



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

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

Titelblad

Studenterrapport

Uddannelse:	Master i Bygningsfysik
Semester:	4.semester
Titel på masterprojekt:	Indvendig efterisolering af ældre etageejendomme af massivt murværk – Simulering af væggens hygrotermiske forhold, med tilhørende risikoparametre.
Projektperiod:	1. februar 2015 - 1. juni 2015
Vejleder:	Martin Morelli
Studerende:	Michael Brask Olsen

Martin Morelli

Michael Brask Olsen

Antal normalsider:	47 normalsider af 2400 anslag pr. normalside. I alt 113.693 anslag.
Afleveringsdato:	1. juni 2015

Indvendig efterisolering af ældre etageejendomme af massivt murværk

- Simulering af væggenes hygrotermiske forhold, med tilhørende risikoparametre

Afgangsprojekt for 4. Semester

Master i Bygningsfysik

Udarbejdet af:

Michael Brask Olsen

Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) &

Aalborg Universitet København

01/06/15

Indholdsfortegnelse

Titelblad.....	1
Indholdsfortegnelse	4
Forord.....	6
Abstract	7
1. Indledning	8
1.1. Problemformulering	9
1.2. Afgrænsning	9
2. Baggrund og Teori.....	11
2.1. Litteratur baggrund	11
2.2. Historisk baggrund	12
<i>Ydervægge.....</i>	<i>12</i>
<i>Konstruktioner.....</i>	<i>13</i>
2.3. Varme teori.....	15
<i>Linjetab og kuldebroer</i>	<i>16</i>
2.4. Fugt teori.....	18
<i>Diffusion</i>	<i>19</i>
<i>Konvektion</i>	<i>20</i>
<i>Kapillartransport og kapillarsugning.....</i>	<i>21</i>
3. Metode	23
<i>Beregningsmetode og simulering</i>	<i>23</i>
3.1. Materialer og randbetingelser	24
<i>Glaser-metoden, indtastning</i>	<i>25</i>
<i>Udeklimadata</i>	<i>26</i>
<i>WUFI, indtastning</i>	<i>27</i>
4. Resultater	29
4.1. Resultater for Glaser-metoden	29
4.2. Resultater for WUFI simuleringer i 1D	31

<i>Målepunkt i tegl. 10 mm fra udvendig overflade</i>	31
<i>Målepunkt 5mm inde i puds fra indvendig overflade</i>	32
4.3. Resultater for WUFI simuleringer i 2D	33
<i>Målepunkt i bjælkeende for nordlig orientering</i>	34
<i>Målepunkt i bjælkeende for sydlig orientering</i>	35
<i>Opsummering af resultater</i>	36
5. Diskussion	37
5.1. Stationære resultater ved Glaser metoden	37
5.2. Betingelser for skimmelsvampevækst	38
5.3. Risiko for kondens og skimmelvækst mellem puds og isolering	39
<i>Kondensering for sydlig orientering grundet udvendig vandpåvirkning</i>	42
<i>Kappilaraktivitet gennem eksisterende teglsten</i>	43
<i>Porernes betydning for kapillarsugning</i>	43
5.4. Risiko for råd i træbjælkeenderne	45
5.5. Tæthed i omkring etageadskillelsen	47
5.6. Risiko for frostsprængninger i den udvendige facadeoverflade	49
5.7. Kritisk vurdering af de teoretiske WUFI simuleringer	51
5.8. Afskærmning af facaden og minimering af slagregn.....	53
5.9. Fremtidige undersøgelser og supplerende studier.....	55
6. Konklusion	55
Litteraturliste.....	57
<i>Bøger & Publikationer:</i>	57
<i>Artikler:</i>	57
<i>Hjemmesider:</i>	58
Bilagsfortegnelse.....	59
<i>Glaser-metoden:</i>	59
<i>WUFI 1D simuleringer:</i>	59
<i>WUFI 2D simuleringer:</i>	59

Forord

Denne rapport er skrevet og udarbejdet som det afsluttende afgangsprojekt for min masteruddannelse, udstedt af Aalborg Universitet og Statens Byggeforskningsinstitut, SBI – ”Master i Bygningsfysik”. Med udfærdigelsen af denne rapport, er fjerde og sidste semester på denne masteroverbygning gennemført og hele uddannelsen afsluttet.

Rapporten er udarbejdet i foråret 2015, som sidste led i studiet og skrevet sideløbende med mit daglige arbejde på et arkitektbureau i København.

Emnet for rapporten er valgt ud fra en egen voksende interesse indenfor renovering og energioptimering af den ældre bygningsmasse i Danmark. Derudover har der også været et fokusområde for min arbejdsgiver, om at udforske et felt der er mindre kendt for firmaet, men som der kan ses et voksende potentiale for at få belyst.

Jeg har gennem hele forløbet haft stor glæde af at sparre og vidensdele med min vejleder fra SBI, som selv også har en stor interesse indenfor det valgte emne.

God læselyst

- Michael

Abstract

Along with the increasing demands of energy efficient buildings, there are many different opinions about energy retrofitting of the exterior wall, with internal insulation. Several recognized building authorities, advise against the internal insulation that in many cases will promote a depleting process in the materials of the exterior wall. Previous research has shown a familiar dilemma, that the internal insulation will occur a moisture problem in several places of the exterior wall, when setting up a traditional interior insulation wall with wood, mineral wool, vapor barrier and plasterboard.

This report covers the hygrothermal studies of a solid brick wall with interior insulating *without* a vapor barrier, where new materials are used. Shown in this paper, with theoretical hygrothermal simulations, that a moisture problem will occur several places in the outer wall. These moisture problems will increase the risk of mold growing between the existing wall and the new insulation, and increase the moisture content of the beam ends with the risk of rot. When the masonry wall gets colder the risk of frost damages in the surface of the façade increases. The outer brick gets more freeze/thaw cycles during the heating season, which can affect the water content of the brick.

The orientation of the façade appears to have a great influence on the increasing moisture content in Danish outdoor climate. Especially the driving rain on the south orientated façade is of great importance to the massive moisture accumulation in the exterior wall, when insulating on the interior surface.

1. Indledning

I Danmark er der er politisk incitament for at nedbringe, og med tiden helt afskaffe, behovet for fossile brændsler, i målet om at nedbringe landets samlede CO₂-udslip.

Den politiske målsætning frem til 2050, er at 100 % af landets energiforsyning skal være baseret på vedvarende energikilder (VE), hovedsageligt gennem vindmølle drift. Omtrent 40 % af Danmarks samlede energiforbrug, findes i dag i bygninger for opvarmning og drift af installationer (Regeringen, 2014).

For at nå i mål med denne politiske målsætning, må det samlede energiforbrug i bygningsmassen da reduceres med ca. 35 % inden år 2050, i forhold til nutidigt niveau. En målsætning som kræver stor opmærksomhed for energioptimeringen af den eksisterende ældre bygningsmasse i Danmark. Langt størstedelen af denne eksisterende bygningsmasse vil frem til 2050 skulle renoveres i takt med at bygningerne nedslides, hvorfor der laves en strategi som skal gøre det omkostningseffektivt at energirenovere de gamle bygninger løbende (Regeringen, 2014).

En af de store udfordringer ved redueringen af energiforbruget i eksisterende bygninger, forekommer ved optimering af varmetabet igennem ydervæggen. Dette omhandler i særdeleshed for bygninger fra før 1979, hvor de væsentligste stramninger omkring isoleringskrav blev indført i bygningsreglementet. Der kan her være behov for at isolere hele klimaskærmen og undgå kuldebroer, samt optimere lufttætheden i disse ældre bygninger, for at nedsætte energiforbruget.

Den efterisolerende foranstaltning kan for klimaskærmens ydervæg praktisk taget foretages hhv. udvendigt, indvendigt eller i et eventuelt hulrum mellem for-/ og bagmur. Dog er der ofte rent praktisk kun én mulig løsning for efterisolering, nemlig indvendig efterisolering.

Ældre muret byggeri fra før 1920'erne vil være opbygget som massive ydervægge og mange gange med lokale sanktioner om arkitektonisk udtryk eller anden bevaringsværdig henseende, som gør at der i sidste ende kun kan efterisoleres indvendigt. Indvendig efterisolering af ydervæggen kan altså i flere tilfælde fremkomme som den eneste mulighed for at forbedre varmetabet gennem denne del af klimaskærmen. Dette omdiskuterede område indenfor energirenovering kan i mange tilfælde give anledning til brug af forskellige både nye og gamle materialer og konstruktionsløsninger, som kan være mere eller mindre risikofyldte og kan gøre større skade end gavn. Den eksisterende ydervægs temperatur og fugtforhold ændres væsentligt ved indvendig efterisolering og det kræver stor indsigt i disse parametre for selve konstruktionen og de tilstødende bygningsdele, at foretage sådanne foranstaltninger. Hvis ikke der tages yderligere hensyn til konstruktionens ændrede varme- og fugttekniske egenskaber,

kan der risikeres at skabes fugtproblemer, som i yderste tilfælde kan resultere i råd og skimmelsvampeskader, materialenedbrydning ol. svigt som påvirker konstruktionens holdbarhed og levetid.

Disse overvejelser omkring fremtidig indvendig efterisolering på en fugtteknisk forsvarlig måde, er afgørende, under rådgiverens projekteringsforløb og forundersøgelser, for udvælgelse af den korrekt valgte løsning.

1.1. Problemformulering

Formålet med nærværende afgangsprojektet er at undersøge hvilke fugttekniske parametre man skal være opmærksom på, ved indvendig efterisolering af ældre etageejendomme, af massivt murværk for tidsperioden 1850-1920. Hvad indebærer det at foretage en indvendig efterisolering og hvilke fugttekniske konsekvenser og følgeskader kan man risikere? Kan denne efterisolering overhovedet lade sig gøre ret fugtteknisk forsvarligt?

Jeg vil undersøge de hygrotermiske forhold man som rådgiver bør overveje, i målet om at opretholde en fugtrobust ydervægskonstruktion med indvendig efterisolering, ved to forskellige nyere materialer for indvendig efterisolering.

1.2. Afgrænsning

Der vil ofte opstå risiko for fugtskader, når vi ændre på væggens hygrotermiske forhold, hvor jeg i denne opgave vil beskrive hvilke risikofaktorer der finder sted ved ydervæggens ændrede fugtbalance.

Der vil primært undersøges konstruktionsløsninger hvor den indvendige efterisolering udføres med nyere isoleringsmaterialer af byggeplader med forskellig karakter, som de senere år er dukket op på det Danske marked. Løsningsmetoder hvor der ikke decideret skal indarbejdes en dampspærre for at stoppe indtrængen fugt, hvorfor løsningerne gerne skulle være mere bygbare. Disse konstruktionsløsninger vil da sammenlignes med det eksisterende murværk *uden* indvendig isolering, ud fra hvor der kan diskuteres fordele og ulemper, samt risikoen for materialenedbrydelse og svigt.

Det ene materiale er af kapillaraktive kalciumsilikat byggesten, herefter benævnes (kal.), hvis evne til at transportere fugt ud til materialets diffusionsåbne overflade anvendes. Her anvendes ingen dampspærre.

Det andet materiale er en lagopdelt byggeplade af en stiv thermohærdende fenolbaseret skumplade, belagt med en dampbremsende alufolie samt en påklæbet gipsplade. Alt sammen

udført fra fabrikken i én byggeplade, herefter benævnes (skum/gips). Folien imellem den isolerende skum og gips materialet har samlet set en dampbremsende effekt.

For de to efterisoleringsmetoder fokuseres der på tre forskellige risikobehæftede områder som optræder forskellige steder i konstruktionen. Forholdene studeres i følgende prioriterede rækkefølge, hvor mange af de hygrotermiske parametre dog alligevel lapper henover hindanden.

1. Den øgede luftfugtighed i konstruktionen der kan medvirke til kondensproblemer ved forhøjet relativ luftfugtighed, mellem det eksisterende murværk og den nye isoleringsvæg. Dette undersøges og risikoen for skimmelsvampevækst imellem lagene belyses. Denne begroning af skimmelsvamp inde i ydervægskonstruktionen kan komme til at påvirke det kommende indeklima og brugerens velvære.
2. Der ses på kuldebroernes betydning ved etageadskillelser af træbjælkelag som hviler af på ydermuren og som ventes yderligere opfugtet, med risiko for angreb af råd og materialenedbrydende svampe.
Kritiske steder hvor tæthedsplanet kan være ganske svært at udføre i samlingsdetaljen, og hvor eventuelt konvektion kan risikere at skabe en lokal fugtophobning.
3. Der sættes også fokus på den eksisterende ydervægs udvendige overflade, hvor udeklima påvirkningen ved især slagregn fremmer en opfugtning i ydervæggen. Der vil opstå flere fryse-/tø cyklusser i den yderste del af teglstenen, som vil fremme risikoen for frostsprængninger. Mængden af nedbør og slagregn har her en væsentlig rolle for opfugtningen af klimaskærmen, denne er ydermere variabel med facadens orientering. Vand absorptionen i murværket varierer med de forskellige materialer som indbygges i isoleringsløsningerne, hvor nogle materialer transporterer fugten bedre end andre ud til overfladen.

Ved teoretiske simuleringer af den efterisolerede ydervæg analyseres væggen risiko for fugtproblemer med risiko for svigt, nedbrydning og andre følgeskader for de to efterisolerede foranstaltninger med indvendig isolering.

2. Baggrund og Teori

2.1. Litteratur baggrund

Den baggrund og viden der er indenfor området, indvendige isolering og de risikobehæftede parametre som måtte fremkomme ved ydervæggens ændrede hygrotermiske forhold, er rimelig godt afdækket. Der vil ikke optræde nye sider af dette emne i nærværende rapport.

Mange af de valide kilde på området er forskningsbaserede studier, både teoretiske og praktiske, som ofte når samme konklusioner som også går igen i både lærebøger, anvisninger og forskningsartikler. Langt det meste af disse studier er baseret på indvendige isoleringsløsninger hvor forsatsvæggen er bygget op af et træ/- eller stålskelet med mineraluld, dampspærre og gipsplade indvendigt. Denne løsning har længe været anerkendt da det indvendige fugttilskud minimeres ved opsætning af dampspærren. Dette løser problemet om det indefra kommende fugt, dog er der blandt flere forskere opstået nogle væsentlige fokuspunkter omkring træbjælkeenderne da disse ikke vil kunne tættes tilstrækkeligt, samt regn på virkningen på facaden som øger fugtophobningen i væggen.

Erfaringer fra opførelser af dette, viser at isolerings løsninger med separat opsatte dampspærre ikke altid er lige bygbare ude på pladsen, og kan være utrolig svære at sikre korrekt udført. Af samme grund har jeg set et behov for at undersøge isoleringsløsninger som ikke har denne samme komplicerede udførelsesmetode, men forhåbentligt kan sikre en fugtsikker isolering.

Der ses studier og valide forskningsresultater for alle de i rapport omtalte principper og teorier, dog har jeg ikke kunne finde nøjagtigt samme simuleringsresultater til at underbygge valget af lige netop disse efterisoleringsløsninger uden dampspærre.

De to isolerings materialer som er taget udgangspunkt i denne rapport, ses på billede 1 + 2.

Billede 1:
Kapillaraktiv
kalciumsilikat,
(kal.)200



Billede 2:
Fenolskumplade med
gips, (skum/gips)120

2.2. Historisk baggrund

De gamle etageejendomme fra perioden mellem 1850-1920, som er beliggende omkring i de danske større byer, er ofte flotte og prægtige byggerier, som strækker sig op i 5-6 etagers højde. Denne periode kendetegnes som "Det ældre murede byggeri" hvor materialer og konstruktioner for denne tid er normalt kendte. Disse gamle fuldmurrede etageejendomme har sin helt egen charme og har stor værdi for os som bor i dem og betragter deres facader og holdbare materialeløsninger. Udseendet og det arkitektoniske udtryk af det sted man bor, kan have meget stor betydning for folk, hvor bygningerne skaber sit helt eget særpræg i det byområde man færdes i. Mange byggerier er blevet bestemt bevaringsværdige og fredet ud fra en lang række parametre, på baggrund af byggeriets historie, arkitektoniske udtryk eller anden form for kulturarv.

Ved ethvert ældre byggeri skal man i høj grad respektere de oprindelige konstruktioner og materialer da disse kan blive stort påvirket under en istandsættelse med nye materialer.

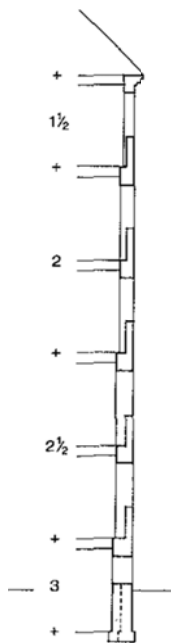
Ved renovering af bevaringsværdigt eller fredet byggeri vil man kun i få tilfælde få tilladelse til at lave om på gadesidens arkitektoniske facade, med udsmykninger og gesimsbånd mm.

En ombygning af facaden vil ofte fuldstændigt ændre byggeriets oprindelige arkitektoniske ydre udtryk, som man er bange for at miste. Denne tænkning omkring bevaring af facaden, kan ofte konflikte med ønsket om at efterisolere ydervæggen under en energirenovering. Det er ofte denne problemstilling, som fører bygherren frem til ønsket om at efterisolere indvendigt.

Ydervægge

Ydervæggen for etageejendomme i det ældre murede byggeri, blev almindeligvis udført af fuldmurrede vægge af teglsten. Dette var dengang primært styret af datidens lovgivning, byggetradition og ressourcer. Byggelovgivningen i København 1897, bekendtgjorde at den øverste etage skulle udføres af 1-1½ sten for at kunne bære tagkonstruktionen, hvorfor der i mange tilfælde ses en murtykkelse på 1½ sten (ca. 35 cm inkl. fuger) på øverste etage.

Murpillerne mellem vinduerne ses som værende den bærende del af ydervæggen, hvor de største laster føres hele vejen fra tagkonstruktion og ned til fundamentet. Tykkelsen på disse murpiller forøges i tykkelse jo længere ned af facaden man kommer. Typisk bliver tykkelsen forøget med ½ sten pr. 2 etager, og det er ofte forventeligt at springene sker mellem hhv. 3. og 4. sal samt mellem 1. og 2. sal. Dette vil ofte føre murtykkelsen i stueetagen op på 2½ sten (ca. 58 cm inkl. fuger). Der er altså stor forskel på ydervæggens murtykkelse fra stueetagen til 4.sal, som begge adskiller udeklima med brugerens indeklima.



Mellem murpillerne er der opmuret brystningspartier under hvert vindue. Disse brystninger er formentlig muret i 1 stens tykkelse (ca. 23 cm). Brystningen kan variere fra mellem $\frac{1}{2}$ - 1 stens tykkelse alt efter lokalbestemmelser og højden på bygningen. Brystningerne bæres af vinduesoverliggerne, som overfører kræfterne videre ud i de vertikale murpiller.

Gavl væggene ind mod naboejendommen er ligeledes muret til grund med en kraftig murpille omkring hovedskillevæggen. Gavl muren står for det meste lige i skellet og fungerer også som brandadskillende mur mod naboen.

Disse gavlvægge er i reglen opbygget med tyndere blændinger i 1 stens murtykkelse.

På gadefacaden er det ikke umuligt, at springene sker på ydersiden af muren, og på denne måde skaber spil i facaden (det sker dog som oftest på indersiden), mens det på gårdfacaden forventes at foregå på indersiden af muren. (Engelmark, 2013).

Fig. 1: Tværsnit i ydervæg

Konstruktioner

Jeg vil kigge nærmere på ydervæggen og på dets tilstødende bygningsdele. Her ses både fundament, terrændæk, etageadskillelse og tag, som bærer hver sine udfordring i løsningen af samplings detaljerne ved indvendig efterisolering. Det er i disse knudepunkter at vi oplever konstruktive kuldebroer som man ofte må acceptere store varmetab igennem sig. Det er også her de væsentligste udfordringer og de mest omkostningsfulde konsekvenser ligger, hvor der ofte optræder organisk træmateriale, bjælker, spær, remme, vinduesoverligger mm. Ud over at de konstruktive kuldebroer kan være svære at isolere kan de også fremkomme næsten umulige at tætnes mod den indefra kommende fugtige luft.

Disse sammenbyggede konstruktioner er yderst vigtige at undersøge. Det kan for eksempel være ganske vigtigt at vide, hvor langt en bjælke ender hviler af inde i det solide murværk, hvor denne let opfugtes.

Denne tids etageadskillelser er altid bygget op af et træbjælkelag, hvorunder der er fastmonteret bræddeforskalling, som holder det pudsede loft. Mellem bjælkerne ses et lag af indskudsbrædder med ler, som virker brand hæmmende. Bjælkelaget er beklædt med gulvbrædder, som giver den færdige gulvoverflade. Etagebjælkerne hviler som oftest af 1 sten inde i murværket, dog efter slutningen af 1800-tallet kan man risikere at bjælkerne kun hviler af $\frac{1}{2}$ sten inde i murværket, fra ydersiden. Vederlaget er dog større for de etager hvor ydervæggen tanner ud. Jo længere ude bjælkeenden ligger, desto større risiko er der for at træet på flere måder kan nedbrydes af fugt og direkte vand. Etagebjælkerne hviler af på en indmuret rem og

danner på denne måde et tilpas vederlag. De langsgående bjælker ud mod gavlen er monteret helt tæt op mod gavlvæggen eller etageskellet og hviler dermed af ude på facaderne og på bærende indervægge, så som hovedskillevæggen.

Tagspærene er opbygget med et lignende bjælkelag som etageadskillelserne, hvor kun den øvre del som bærer tagdækningen varierer, eks. saddeltag, mansardtag eller københavnertag. Nogle tage er mere almindelige hanebåndsspær, mens andre har en forhøjet tagfod med gesims mod gaden. "Københavnertaget" er tidstypisk for denne tid hvor den øverste trekant over hanebåndet er skåret fra og ender som (næsten) fladt tag mod det fri. Her biliver tagetagen ofte benyttet til bolig hvor loftshøjden udnyttes uden at gå på kompromis med datidens Københavnske lovgivning om taghældning og bygningshøjde. Denne tagkonstruktion har stadig 45 graders hældninger på de skrå tagflader, men er asymmetrisk i tværsnittet og danner en højere murkrone/hovedgesims ud mod gaden. Konstruktionen er højere og mere kompliceret, og er derfor understøttet med trempel og skråbånd for hvert 3. fag, båret på en stolvæg.

Selve ydervæggens statik og bæreevne er bygget op efter datidens søjle/drager system, således at murværket skal ses som lodrette murpiller imellem rækker af vinduer. Det er denne del af murværket, "pillerne", hvis tykkelse varierer op igennem etagerne for at kunne bære de tunge laster. Mellem disse piller ses vinduerne samt vinduesbrystningerne. Brystningerne har ingen større statiske egenskaber, og er derfor blot murret op i 1 stens tykkelse. Etageadskillelsen er dog stadig båret af tværgående murbjælker som forløber henover vinduet i samme tykkelse som det øvrige murværk, alt afhængigt af etagen. På denne måde fordeles kræfterne fra etageadskillelsen ud i de lodret gående murpiller. Murbjælkerne hviler af på vandrette vinduesoverligger af træ, og gemmer derfor også her på organisk materiale som har en statisk funktion for at lede kræfterne videre ud i pillerne. Disse vinduesoverligger vil potentielt set udgøre en risiko for fugtskader når der bliver påmonteret indvendigt efterisolering på væggen samt i lysningen. Det er i de store samlingsdetaljer, samt ved materialeskift i klimaskærmen at man skal være ekstra opmærksom, når varme og fugtforholdene ændres. (Munch-Andersen, 2008).

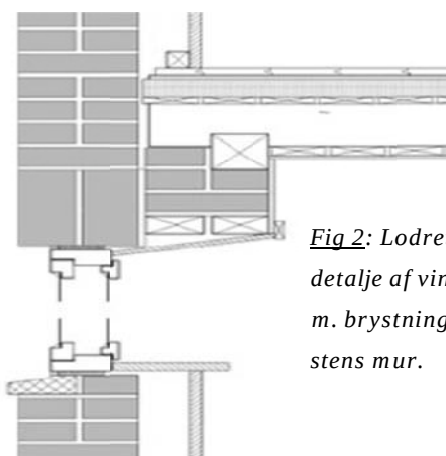


Fig 2: Lodret detalje af vindue m. brystning 1 stens mur.



Billede 3: Foto af typisk overligger/murpille, for en 2,5 stens mur.

2.3. Varme teori

En bygnings klimaskærm holder basalt set indeklima og udeklima adskilt. Den skærmer imod nedbør, vind og kulde, hvor klimaskærmens evne til at sikre den termiske temperaturadskillelse, afhænger af isoleringsevnen for materialerne i konstruktionen samt tætheden. Eksempelvis udfører en uisoleret og utæt ydervæg denne opgave relativt dårligt, men til gengæld er selve væggen lun helt ud til ydersiden. Man bruger dermed store mængder varmeenergi på at varme selve hovedkonstruktionerne op, men drager ikke nytte af denne varme i sit indeklima til rumopvarmning. I mange tilfælde er dette forklaringen på, at gamle uisolerede huse fungerer godt fugtteknisk, men har et alt for stort varme og energiforbrug. Den varmestrøm som er stødt faldende ud igennem det massive murværk vil ses som en jævnt fordelt lineær kurve da mursten og fuger samlet set vil have nogenlunde den samme varmeledningsevne i hele murens tykkelse. Dog vil varmeledningsevnen være en lille smule ringere i den yderste del af murværket da denne er mere konstant fugtpåvirket. Denne lille forskel i materialeegenskaber har dog ingen synderlig betydning for de termiske forhold i konstruktionen.

Den varmemængde som afgives igennem en væg er defineret af arealet af væggen, temperaturforskellen henover væggen, samt materialelagenes samlede U-værdi. Dette udtrykkes som det dimensionerende transmissionstab gennem bygningsdelens flade. Her er U-værdien da et udtryk for den mængde varme der trænger ud igennem 1 m² af konstruktionen ved en temperaturforskel på 1 grad. En konstruktion der er opdelt i flere materialelag, vil defineres som summen af hvert materialelags isolanser, som ydermere er defineret som tykkelsen af materialelaget divideret med materialets varmeledningsevne. Når alle isolanserne for samtlige materialelag ud igennem konstruktionens lag summeres sammen, fås den samlede isolans for hele konstruktionen. U-værdien for en konstruktion er lig med den reciprokke værdi for konstruktionens samlede isolans.

Ydervægskonstruktionens samlede transmissionstab har en stor indflydelse på hele bygningens samlede varmetab, som herudover også tæller linjetab, ventilationstab og infiltration (lufttæthed). I målet om at nedsætte varmetabet for hele bygningen er det væsentligt at fokusere på transmissionstabet gennem klimaskærmen, som i store træk kan ses som skærpelsen af den pågældende konstruktions U-værdi.

Eksempel 1: Et eksisterende 1½-stens massivt murværk (ca. 350 mm) med 20 mm puds, vil have en U-værdi på ca. 1,45 W/(m²K). I et rum på 20 °C inde, på en vinterdag med 0 °C ude, vil den indvendige overfladetemperatur på den pudsede væg ofte ligge et sted mellem 16-17 °C. Isoleres der her med 200mm indvendig isolering af mineraluld kl. 40, nedsættes U-værdien til ca. 0,17 W/(m²K). Den efterisolerede ydervæg vil på den pågældende vinterdag have en indvendig overfladetemperatur på mellem 19-20 °C, ganske tæt på rumtemperaturen. En

betragtelig forøgelse i overfladetemperatur som både vil fremme komfort og mindske varmetabet. Temperaturkurven igennem den nu efterisolerede massive ydervæg vil falde markant, ud igennem de 200 mm isolering. Temperaturen for pudsens vil da nu ligge omkring de 2,5 °C og temperaturen vil herefter dale ud igennem det eksisterende massive murværk til den når udetemperaturen. I dette eksempel ses altså en kold bærende konstruktion, hvor man kan forvente en temperatur, 100mm inde fra udvendig overflade, på ca. 0,5 °C med indvendig isolering. Sammenligneligt vil der i samme målepunkt på en massiv ydervæg uden isolering være ca. 4 °C, 100 mm fra udvendig overflade.

Linjetab og kuldebroer

I de knudepunkter hvor to bygningsdele mødes vil der næsten uundgåeligt altid opstå kuldebroer, som man skal være meget opmærksomme på. De konstruktive og systematiske kuldebroer optræder eksempelvis hvor etagedækket hviler af på ydermuren, eller hvor en bærende indervæg møder en gavlmur. Kuldebroerne optræder de steder hvor der forekommer en dårligere isoleringsgrad end for den/de øvrige nærliggende konstruktioner.

Når ydervæggene isoleres indvendigt ses problematikken omkring etageadskillelsen, da det ofte ikke er praktisk muligt at isolere i samme grad i etageadskillelsen, som op langs væggen. Kuldebroen vil da forløbe lige i samlingen mellem de to bygningsdele og danne et linjetab langs gulvet/loftet. Dette linjetab vil skabe en mindre varmetransport omkring bjælkeenderne som sikrer at temperaturen omkring bjælkeenderne *kun* reduceres med 3-4 °C i dette knudepunkt, når der efterisoleres indvendigt. Jf. SBI-anvisning 221, menes der at det linjetab der løber langs etageadskillelsen ved indvendig efterisolering, sikrer en rimelig temperatur i et ellers fugtkritisk knudepunkt.

Isotermene på figur 3 viser varmestrømmen ud fra etagedækket og det ses hvorledes temperaturen ved bjælkeenden reduceres fra ca. 10 °C til ca. 7 °C. Snittet på fig. 3, er taget ved siden af bjælkeenden, hvor temperaturen er en smule lavere pga. varmeledningsevnen for murværket.

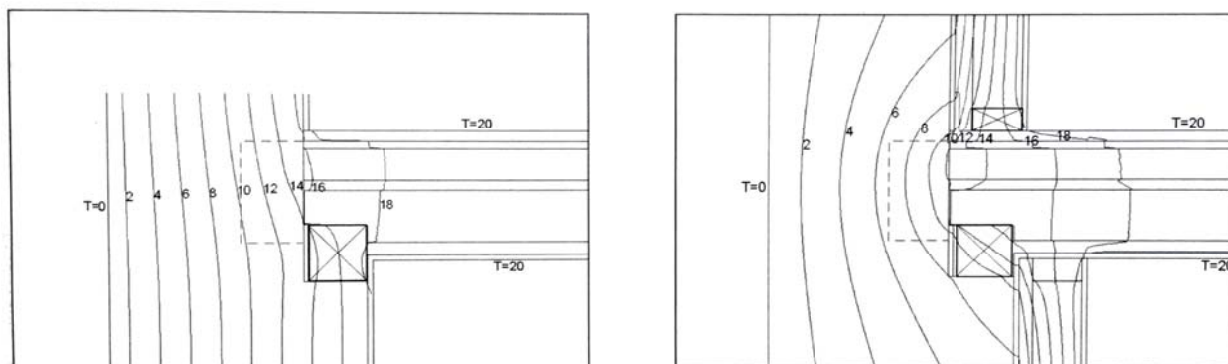


Fig. 3: Isothermer ud fra etagedæk med/uden isolering. (SBI-anvisning 221)

Linjetabet igennem etagedækket kan beregnes ved at udføre simuleringer i eksempelvis HEAT2, hvor man kan få opgivet det todimensionale linjetabskoefficient (L_{2d}). Denne koefficient kan da ganget med længden af vægsamlingen, samt temperaturdifferencen give det dimensionerende transmissionstab igennem en samling (W).

Hvis man ser på en ydervægsopstalt indefra et rum med to vinduer, vil der langs etageadskillelsen forløbe flere etagebjælker som vil danne en systematisk kuldebro i facaden. Der vil her være forskel på den linjetabskoefficient som forløber midt i bjælkerne samt lige ved siden af bjælkerne. Man kan her tale om et samlet transmissionstab for hele samlingen i overgangen mellem ydervæg og etagedæk. I dette tilfælde kan det være anvendeligt at modellere sin væg og etageadskillelse op i 3D i eksempelvis HEAT3, for at beregne det tredimensionelle linjetabskoefficient (L_{3d}).

Forskning viser at når man kigger på en typisk facadeopstalt for en 2-stens ydervæg (470 mm), med en traditionelt etageadskillelse samt med to vinduer (fig. 4), kan der ved tredimensionale beregninger findes meget præcise varmetabsberegninger før og efter indvendig isolering. Væggen og vinduernes U-værdier, samt de linjetab ved loft og gulv, danner til sammen et totalt transmissionstab for en typisk eksisterende væg på **146 W**, ved en temperaturdifferens på 14,5 °C (inde-/udetemp.). Efterisoleres denne ydervæg indvendigt med 200mm isolering som i Eks.1, fås nu et total transmissionstab på **58 W**. Dette er beregnet med tredimensionale beregninger i HEAT3, for en typisk facadeopstalt. Det samlede transmissionstab igennem facadeopstalten mere end halveres, ved opsætning af 200mm mineraluld. (Morelli, 2010)

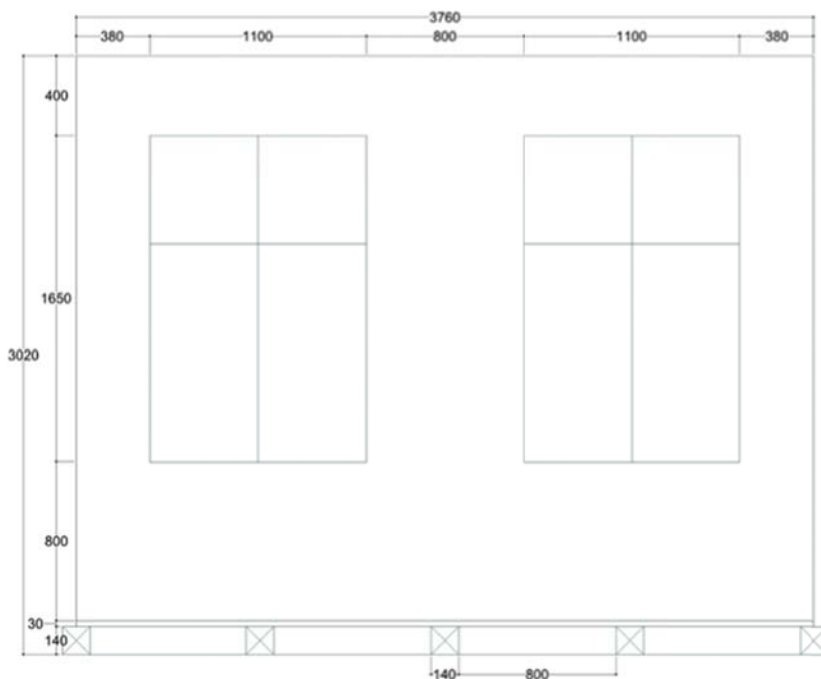


Fig. 4: Typisk facadeopstalt af en ældre etageejendom, af massivt murværk med etageadskillelse af træ. Modelleret op i 3D og beregnet transmissionstab og linjetab herfor.

2.4. Fugt teori

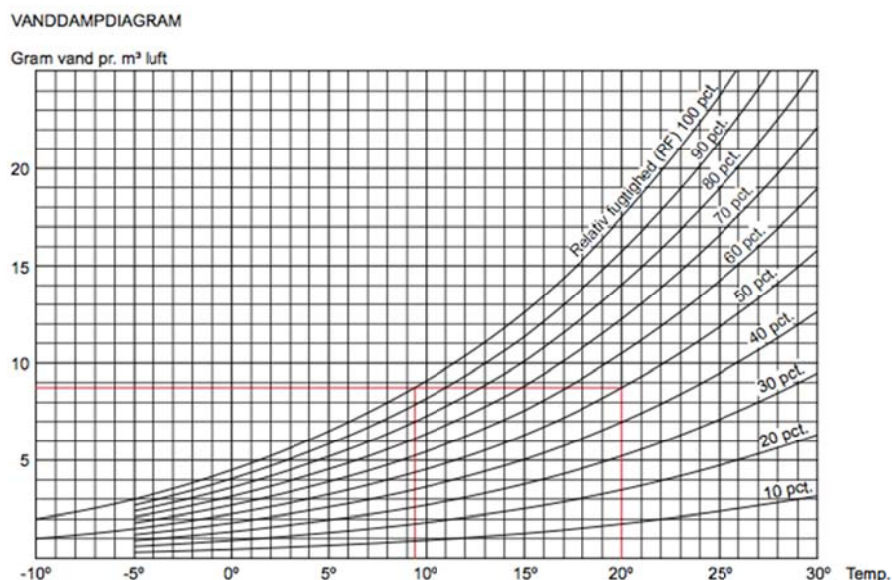
Fugt i boligen kan fremkomme på mange forskellige måder. Det kan eksempelvis ske udefra ved varierende vejrforhold og nedbør, fra undergrunden som opstigende grundfugt, fra overfladevand og utætheder i enten rør eller afløb, eller internt i boligen fra almindelig adfærd, ved aktivitet og respiration.

Ved almindelig adfærd i boligen opstår der en hvis mængde fugt blot ved, at vi befinder os i boligens rum. I nogle rum såsom køkken eller badeværelset kan vi have en klar fornemmelse af denne relative luftfugtighed (RF) ved blot at se på duggen på vores spejl, efter at have været i bad. Her er den relative luftfugtigheden så høj, at vandet fortætter på de kolde blanke overflader. Dette skyldes overproduktion af fugt ved den pågældende rumtemperatur.

Denne fugtproduktion opfattes som mængden af vanddamp i luften pr. m^3 , og varierer altså ved vores naturlige adfærd og brugen af de pågældende rum. Hvis man sammenholder mængden af vanddamp ved en given temperatur holdt op imod det totale mængde vanddamp for denne temperatur, får man den relative luftfugtighed (RF) målt i procent. Denne RF vil typisk for beboelse ligge et sted mellem 40-60 %RF alt afhængigt af årstiden og fugtbelastningen. Dette vil for de fleste opleves som et behageligt indeklima, hverken for tørt eller for fugtigt. Ved for høj konstant fugtighed på over 75-80 %RF vil man kunne risikere skimmelsvampe dannelse og tilsmudsning på vægoverflader af forskellige materialer. Opnår man en relativ luftfugtighed på 100 %RF, vil luften indeholde så meget fugt at det fortætter og bliver til dråber af vand. Dette ses ofte på den indvendige side af vinduesoverfladen, i samlingen mellem glas og ramme, ved for høj fugtproduktion mod for dårligt isolerede vinduer. Dette kaldes i dagligt tale for dugpunktet, kondens eller mættet vanddamp. (Brandt, 2013).

Sammenhængen mellem mængden af vanddamp i luften, den pågældende temperatur og den relative luftfugtighed RF, illustreres ofte ved vanddampdiagrammet (Fig.5). Her ses det hvordan luften kun kan indeholde en hvis mængde vanddamp ved en temperatur, før end at fugten i luften fortætter.

Fig. 5: Vanddampdiagram over temperatur, fugtproduktion samt relativ luftfugtighed (RF)



Eksempel 2: I et rum med en temperatur på 20 °C og en relativ luftfugtighed på 50 %RF indeholder luften ca. 8,5 g vanddamp pr. m³. Hvis temperaturen igennem ydermuren falder til 9 °C, stiger RF til 100 %RF og fortætter dermed ved dugpunktet.

I en massiv ydervæg vil dette tilsyneladende foregå midt inde i den fuldmurede ydervæg alt afhængigt af udetemperaturen, og vandet/fugten transporteres ud til overfladen og kondenserer/fordamper.

Diffusion

Vanddampsdiagrammet viser, hvordan RF stiger ved højere temperaturer. Dette skyldes, at varm luft kan indeholde mere vanddamp end kold luft, man siger at "damptrykket" er højere i varm luft. Når varm luft kan indeholde mere vanddamp, skal der da også langt mere vanddamp til, før luften fortætter ved dugpunktet.

Om sommeren sker der altså ingen større udsving, da ude/ind temperaturen vil være tæt på hinanden og ofte også samme luftfugtighed. Der foretages også et hyppigere luftskifte igennem vinduer og ventiler, som skaber en balanceret naturlig ventilation uden et større varmetab.

I vinterhalvåret er der derimod langt større temperaturforskel mellem stuetemperatur indenfor og udeklimaets fryse temperaturer, dog er vanddampindholdet om vinteren lavere.

Fra naturens side vil vandmolekylerne i den varme inde luft prøve at fordele sig jævnt i luften for at opnå et ens damptryk. Dette vil med temperaturreduceringen påvirke, at den kolde luft vil få en højere relativ luftfugtighed. Fugten i den varme indeluft bevæger sig ud mod den tørrere og koldere udeluft og vil prøve at opnå fugtligevægt i denne fugttransport gennem klimaskærmen. Diffusion gennem klimaskærmen opstår når vanddampptrykket indendørs er højere end vanddampptrykket udendørs, hvilket vil være drivkraften for en fugttransport. Jo højere vandindholdet er ved en given temperatur, desto højere damptryk (Pa).

Damptrykket vil ligesom temperaturen dale ud igennem klimaskærmen, grundet de forskellige damptryk ude og inde. Ved dette damptryksfald igennem hvert materialeglag vil materialets damppermeabilitet skabe en diffusionsmodstand i materialet, som vil resultere i en fugtophobning i materialet. Det kan for nogle materialer være altafgørende ikke at skabe for stor fugtophobning mellem materialerne, hvorfor man altid skal være opmærksom på når den relative luftfugtighed ligger mellem 80-100%RF midt inde i sin konstruktion.

En dampspærre har så stor diffusionsmodstand at damptrykket gennem denne vil falde markant og dermed vil danne et meget lavt damptryk, samt lavt RF på ydersiden af dampspærren.

Risikoen for fugtophobning i konstruktionen mindskes herved.

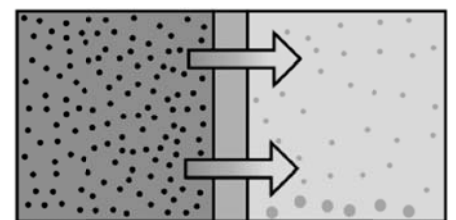


Fig. 6: Diffusion igennem materiale

Selvom en dampspærre anses for at være 100% damptæt, kan denne alligevel fås i forskellige tæthedsgader, hvor dampspærrens sd-værdi typisk vil variere fra 60-200m (en sd-værdi på 60m $\approx$ en Z-værdi på 315 (GPa m² s/kg)). Denne værdi er for et materiale meget højt og vil til enhver tid sænke damptrykket i konstruktionen betragteligt. Når et materialelags diffusionsmodstand stiger, falder damptrykket henover dette materiale og dermed vil også den relative fugtighed RF falde.

En sådan dampspærre anvendes ofte til at danne klimaskærmens tæthedsplan. Dette tæthedsplan sikrer at den fugtige luft ikke trænger ud i konstruktionen, hvor den ved for høj fugtighed kan skabe fugtskader. Derudover sikrer tæthedsplanet også imod varmekomfort, trækgener, dårlig styring af ventilation og energiforbrug ved udnyttelse af varmegenvinding.

Konvektion

Selvom dampspærren er damptæt i sin struktur, er det dog ikke ensbetydende med at opsætningen af en dampspærre også er lufttæt!. En lufttæt dampspærre kan man kun garantere, hvis man kan garantere en 100% korrekt opsat dampspærre. Ingen huller og revner eller utætheder af nogen art. Små og store utætheder i en sådan dampspærre vil risikere at danne konvektion.

Et hus, der bliver påvirket af vind og lufttryk både udefra og indefra, vil have tendens til at have forskellige lufttryk. Eksempelvis vil en utæt konstrueret facade, med et ringe tæthedsplan, kunne bringe vind og andre luftstrømme ind igennem revner og sprækker og danne et mindre overtryk inde i huset. Disse luftstrømme vil konstant søge mod lavere lufttryk.

Hvis der skabes overtryk i den ene ende af huset pga. en utæt klimaskærm, vil der dannes undertryk i den anden ende af huset, og luftstrømmene vil her blive suget ud igennem revner og sprækker i klimaskærmen. Luftstrømme, som bevæger sig igennem konstruktionen, mod lavere tryk, og derved fokuserer fugttransporten gennem revner og sprækker, kaldes konvektion.

Når en fugtig luft gennemstrømmer en konstruktion på en kold vinterdag, mættes fugten i luften og kan udfælde sig som kondens i den bærende konstruktion. Hvis der derfor skabes undertryk henover en ringe opsat dampspærre med eventuelle revner i, koncentrerer dette undertryk netop her. Konvektionen gør da, at en langt større mængde fugt kan transporteres igennem materialet og samtidigt koncentrerer ét sted. Når fugten fokuseres ét sted, er der større risiko for følgeskader, når den relative luftfugtighed, RF stiger.

Dampspærre producenter har udført beregninger for denne fugttransport ved diffusion og konvektion igennem en ydervægskonstruktion, med en brudt dampspærre, som viser en fugtproduktionen som er over 200 gange større ved konvektion end ved diffusion. Den mængde vanddamp der fokuseres i disse områder ved konvektion er altså langt mere risikabel, hvormed den fugtige luft kan kondensere og skaber råd eller svamp. Det er derfor yderst vigtigt at

montere en så tæt dampspærre som muligt, hvor især hjørner og samlinger er ekstra udsatte. I lofter og andre steder er det ofte uundgåeligt ikke at gennembryde dampspærren, hvorfor man her skal sikre tætheden for dampspærren med tape, lim og klemmelister.

Kapillartransport og kapillarsugning

Teglsten og mørtel i en fuldmurret ydervæg er porøse materialer, som opfattes som et kanalsystem af mikroskopiske åbne porer, som danner gennemgang for luft og vanddamp. Teglkonstruktioner er diffusionsåbne grundet denne porestruktur og vil dermed kunne transportere vanddamp (diffusion) og vand i sig (kapillartransport). Der vil på en massiv ydervæg konstant foregå en transport af vanddamp og vand, fra udefrakommende vandpåvirkninger af slagregn, opstigende grundfugt, diffusion eller anden form for fugt. Fugten transporteres ud til ydervæggens overflader, hvor vanddampen kan fordampe og murværkets materialeegenskaber vil forblive uændret. De forskellige materialegag som optræder i klimaskærmen vil enten bremse eller ophobe denne fugttransport og vil fremme enten opfugtning eller udtørnings-processen i konstruktionen.

En fugttransport igennem et eksisterende massivt murværket klarer på mange måder sig selv, og så længe murværket forbliver uændret, er der som oftest en rimelig balance. Først når vi prøver at ændre på fugt- og temperaturforholdene for væggen kan man risikere forskellige udsving i væggens egenskaber. Dugpunktet rykkes eksempelvis andetsteds hen i vægkonstruktionen, hvis en indvendigt isoleret forsatsvæg sættes op, dette vil fremme en opfugtning på den indvendige side af det eksisterende murværk.

Kapillartransporten i murværket er den vandtransport, der finder sted i de porøse materials poresystem. Vanddampen transporteres fra områder af materialet med højt fugtindhold til de mere tørre områder hvor der da vil opnås fugtligevægt ved det pågældende damptryk. Denne fugtligevægt afhænger af materialets porestørrelse og grovhed og resulterer i at forskellige materialer har forskellige porestruktur og størrelser. Tegl har væsentligt grovere porer end træ hvormed fugten optages væsentligt hurtigere, men i samme grad også afgives hurtigt igen. Træets finere porestruktur har en større stighøjde og langsommere fugtligevægt, hvilket medfører at træet kan indeholde en del mere vanddamp end tegl ved samme RF. Forskellige materialer har forskellig densitet og porestruktur. Disse parametre fortæller om materialets fugtligevægt og skaber forskellige sorptionskurver for de enkelte materialer, som alle viser vandindholdet i materialet i vægt%, for en given RF. (se bilag 4.2) Sorptionskurver for forskellige materialer vil alle stige i fugtligevægt når RF forøges. Fugt som absorberes i poregangene binder vandmolekylerne til sine porevægge helt indtil porene er opfyldte. Der er en variation i denne fugt absorbering, da bindingerne bliver svagere og svagere når RF stiger. Når den enkelte pore

er ved at være fyldt vil der ske en kraftig stigning i ligevægtsfugtigheden, da der vil foregå en kapillær kondensation.

Den kapillære transport er kun aktiv, når der er kontakt mellem de væskefyldte porer i materialet. Derfor spiller kapillartransporten først rigtig en betydning for fugtindhold højere end ligevægtsfugtindholdet ved 90-95 % RF. For at der skal kunne foregå en kapillaraktiv transport mellem to forskellige materialer skal der være en direkte kontaktflade mellem materialerne. Kapillartransporten har størst betydning for at omfordele fugten i materialerne og er medvirkende til, at lokale opfugtninger i materialer relativt hurtigt transporteres med damptrykforskellen ud til overfladen, hvorfra den herefter kan fordampe.

Hvis der foregår en mere eller mindre konstant vandpåvirkning eller opfugtning af overfladen ved nedbør og slagregn eller grundvand, vil det konstante vandtryk skabe et mindre undertryk i porerne mellem vandoverflade og materiale. Dette undertryk vil medføre en kapillarsugning op igennem materialets porer, så væsken suges ind i porerne (se fig. 8). Finere porer med større stighøjde har her en evne til at suge vand fra materialer med en grovere porestruktur.

Kapillarsugning har stor betydning for eksempelvis opstigning af grundfugt, hvor fundamenter af massivt murværk ofte står nært grundvandsspejlet og til tider med konstant vandpåvirkning og derved "suger" grundfugt op igennem ydervægge. Her vil teglens porestruktur medvirke til at de ikke kan indeholde særlig store mængder fugt før end at porerne er vandfyldte og der opnås fugtligevægt. Her vil kapillarsugningen hastigt transportere vandet videre op igennem ydervægen (Brandt, 2013).

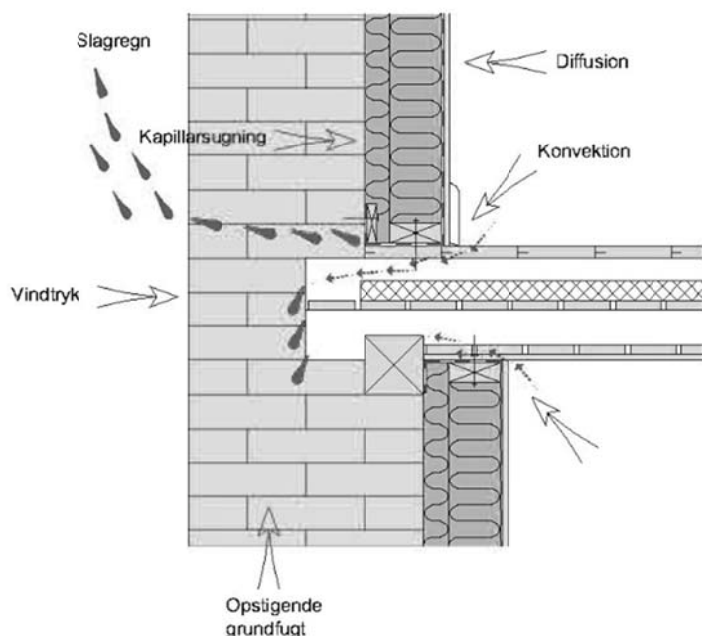


Fig. 7: Fugtpåvirkninger i detaljen mellem ydervæg og etageadskillelse

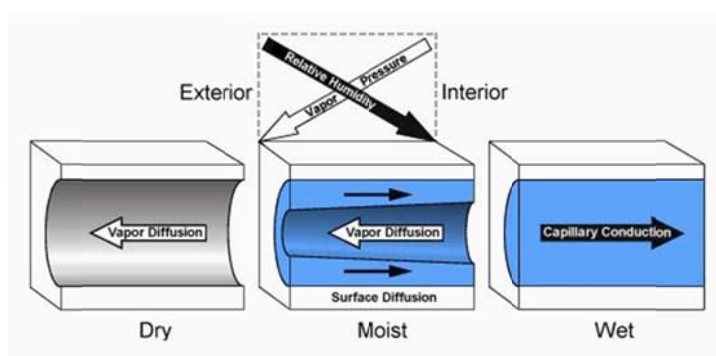


Fig. 8: Fugttransport i massiv ydervægs porer om vinteren. Der ses forskellige stadier af fugtindhold, gennem opfugtning/udtørings processen.

3. Metode

Til undersøgelse af murværkets fugtrobusthed, er der overordnet anvendt 2 forskellige beregningsmetoder til måling og analyse af temperatur og fugtforholdene.

Disse beregningsmetoder vil samlet set belyse alle de fugtproblematikker og risikoparametre som tidligere nævnt under afgrænsningen for nærværende rapport. Metoderne bliver gradvist mere og mere detaljerede for i sidste ende at have overskueliggjort de samlede påvirkninger ydervæggen bliver udsat for.

Studiet udføres som et teoretisk studie, hvor samtlige resultater findes ved beregninger og simuleringer, og der tages udgangspunkt i faste randbetingelser og anerkendte klimadatasæt.

Som start udføres stationære betragtninger af de to efterisoleringsmuligheder, samt en reference for det eksisterende massive murværk, dette udføres ved Glaser-metoden. Herefter betragtes bygningsdelene samt knudepunkter i hhv. 1D og 2D simuleringsværktøj, for at se på den dynamiske hygrotermiske simulering henover en årrække, før og efter den indvendige efterisolering er opsat.

Alle simuleringer og beregninger udføres for begge efterisoleringsmetoder. Kalciumsilikat byggesten (kal.) og den fenolbaserede skumplade, belagt med en kompositfolie og gipsplade (skum/gips), for da at kunne sammenligne disse to materialeløsninger. Der vil også simuleres for en eksisterende 1,5 stens ydervæg som reference og sammenligningsgrundlag. Orienteringen for ydervæggen vil også tages i betragtning, hvor der vælges to modstående orienteringer, nord og syd. Dette kan eksempelvis betragtes som en gårdfacade og en gadefacade.

Beregningsmetode og simulering

Den første metode, Glaser-metoden, er en stationær beregningsmetode af de givne forhold under nogle helt faste forudsætninger. Her angives der randbetingelser svarende til fugtbelastningsklassen for etageejendomme, samt en fast temperaturdifferens. Med denne metode vises vanddampsdiffusionen gennem konstruktionen henover et månedsinterval, samt damptrykfordelingen igennem konstruktionen. Beregningsmetoden er nærmere beskrevet i DS/EN ISO 13788. Der beregnes kun for februar måned med en udetemperatur på $-1,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ og 91 %RF, dette antages at være den mest kritiske måned på året jf. TRY (Test reference year). Metoden kan kun anvendes for bygningsdeles normalkonstruktioner, men kan give en indikation på hvor der måtte opstå fugtproblemer inde i konstruktionens materialelag.

Efterfølgende hygrotermiske simuleringer udføres med fugt- og temperatursimuleringsprogrammet WUFI, (Fraunhofer). WUFI-simuleringer udføres i hhv. 1D med WUFI light (gratis version), samt i WUFI 2D. I 1D simuleres samme normalkonstruktion henover en årrække, hvor

der ses på fugtophobning og udtørningspotential for specifikke målepunkter i væggen, samt den eksakte vandindhold af visse materialelag.

I 2D simuleres der for samme årrække for knudepunktet mellem ydervæg og etageadskillelse med henblik på problematikken omkring råd i bjælkeender som hviler af på murværket.

Der anvendes de randbetingelser og parametre som optræder i de forskellige WUFI programmer, som ligger til grund for analyserne i denne opgave.

3.1. Materialer og randbetingelser

Der er undersøgt materialeegenskaber for alle de forskellige materialer som anvendes til beregning og simuleringer. Alle materialerne er listet op i tabel 1 og er fundet fra hhv. danske producenter, DS/EN ISO 10456 eller taget direkte fra WUFI's materialedatabase.

Materialeparametrene i tabel 1 afspejler tilnærmelsesvis de materialer der findes på markedet, og som denne opgave tager udgangspunkt i. Dog er diffusionsmodstanden for (skum/gips) pladen, fra producentens side, kun angivet med én samlet diffusionsmodstandsfaktor for hele pladen og skal derved opdeles i flere materialelag for at kunne simulere i WUFI.

	Isolans $\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$	Densitet Kg / m^3	Tykkelse mm	Varme- ledningsevne W / mK	Damper- meabilitet $\text{Kg} / (\text{m} \cdot \text{s} \cdot \text{GPa})$	μ , Vanddamp Diffusions- modstandsfaktor
Indv. Overflade, R_{int}	0,13					
Fenolskum		39	120	0,025	0,00213	88,93
Alufolie		130	1	2,3	0,0000038	50.000*
Gipsplade		850	12,5	0,20	0,0228	8,3
Kalciumsilikat		115	200	0,04	0,046	4,1
Puds, indv.		1480	20	0,950	0,011	17
Tegl, udv. massiv.		1800	350/580	0,700	0,0126	15
Luftlag		1,3	15	0,071	0,26	0,73
Etagedæk, Træ		420	200	0,13	0,0038	50
Udv. Overflade, R_{ex}	0,04					

Tabel 1: Materialer

Materialerne for denne plade er derved tilpasset de materialer der var tilgængelig i WUFI. Den termohærdende fenolskumplade har fra producentens side en total vanddampdiffusionsmodstandsfaktor på 583μ for hele pladen med tykkelsen (132,5 mm). Ved beregninger er da fundet damppermeabiliteten for hele pladen på $0,0003259 \text{ kg}/(\text{m}\cdot\text{s}\cdot\text{GPa})$ og derved en z-værdi på $406 (\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})/\text{kg}$. Da vi kender z-værdien for hhv. fenolskum og gipspladen, trækkes disse fra og derved findes z-værdien for alufolien på ca. $350 (\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})/\text{kg}$ (svarende til en sd-faktor på 66,5 m, eller omskrevet til 66.500μ , for alufolien). Da det ikke har været muligt at finde en korrekt alufolie i WUFI's materialedatabase, er der i sidste ende valgt en dampspærre med en sd-faktor på 50 m (50.000μ), som dermed giver en z-værdi på $263 (\text{GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s})/\text{kg}$.* Begrænsninger i simuleringsprogrammet gør altså at der er valgt en lavere samlet diffusionsmodstandsfaktor, end den som er angivet for producenten.

Glaser-metoden, indtastning

For de fleste af de øvrige materialer er de fundne værdier for damptæthed ofte angivet i vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren (μ), som derved ofte kræver en omregning for at kunne anvendes i Glaser-metoden. ($0,19/\mu = \text{Damppermeabiliteten}$). Denne damppermeabilitet samt varmeledningsevnen for det pågældende materiale, indtastes sammen med materialets tykkelse i Glaser-metoden, for at beregne temperatur-/ og damptryksfordelingen imellem de forskellige laggrænser. På denne vis kan vi aflæse temperatur, damptryk, korrigeret damptryk og RF% for hvert målepunkt i laggrænserne mellem samtlige materialer.

Randbetingelserne for beregningerne ved Glaser-metoden er som tidligere nævnt et udeklima for februar måned med 91 %RF. Dertil kommer en intern fugtbelastningsklasse på 3, svarende til 59,8 %RF (Brandt, 2013). Temperaturforskellen henover ydervæggen er på $21,1^\circ\text{C}$ (20°C inde og $-1,1^\circ\text{C}$ ude).

Det er væsentligt i Glaser-beregningen at korrigere damptrykket som ikke altid falder lige så hurtigt som mætningsdamptrykket igennem et pågældende materialelag. I et materiale med lav varmeledningsevne og lav diffusionsmodstand vil mætningsdamptrykket falde hurtigere end selve det aktuelle damptryk, hvilket vil skabe 100 %RF og danne kondens. Da det er fysisk umuligt at have en højere RF end 100%, skal damptrykket korrigeres ned til mætningsdamptrykket i disse tilfælde. Det grafiske udtryk på Glaser beregningerne viser dette damptryksfald, samt korrigeringen igennem materialelagene.

Denne stationære beregningsmetode er anvendelig for at få et overblik over sin normalkonstruktion, men danner samtidig kun et øjeblicsbillede for randbetingelserne for den pågældende februar måned. (se bilag 1.1 – 1.6)

Udeklimadata

For at kunne få et helhedsbillede af de hygrotermiske forhold i konstruktionen henover en årrække, er der lavet simuleringer af konstruktionsløsningerne med klimadata for Lund i Sverige. Dette klimadatasæt er det eneste der er tilgængeligt i WUFI Light, men kan samtidig være retvisende for en location i København da disse to byer ligger på tilnærmelsesvis samme breddegrad med kun ca. 60 km afstand fra hinanden. Klimadatasættet for Lund, MDRY (fugt design reference år), angiver et gennemsnitligt typisk reference år hvor der tages hensyn til en kritisk fugtbelastning i udeklimaet. Dette reference år vil antageligt vise en lidt større regn og fugtbelastning end et normalt år for vor tids 10-års dekadeværdi, pga. de mange forskellige vejrparametre der spiller ind. Disse klimadatafiler som simuleringsprogrammerne anvender, bliver opdateret hvert 10 år, i sammenhæng med et mindre skiftende udeklima.

Det ses ud fra fig. 9 hvordan udeklimaet varierer henover hele året, angivet ved temperatur og relativ luftfugtighed. De kraftigt optrukne streger indikerer gennemsnittet for graferne, hvor det ses at der er stor variation for især RF (blå) for den enkelte dag. Den relative luftfugtighed vil være højere i vinterhalvåret end for sommerhalvåret, til gengæld indeholder denne kolde udeluft ikke lige så højt absolut vandindhold pga. de lavere temperaturer, dermed opleves luften mere tør. Derimod fremkommer der om sommeren en lavere gennemsnitlig luftfugtighed, men til gengæld er der større variation henover det enkelte døgn. Luftfugtigheden om sommeren kan være helt nede på 50 %RF midt på dagen når der er varmest, og alligevel nå helt op på 90-100 %RF hen på aftenen, når duggen lægger sig. Der er altså stor variation i RF om sommeren hvor vanddampindholdet i luften ofte når op på over den dobbelte mængde absolut vandindhold, hvorfor luften opleves fugtig i sommervejret.

På figur 10 ses den slagregnpåvirkning som bygningen udsættes for ved dette klimadatasæt. Figuren indikerer regnmængden og vindretningen ved slagregnpåvirkning og viser hvordan der er ca. 4 gange så stor vandpåvirkning på en sydfacade frem for en nordvendt facade.

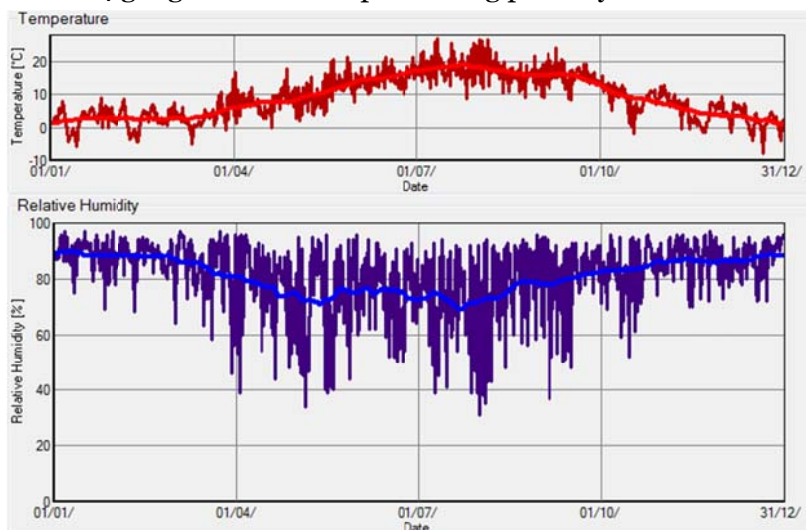


Fig. 9: Klimadatasæt, Lund

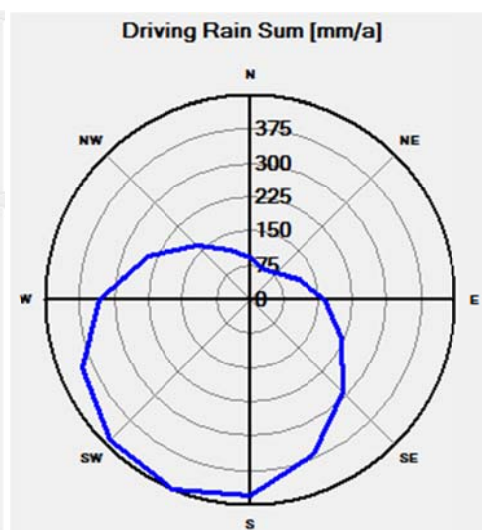


Fig. 10: Slagregnpåvirkning, Lund

Med en ydervæg i tegl, som er kappilaraktiv, vil denne regnpåvirkning formentlig gøre en væsentlig forskel i vandoptag i murværket. Denne store forskel taget i betragtning, samt at man ofte vil foretage samme efterisolerende foranstaltning på to modstående facader, gør at der er valgt syd og nord orienteringerne som sammenligningsgrundlag. Denne regnmængde på facaden er i klimadatasættet målt for en bygning uden nogen afskærmende bygninger omkring sig, så regnmængden vil altså ses som en maksimal regnpåvirkning, for den gældende orientering.

Solindstrålingen er også medregnet i klimadatasættet og vil bidrage til en væsentlig større mængde solskinstimer for den syd vendte orientering. Denne solfaktor vil formentlig fremme udtørningsprocessen af sydfacaden en smule, men det forventes at slagregns påvirkningen vil udgøre den helt store forskel mellem nord- og syd orienteringerne.

Udeklimaets betydning for murværkets fugtoptag ved kappilarsugning, forventes at kunne ses i forskellen mellem fugtophobning og udtørningsprocessen henover et år ud igennem konstruktionen. Simuleringer over flere år vil vise om der vil være en stigende fugtophobning over tid, hvorfor der simuleres for 6 år af gangen. Hvis der opnås balance i ligevægtstilstanden i et pågældende materialelag, indenfor et acceptabelt relativt fugtigheds niveau, må vi som udgangspunkt antage at løsningen kan accepteres.

WUFI, indtastning

Både for WUFI 1D og 2D, er der udført de samme parametre for indtastningen af materialer og randbetingelser. Det er samme klimadata, orienteringer og regnpåvirkninger for begge simuleringsprogrammer. Den store essentielle forskel på simuleringerne i 1D og 2D er geometrierne og målepunkterne. Der er i 2D er skabt større kompleksitet i samlingsdetaljen for at kunne simulere opfugtningen i bjælkeenden, hvor bygningsdelene mødes. Følgende er indtastet:

- Geometri:
 - o Der er taget udgangspunkt i en 1,5 stens massiv teglmur, som ofte ses på øverste etage i etageejendomme.
 - o Konstruktionen er opdelt i lag som er pålagt et materiale.
 - o Der snittes vertikalt i ydervæggen midt i bjælken for etageadskillelsen.
- Grid-linjer fordeles automatisk fininddelt, med 100 ud af x-aksen og 100 ud af y-aksen.
- Materialerne er tilføjet geometrien ud fra parametre som angivet i tabel 1.
- Orientering:
 - o Syd = 0° (Azimuth)
 - o Nord = 180° (Azimuth)

- Hældning, lodret = 90° (Inclination)
- Slagregnskoefficient:
 - o Slagregn (Driving rain coefficients): $R_1 = 0$ og $R_2 = 0,05$ s/m (WUFI standarder)
Regnmængde udregnes for hvert klimadatasæt i WUFI som normal regn $\times (R_1 + R_2 \times \text{vindhastighed})$.
- Regnvands absorptionsfaktor = 0,7. (Zirkelbach, 2005).
 - o Denne faktor forholder sig til, at noget af det regnvand som rammer facadeoverfladen, plasker af og ikke bidrager til kappilar absorption.
 - o Ifølge WUFI support forum på internettet, relaterer denne faktor sig marginalt til overfladens struktur, men er stærkere knyttet til orientering eller afskærmningen af facade overfladen. Denne faktor kan derved også ses som en afskærmningsfaktor.
- Vindafhængighed er sat til.
- Kortbølge strålings absorption = 0,68 (Brick, red).
 - o Mængden af solstråling som absorberes af facaden.
- Langbølge strålings emisivitet = 0.
 - o Emisiviteten af overfladen for termisk stråling. Det anbefales at sætte denne til 0.
- Overfladebehandling:
 - o Der er ikke tilføjet nogen overfladebehandling hverken indvendigt eller udvendigt.
- Ude/inde-klima:
 - o For udeklima vælges Lund klimadatafil som tidligere nævnt.
 - o For indeklima vælges EN 15026.
- Tidsinterval:
 - o Der er 8.760 timer på et år. Hver time indikerer et tidsinterval.
Alle simuleringerne starter d. 1/10-2015, som indikerer indgåelsen i fyringssæsonen og det kolde halvår. Fra 1/10-2015 – 1/10-2021 = 52.560 timer.
 - o For at simulere en af de potentielt set koldeste dage er valgt 1/2-2021 = 46.800 t.
- Outputdata for både 1D og 2D:
 - o Temperatur i $^\circ\text{C}$. Relativ luftfugtighed (RF) i %. Vandindhold i kg/m^3 .
Vandindhold i vægt%.

Ud fra disse indtastede data er der både simuleret 1D (normalkonstruktioner), samt 2D (samlingsdetaljer) for de forskellige ydervægge med indvendigt efterisolering. Når en simulering er udført, vises temperatur og fugtforholdene inde i konstruktionen for et ønsket tidspunkt. Ud fra disse data kan man finde en hvilken som helst hygrotermisk parameter i et givent målepunkt, som konstruktionen udsættes for.

4. Resultater

Ud af de mange beregninger og simuleringer som er foretaget, er de væsentligste data, grafer og målepunkter synliggjort på bilag. Der er et bilag for hver simulering med den pågældende vægtype, samt med en skiftende orientering for Nord og Syd. Alle bilagene er oplistet under bilagsfortegnelsen bagerst i rapporten.

For at kunne orientere sig i de mange grafer for specifikke målepunkter, er bilagene nummereret under en systematisk rækkefølge for at synliggøre de fundne værdier for læseren. Nummereringen er inddelt i hovednummer og løbenummer ud fra følgende system:

- Bilag 1.1 – 1.6 - Bilag med resultater for Glaser-metoden.
- Bilag 2.1 – 2.8 - Bilag med resultater for WUFI 1D simuleringer (normalkonstruktioner).
- Bilag 3.1 – 3.9 - Bilag med resultater for WUFI 2D simuleringer (detaljer).
- Bilag 4.1 – 4.3 - Diverse bilag samt resultater for ændrede/afvigende faktorer.

De mange bilag er nødvendige for at skabe et helheds billede af studiet for efterisolering, hvor flere simuleringer anvendes som sammenligningsgrundlag for hhv. orientering eller isoleringstykkelse.

4.1. Resultater for Glaser-metoden

Først og fremmest ses det af resultaterne for Glaser-metoden at temperaturen og damptrykket falder ud igennem ydervæggen i den kolde februar måned med RF på 91%. Det er for denne måned at der er den største damptryks differens mellem ude og inde, som er drivkraften for at vanddampmolekylerne vil bevæge sig igennem konstruktionen. Om sommeren hvor der eventuelt vil være varmere ude end inde, kan der ske et stigende damptryk ud igennem klimaskærmen, med en mindre damptryksdifferens, som dog ikke vil påvirke ydermuren synderligt.

De første to bilag (bilag 1.1 og 1.2), viser to forskellige eksisterende murtykkelser i 1,5 og 2,5 stens tykkelse. Her falder damptryk og temperatur som det skal og ydervæggene har en U-værdi på hhv. 1,45 W/(m²K) og 0,98 W/(m²K). Her ses at der er en potentiel risiko for skimmeldannelse på den indvendige overflade som er over 75% RF for december til februar måned.

De fire næste bilag (bilag 1.3-1.6) viser de samme to ydervægskonstruktioner med hhv. de to forskellige efterisoleringsløsninger som anvendes.

Her ses ingen større hygrotermisk forskel hvad enten der isoleres på en 1,5 sten (350 mm)

murværk, eller en 2,5 sten (580 mm) murværk. Den eneste væsentlige forskel mellem de to murtykkelser, gør sig til udtryk ved den samlede U-værdi for den efterisolerede ydervæg. U-værdien falder ved stigende murtykkelse. Af samme årsag vælges der fremover kun at simuleres med én murtykkelse, nemlig 1,5 stens tykkelse, som ofte ses på øverste etage i ældre etageejendomme.

Det ses af bilagene at ydervæggen med kalciumpulver, (kal.)200, kommer til at kondensere inde i det isolerende materiale, da temperaturfaldet sker så markant ud igennem dette materiale. Diffusionsmodstanden er ikke stor nok i dette kappilaraktive materiale, således at damptrykket ikke kommer til at dale tilstrækkeligt ud igennem materialet, og dermed når over mætningsdamptrykket. Damptrykket korrigeres da der skabes kondens ved 100%RF. (fig. 11)

Man må her huske på at Glaser-metoden er en stationær beregningsmetode baseret på damptrykket i materialerne ved et fast tidspunkt. Der tages ikke højde for variationen i ude/indeklimaet samt at kalciumpulver materialet er kappilaraktivt og derved hurtigt fordeler fugten rundt i porerne når disse er vandfyldte. Det ses at overgangen mellem gammel puds og den nye isolering vil opnå 100%RF, og dermed teoretisk set vil kunne danne skimmelsvamp.

For den anden efterisoleringsløsning med fenolskumpladen, (skum/gips)120, ses på bilag 1.5 og 1.6 nogle mere fornuftige fordelinger af RF igennem lagene. Her optræder ikke umiddelbart nogle kondensproblemer, men der er dog stadig en høj RF på 89% mellem eksist. puds og ny fenolskum. Dette kan teoretisk set danne grobund for skimmelsvamp mellem materialerne. Den sammensatte isoleringsplade har som tidligere nævnt et lag alufolie i mellem de to øvrige materialer (fenolskum og gips). Damp-tætheden i denne folie skaber et sådan damptrykfald at mætningsdamptrykket ikke opnås, men dog stadig kan forekomme kritisk. (fig. 12)

De to efterisoleringsløsninger har ved første øjekast begge en kritisk RF i overgangen mellem ny og gammel konstruktion. Begge løsninger isolerer omtrent lige godt med henblik på den samlede u-værdi, til gengæld fylder (kal.)200, 67,5 mm mere i tykkelsen og samlet set inddrager denne løsning for indvendig efterisolering flere kvadratmeter af det samlede gulvareal.

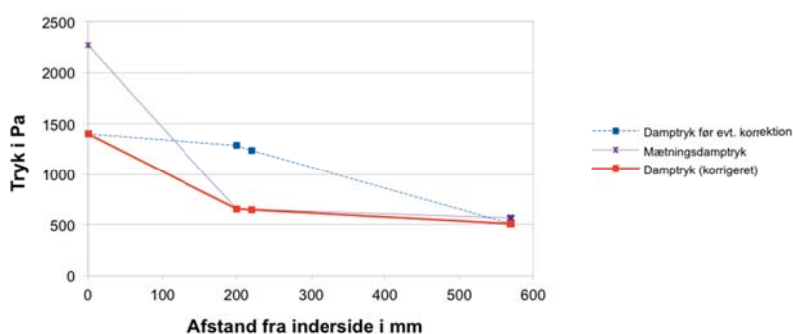


Fig. 11: Damptrykfordeling med (kal.)200.

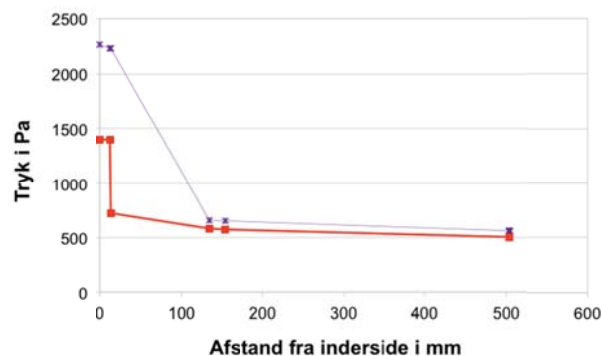


Fig. 12: Damptrykfordeling med (skum/gips)120.

4.2. Resultater for WUFI simuleringer i 1D

Ved resultaterne for 1D simuleringerne er der som udgangspunkt mange forskellige målepunkter som kan vælges til sammenligningsgrundlag mellem flere forskellige konstruktioner. Hvert enkelt "grid"-inddeling kan praktisk tage vælges som målepunkt hvormed det er vigtigt at finde et korrekt strategisk placeret målepunkt. Der er som udgangspunkt valgt to placeringer som går igennem for alle konstruktions simuleringerne i 1D. Målepunktet 10mm fra udvendig tegl overflade, samt 5 mm fra indvendig puds overflade. Graferne for disse simuleringer ses i bilag 2.1 - 2.9.

Målepunkt i tegl. 10 mm fra udvendig overflade

Første placering er valgt ca. 10mm inde i murværket fra udvendig overflade. Denne placering er valgt ud fra et ønske om at kunne analysere den yderste del af teglens fugtindhold, samt vise om der er en forskel i fugtniveauet i den yderste del af teglen når der efterisoleres med de forskellige materialer. Disse grafer skulle gerne skabe et overblik over teglens øgede risiko for frostsprængninger ved højere vandindhold, samt en stigende risiko for fryse/tø- cyklusser. Temperatur og relativ luftfugtighed er målt 10mm inde i murværket i et specifikt målepunkt udpeget i en enkelt specifik grid-celle. Det absolutte fugtindhold bliver derimod vist for hvert enkeltmateriale gennem hele simuleringsperioden. Fugtindholdet som beregnes i kg/m^3 eller i vægt%, er altså beregnet på hele enkeltmaterialet og ikke kun en enkelt grid-celle. Af denne årsag er der valgt at opdele selve teglydervæggen i to ens enkeltstående materialer på hhv. 1 cm og 34 cm, således at der måles vandindhold på hele enkeltmaterialet for den yderste 1 cm tegl.

Hvis man ser på et vinterhalvår fra 1. oktober til 1. april, og sammenligner to nordvendte facader med og uden isolering, ses at der er en lille forskel i fugtophobningen i de yderste 10mm tegl. På fig. 13 + 14 ses denne mindre forskel i fugtophobning, når der efterisoleres. RF hæves med ca.

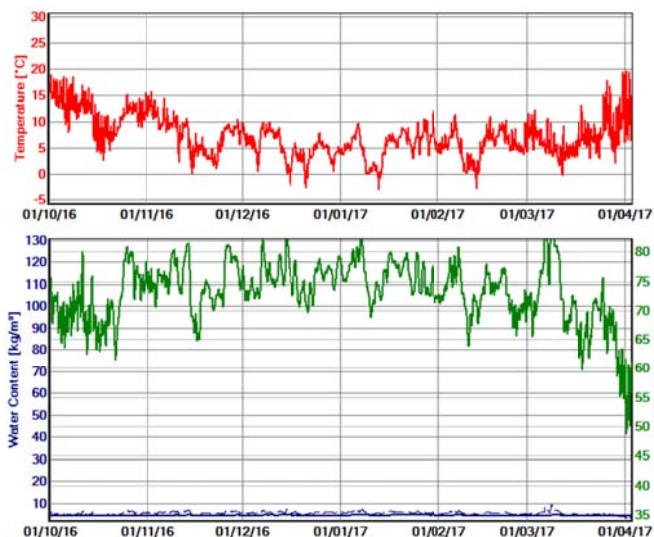


Fig. 13: Temperatur og fugtforhold for eksist. murværk_N_10 mm fra udv. overfladen om vinteren.

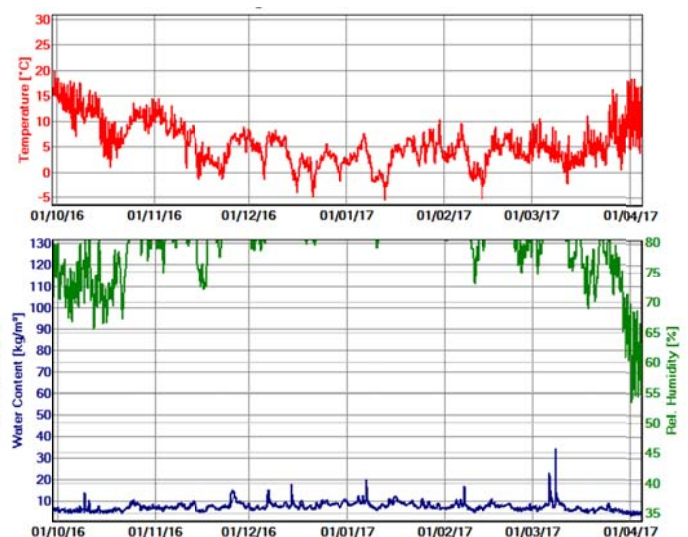


Fig. 14: Temperatur og fugtforhold for (Kal.)200_N_10 mm fra udv. overflade om vinteren.

5% i gennemsnit, da murværket samtidigt er en smule koldere.

Da nordfacaden har en væsentlig mindre regnpåvirkning end Syd, kan denne forskel på de to ovennævnte figurer antages at være en minimumsforskel i dette punkt yderst i teglvæggen. Den forskel mellem fig. 13 og 14 for temperatur og RF, er altså pga. den ny opsatte isoleringsvæg.

Målepunkt 5mm inde i puds fra indvendig overflade

Søger vi længere ind i konstruktionen og måler fugt og temperaturforhold for den eksisterende gamle puds ses nogle meget varierende grafer henover bilag 2.1 - 2.8. Overordnet set ses en markant forskel i dette målepunkt for pudsen før og efter efterisolering, samt stor regnpåvirkning på den pågældende facade orientering. Fig. 15 + 16 viser simuleringer for de to facadeorienteringer med fenolskumpladen.

Pudsen på det eksisterende murværk har en god og fornuftig variation i fugtligevægt. RF ligger mellem 50 % – 60 % og temperaturen svinger mellem ca. 17 °C – 24 °C. Der ses ingen hygrotermiske problemstillinger for den indvendige puds. Heller ikke den skiftende orientering og slagregenspåvirkning, gør nogen synderlig forskel ved pudsen.

Når der efterisoleres med (kal.)200, ses en RF mod nord som nu variere mellem 75 % - 90 %, samt en temperatur variation mellem ca. 5 °C – 24 °C. Pudslaget bliver væsentligt koldere langt størstedelen af året end tidligere. RF mod syd varierer fra 81% - 92% henover perioden. Derudover ses også hvordan vandindholdet i hele pudslaget har en mindre stigning de første 5 år, hvor der herefter ses en ligevægtstilstand hvor fugtindholdet i pudsen for hvert år når op på ca. 21 kg/m³. Dette er dog kun gældende mod syd hvor vi har den store regnintensitet.

Ved simuleringerne for (skum/gips)120 for målepunktet i pudsen, ses til dels et lidt værre billede, for mængden af fugt i pudslaget. Mod nord ses en variation for RF mellem 80 % - 85 %, med en svag fugtophobning som herefter når en fugtligevægt og forbliver i dette leje henover året (fig. 15). På samme vis som for (kal.)200, varierer temperaturen mellem ca. 5 °C – 24 °C og skaber en væsentligt koldere formur.

Kigger vi mod syd-orienteringen, ses en meget stor fugtophobning hvor RF hurtigt kommer op

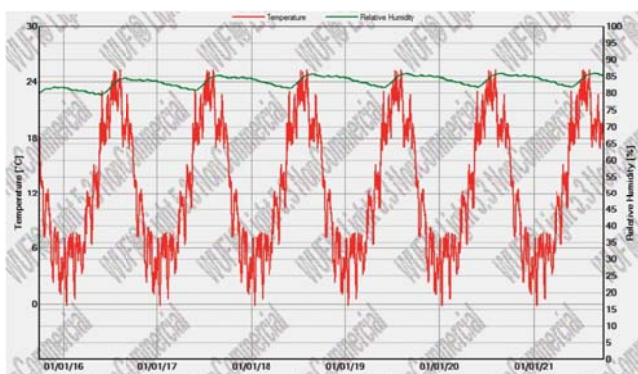


Fig. 15: 6 års simulering af (skum/gips)120_Nord indvendig puds

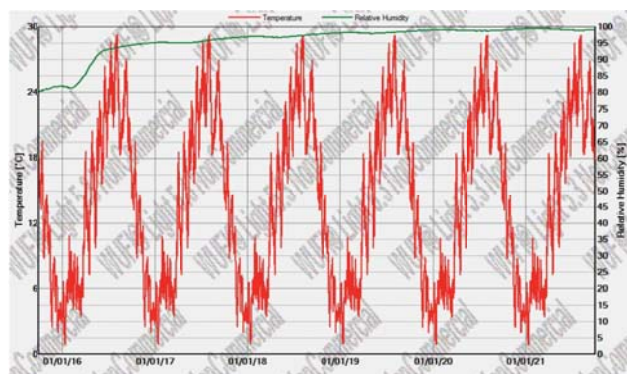


Fig. 16: 6 års simulering af (skum/gips)120_Syd indvendig puds

og ligge mellem 96% - 99% (fig 16). Her ses en stigende fugtophobning for hvert år der går, hvilket indikerer at pudslaget ikke når at tørre tilstrækkeligt ud, til at komme i ligevægt de første 6 år. Konstruktionen er yderligere simuleret for en 20 årig periode hvor det ses at vandindholdet i pudslaget stiger til ca. 118 kg/m³ og først når en ligevægtstilstand efter 8 år. Den type indvendig puds som anvendes for simuleringerne har en sorptionskurve som vist i bilag 4.2. For pudsens sorptionskurve ses at der ved dette høje vandindhold er en meget høj RF, hvorfor der her vil foregå en kappilarsugning.

4.3. Resultater for WUFI simuleringer i 2D

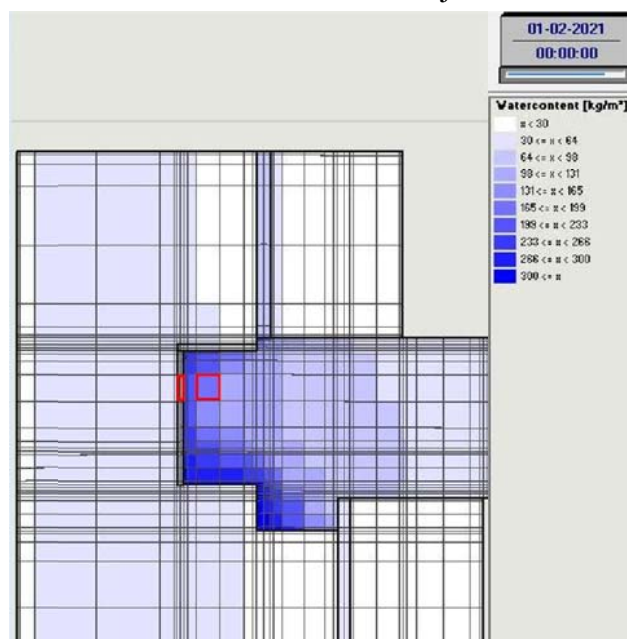
Simuleringerne i 2D er udført for at kunne analysere det kritiske knudepunkt hvor etageadskillelsen hviler af på det massive murværk. Her dannes en konstruktiv kuldebro hvor den varme fugtige indeluft trænger ud og påvirker bjælkeenden.

Detaljesamlingen er modelleret op i WUFI således at der fremgår en 15 mm luftspalte for enden af bjælkeende samt henover bjælken. Denne mindre luftspalte ses ofte indbygget omkring træbjælkeender da træ har tendens til at udvide sig om sommeren og tilsvarende svinde ind om vinteren, pga. svingninger i træets vandindhold. Der vil altså fremkomme stillestående luft omkring træbjælkeenden.

Samplingsdetaljen er snittet lige midt i træbjælken, i overgangen mellem den øvre 1,5 stens murværk og den nedre 2 stens murværk. De tværgående træbjælker forventes at hvile af på en rem (se bilag 3.1 – 3.8).

For alle simuleringerne med detaljesamlinger er der udtaget 2 væsentlige målepunkter, til at indikere de hygrotermiske forhold i samlingen. Det ene målepunkt er foretaget i luftspalten for enden af bjælkeenden. Det andet målepunkt foretages i træbjælkeendens yderste øvre del, dog ikke i det mest kritiske punkt da vandindholdet her kan forekomme urealistisk højt. For sammenligneligheden mellem de forskellige isoleringsløsninger, kommer det ikke så nøje hvor i træbjælken der måles fra, så længe det er samme punkt i alle simuleringerne (fig. 17).

Fig. 17: Grafisk fremstilling af vandindholdet i knudepunktet for (kal.)200. d. 1. feb 2021. Målepunkter markeret med rød. Der ses stor fugtophobning i bjælkeenden



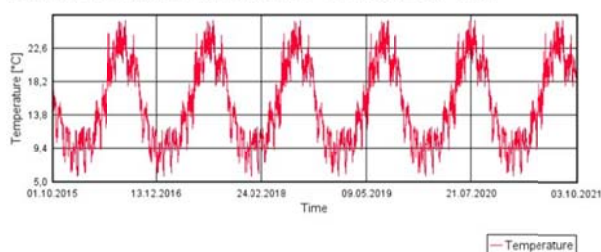
Målepunkt i bjælkeende for nordlig orientering

Forsiden af alle bilag 3'erne, viser vandindholdet, den relative luftfugtighed samt temperaturen for d. 1. februar 2021 ved midnats tid. Dette tidspunkt har en udendørs RF på 85% ved 1 °C, og måles ca. 5,5 år inde i den totale simuleringsperiode. Den grafiske fremstilling på bilagsforsiderne danner et hurtigt overblik over opfugtningen i materialerne, samt temperaturfaldet. Figurerne viser her en farverindikation for hvordan eksempelvis vanddampindholdet vil fordele sig i materialerne, hvor det tydeligt ses at træmaterialet er væsentligt mere opfugtet end teglen (se fig. 17). Porerne i træet kan indeholde væsentligt mere vanddamp end teglen kan ved samme RF, da træet både har mange grove pore samt et utal af fine pore i cellernes vægge. Sorptionskurverne vidner om at der sagtens kan være stor fugtforskel i de forskellige materialer og samtidig være fugtligevægt i det pågældende materiale. Træets store poreoverflade har altså en større overflade end teglen hvor fugten kan binde sig, dermed ses også et højere vandindhold i træet, markeret med blå på bilagsforsiderne.

For bilag 3.1, som viser det eksisterende murværk uden isolering, ses følgende forhold i luftspalten mellem bjælkeende og murværk. Figur 18 viser at temperaturen svinger mellem ca. 9 °C – 24 °C. RF svinger mellem 82% - 86% og er en lille smule aftagende for hvert år der går. Selve træbjælken har et vanddampindhold der svinger mellem ca. 77 kg/m³ - 79 kg/m³, og er samtidigt også dalende. Vandindholdet for træet kommer højest op på 19 %.

Når der isoleres med (kal.)200 (bilag 3.3), ændres temperaturen i luftspalten, som vil variere mellem ca. 4 °C – 24 °C henover året. Der bliver derved en smule koldere i bjælkeenden ved denne type isolering, end den temperatur på ca. 7 °C som først var antaget ved fig. 3 (s.16). RF stiger de først 6 år til der nås en ligevægtstilstand for materialerne hvor luftenspaltes RF stiger fra ca. 94 % - 97 %RF henover året (fig. 19). Denne høje relative luftfugtighed resulterer i at bjælkeenden når et vanddampindhold i træet omkring +25 %, der forventes først fugtligevægt

Tempeartur mellem mur og bjælkeende - Eksis. murværk - Nord



Relativ fugtighed mellem mur og bjælkeende - Eksis. murværk - Nord

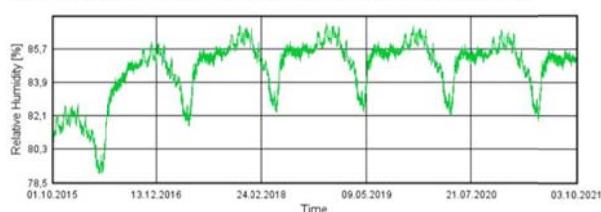
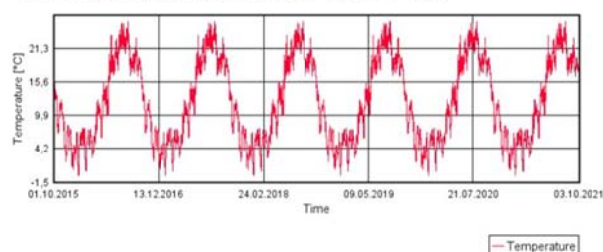


Fig. 18: Temp./RF i luftspalte ved bjælkeende, se bilag 3.1

Temperatur mellem mur og bjælkeende - (Kal.)200 - nord



Relativ fugtighed mellem mur og bjælkeende - (Kal.)200 - nord

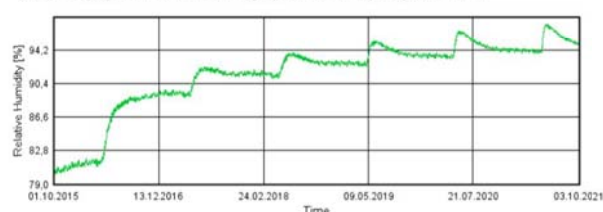


Fig. 19: Temp./RF i luftspalte ved bjælkeende, se bilag 3.3

efter mange år.

Ved isolering med (skum/gips)₁₂₀ mod den nordlige orientering, ses næsten den samme temperatur variation på ca. 4 °C – 24 °C henover året. Dette stemmer godt overens med at de to efterisoleringsmetoder giver omtrent den samme U-værdi for ydervæggen. På tidligere nævnte bilag 1.3 og 1.5 er U-værdierne beregnet for (kal.)₂₀₀ = 0,17 W/m²K og (skum/gips)₁₂₀ = 0,18 W/m²K.

RF for luftspalten ligger en lille smule højere og varierer mellem 95% - 98% og vil i bjælkeenden nå op på et vanddampindhold i træet på ca. +26 %. Kurven flader ud over årene i takt med træets sorptionskurve, men der vil stadig foregå en lidt større fugtophobning end udtørring for hvert år der går.

Bilag 3.5 viser en simulering for efterisolering med 50 mm kalciumpulver (kal.)₅₀ for nordfacaden. Her isoleres med ¼-del af den tidligere isoleringstykkelse som skaber en samlet U-værdi for ydervæggen på 0,55 W/m²K. Temperaturen for luftspalten varierer mellem ca. 6 °C – 24 °C, hvormed der opnås en RF mellem 91 % - 93 %. Vanddampindholdet i træbjælkeende kommer efter 6 år op på ca. 22 % og vil fortsat stige. Selv med denne mindre isoleringsevne vil der kunne opnås en kritisk fugtligevægt i bjælkeenden mod nord.

Målepunkt i bjælkeende for sydlig orientering

Bilagene for den sydlige orientering er noget voldsommere i udsvingene for vanddamp, RF og temperatur. Dette skyldes at denne orientering som tidligere nævnt er den hårdest belastede orientering af disse to, hvad angår solindstråling og slagregn. Bilag 3.2, 3.4, 3.6, og 3.8, viser grafer for denne orientering.

Ved simuleringen for det eksisterende massive murværk *uden* indvendig isolering ses nogle høje hygrotermiske værdier ud fra graferne.

Temperaturen i luftspalten mellem bjælke og murværk varierer mellem ca. 9 °C – 27 °C henover året, hvilket er magen til for den nordlige orientering. RF er derimod svingende mellem 96 % - 98 % i luftspalten efter 2 år, og der ses at være et stigende vanddampindhold i selve træbjælkeenden som når op til +27 %, i vægt%. Efter 6 år er der ophobet sig ca. 113 kg/m³ vanddamp op i de sydlige bjælkeender, hvilket er ca. 46 % mere end for de nordlige bjælkeender på 77 kg/m³. Dette skyldes hovedsageligt klimadatasættet, hvor der er væsentlig større vandpåvirkning i form af slagregn på den sydlige orientering. Dette er udgangspunktet for den sydlige facadevæg inden der efterisoleres.

Ved isolering med (kal.)₂₀₀, varierer temperatur i luftspalten mellem ca. 4 °C – 27 °C henover året. Der opnås højere temperaturer om sommeren på sydfacaden end for norfacaden.

RF i luftspalten stiger hurtigt og har en jævn fugtophobning indtil der nås en ligevægt på

omkring 98 % - 99 % RF. Også vandindholdet i bjælkeenden er markant stigende og når op til +43 i vægt% for træbjælken.

Samme tendens gør sig gældende for (skum/gips)120 isoleringen på den sydlige orientering, hvor temperaturen i luftspalten ligger mellem 4 °C – 27 °C. RF når samme højder som tidligere på over 98 % - 99 %, og der ses en stigende fugtophobning i bjælkeenden på helt op til 50 % vandindhold i bjælken svarende til 210 kg/m³ vanddamp.

Isoleringen med (skum/gips)120 på den sydlige orientering skaber klart den værste fugtophobning i bjælkeenden, når man sammenligner alle simuleringerne.

Opsummering af resultater

Af resultaterne ses det samlet set at det eksisterende murværk holdes væsentligt koldere når der efterisoleres indvendigt. For begge isoleringsløsninger daler den eksisterende puds i temperatur med ca. 12 °C, og bjælkeenden falder med ca. 5 °C om vinteren. Med dette drastiske temperaturfald stiger den relative luftfugtighed, på både den gamle pudsoverflade, samt i detaljeovergangen. For pudsoverfladen mellem eksist. væg og ny isolering varierer RF mellem ca. 80 % - 90 %, afhængig af isoleringstypen og orienteringen. I luftspalten ud for bjælkeenden varierer RF imellem ca. 94 % - 99 %. RF er generelt stødt stigende og vil fremme en fugtophobning henover årene når der efterisoleres (se fig. 20).

Der er stor forskel i de to orienteringer, hvor det ses at udeklimaet skaber stor betydning for opfugtningen af murværket, samt ved de kritiske overgange mellem materialerne.

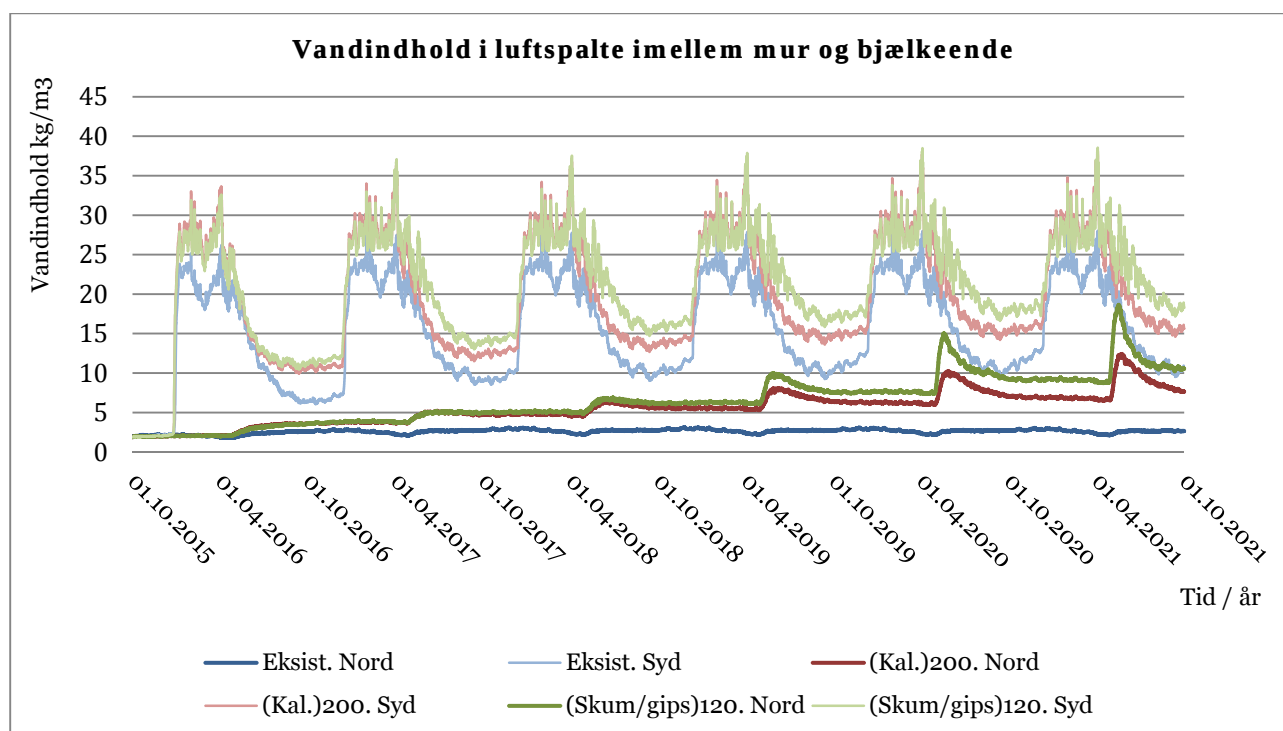


Fig. 20: Der ses stigende vandindhold i overgangen mellem mur og bjælkeende, varierende af isolering og orientering

5. Diskussion

Alle de mange målinger og resultater der er fundet ved bilagene, vidner om at der altid vil kunne findes en forøgelse i fugtindholdet i forskellige steder i murværket, når der efterisoleres indvendigt. Det eksisterende murværk bliver koldere, hvormed luftfugtigheden i den fugt der transporteres igennem konstruktionen forøges. Har man altså et murværk som allerede ved udgangspunktet er alt for opfugtet skal man kritisk genoverveje om indvendig efterisolering er en god ide. I sådanne tilfælde er det muligvis bedre at kompensere for sit varmetab igennem klimaskærmen andetsteds i bygningen. Byg-Erfa beskriver i deres erfaringsblad således:

...Indvendig efterisolering frarådes normalt, da metoden indebærer stor risiko for fugtophobning og skimmelvækst på den eksisterende ydervægs inderside. Hvis det i særlige tilfælde er den eneste mulighed, skal det fx sikres, at murværket er egnet til indvendig efterisolering. (BYG-ERFA. 2009).

At murværket er egnet til indvendig efterisolering, kan være uhyre vanskeligt at analysere og vide sig 100% sikker på. Nogle gange går det godt uden at man med sikkerhed ved hvorfor. Andre gange kan man kortlægge samtlige af sine risikoparametre og alligevel ende op med et fugtproblem forskellige steder i murværket, som i sidste ende skader murværket mere og fremmer en materialenedbrydende effekt.

5.1. Stationære resultater ved Glaser metoden

De resultater der er beregnet ved Glaser metoden er som udgangspunkt alt for simple i sit beregningsgrundlag til at kunne give et fyldestgørende billede af de hygrotermiske påvirkninger. Vi ser at der er meget høje værdier af relativ luftfugtighed som for nogle konstruktioner vil kondensere mellem den nye og den gamle væg, mens den årlige fugtophobning samt tidspunktet for fugtligevægt ikke kan fremskaffes. Vi ser blot at konstruktionen har et fugtproblem imellem sine materialelag. For mange rådgivere vil denne oplysning måske også være tilstrækkelig grundlag for at træffe sin beslutning om indvendig efterisolering.

Problemet ved Glaser metoden kan opstå i det tilfælde hvor man kunne være tilbøjelig til, kun lige akkurat, at sikre en fugtrobust konstruktion. I sådanne tilfælde kan metoden ikke forudse fugtændringer skabt af det skiftende udeklima, eller problemstillingerne omkring samlingsdetaljer.

Da beregningsmetoden er bygget op omkring damptryksfald igennem en konstruktion, fås nogle gode indikationer for hvor højt RF ligger i de forskellige lag.

Det første fokuspunkt er for denne metode at skabe et damptryk for lag og overflader som ligger

under 75 - 80 % RF. Denne fugtighedsgrænse er en af flere vækstbetingelser for om der er risiko for begroning af skimmelsvamp. En af de sikreste måder at undgå skimmelsvamp vil derved være at have en tilpas lav RF for visse materialelag. Ikke alle materialer er dog lige fugtfølsomme ved fugtigheder over 75% RF, hvorfor nogle materialer godt kan tåle at have en højere fugtpåvirkning i visse perioder. Ofte vil der henover året foregå en udtørring af konstruktionen hvormed RF vil dale igen, til under den kritiske skimmelgrænse. Vurderingen for om et materialelag er fugtrobust eller ej må derved også indeholde tiden hvormed der sker en opfugtning af materialet, samt om selve materialet her kan tåle at blive opfugtet.

5.2. Betingelser for skimmelsvampevækst

Det kan for mange mennesker være sundhedsskadeligt at opholde sig i sin bolig, hvor der er udbrud af skimmelsvampe. Hvad enten denne skimmelbegrøning optræder på den indvendige vægoverflade eller bagved en forsatsvæg, kan skimmelsvampen frigive lugtgener og fremme et utal af forskellige sygdomme. Disse symptomer kan være hovedpine, koncentrationsbesvær, svimmelhed, lugtgener, astma og allergi mm., der er altså risiko for at indeklimaet gør én syg. Skimmelsvamp og mugbegrøning på den indvendige overflade er en indikation på at der er for høj fugtighed på overfladen. Selv skimmelsvampeangreb inde i en forsatsvægge kan have indflydelse på indeklimaet, idet svampen frigiver sporer og fragmenter der kan passere igennem utætheder, for eksempel ved stikkontakter eller etageadskillelser. Desuden kan muglugt fra svampene trænge igennem væggen og i høj grad påvirke opfattelsen af et usundt indeklima. Alt dette er med til at forværre brugerens indeklima og velvære og resultere i sygdom for den enkelte. Det er dog meget forskelligt hvordan mennesker reagerer på de stoffer som bliver udviklet ved skimmelsvampe begroningen. Nogle mennesker reagerer voldsommere end andre, hvormed det kan være svært at bestemme hvor vidt ens helbred er påvirket af et skimmelsvampeangreb eller måske noget helt andet. (Gravesen, 2002).

For at der skal være de mest optimale vækstbetingelser for skimmelbegrøning, skal der optræde et fugtigt klima, på over 75% RF, ved temperaturer på mellem 25 - 30 °C. Temperaturer udenfor dette spænd vil mindske vækstbetingelserne og helt ophøre ved 0 °C. Denne 75% RF grænse er gældende for træbaserede organiske materialer og stiger ved andre materialer som eksempelvis puds. Skimmelvækst kan altså godt forekomme på de uorganiske materialer, dog ved højere RF. Der skal blot være næringsstoffer til stede, gerne af organisk materiale, hvor selv forurening og smuds vil være nok til at der sker en skimmelvækst. Disse tre betingelser skal være til stede henover en vis tidsperiode. Dette kan være alt fra få dage til flere uger, alt afhængigt af typen af skimmelsvamp og de øvrige parametre. Svampesporerne vil blive ved med at brede sig indtil der vil opstå en udtørningsproces. Har man først haft en skimmelbegrøning en gang, kan man godt

forvente at det kommer igen året efter på samme årstid, indtil der foretages et decideret indgreb hvor skimmelsvampen afrensnes og de hygrotermiske parametre for væggen ændres.

5.3. Risiko for kondens og skimmelvækst mellem puds og isolering

For endeligt at kunne kortlægge risikoen for en skimmelbegroning skal de tidligere nævnte vækstbetingelser være til stede. Næringsstoffer i overfladen for det enkelte materiale er en af disse betingelser. Forskning og laboratorieforsøg viser at der er forskel på skimmelvækstbegroningen på organiske og for uorganiske materialers overflader. Der er større risiko for vækst på overflader af organisk materiale. (Kessel, 2013, s. 101) viser med fig. 21 og 22 denne forskel, hvormed grænsen for den lavest tænkelige risiko for skimmelvækst, er anvist på overflader af uorganiske materialer på 80 %RF ved 20 °C. Dette skaber en god indikation for risikoen i pudslaget som er et uorganisk materiale.

Figurerne er baseret på begroningen på den indvendige vægoverflade, hvor de mikroskopiske luftbårne bakterier og partikler i indeluften spredes. Ved koncentration af de naturligt forekommende mikroorganismer i luften, kan sådanne gunstige forhold danne skimmelsvampesporer, som spreder skadelige stoffer ud i indeklimaet.

Langt det meste forskning omkring skimmelsvamp er baseret på begroningen på den indvendige vægoverflade, og altså ikke imellem to materialelag, hvor der ikke vil være nær så meget forurenset luft til stede. Man må dog forvente at mindre luftlommer mellem den gamle og nye væg, potentielt set kan skabe grobund for skimmeludbredelse når de øvrige vækstforhold er til stede.

Erfaringer fra indvendig isolering med traditionel opbygning af træskelet med dampspærre, mineraluld og gips, ses at der ofte dannes skimmel på den tidligere indvendige overflade. Her vil ofte optræde luftlommer imellem pudsoverfladen og den sammentrykte isolering. God grobund for at skimmelsvampen kan etablere sig på overfladen mellem lagene, selv når isoleringsmaterialet støder helt op imod den eksisterende væg.

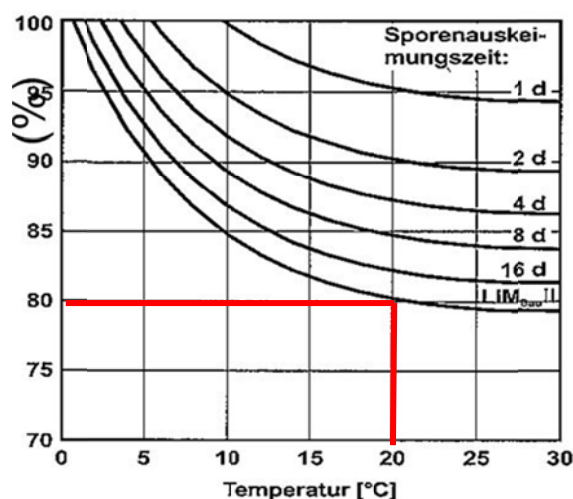


Fig. 21: Vækstbetingelser for skimmel på uorganisk materiale eksempelvis puds.

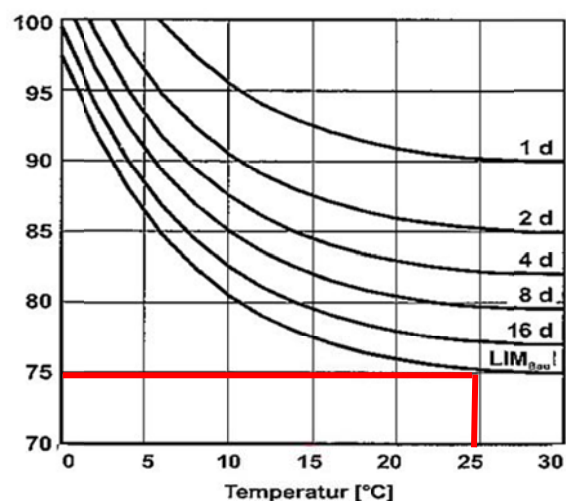


Fig. 22: Vækstbetingelser for skimmel på organisk materiale eksempelvis træ og tapet.

Kalciumcilikat byggestenene vil normalvist blive fuldklæbet eller limet til den gamle pudsede overflade, for at skabe den kapillaraktive effekt. Her vil der formentlig ikke være luftlommer til stede i mellemrummet. Der vil formentlig ikke være særlig stor risiko hvis overhovedet nogen risiko for skimmelbegroning imellem lagene, da der ikke på samme måde er nogle luftlommer hvor skimmelsvampen kan gro. Den fugtig og mættet vanddamp som måtte drive med damptrykket igennem materialegene, vil transporteres ved kappilartransport ud til den indvendige overflade og fordampe.

Den fenolbaserede byggeplade vil derimod ofte blive monteret med en klæbemørtel punktvis på bagsiden af pladen og vil hermed formodentlig indkapsle luft imellem lagene. Der vil antageligt være større risiko for vækst i luftlommerne bag pladen, da det er i de yderste lag at skimmelsvampene gror. I overgangen mellem de nye og gamle lag, er der her af og til luftrum med mulig kontamineret luft, hvor der vil være plads til skimmelbegroning ved for høj RF.

I resultatafsnittet så vi for den nordlige orientering at (kal.)200 havde en tendens til at skabe en lidt større opfugtning i pudslaget end (skum/gips)120 for samme orientering (bilag 2.3 og bilag 2.7). Overgangen mellem puds og isolering varierer henover et år, mellem 75 % - 90 %RF for (kal.)200 og mellem 80 % - 85 % RF for (skum/gips)120. Der opnås altså højere fugtindhold for den kapillaraktive (kal.)200 om vinteren, end for den færdige fenolbyggeplade (skum/gips)120, men samtidigt tørrer kalciumsilikaten mere ud om sommeren da denne er kappilaraktiv. Begge isoleringsmaterialer skaber et fugtindhold på pudsoverfladen som periodevis når over 80%RF, hvormed der iht. fig. 21, vil forekomme fare for begroning af skimmelsvamp imellem lagene.

Som tidligere nævnt er temperaturen for overfladen også en parameter for om der kan gro skimmelsvamp på overfladen. 25 - 30 °C er de mest gunstige betingelser herfor.

Fig. 23 + 24 viser en hygrotermiske simulering på halvanden måned i sommerhalvåret, hvor der

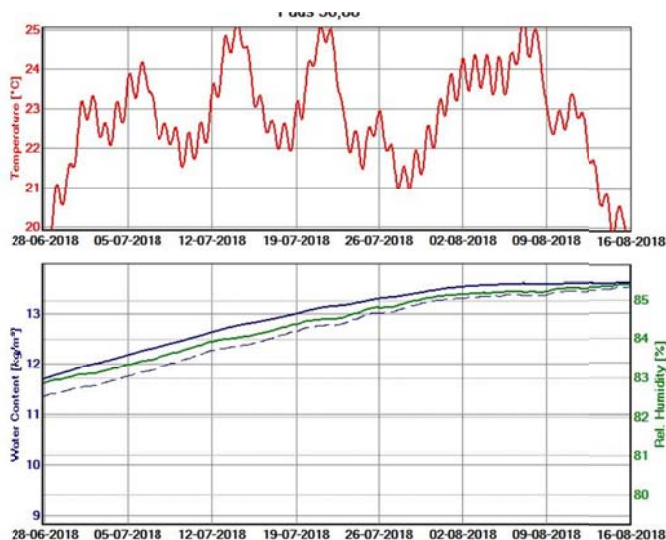


Fig. 23: (skum/gips)120_N_ overgang imellem eksist. puds og ny isolering.

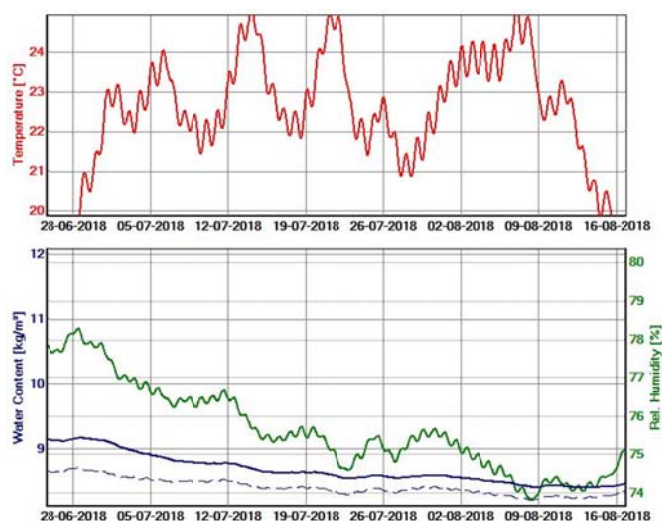


Fig. 24: (kal.)200_N_ overgang imellem eksist. puds og ny isolering.

opstår over 20 °C for den pudsede overflade med de to isoleringsmuligheder. Der er simuleret for den nordlig orientering, som har lavest regnpåvirkning fra udeklimaet.

Her ses det at (skum/gips)₁₂₀, ligger i risikozonen for at danne skimmelsvamp da RF i denne periode stiger fra ca. 83 % - 85 % RF. Fenolskumpladen har tendes til at opfugte pudslaget om sommeren og kun udtørre en lille smule om efteråret/vinteren. Dette skyldes det svagt indadgående drivtryk, som vil trænge fugten ind i konstruktionen ved sommerkondens og danne en mindre fugtophobning på den *udvendige* side af alufolien, altså midt inde i isoleringen. Fugtniveauet ligger rimelig stabilt med en lille variation pga. denne manglende udtørring om sommeren. Der vil altså forekomme en relativ fugtighed på over 80 % RF henover halvanden måned med en temperatur på over 20 °C, her vil kunne dannes skimmel på den uorganiske pudsoverflade jf. figur 21.

For isolering med (kal.)₂₀₀, vil der for samme periode forgå en udtørring af materialet om sommeren, hvormed der se en dalende RF fra 78 % - 75 %. Fugtindholdet i pudsoverfladen ligger altså under grænsen for skimmelvækst på uorganiske materialer. Det kapillaraktive materiale har en mere fornuftig udtørningspotentiale igennem sig i de varme måneder.

Denne fine udtørring for (kal.)₂₀₀ skyldes at der ikke er noget materialelag som kan risikere at ophobe fugt inde i kalciumsilikaten. Den vanddamp som vandrer i gennem materialets porer kan fordampe på den indvendige vægoverflade og vil ikke blive ophobet i materialet. For at denne udtørring igennem den åbne overflade kan ske, er det yderst vigtigt at foretage en korrekt malerbehandling af sine indvendige vægoverflader. Malerbehandlingen skal være med en diffusionsåben silikatmaling som sikrer vægens "åndbarhed" og evne til at afgive fugt. Denne er ofte påført på en ny pudset overflade jf. den pågældende producent. Det er vigtigt ikke at tætnes den indvendige overflade med en almindelig plastik maling som vil risikere at dæmme op for fugtophobningen og mindske udtørringen. Der anbefales altid en diffusionsåben silikatmaling til den indvendige overflade, dette skal man som bruger være meget opmærksom på ved fremtidige malingslag.

Nogle producenter af kalciumsilikatplader promoverer sig på at der ikke er nogen skimmelrisiko mellem materialelagene, da der opstår kapillarsugning i isoleringen, som sikrer udtørring om sommeren.

Der må hermed forventes, for den nordlige facade, at være størst risiko for begroning af skimmelsvamp på den eksisterende vægoverflade, som isoleres med fenolskumpladen. Her skabes varme og fugtige vilkår for skimmelsvampen, for en gunstig begroning. Her er formentlig også mere plads til at skimmel kan vokse og brede sig, pga. luftlommer som indkapsles.

Det er altid væsentligt at afrense sin væg fuldkommen for eventuelle rester af maling, tapet eller andet organisk materiale på den indvendige overflade, inden man sætter indvendig isolering op. Dette gælder for en hvilken som helst indvendig isoleringsløsning som vælges, hvad enten det er

med eller uden dampspærre. Selvom den eksisterende væg er afrenset, vil der alligevel kunne opstå risiko for skimmel på den uorganiske overflade.

Når der ses en risiko på skimmel mellem lagene for den nordlige orientering, må man forvente at der også er en langt større risiko på den sydlige orientering.

Kondensering for sydlig orientering grundet udvendig vandpåvirkning

Vi ser på bilag 2.8 hvorledes der i overgangen mellem den eksisterende puds og fenolskumpladen for den sydlige orientering vil skabe en jævn stigende fugtphobning helt indtil der her nås mætningspunktet og der vil ske en kondensering af vanddampen. Denne kondensation af vanddampen foregår som tidligere nævnt ved 100% RF, hvor dampen vil fortætte og blive til dråber af vand på overfladen. Da der er risiko for luftlommer bag ved fenolskumpladen kan man forestille sig hvorledes dette vand vil kunne løbe langs væggene og helt ned på etageadskillelsen hvor vandet vil bidrage til opfugtningen af bjælkeenderne. Det ses altså for den sydlige orientering, at væggen med (skum/gips)120 ikke vil have mulighed for at tørre ud henover året, men gradvist opfugte pudslaget mere og mere.

Den indadgående udtørring, som sker ved (kal.)200 er ikke til stede ved (skum/gips)120 på grund af alufolien, hvorfor der altså vil ske en fugtphobning i fenolskumpladen for den sydlige orientering.

Når man sammenligner det totale vandindhold (Total water content) på bilag 2.2, 2.4 og 2.8, for de tre facader med den sydlige orientering, ses fugtindholdet for hver af væggene (fig. 25 a, b, c). Ydervæggen bliver mere fugtig ved begge isoleringsløsninger end den eksisterende var, dog sker der en årlig udtørring for (kal.)200 som ikke kommer til at ske for (skum/gips)120. Grafen for fig.25 (C) viser hvorledes fugten hober sig op for hvert år der går.

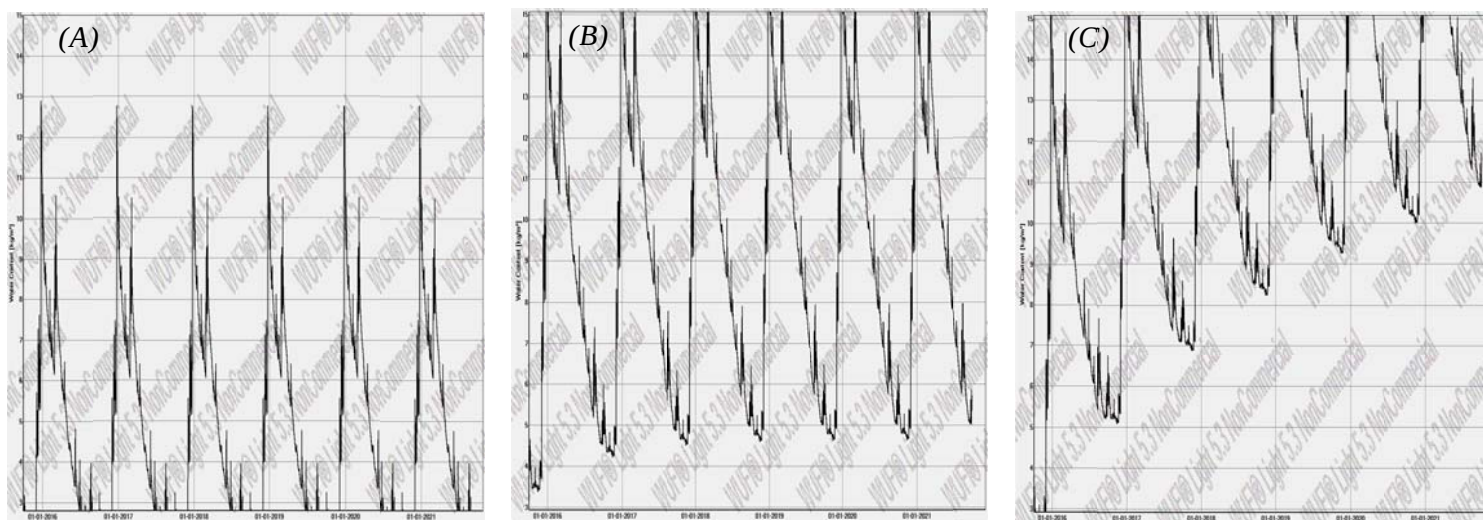


Fig. 25: Totalt vandindhold for hele ydervæggen, orientering mod Syd. (A)Eksist. væg. (B) (kal.)200. (C) (skum/gips)120

Umiddelbart ses det altså *ikke* som en fordel at have dette dampbremsende lag inde i fenolbyggepladen, da dette er med til at ophobe fugten bagved alufolien og øge vandindholdet for pudsen og for resten af ydervæggen.

Heraf kan udeledes at den indadgående udtørring udgør en væsentlig forskel for den samlede vægs vandindhold. Dette giver endnu engang anledning til at tro at det er regn intensiteten på den udvendige facade som har en langt større vigtighed for væggenes samlede fugtindhold, end den indefra kommende rumluft som diffunderer ud igennem klimaskærmen.

Den indefra kommende fugtbelastning er med til at hæve fugtniveauet for ydervæggen, men har altså ikke lige så stor betydning for fugtbalancen i selve væggen. Man kan med rette sige at den vanddamp som diffunderer ud igennem klimaskærmen ikke udgør en lige så kritisk fugtparameter som den vandmængde som optages igennem kappilarsugning.

Det stærkt dampbremsende lag af alufolien, som er indsat i fenolskumpladen, kunne godt se ud til at hæve den samlede fugt akkumulering i ydervæggen, da fugten ”spærres inde” i isoleringen. Hertil ses at denne fugt akkumulering for ydervæggen falder når der er adgang for indadgående udtørring af væggen.

Denne samme konstatering ses i forskning af de hygrotermiske egenskaber med opsætning af VIP (Vacuum insulated panels) som indvendig isolering (Johansson, 2013).

Kappilaraktivitet gennem eksisterende teglsten

Tidligere studier viser at typen af tegl og mørtel for den eksisterende teglstensvæg, kan have stor betydning for vandoptaget i væggen. Murværk af nyere mursten er mindre kappilaraktive end gamle historiske håndformede teglsten og der vil derfor gå længere tid før murstenene er mættet med fugt. De gamle historiske teglsten bidrager til en hurtigere opfugtning gennem de grove porer i stenen, som samtidig ikke har så høj en stighøjde. Kappilarsugning vil her forekomme hurtigt da fugten i porerne mættes hurtigere end for nyere teglsten.

Det er væsentligt at være opmærksom på den pågældendes murstens egenskaber for fugtabsorption ved kappilarsugning når et murværk skal godkendes egnet til indvendig efterisolering. Der kan være op til 6 gange så stor en forskel på hvor hurtigt den pågældende teglsten optager vand ved kappilar absorption, for historiske gamle teglsten modsat mursten af nyere dato (Johansson, 2013). Porerne i de gamle historiske teglsten bliver altså hurtigere vandfyldte og hæver dermed den relative fugtighed inde ved det isolerende materiale.

Porernes betydning for kappilarsugning

Materialets poresdiameter og stighøjde er afgørende for hvorledes materialet vil transportere vandet/fugten videre igennem sig ved kappilarsugning. Teglsten har grove porer med en stor

porediameter som resulterer i en lav stighøjde. Teglstenens porer fyldes dermed relativt hurtigt med vand, men trænger ikke så langt ind i materialet. Når porediameteren falder i materialer med fine porer, forøges stighøjden og vandet kan trænge længere ind i materialet ved kapillarsugning. Dette sker dog langsommere i de små fine porer da strømningsmodstanden er større for disse fine porer. Når der mellem forskellige materialer sker en forskel mellem fine og grove porer, skabes der den fornødne tiltrækningskraft ved undertryk når vandindholdet forhøjes, som sikrer at der sker en kapillaraktivitet igennem materialerne. Der vil normalt ske en kapillaraktivitet ved en relativ luftfugtighed på over 95 %RF i materialet.

Materialer med høj porøsitet og lav kapillarsugnings koefficient (liquid water coefficient) indeholder fine porer, som vil suge vandet fra materialer med grove porer. Kalciumsilikaten vil dermed suge vandet kapillært fra både puds og teglstenen. Det er hele denne egenskab som udnyttes til indvendig udtørring af væggen. I tabel 2 er anvist nogle af de materiale parametre som udnyttes ved kapillar sugning, for de materialer som er simuleret for, under resultater. Det ses at kalciumsilikaten har rigtig mange fine porer til at fremme materialets optimale egenskaber for kapillarsugning. Dernæst bliver porerne gradvist grovere for hhv. puds og teglsten. Man vil sandsynligvis få den bedste udnyttelse af kapillarsugning, og indadgående udtørring, hvis man helt fjerner det eksisterende indvendige pudslag. Der vil da være større forskel mellem porerne som vil styrke adhæensionskræfterne mellem materiale og vand, og skabe en bedre kapillarsugning. Dette har dog ikke været et fokuspunkt i nærværende rapport og er ikke undersøgt nærmere. En af de største ulemper ved materialet vil langt hen ad vejen være den lave densitet, som beskriver materialets svage styrkeevne. Kalciumsilikaten kan ikke tåle særlig meget tryk og træk påvirkning, og man skal derfor være særligt opmærksom på hvad der opsættes på disse indervægge med kalciumsilikat som indvendig efterisolering. (Brandt, 2013).

	Porøsitet m³/m³	Densitet Kg/m³	Tykkelse mm	Liquid water coefficient m²/s	μ, Vanddamp Diffusions- modstandsfaktor
Gipsplade	0,65	850	12,5	4,5	8,3
Kalciumsilikat	0,96	115	200	0,017	4,1
Puds, indv.	0,44	1480	20	5	17
Tegl, udv. massiv.	0,28	1800	350/580	300	15
Etagedæk, Træ	0,75	420	200	0,0005	50

Tabel 2: Materialeparametre for vandoptag

5.4. Risiko for råd i træbjælkeenderne

Det ses i resultatafsnittet at træbjælkeenderne som hviler af i murværket bliver mere opfugtet for hvert år der går når der isoleres indvendigt. På den tidligere nævnte figur 20, kunne ses hvorledes vandindholdet i luftspalten mellem murværk og bjælkeende forøges med ca. 80 % om vinteren med (skum/gips)¹²⁰ som isolering i forhold til massivt murværk uden isolering. Denne fugtophobning kan antages at være problemstillingen efter 5 år og er både gældende for den nordlige og sydlige orientering.

Det kan ud fra denne graf (fig. 20) ses at fenolskumpladen bevirker en større opfugtning end kalkiumsilikaten, for de eksisterende bjælkeender. Der vil altså med sikkerhed ske en fugtforøgelse omkring bjælkeenderne når der efterisoleres, hvormed man kan forestille sig at den årlige fugtcyklus som bjælkeenderne har været udsat for indtil nu ændres markant.

Det fugtindhold som optræder imellem murværk og bjælkeende når så høj en fugtighed at luft vil være tæt ved at mættes ved 98 – 99 %RF. Der vil ganske givet være stor risiko for skimmelsvamp begroning og kondenserende vand på den organiske træbjælkeende.

De gamle uimprægnerede træbjælker som normalvis har været brugt i bjælkelaget har ofte været udført i gran og kan indeholde store mængder fugt i sig. Træet kan optage et vandindhold på op til 1,5 gange dens egen tørvægt. Det træ som blev brugt i simuleringerne har en densitet på 420 kg/m³ og kan jf. sorptionskurven have et vandindhold på 600 kg/m³ ved mætningspunktet (se bilag 4.2). Da træ forholdsvis hurtigt når sin ligevægtstilstand med den omgivende luft, kan træet indeholde store mængder fugt i porerne på trods af at det er et organisk materiale. Det er dog yderst vigtigt at træet kan få mulighed for at udtørre henover året og derved afgive noget af alt denne fugt igen. Træets fine porer vil kunne transportere fugten langt ind i træbjælkelaget.

Normalt uimprægneret tømmer skal holdes på et fugtniveau med et træfugt indhold på under 20 % i vægt %, for at undgå fare for råd og trænedbrydende svampe. Dette svarer til en ligevægtstilstand med luft ved 20 °C på ca. 87 %RF. Kommer vandindholdet da over de 20 % træfugt i længere perioder, uden at udtørre, vil træet risikere at rådne. En sådan forrådnelse og svigt i materialet vil udgøre en større risiko for træets oprindelige styrkeevne hvor træet risikerer at deformere. En af de hyppigst forekommende trænedbrydende svampe for indmurret træ er Ægte Hussvamp, som medfører kraftig mycelievækst i det omgivende murværk. Denne svamps sporer kan spredes og forgrene sig, over 0,5 m fra det angrebne træværk.

De gamle etageadskillelser med træbjælkelag kan langt hen ad vejen godt tåle den periodevis høje vandpåvirkning, men for at sikre sig at de trænedbrydende svampe ikke kan vokse bør det kritiske træfugtindhold på 20 % ikke overskrides.

Af resultatbilagene for bilag 3.1 – 3.8 ses at fugtigheden i bjælkeenderne stiger i de simulerede knudepunkter. Det ses tydeligt hvordan den sydlige orientering skaber den største opfugtning, som skaber et billede af meget høje værdier af vandindhold. For sammenligningsgrundlag mellem isoleringsløsningerne, ses i figur 26 den relative luftfugtighed i bjælkeenderne som indikerer den årlige fugtophobning for de nordlige bjælkeender.

Bjælkeenderne for det eksisterende murværk har en fornuftig fugtligevægt og aftager en smule med tiden. Fugtindholdet i disse bjælker kommer om sommeren ned på ca. 78 %RF, som ved 20 °C vil indstille sig på et fugtindhold på ca. 16 % - 17 %.

Når der efterisoleres stiger luftfugtigheden i bjælkeenderne til op over de 87 %RF, hvor fugtindholdet i bjælken vil ligge over de 20 % og være stadigt stigende. For de to isoleringsløsninger med lavest U-værdi, (kal.)200 og (skum/gips)120, nås den kritiske grænse efter ca. 2,5 år. For (kal.)50, med den svagere U-værdi, rammes den kritiske grænse efter 6 år.

Der må formodes at forekomme en stigende risiko for råd i træbjælkeenderne for begge orienteringer, når der efterisoleres indvendigt. Vandindholdet overstiger den kritiske grænse for angreb af trænedbrydende svampe efter 2,5 år. Herefter stiger risikoen for hvert år der går.

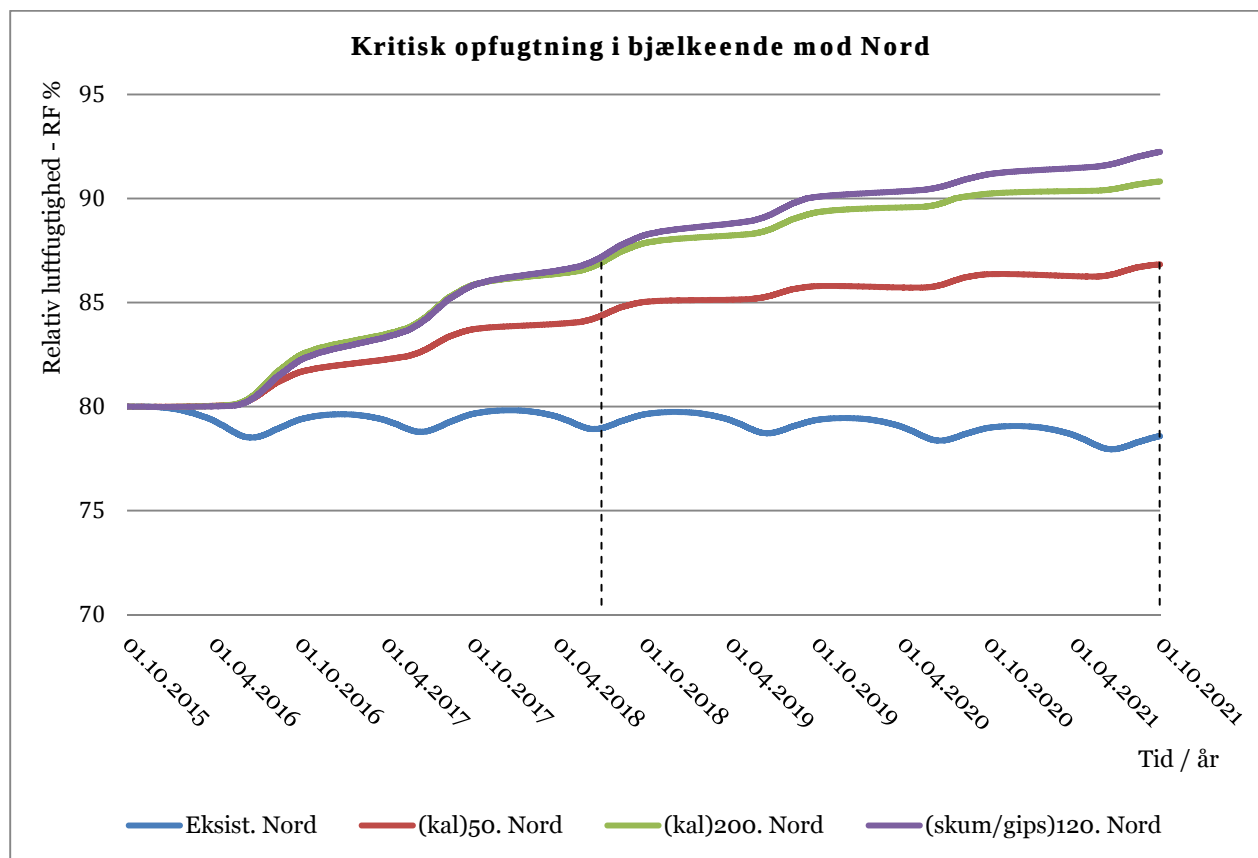


Fig 26: Opfugtning i bjælkeenderne mod Nord. Kritisk grænse for vandindhold på 20 vægt% ved 87 %RF.

5.5. Tæthed i omkring etageadskillelsen

Ved den traditionelle indvendige efterisolering, som udføres af træskelet med mineraluld, dampspærre og gips, stilles der normalt vis store krav til tætheden af samlingerne. Det anbefales i SBI-anvisning 221 at dampspærren bukses rundt om den ny opsatte træskelet konstruktion og klæbes og klemmes fast til bagvæggens overflade. På denne vis opnås en så tæt dampspærre opsætning som muligt.

Ved denne opsætning af dampspærren, kan man dog ikke undgå at man kommer til at friholde et stykke omkring etageadskillelsen som ikke kan tætnes mod det varme fugtige rumluft.

Som tidligere nævnt vil der foregå konvektion i detaljeovergangen med etageadskillelsen, som vil fokusere en fugtophobning lige i de knudepunkter som i forvejen er skrøbelige og som indeholde organisk materiale.

Bilag 3.9 viser temperatur og fugtforhold for et simuleret knudepunkt med en traditionel opsat indvendig efterisolering. Der er udvalgt samme målepunkt som for de øvrige simulerede knudepunkter, for nemmere at kunne sammenligne disse.

Simuleringen af denne traditionelle isolering på træskelet (bilag 3.9), minder unægtelig meget om simuleringen for (skum/gips)₁₂₀ (bilag 3.7). Materialet for fenolskummen er skiftet ud med en mineraluld på 95mm og alufolien er udskiftet med en dampspærre med en diffusionsmodstandsfaktor på 100.000 μ . Dampspærren er altså dobbelt så tæt men har tilsyneladende ingen større betydning i det pågældende knudepunkt, da dampspærren stopper mod gulv/loft overfladerne.

Man kan med god grund antage at den fugt som trænger ind i konstruktionen ved konvektion omkring etageadskillelsen for den traditionelle isolering, også er retvisende for efterisoleringen med fenolskumpladen. Selv når der er forskellig diffusionsmodstand for dampspærreerne er de begge så tætte at de resulterer i samme opfugtningen af bjælkeenden.

Ved opsætning af kalciumpulken, (kal.)₂₀₀, ses for bilag 3.3 at der rigtig nok også vil være en stigende fugtophobning i træbjælkeenden lige som for (skum/gips)₁₂₀. Denne er stadig kritisk i forhold til risikoen for råd, men er dog ikke lige så høj som for fenolskumpladen.

Kalciumpulkens indadgående udtørring virker til at sænke fugtniveauet en lille smule og indikerer at træbjælkeenden nok ikke bliver påvirket helt så meget af den indefra kommende konvektion, men nærmere den udefrakommende vand absorption gennem murværket.

Som tidligere nævnt under resultatafsnittet (side 35), har de to isoleringsløsninger omtrent samme U-værdi, og burde dermed isolere næsten lige godt. De burde dermed danne samme kølige temperatur bagved isoleringen, samt omkring træbjælkeenden.

Figur 27 + 28 indikerer temperaturerne bagved isoleringsløsningerne samt i bjælkeenden, i samme afstand fra den udvendige overflad. Her ses ud fra graferne, de temperaturer henover året som måles i de to målepunkter. Vi ser at kalciumsilikaten skaber samme temperatur variation bagved isoleringen som midt i bjælkeenden, dette vil da også indikere en samme luftfugtighed begge steder. Der vil her være det samme varmetab igennem både midten af bjælkeenderne samt midt på den isolerende væg med (kal.)200.

Fenolskumpladen vil derimod skabe en lavere temperatur midt på væggen end ud fra bjælkeenden, hvilket indikerer at der sker et større varmetab igennem etageadskillelsen, hvor den varme fugtige luft fokuseres ved konvektion. Disse lidt varmere bjælkeender kan indeholde en smule mere fugtig luft end for (kal.)200, men her mangler den indadgående udtørring pga. tætheden i fenolskumpladen.

Der sker et større linjetab i etageadskillelsen når der isoleres med (skum/gips) pladen som har den dampbremsende alufolie og som derved fremmer konvektionen igennem etageadskillelsen.

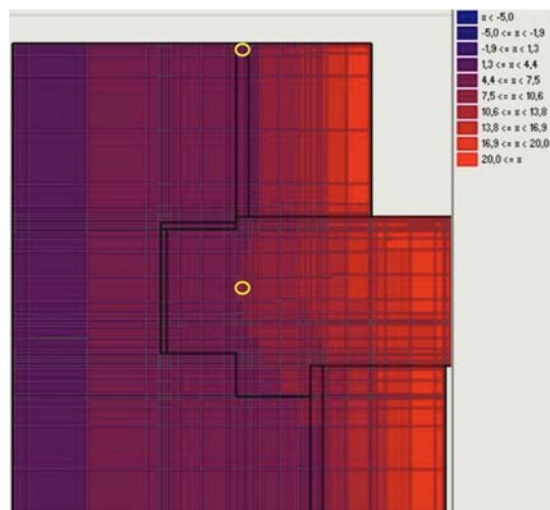


Fig 27: Temperaturmålepunkter i knudepunkt. Bagved isolering samt midt i bjælkeende.

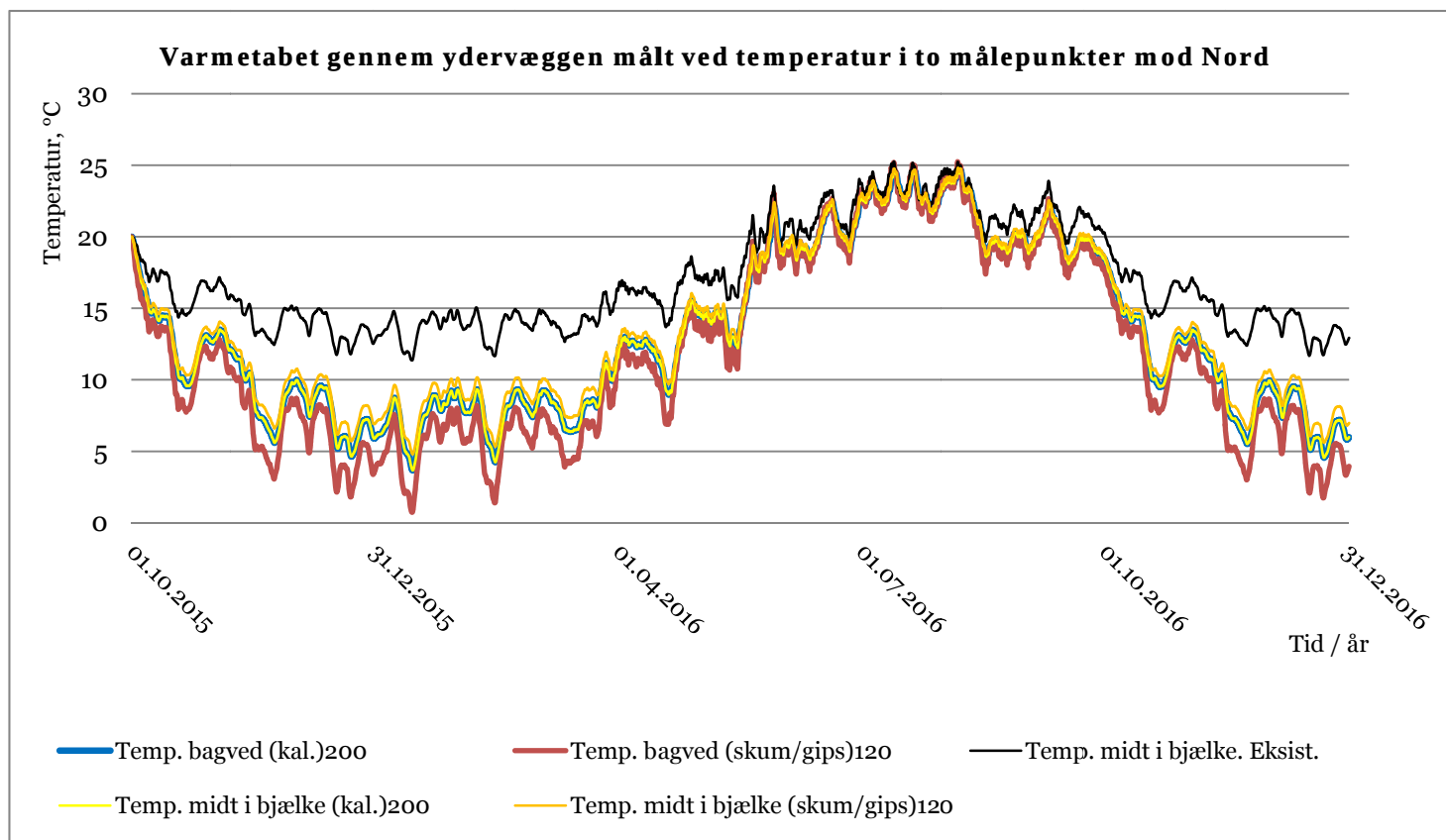


Fig 28: Temperatur indikation for varmetabet bagved isoleringen samt ud igennem etageadskillelsen.

5.6. Risiko for frostsprængninger i den udvendige facadeoverflade

Som tidligere nævnt anbefales det altid at tætnes sin udvendige side af klimaskærmen inden opsætning af den indvendige efterisolering. Det skal sikres at murværket er i god stand og egnet til at optage de større mængder fugt som der fremadrettet vil blive ophobet i væggen når temperaturen sænkes. Hvis der allerede ved en før registrering ses antydninger af fugtophobning i murværket må man kunne forvente at denne ophobning forøges efter opsætning af isoleringen, og man bør derfor være ekstra opmærksom på gamle skader i murværket.

Hvis der findes store sætningsskader, ødelagt og defekte sten eller forvitrede fuger mm. bør man være opmærksom på om murværket er fugtrobust nok til efterisolering. Alle udvendige skader i murværket bør repareres således at regnskærmen tættes så godt som muligt. Der vil givetvis være en større fugtophobning i et ødelagt og utæt murværk.

Frostsprængninger i den udvendige overflade af murværket vil som oftest forekomme når murstenene er så våde, at de ikke kan nå at afgive fugten ved fordampning på overfladen. Når det da bliver frostvejr, vil vandet i murstenene fryse til og udvide sig i stenes porersystem. Dette ses ofte som den hyppigste årsag til nedbrydning af murværket.

Når vandet fryser til is i porerne vil det udvide sig med 9% i porerne og dermed skabe et tryk igennem porerne. Den kritiske vandmætningsgrad i materialer som eksempelvis mursten, defineres af forholdet mellem de luftfyldte porer og det frysbare vand som måtte befinde sig i stenens porer. Når vandet fryser og udvider sig i stenens vandfyldte porer vil der foregå et hydraulisk tryk i poresystemet. Dette tryk kan være større en teglstenens trækstyrke hvormed man kan risikere at stenen vil revne og/eller sprænge af i flager. Herved sker frostsprængningen af den eksisterende teglstens overflade, da trykket i porerne er for højt. Den volumenforøgelse der sker i porerne når vandet fryser til is kan forårsage store skader i det faste stenmateriale. Man vil som udgangspunkt forsøge at undgå dette hydrauliske tryk som dannes ved for højt frysbart vand i forhold til de luftfyldte porer. Der vil ikke være nogen risiko for frostsprængninger, når luften i porerne udgør mindst 9 % af det frysbare vands volumen i porerne. (Møller. 2013).

Porernes størrelse og afstanden imellem sig er her en faktor som vil påvirke risikoen for frostsprængninger når temperaturen passerer frysepunktet og vandet i porerne fryser til. Hvis man øger luftvolumen i sine tegl, ved at blande luftbobler i og skabe flere mindre poresystemer, mindskes risikoen for hydraulisk tryk da vandet ikke når vandmætningsgraden når den fryser. De små porer kræver et større hydraulisk tryk for at der sker frostsprængninger.

Når murværket gentagene gange udsættes for fryse/tø passager henover frysepunktet, fremmes frostrisikoen og den materialenedbrydende effekt. Jo flere fryse/tø passager der forekommer når murværket er gennemvædet med vand, desto større er risikoen for at de vandfyldte porer danner hydraulisk tryk, med voksende risiko for frostskafer.

Med det kolderer murværk og stigende frysetemperaturer, ved opsætning af indvendig efterisolering, vil udsvingene omkring frysepunktet blive hyppigere og danne større omskiftelighed mellem perioder med frost og tø. Man kan af denne grund antage at et stigende antal fryse/tø passager vil indikere en stigende risiko for frostsprængninger.

På bilag 4.1 er der optalt antallet af de fryse/tø passager der optræder 4 mm inde i ydervæggen fra den udvendige overflade. Der er simuleret for begge orienteringer (Nord/Syd), samt for fire forskellige ydervægløsninger, eksisterende, (kal.)200, (kal.)50 og (skum/gips)120.

Man kan se af graferne at der på Nord facaden optræder ca. dobbelt så mange fryse/tø passager (27. stk), efter der er blevet isoleret på den indvendige side ift. den eksisterende væg. Nord facaden er som bekendt koldere da der ikke kommer direkte solindstråling, derfor ses så mange fryse/tø passager. Til gengæld er der ikke så stor fugtophobning fra regnvand da den nordlige orientering har mindste regnintensitet og næsten ingen slagregn. Der vil da ikke være særlig stor risiko for frostsprængninger, da porerne i teglen ikke vil være vandfyldte.

For den sydelige facade dannes et billede af en forhøjet risiko for frostsprængninger, fra den eksisterende til den isolerede ydervæg. Der vil antageligt forekomme tre gange så mange fryse/tø passager i de yderste 4 mm murværk igennem fyrringsæsonen (i alt 24 stk). Antallet af passager er lavere end mod Nord, da facaden er varmere pga. solindstråling.

Vandindholdet i murværket i de kritiske perioder er dog langt større, hvormed der her vil være en voksende risiko for hydraulisk tryk i de vandfyldte porer. Nedenstående figur 29 + 30 viser forskellen i de to orienteringer og indikerer en stigende risiko for frostsprængninger når der isoleres. Her ses grafer for ydervæggen opsat med (kal.)200.

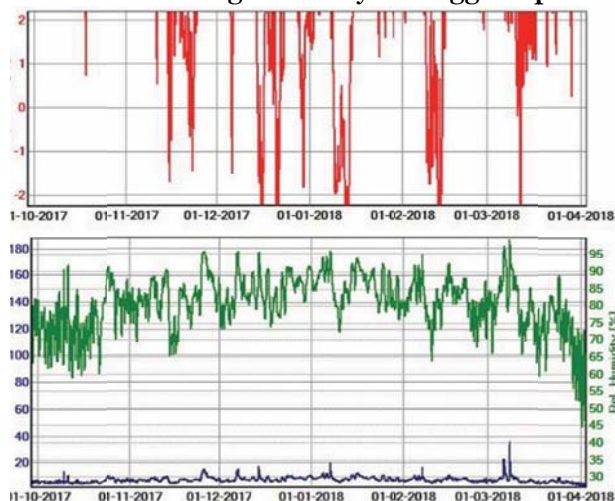


Fig 29: 4 mm fra udv. overflade med (Kal.)200 mod Nord. Der optræder 27 fryse/tø passager, hvilket er ca. dobbelt så mange som før efterisolering.

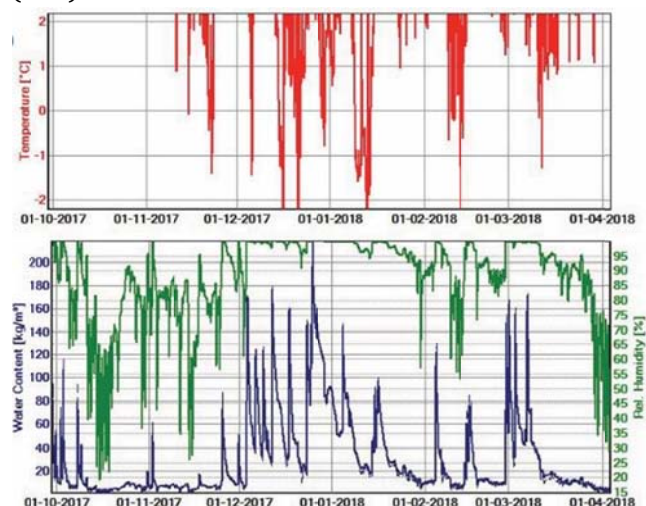


Fig 30: 4 mm fra udv. overflade med (Kal.)200 mod Syd. Der optræder 24 fryse/tø passager, hvilket er ca. tre gange så mange som før efterisolering.

På bilag 4.1 ses yderligere at antallet af fryse/tø passager i ydervæggen falder når der isoleres med en lavere isoleringsevne. Indvendig efterisolering med (kal.)50 skaber kun 17 fryse/tø passager hvilket reducerer risikoen for frostsprængninger.

Frostsprængninger i en murstensfacade er en almindelig forekommende skade, hvor det også kan ses på ydervægge som ikke er efterisoleret. Nogle teglsten er mere udsatte end andre eller er ringer fremstillet.

Da det ofte er vanskeligt at måle murværkets frostfasthed overfor frostsprængninger, må man forsøge at sikre sig, ved at tætte de synlige skader der måtte forekomme på den udvendige overflade. Det anbefales altid at gennemgå sine udvendige facader ved indvendig efterisolering. For at reducere fugtphobning bør alle fuger med synlige revner, huller og forvitrede sten repareres og udskiftes. Store revner i murværket skal repareres og defekte mursten kan eventuelt udskiftes med frostfaste sten.

Det kan være nødvendigt at få analyseret de eksisterende sten som er anvendt i murværket, da der ofte ses en sammenhæng mellem stenenes brænding og porøsitet og risikoen for frostsprængninger. Generelt er maskinsten mere frostfølsomme end blødstøgne sten.

Af andre forbedringer kan man overfladebehandle sin facade for at reducere fugtindtrængningen. Dette kan eventuelt gøres ved en imprægnering af overfladen med eksempelvis "monosilan", hvor langt det meste fugt og regnvand vil prælle af og risikoen for frostsprængninger yderligere nedsættes. Det er vigtigt at imprægneringen er diffusionsåben og at der ikke forekomme nogle utætheder i overfladebehandlingen, hvor fugt kan trænge ind bagved hydrofoberingen og bidrage til en stedvis kraftigere opfugtning i murværket.

Imprægnering af murværket stiller store krav til udførelsen, da revner og gennembrydninger kan forvære fugtphobningen. Til gengæld kan hydrofoberingen også bidrage til en længere levetid for murværket.

5.7. Kritisk vurdering af de teoretiske WUFI simuleringer

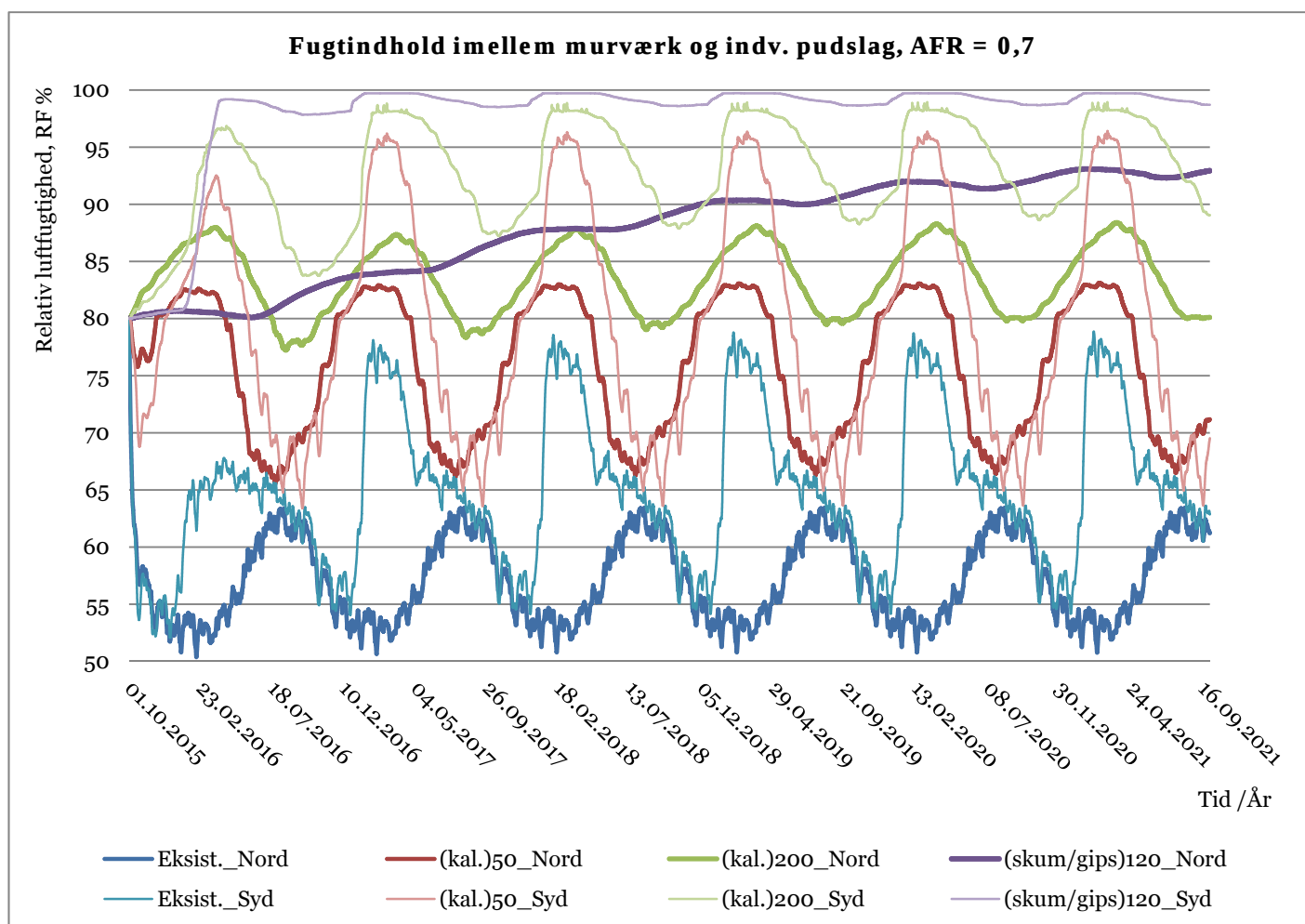
Samtlige WUFI simuleringer som ligger til grund for alle de mange målepunkter og grafer som analysen er baseret på, er som bekendt foretaget ud fra samme indtastning af randbetingelser som nævnt i metodeafsnittet. Disse randbetingelser er ens for bedre at kunne sammenligne de forskellige konstruktionsløsninger og samtidigt burde simulere de mest virkeligheds tro forhold for væggen. Man er naturligvis interesseret i at vise et så korrekt billede af de aktuelle forhold som muligt, ved de udførte simuleringer.

Selv når disse data menes at være korrekt indtastet, jf. WUFI's fremgangsmåde og forskrifter, ser det alligevel ud til at resultaterne ikke er 100 % retvisende. Langt hen ad vejen ses et utroligt højt vandindhold flere steder i væggen, hvor man bør stille sig kritisk overfor sine resultater. Eksempelvis afslører resultaterne for simuleringerne med bjælkeenden, at der vil være en

temmelig høj relativ luftfugtighed for den sydlige orientering selv når der ikke isoleres indvendigt. Den luftspalte mellem bjælkeende og murværk som der simuleres for svinger imellem 95 – 98 %RF allerede efter et år. Det er væsentligt at spørge sig selv om dette kan være realistisk, eftersom at der da burde være utroligt mange sydligt orienterede bjælkeender, som teoretisk set ville have et fugtproblem. Her bør man naturligvis endnu engang kontrollere om indtastningen er korrekt.

Da der i dette studie både er simuleret med WUFI lite og WUFI 2D, har det været naturligt at have de samme randbetingelser i begge programmer, for at kunne sammenligne normalkonstruktioner med detaljer. Her opstår dog den begrænsning, at man ikke kan variere vandabsorptionsfaktoren i lite-programmet, men kun i 2D-programmet. Derfor er denne faktor sat til 0,7 som er fælles for begge programmer. Ydermere kan man kun i begrænset omfang variere sd-værdien på den udvendige overflade. Ved fuld variabel kontrol ville man muligvis kunne justere sine resultater en smule og få lidt lavere værdier for fugtindhold, men størrelsesforholdet mellem simuleringerne ville dog stadig være den samme som anvist i denne rapport.

De teoretiske WUFI simuleringer viser dermed bedst af alt forskellen i de hygrotermiske forhold for væggen, for de mange forskellige isolerings kombinationer. Figur 31 viser en grafiskoversigt



over nogle af simuleringerne målt for relativ luftfugtighed i samme målepunkt bagved den eksisterende puds. Der ses for ovenstående graf et samlet billede af den fugtphobning og variation som pudsen påvirkes af. Det kan virke foruroligende at se hvor stor en variation der sker før og efter isoleringstiltagene, med erkendelsen af at fugtindholdet i ydervæggen stiger markant.

Den store forskel i regnmængden som rammer overfladen og som dermed bidrager til kapilarabsorption, viser sig endnu engang at have voldsom stor indflydelse mellem de to orienteringer.

5.8. Afskærmning af facaden og minimering af slagregn

Der er flere indikationer på at den største og mest kritiske fugtphobning i klimaskærmen kommer udefra, ved slagregn påvirkningen. Når man isolerer indvendigt med nye isolerende materialer, med god diffusionsmodstand og dampbremsende effekt, er det altså ikke altid til megen nytte hvis murværket primært fugtphobes udefra. Det kan ses flere steder igennem analysen, at flere af simuleringerne viser kritiske fugtindhold forskellige steder i væggen grundet denne høje regnpåvirkning på klimaskærmen. Selv den indtrængende fugt ved konvektion ved etageadskillelsen, ses at have en mindre fugtpåvirkning og lader ikke til at være altafgørende for om konstruktionen er fugtteknisk forsvarlig eller ej.

Med andre ord ses det flere steder at være murværkets udvendige overflade som bør beskyttes og tætnes, mod den alt for store opfugtning flere steder i murværket.

Som før nævnt kan det være problematisk at de mange simuleringer i udgangspunktet skaber meget høje resultatværdier for relativ luftfugtighed og vandindhold i væggen. Til tider kan disse teoretiske simuleringer virke mere eller mindre urealistiske, hvorfor man er nødsaget til at se skeptisk på sine indtastede randbetingelser.

Når udeklima datasættet står til at have så stor betydning for fugtphobningen i målepunkterne kan det være fordelagtigt at kunne regulere på regnvandsintensiteten i udeklimaet.

Regnvandsabsorptionsfaktoren er som tidligere nævnt den faktor som beskriver hvor meget af det vand som rammer facadeoverfladen, som bidrager til kapillar absorption. Når absorptionsfaktoren (AFR) er sat til 1, vil der være fuld kapillar absorption og alt regnvand vil bidrage til opfugtning af murværket. Er AFR derimod sat til 0 er facaden fuldt beskyttet og intet regnvand vil være tilgængelig for kapillar absorption. Som udgangspunkt er simuleringerne udført med $AFR = 0,7$ grundet den tidligere nævnte begrænsning i WUFI-lite.

Denne absorptionsfaktor beskriver med andre ord en form for afskærmning af den regnmængde som rammer facaden og som er tilgængelig for kapillarsugning, hvad enten det er almindeligt regn eller slagren. Der er således god sammenhæng i at forstå denne faktor som en udvendig

afskærmnings faktor, som kan varieres af hensyn til hvor meget regn der blokeres for facaden ved tættere bymæssig bebyggelse. I byerne skærmer en stor del af de omkringliggende bygninger ofte for hindanden hvilket påvirker hvor stor en slagregnsmængde facaden bliver påvirket af. Studier med CFD beregninger viser at den slagregn som rammer luv facaden på en bygning, vil have en blokkerende effekt på læ siden, samt bagvedliggende bygninger. Denne vind-blokerings effekt varierer med bygningens højde og bredde, og har stor betydning for hvor meget af det aktuelle regnvand som rammer facaden. Der er samtidig også stor forskel på hvor på facaden det meste af vandet måtte ramme, hvor det vises at den øverste del af facaden og især hjørnerne er de mest udsatte for slagregn. (Blocken, 2006)

Det vides endnu ikke om der kan drages direkte paralleller mellem bygningers vindblokerings effekt ved slagregn, og en minimering af vandabsorptionsfaktoren på facaden. Det er dog denne tænkning, om at bygningers afskærmning til hindanden kan minimere vandmængden på facaden, som synes interessant. Dette er dog ikke undersøgt nærmere.

Figur 32 viser hvorledes den hårdest belastede facade med indvendig isolering, vil ændre markant på fugtindhold i bjælkeenden, når man reducerer regnvandsabsorptionsfaktoren. Den relative luftfugtighed i bjælkeenden når en fornuftig fugtligevægt når $AFR = 0,3$. Her vil da kun være 30 % af regnvandet som bidrager til kapilarsugning igennem murværket.

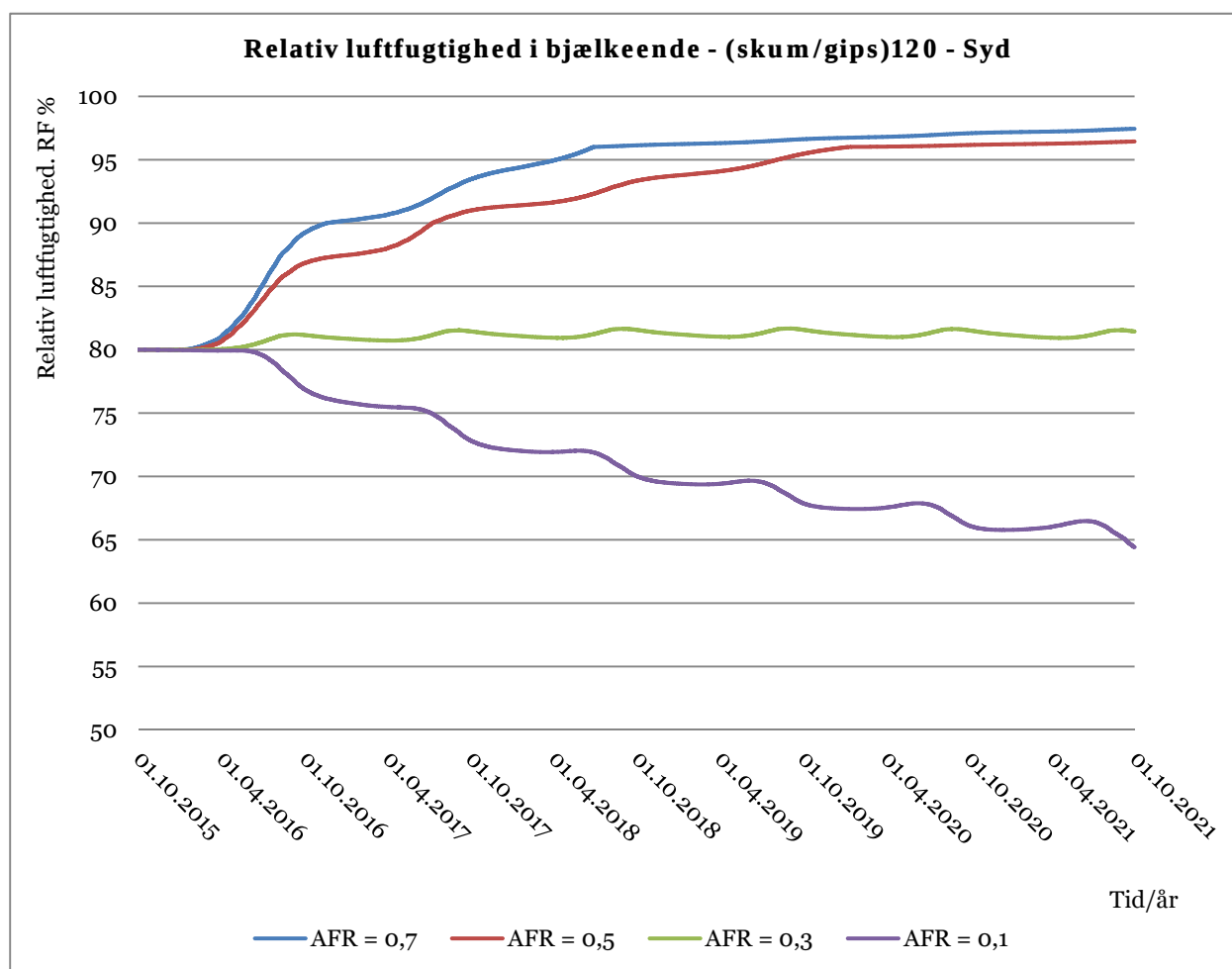


Fig 32: Relativ luftfugtighed i bjælkeenden ved variation af regnvandsabsorptionsfaktoren (AFR).

5.9. Fremtidige undersøgelser og supplerende studier

Til fremtidige studier kunne det være interessant at undersøge, om der er en nærmere sammenhæng for hvornår man kan tillade sig at reducere vandabsorptionsfaktoren. Kan denne AFR eventuelt justeres ud fra områdetyperne for de forskellige boligtyper, eksempelvis tæt-lav bebyggelse eller etageejendomme? Bør man bruge forskellig absorptionsfaktorer for forskellig højder for murværket da det øverste af ydervæggene påvirkes af mest slagregn? Hvad er der generelt set af muligheder for at reducere denne AFR-faktor? Eksempelvis ved forskellige imprægneringsmetoder af den udvendige overflade.

Derudover kunne et praktisk studie, med logning af de hygrotermiske egenskaber hvor der samtidigt sammenlignes med teoretiske simuleringer, være nyttigt. Feltmålinger af indvendig efterisolering uden dampspærre, på facader med stor regnpåvirkning, kunne belyse hvor vidt de teoretiske simuleringer skaber et retningsvisende billede eller ej. Dette kunne samlet set give et bedre overblik over hvornår de hygrotermiske forhold i væggen var kritiske.

Overordnet set vil det være nødvendigt med flere dybdegående undersøgelser, for hvornår man kan forvente at ens efterisolerede murværk udføres fugtteknisk forsvarligt. Hvis blot man kunne argumentere for en lavere regnvandsabsorptionsfaktor på 0,3, ville ens simuleringer som vist på figur 33, tegne et væsentligt bedre billede af de hygrotermiske forhold igennem ydervæggen.

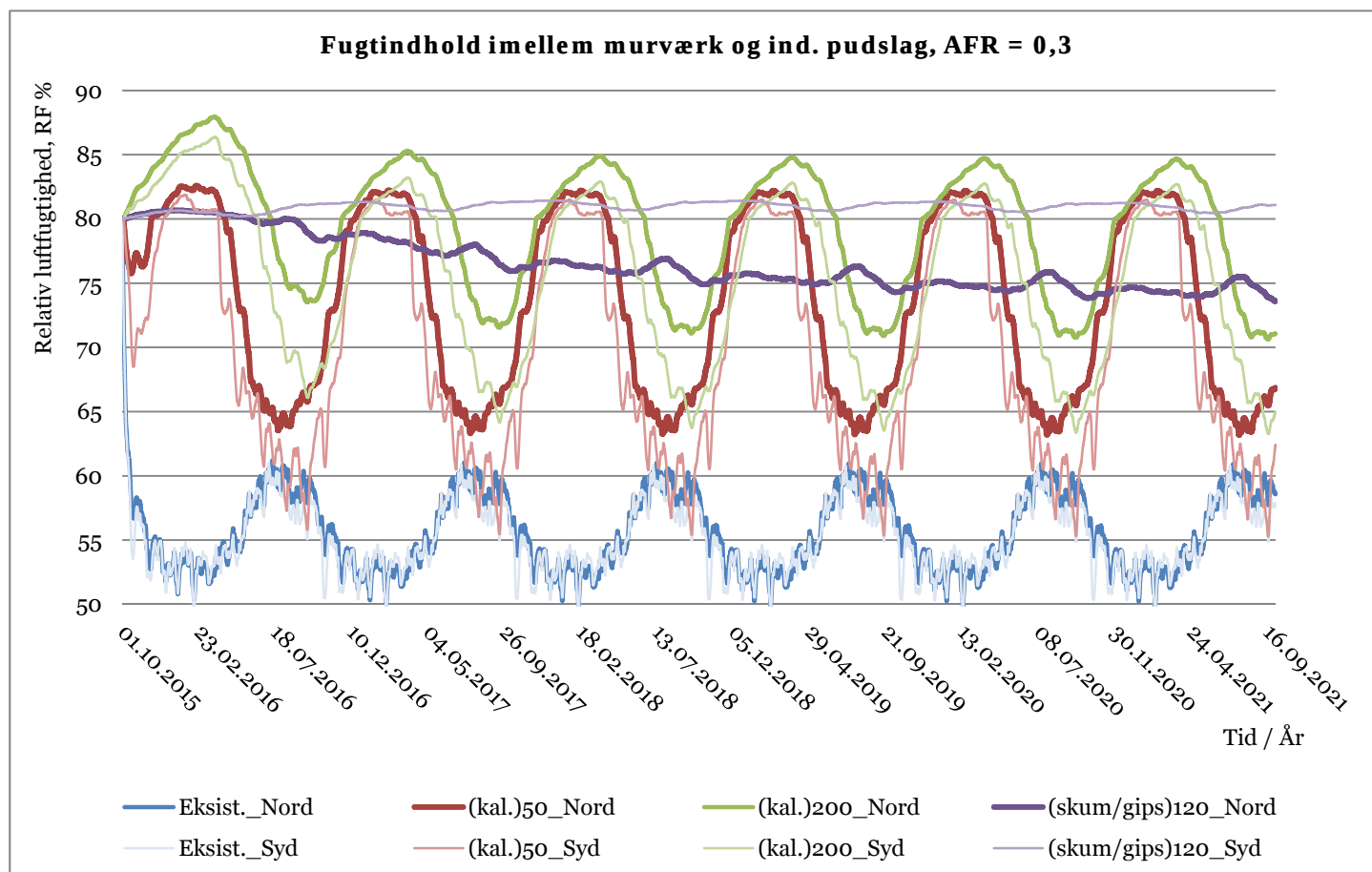


Fig 33: Fugtphobning og variation bagved puds, ved de forskellige isoleringsløsninger. (AFR = 0,3)

Konklusion

Ved simuleringer af ydervæggen af massivt murværk med to forskellige isoleringsløsninger, har denne rapport skabt overblik over de parametre som kan risikere at optrappe fugtproblemer i ydervæggen. Der tegner sig et billede af at vandindholdet generelt hæves og murværket og de øvrige materialer da bliver påvirket af en øget opfugtning. Det kan ifølge dette studie være vanskeligt at sikre en komplet fugtteknisk forsvarlig ydervægskonstruktion med indvendig efterisolering, hvor dette formentlig altid vil indebære en vis risiko i de udvalgte fokusområder. Der må altid tages en enkeltstående vurdering af den pågældende ydervæg.

Begge isoleringsløsninger, (kal.)200 og (skum/gips)120, sælger sig på at være dampspærre-frie løsninger, som vil lette opsætningen af pladerne og mindske fejl ved udførelsen.

Fenolskumpladens indbyggede alufolie stopper den fugtige rumluft i at trænge ud i konstruktionen, til gengæld hindres samtidigt den indadgående udtørring som ses at have stor vigtighed for væggens samlede fugtindhold. Der skabes ydermere konvektion i etageadskillelsen. Den kapillaraktive kalciumsilikatplade egner sig umiddelbart bedst til indvendig efterisolering af de to, da dennes udtørningspotentiale viser sig at medvirke til hele ydervæggens udtørningsprocess om sommeren. Der vil være langt mindre risiko for skimmelsvamp bagved den kapillaraktive plade, hvor vækstbetingelserne herfor er mindre end for fenolskumpladen.

Der ses for begge løsninger en fugtophobning i bjælkeenderne som forøger risikoen for materialenedbrydende svampe i forhold til de eksisterende bjælkeender, som ligger under den kritiske grænse for råd. Fenolskumpladen danner en lidt større opfugtning i bjælkeenderne henover den 6 årige periode, hvilket givetvis er grundet den mindre konvektion af den indvendige rumfugt som fokuseres i etageadskillelsen. Dog ses det at være den udefra kommende regnvands absorption, som har størst indflydelse på fugtindholdet i væggen.

De teoretiske simuleringer viser at der er stor forskel i facadeorienteringen for en ydervæg som isoleres i det danske udeklima. Der skabes langt større fugtophobning mod den sydlige orientering pga. den større mængde slagregn som rammer facaden. I bynære områder kan man i nogle tilfælde antage en afskærmningsfaktor på facaden, som mindsker vand absorptionen for ydervæggen til gavn for ens simulerings resultater. Dog skal man være opmærksom på at den øverste 1,5-stens ydervæg er mere blotlagt for slagregn end længere nede på facaden.

Når temperaturen sænkes og fugtindholdet hæves i ydervæggen vil dette fremme en øget risiko for frostsprængninger i facaden, i kraft af en stigende antal fryse-tø passager for de yderste 4mm af teglstenen. Svage sten og nedbrudte fuger vil have større tendens til at frostsprænges.

Samtlige af disse risikoparametre skal opvejes grundigt når der overvejes efterisolering af den indvendige vægoverflade.

Litteraturliste

Bøger & Publikationer:

- Regeringen. (2014). *Strategi for energirenovering af bygninger*. Klima-, Energi- og Bygningsministeriet.
- Munch-Andersen, J. (2008). *SBi-anvisning 221: Efterisolering af etageboliger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Brandt, E. (2013). *SBi-anvisning 224: Fugt i bygninger*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Engelmark, J. (2013). *Dansk byggeskik, Etagebyggeriet gennem 150 år*. Grundejernes Investeringsfond og Realdania.
- DS/EN ISO 13788 (2013). *Byggekomponenter og –elementers hygrotermiske ydeevne – Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overflade-og mellemrumskondens - Beregningsmetode*. Dansk Standard.
- DS/EN ISO 10456 (2008). *Byggematerialer og –produkter. Hygrotermiske egenskaber – Tabelværdier og procedure til bestemmelse af termiske deklarerede værdier og deklarerede designværdier*. Dansk Standard.
- Zirkelbach, D. (2005). *WUFI 2D Manual, Calculation eksempel step by step*. Fraunhofer IBP.
- BYG-ERFA. (2009). *Indvendig efterisolering af ældre ydermure*. Erfaringsblad 90 10 29.
- Gravesen, S. (2002). *Forskningsprogrammet "Skimmelsvampe I bygninger"*. Statens Byggeforsknings Institut.
- Kessel, M. H. (2013). *Vorlesung Bauphysik*. Technische Universität Braunschweig.
- Møller, E. (2013). *Metaaterialenedbrydning – Mekanismer og forebyggelse*. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Rønby, L. (2011). *Erfaringer fra prøvelejlighed Ryesgade 30C 1tv*. DTU Byg.

Artikler:

- Morelli, M. (2010) *Internal Insulation of Masonry Walls with Wooden Floor Beams in Northern Humid Climate*. ASHRAE

- Vereeken, E. (2014) *Interior insulation for wall retrofitting – A probabilistic analysis of energy savings and hygrothermal risks*. Elsevier.
- Blocken, B. (2006) *The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure*. Journal of wind engineering.
- Ueno, K. (2013) *Field Monitoring and Simulation of a Historic Mass Masonry Building Retrofitted with Interior Insulation*. ASHRAE
- Johansson, Pär. (2013) *Interior Insulation Retrofit of a Brick Wall Using Vacuum Insulation Panels: Design of a Laboratory Study to Determine the Hygrothermal Effect on Existing Structure and Wooden Beam Ends*. ASHRAE
- Blocken, B. (2006) *The influence of the wind-blocking effect by a building on its wind-driven rain exposure*. Elsevier.

Hjemmesider:

- Icopal håndbog 9 (2012). *Bygningsfysik 4.1 Fugtlære*:
 - o http://www.icopal.dk/Raadgivercenter/Icopal_Haandbog/Bygningsfysik.aspx
- <http://www.wufi-forum.com/>
- Producenter:
 - o [http://www.kingspaninsulation.dk/Produkt/Kooltherm/K17-Isolerede-gipsplader-\(klæb\).aspx](http://www.kingspaninsulation.dk/Produkt/Kooltherm/K17-Isolerede-gipsplader-(klæb).aspx)
 - o http://www.ytong.dk/dk/content/multipor_innendaemmung_wi.php
 - o <http://www.microtherm.dk/Indvendig-efterisolering.aspx>
 - o <http://www.knaufdanogips.dk/Produkter/Gør-det-selv/Byggeplader/Efterisolering/Varmvæg.aspx>
- Fraunhofer, IBP. Software WUFI 1D, Light og WUFI 2D

Bilagsfortegnelse

Glaser-metoden:

- Bilag 1.1_1,5 sten Eksist. murværk.
- Bilag 1.2_2,5 sten Eksist. murværk
- Bilag 1.3_1,5 sten murværk (kal.)_200.
- Bilag 1.4_2,5 sten murværk (kal.)_200
- Bilag 1.5_1,5 sten murværk (skum_gips)_120
- Bilag 1.6_2,5 sten murværk (skum_gips)_120

WUFI 1D simuleringer:

- Bilag 2.1_Eksist. murværk_1,5_N
- Bilag 2.2_Eksist. murværk_1,5_S
- Bilag 2.3_Kal.200_1,5_N
- Bilag 2.4_Kal.200_1,5_S
- Bilag 2.5_Kal.50_1,5_N
- Bilag 2.6_Kal.50_1,5_S
- Bilag 2.7_(skum-gips)120_1,5_N
- Bilag 2.8_skum-gips120_1,5_S

WUFI 2D simuleringer:

- Bilag 3.1_Eksist. murværk_bjælkeende_nord
- Bilag 3.2_Eksist. murværk_bjælkeende_syd
- Bilag 3.3_(kal.)200_bjælkeende_nord
- Bilag 3.4_(kal.)200_bjælkeende_syd
- Bilag 3.5_(kal.)50_bjælkeende_nord
- Bilag 3.6_(kal.)50_bjælkeende_syd
- Bilag 3.7_(skum-gips)120_bjælkeende_nord
- Bilag 3.8_(skum-gips)120_bjælkeende_syd
- Bilag 3.9_Trad.iso95 – Bjælkeende - Nord
- Bilag 4.1_Fryse/tø cyklusser i fyrringssæson_4 mm inde i murværk fra udv. overflade.
- Bilag 4.2_Sorptionskurver
- Bilag 4.3_(skum-gips)120_bjælkeende_syd_AFR 0,3