growth on the surface. In the case study this was also the coincidence even though there were used different types of surface treatments on the insulation boards.

By measuring inside the materials to follow the moisture content it did show some dissimilarity to the different types of insulation boards. This was also the coincidence during the simulating results. Where the two types of insulation boards based on calcium silicates showed a tendency of a drying process through the whole construction, the board based on gas concrete had some difficulties by transporting the moisture from the wall to the surface. The capillary qualities of the calcium silicate boards are therefore estimated to be better to handle the moisture influences than the last board.

By making openings in the insulation boards it could be discovered that there were very high concentrations of mould spores behind some of the board. On the time of the experimental period there was however no growth of mould and the concentrations of mould spores had not inflected on the indoor climate. In the long term it is however estimated that there is a higher risk for growth of mould through to the high concentrations of mould spore. This is also based on the fact, that there have occurred cracks in different dimensions on all three types of board, which can lead to the entering of oxygen and dust that gives good growth conditions to mould. The course of these cracks have not been found during the examinations, and it is also difficult to give an exactly evaluation on whether the different types of capillary active insulation boards are useful in an environment like the case. It would need more time for study.

3. Indledning

I Danmark findes et stort antal bygninger af ældre dato, hvor problemer med indtrængende fugt og overfladekondens ofte er at finde grundet manglende/mangelfuld fugtspærre og isolering. Dette kan give risiko for skader i form af løst puds, misfarvninger, saltudtræk og skimmelvækst med yderligere risiko for negativ påvirkning af indeklimaet til følge.

Som alternativ dels til de mere omkostningstunge udvendige løsninger og dels til de traditionelle indvendige efterisoleringsløsning findes der såkaldte kapillaraktive isoleringsmaterialer, der dels via en relativ fornuftig isoleringsevne kan hæve den indvendige overfladetemperatur, så kondens undgås og dels via deres kapillaraktive egenskaber kan tillade indtrængende fugt at passere igennem materialet og stadig holde en tør overflade, så eksempelvis skimmelvækst undgås. Der findes efterhånden en del forskellige såkaldte kapillaraktive isoleringsplader, men de mest anvendte er mineralske isoleringsplader lavet af enten kalciumsilikat eller autoklavet¹ gasbeton. Kalciumsilikat plader er oprindeligt udviklet som højtemperatur isolering, der specielt i udlandet anvendes i industrien, eksempelvis som isolering af industrioivne (jf. www.skamol.com). Efterhånden er de så også begyndt at blive anvendt mere og mere som isolerings-/indeklimalplader grundet deres lave varmeledning og de kapillarsugende egenskaber. Derudover findes der blandingsmaterialer af eksempelvis træfiberplader med funktionslag² eller plader lavet af PUR skum, hvor små gennemgående huller udfyldt med særlig mørtel skal sikre de fugtregulerende egenskaber.

Der findes forskellige undersøgelser foretaget både herhjemme og i udlandet baseret på teoretiske og praktiske forsøg omkring, hvordan disse såkaldte kapillaraktive isoleringsplader fungerer i forhold til de påståede hygrotermiske egenskaber. Disse undersøgelser viser blandt andet, at der er store forskelle på både de kapillarer sugsevner, diffusionsåbenheden samt bibeholdelse af isoleringsevne ved de forskellige isoleringsplader, og det er derfor ikke lige meget, hvor eller hvordan materialerne bliver anvendt.

Efterhånden bliver de forskellige kapillaraktive isoleringsplader dog anvendt flere og flere steder i specielt renoveringsopgaver, hvor udvendige isoleringsløsninger ikke er en mulighed. Dog er der ikke særligt meget viden at finde i forhold til, hvordan de enkelte plader reagerer under meget kraftig fugtpåvirkning, hvis de opsættes i eksempelvis en meget fugtig kælder, da de fleste undersøgelser bygger på opsætning under "almindelige" klima-/vejrforhold.

I grundmurede kældre er der ofte store problemer med indtrængende fugt og kondens grundet manglende fugtspærre og isolering, og her kan det være svært at finde en løsning, der er tilstrækkelig til at mindske disse problemer uden, at der skal foretages den store opgravning udvendigt for at lægge dræn og isolering langs kælderydervæggene. Det kunne derfor være interessant at finde ud af, om de kapillaraktive isoleringsplader med deres isoleringsevne ville kunne sikre en tilstrækkelig tør overflade til at undgå kondens og skimmelvækst samtidig med, at

¹ Fremstillingsmetode, hvor pladematerialet udsættes for stort damptryk og temperatur i en tætlukket kabine

² Med funktionslag menes et indbygget lag af mineralsk materiale som ler, som skal fungere dampregulerende (iht. "CAPILLARY ACTIVE INTERIOR INSULATION SYSTEMSFOR WALL RETROFITTING: A MORE NUANCED STORY" og produktinfo fra Pavatex)

deres kapillaraktive egenskaber tillader fugt at passere igennem, så der ikke sker en yderligere ophobning af fugt i konstruktionerne.

Jeg har derfor fået lov til at følge med på en case i en ældre københavnsk ejendom, hvor der er store fugtproblemer i kælderen, og som forsøges udbedret ved opsætning af netop mineralske isoleringsplader.

3.1 Problemformulering

I den omhandlende case har der været forsøgt udført forskellige tiltag for udbedring af de pågældende fugt- og skimmelproblemer, blandt andet har der været anvendt en speciel drænpuds samt efterfølgende overfladebehandling med specialprodukt, der skal sikre en diffusionsåben overflade, så fugten kan trænge igennem og efterfølgende fjernes ved ventilation. Grundet et stort vandpres fra den omkringliggende jord har denne løsning ikke været tilstrækkelig til at hindre nye fugt- og skimmelproblemer, og forsøget med opsætning af de tre forskellige typer mineralske isoleringsplader er derfor iværksat for at se, om dette er den optimale løsning til at sikre, at der ikke opstår nye fugt- og skimmelproblemer.

Det har derfor været interessant at finde ud af, hvordan disse mineralske isoleringsplader virker rent fugtteknisk. Er deres egenskaber rent faktisk tilstrækkelige til at minimere risikoen for sundhedsmæssige problemer i indeklimaet, når pladerne opsættes under ekstreme forhold, som en kælder i et ældre københavnsk byggeri, der har et stort pres fra indtrængende grundfugt i ydervæggene? Kommer der skimmelvækst på/bag ved pladerne – hvis ja, hvilken indflydelse har det på indeklimaet i de pågældende rum? Hvordan er pladernes holdbarhed – giver den store fugtbelastning nogen risiko for skader på pladerne og deres overflade? Hvordan virker/reagerer de forskellige typer isoleringsplader i forhold til hinanden, og giver det nogen forskel, hvilken type overfladebehandling, der er anvendt?

Desuden er det interessant at se, om det giver samme resultat, når der beregnes på isoleringspladernes virkning i forhold til, når de anvendes i praksis. Hvis der er forskel i de beregnede resultater kontra de praktiske målinger, hvori ligger forskellen så, og hvad kan være årsag hertil?

Det er med udgangspunkt i ovenstående problemstillinger, at dette speciale er udarbejdet.

3.2 Rapportens indhold

Den følgende rapport kan deles op i følgende afsnit:

En teoretisk del, der beskriver generelt omkring fugtteori og fugttransport samt de problemstillinger, der kan være forbundet med fugt/varme i forhold til kældre generelt og opsætning af indvendig efterisolering. Desuden er der kort beskrevet om de mest almindelige måleprincipper, når det gælder om at undersøge bygninger og bygningsdele for mulige fugtproblemer.

Efterfølgende er der hele den praktiske case, hvor først bygningstypen generelt bliver beskrevet ud fra det tidstypiske og de tilgængelige data. Dernæst følger et afsnit omkring selve sagen og den historik, der ligger til grund for det igangsatte forsøg. De anvendte materialer med deres tekniske data og de anvendte målemetoder bliver herefter beskrevet. Slutteligt i dette afsnit samles der op på de resultater, der er kommet frem via målinger og undersøgelser.

Sidste afsnit omhandler en beregningsdel, hvor de opbyggede konstruktion fra den praktiske case bliver analyseret ved hjælp af beregningsprogrammet WUFI. Her foretages så vidt muligt simuleringer af de faktiske forhold for at se, om disse stemmer overens med de reelle undersøgelser og målinger på stedet. Der beskrives kort, hvordan simuleringerne er opbygget, og om der er afvigelser i forhold til de reelle konstruktioner. Simuleringsresultaterne for hver type opbygning bliver beskrevet, inden der slutteligt foretages en samlet vurdering på de i praksis fundne resultater kontra de beregnede resultater.

4. Fugtteori

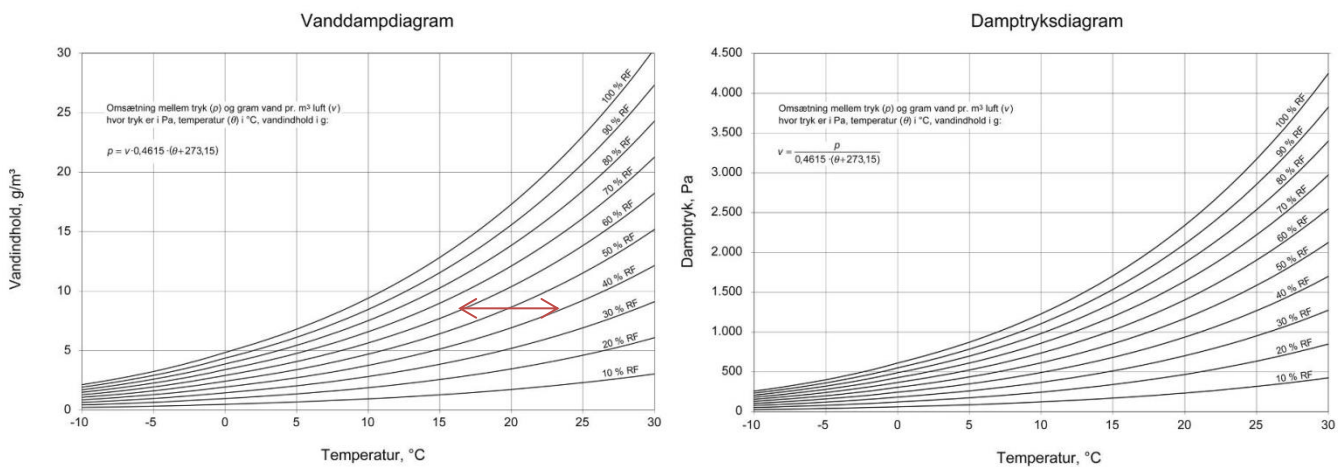
For at forstå, hvorfor fugtpåvirkning i store mængder anses for at være en af de væsentligste årsager til de fleste bygningskader, er det vigtigt med en grundlæggende viden omkring, hvordan fugt opfører sig under forskellige situationer og i forhold til forskellige materialer, konstruktioner og omgivelser.

Der er primært anvendt følgende kilder som baggrundsmateriale for dette afsnit: SBI-Anvisning 178 "Bygningers fugtisolering", SBI-anvisning 224 "Fugt i bygninger", "Indvendig efterisolering i fugtige kældre" af Stine Kirkeskov Jensen fra DTU samt Byg-Erfa blad 09 10 29 og 04 12 29.

4.1 Fugt og luft

Luften omkring os er, afhængigt af blandt andet årstid, temperatur og geografi, i stand til at optage og afgive fugt – kaldet vanddamp. Ved en given temperatur kan luft helt grundlæggende kun indeholde en begrænset mængde vanddamp, og når denne mængde er nået, har luften nået sit mætningsdamtryk eller mætningsindhold. Luftens indhold af vanddamp beskrives også ved den relative luftfugtighed, der angives som RF %. Når luften ved en given temperatur har nået sit mætningsindhold, er RF = 100 %. Denne temperatur kaldes for dugpunktet, og det er her kondens opstår, når vanddampen fortættes og bliver til vanddråber. Varm luft kan indeholde mere fugt end kold luft, da mætningsdamtrykket stiger ved højere temperaturer. Det betyder så, at når vanddampindholdet er uændret, så vil RF mindskes, hvis luften varmes op, og tilsvarende øges, hvis luften afkøles.

Vanddamtryk eller partialtryk er et udtryk for, hvor stort et tryk vandindholdet i luften udøver. Det er vigtigt at kende, da det har stor betydning for i hvilken retning, vanddampen søger hen, hvis der er forskel på eksempelvis luftens fugtindhold eller temperatur mellem ude og inde. Hvis vanddamtrykket er højest inde som følge af et højt fugtindhold i luften, så vil vanddampen søge ud gennem en bygnings konstruktioner. Da temperaturen aftager ud gennem konstruktionen, kan vanddampen fortætte til kondens, hvis luften et sted i konstruktionen når sit mætningsindhold. Dette kan så give risiko for fugtskader.



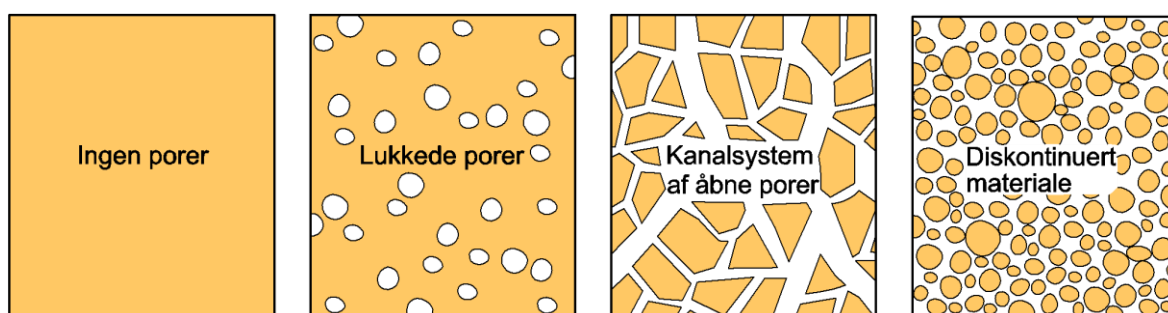
Figur 1 Vanddampdiagram (tv.) viser, når luft ved en given temperatur og med en given RF afkøles, så stiger RF, mens RF falder, hvis temperaturen stiger. Damtrykdiagram (th.) viser luftens maksimale vanddampindhold og vanddamtryk (partialtryk). /SBI 224 (2013)

Luftens fugtindhold og vanddamptryk kan blandt andet findes ved hjælp af vanddampdiagrammet og damptryksdiagrammet. Her er det også muligt at bestemme dugpunktstemperaturen ved et givent fugtindhold samt se den absolutte mængde fugt, vanddampkoncentrationen (g/m^3), som luften kan indeholde.

4.2 Byggematerialer og fugttransport

De fleste byggematerialer er i mere eller mindre omfang porøse, og vil dermed kunne optage fugt i større eller mindre grad enten i damp- eller væskeform. Byggematerialer kan deles op i 4 kategorier:

- De tætte materialer, der er uden porestruktur og derfor ikke har mulighed for at optage/binde fugt.
- Materialer med lukkede, isolerede porer, der kun i et begrænset omfang tillader fugttransport mellem porerne.
- Materialer med sammenhængende poresystem, som i mere eller mindre omfang er gennemtrængelige for luft og fugt i forskellig form.
- Materialer uden fast struktur men med stor andel af luft.



Figur 2 De 4 forskellige kategorier indenfor porestruktur i materialer. Materialer uden porestruktur er eks. metal og glas - Materialer med lukkede porer er eks. celleglas og polystyren - Materialer med åben porestruktur er eks. træ, (let)beton og tegl – Diskontinuert materiale er eks. Grus og mineraluld. /SBI 224 (2013)

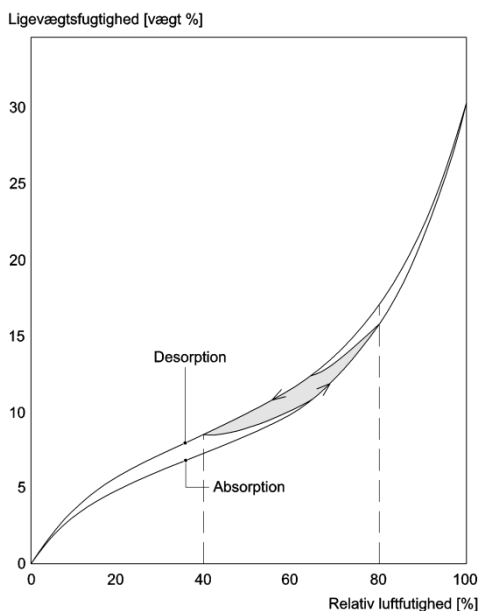
Porestørrelsen og sammenhæng mellem porerne har stor betydning for, dels hvor meget fugt et materiale kan indeholde, og dels hvordan og hvor hurtigt fugten optages og bindes i materialet. Ved grove porer optages fugt hurtigt, mens det ved finere porestruktur går langsommere. Til gengæld kan fugten trænge længere ind ved den fine porestruktur.

4.2.1 Fugtligevægt

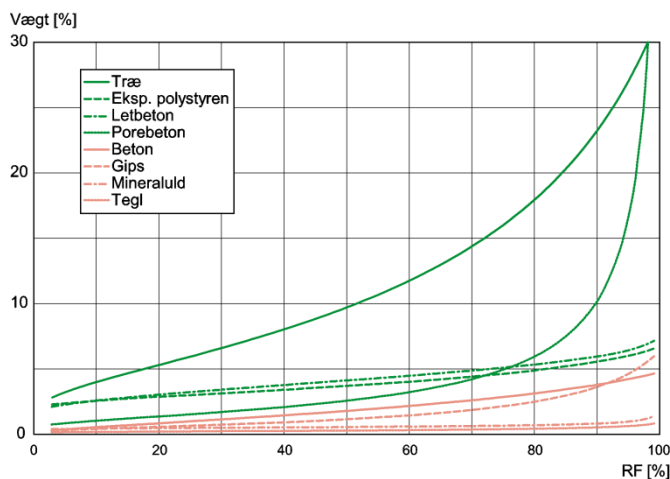
Et porøst materiale vil altid søge at være i fugtligevægt med dets omgivelser ved enten at optage eller afgive fugt. Denne tilstand indtræffer, når damptrykket inde i materialet er den samme som i den omgivende luft ved en given temperatur. Sker der ændringer i den relative luftfugtighed vil materialet igen søge en ny ligevægt ved enten at optage eller afgive fugt i porerne. Når et materiale optager fugt, kaldes det absorption, mens det kaldes desorption, når materialet afgiver fugt. Denne proces kaldes samlet for sorption og afbilledes på såkaldte sorptionskurver, og er afhængig af temperatur, materialets densitet og porestørrelse. Normalt kigges der på én sorptionskurve for et materiale – en middelvej. Men i virkeligheden er der afvigelser på absorptions- og desorptionskurvens forløb. Denne afvigelse kaldes for hysteresis og sker, når et

materiale skiftevis udsættes for opfugtning og udtørring, idet fugtindholdet så vil bevæge sig mellem kurverne.

Den hældning en sorptionskurve har, er et udtryk for, hvor stor fugtkapacitet et materiale har, altså hvor meget fugtindholdet ændrer sig ved ændring af RF. Et materiale har stor fugtkapacitet, hvis fugtindholdet ændrer sig meget ved en mindre ændring af RF. Det er som regel ved meget lave eller meget høje RF, at fugtkapaciteten er størst.



Figur 3 Desorptions- og absorptionskurve, der viser hhv. vandafgivelse og opfugtning. Ved svingninger i RF bevæger fugtindholdet sig mellem de to kurver - dette kaldes hysteresese. /SBI 224 (2013)



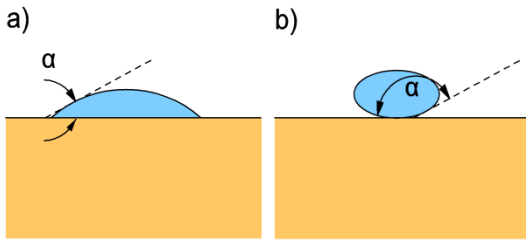
Figur 4 Forskellige sorptionskurver for forskellige materialer. Materialer med meget fine porer vil hurtigt få et højere vandindhold end materialer med grovere porer. /SBI 224 (2013)

4.2.2 Transportformer

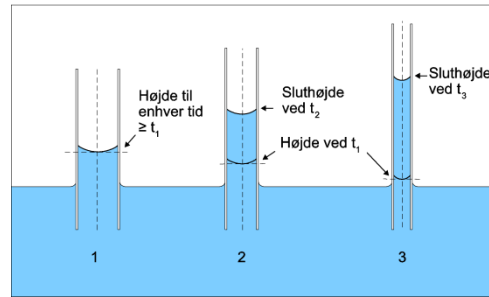
Når fugt transporteres til/fra luft og materialer kan det ske enten på væskeform eller dampform, hvilket foregår som følge af en forskel i vanddamptryk, vanddampindhold eller vandtryk og altid fra højeste side til laveste. Eksempelvis vil et højt damptryk i et materiale presse fugten mod et lavere damptryk i den omgivende luft.

Kapillarsugning

Fugt i væskeform kan transporteres i porøse, hygrotermiske materialer ved kapillarsugning, hvor det er vandtrykket, der er den drivende kraft, og det ses blandt andet ved opstigende grundfugt. Det sker ved den sammenhængskraft (kohæsiionskraft), der er vandmolekylerne i mellem samt den vedhæftningskraft (adhæsiionskraft), der er mellem vand og materiale. Når vand lægger sig på overfladen af et materiale dannes der en kontaktvinkel mellem disse. Jo mindre kontaktvinkel jo nemmere opfugtes materialet. Dette gør sig også gældende i et materiales porestruktur. Jo bedre vedhæftningskraft mellem materiale og vand jo mindre kontaktvinkel kommer der mellem porens indvendige overflade og vandet, hvilket resulterer i en opadrettet kraft, der suger vandet længere ind i poren. Desuden ses det, at jo finere porestruktur jo højere bliver den kapillarer stighøjde. Dette betyder også, at vand kan suges fra grovere porestruktur til finere porestruktur.



Figur 5 Ved en lille kontaktvinkel mellem dråbe og materiale, vil materialet hurtigt blive opfugtet, mens en stor kontaktvinkel mellem dråbe og materiale betyder, at overfladen ikke bliver opfugtet. /SBI 224 (2013)



Figur 6 Jo finere porestruktur jo højere vil vandet blive suget op i poren. Til gengæld tager det længere tid end ved grovere porestruktur, hvor vandet hurtigt bliver suget op i en lavere højde /SBI 224 (2013)

Diffusion

Ved diffusion er det fugt i dampform, der transporteres gennem luft eller materiale grundet forskel i vanddampindhold eller vanddamptryk. Mængden af vanddamp der over tid diffunderer gennem et materiale kan defineres ved hjælp af Ficks lov, hvor fugtmængden afhænger af trykforskellen (Pa) på hver side af materialet, tykkelsen af materialet (m) og materialets vanddamppermeabilitet (materialets gennemtrængelighed for vanddamp – kg/m s Pa).

$$gx = \delta p \frac{dpv}{dx} \quad \text{eller} \quad gx = \delta v \frac{dv}{dx}$$

Vanddamppermeabiliteten varierer meget fra materiale til materiale, men er størst ved porøse materialer. For finporede materialer kan den endog variere i forhold til den relative fugtighed, da fugttransporten både kan ske via diffusion og kapillarsugning.

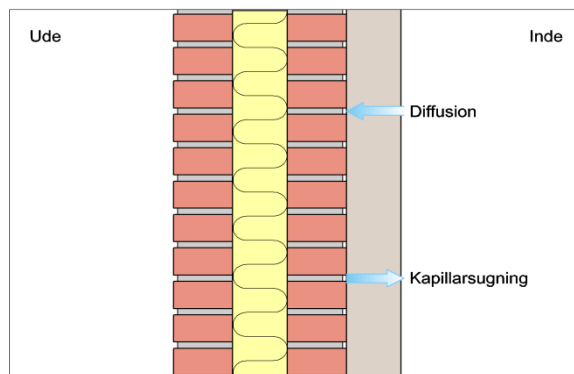
Når der skal foretages en fugtteknisk vurdering af et materiale anvendes materialets vanddampdiffusionsmodstand eller den såkaldte Z-værdi ($\frac{GPa s m^2}{kg}$), der er defineret som tykkelsen af materialet i forhold til vanddamppermeabiliteten.

$$Zd = \frac{d}{\delta}$$

Jo lavere Z-værdi, jo lavere er diffusionsmodstanden i et materiale.

Diffusion og kapillarsugning

For nogle porøse materialer kan fugttransporten ske både ved diffusion og ved kapillarsugning. Dette sker ved, at vanddamp diffunderer ind i materialet gennem de grove porer via damptrykforskel. Når det relative fugtniveau når en vis størrelse, vil der ske en kapillarkondensation inde i porerne, hvorefter det kondenserede vand via kapillarsugning bliver suget tilbage gennem mindre porer, hvor det så kan fordampe. Kondenseringen kan også foregå grundet temperaturforskel inde i en konstruktion



Figur 5 Forekomst af diffusion og kapillarsugning på én gang, når fugt diffunderer ind i et materiale og kondensere inden i for så at blive suget tilbage igen via kapillarsugning. /SBI 240 (2012)

(*"Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber"* af Gottfredsen & Nielsen) – eksempelvis hvis en porebetonplade eller en kapillaraktiv mineralsk isoleringsplade er opsat direkte på den indvendige side af en massiv murstensvæg. Porebetonpladen vil med sin lavere U-værdi mindske temperaturen på overfladen af murstensvæggen. Fugt, der diffunderer gennem porebetonpladen vil så kondensere på murstensvæggen, hvorefter fugten ved kapillarsugning vil blive transporteret tilbage til overfladen på porebetonvæggen.

Konvektion

Vanddamp kan også transporteres ved hjælp af konvektion, hvor den fugtige luft bliver flyttet via luftstrømme som følge af forskel på lufttryk eksempelvis vindtryk, lufttryk forårsaget af ventilation eller temperaturforskelle. Konvektion kan blandt andet være, når vanddamp transporteres gennem spalter og hulrum i en bygningskonstruktion. Det kan eksempelvis være, at der grundet ventilation er et mindre overtryk inde i en bygning – dette kan så forårsage, at vanddamp fra indeluften via konvektion bliver transporteret ud i en konstruktion, hvor dels trykket er lavere og temperaturen aftagende ude i konstruktionen, som så kan medføre stigende RF %, hvilket i sidste ende kan give risiko for kondens og fugtskader. Det kan også være eksempelvis grundet skorstenseffekten, hvor der i en almindelig bygning vil være et undertryk i den nederste del af bygningen og et overtryk i den øverste del, da varm luft er lettere end kold luft og derfor stiger til vejrs.

4.3 Kældre og fugt

Generelt er kælderen en bygningsdel, som er meget kompliceret at sikre mod fugtpåvirkning. Dette skyldes, at kældrens gulv og vægge kan blive påvirket af flere forskellige fugtkilder både udefra og indefra, og at varierende temperatur hen over året i dels den omkringliggende jord og dels også i selve kældrens indeklima kan forårsage yderligere fugtpåvirkning. Af forskellige fugtkilder kan nævnes:

Byggefugt – Der vil i en nystøbt kælder være et stort fugtoverskud, som under udtørring afgives til indeluften, der kan nå en RF på næsten 100 %, hvis ikke fugtoverskuddet fjernes ved eksempelvis udluftning.

Indtrængende/opstigende grundfugt – Den omkringliggende jord indeholder relativt meget fugt, og især kapillarsugende materialer som murværk og porøs beton kan opsuge denne fugt. Hvor højt fugten suges op i væggene afhænger blandt andet af balancen mellem fugttilførslen og mulighed for fordampning fra vægoverfladerne samt materialets porestruktur. Jo finere porestruktur, jo højere vil fugten stige op i konstruktionen.

Nedsivende regnvand – Ved kraftige regnskyl eller hvis terrænforholdene ikke er udført med tilstrækkeligt fald væk fra bygningen, så vil overfladevand kunne sive ned langs kælderydervæggen og opfugte denne.

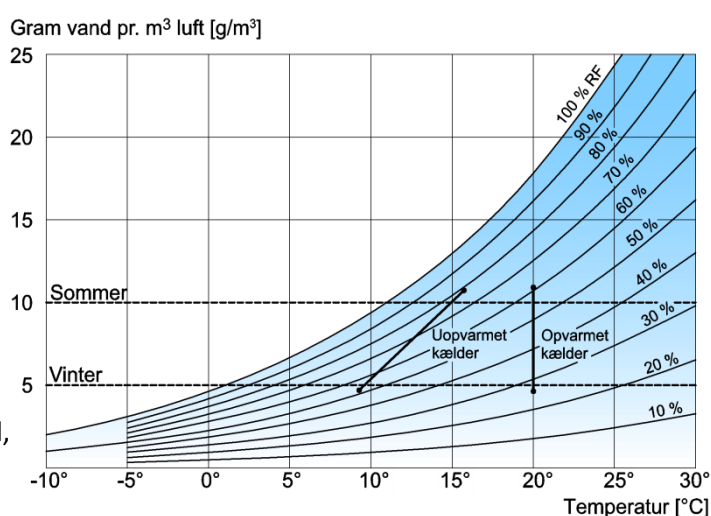
Kondens – Der kan være store forskelle på temperatur og RF i indeluften i en uopvarmet og uisoleret kælder kontra i udeluften. Om sommeren kan der opstå såkaldt sommerkondens, da indeluften i kælderen som regel ligger på omkring 15°C, mens udeluftens vandindhold ofte ligger på 10-12 g/m³, og RF inde i kælderen vil dermed ligge omkring 90-100%. Om vinteren ligger udeluftens vandindhold på 4-5 g/m³, og indeluftens RF ved 10°C ligger på ca. 60%. Det er derfor bedst at lufte grundigt ud i vinterperioden frem for i sommerperioden.

Kondens kan også forekomme i selv opvarmede kældre, hvis fugt tilføres til indeluften hurtigere, end den kan fjernes, og hvis væg-/gulvoverflader har lavere overfladetemperaturer end rumluftens temperatur som følge af manglende isolering og kuldebroer.

Desuden har det generelt stor indflydelse på fugtforholdene, om kælderen er opvarmet og/eller ventileret, samt hvilken anvendelse den har.

I nyere opførte isolerede og opvarmede kældre er fugtpåvirkningen udefra som regel minimeret væsentligt eller helt fjernet ved, at kælderen er udført med en optimal fugtsikring.

Ældre kældre med grundmurede ydervægge og manglende kapillarbrydning i gulv har ofte store problemer med især indtrængende grundfugt fra den omkringliggende jord, og en renovering kan derfor være nødvendig for at mindske fugtproblemerne og dermed forbedre forholdene mest muligt. Der findes flere muligheder for dette enten som enkelt tiltag eller som kombination af flere løsninger.



Figur 6 Diagrammet viser, hvordan sommerkondens opstår i en uopvarmet kælder, når varm udeluft afkøles inde i kælderen og RF dermed stiger. Er kælderen derimod opvarmet vil RF være lavere, og kondens kan dermed undgås. /SBI 224 (2013)

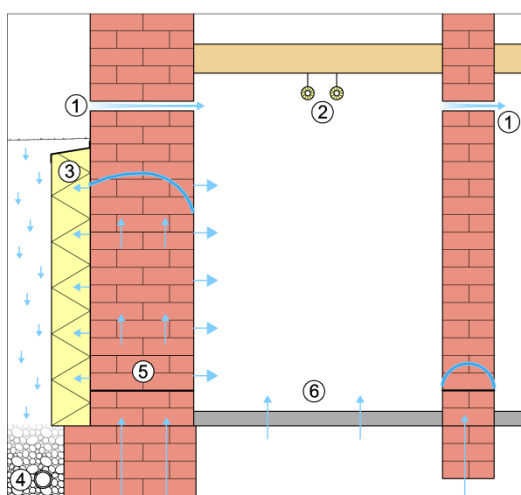
Den mest optimale løsning for at sikre kælderen mod fugtpåvirkninger er at udføre en udvendig fugtsikring, dels i form af omfangsdræn langs fundament og dels i form af drænende isoleringsmateriale på ydersiden af væggen. Samtidig kan der udføres en vandret fugtspærre i bunden af kælderydervæggen, så grundfugt ikke kan stige op der. En sådan fugtspærre kan udføres enten som stålplader, der presses ind i væggen, ilægning af asfaltpap ved udskæring eller injektion af vandstandsende kemikalier³. Desuden er det en god ide at sørge for en god ventilation af kælderen, så fugtig luft kan fjernes fra indeluften. Ligeledes kan øget opvarmning sammen med ventilation sænke den relative luftfugtighed i lokalerne. Det er desuden vigtigt med en

³ Forskellige forsøg med kemisk injicering har dog vist, at flere produkter kun er fugtbremsende og ikke fugtstandsede. Desuden er der stor forskel på effekten afhængigt af den oprindelige konstruktions opbygning, fugtindhold, saltindhold og rumluftens temperatur (jf. "Standsning af grundfugt i ældre ejendomme" v. GI Bedre Boliger)

diffusionsåben overflade på væggene, så eventuel indtrængende fugt kan fordampe fra overfladen og efterfølgende fjernes med ventilation.

I nogle tilfælde er det ikke muligt at udføre en udvendig løsning med isolering, og selvom det generelt frarådes, så kan en indvendig isoleringsløsning være et alternativ. Hvis en traditionel indvendig efterisolering med lægteskelet, isolering, dampspærre og gipsbeklædning vælges, er det vigtigt, at kælderen er tør og opvarmet til min. 20°C samt, at al organisk materiale på eksisterende vægge fjernes. Det er desuden vigtigt, at konstruktionen udføres fuldstændig damptæt, så indeluft ikke kan trænge ud og kondensere på den nu koldere eksisterende vægoverflade. Er der risiko for indtrængende grundfugt bør der ikke anvendes organiske materialer, da disse kan blive opfugtet, når fugten fordamper indad. Endvidere kan den damptætte konstruktion medfører, at indtrængende grundfugt stiger højere op i væggen, da den netop så ikke kan fordampe indad. Så generelt er en traditionel isoleringsvæg ikke at foretrække. Der findes dog alternativer til det traditionelle lægteskelet i form af mineralske uorganiske isoleringsplader, der både har en isolerende effekt samtidig med, at de i henhold til producenterne også er kapillarsugende, så de kan optage fugt fra den omkringliggende jord og tillade denne at fordampe fra den indvendige overflade, hvor den så kan ventileres væk fra rumluften. Desuden kan fugt fra indeluften diffunderer ind i pladerne, hvor der, når fugtniveauet er tilstrækkeligt højt sker en kapillarkondensering (jf. SBI 240, 2012). Efterfølgende bliver fugten så igen via kapillarsugning transporteret tilbage til overfladen, hvor den fordamper til bortventilering (se afsnit 4.2.2 Fugttransport). Dette skulle så sikre, at overfladen forbliver tør, så kondens og skimmelvækst undgås. Desuden giver den mineralske sammensætning ikke nogen særlige gode vækstbetingelser for skimmelvækst, da der ikke er nogen næring til stede.

Skal kældergulvet også optimeres mest muligt, så er det som regel nødvendigt med en fuldstændig opgravning, hvor der efterfølgende udlægges et kapillarbrydende lag, inden ny isolering lægges, og nyt betongulv støbes. (Byg-Erfa blad 04 12 29 "Fugtskader i ældre kældre") Dette er dog igen en meget bekostelig løsning, så alternativet kan være enten at udføre en fugtspærre ovenpå eksisterende betongulv i form af eksempelvis støbeasfalt eller en smøremembran, eller en løsning kunne være en diffusionsåben belægning som uglaseret klinkegulv. Vælges løsningen med udlægning af en fugtspærre direkte på eksisterende betongulv, skal det dog overvejes, om det kan give øget fugtpres på øvrige bygningsdele som eksempelvis



Figur 7 Fugtpåvirkning i en ældre kælder kan komme fra forskellige kilder eks. Indtrængende grundfugt, overfladevand og indvendig kondens. Forskellige tiltag kan udføres for at mindske dette:/SBI 224 (2013)

- 1) Ventilation fjerner fugtig luft og mindsker RF
- 2) Opvarmning mindsker RF og øger fordampning fra vægge – bør være i forbindelse med ventilation
- 3) Udvendig isolering med drænfunktion hæver overfladetemperaturen indvendigt og mindsker indtrængende grundfugt
- 4) Omfangsdræn mindsker den indtrængende grundfugt
- 5) Vandret fugtspærre i væggen mindsker opstigende grundfugt
- 6) Fugtspærre på gulv mindsker opstigende grundfugt

væggene.

En total løsning, så kælderen bliver som en helt ny kælder fugtmæssigt, kan dog være særdeles vanskelig at opnå dels grundet økonomi og dels de enkle konstruktionsforhold. Det er derfor vigtigt inden en renovering igangsættes at se på, hvilket maksimalt fugtniveau der ønskes at opnå og til hvilken økonomi.

I praksis er det ofte de simple (billigste) løsninger, som øget/kontrolleret ventilation, bedre opvarmning samt diffusionsåbne indvendige overflader som hydraulisk kalkmørtel, kalkmalinger og silikatmalinger, der anvendes, og i langt de fleste tilfælde er disse tiltag også tilstrækkelige til at sikre, at fugtpåvirkningerne ikke forårsager skader eller skimmelvækst på konstruktionerne. I nogle tilfælde er der dog et ønske om en øget overfladetemperatur for at undgå kondens, øge mulighederne for anvendelse af kælderlokalerne, eller at fugtpåvirkningerne udefra er så store, så de helt simple løsninger ikke er nok. Da det stadig er en meget bekostelig affære med en udvendig løsning, og det i nogle tilfælde heller ikke er muligt rent lovteknisk, så anvendes der indvendig (fugt-)isolering i form af de mineralske isoleringsplader.

4.4 Måleprincipper til fugtmålinger

Når en bygning eller en konstruktion af forskellige årsager skal undersøges for fugt, er der flere metoder, der kan anvendes. Den mest tilgængelige metode er den visuelle besigtigelse, hvor en bygning/konstruktion eftergås for synlige fugtskjolder, skimmelvækst, afskallede overflader eller råd samt synlige fugtkilder. Ofte foregår en fugtundersøgelse dog ved anvendelse af flere metoder for at få så grundig en vurdering som muligt af de pågældende forhold. Nedenfor er beskrevet de mest anvendte målemetoder:

Tørre-veje prøve:

Er en destruktiv metode, hvor der udtages en materialeprøve af den pågældende konstruktion, som vejes straks efter udtagning. Herefter tørres den i et varmeskab, til vægten ikke længere ændrer sig, hvorefter materialet så vejes igen. Fugtindholdet kan så udregnes ud fra vægtforskellen af de to vejninger. Metoden anses for at være den mest nøjagtige men er relativt tidskrævende, før et svar foreligger.

Indstiksmålere:

Er en non-destruktiv målemetode til måling af fugt i træ, hvor to elektroder (stikben) presses ind i træet. Herefter måles den elektriske modstand i træet. Jo højere fugtindhold, jo mindre modstand. De fleste af denne type måleinstrument måler fugtindholdet i %. Der findes to forskellige slags indstiksmålere. En med såkaldte isolerede stikben, hvor det kun er ude mellem benenes spids, og dermed inde i selve træet at målingen foregår. Den anden slags måler er med uisolerede stikben og måler i benenes fulde længde. Dette kan give usikkerhed, da træet godt kan være tørt indeni, mens måleren reagerer på en eventuel overfladeopfugtning.

Kapacitiv fugtmåler:

Igen en non-destruktiv målemetode, der anvendes til at undersøge fugtfordelingen i en konstruktion. Det er en overflademåler, da den kun måler i de øverste 10-20 mm af et materiale. Der findes flere typer, men de er alle sammen forsynet med en eller flere elektrisk ledende følere, som presses mod materialet. Det er dog vigtigt at vide, at disse målere er meget følsomme overfor indhold af salt i materialet, eller hvis der er inde i konstruktionen er andet ledende materiale som eksempelvis stålindrør eller elkabler.

Indbygningsfugtføler:

Lettere destruktiv målemetode, der anvendes, hvis der ønskes kontinuerlige målinger i en konstruktion/materiale over en længere periode. Der findes flere typer, der indbygges i konstruktionen/materialet, men de mest simple er lavet af krydsfiner eller træ som en rondel eller dybel med indborede elektroder, hvor det igen er modstanden mellem elektroderne, der bestemmer fugtindholdet i materialet. De lidt mere avancerede indbygningsmålere kan måle både temperatur, relativ fugtighed og tryk, og kan sende data løbende trådløst via en transmitter til en computer, hvor det så kan bearbejdes (jf. www.condair.dk).

Fugtfølere i borehuller:

Igen en lettere destruktiv målemetode, hvor en fugtføler sættes ind i et uorganisk materiale via et tæt lukket borehul. Når luften i borehullet har opnået fugtligevægt med det omkringliggende materiale, kan fugtføleren isættes og den relative luftfugtighed i hullet kan så måles. Dette er en langvarig målemetode, idet det kan tage adskillige dage, fra hullet er boret og forseglet, til der er opnået ligevægt. Til gengæld kan der måles flere gange over en periode, og det er muligt at lave flere borehuller i forskellig dybde, så fugtniveauet kan følges nøje.

Datalogger:

Datalogger er en lille selvstændig måler, der anvendes til temperatur- og fugtmålinger over en længere periode, og den kan måle i forskelligt tidsinterval. Den er især anvendelige til at følge årstidsvariationer og brugeradfærd i forhold til fugt- og temperatur forhold i eksempelvis boliger, kontorer og daginstitutioner. De opsamlede data indlægges efterfølgende på en computer til videre behandling. Det er også muligt at få løbende målinger, som ved indbygningsfølerne via en transmitter og eventuelt trådløst netværk. Hvis den anbringes i tæt forbindelse med en bygningskonstruktion, kan den også anvendes til at måle udviklingen i materialets fugtindhold.

Det er vigtigt med et grundigt kendskab til de anvendte målemetoder, bygningsfysiske forhold som materialekendskab og fugtforhold samt at foretage fugtmålingerne over et større område og i flere højder end det pågældende kritiske område for at kunne tolke tilstrækkeligt på de fundne resultater, og dermed til at kunne give så optimal en vurdering af forholdene som muligt.

5. Beregningsprogrammet WUFI

For at kunne foretage en simulering af de forskellige isoleringspladers forventede fugttekniske egenskaber og dermed også kunne lave en sammenligning af, hvordan de umiddelbart bør reagerer i den i dette projekt givne situation har jeg valgt at anvende simuleringprogrammet WUFI. I programmet er det muligt at simulere en konstruktions hygrotermiske forhold som temperatur, relativ fugtighed og absolut vandindhold over en længere periode, hvilket er særdeles relevant for dette projekt for at se, hvordan længere tids kraftig fugtpåvirkning indvirker på de enkelte isoleringsplader samt, om de forventede kapillaraktive egenskaber rent faktisk er til stede i pladerne.

Gennem mit studieforløb har jeg haft adgang til en begrænset version af programmet, men på en forespørgsel til udbyderen af WUFI har jeg fået lov til at få en tidsbegrænset licens til den udvidede version. Dette har givet mig muligheden for at kunne opbygge mine konstruktioner langt mere præcist, så de matcher de anvendte materials egenskaber, densitet osv. så meget som muligt.

Programmet WUFI er opbygget sådan, at det ud fra en række forskellige parametre, så som konstruktionsforhold af den givne konstruktion, naturlige klimabetingelser (indendørs og udendørs) og tidsbegrænsning, gør det muligt at foretage en simulering af, hvordan en eventuel fugttransport over tid foregår gennem en given konstruktion – sammensat eller homogen. Det er blandt andet muligt at undersøge generelle forhold som udtørring, kondenspåvirkning og påvirkning fra slagregn, og programmet kan regne fugttransporten både som diffusion og kapillarsugning. Desuden er det muligt at indsætte målepunkter forskellige steder i den opbyggede konstruktion, så forholdene lige præcis i disse punkter kan undersøges nærmere.

Dette gør det også muligt efterfølgende at sammenholde de simulerede resultater med de resultater, jeg kan måle mig frem til i det praktiske projekt.

6. Casestudie – Enghave Plads 5

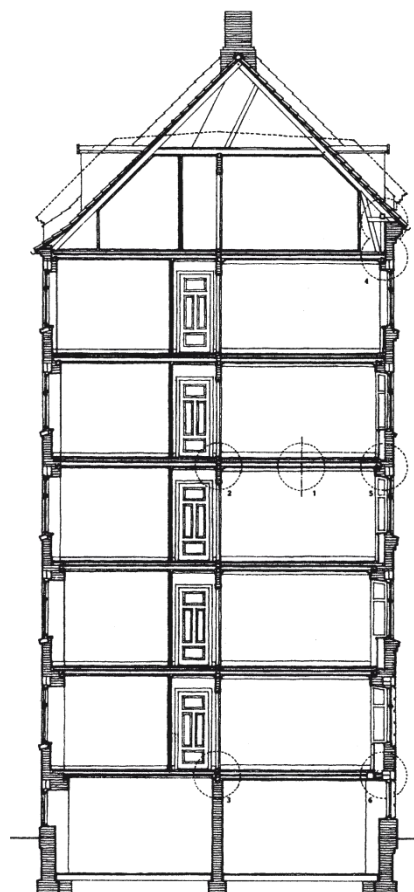
6.1 Bygningshistorik

Bygningen, hvor forsøget med de mineralske isoleringsplader er opsat, er en etageejendom fra 1901 i henhold til BBR. Det har desværre ikke været muligt at finde særligt meget materiale omhandlende lige præcis denne bygning, da bygningsejer ikke selv har ret meget materiale liggende, og af sikkerhedsmæssige årsager har jeg heller ikke fået bemyndigelse til at søge efter eventuelt yderligere materiale i kommunens arkiver. Jeg har derfor søgt at finde generel information omkring etagebygninger opført samtidigt med denne for at kunne få en tilstrækkelig baggrundsviden om den forventede konstruktionsopbygning i forhold til min videre undersøgelse af isoleringspladernes indvirken såvel i de praktiske målinger som ved beregning.

Bygningen er fra en periode (1850-1920), hvor der skete et massivt byggeboom i København som følge af industrialiseringen, der sendte en stor mængde mennesker fra land mod by, og der var dermed et stort behov for boliger til alle disse mennesker. Efter de to store brande i byen i 1728 og 1795 blev der efterhånden stillet flere og flere krav til bygningernes konstruktion, og i 1856 kom den første egentlige samlede lovgivning om byggeri, hvor der blandt andet var krav til murværkets tykkelse og materiale samt bygningens højde. (jf. www.danskbyggeskik.dk)

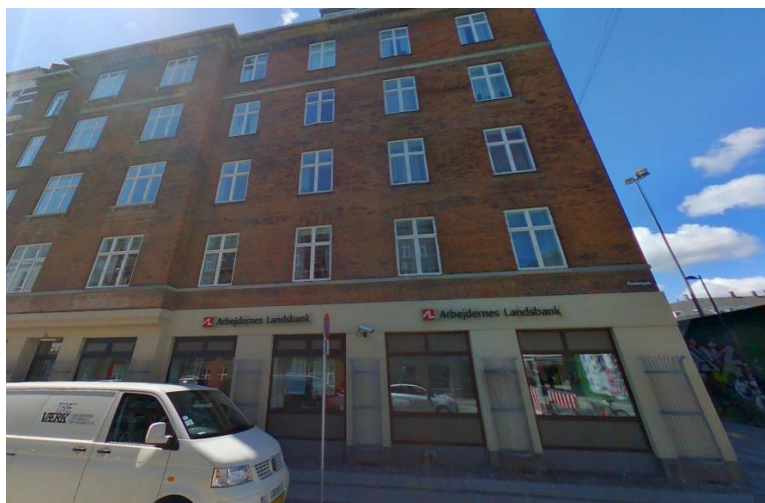
Generelt blev de fleste etageejendomme i den tid opført med massivt murværk for de bærende og længdeafstivende facadevægge og hovedskillevægge, og de var typisk i 5-6 normal etagers højde foruden kælder og loftetage. Kælderydervæggene blev normalt fuldmuret i 3-3½ stens tykkelse – ved eventuelle vinduesblændinger dog ofte kun i 1½ stens tykkelse. Murværkets tykkelse blev så tyndere for hver/hver anden etage indtil øverste etage, der skulle være i min. 1½ stens tykkelse. Fundamentet blev ofte udført i murværk på 5 skifte og 1 mursten bredere end den ovenstående ydervæg – i slutningen af 1800-tallet påbegyndtes dog også brug af støbte betonfundamenter, men det blev først senere mere udbredt. Kældergulvene i de tidligste bygninger fra perioden var som oftest af stampet ler, men med indførelsen af krav herom i byggeloven fra 1889 anvendtes der efterhånden også beton eller asfalt som gulv. I nogle bygninger kan et eventuelt betongulv dog være støbt ud senere end fra opførelsen.

Etageadskillelsen bestod af et træbjælkelag, der spændte fra ydervæg til ydervæg med mellemunderstøtning fra hovedskillevæggen. De indvendige vægge blev bygget som muret hovedskillevæg og øvrige vægge som lette bræddeskillevægge. Tagkonstruktionen var udført som en trækonstruktion med tagbeklædning af enten tegl, skifer eller metal. Der var krav om maksimal bygningshøjde, og her var



Figur 8 Snittegning af typisk etagebolig fra 1850-1920, hvor ydermurværk bliver smallere for hver/hveranden etage og bærende skillevæg er af murværk. /SBI 221(2008)

der taget udgangspunkt i et sadeltag med 45° hældning. Det såkaldte Københavnertag gav mulighed for en ekstra normaletage ved at selve facadehøjden kunne hæves mod, at taghøjden blev sænket til det næsten helt flade tag, der er karakteristisk for netop Københavnertaget. (jf. SBI-rapport 142 "Københavnsk etageboligbyggeri 1850-1900")



Billede 1 Enghave Plads - Casebygning set udefra. Opført i 1901 iht. BBR

Ud fra det umiddelbart tilgængelige materiale samt diverse besigtigelser på stedet vurderer jeg bygningen til at være tidstypisk med fuldmuret kælderydervægge i ca. 3½ stens tykkelse og murede indervægge – da det er kælderen, forsøget er opsat i, er det også udelukkende her, jeg har besøgt konstruktionerne. Der har tidligere været kældervinduer, men disse er på et tidspunkt blevet tilmuret.

Etageadskillelsen består af et træbjælkelag med indskud og pudset rørloft på forskallingsbrædder. Grundet den senere anvendelse af kælderlokalerne til opholdsrum og arkiv er der opsat nedhængt gipsloft på stålskinnesystem. Kældergulvet består som støbt betongulv af ukendt alder pålagt gulvmaling. (Plantegning af kælder kan ses i bilag 1)

6.2 Sags historie

Baggrunden for det i dette speciale omhandlende forsøg med opsætning af forskellige typer mineralske isoleringsplader er, at ejerne af kælderen på Enghave Plads tilbage i 2010 grundet blandt andet observationer af afskallet maling og puds på kældervægge havde fået en mistanke om, at der kunne være et generelt fugtproblem med mulig skimmelvækst til følge. Der blev derfor iværksat en større undersøgelse af alle kælderlokaler i ejendommen – dette speciale omhandler dog kun enkelte af lokalerne, hvor der periodevis har været personophold. Der var på den første undersøgelses tidspunkt gulvtæppe på gulvene i de berørte lokaler samt delvis træbeklædning på kældervæggene. Følgende sags gennemgang er ud fra de rapporter, rådgivende ingeniør Mikkel Larsen, Østergaard Bygge & Indeklimateknik, har udarbejdet undervejs i forløbet.

Generelt kunne der konstateres opstigende/indtrængende grundfugt i varierende højde på samtlige vægge – ved ydervægge i fuld højde, og der blev desuden konstateret skimmelvækst i et omfang, der vurderedes at have betydning for indeklimaet. Det blev derfor besluttet, at en renovering var nødvendig for at komme fugt- og skimmelproblemet til livs.

Gulvtæpper samt diverse træbeklædninger og eksisterende puds på alle opfugtede vægge blev fjernet, og overfladerne skimmelsaneret. Undervejs blev der løbende ført tilsyn af bygherres rådgiver, og efter endt nedrivning og skimmelsanering kunne der pludselig konstateres kraftig

vandindtrængen ved det ene kælderydervægshjørne. Vandet nærmest løb ind gennem fugerne og ned af væggen. Ved en udvendig gennemgang kunne det konstateres, at den vandrende, som tagedløbet havde direkte afvanding til, var tilstoppet grundet sammenpresset sne. Det blev derfor nødvendigt med en affugtning af de indvendige overflader samt sikring af tilstrækkeligt/korrekt fald på belægning og vandrende uden for, så vand fra tagedløb blev ledt ordentligt væk fra bygningen.



Billede 2 Det ene af de to kælderrum, hvor pågældende forsøg er udført. Her før første udbedring, hvor der kan ses fugtskjolder i niche bagerst. Der er desuden træbeklædning på ydervæg



Billede 3 Ydervægge ved senere gennemgang. Der er søgt udbedret med drænpuds og diffusionsåben overfladebehandling, men der ses tydelige fugtskjolder og misfarvning af skimmelvækst

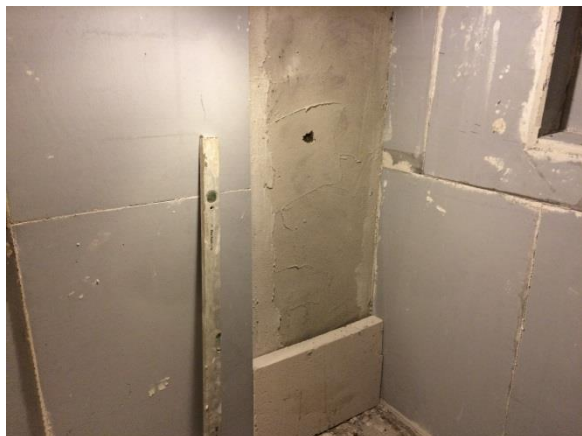
Rådgiver anbefalede, at den mest optimale løsning for udbedring af problemerne i kælderen ville være en udvendig efterisolering inklusiv etablering af dræn langs hele kælderydervæggen. Men grundet vanskeligheden for at opnå gravetilladelse af Københavns Kommune som følge af Metrobyggeri på Enghave Plads og diverse forsyningsledninger under fortovet, samt det betydelige økonomiske omfang, så blev en indvendig løsning i stedet for valgt. Det blev besluttet, at væggene indvendigt skulle pudses op med en speciel drænpuds samt afslutningsvis behandling med en speciel malingstype, der begge via en mikroporøs struktur samt fugtregulering har til formål at suge fugten fra underlaget og ud til rumluften, hvor den så kan ventileres væk (*i henhold til producenterne*).

Efter ca. tre år blev rådgiver igen tilkaldt, da der på ny blev observeret misfarvninger og skimmelvækst på kælderydervæggene samt afskalning af overfladebehandlingen. Her kunne det konstateres, at ydervæggene fortsat var kraftigt opfugtede, men dog ingen direkte vandindtrængen. Der blev derfor udført en genbehandling af væggene med specialmalingen samt forbedring af den naturlige ventilation i kælderlokalerne. Desuden blev de udvendige forhold også eftergået, hvor der ikke kunne findes nogen problemer med afledningen af vand fra tag og terrænoverflade. Det viste sig dog endnu en gang, at behandlingen ikke var tilstrækkelig, og ca. et års tid senere kunne der på ny konstateres misfarvninger og skimmelvækst på kælderydervæggene grundet et fortsat kraftigt forhøjet fugtniveau.

Derfor blev det besluttet som forsøg at opsætte mineralske isoleringsplader på de mest belastede vægge, da pladernes porøse struktur og kapillaraktive egenskaber skal tillade fugttransport fra

underlaget og ud til rumluften. Samtidig gør deres isoleringsevne, at overfladetemperaturen hæves, hvilket mindsker risikoen for kondensdannelse på overfladerne.

Ny skimmelsanering samt opsætning af isoleringsplader inklusiv afsluttende overfladebehandling blev udført og afsluttet i december måned 2014. Der blev desuden opsat mekanisk ventilering for at sikre tilstrækkelig ventilation af kælderrummene.



Billede 4 Opsætning af mineralske isoleringsplader i Rum 1 - Her hjørne med Skamol SkamPlus+ og Ytong Multipor



Billede 5 Færdig væg i Rum 2, hvor MicroThermplader er overfladebehandlet med tre forskellige produkter – Silikat, WeberTon 411 og Biorid

6.3 Materialer & Målemetoder

6.3.1 Materialerne og deres forventede egenskaber

Da der findes flere typer af mineralske isoleringsplader på markedet, blev det besluttet at lave et forsøg ved at opsætte tre forskellige typer for at se, om de reagerer ens, eller om der er nogen typer, der er bedre egnet til så ekstreme forhold som den pågældende kælder. Til hver af pladerne er det muligt at få et samlet system med klæber, afsluttende puds og ved nogle produkter også en afsluttende overfladebehandling. For at give pladerne så optimale forhold som muligt, blev det derfor valgt, at de dels skulle opsættes med deres eget system, og dels blev der lavet områder, hvor pladerne blev overfladebehandlet med samme produkt. Dette for at se, om det har nogen betydning for effekten af pladernes egenskaber. De tre typer isoleringsplader er: Ytong Multipor, Skamol SkamPlus+ og Microtherm/EpaTherm.

	Ytong Multipor	Skamol SkamoPlus+	MicroTherm	Multipor Letmørtel	Weber Multi 292	MicroTherm Klæber ⁴
Densitet (tørvægt) g/m ³	115	225	250	Letvægt	-	-
Varmeledning λ W/mK	0,042	0,062	0,067	0,18	-	-
Vanddampdiffusion μ	5	3	3	< 10	< 20	-
Vandabsorbtion % vægt v. 23°C/80 % RF	≤ 6	-	200	-	-	-
PH-værdi	-	10,3	8-11	-	-	-
Trykstyrke MPa	0,3	2,8	2,8	1,5-5	-	-

Tabel 1 Oversigt over de tilgængelige tekniske data for de enkelte isoleringsplader og deres klæber

⁴ Det har desværre ikke været muligt at få specifikationer på MicroTherms klæber

Isoleringspladerne

Ytong Multipor:

Ytong Multipor består af kalk, sand, cement og vand. Under fremstillingsprocessen, der foregår via autoklavering, dannes pladens åbne porestruktur. Ud fra de tilgængelige produktdata kan det ses, at det er en relativ let plade med en densitet på kun 115 kg/m³. Det er også den plade med den lavest angivet varmeledning på 0,042 W/mK. I forhold til fugttransport har pladen iht. producenten en relativ lav vanddampdiffusion med en Z-værdi på 5, mens dens vandabsorption i forhold til egen vægt kun ligger på maksimalt 6 %.

Ifølge producenten, så er Ytong Multipor en diffusionsåben isoleringsplade, der uden at ophobe fugt skal virke fugtregulerende ved at kunne optage og afgive fugt fra rumluften, og dermed forhindrer fugt på overfladen med skimmelvækst til følge. Til gengæld fortæller producenten, at den ikke umiddelbart er egnet til opsætning i et miljø med kraftig fugtpåvirkning.

Skamol SkamoPlus+:

Skamol SkamoPlus+ er det, der betegnes som en kalciumpulverplade. Den er sammensat af kalk, silika, vand og træfiber. Træfibermasse er tilsat for at give pladen øget styrke, da den oprindeligt er produceret til at kunne modstå meget høje temperaturer og blandet andet til anvendelse som isolering af ovne i stålindustrien (*iht. leverandør fra Byggros*). Den har en højere varmeledningsevne end Ytong Multipor på 0,062 W/mK, og det er også en mere massiv plade med en densitet på 225 kg/m³. Til gengæld har den en lidt lavere vanddampdiffusion med en Z-værdi på 3. Det har desværre ikke været muligt at finde information på pladens vandabsorption.

Ifølge producenten er denne plade kapillaraktiv både med en stor diffusionsåbenhed, der er med til at regulere den relative fugtighed i omgivelserne, og dels har den de kapillarer egenskaber, så den kan flytte fugt fra den kolde side af væggen til den varme side.

MicroTherm/EpaTherm

MicroTherm eller EpaTherm, som den kaldes fra producentens side (*epasit*) er en ren kalciumpulverplade, der består af kalciumpulver og vand, som ligesom de to øvrige plader også bliver autoklavet ved produktion. Den har stort set identisk varmeledningsevne som Skamol pladen, kun en anelse højere på 0,067 W/mK, og den har også samme vanddampdiffusion med en Z-værdi på 3. Til gengæld er den en lille smule tungere med en densitet på 250 kg/m³. På denne plade har det været muligt at finde vandabsorptionen, og ifølge de tilgængelige data, så skulle den kunne optage, hvad der svarer til 200 % af egen vægt.

I henhold til producenten så skulle den plade også være kapillaraktiv og fungerer på samme måde som Skamol pladen med en stor diffusionsåbenhed til regulering af den relative fugtighed i omgivelserne, samtidig med at de kapillarer egenskaber sikrer, at fugt bliver flyttet fra den kolde til den varme side af væggen.

Klæbesystemer

Ytong Multipor Letmørtel:

Til opsætning af Ytong Multiporplader anvendes producentens egen mineralske letmørtel. Denne anvendes både som klæber og afsluttende puds i forbindelse med et armeringsnet, der sættes uden på pladerne for at give dem større styrke. Den har en varmeledningsevne på 0,18 W/mK og en vanddampdiffusion med en Z-værdi på < 10. Den har altså en diffusionsmodstand, der er en noget større end selve pladen.

Det er også muligt at anvende et andet klæbesystem, der er baseret på en hydraulisk kalkmørtel. Denne skal ifølge producenten (*St.Astier v./ Nordisk NHL*) have en vanddampdiffusion med en Z-værdi på helt ned til 0,13, hvilket må siges at være særdeles lavt. Dens varmeledningsevne er så en anelse højere med 0,54 W/mK.

Det er dog Ytongs eget system, der er anvendt til opsætning af Multipor pladerne i denne sag.

Skamol – Weber Multi 292:

Til opsætning af Skamolpladerne anvendes der en fiberforstærket letpuds fra Weber. Denne består af cement, sand, tilsætningsstoffer, specielle fibre og mineralisk let tilslag. Den benyttes på samme vis, som Ytongs Letmørtel, både som klæber og afsluttende puds. Der findes ikke umiddelbart nogen data på varmeledningsevnen, men til gengæld har den en vanddampdiffusion med en Z-værdi på < 20. Dette er også en noget større diffusionsmodstand end pladens egen værdi.

MicroTherm Klæbesystem:

Det har desværre ikke været muligt at finde særlig meget teknisk information omkring MicroTherm eller EpaTherms eget klæbesystem andet end, at der er tale om en kalk/cement mørtel i stil med den der anvendes til Skamolpladerne. Resten er tilsyneladende forretningshemmeligheder (*Iht. MicroTherm*). Til gengæld er opsætningssystemet til MicroTherm/Epatherm pladerne det eneste, hvor der er anvendes flere trin og dermed også flere produkter til opsætningen⁵.

Der anvendes i første omgang en grunder, der smøres på pladerne. Efterfølgende fuldklæbes pladerne til underlaget med den tilhørende klæber – fuldklæbning gælder i øvrigt for alle 3 typer plader, ligesom der ikke må anvendes mørtel i samlingerne mellem pladerne, da dette kan forårsage kuldebro. Til sidst spartles pladerne med en tilhørende spartelmasse, inden de så kan overfladebehandles med en diffusionsåben maling.

Overfladebehandlinger

Alle pladerne er efter opsætning og afsluttende pudsning blevet overfladebehandlet med diffusionsåbne materialer. Der hører ikke specifikt noget specielt overfladeprodukt med til de

⁵ I henhold til monteringsvejledning fra producenten *epasit*.

enkelte systemer, fælles for alle er dog, at de anbefaler anvendelsen af diffusionsåbne produkter for at bevare pladernes egenskaber.

Den eneste, der anbefaler et navngivent produkt er Skamol, der anbefaler Weber Ton 411. Dette er et silikatbaseret produkt, der indeholder silikoneharpiks, men skulle have en hydrofil overflade, der kan optage og afgive fugt (*iht. Saint-Gobain Weber*). Ved nærmere kig på de tekniske data har den vanddampdiffusionsmodstand med en Z-værdi på ca. 300, hvilket er bemærkelsesværdigt højt, når det sammenlignes med værdien for silikatmaling med en Z-værdi på 1 (*iht. tabel 29, SBI 240 (2013)*).

Desuden er der anvendt to andre typer silikatmaling – en helt almindelig gængs silikatmaling samt Detoxy fra Protox. Den sidstnævnte skulle i henhold til producenten indeholde såkaldt aktiv titandioxid, der via en reaktion med ilt nedbryder organiske stoffer til CO₂ og vand, når de lander på overfladen (*iht. Protox*).

Den sidste overfladebehandling, der er anvendt, er Biorid/KefaRid, der er baseret på ekspanderet vulkansten. Dette skulle give produktet et enormt overfladeareal (ca. 20.000 gange større end andre overfladebehandlinger), der så via kapillareffekten kan optage vand fra tilstødende materialer eller den omkringværende luft for så at afgive det igen, når det relative fugtniveau falder (*iht. Kefa International*). Den pålægges i en bestemt lagtykkelse afhængigt af fugtbelastning. Ved almindelig indeklimaforhold anvendes 800 g/m, mens der ved kældre anvendes 1000 g/m². Biorid produktet har desuden en varmeledningsevne på 0,085 W/mK. Det har desværre ikke været muligt at få oplyst værdier for vanddampdiffusion eller vandabsorption, men ud fra datablad kan det ses, at produktet over tid (72 og 144 timer) kan transportere fugt, hvad der svarer til ca. 55 % af egenvægt. Med en lagtykkelse på 800 g/m² absorberer/desorberer produktet 450 g/m² fugt over 72 timer

Drænpuds

Det sidste materiale, der er relevant for dette forsøg, er den puds, der er anvendt direkte på den oprindelige kælderydervæg. I forbindelse med den første udbedring blev væggene afrenset for eksisterende pudslag, og et nyt blev pudset op. Dette er en specialpuds, der dels skal have en mindre isolerende effekt men samtidig også en drænende effekt, der skal være med til at udtørre vægoverfladen. På denne sag er der anvendt en Drænpuds fra Kefa. Denne er ligesom overfladebehandlingen Biorid baseret på ekspanderet vulkansten og så cement. Igen skulle produktet få en enorm stor overflade i kraft af det iblandede vulkansten, der så via kapillareffekt kan transportere fugt fra det bagvedliggende materiale til overfladen, hvor det kan fordampe. Varmeledningsevnen for Drænpuds er på 0,099 W/mK (*iht. Kefa*). Det har desværre heller ikke ved dette produkt været muligt at få oplyst værdier for vanddampdiffusion eller vandabsorption.

6.3.2 Målemetoder – Instrumenter, og arbejdsmetode

Det var lidt til overvejelse, hvilke måleinstrumenter og arbejdsmetoder der ville være mest anvendelige for at kunne følge udviklingen i de opsatte isoleringsplader. Dels ville det være interessant at se, hvad der sker på overfladen af pladerne – både rent visuelt, men også i forhold til eventuel overfladefugt og temperatur. Dels ville det også være interessant at kunne følge

fugtudviklingen inde i materialerne for at se, om der sker en fugtvandring mellem det oprindelige murværk og de opsatte plader. Jeg har derfor haft overvejet meget, om det enten skulle være måling med indbyggede følere, eller om det skulle være mere manuelt, hvor jeg så løbende ville skulle ned og måle direkte.

Jeg besluttede at foretage mine dybdemålinger i materialerne manuelt, da jeg alligevel ville skulle lave løbende overflademålinger på stedet. Desuden ville en anskaffelse af passende indbygningsfølere have været af en større økonomisk omkostning, som jeg ikke havde mulighed for at foretage.

De måleinstrumenter, jeg har haft benyttet under projektet, er som følger:

Overflademålere:

Til måling af fugtniveauet i overfladerne på pladerne har jeg anvendt to forskellige typer af kapacitive fugtmålere, Tramex og Trotec T660, der begge via non-destruktiv måde og ledende følere måler fugtniveauet i en relativ værdi i de yderste 10-20 mm af et givent materiale. Jeg har valgt to forskellige instrumenter, da den ene, Tramex, er ideel til at måle, om der generelt er overfladefugt eller ej, mens Trotec T660 via sin større måleskala i digits er god til at måle finere nuancer i værdierne. Dette for tydeligere at kunne se, om der sker en udvikling i fugtniveauet på overfladen undervejs.

Tramex måleren måler på en relativ skala, og for murværk/beton er den gående fra 0-100, hvor RV 0-30 er acceptabelt og RV 70-100 er uacceptabelt.

For fugtmåleren Trotec T660 er måleskalaen angivet i "Digits". For materialer med vægtfylde på ca. 1800 kg/m³ (som beton) er værdierne: <70 digits = tør, for 90-120 digits = fugtigt, for 120-140 digits = meget fugtigt, for >140 digits = vådt.

Dybdemåler:

Til måling af fugt inde i materialerne har jeg valgt at anvende et multiinstrument, Testo 400, hvor jeg gennem borehuller kan indstikke en føler, der så måler på tre parametre inde i hullet: Det relative fugtniveau RF%, temperatur samt den absolutte fugtmængde g/m³. Når hullerne er boret i den ønskede dybde sættes en tætsluttende prop, så luften inde i hullerne kan indstille sig i ligevægt med det omkringliggende materiale. Herefter kan målingerne så foretages.

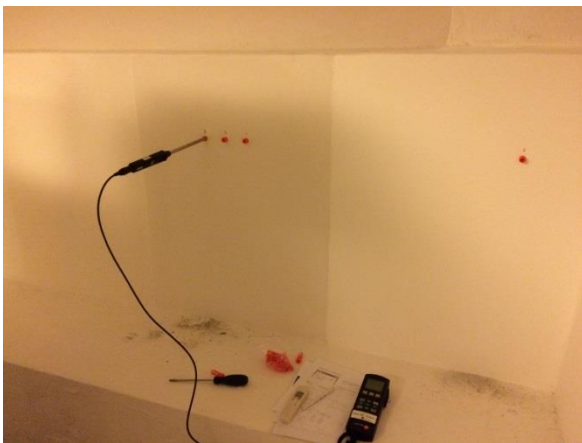
Yderligere måleinstrumenter:

Ud over de forskellige ovenfor nævnte fugtmålere, så har jeg også anvendt en temperatur måler, der via infrarød stråling kan måle overfladetemperaturen på pladerne. Dette for at se, om der ville være kritiske områder, hvor temperaturen kommer så langt ned, at den kan give risiko for kondensdannelse.

Desuden har jeg haft to dataloggere liggende i de to rum for at kunne se, hvordan indeklimaforholdene opfører sig i forhold til temperatur og relativ luftfugtighed, da dette kan have en indvirkning på fugtforholdene i og på isoleringspladerne.

Arbejdsmetoder:

Arbejderne med opsætning af isoleringspladerne blev afsluttet lige inden jul 2014, og jeg foretog de første målinger i midten af januar. Den første gang kunne jeg udelukkende lave overflademålinger, da der først skulle laves borehuller, så luften i disse kunne indfinde sin ligevægt med materialerne. Der blev boret 3 huller i hver af de tre typer isoleringsplader, og hvert af de tre huller blev boret ind i forskellig dybde. Første hul blev boret ind til ca. midt i isoleringspladen, andet hul blev boret ind til klæbelaget, og sidste hul blev boret helt ind i det oprindelige murværk – dette for at kunne følge den fugttransport, jeg forventede ville være mellem materialerne. Da jeg ved andet besøg i kælderen kunne konstatere, at MicroTherm pladerne havde løsnet sig omkring borehullerne, valgte jeg at bore yderligere 3 huller i et område, hvor MicroTherm pladerne sad fast for at være sikker på sammenlignelige målinger i forhold til de to øvrige pladetyper. Alle borehullerne er lavet der, hvor pladerne er 50 mm tykke.



Billede 2 Igangværende måling af fugtniveau inde i borehuller. Der er udført tre borehuller for hver pladetype - midt i plade, i klæber og i murværk



Billede 3 Overfladefugtmåling foretaget med kapacitetsfugtmåler af mærket Trotec T660. Viser tør overflade

Overflademålingerne har jeg foretaget ud fra et "målenet", så jeg har målt i samme områder på alle pladerne hver gang (se måleresultater i bilag 2).

I alt er der foretaget 5 gange overflademålinger og 4 gange dybdemålinger fordelt med de første 4 og 3 målinger med 14 dages mellemrum, og den sidste måling efter yderligere 4 uger startende fra 15/1 og frem til 26/3.

Ca. midt i hele måleperioden har jeg haft de to dataloggere liggende for at undersøge, hvordan indeklimaet i kælderen opførte sig i forhold til relativ luftfugtighed og temperatur i perioden. Disse var opsat i 4 uger. Desuden lavede jeg en her-og-nu måling af indeklimaforholdene ved hver måling, hvor både temperatur, luftfugtighed og absolut fugtmængde blev målt.

Hver gang er isoleringspladerne eftergået visuelt for at se, om der skulle være misfarvninger efter fugt og skimmelvækst, samt deres generelle tilstand under forløbet.

Materialeprøver:

Som afsluttende forsøg på projektet havde jeg fået lov til at udtage prøver af isoleringspladerne, hvor jeg har skåret åbninger i de enkelte isoleringsplader. Dette for at kunne se, hvordan

forholdene er bag ved isoleringspladerne, og hvordan/om den kraftige fugtpåvirkning indvirker på materialerne. Der blev lavet to åbninger i hver type plade – dog blev der lavet en ekstra åbning i MicroTherm pladerne, da disse i større områder, havde sluppet vedhæftningen, og det derfor ville være interessant at se, hvad der eventuelt var årsag til dette. Alle åbninger på nær i Ytong Multipor blev foretaget der, hvor pladerne er 25 mm tykke. Den mindske tykkelse for Ytong Multipor er 50 mm.

Desuden er der udtaget skimmeltests i form af dels aftryksprøver og dels i form af Mycometer test for at se, om der eventuelt ville være skimmelsporer og vækst af skimmel bag pladerne. Ligeledes er der taget aftryksprøver i hvert rum for at se, om eventuel skimmelvækst bag pladerne har indvirkning på indeklimaet.

6.4 Undersøgelse og måleresultater

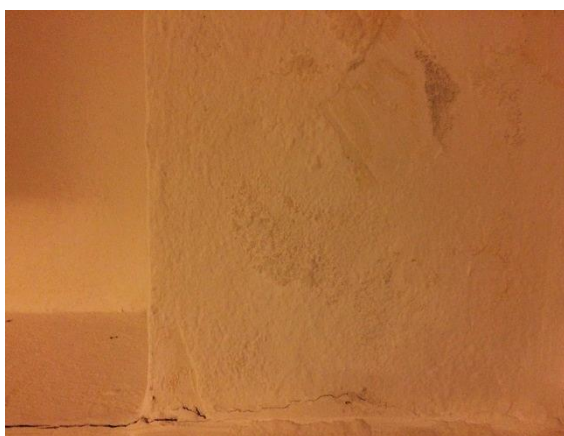
Gennem de foretagne undersøgelser og fugtmålinger er det muligt at opsummere resultaterne. I bilag 2 forefindes skitsetegning i opstaltsform af alle vægstykker, hvor blandt andet overflademålinger, borehuller og udtagne prøveområder er indtegnet. Desuden rummer bilaget også måleresultater fra borehuller og udtagne skimmeltests.

6.4.1 Visuelt og overflademålinger

Generelt viser overflademålingerne, at overfladerne er tørre uafhængigt af pladematerialer og overfladebehandling med måleværdier for henholdsvis Trotec T 660 på <70 og Tramex, der viste RV 0. Der var let forskel på de målte værdier for de enkelte plader. På Ytong og MicroTherm pladerne var det generelle niveau mellem 20-45 digits, mens de lå på 40-70 på Skamol pladerne. De øvrige ydervægge i tilstødende kælderrum og over/ved siden af de opsatte plader viste overflademålinger med værdier op til 185 digits – altså kraftigt opfugtet og havde tydelige fugtskjolder, saltudtræk samt afskallende maling i varierende omfang



Billede 8 Svage udslag på fugtmåler Tramex med måleværdier på RV 35



Billede 9 Tydelige fugtskjolder, saltudtræk samt afskallende maling på murpille over MicroTherm plader

I Rum 1 viste begge fugtmålere dog udslag i de nederste 15 cm langs både Skamol og Ytong pladerne. Tramex måleren med det mindste udslag på RV 30-50 (tørt til let fugtigt) og Trotec T660 med 75-90 digits (let opfugtet). Ved nederste hjørne af Ytong kunne der dog måles op til 130

digits (kraftigt opfugtet). Det hjørne har i øvrigt været det mest fugtbelastede område under hele sagsforløbet.

I Rum 2 kunne der måles et forhøjet fugtniveau i nederste venstre hjørne af MicroTherm pladerne med en måleværdi mellem 90-95.

Ved hver inspektion blev overfladerne også gennemgået visuelt. Ingen af pladerne viste tegn på fugtpåvirkning i form af eksempelvis fugtskjolder eller synlige misfarvninger af skimmelvækst. Der kunne dog konstateres mindre vandrette revner i overfladen på de 25 mm Skamol plader ved første inspektion d. 15/1. Højden, hvor revnerne kunne konstateres, svarer ca. til pladehøjden, altså ved en vandret pladesamling. Desuden var der områder omkring revnerne, hvor pladerne lød hule, og det sandsynliggjorde, at pladerne i disse områder havde sluppet sin vedhæftning. Der var også enkelte områder ved Ytong pladerne, hvor disse lød hule.



Billede 10 Tydelige langsgående revne mellem MicroTherm plade og murværk i brystningsniche



Billede 114 Vandret revne ved pladesamling på 25 mm Skamol plader

Ved MicroTherm-pladerne kunne der ligeledes ved første inspektion konstateres en revne hele vejen langs samling mellem plade og væg ved brystningsnichen, og også her lød pladerne hule, som om de havde sluppet vedhæftningen i et større område. Grundet den hulhed, som også var i området, hvor borehullerne var lavet, blev det valgt at lave nye borehuller i et område, hvor der ikke var tegn på, at pladerne var løstsiddende. Dette således, at målingerne i de forskellige materialer er foretaget på et sammenligneligt grundlag. Det kunne i øvrigt observeres, at den langsgående revne i samlingen mellem MicroTherm og væg blev bredere under forløbet.

6.4.2 Borehuller

Generelt ser det ud til, at det absolutte fugtniveau målt i g/m^3 i murværket har stor indflydelse på fugtniveauet i både pladerne og rumluften. Når fugtniveauet i murværket stiger, sker der en cirka tilsvarende stigning i pladernes og rumluftens absolutte fugtniveau, og tilsvarende ved fald i det absolutte fugtniveau i murværket.

For Skamol pladerne kan det ses, at det absolutte fugtniveau i murværket ligger jævnt omkring $12,5-13 g/m^3$ i perioden. Fugtniveauet i klæbelaget svinger fra $12,5-14 g/m^3$ gennem perioden med en kraftig stigning d. 26/2 for derefter at falde. Generelt ligger fugtniveauet i klæbelaget over fugtniveauet i både murværk og plademateriale hele perioden igennem. Midt i pladen ligger

fugtniveauet ca. 1 g/m³ lavere end for murværket med en tendens til en svag stigning i slutningen af perioden.

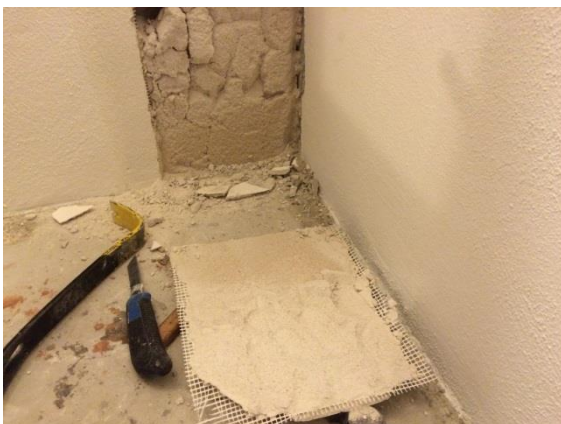
Ved Ytong pladerne ligger det absolutte fugtniveau mellem ca. 13-14 g/m³. Dette er ca. 2 g/m³ højere end for murværk, der ligger mellem ca. 11-12 g/m³. Dog følger fugtniveauet i pladerne de generelle svingninger i murværket, og det ser ud til, der sker en langsom udtørring af murværket via pladerne til rumluften. Klæbelaget ligger jævnt omkring 12 g/m³ med en svag tendens til stigning i den sidste del af perioden.

For MicroTherm pladerne kan det i begge måleområder ses, at fugtniveauet generelt er faldende fra murværk gennem klæber og til isoleringspladerne. Generelt ligger det absolutte fugtniveau i murværket mellem 14,5-15 g/m³ med en tendens til svagt fald i slutningen af perioden. Fugtniveauet i pladerne ligger mellem 12,5-13,5 g/m³ igen med en tendens til svagt fald i slutningen af perioden. Klæbelaget for A borehullerne svinger mellem 13,5-15 g/m³, mens det for B borehullerne ligger jævnt omkring 13,5 g/m³.

Det absolutte fugtniveau i rumluften ligger for henholdsvis Rum 1 mellem 8-9 g/m³ og for Rum 2 mellem 8,5-9,5 g/m³. Kigges der på det typiske fugtindhold for indeluften i den målte periode fra januar til marts, så vil det i henhold til figur 28 i SBI 240 "Fugt i bygninger" ligge omkring 7 g/m³ ved et udendørs fugtindhold på 3,5-4 g/m³. Der sker altså umiddelbart en yderligere fugttilførsel på 1-2,5 g/m³ til rumluften i de to kælderrum. Via datalogningen kunne det desuden ses, at temperaturniveau og relativt fugtniveau gennem perioden har ligget stabilt omkring 20-21°C og 49-52% RF.

6.4.3 Udtagning af materialeprøver

Ved sidste inspektion blev der lavet åbninger i alle tre typer isoleringsplade for at se, hvordan forholdene er bagved pladerne, og hvordan den kraftige fugtpåvirkning har indvirket. Der blev lavet 2 åbninger á ca. 30x30 cm i alle tre plader, dog blev der lavet en ekstra åbning i MicroTherm pladerne grundet de store områder, hvor de tilsyneladende sad løst. Som skrevet tidligere blev åbningerne foretaget i de 25 mm tykke Skamol og MicroTherm plader, mens det grundet minimumstykkelsen på 50 mm for Ytong, blev foretaget i denne plade.



Billede 12 Åbning Y1 i Ytongpladen. Det afsluttende pudslag har sluppet, og der ses tydeligt fugt i bunden, mens Ytong pladen er smuldret i stykker



Billede 53 Fugtmåling i åbning Y1, der viser kraftig opfugtning

Ved Ytong pladerne blev den første åbning (Y1) foretaget i det nederste hjørne, hvor overfladefugtmålingerne har vist det højeste fugtniveau. Her har det lydt, som om pladen sad løst, da det lød hult, når der blev banket på pladen. Ved udtagning af plade gik denne nærmest smuldrende fra hinanden. Det yderste afsluttende pudslag inkl. armeringsnet kunne tages af i et stykke og var tydeligt vådt i de nederste 10 cm på bagsiden. Det samme gjorde sig gældende for forsiden af selve pladen. Der kunne på både bagside af pudslag og på forside af plade måles op til 180 digits i de nederste 10 cm. Pladen var desuden synligt våd på hele bagsiden ved udtagning. Klæbelaget var ligeledes fugtigt og sad delvist løst. Der lugter generelt af fugt i åbningen og på bagsiden af pladen.



Billede 14 Udtaget Ytong plade fra åbning Y2, hvor plade kom fri i et stykke inkl. det meste af klæber



Billede 15 Åbning S1 i Skamol plader, hvor plade sidder relativt godt fast, men slipper i klæbelag. Fugtniveau målt i plade viser kraftig opfugtning.

Den anden åbning (Y2) blev foretaget i ca. 70 cm højde, hvor dels overfladen kunne måles tør, og hvor der ikke var tegn på, at pladen havde sluppet vedhæftning. Her kunne Ytong pladen tages ud i et samlet stykke inklusiv hele klæbelag, mens det afsluttende pudslag inkl. armeringsnet også her let kunne tages af pladens forside. Der kunne måles kraftigt forhøjet fugtniveau i pudslaget bag pladen – op til 180 digits.

Ved Skamol pladerne blev den første åbning (S1) lavet i nederste hjørne mod Ytong pladerne, hvor fugtniveauet var størst. Det fritskårne plademateriale slipper klæbelaget ved udtagning. Der



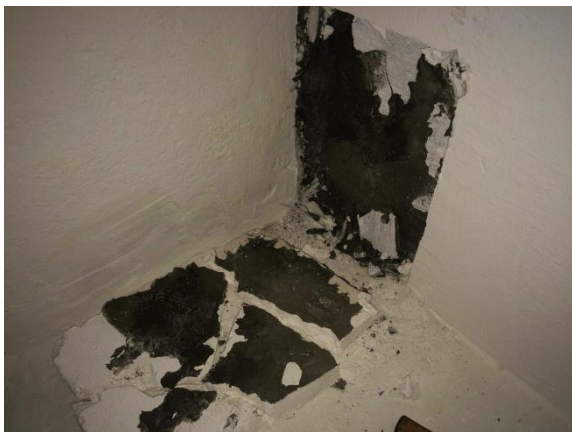
Billede 6 Åbning S1 i Skamol plade ved hjørne mod Ytong. Bagside af plade og hjørne i åbninger ses tydeligt våde.



Billede 7 Tydelig opfugtning i klæbelag bag Skamol plade i åbning S2

kunne måles kraftigt opfugtet på bagside af Skamol plade og på klæbelaget, der er desuden tydeligt fugtskjold inderst i hjørnet af åbningen. Ved hulbankning i klæbelag kunne det tydeligt ses, at pudslag var stærkt opfugtet.

Åbning nummer 2 i Skamol pladerne (S2) blev foretaget omkring den ene vandrette revne. Det var lige i en pladesamling, og hvor pladen har lydt hul som ved sluppet vedhæftning. Igen er det



Billede 18 Åbning M1 i MicroTherm plade, hvor plade går i stykker ved udtagning samt klæbelag deles. Der er tydelige fugtskjolder



Billede 19 Åbning M2 i MicroTherm plade, hvor der var tydelig revne mellem plade og væg. Plade inkl. klæber har helt mistet vedhæftning og kan tages ud i et stykke

pladen, der slap klæbelaget, og både bagsiden af plade samt klæbelaget var tydeligt opfugtet omkring 125-135 digits. Klæbelaget sidder løst på pudslaget, og pudslag er tydeligt vådt inden bagved.

Ved MicroTherm pladerne blev der som nævnt lavet tre åbninger. Den første (M1) blev foretaget i nederste venstre hjørne, hvor der kunne måles forhøjet fugtniveauer i overflademålingerne. MicroTherm pladen sad relativt godt fast, og gik delvist i stykker ved udtagning, hvor det meste af det yderste lag klæber (klæber er delvist smurt på plade og væg inden sammenpresning) i øvrigt blev siddende på pladen. Både klæber og bagside af MicroTherm plade måles kraftigt opfugtet op til 160 digits. Der blev desuden lavet hul ind til pudslag, som også kunne måles kraftigt opfugtet op til 180 digits.



Billede 20 Åbning M3 i MicroTherm plade. Pladen går delvist i stykker ved udtagning. Klæberen deles i de to lag



Billede 21 Bagsiden af det udtagne pladestykke i M3 måles kraftigt opfugtet.

Åbning nummer to (*M2*) blev foretaget i den øverste del af MicroTherm væggen, hvor pladerne har sluppet vedhæftningen til væggen helt. Pladen kunne inkl. hele klæbelaget tages ud i ét stykke – der var således slet ikke nogen vedhæftning mellem pudslag og klæbelag. Både klæbelag og pudslag måles kraftigt opfugtet mellem 160-180 digits.

Den sidste åbning (*M3*) blev foretaget i bunden af væggen, hvor pladerne umiddelbart har bibeholdt deres vedhæftning. Ved udtagning går pladen delvist i stykker, og klæber deles i de to lag. Generelt måles både bagside af plade, klæbelag og bagvedliggende pudslag stærkt opfugtet.

6.4.4 Udtagne skimmelpøver

Samtidig med udførelsen af åbninger i alle isoleringsplader blev der også taget aftryksprøver dels i indeklimaet og dels i åbningerne for at undersøge om, der ville være forekomster af skimmelsporer, og i hvilket omfang det så eventuelt ville være. De udtagne aftryksprøver i åbningerne blev taget henholdsvis på forsiden af klæber som har haft kontakt med isoleringspladerne, og på bagsiden af klæber som har haft kontakt med det bagvedliggende pudslag.

Ud fra prøveresultaterne, som kan se i bilag 2 med målingsresultater, kan det ses, der i nogle tilfælde er et relativt højt niveau af skimmelsporer. Dette gælder specielt første åbning i Ytong pladerne (*Y1*), hvor niveauet for både for- og bagside af klæb er over 100 kolonier af skimmelsvampe. Dette betragtes normalt som værende langt over det acceptable niveau. Ligeledes blev der også fundet forholdsvis høje forekomster af skimmelsporer bag Skamol pladerne i åbning 2 (*S2*) og ved MicroTherm pladerne i åbning 1 (*M1*) mellem 50-60 kolonier på hvert aftryk, samt ved Ytong pladerne i åbning Y2 med 44 kolonier. For de to prøver, der blev taget i indeklimaet i hvert rum var niveauerne henholdsvis 10 og 30 kolonier for hver aftryksprøve.

I de åbninger, hvor der kunne konstateres et højt antal skimmelsporer, blev der også udtaget Mycometer test for at se, om det høje antal skimmelsporer havde givet anledning til skimmelvækst. Der blev udtaget et styks Mycometer test i hver af de 4 åbninger, men som det kan ses af resultatet i bilag, så var der ikke umiddelbart tegn på skimmelvækst bag nogen af pladerne. Den højeste målte Mycometer værdi blev målt til 24, hvilket er i kategorien ingen/ringe vækst.

6.5 Diskussion/delkonklusion på de målte resultater

Det er interessant at sætte ovenstående resultater op over for problemstillingen omkring, om de opsatte plader ville kunne mindske fugt- og skimmelproblemerne i den pågældende kælder trods de ekstreme fugtpåvirkninger. Dette fordi der er flere forhold i resultaterne, der ikke giver et entydigt svar, og som dermed kan diskuteres.

Kigges der rent visuelt på de opsatte pladers effekt, må det umiddelbart konkluderes, at de fremstår uden nogen synlige tegn på fugtindikationer i form af synlige opfugtninger, fugtskjolder eller skimmelvækst, og dette gør sig gældende uanset pladetype eller overfladebehandling. Det lader dermed til, at det ikke umiddelbart har noget at sige for lige netop denne problemstilling, hvilken type diffusionsåben overfladebehandling, pladerne er behandlet med. Dog er der enkelte

områder – i bunden generelt og ved det mest fugtbelastede hjørne ved Ytong pladerne, hvor overfladerne kan måles opfugtet i let til høj grad, og her vurderes det, at der på sigt kan være en risiko for, at der opstår problemer i form af fugtgennemslag og i sidste ende skimmelvækst.

I forhold til de kapillarer egenskaber i dels pladerne, men også i deres samlede opsætningssystemer, ser det ud til, at selve Skamol og MicroTherm pladerne virker efter hensigten, så fugt fra murværk bliver transporteret ind til den indvendige overflade via kapillarsugning. Ytong pladerne ser ud til at have sværere ved at transportere fugten fra murværk, idet den har et højere absolut fugtniveau end murværk. Men i henhold til de tekniske data er pladens vandabsorption også relativt lav med kun op til 6 % af egenvægt i forhold til eksempelvis MicroTherm pladen med op til 200 % af egenvægt. De kapillarer egenskaber i form af kapillarsugning virker derfor begrænset for Ytong pladen.

Kigges der på hele systemet, altså plade inkl. klæber og eventuel afsluttende puds, så virker det til, at Skamols klæber fungerer bremsende på fugttransporten i kraft af den fugtophobning, måleresultaterne viser. Den ligger også generelt højere i fugtniveau end murværk i hele perioden. Muligvis skyldes denne fugtophobning, at klæberen i henhold til de tekniske data har en relativ høj diffusionsmodstand med en Z-værdi på ca. 20 mod Skamol pladens egen Z-værdi på 3. Ved Ytong pladerne ser der ud til, at fugten har lettere ved at passere klæbelaget og nå frem til isoleringspladen, hvilket måske også kan være med til at forklare, hvorfor fugtniveauet i Ytong pladen er så meget højere i forhold til murværket end hos de to andre typer plader. Den kan med stor sandsynlighed ikke nå at transportere fugten fra klæbelaget videre ind til rumluften. For MicroTherm pladerne ser det derimod ud til, at hele systemet på trods af, at det er bygget op i flere "lag" med en selvstændig grunder, klæber og spartelmasse, fungerer helt efter hensigten ved at fugtniveauet er faldende gennem alle lag, og at der sker en langsom udtørring af murværket over perioden. For at se, om alle plader ville kunne forårsage en udtørring af murværket, eller om der ville ske en større ophobning af fugt i materialerne over tid, ville det dog være nødvendigt med en længere undersøgelsesperiode, da netop materialer som murværk er meget længe om denne proces.

I forhold til, om de opsatte plader kan mindske risikoen for skimmelvækst i indeklimaet, har det også været interessant at kigge på de udtagne skimmeltest. Umiddelbart har pladerne på overfladen virket efter hensigten, da der ind til videre ikke er nogen synlige indikationer på skimmelvækst. Ud fra de udtagne skimmelprøver kan det dog ses, at der bag specielt den del af Ytong pladerne, hvor der er målt de højeste fugtniveauer, er forekomsterne af skimmelsporer i et niveau, der normalt vil blive betragtet som værende uacceptabelt. Der er dog i henhold til de udtagne Mycometer test endnu ikke noget skimmelvækst, men det må vurderes, at der kan være en øget risiko for fremtidig vækst bag disse plader. Dette også med baggrund i, at lige netop Ytong pladen, hvor de høje sporeniveauer optræder, sidder løst og er smuldret, så der kan opstå risiko for, at ilt og støv kan trænge ind bagved og dermed give bedre vilkår for skimmelvækst. Dette må også vurderes at være en risiko de steder, hvor det er observeret, at pladerne har mistet deres vedhæftning. Der kan dog på nuværende tidspunkt ikke måles uacceptable forekomster af skimmelsporer i indeklimaet, trods de højere forekomster bag enkelte af pladerne.

Desuden er der opstået mindre revnedannelser i Skamol pladerne omkring nogle vandrette samlinger, samt i MicroTherm pladerne ved den langsgående samling med væggen. Der kan endvidere konstateres områder, hvor pladerne har mistet deres vedhæftning. Umiddelbart vurderes det, at revnerne blot ville have haft karakter af kosmetisk betydning, hvis ikke det var fordi, pladerne i områderne omkring havde mistet vedhæftning. Denne manglende vedhæftning må på sigt vurderes til at kunne give risiko for funktionssvigt i de kapillarer egenskaber, da den manglende kontakt til murværk kan hindre kapillareffekten mellem denne og pladen og dermed også hindre den ønskede udtørring af murværk. Desuden må der være en risiko for, at ilt og støv kan trænge ind bag pladerne og dermed give grobund for skimmelvækst.

Hvad denne revnedannelse og vedhæftningssvigt skyldes har været svært at vurdere ud fra de foretagne undersøgelser. Det bør umiddelbart undersøges nærmere, men der kan være flere bud. Det kunne være som følge af ukorrekt håndværksmæssig udførelse ved opsætning af pladerne. Men efter diskussion med flere produktleverandører – der i øvrig hver især erklærer ikke at have set lignende tilfælde trods andre opsætninger under tilsvarende forhold – virker dette ikke umiddelbart som værende tilfældet. Pladerne vurderes til at være opsat helt efter anvisningerne. Dernæst kunne det være som følge af kraftig saltudfældning, men dette er der umiddelbart ikke nogen synlige tegn på, heller ikke i de områder hvor pudslag er blotlagt. Det kunne også være som følge af overfladespændinger mellem murværk og de opsatte plader, hvis ikke det mellemliggende pudslag er rettet tilstrækkeligt jævnt op. For at afklare dette, ville det dog kræve, at pladerne bliver pillet ned i fuld højde i de berørte områder, hvilket ikke har været umiddelbart muligt i dette forsøg. En anden tese kunne være, at det igangværende metrobyggeri uden for bygningen har forårsaget rystelser i undergrunden, der kan have fået pladerne til at slippe underlaget. Slutteligt kan det være, at den ekstreme fugtbelastning simpelthen har været for stor, så vandpresset har skubbet klæber og plader løse. Dette ville dog igen kræve en nærmere undersøgelse af fugtforholdene.

Umiddelbart kan det dog konkluderes, at de opsatte plader i den pågældende forsøgsperiode har håndteret den pågældende fugtbelastning bedre, end kælderydervæggene uden isoleringsplader men med diffusionsåben overflade ville have klaret i kraft af, at der som nævnt øverst i dette afsnit ikke er nogen synlige forekomster af fugtskjolder eller skimmelvækst. Desuden har de påviste niveauer af skimmelsporer bag pladerne ikke givet anledning til uacceptable forekomster af skimmelsporer i indeklimaet i forsøgsperioden.

7. Simulering i programmet WUFI

I forbindelse med analysering af de kapillare egenskaber for de opsatte isoleringsplader foretages en række beregninger i simuleringsprogrammet WUFI.

I WUFI vælges materialeparametre så tæt på de anvendte materialer som muligt. For at gøre beregningen simplere, og da det umiddelbart i de målte resultater har vist sig, at de forskellige overfladebehandlinger ikke gjorde nogen synlig forskel, vælges det at se bort fra disse. Ligeledes regnes der heller ikke med det afsluttende puds-/spartellag, da dette er relativt tyndt for alle plader, ca. 5 mm. Der regnes derfor kun på en konstruktion opført af 3½ stens murværk, 30 mm drænpudslag, 10 mm klæbelag og 50 mm isoleringsplade. Det sidste grundet, at Ytong Multipor pladens mindste tykkelse er 50 mm.

7.1 Opsætning af simuleringerne

For at kunne foretage en simulering i WUFI af en konstruktions hygrotermiske forhold er der flere forskellige parametre, der skal vælges.

Konstruktionsopbygning:

Allerførst skal selve konstruktionen opbygges og forholdene omkring denne angives.

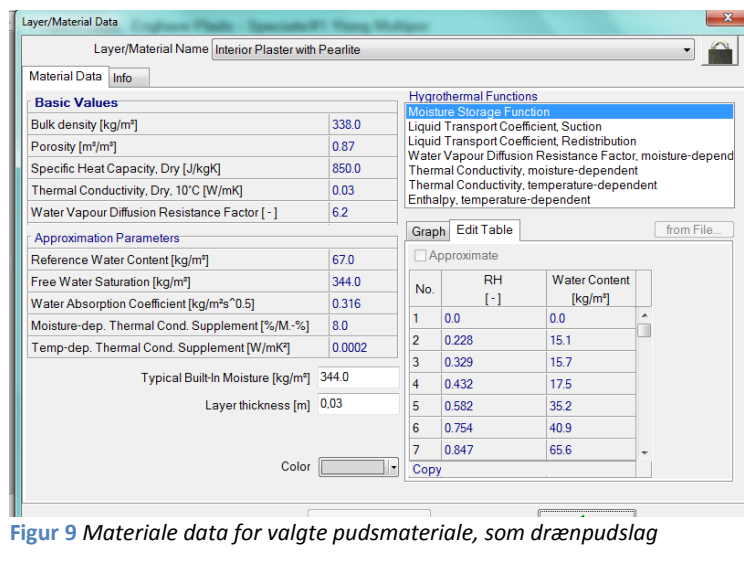
For bygningskonstruktionen anvendes følgende materialer: Da der er tre forskellige typer isoleringsplader med hver deres klæber, er det også nødvendigt at lave tre forskellige konstruktioner. De er her angivet som nummer 1 Ytong, 2 Skamol og 3 MicroTherm.

Mursten

Solid Brick, handformed – Densitet, 1725 kg/m³, Varmeledning 0,6 W/mK, Diffusionsmodstand, 17

Drænpuds

Interior Plaster with Perlite – Dette materiale anvendes, da det ikke er muligt at finde Kefa Drænpuds. Til gengæld er det valgte materiale en cementpuds med Perlite, der er ekspanderet vulkansten, hvilket er tilsvarende i Kefa Drænpuds – ved nærmere undersøgelse hos producent. Densitet, 338 kg/m³, Varmeledning 0,03 W/mK, Diffusionsmodstand, 6,2



Figur 9 Materiale data for valgte pudsmateriale, som drænpudslag

Klæber

1) *Ytong Multipor Adhesive* – Densitet, 833 kg/m³, Varmeledning 0,155 W/mK, Diffusionsmodstand 15,1 (dette er dog en smule højere, end Ytong skriver i deres datablad om deres Multi letmørtel.)

2) *SAKRET Klebe- und Armierungsmörtel KAM L* – ved nærmere undersøgelse på producentens hjemmeside ses, at der er tale om en let kalk-cementmørtel tilsat fibre og mineralsk tilslag i stil med Weber Multi 292, som anvendes til Skamol's plader. Densitet, 1095 kg/m³, Varmeledning, 0,43 W/mK, Diffusionsmodstand, 16

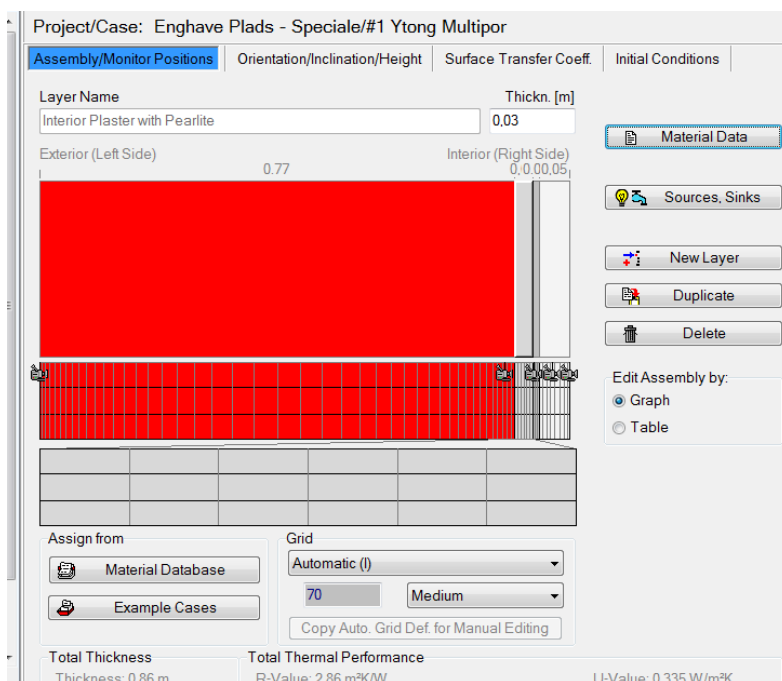
3) *Mineral Lime Cement Lightweight Plaster* – Der er tale om en mineralsk let kalk-cementmørtel, hvilket umiddelbart burde svare til den, som der anvendes til MicroTherm trods den manglende datainformation. Densitet, 1024 kg/m³, Varmeledning, 0,179 W/mK, Diffusionsmodstand, 6,1

Isoleringsplade

1) *Ytong Multipor* – Densitet, 115 kg/m³, Varmeledning, 0,04 W/mK, Diffusionsmodstand, 4,1

2) *CaSi Board (Lüneburg)* – Det materiale, der umiddelbart kommer tættest på de tekniske specifikationer for Skamol SkamoPlus+. Densitet, 230 kg/m³, Varmeledning, 0,05, Diffusionsmodstand, 3,23

3) *Calcium Silikates* – Igen det materiale, der bedst modsvarer de tekniske data for MicroTherm pladerne. Densitet, 270 kg/m³, Varmeledning, 0,062, Diffusionsmodstand, 3,8



Figur 10 For illustration af, dels hvordan konstruktionen i WUFI er opbygget, men også hvor de indsatte målepunkter er placeret, så de modsvarer borehullerne fra de praktiske målinger

For at kunne sammenligne simuleringresultaterne med de målte resultater, indsættes der målepunkter i konstruktionen svarende til de anvendte borehuller. Det vil sige, der indsættes et målepunkt ca. midt i isoleringspladen, i klæberen og 2-3 cm inde i murværket.

For overfladekoefficienter vælges kategorien "Basement" og dermed de forudindstillede data, der hører her til, og for den indvendige overgangsisolans bliver værdien derfor 0,125 m²K/W. Da kælderydervæggen er

beliggende under jord vælges der ingen strålingsfaktor.

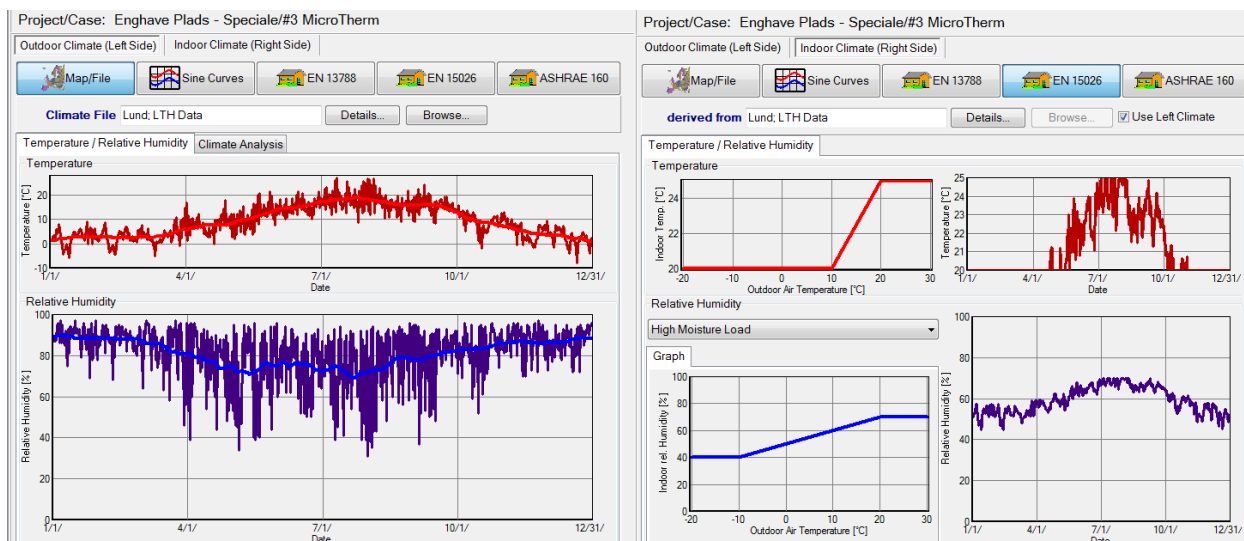
Under startbetingelser i forhold til temperatur og fugtindhold angives der de forudindstillede værdier for byggefugt i de enkelte materialer, da isoleringspladerne jo nyopføres, og der dermed må være en hele del byggefugt i både klæber og plader, som kan have indvirkning på resultatet.

Beregningsperiode:

I forhold til beregningsperioden, så anvendes der i første omgang en periode nogenlunde tilsvarende den periode, hvor undersøgelserne har fundet sted – igen for at have et så sammenligneligt grundlag som muligt. Denne periode sættes til at være fra 22/12-2014 til 1/4-2015.

Klimadata:

For klimadata vælges Lund LTH Data, som både udendørs og indendørs forhold, da disse svarer mest til de danske klimaforhold. Ved indendørs betingelserne anvendes High Moisture Load, da der forventes en relativ stor fugtpåvirkning fra kælderydervæggene, hvor den indtrængende grundfugt passerer igennem de enkelte materialer og ind til rumluften. Ud fra de målte resultater sker der en stor fugttilførsel til rumluften med ca. 3,5-4 g/m³.



Figur 11 De anvendte klimadat for både udvendige og indvendige forhold. Der anvendes forudstillede klimadata for Lund, Sverige

7.2 Simuleringsresultater

I bilag 3 kan alle resultaterne fra de simulerede forhold ses.

Ytong Multipor – Konstruktion 1:

Ud fra de simulerede beregninger kan det ses, at murstensvæggen generelt har et faldende fugtindhold hen over perioden. Den falder fra et fugtindhold på ca. 5,8 % af egenvægten til omkring 5,07 %. Det samme gør sig gældende for drænpudslaget, der falder fra ca. 100 % af egenvægten til omkring 86 %. Til gengæld stiger fugtindholdet markant i Ytong klæbelag over de første 10 dage fra 3,65 % af egenvægt til ca. 4,12 %. Selve Ytong pladen har også en markant stigning i vandindholdet over de første 14 dage fra omkring 6,9 % af egenvægt til omkring 14 %. Herefter svinger den mellem 12,2 % til 14 %.

De udvendige temperatur- og relative fugtighedsforhold for den udvendige (mod jord) overflade af kælderydervæggen svinger gennem perioden med en temperatur mellem -7- +15° C, de fleste dage ligger temperaturen dog mellem 0-7° C. Det relative fugtniveau ligger mellem 80-100 % med enkelte udsving ned til ca. 70 %. Dette er i øvrigt gældende for alle tre konstruktioner.

Inde i murværk og inde i klæbelag er tendensen relativt ens, med et relativt fugtighedsniveau lige under 100 % med et svagt fald gennem perioden. Temperaturen svinger for murværk mellem 6-10° C, mens temperaturen for klæbelag ligger mellem 7-11° C. Forholdene midt i Ytong pladen viser et meget konstant relativt fugtighedsniveau, der fra ca. 10 inde i simuleringen ligger på ca. 92 %. Temperaturen svinger gennem perioden mellem 12-14° C. For den indvendige overflade på ydervægskonstruktionen svinger den relative fugtighed mellem 50-60 %, mens overfladetemperaturen ligger jævnt omkring 18-19° C.

Skamol SkamoPlus+ - Konstruktion 2

Konstruktionen, der skal simulere Skamol SkamoPlus+ pladerne, har som nævnt tidligere SAKRET Klebe- og Armierungsmörtel i stedet for Weber Multi 292 klæber og CaSi Board i stedet for SkamoPlus+ pladen.

Ud fra simuleringsresultaterne kan det ses, at murværket som hos Ytong-konstruktionen har et faldende vandindhold gennem hele simuleringsperioden. Den går også her fra 5,8 % af egenvægt til 5,07 %. Det samme gør sig gældende for drænpudslaget, som går fra et vandindhold på ca. 99 % af egenvægt til omkring 86 %. Klæbelaget har en markant stigning i vandindholdet over de første 14 dage fra ca. 7,30 % af egenvægten til ca. 11 %. Herefter falder det jævnt resten af perioden ned til ca. 9 %. For CalciumSilikat pladen er der de første dage et markant fald i vandindholdet helt ned til 2 % af pladens egenvægt. Efterfølgende stiger det så markant igen over de næste 4 ugers tid op til 3,6 %. Tendensen er herefter et fald i vandindholdet resten af perioden ned til ca. 2,85 med mindre udsving undervejs.

I forhold til temperaturforholdene og den relative fugtighed i materialerne, så kan det ses, at inde i murværk samt i klæbelag er det relative fugtniveau jævnt omkring lige under 100 % med et svagt fald perioden igennem. Temperaturen svinger for henholdsvis murværk mellem 7-10,5°C og for klæbelag lidt højere mellem 8-11°C. For CalciumSilikat pladen følges temperatur og relativt

fugtniveau pænt af, hvor temperaturen svinger mellem 12,5-14°C og RF mellem 80-87 %. For den indvendige overflade af konstruktionen ligger temperaturen jævnt omkring 18,5-18,8°C, mens RF ligger omkring 50-65 %.

MicroTherm – Konstruktion 3:

Konstruktionen er i stedet for MicroTherm og MicroTherms egen klæber bygget op med Mineral Lime Cement Plaster og en indvendig plade af Calcium Silikat.

Kigges der på vandindholdet i murværk gennem perioden er der som ved de to foregående konstruktionstyper et jævnt fald i vandindholdet fra ca. 5,8 % af egenvægt til 4,7 %, hvilket er lavere end ved de andre konstruktioner. For drænpudslaget sker der også et jævnt, dog stejlere fald i vandindholdet fra ca. 100 % af egenvægt til ca. 20 %. For klæbelaget er der ligeledes et jævnt fald gennem perioden fra et vandindhold på 10,25 % af egenvægt til 5,86 %. Ved Calcium Silikat pladen sker der først en kraftig stigning af vandindhold over de første ca. 5 dage fra 2,96 % af egenvægt til ca. 16 % for herefter at falde først hurtigt de næste ca. 14 dage til ca. 8,89 %, inden det finder et jævnt niveau omkring 8 % med tendens til fortsat fald.

For temperatur og det relative fugtniveau kan det ses for murværk og klæber, at der inde i de to materialer sker et fald i det relative fugtniveau fra lige under 100 % til ca. 97 % for murværk og ned til 91 % for klæbelag. I de første 2/3 af perioden sker faldet langsomt, mens RF falder noget hurtigere i den sidste 1/3. Temperaturen svinger for henholdsvis murværk mellem 7-10 °C, og for klæber mellem 10-13°C. For Calcium Silikat pladen ligger temperaturen mellem 13-15°C, mens RF falder svagt perioden igennem fra lige under 100 % til ca. 85 %. På den indvendige overflade af konstruktionen ligger temperaturen jævnt omkring 18,5°C, dog med et dyk ned til 17°C i de første dage. RF ligger igennem perioden mellem 50-65 % med et større udsving i de første dage op til 80 %.

7.3 Diskussion/delkonklusion på de simulerede resultater

Ud fra de foretagne simuleringer kan der laves en generel vurdering af, hvordan konstruktionerne opfører sig i den pågældende simuleringsperiode. Ud fra resultaterne er der en generel tendens til, at fugtniveauet i både murværk og drænpudslag er faldende gennem hele simuleringsperioden og for alle tre konstruktionstyper. Dette kan skyldes, at der dels er den større mængde byggefugt, der over den simulerede tid tørre ud, men samtidig må en del fugt også blive transporteret videre til klæbelaget, der for alle tre konstruktionstyper har en markant stigning i fugtindholdet over den første tid på ca. 10 dage. For Ytongs egen klæber sker der en udjævning efter de første dage, hvorefter fugtindholdet ligger stabilt resten af perioden. Der sker hverken et fald eller en stigning i fugtindholdet, hvilket kan skyldes, at klæbelaget har indstillet sig i en ligevægt i forhold til, hvor meget fugt denne får tilført samt hvor meget fugt, den kan afgive til i dette tilfælde Ytong pladen. Ytong pladen har også en tendens til et nogenlunde jævnt fugtindhold både i forhold til RF og reelt vandindhold. Der sker dermed ikke nogen umiddelbart udtørring af konstruktionen, og pladen er heller ikke umiddelbart særlig påvirket af eventuelle temperatursvingninger. Det kan derfor diskuteres, om pladen reelt set har kapillarsugende egenskaber, da der ikke ser ud til at ske nogen særlig fugttransport frem og tilbage i pladen. Fugttransporten sker tilsyneladende

udelukket via dampdiffusion, hvor et stort vandindhold kan opretholde et passende damptryk, der hele tiden sikrer, at der ikke sker en yderligere ophobning af fugt i materialet.

For konstruktionen, der skal simulere opsætningen med Skamol pladen, vurderes det, at der sker en gradvis udtørring af konstruktionen gennem perioden. Dette baseres på, at der generelt sker et jævnt fald i fugtindholdet i alle 4 materialer. Derudover vurderes det, at den anvendte CalciumSilikat plade også er påvirket af de indvendige temperatur- og relative fugtforhold idet, der ses svingninger dels i fugtindholdet men også i det relative fugtniveau, der svarer nogenlunde overens med de svingninger, der er i temperatur og relativt fugtniveau på overfladen af konstruktionen. Umiddelbart lægger det op til, at de kapillarer og diffusionsåbne egenskaber virker efter hensigten idet, pladen tilsyneladende hele tiden forsøger at indstille sig i en ligevægt med den omgivende rumluft samtidig med, at den har mulighed for at afgive fugt fra konstruktionen til rumluften.

For konstruktionen, der skal simulere opsætningen med MicroTherm pladen, vurderes det også, at der generelt sker en gradvis udtørring gennem konstruktionen, da der som ved Skamol konstruktionen sker et jævnt fald i vandindholdet hen over alle 4 materialer. Ved denne konstruktion er faldet i vandindhold endda størst i forhold til de andre konstruktioner. Udtørringen er kraftigst i starten af perioden for derefter at blive jævnet ud for alle materialer over tid. Dette kan skyldes, at de alle indfinder sig i en ligevægt med hinanden, så der er ligevægt i den fugt, der bliver transporteret mellem de enkelte materialer. Det er også denne konstruktion, der generelt set har den største diffusionsgennemtrængelighed set gennem hele konstruktionen, og dermed også muligheden for at kunne transportere mest muligt fugt materialerne i mellem og i forhold til rumluften på den indvendige side af konstruktionen.

Kigges der på alle tre konstruktioner vurderes det, at konstruktionen med de to typer Calcium Silikat plader virker bedre i de kapillarer egenskaber i forhold til konstruktionen med Ytong Multipor. Dette fordi, der for Calcium Silikat konstruktioner, sker en generel udtørring af materialerne over den simulerede tidsperiode, mens der for Ytong konstruktionen sker en fugtophobning inde i konstruktionen, hvorefter fugtindholdet forbliver stabilt, mens pudslag og murværk fortsat holder et stort fugtindhold.

Det skal dog lige nævnes, at den anvendte simuleringsperiode er relativ kort i forhold til større forandringer i fugtforhold i tungere bygningskonstruktioner, som en grundmuret kælder må betegnes at være. Det ville være oplagt også at simulere over en længere periode for at se, om der sker en større generel udtørring eller fugtophobning over tid i dels hele konstruktionen og dels i de enkelte materialer. Dette ville også give et bedre grundlag for en vurdering af materialernes egnethed til en situation som denne.

8. Diskussion af de målte resultater kontra simuleringsresultater

Det er nu interessant at sammenholde de i praksis målte resultater med de simulerede beregningsresultater. Dette for at se, om der ensartede resultater de to metoder imellem.

Hvis der startes med konstruktionernes overflader, så har de målte resultater umiddelbart vist, at de tre forskellige isoleringsplader godt kan håndtere den pågældende kraftige fugtpåvirkning. Der er kun mindre områder, hvor fugtniveauet på overfladen er kritisk, og dermed på sigt kan give risiko for fugt-/skimmelproblemer over tid. Ses der på simuleringsresultaterne, så er der mindre udsving i det relative fugtniveau i forhold til temperaturniveauet, men alle plader ligger indenfor et niveau i de relative fugtforhold på 50-65 % i perioden, mens temperaturen ligger omkring 18,5-18,8°C. Der er dermed generelt ikke nogen umiddelbar risiko for fugt- og skimmelproblemer i henhold til simuleringen. Det der dog skal overvejes i forhold til simuleringen er, at denne ikke tager højde for, om der kan være områder, der er mere fugtbelastede end det generelle billede. I de praktiske målinger var der områder, hvor der havde været større fugtbelastning i form af rindende vand i konstruktionen, hvilket selvfølgelig skaber et større fugtpres på konstruktionen i det pågældende område. Desuden kan der i praksis også være større udsving i temperaturen, der kan forårsage risiko for kondensdannelser på overfladen, hvis temperaturen falder til under 14°C ved et fugtniveau på RF 65 %.

Ses der på forholdene inde i konstruktionerne, så der nogenlunde samstemmighed mellem de målte resultater og simuleringerne i forhold til den generelle fugttransport. Det vurderes generelt til ved de praktiske målinger, at de kapillarer egenskaber fungerer bedst hos Skamol og MicroTherm, hvilket også gør sig gældende i de simulerede konstruktioner med de to forskellige Calcium Silikat plader. Både måleresultater og simuleringsresultater viser, at der sker en langsom udtørring over tid fra murværk gennem drænpudslag og ind til pladerne. Der er dog forskel på, om der sker en ophobning af fugt og i hvilke materialer, dette sker. For de målte resultater ser det ud til, at den anvendte klæber for Skamol pladen – Weber Multi 292 – virker fugtbremsende grundet den højere Z-værdi end selve pladens. Der sker i hvert fald en ophobning af fugt i dette materiale, som har svært ved at komme af med fugten igen. I de simulerede beregninger ser det ud til, at det er i Ytongs egen klæber, at der sker en fugtophobning. Det kan dog måske være de forudindstillede værdier, der er afviger en smule fra de faktiske forhold. Både når det gælder materialeparametrene, det var jo eksempelvis ikke muligt at finde en klæber fuldstændig identisk med den anvendte klæber til Skamol pladerne, men det kan også være i klimaforholdene, der er variationer i forhold til de faktiske forhold i kælderen.

Det er måske netop også variationerne i klimaforholdene fra simuleringsprogrammet til de faktiske forhold, der gør sig gældende, når det kan ses, at der generelt er forskel på det relative fugtniveau og temperatur inde i materialerne de målte resultater og simuleringsresultaterne i mellem. De målte resultater ligger generelt ca. 2°C højere i temperatur, og dermed bliver det relative fugtniveau også mindre end ved de simulerede beregninger. Dette gør sig især gældende for klæbelaget og isoleringspladen, hvor de målte værdier for den relative fugtighed ligger ca. 5-10 % point lavere end ved simuleringerne, men temperaturen er som nævnt også det højere i de målte resultater. En simulering, hvor alle klimaforhold er mere nøje afstemt med de faktiske

forhold ville med al sandsynlighed kunne give et resultat, der er endnu mere tilnærmeligt de målte resultater.

Generelt set vil jeg dog vurdere simuleringerne af de tre konstruktioner som værende ganske tæt på de målte resultater. Det er derfor også umiddelbart min vurdering, at programmet WUFI er velegnet til netop at foretage forhåndssimuleringer af en ønsket konstruktionsopbygning. Også når der er tale om så ekstremt et tilfælde som dette, hvor fugtbelastningen er særdeles stor.

Som det dog også er nævnt både ved de målte resultater og ved simuleringerne, så har selve forsøgsperioden været lige til den korte side i forhold til at kunne vurdere fugtforholdene i konstruktionerne optimalt over tid. Dette især med øje for, at der i de praktiske målinger har været en del udfordringer med vedhæftningen af pladerne. Der er godt nok ind til videre ikke nogen umiddelbare indikationer på, at konstruktionsopbygningerne skulle give problemer med fugt eller skimmelvækst. Men det kan være svært at vurdere pladernes egenskaber og evner under de givne forhold, når der så tidligt i forløbet er opstået konstruktionssvigt af den ene eller anden årsag. Der vil derfor være usikkerheder forbundet med de givne vurderinger, som kun kan mindskes ved en længere undersøgelsesperiode, så forholdene løbende kan besigtiges for den videre udvikling. Ligeledes vil en større simulering af konstruktionerne over længere tid også give et bedre billede af, hvad der sker i konstruktionerne i forhold til de pågældende fugtforhold.

9. Konklusion

I forhold til det store antal bygninger der findes i Danmark af ældre dato, hvor der er store problemer med indtrængende grundfugt og overfladekondens, har det været interessant at se, om de såkaldte kapillaraktive mineralske isoleringsplader kunne være et alternativ til traditionel indvendig isolering, der generelt ikke anbefales til fugtpåvirkede konstruktioner. I henhold til flere af producenterne skulle pladernes egenskaber både være med til at sikre overfladen mod kondens ved dels en højere overfladetemperatur og dels ved, at pladen ville kunne optage/afgive fugt fra rumluften via diffusion. Desuden ville den kunne tillade fugt fra de bagvedliggende materialer at passere igennem via kapillarsugning, så fugtophobning inde i konstruktionen ville kunne undgås.

Igennem projektet har resultaterne fra dels de praktiske målinger i forsøgskælderen og dels de simulerede beregninger vist, at de tre forskellige typer isoleringsplader, der er anvendt i forsøget alle havde egenskaber, der mindskede risikoen for kondens og fugtophobning på overfladerne, og dermed også mindskede risikoen for skimmelvækst på overfladen. Dette gjorde sig endda gældende uanset hvilken type diffusionsåben overfladebehandling, de i det praktiske forsøg var blevet behandlet med.

Der blev i det praktiske forsøg også foretaget åbninger i de forskellige plader for at se, om der ville være risiko for skimmelvækst bagved, samt hvordan plader og klæbelag reagerede på den kraftige fugtpåvirkning. I forhold til skimmelvækst viste de udtagne prøver, at der i nogle tilfælde var stærkt forhøjede forekomster af skimmelsporer bag pladerne, men at der i forsøgsperioden ikke var tegn på skimmelvækst. Der var ligeledes heller ikke uacceptable forekomster af skimmelsporer i indeklimaet. Det vurderes dog, at der over tid kan være en risiko for skimmelvækst grundet det høje antal sporer samt, at der flere steder var risiko for indtrængning af ilt og støv bag pladerne grundet revner og manglende vedhæftning i klæbelag. Denne manglende vedhæftning har i øvrigt været vanskelig at forklare og vil kræve yderligere undersøgelser for at afklare, om det er grundet det høje fugtpres eller anden årsag.

Ved de foretagne dybdemålinger samt simuleringsberegninger kunne det ses, at der er forskel på de kapillarer egenskaber de enkelte isoleringsplader i mellem. Hvor MicroTherm og Skamol umiddelbart ser ud til at kunne udtørre konstruktionen, har Ytong sværere ved at trække fugten ud af konstruktionen. Det må derfor konkluderes, at Ytong pladens kapillarer egenskaber ikke er tilstrækkelige til så ekstreme forhold. Det kan også udledes af, at ved åbning af netop Ytong pladen i det mest fugtbelastede område, så smuldrede denne nærmest fra hinanden, mens puds og klæbelag ligeledes gik fra.

Det er dog vanskeligt at give en helt klar vurdering af, om pladerne er egnet til så ekstreme forhold, som den pågældende kælder. Dels har forsøgsperioden været relativ kort i betragtning af, hvor langsomt fugtforhold kan udvikle/ændre sig i massive konstruktioner, og dels fordi der var store problemer med vedhæftningen af pladerne af fortsat uforklarlige årsager, så forsøget ikke virkede 100 % efter hensigten. Det kunne derfor være interessant med mere tid, så en grundigere undersøgelse/vurdering af forholdene og pladernes egenskaber kan foretages.

10. Litteraturliste (tilrettes og opsættes pænt)

Bøger, artikler og rapporter:

SBI 142 (1983)

Jesper Engelmark; *SBI Anvisning 142 "Københavnsk Etageboligbyggeri 1850-1900 – en byggeteknisk undersøgelse"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 1983

SBI 178 (1993)

Nils Erik Andersen, Georg Christensen, Fleming Nielsen; *SBI Anvisning 178 "Bygningers fugtisolering"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 1993

SBI 221 (2008)

Jørgen Munch-Andersen; *SBI Anvisning 221 "Efterisolering af etageboliger"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 2008

SBI 224 (2013)

Erik Brandt m. fl.; *SBI Anvisning 224 "Fugt i bygninger"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 2013

SBI 240 (2012)

Eva B. Møller; *SBI Anvisning 240 "Efterisolering af småhuse – byggetekniske løsninger"*; 2012

BYG-ERFA 04 12 28 (2004)

Erik Brandt, Morten Hjorslev Hansen; *BYG-ERFA 04 12 28 "Fugtskader i ældre kældre – undersøgelser"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 2004

BYG-ERFA 04 12 29 (2004)

Erik Brandt, Morten Hjorslev Hansen; *BYG-ERFA 04 12 29 "Fugtskader i ældre kældre – udbedring og forebyggelse"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 2004

BYG-ERFA 09 10 29 (2009)

Georg Christensen, Tommy Bunch-Nielsen; *BYG-ERFA 09 10 29 "Indvendig efterisolering af ældre ydermure"*; Statens Byggeforskningsinstitut; 2009

Indvendig efterisolering i fugtige kældre (2012)

Stine Kirkeskov Jensen; *Indvendig efterisolering af fugtige kældre – kalciumsilikatisolering og dets materialeegenskaber"*; Institut for Byggeri og Anlæg; Diplom afgangprojekt; 2012

Kapillarsugende isolering til indvendig isolering af bygninger (2004)

Sajet Mahmudovski; *"Kapillarsugende isolering til indvendig isolering af bygninger"*; BYG-DTU; Afgangprojekt; 2004

Capillary Active Interior Insulations Systems for Wall Retrofitting (2015)

Evy Verecken, Staf Roels; *"Capillary Active Interior Insulations Systems for Wall Retrofitting – A more nuanced story"*; International Journal of Architectural Heritage; 2015

Links:

www.bygningskultur.dk

www.danskbyggeskik.dk

www.kefa-international.dk

www.skamol.dk

www.ytong.dk

www.nhl-nordisk.dk

www.microtherm.dk

www.epasit.de