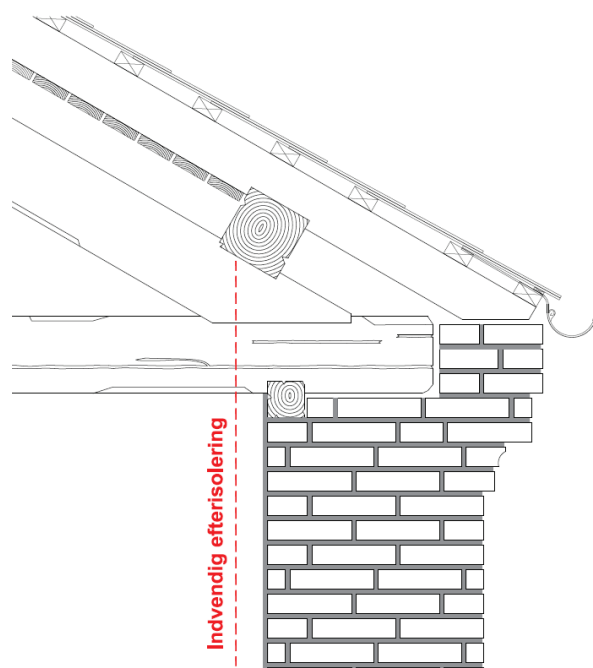


Indvendig efterisolering

Parameterstudie og fugtanalyse

Rapport omhandlende indmurede træbjælkeender i forbindelse med indvendigt efterisolerede teglfacader.



Tommy Kær Bjerke Møller



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

Studiesekretær: Silpa Stella Rondón Pinto
Telefon: 9940 2285
master@sbi.aau.dk

Studenterrapport

Uddannelse:

Master i bygningsfysik

Semester:

04

Titel på masterprojekt:

Parameterstudie omhandlende indmurede træbjælkeender i forbindelse med indvendigt efterisolerede teglfacader.

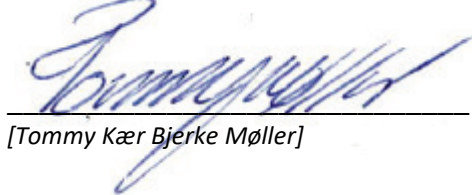
Projektperiode:

1. februar 2019 – 3 juni 2019

Vejleder:

Eva. B Møller

Martin Morelli

Studerende:
[Tommy Kær Bjerke Møller]

Antal normalsider: 58

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 1 juni 2019

Resume:

Rapportens formål er at fastslå, hvornår det er fugtteknisk forsvarligt at indvendigt efterisolere fuldmurede teglfacader med indmurede træbjælkeender. Studiet tager udgangspunkt i en bevaringsværdig bygning, som står overfor en gennemgribende transformation og deraf behovet for indvendig efterisolering. Rapporten er relevant for alle med interesse i bygningsfysik, og særligt personer som står overfor at skulle projektere eller udføre indvendig efterisolering. Studiet bygger på dynamiske simuleringer til at eftervise de hygrotermiske konsekvenser, som indvendig efterisolering omkring bjælkeenderne medfører. Indvirkningen af kapillaraktive plader og en forsatsvæg bliver undersøgt med udgangspunkt i den valgte bygning og dennes indmurede bjælkeender. Endvidere vil effekten af facadeimprægnering, samt indbygningsfejl i forbindelse med de to efterisoleringsprincipper, blive undersøgt.

På baggrund af analyserne kan det konkluderes, at der optræder kritiske hygrotermiske forhold omkring træbjælkeenden, når facaden er udsat for megen slagregn. Kun når slagregnen er begrænset, og tiltagene udføres fejlfrit, er det fugtteknisk forsvarligt at efterisolere omkring træbjælkeenderne. Alternativt skal facadens ydre imprægneres, så fugttilskuddet, og den afledte fugtvandring igennem teglfacaden, stoppes.

Indholdsfortegnelse

1	FORORD	3
2	RESUME/ABSTRACT.....	4
2.1	DK.....	4
2.2	ENG	4
3	INDLEDNING	5
3.1	PROBLEMFORMULERING.....	6
3.2	AFGRÆNSNING	6
4	LÆSEVEJLEDNING	7
5	CASE INTRODUKTION	8
5.1	BYGNINGEN GENERELT	8
5.2	TEGNINGSMATERIALE.....	9
5.3	NUVÆRENDE FORHOLD	11
5.4	OPRINDELIG SAMLINGSDETALJE.....	12
5.5	FREMTIDIG SAMLINGSDETALJE	12
6	TEORI.....	14
6.1	VARMETRANSPORT.....	14
6.2	GRUNDLÆGGENDE FUGTTEORI.....	18
6.3	FUGTTRANSPORT	21
6.4	FUGTKILDER.....	24
6.5	SKADESMEKANISMER	26
6.6	INDVENDIG EFTERISOLERING.....	29
6.7	HYDROFOBERING	30
7	CASES I LITTERATUREN	31
7.1	SLAGREGN	31
7.2	LUFTTÆTHED.....	32
8	FORANALYSE	33
8.1	METODE	33
8.2	BEREGNINGSMETODER.....	34
8.3	SIMULERINGSFORUDSÆTNINGER	36
8.4	RESULTATER.....	39
8.5	DISKUSSION	47
9	HOVEDANALYSE	48
9.1	METODE	48
9.2	FORUDSÆTNINGER	53
9.3	RESULTATER.....	55
9.4	DISKUSSION	72
10	KONKLUSION.....	76
10.1	FORSATSVÆG	76

10.2	KAPILLARAKTIVE PLADER.....	76
10.3	OPSUMMERING	77
10.4	PERSPEKTIVERING	78
11	KILDE- OG LITTERATURLISTE	79
12	APPENDIKS	82
12.1	SIMULERINGSMODELLER – REFERENCER	83
12.2	SIMULERINGSMODELLER – FORSATSVÆG	85
12.3	SIMULERINGSMODELLER – KAPILLARAKTIVE PLADER.....	97
12.4	TEGL-SAMMENLIGNING	103

1 Forord

Indeværende masterspeciale i bygningsfysik, er afslutningen på et toårigt studieforløb på Aalborg Universitet.

Formålet med analysearbejdet har været at undersøge, hvilke bygningsfysiske parametre som er særligt vigtige at være bekendt med, når træbjælkeender i murværk efterisoleres. Indholdet kan gavne personer som står for at skulle projektere eller udføre indvendig efterisolering af fuldmurede teglfacader.

Interessen i emnet udsprang netop som følge af, at jeg i mit virke skal projektere en løsning med indvendig efterisolering, i forbindelse med en bevaringsværdig bygning beliggende i Botanisk Have i København.

Projektet er udarbejdet på 4 måneder sideløbende med mit virke på en arkitekttegnestue. Jeg vil gerne takke min arbejdsgiver for fleksibilitet i dagligdagen og opbakningen i hele læringsprocessen. Jeg ser frem til at kunne anvende min fornyede viden på tegnestuen. Slutteligt vil jeg gerne takke mine to vejledere, Seniorforsker Eva B. Møller og Seniorforsker Martin Morelli, der med stort engagement har støttet og vejledt under hele forløbet.

2 Resume/Abstract

2.1 DK

Rapportens formål er at fastslå, hvornår det er fugtteknisk forsvarligt at indvendigt efterisolere fuldmurede teglfacader med indmurede træbjælkeender. Studiet tager udgangspunkt i en bevaringsværdig bygning, som står overfor en gennemgribende transformation og deraf behovet for indvendig efterisolering. Rapporten er relevant for alle med interesse i bygningsfysik, og særligt personer som står overfor at skulle projektere eller udføre indvendig efterisolering. Studiet bygger på dynamiske simuleringer til at eftervise de hygrotermiske konsekvenser, som indvendig efterisolering omkring bjælkeenderne medfører. Indvirkningen af kapillaraktive plader og en forsatsvæg bliver undersøgt med udgangspunkt i den valgte bygning og dennes indmurede bjælkeender. Endvidere vil effekten af facadeimprægnering, samt indbygningsfejl i forbindelse med de to efterisoleringsprincipper, blive undersøgt.

På baggrund af analyserne kan det konkluderes, at der optræder kritiske hygrotermiske forhold omkring træbjælkeenden, når facaden er udsat for megen slagregn. Kun når slagregnen er begrænset, og tiltagene udføres fejlfrit, er det fugtteknisk forsvarligt at efterisolere omkring træbjælkeenderne. Alternativt skal facadens ydre imprægneres, så fugttilskuddet, og den afledte fugtvandring igennem teglfacaden, stoppes.

2.2 ENG

The purpose of this thesis is to establish under which circumstances it is moisture safe to apply interior insulation on brick facades with wooden beam ends embedded in solid masonry. This study has its foundation in a heritage building which is facing a thorough transformation, hence the need for interior insulation. This thesis is relevant for anyone with interest in building physics, and in particular professionals who are looking to plan or execute an insulation project on a heritage building. The study is built around dynamic simulations to determine the hygrothermal consequences of carrying out interior insulation around wooden beam ends. The influences of insulation either with capillary active material or an insulated framework construction with an airtight sealing are investigated, in the light of the chosen structure with beam ends embedded in solid masonry. Furthermore, the study will investigate the impact of both an intact and defect facade impregnation, as well as potential flaws in connection with the establishment of an airtight sealing.

The findings in the analyses lead to the conclusion that critical hygrothermal conditions are indeed present around the beam end when the facade is subject to heavy amounts of wind-driven rain. Only when the wind-driven rain is limited or moderate and the measures are executed without any flaws, it is moisture safe to apply this sort of interior insulation around the wooden beam ends. Alternatively one should impregnate the facade in order to prevent the moisture ingress.

3 Indledning

Den danske bygningsmasse er rig på bygninger med stor kulturhistorisk- og arkitektonisk værdi. Ca. 9000 af dem er fredede og omkring 350.000 er efter SAVE-metoden (Survey of Architectural Values in the Environment) kategoriseret som værende bevaringsværdige. Det er kommunerne der udpeger, hvilke bygninger som er bevaringsværdige, og formålet er at passe på vores fælles bygningskultur (Kulturarv.dk, 2019).

Når en bygning er vurderet som værende bevaringsværdig medfører det ofte restriktioner, som betyder at bygningens ydre ikke må ændres (Historiskehuse.dk, 2019). Skal bygningen renoveres eller ændre anvendelse, der indebærer et væsentligt større energiforbrug, skal bygningen som udgangspunkt isoleres svarende til kravene i bygningsreglementet. Der kan være byggetekniske- og indeklimaforhold samt rentabilitetsbetragtninger som kan bevirke, at det ikke er muligt, eller ikke kan ske uden risiko for fugtskader (Bygningsreglementet.dk, 2019).

Eftersom det er en bygnings samlede bevaringsværdi, der medfører status af bevaringsværdig, kan det blandt andet betyde, at udvendig facadeisolering ikke er en mulighed (Vadstrup, 2014 s. 5). Efterisolering af klimaskærmen, på den indvendige side af den eksisterende konstruktion, har store fugttekniske konsekvenser. Temperaturen i den eksisterende del sænkes, hvilket bevirker at fugtindholdet øges. Stigningen i fugtindhold øger risikoen for at fugtfølsomme materialer, som f.eks. organiske materialer, kan nedbrydes. Indvendig efterisolering kræver nøje projektering, og at den udførende har fokus på, at arbejdet skal udføres efter forskrifterne (Møller, 2012, s. 58).

Netop denne problematik er omdrejningspunkt for, og har skabt interessen i, at undersøge problemstillingen i forbindelse med en bevaringsværdig bygning, der står overfor en omfangsrig transformation, og deraf behovet for indvendig efterisolering. Bygningen er beliggende i Botanisk Have i København, og består af fuldmurede facader i tegl, hvori træbjælkelag har vederlag. Facaderne forventes efterisoleret med en forsatsvæg, eller ved benyttelse af kapillaraktive plader.

I forbindelse med disse forestående arbejder, indgår en bred vifte af bygningsfysiske parametre, der alene eller i kombination med hinanden, kan have afgørende betydning for de hygrotermiske forhold. Her tænkes f.eks. på om facadens tegl er hårdtbrændte eller mere porøse, med en porestruktur der resulterer i større vandopsugningsevne. Det kunne også være vandbelastningen, som facaden udsættes for, der til dels styres af geometriske forhold, men også af placering i landskabet samt orientering. Endvidere kan fejl i udførelsen af efterisoleringen medføre utilsigtede revner i det luft- og damptætte plan, hvilket kan have betydning for konstruktionen.

Med baggrund i ovenstående er det fundet spændende at udføre et parameterstudie, ved benyttelse af dynamiske simuleringer. Studiet tager udgangspunkt i, at facaderne indvendigt efterisoleres med kapillaraktive plader eller ved brug af en forsatsvæg med dampspærre, og undersøger betydningen af facadens orientering, dampspærrens tæthed samt indvirkning af facadeimprægnering (hydrofobering).

3.1 Problemformulering

Under hvilke betingelser kan det vurderes fugtteknisk forsvarligt at foretage indvendig efterisolering omkring træbjælkeender med vederlag i fuldmurede teglfacader?

Eftersom det kan være vanskeligt på forhånd at vide, hvilke parametre der har den største påvirkning på varme- og fugtforholdene omkring træbjælken, har indeværende rapport til hensigt at:

- *Vurdere hvordan udvalgte parametre påvirker de hygrotermiske forhold i området omkring bjælkeenden, med henblik på at fastslå de af størst betydning.*
- *Vurdere hvilke konsekvenser kapillaraktive plader eller forsatsvæg med dampspærre, i kombination med de udvalgte parametres indvirkning, har på temperatur- og fugtniveauer, og dermed fastslå om der er risiko for skader på bjælkeenden.*

3.2 Afgrænsning

I indeværende rapport fokuseres alene på de fugtmæssige konsekvenser som følge af indvendig efterisolering af en fuldmuret teglfacade. Selvom det kunne være interessant, at undersøge hvilken effekt parameterstudiets efterisoleringsprincipper bidrager med i varmetabs- og energimæssig sammenhæng, behandles dette ikke i rapporten.

I det omfang det har været relevant for denne opgaves fokus, behandles begreber i relation til varmetab og energiforbrug på et teoretisk plan i afsnit 6, da den grundlæggende varmeteor i høj grad hænger sammen med, og påvirker fugtforholdene i konstruktionen.

Efterisolering kan foruden økonomiske incitamenter også bero på ønsket om et behageligere samt sundere indeklima (Møller, 2012, s. 16). Men i dette projekt er det ikke hensigten, at undersøge hvordan efterisoleringen påvirker det samlede indeklima. Her tænkes på forhold som kuldenedfald, overtemperaturer og CO₂-niveauer med mere. Derimod behandles risikoen for skimmelvækst, som følge af efterisoleringen, og dennes potentielle indvirkning på indeklimaet.

Foruden de i rapporten indgående parametre, findes der i bygningsfysiske sammenhænge mange andre, som kunne være relevante, og som kunne tilvejebringe et endnu bredere perspektiv. Alene indenfor de 2 valgte isoleringsprincipper og de 3 udvalgte parametre, ville der f.eks. være mulighed for at justere på isoleringsmængden, medtage flere orienteringer, ændre graden af dampspærrens tæthed med mere. Eventuelle beregningsmæssige afgrænsninger/begrænsninger eller ubekendte i forbindelse med den konkrete case, beskrives for læsbarhedens skyld i de konkrete afsnit.

4 Læsevejledning

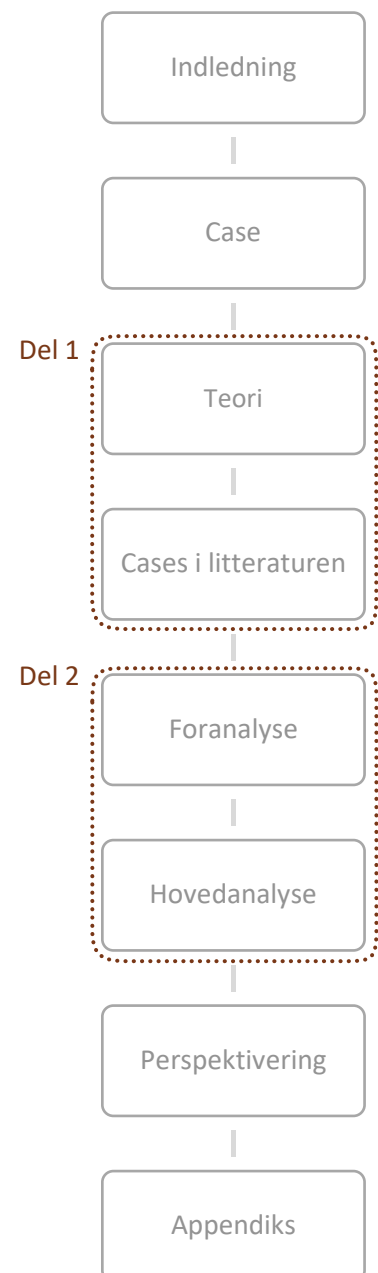
Rapporten er indledt med en overordnet beskrivelse af problematikken, der kan relateres til indvendig efterisolering af bevaringsværdige bygninger. Det er rapportens formål at svare på problemstillingen, så denne kan være til nytte i generelle sammenhænge, men med udgangspunkt i en konkret case der præsenteres i det kommende afsnit.

Efterfølgende består rapporten grundlæggende af 2 dele, hvoraf den første redegør for den bygningsfysiske teori, som er særligt betydende, når der indvendigt efterisoleres omkring træbjælkeender. I den forbindelse behandles varme- og fugtteori. I forlængelse af teoriafsnittet præsenteres erfaringer fra lignende studier, hvorved der skabes et grundlag, som resultaterne af indeværende rapport kan holdes op imod.

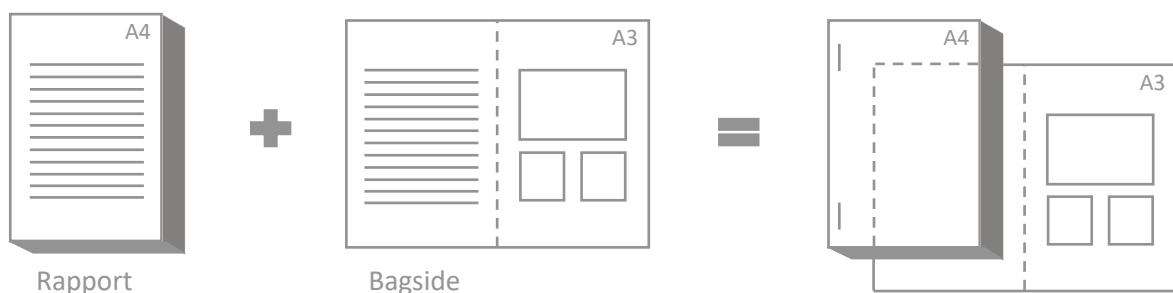
Rapportens anden del behandler resultaterne, tilvejebragt ved forskellige simuleringer og beregninger. Rapporten bygger på et parameterstudie, hvor der indgår mange variabler som har indflydelse på resultaterne. Af samme grund undersøges først udvalgte parametre (foranalyse), som jævnfør teorien og litteraturstudiet er fundet betydningsfulde. Herefter fremlægges de egentlige resultater (hovedanalyse), som danner grundlag for besvarelse af rapportens problemformulering, hvorfor rapporten principelt kan forstås uden at læse foranalysen.

Slutteligt sættes der andre perspektiver på rapportens indhold, og der redegøres for hvilke fremadrettede undersøger, som på baggrund af indværende rapport kunne være relevante. Afslutningsvis indeholder rapporten et appendiks, med resultater af simuleringer som indgår i rapportens konklusioner, men som ikke er præsenteret i deres heldhed.

Trykkes rapporten, kan den sidste side med fordel printes som et liggende A3-format og herefter samles med resten af rapporten. Bagsiden redegør for opbygningen af projektets simuleringsskemaer og datapositioner. Siden foldes ud og kan i forbindelse med hovedanalysens resultatafsnit hjælpe læseren igennem modellerne.



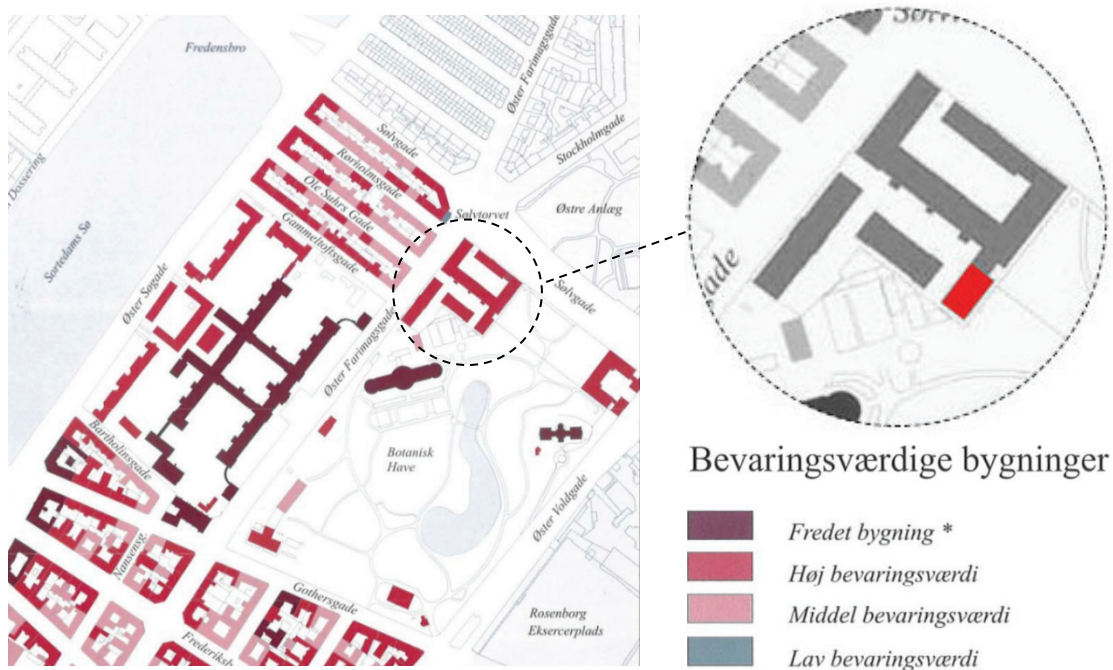
Figur 1. Viser rapportens struktur og forløb.



5 Case introduktion

5.1 Bygningen generelt

Dette projekt tager afsæt i en bevaringsværdig bygning, som står overfor en gennemgribende renovering og bygningsfysisk transformation. Bygningen er opført i 1906 og tegnet af arkitekt Johannes Emil Grudtzmann, og var en kedelbygning. Bygningen var en tilføjelse og del af en større udvidelse af den polytekniske Læreanstalt (Sølvtorvskomplekset), placeret i Botanisk Have i København. Det oprindelige anlæg blev opført i 1890 af arkitekt Johan Daniel Herholdt, som foruden sit professorembede ved den polytekniske Læreanstalt, var kongelig bygningsinspektør. Bygningskomplekset blev til, i en af de mest betydningsfulde perioder i Københavns historie, hvor voldene bliver sløjfet og brokvartererne anlagt. Bygningen er altså en del af et område med stor kulturhistorisk- og arkitektonisk værdi.

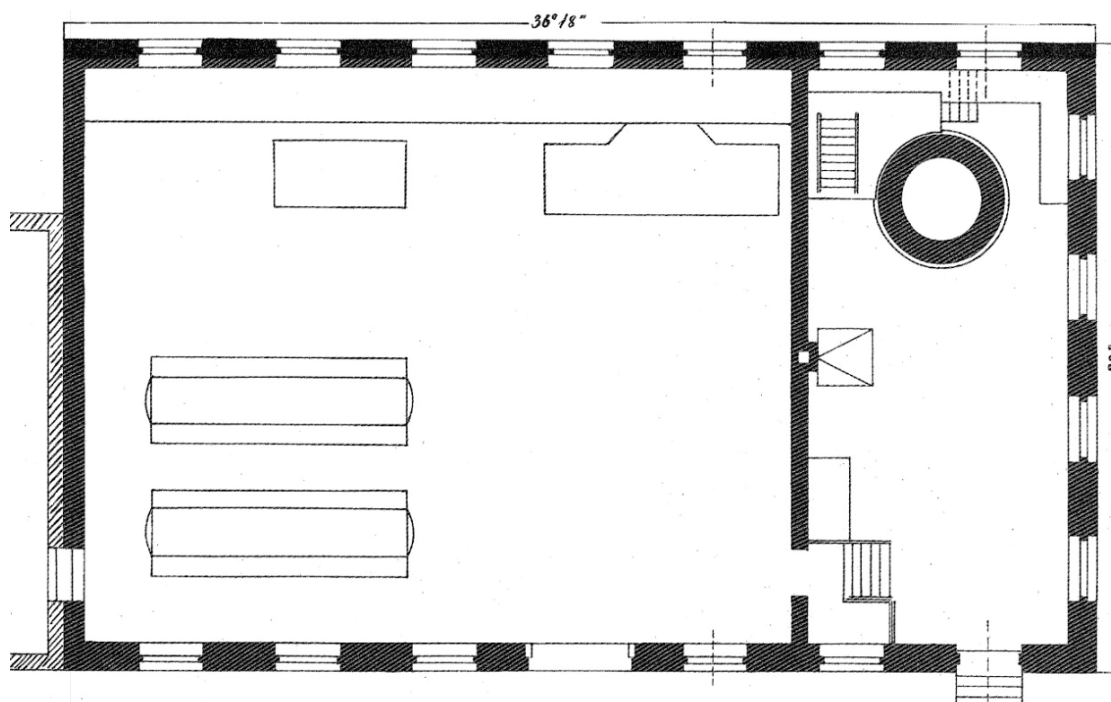


Figur 2. Er et kort over fredede og bevaringsværdige bygninger i Kbh. Af kortet fremgår blandt andet Sortedamssøen, det gamle kommunehospital og Sølvtorvskomplekset i hjørnet af Botanisk Have. Det forstørrede billede viser Kedelbygningen som rapporten omhandler (Skov- og Naturstyrelsen, 1996).

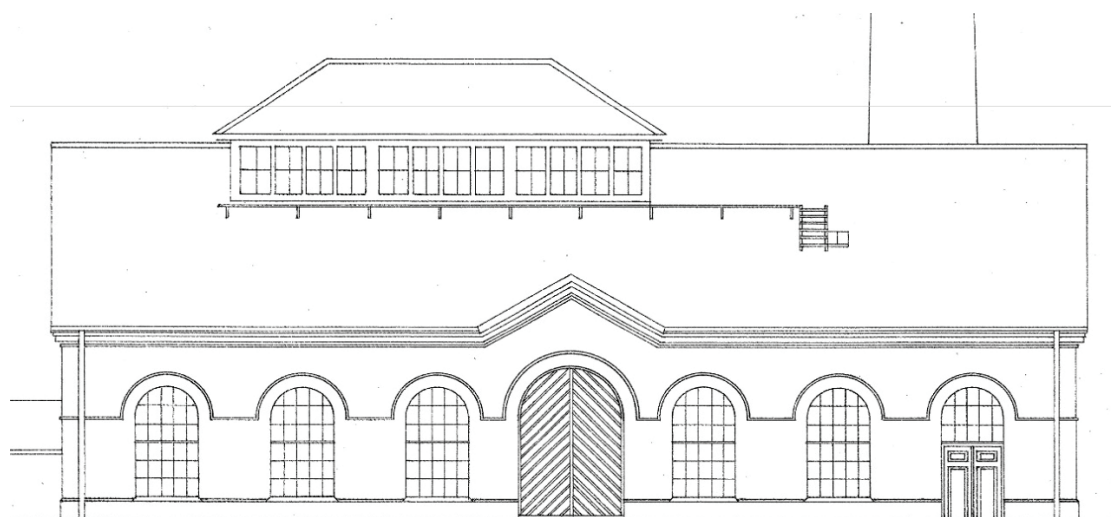
Kedelbygningen indgik tidligere som et led i kompleksets tekniske infrastruktur, hvilket tydeligt var afspejlet ved en 50 alen (ca. 32 meter) høj muret skorsten i forlængelse af bygningens kedelrum (Elgaard, Stougaard & Hammer Marts 2011, s. 1-10). Bygningens funktion har sidenhen ændret sig af flere omgange og står i dag ubenyttet hen. Den ændrede anvendelse har bevirket, at bygningen ikke fremstår i sin originale stand. De fuldmurede facader og den ventilerede tagkonstruktion er i dag indvendigt efterisoleret.

I de kommende år vil arbejdet med at etablere Danmarks nye naturhistoriske museum i Botanisk Have pågå. Her vil kedelbygningen på ny ændre funktion, og skal i fremtiden fungere som cafe for museums- og havebesøgende. Det ønskes for så vidt muligt at bringe bygningen tilbage til sin oprindelse, i forbindelse med opførelsen af det nye museum.

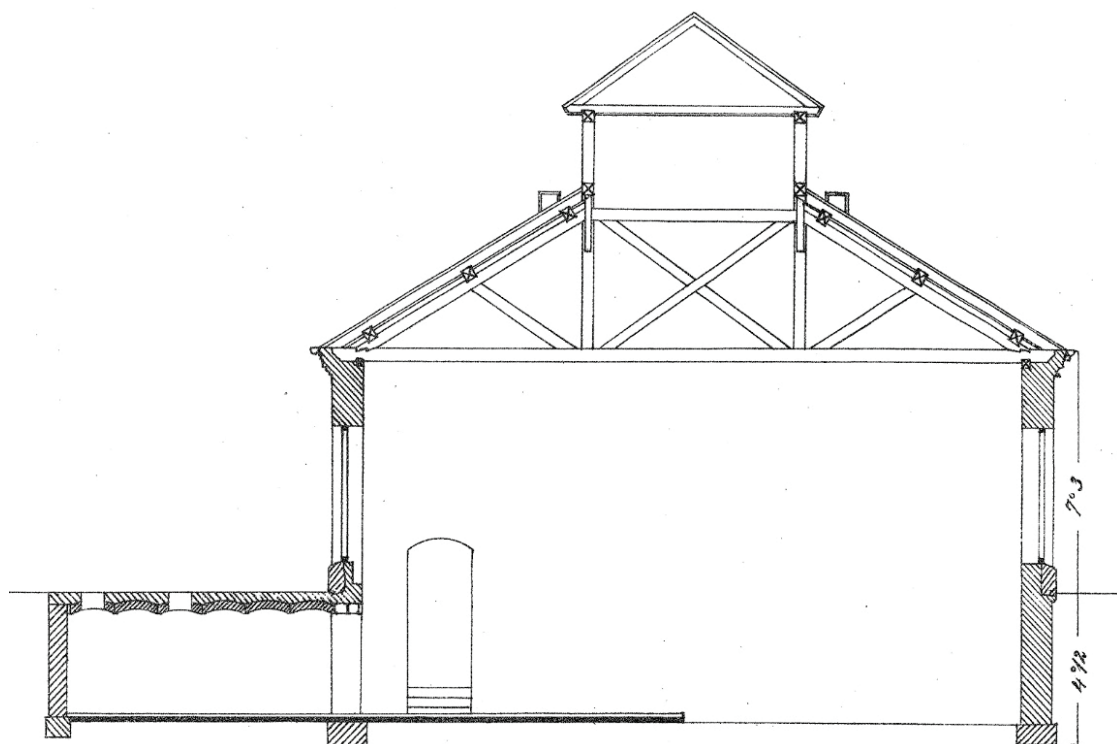
5.2 Tegningsmateriale



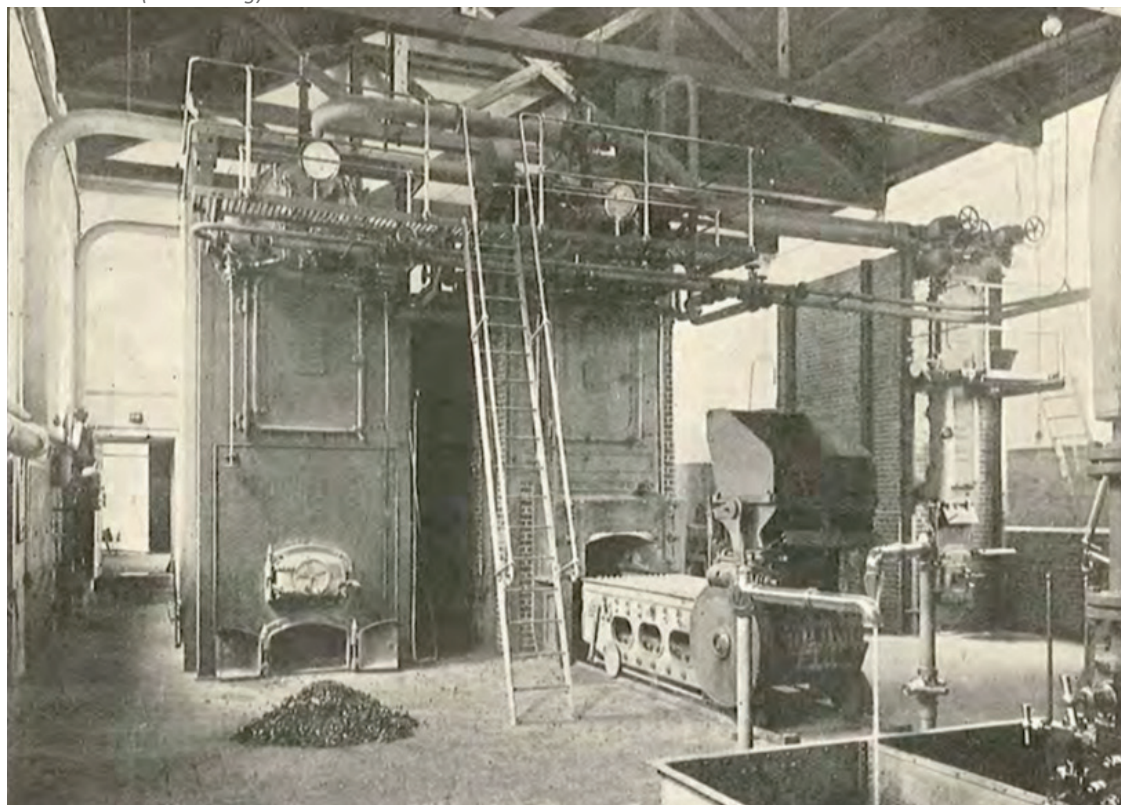
Figur 3 Er en original plantegning af kedelbygningen, med det store kedelrum til venstre og en mindre værkstedsfunktion, omkring den nu nedlagte skorsten. Husets målsætning svarer til ca. 23 x 14 meter.



Figur 4. Er en original facadeopstalt af kedelbygningen. Facaderne er enkle og uden større udsmykning, sammenholdt med de resterende bygninger i komplekset.



Figur 5. Er et originalt tværsnit af kedelbygningen med anvisning af spærfagernes opbygning og deres udstrækning/vederlag i facaden. Den samlede facadekonstruktionen er ca. 7 meter høj, hvoraf ca. 2,5 meter er under terræn (kældervæg).



Figur 6. Viser kedelrummet i sin originale funktion, hvor dampkedlen fyres med kul via en vandrerist. Endvidere kan man ane, hvordan facaden er muret op omkring spærfagene og slutter tæt til den første ås (BR 722_BILAG 7 oprindelige tegninger, 2011).

5.3 Nuværende forhold



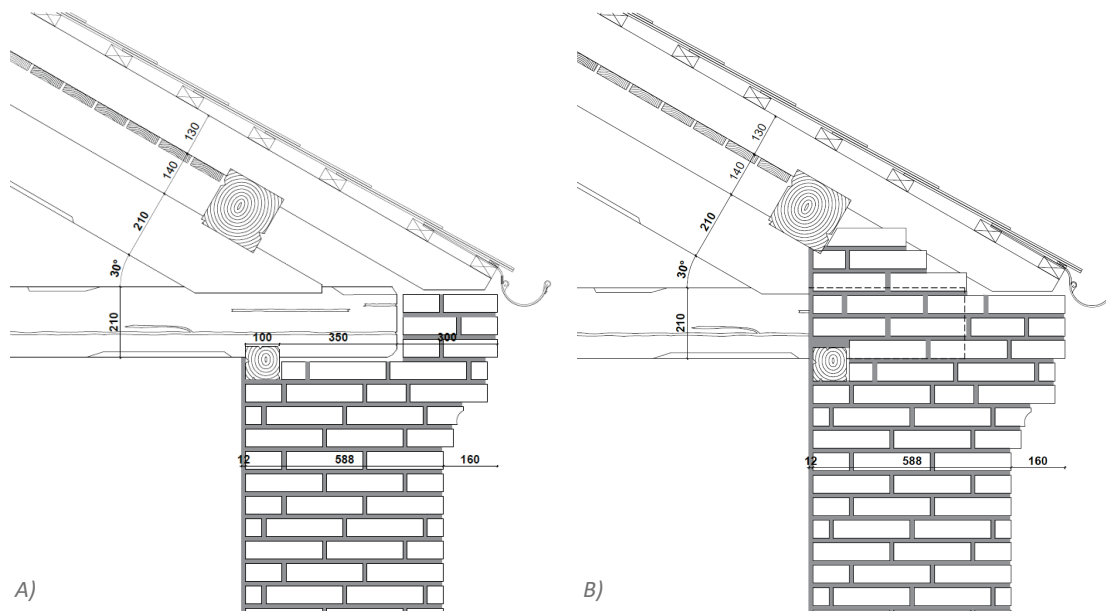
Figur 7. Viser hvordan kedelrummet ser ud i 2019, 113 år efter opførelsen af kedelbygningen.

Forskellene mellem 1906- og 2019-udgaven af kedelrummet fremgår tydeligt, når de oprindelige forhold sammenlignes med de nuværende forhold. Der er indført en dækkonstruktion i niveau med terræn, og derved etableret en kælder i bygningen. Tagkonstruktionen er efterisoleret i en grad, så dele af spærfagene ikke længere er synlige. Facader og gavle fremstår heller ikke i deres originale stand. De er efterisoleret med en let konstruktion, som bevirker at de to yderste spærfag tættest på gavlene, er pakket væk. Bjælkeenderne er på nuværende tidspunkt indvendigt efterisoleret som følge af efterisolering af både facader og tag.

Som en del af de kommende byggearbejder indgår bortskaffelse af alle de nævnte tiltag (EKJ, 2019). I første omgang bringes konstruktionerne tilbage til den oprindelige udgave, hvorefter nye arbejder kan udføres, i fald den oprindelige klimaskærm er i god stand.

I efteråret 2018 blev tilstanden af kedelbygningen undersøgt, med særligt fokus på kældervæg og facade. Der blev foretaget mindre åbninger i den nuværende efterisolering, som viste sig at være op imod 200 mm. Endvidere blev der foretaget temperatur- og fugtlogning i kedelrummet samt i væggen. Undersøgelserne kunne konkludere, at der optræder kritiske hygrotermiske forhold i området mellem den oprindelige vægoverflade og efterisoleringen (Silvestru, Olsen, Jahr & Møller, 2018). Det kan indikere, at der i området omkring bjælkeenden findes tilsvarende forhold. Af såvel bygningsfysiske som arkitektoniske hensyn, tager indeværende projekt udgangspunkt i de oprindelige forhold. På baggrund af disse, undersøges de hygrotermiske påvirkninger ved af etablering af en forsatsvæg, eller ved brugen af kapillaraktive plader.

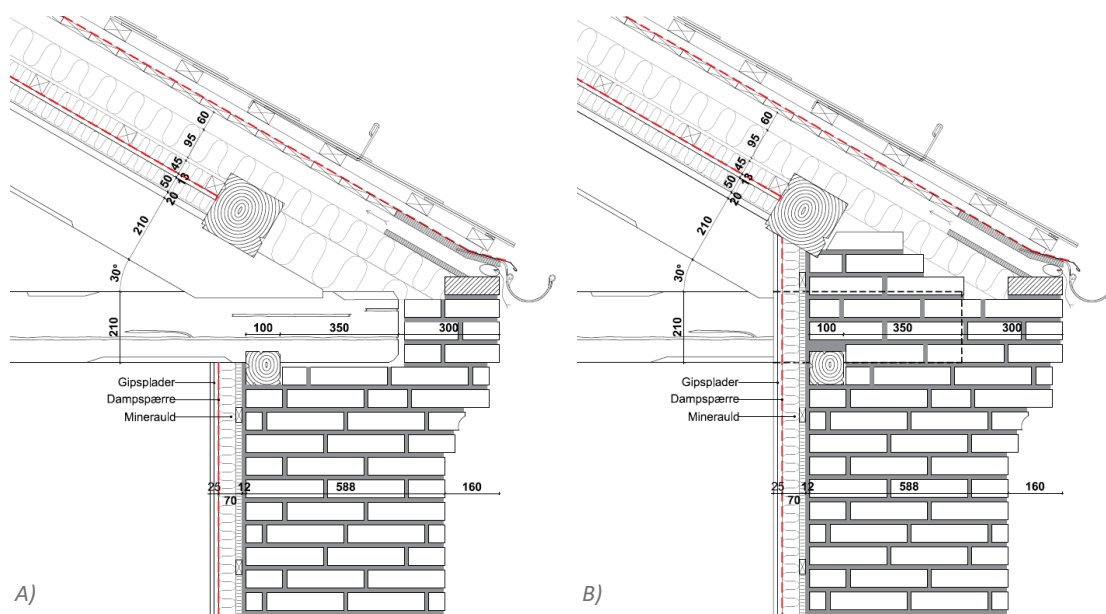
5.4 Oprindelig samlingsdetalje



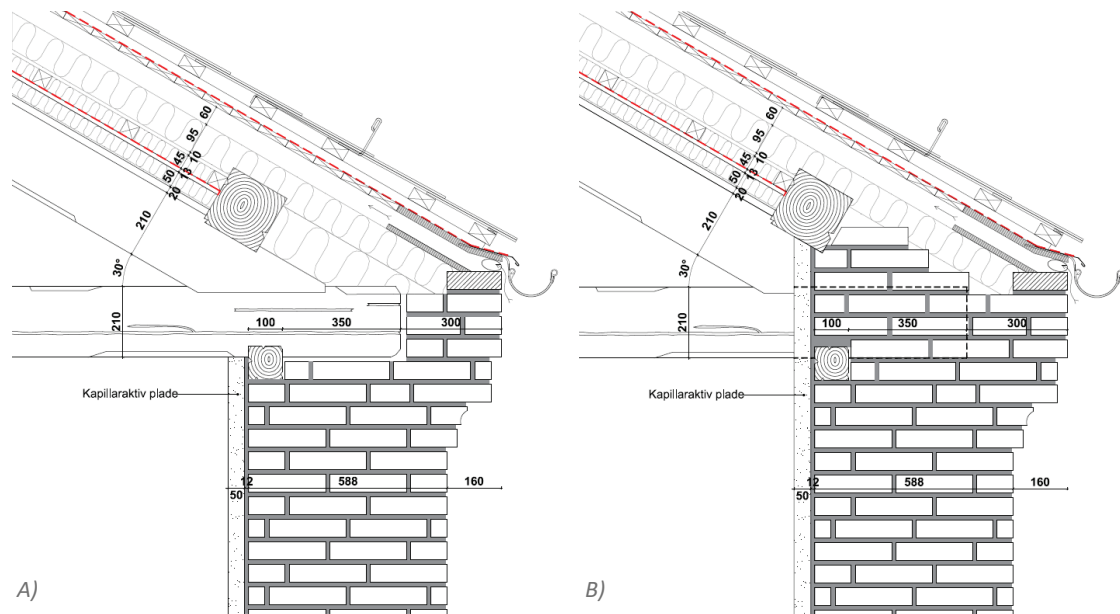
Figur 8. A) viser antaget detaljeudformning i bjælken. B) viser antaget detalje i normalsnittet.

Ud fra det oprindelige tegningsmateriale og gamle billeder, forventes det at spærfagene hviler af på en gennemgående rem i træ, der sender kræfterne videre til teglfacaden. Ovenstående detaljer er udført på baggrund af det oprindelige tegningsmateriale fra kapitel 5.2. Der indgår i alt 6 spærfag af fuldtømmer med 3 tværspændende åse, hvorpå bjælkespærerne er udlagt, og tagdækningen i form af naturskifer er fastgjort.

5.5 Fremtidig samlingsdetalje



Figur 9. A) viser forsatsvægens møde med bjælkeenden. B) viser hvordan forsatsvæggen udføres i normalsnittet. Dampspærren og undertaget (tagpap) er vist med rød. Dampspærren forventes udført efter anvisninger i SBI-221.



Figur 10. A) viser den kapillaraktive plades møde med bjælkeenden. B) viser hvordan de kapillaraktive plader udføres i normalsnittet. Der indgår kun en dampspærre i taget, denne samt undertaget (tagpap) er vist med rød.

Med afsæt i ovenstående tegninger kan det udledes, hvordan bjælkeende-detaljen kan tage sig ud, med anvendelse af en forsatsvæg eller ved benyttelse af kapillaraktive plader. Den præcise isoleringsmængde i taget er ukendt. Tagdækningen er for nyligt skiftet, og i indeværende rapport antages det, at taget i samme omgang er efterisoleret med 95 mm mineraluld ($\lambda = 0,032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Der tilføres yderligere 95 mm i forbindelse med de forestående byggearbejder, hvorfor dette projekts simuleringer udføres med i alt 200 mm ($\lambda = 0,032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$).

Udgaven med en forsatsvæg er tegnet efter anvisninger fra membran-erfa.dk. skeletkonstruktionen friholdes fra den oprindelige indvendige overflade, ved hjælp af afstandsklodser i plast. Væggen isoleres med 70 mm mineraluld ($\lambda = 0,032 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) og umiddelbart inden konstruktionen lukkes med 2 gipsplader, monteres en PE-folie (luft- og damptæt plan).

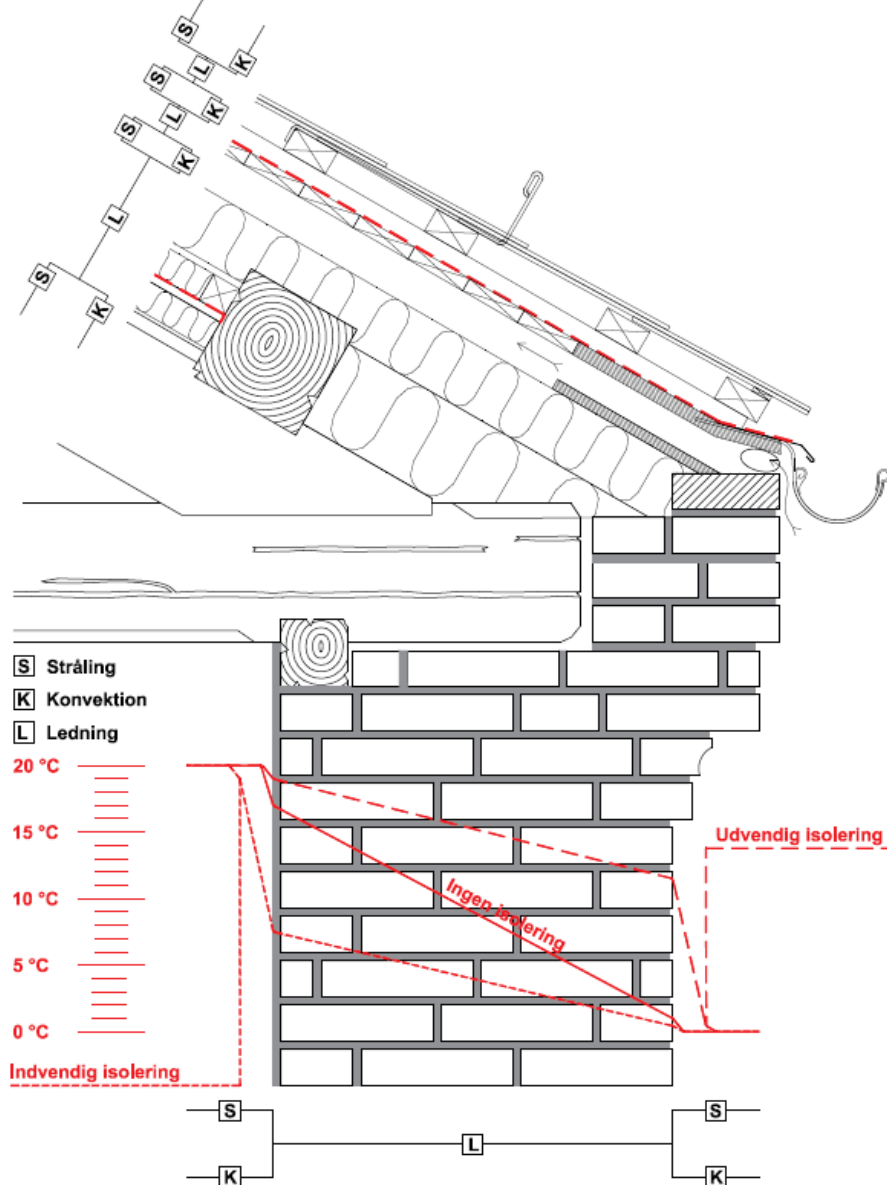
Udgaven med kapillaraktive plader består udelukkende af pladerne, der fuldklæbes til overfladen. I dette tilfælde anvendes pladetykkelser på 50 mm ($\lambda = 0,043 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). De specifikke materialeegenskaber, som de enkelte dele besidder, redegøres der for i metodeafsnittet, og en dybere bygningsfysisk gennemgang af efterisoleringsprincipperne fremgår af teoriafsnittet.

6 Teori

6.1 Varmetransport

6.1.1 Generelt

Transport af varmeenergi kan i bygningsfysiske sammenhænge relateres til 3 forskellige mekanismer, som hver for sig -eller i kombination- flytter energi fra varmt mod koldt. Der er tale om henholdsvis strålingsudveksling, konvektion samt varmeledning. Rapportens udgangspunkt i en fuldmuret teglfacade bevirker at varmetransport og varmetab, primært tilskrives varmeledning. Varmeteorien behandler derfor stråling og konvektion på et generelt plan, hvorefter følgerne af varmeledningen præsenteres indgående.



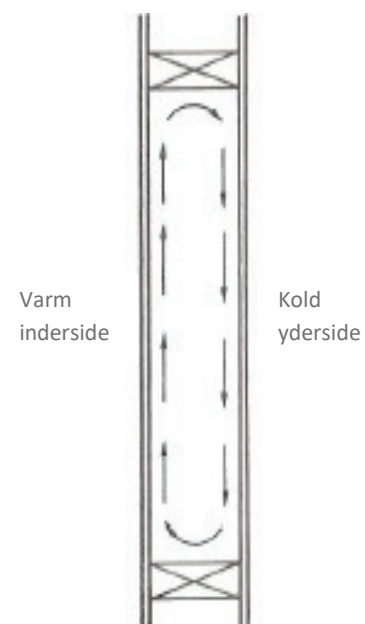
Figur 11. Viser den dominerende varmetransport mekaniske igennem konstruktionen og temperaturgradienten som funktion af isoleringens placering. Isoleringens tykkelse er 50 mm og lambdaværdien er 0,043 W/m·K. Temperaturforskellen er 20 °C.

6.1.2 Stråling

Strålingsudveksling finder sted, i fald at modstående overflader har forskellige overfladetemperaturer, hvorved der overføres energi i form af elektromagnetisk stråling. Varmestrålingstyperne består af ultraviolet- og infrarød stråling samt synligt lys i bølgelængder mellem $0,01\mu\text{m}$ og $100\mu\text{m}$. Alle legemer/overflader modtager og afgiver konstant varmemstråling, hvor effekten afhænger af temperaturen og den konkrete overflades egenskaber, som reflektans samt transmittans. I praksis betyder det, at en del af den stråling der rammer en overflade, enten vil reflekteres, absorberes i materialet som varmeenergi eller transmitteres igennem. For de mest almindelige byggematerialer er strålingsevnen (emissivitet) 0,90 hvorfor reflektansen er 0,10, hvilket betyder at materialerne primært vil absorbere indkommende stråling (Vej-Hansen & Rode, 2010, s. 49-60). Et konkret eksempel hvor ovenstående er meget relevant, er i forbindelse med emissionsbelægninger på ruder. Her er det i energimæssige sammenhænge vigtigt at kende til forholdet mellem langbølgestråling som slipper ind, og kortbølgestråling der slipper ud (Nielsen & møller, 2017, s. 15).

6.1.3 Konvektion

Konvektion er stoftransport i væske eller gas, drevet af temperaturdifferencer, hvor varmeenergien flyttes igennem bevægelse. Konvektion i luft kan tilskrives naturlige drivkræfter (naturlig konvektion) eller overstyres f.eks. ved brug af ventilator (tvungen konvektion). Den naturligt drevne konvektion opstår som følge af massefyldeforskelle forårsaget af forskelle i temperatur. Varm luft er lettere (mindre densitet) end kold luft, hvorfor den varme luft vil stige, og den kolde vil dale. Et eksempel kunne være en lodret spalte i en konstruktion, hvor overfladerne har forskellige temperaturer (se Figur 12). Her opstår en cirkulær luftbevægelse hvilket bidrager til den samlede varmetransport gennem konstruktionen. Når konvektionen er tvungen, er det som nævnt en ydre påvirkning, der sætter luften i bevægelse. Det kan være vindtrykket som gennem utætheder i det vindtætteplan, skaber en luftstrøm i konstruktionen, og derved på tilsvarende vis bidrager til varmetransporten (Nielsen & møller, 2017, s. 11-13).



Figur 12. Viser hvordan luften bevæger sig som konsekvens af forskellige overfladetemperaturer.

6.1.4 Varmedledning

Varmedledning er overførelse af energi i faste stoffer, væsker og gasser. Transporten sker ved at molekyler med høj bevægelsesenergi, ved tilfældelige stød overfører energi til molekyler med lav bevægelsesenergi (Vej-Hansen & Rode, 2010, s. 1-5).

Når følgerne af varmedledning skal undersøges, må varmedledningsevnen også omtalt som λ -værdien kendes. Materialekonstanten λ [$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$] er i princippet ikke konstant, eftersom

fugtindhold og temperatur påvirker materialets evne til at lede varme. I mange henseender kan det være tilstrækkeligt at regne med stationære forhold, hvorfor der ses bort fra varierende materialeegenskaber.

Med udgangspunkt i det tidligere anviste diagram (se Figur 11), hvor facaden består af 600 mm tegl ($\lambda = 0,8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) og 50 mm isolering i form af kapillaraktive plader ($\lambda = 0,043 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), kan lagenes isolans (varmemodstand) beregnes på følgende vis:

Bestemmelse af isolans, R

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (6.1)$$

Hvor

d er lagets dimension [M]

λ er varmeledningsevnen $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$

Af udtrykket bestemmes isolansen [$\text{m}^2\text{K/W}$] til 1,16 for de kapillaraktive plader og 0,78 for teglet. Konstruktionens samlede varmemodstand består endvidere af overgangsisolanserne mellem den fri luft og overfladen. Varmeovergangen er sammensat af konvektion og stråling. I bygningsfysiske sammenhænge har de almindvis mindre betydning, og faste værdier fra DS418 kan anvendes. I dette eksempel benyttes 0,13 [$\text{m}^2\text{K/m}$] for den indvendige og 0,04 [$\text{m}^2\text{K/m}$] for den udvendige overgangsisolans, hvorved den samlede isolans bestemmes som:

Konstruktionens samlede isolans, R_{total}

$$R_{\text{total}} = R_{si} + \sum \frac{d}{\lambda} + R_{se} \quad (6.2)$$

Hvor

d er lagets dimension [M]

λ er varmeledningsevnen $\left[\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right]$

R_{si} er indvendig overgangsisolans $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$

R_{se} er udvendig overgangsisolans $\left[\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}\right]$

Resultatet er 2,08 [$\text{m}^2\text{K/W}$], og med dette kendskab kan transmissionskoefficienten (U-værdien) bestemmes som den reciproke værdi af den samlede varmemodstand og som:

Bestemmelse transmissionskoefficient, U

$$\frac{1}{U'} = R_{si} + R_{se} + \sum_{i=1}^n R_i \quad (6.3)$$

Hvor

U' er den ukorrigerede transmissionskoefficient i $\text{W/m}^2\text{K}$

R_{si} er overgangsisolans ved den indvendige overflade i $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

R_{se} er overgangsisolans ved den udvendige overflade i $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

R_i er isolans for de enkelte lag i $\frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}}$

n er antallet af lag

Konstruktionens ukorrigerede U-værdi er altså 0,48 [W/m²K], og udtrykker det varmetab, som finder sted igennem en kvadratmeter med en temperaturdifferent på 1 kelvin. På tilsvarende vis kan klimaskærmens resterende 1-dimensionale transmissionskoefficienter bestemmes, og efterfølgende indgå i beregning af f.eks. det dimensionerende transmissionstab (Nielsen & Møller, 2017, s. 2-6).

Foruden det varmetab som kan relateres til de 1-dimensionale strømninger, kan kuldebroer give anledning til fler-dimensionale varmestrømme. De linje- og eller punkttab der opstår som følge af kuldebroer, kan være anseelige og betyde relativt mere, når normalkonstruktionen er velisoleret, eller i fald at konstruktionen senere indvendigt efterisoleres (Wagner, Maagaard, Worm, Thamdrup, Weitzmann, Kamper, Knudsen, 2018, s. 12-19). I indeværende rapport er fokus lagt på de hygrotermiske konsekvenser, som indvendig efterisolering omkring bjælkeender i murværk (kuldebro) medfører. Derfor er bestemmelsen af temperaturfaldet over de indgående materialeg, og derved optegning af temperaturgradienten, af stor betydning. Det gælder særligt i forbindelse med indvendig efterisolering, hvor temperaturen i grænselaget mellem den oprindelige overflade og efterisoleringen kan medføre kritiske hygrotermiske forhold. Temperaturfaldet kan relateres til materialets varmeledningsevne, hvor faldet over velisolerende materialer (høj isolans) er stort, og skal desuden bestemmes i relation til konstruktionens samlede isolans (Nielsen & Møller, 2017, s. 6-7), som her angivet:

Bestemmelse af temperaturfald, $\Delta\theta_m$

$$\Delta\theta_m = \left(\frac{R_m}{\Sigma R} \right) (\theta_{inde} - \theta_{ude}) \quad (6.4)$$

Hvor

R_m er lagets isolans

ΣR er konstruktionens samlede isolans

Ved en temperaturdifferent på 20 °C (indeluft på 20 °C og udeluft på 0 °C) kan det udledes, at temperaturen i grænselaget mellem den oprindelige overflade og de kapillaraktive plader er ca. 7.6 °C. Var tilsvarende isolans placeret på den udvendige side af teglfacaden, ville temperaturen i samme område være 18.8 °C. Det er altså ikke uden betydning, på hvilken side efterisoleringen placeres, hvilket også fremgår af Figur 11, hvor temperaturgradienterne er indtegnet. Foruden varmetab, varmestrømninger og derfra afledte temperaturer, er fugt af afgørende betydning i forbindelse med den hygrotermiske ydeevne. I det følgende afsnit behandles fugtteorien og dennes indvirkning.

6.2 Grundlæggende fugtteori

6.2.1 Luftens bestanddele

I et porøst byggemateriale påvirkes fugtindholdet blandt andet af den omgivende lufts tilstand. Selvom luften for langt de fleste parametre er nærmest ens over hele kloden, så er der et forhold, som er særligt varierende, og det er indholdet af vanddamp. Den atmosfæriske luft består af en blanding af luftarter (gasser), der samlet yder det normale atmosfæretryk. Trykket bestemmes som partialtrykket af tør luft plus partialtrykket for vanddamp.

Indholdet af vanddamp/fugt i luften kan betragtes som vanddampindholdet [kg/m^3], vanddampens partialtryk [$\text{Pa} = \text{N}/\text{m}^2$] eller absolut vandindhold [kg/kg].

Partialtrykkets sammenhæng med vanddampindholdet kan bestemmes ved idealgasloven, hvorefter vanddampindholdet kan defineres som (Brandt, 2013, s. 14-16):

Vanddampindholdet, V

$$V = \frac{P_v}{461,4 \times T} \quad (6.5)$$

Hvor

T er den absolutte temperatur [K]

Konstanten 461,4 har enheden $\left[\text{Pa} \times \frac{\text{m}^3}{\text{kg} \times K} \right]$

6.2.2 Relativ luftfugtighed

Mængden af vanddamp en given luft kan indeholde, bestemmes af temperaturen. Jo højere temperatur, desto større er luftens potentiale til at indeholde vanddamp. Det maksimale indhold (mætningsdamptrykket) kan tilnærmet bestemmes som:

Mætningsdamptryk, P_m

$$P_m = 610,5 \times e^{\frac{17,269\theta}{237,3 + \theta}} \text{ for } \theta \geq 0^\circ\text{C} \quad (6.6a)$$

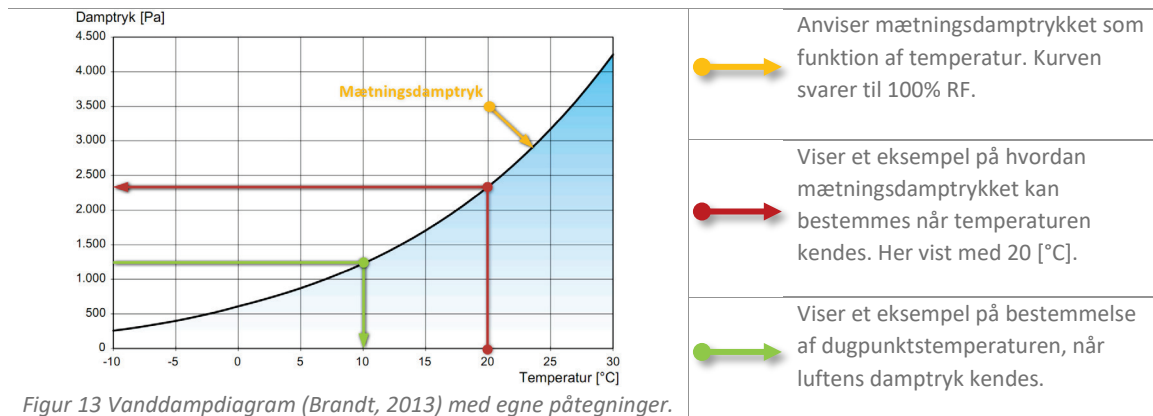
$$P_m = 610,5 \times e^{\frac{21,875\theta}{265,5 + \theta}} \text{ for } \theta < 0^\circ\text{C} \quad (6.6b)$$

Hvor

P_m er vanddamps partialtryk ved mætning

θ er temperaturen i $^\circ\text{C}$

Bestemmelsen af luftens damptryk og temperatur udtrykkes ofte i diagramform (se Figur 13). Er luftens temperatur f.eks. 20°C kan det ved hjælp af et vanddampdiagram udledes, at luftens mætningstryk er ca. 2340 [Pa] . Tilsvarende er det muligt at bestemme minimumstemperaturen, hvorved luften kan bære den aktuelle vanddamp. Tilføres yderligere vanddamp eller sænkes temperaturen, udskilles vanddampen som vand.



Figur 13 Vanddampdiagram (Brandt, 2013) med egne påtegninger.

I bygningsfysisk sammenhæng benyttes begrebet relativ luftfugtighed ofte til at beskrive luftens aktuelle vanddampindhold, der bestemmes af efterfølgende udtryk:

Relativ luftfugtighed, RF

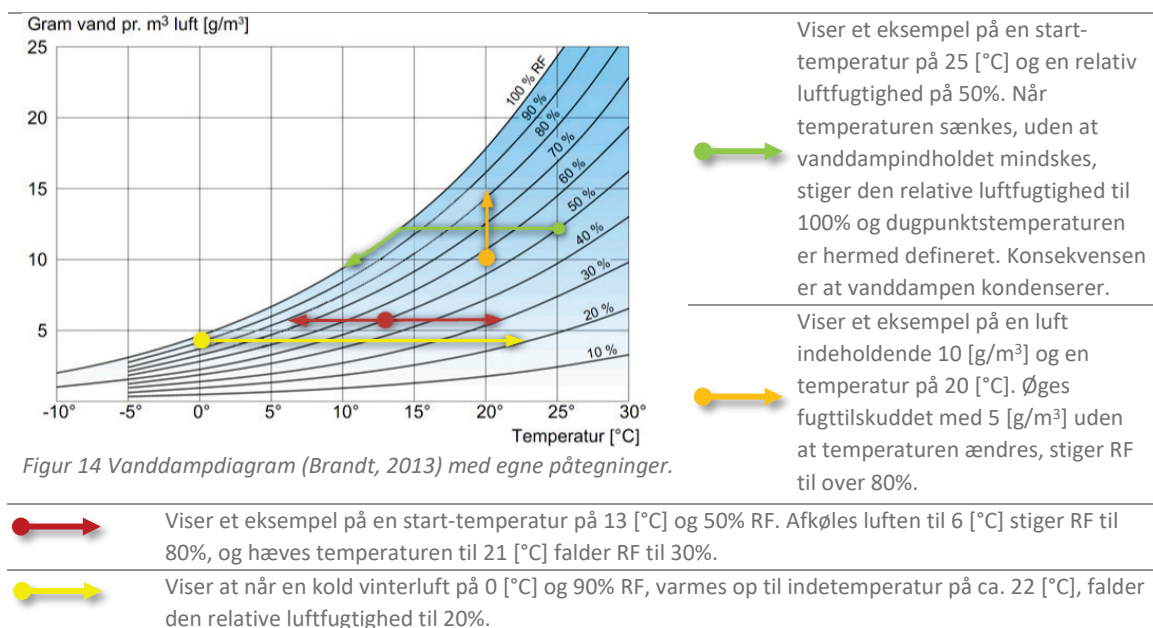
$$RF = \frac{V_{\text{aktuel}}}{V_m} \quad (6.7)$$

Hvor

A_{aktuel} angiver det tilstedeværende vanddampindhold

V_m angiver det maksimalt mulige vanddampindhold

Af ligningen kan det udledes, at når temperaturen falder, så stiger den relative luftfugtighed og omvendt, hvis vanddampindholdet forbliver det samme. Forbliver temperaturen den samme, men luftens vandindhold ændres, falder eller stiger den relative luftfugtighed på tilsvarende vis. Upåagtet af om det er en ændring i temperatur eller vanddampindhold, der måtte resultere i, at luftens damptryk [Pa]/vandindhold [g/m³] overstiger luftens maksimale potentiale (mætningsdamptrykket), er resultat det samme. Al fugten over dugpunktstemperaturen, må udfældes som fugt i væskeform (Brandt, 2013, s. 17-20).



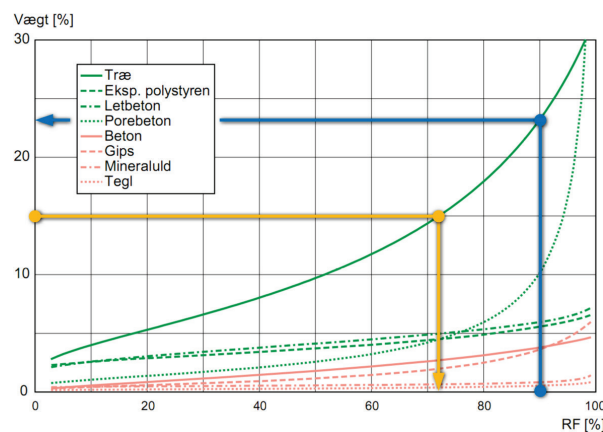
6.2.3 Absolut vandindhold

I forlængelse af teorien omhandlende relative luftfugtigheder, rettes fokus i dette afsnit på definitionen af absolut fugt og tilknytningen til den relative luftfugtighed.

Porøse materialer (hygroskopiske) søger altid ligevægt med den omgivende lufts varme- og fugtforhold. Det betyder at materialet vil afgive eller optage fugt, indtil ligevægten (balancen) mellem damptrykket i porestrukturen er svarende til damptrykket i luften. Luftens konditioner er let påvirkelige og er sjældent stabile i lange perioder. Derfor sker der en kontinuerlig vægtændring som konsekvens af, at fugt frigives eller tilføjes porernes overflader.

Fugtindholdet i materialet og sammenhængen med den relative luftfugtighed er materialebestemt. Eksempelvis indeholder træ mere vand, målt i vægtprocent, end eksempelvis tegl. Det skyldes kombinationen af mange grove porer i træets celler samt talrige porer af fin karakter, i cellernes vægge, der samlet udgør en meget stor indre overflade, som vandet absorberes til.

Forholdet mellem materials fugtindhold i vægtprocent, og den relative luftfugtighed, kan bestemmes ved hjælp af fugtligevægtskurver. Kurverne er meget forskellige alt efter materiale, og også indenfor den enkelte materialekategori kan der optræde store forskelle. Kurverne er endvidere temperaturafhængige og når materialer f.eks. bliver udsat for salte, vil kurveforløbet påvirkes. Fugtligevægtskurverne består i princippet af absorptions- og desorptionskurver (opfugtning og udtørring), der kobles til hinanden via en hysteresesløjfe. Indenfor den bygningsfysiske verden ses der normalt bort fra disse forhold, hvorfor der arbejdes med en gennemsnitsværdi, kaldet sorptionskurve (Brandt, 2013, s. 29-34).



Figur 15 Sorptionsgraf (Brandt, 2013) med egne påtegninger.

Viser et eksempel hvor træfugten i en træklods er bestemt til 15 vægt [%], hvilket indikerer at klodsen er i ligevægt med en relativ luftfugtighed på lidt over 70%.

Viser et eksempel hvor den relative luftfugtighed er bestemt til at være 90%. Når ligevægten har indfundet sig, er træfugten steget til ca. 23 vægt [%].

6.3 Fugttransport

6.3.1 Generelt

Tilsvarende varmelæren, er potentialeforskellen essentiel i forbindelse med fugttransport. Hvor det er temperaturdifferencer i varmelæren der resulterer i transport af varmeenergi, er potentialet i fugtlæren f.eks. vanddamptryk eller vanddampindhold (Brandt, 2013, s. 40-41). Generelt kan fugttransport beskrives som:

Fugttransport, g_x

$$g_x = -k \frac{d\psi}{dx} \quad (6.8)$$

Hvor

g_x er fugtstrømmen i x – retningen

ψ er potentialet

x er længdekoordinaten

k er transportkoefficienten

Transportkoefficienten vælges i sammenhæng med det valgte potentiale.

I det følgende uddybes de væsentligste fugttransportmetoder. De kan i princippet optræde samtidigt og i flere retninger, hvilket er tilfældet i forbindelse med den detalje rapporten omhandler.

6.3.2 Diffusion

Fugttransport via diffusion sker som følge af vandmolekylernes bevægelse, og drives af forskelle i damptryk/vanddampindhold. Fugten flyttes altid i retning af lavere tryk/vanddampindhold. Molekylerne er i gasfasen temperaturafhængige, men de kan bevæge sig uafhængigt af hinanden. Ved blanding af inhomogene luftarter vil molekylerne over tid søge en jævn fordeling. Fugt der flyttes ved vandmolekylernes bevægelser, betegnes diffusion (Brandt, 2013, s. 42).

Diffusion finder også sted i, ud af eller igennem materialer der ikke er 100% damptætte (porøse materialer). Materialernes vanddampdiffusionsmodstand afhænger af porestrukturen. Med finere porer øges sandsynligheden for sammenstød mellem dampmolekylerne og porevæggene i materialet. Porestrukturen er altså afgørende for, hvorvidt et molekyle støder sammen med et andet molekyle, eller møder en modstand, f.eks. i form af en porevæg. Modstanden (vanddampdiffusionsmodstand) af materialer med en fast tykkelse, udtrykkes i Danmark ofte ved en Z-værdi, defineret som følgende (Brandt, 2013, s. 43).

Vanddampdiffusionsmodstand, Z_p

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p} \left[\frac{Gpa \text{ s m}^2}{kg} \right] \quad (6.9)$$

Hvor

d er tykkelsen af materialet (i strømningsretningen)

δ_p er vanddamppermeabiliteten

I forbindelse med fugttekniske dimensioneringer, er det interessant at bestemme damptryksforskellen over de indgående materialelag. Under stationære forhold hvor det alene ønskes at belyse konsekvenserne af vanddampsdiffusion, kan damptryksforskellen over et givet lag bestemmes som:

Damptryksforskellen over et givet lag, Δp

$$\Delta p = \frac{Z}{Z_{tot}} (p_2 - p_1) \quad (6.10)$$

Hvor

Z er diffusionsmodstanden over det betragtede lag

Z_{tot} er den totale diffusionsmodstand

p er damptryk hvorfor $(p_2 - p_1)$ er damptryksforskellen

Og fugttransporten [$\text{kg}/\text{m}^2\text{s}$] kan bestemmes som:

Fugttransport, g

$$g = \frac{\Delta p}{\sum Z} \quad (6.11)$$

Hvor

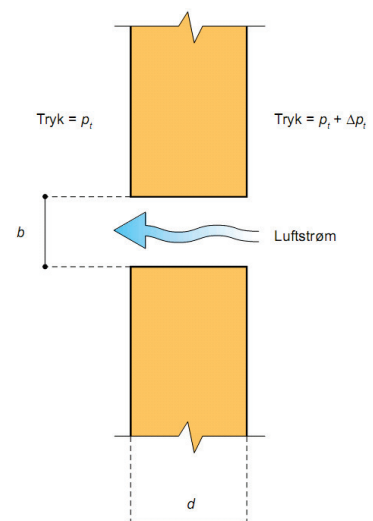
Δp er damptryksforskellen

6.3.3 Fugtkonvektion

Luft indeholdende vanddamp, der flyttes med en luftstrøm, er fugtkonvektion. Luftstrømmen opstår som følge af trykdifferencer, der kan være forårsaget af naturlige drivkræfter, som f.eks. vindtryk eller forskelle i temperatur. Forskellen i lufttryk kan naturligvis også være forårsaget af mekaniske ventilationssystemer, der ændrer de naturlige trykforhold. Når der opstår trykforskel over en konstruktion og retningen er indefra og ud i en koldere konstruktion, vil det bevirke, at den relative luftfugtighed stiger. Vendes transportretningen, vil resultatet en kold vinterdag være, at den relative luftfugtighed inde, vil dale.

Konvektion kan finde sted i meget porøse materialer, som f.eks. mineraluld med lav densitet. Normalt er fugtkonvektion igennem materialer uden betydning, men ved eventuelle utætheder i klimaskærmen eller i det luft- og damptætte plan, er det ikke uanseelige fugtmængder der transporteres. Ved revner eller huller som er $\geq 0,1 \text{ mm}$, vil diffusion normalt være den dominerende transportmekanisme. Ved større utætheder kan fugtkonvektion overgå diffusionsbidraget, hvilket i praksis ofte er tilfældet.

Beregning af luftstrømme igennem utætheder er kompliceret, hvorfor der anvendes tilnærmede formler, hvori de geometriske forhold tages i betragtning (Brandt, 2013, s. 46-48). Ved revner og huller i lag hvor $b < d$ kan strømmingen tilnærmet bestemmes som:



Figur 16. Viser luftstrømning gennem en utæthed, som følge af trykforskel.

Luftstrømning, L

$$L = cAb^2 \frac{\Delta p}{d} \quad (6.12)$$

Hvor

c er en korrektionsfaktor, som for huller er ca. 4600 [Pa s]^{-1} og for revner er ca. 1700 [Pa s]^{-1}

Ved revner og huller i lag hvor $b > d$ kan strømmingen tilnærmet bestemmes som:

Luftstrømning, L

$$L = c A \Delta p^{0,5} \quad (6.13)$$

Hvor

c er ca. $0,8 \text{ [m/(s Pa}^{0,5})]$

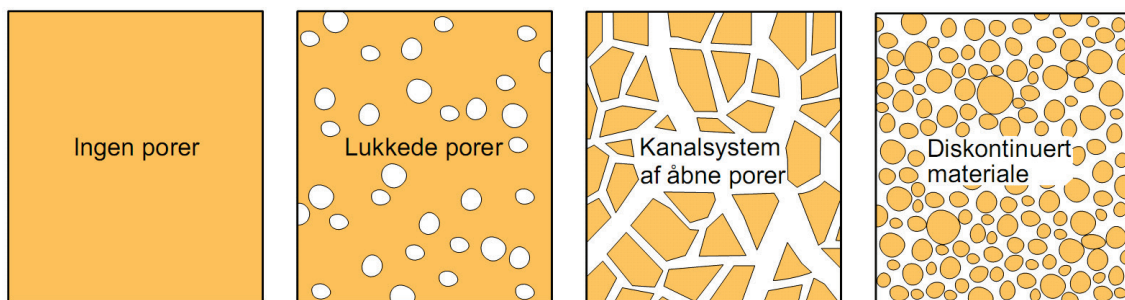
Er luftmængden L og fugtindholdet bestemt, kan den transporterede fugtmængde bestemmes som:

Fugtmængde, G

$$G = L v \quad (6.14)$$

6.3.4 Kapillartransport

Størstedelen af de byggematerialer der avendes i byggeriet, er porøse. Det bevirker at de, foruden at være mere eller mindre åbne overfor vanddamp og luftstrømme, kan være permeable for vand. Porerne størrelse og sammensætning/struktur har stor betydning for et materiales evne til at optage og transportere fugt.



Figur 17. Redegør for porestrukturer på tværs af materialer. Materiale med ingen porer kan f.eks. være glasmateriale. Lukkede porer kan f.eks. være celleglas. Kanalsystem af åbne porer kan f.eks. være træ. Diskontinuert materiale kan f.eks. være mineraluld (Brandt, 2013, s. 25).

Byggematerialer kan inddeles i 4 overordnede grupper (se Figur 17). Der findes enkelte materialer som er helt tætte, og derfor ikke optager eller transporterer fugt. Det kan f.eks. være stål og glas, der betragtes som værende uden porer. I materialer hvor porerne er isoleret fra hinanden, kan transport af fugt mellem porerne kun finde sted i meget begrænset omfang. Materialer i denne gruppe er blandt andre celleglas og ekstruderet polystyren. I de mest almindeligt anvendte materialer som f.eks., træ, tegl og beton, er fast stof kontinuert, og porer

indgår i et sammenhængende system. Et diskontinuert materiale, hvor det faste stof udgør en diskontinuert struktur, kunne f.eks. være mineraluld. Et materiales porestørrelse og fordeling har stor betydning for dets kapillarsugende evne (Brandt, 2013, s. 23-25).

Porøsiteten kan bestemmes som:

Porøsitet, n

$$n = 1 - \frac{\rho_{tør}}{\rho_{faststof}} \quad (6.15)$$

Hvor

$\rho_{tør}$ angiver densiteten af materialet i tør tilstand

$\rho_{faststof}$ angiver densiteten af faststoffet alene

Kapillarsugning kan transportere store mængder af fugt f.eks. fra jorden, eller hvis en facade udsættes for regn. Transportretningen går altid fra våde områder til tørre områder, og kan foregå i alle retninger. Fugten flyttes som konsekvens af kohæsions- og adhæsionskræfterne. Det er altså sammenhængskraften de enkelte vandmolekyler imellem og vedhæftningskraften mellem vand og materiale, der resulterer i kapillarsugning. Den kapillare stighøjde og hastigheden hvorved fugt kan flyttes ind i materialet, skal ses som funktion af porestørrelse samt struktur. Store porer fyldes hurtigere end mindre porer, til gengæld er stighøjden lavere for de store porer end tilfældet er for mindre (Brandt, 2013, s. 36-38).

6.4 Fugtkilder

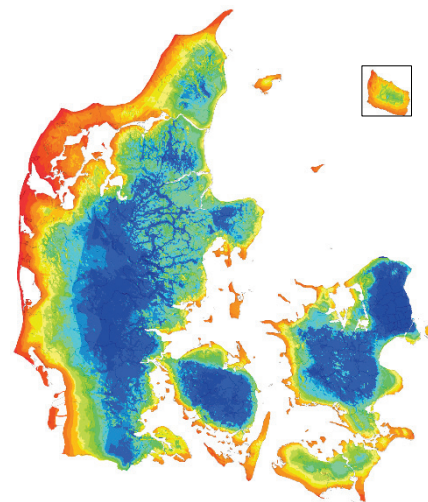
Når der skal foretages fugttekniske vurderinger og evt. beregninger, er kendskabet til hvilke fugtkilder og påvirkninger en given konstruktion udsættes for, særdeles vigtigt.

Fugtpåvirkningen finder steder på begge sider af konstruktionen, hvor blandt andet placering i terræn, orientering og bygningens funktion, har indvirkning på hvilken belastning den aktuelle konstruktion skal dimensioneres efter. I indeværende rapport hvor omdrejningspunktet er indvendig efterisolering omkring en tagkonstruktions træbjælkeender i murværk, er fugtkilderne primært nedbør og luftfugtighed. I andre tilfælde som konstruktioner tættere på jord kunne grundfugt og overfladevand være eksempler på fugtkilder (Brandt, 2013, s. 54).

6.4.1 Udvendige

Udefra påvirkes bygningers klimaskærm særligt af nedbør som regn, hagl og sne. Afbøjes regn af vinden kan den også ramme lodrette bygningsdele som f.eks. en teglfacade, og så kategoriseres det som slagregn. Mængden og den deraf afledte fugtpåvirkning, skyldes flere faktorer, såsom den lokale topografi, bygningens geometri og af omgivelserne m.v. Det betyder altså, at en bygning placeret i Botanisk Have i København, udsættes for en helt anden

belastning, end hvis tilsvarende var placeret ved den danske vestkyst. Når det blæser optræder der forskelle i vindtryk omkring bygninger og deres klimaskærm. Resultatet er at hjørner samt overgang mellem tag og facade, udsættes for større belastninger som følge af slagregn. Facader udføres i mange forskellige materialer, og det betyder jævnfør afsnittet omhandlende kapillartransport, at nogle materialer vil virke sugende mens andre er vandafvisende. Slagregn som rammer en teglfacade, vil i høj grad optages af teglet, hvor områder med glas vil sende vandet videre til lavere liggende dele af facaden, hvorfor de yderligere påvirkes/opfugtes. Ved fleretagers bygninger kan belastningen resultere i en vandfilm og et egentligt vandtryk som følge af vindtrykket (Brandt, 2013, s. 55).



Figur 18. Viser hvor i Danmark der er meget vind (rød) og hvor der er mindre vind (blå).

Det blæser hyppigt i Danmark, og ofte er det vestenvinden der dominerer (se Figur 18). Normalt betyder det at lavtryk indeholdende regnvejr samt blæst, bevæger sig fra vest i en nordlig retning over landet (Cappelen & Jørgensen, 1999, s. 9). Konsekvensen er, at udvendige fugtkilder påvirker klimaskærmen i varierende grad. Under danske forhold betyder det at sydvestvendte overflader udsættes for langt større slagregnsbelastning sammenlignet med nordøstvendte (Brandt, 2013, s. 55). Ved fugtteknisk dimensionering af eksempelvis fuldmurede teglfacader der skal indvendigt efterisoleres, er det vigtigt at være bekendt med disse forhold, således at det afdækkes hvorvidt efterisoleringstiltaget tilvejebringer sikre hygrotekniske betingelser, ved alle orienteringer.

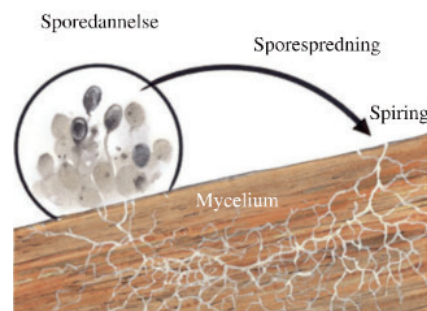
6.4.2 Indvendige

Foruden fugtbelastninger fra udeklimaet påvirkes bygningskonstruktioner også af indvendige fugtkilder. Oftest har påvirkningen relation til luftens vanddampindhold, men kan også tilskrives egentlig vandpåvirkning i forbindelse med rengøring og ifm. vådrum. I denne rapport hvor en ubenyttet bygning ændrer funktion til cafe, må fugtproduktionen og deraf tilskuddet til indeluften, tilskrives menneskelig adfærd ifm. madlavning, opvask, rengøring og ikke mindst menneskets egen fugtproduktionen. Konsekvensen er, at damptrykket inde er større end udeluftens. Som tidligere redegjort for betyder trykdifferensen, at klimaskærmen udsættes for en fugtvandring indefra og ud. Dette forhold har afgørende betydning for hvordan klimaskærmen skal konstrueres. For at nedbringe vanddampindholdet, og forventeligt høje temperaturer samt CO₂-niveauer i den kommende cafe, må indeluften fortyndes med udeluft. Ved fugtteknisk dimensionering kan den indvendige fugtbelastning bestemmes efter 5 forskellige fugtbelastningsklasser. Klasserne er en forenklet metode til håndteringen af indvendig fugtproduktion og luftskiftets indvirkning på vanddampindholdet. I dette projekt tages der udgangspunkt i fugtbelastningsklasse 2. Klassen indeholder funktioner som kontorer og forretninger. Fugttilskuddet varierer som funktion af temperatur. Det er mindst under sommeren når luftskiftet via naturlig ventilation øges. Fugttilskuddet til indeluften under vinteren er maks. 4 g/m³ ved anvendelse af fugtbelastningsklasse 2 (Brandt, 2013, s. 63-66).

6.5 Skadesmekanismer

6.5.1 Skimmelsvamp

Skimmelsvampe tilhører svamperiget og lever af at omsætte organisk materiale (Skimmel.dk, 2019). Tilgangen af lys er ikke en nødvendig vækstbetingelse for skimmelsvampene. De har nemlig ikke klorofyl, og derfor er stofskifteproduktion ikke afhængig af lyset (Valbjørn, 2003, s. 11). Gruppen af skimmelsvampe er meget stor og varieret. De er filamentøse, og hyferne danner mycelium. Herfra udvikles en sporebærende struktur, hvorfra millioner af sporer kan frigives til luften (se Figur 19)

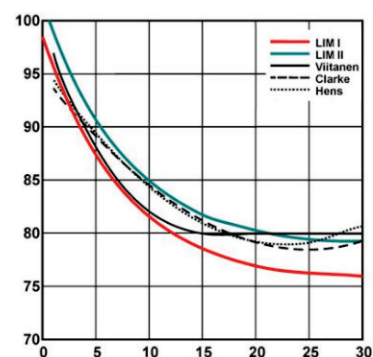


Figur 19. Viser livscyklus for skimmelsvampe

(Fabricius & Blands, 2009, s. 5). Skimmelsvamp findes derfor overalt i vores natur, hvor den spredes ved hjælp af luften, og forekommer derfor også inde i bygninger (Skimmel.dk, 2019). Optræder der skimmelvækst i bygninger, hvor mennesker opholder sig, kan det have betydelig negativ indvirkning på helbredet. Skimmelsvampen afgiver konidier, svampedele og MVOC'er (microbiological volatile organic compounds) til luften. Der kan være giftstoffer i svampene, som kan påvirke mennesker ved indånding og berøring. Mennesker som opholder sig i bygninger med skimmelvækst, kan opleve forskellige symptomer. Det kan f.eks. være træthed, koncentrationsbesvær og hovedpine. Allergikere reagerer ofte med anfald af høfeber, øjenkatar, eksem og astma (Koch & Johansen, 2010, s. 8).

Skimmelvækst kan finde sted, når alle vækstbetingelser opfyldes på samme tid. Under de mest fordelagtige betingelser er latensperioden 2-3 dage, før skimmelvæksten kan finde sted. Svampene har forskellige karakteristika, men i reglen er der stort set ingen vækst, hvis vandaktiviteten er under det kritiske niveau. Den kritiske vandaktivitet (relative luftfugtighed på overfladen) er forskellig alt efter materiale. Ved 20 °C er den laveste eksperimentelt bestemte relative luftfugtighed, hvorved skimmelsvampevækst for træ og træbaserede materialer kan optræde, 75-80 %. I temperaturintervallet 25 - 30 °C er der optimale vækstbetingelser for de fleste skimmelsvampe. Væksten er aftagende når temperaturen befinder sig under eller over disse forhold, og vil normalt helt ophøre under 0 °C og over 50 °C. (Brandt, 2013, s. 96-97).

Selvom kriterierne for skimmelvækst er kendte, kan det være vanskeligt at forudse, om der vil optræde skimmelvækst på en given overflade. Der findes blandt andre isopleth-modeller, biohygrothermal-modeller og matematisk-empiriske modeller, som netop forsøger at afdække denne problemstilling. Selvom nogle modeller er avancerede, så simplificerer de, hvad der er en meget kompleks vækstproces. Derfor vil man ofte opleve at hygrotermiske undersøgelser vil resultere i, at modellerne vurderer risikoen for skimmelvækst forskelligt (se Figur 20). Skimmelvækst lader sig altså ikke entydigt beskrive, og modellerne skal derfor anvendes med en vis grad af forsigtighed. (Vereecken & Roels, 2011, s. 308-309).



Figur 20. Viser grænseværdier fra forskellige skimmelmodeller. Rød, grøn og sort benyttes i projektet.

6.5.2 Råd og trænedbrydende svampe

Råd og svamp er tekniske begreber, der beskriver karakteren af nedbrydning. Det betyder altså at skader forårsaget af råd og svampe, begge skyldes trænedbrydende svampe. Svampeangreb der kræver mange år, førhen træet væsentligt svækkes, betegnes som råd og angreb der på kort tid medfører omfattende svækkelse, betegnes som svamp (Koch, Larsen & Munck, 2003).

Træ har flere egenskaber, der gør det anvendeligt som byggemateriale, med en næsten ubegrænset holdbarhed ved korrekt anvendelse (Koch, Larsen, Lund-Johansen & Munck, 2003). Træ består primært af cellulose, hemicellulose og lignin. I vores natur nedbrydes træ af bakterier, insekter men også af svampe. Dette er naturligvis ikke en ønskelig effekt i forbindelse med indbygningstømmer (Koch & Johansen, 2010, s. 4).

Der findes ca. 30 egentligt trænedbrydende svampearter, som forekommer i den danske bygningsmasse. Størstedelen nedbryder træets cellulose, hvorved træet omdannes til en brunlig masse (brunmuld). Ofte får træet en skør og tør konsistens der sprækker i ” terninger ” (se Figur 21) (Koch & Johansen, 2010, s. 6).

Ægte hussvamp danner brunmuld, og er den skadeligste trænedbrydende svamp der forekommer i Danmark. Ægte hussvamp nedbryder hurtigt og effektivt træværket, men stopper ikke her. I tilfælde af, at træværket er indbygget i murværk, udsender svampen strenge som vokser henover træets overflade, og ind i murværket. Svampen udnytter kalken i mørtlen til at udvikle neutraliserende syre, som udskilles under nedbrydningen. Strenge kan nu brede sig og vokse over flere etager, samt medbringe vand og næringsstof. Tilsvarende brunmulddannende svampe, som f.eks. gul og hvid tømmer svamp, kan på lignende vis nedbryde træværk. De kan dog ikke, eller kun i særlige tilfælde, brede sig i murværket omkring det angrebne træemne (Koch & Johansen, 2010, s. 8).



Figur 21. Viser et eksempel på træ der omdannes til brunmuld.

Foruden brunmuldsgruppen findes der også andre grupper af trænedbrydende svampe. De har hver deres karakteristika, og nedbryder træs bestanddele på hver deres måde. Grupperne benævnes henholdsvis som hvid- og gråmuld.

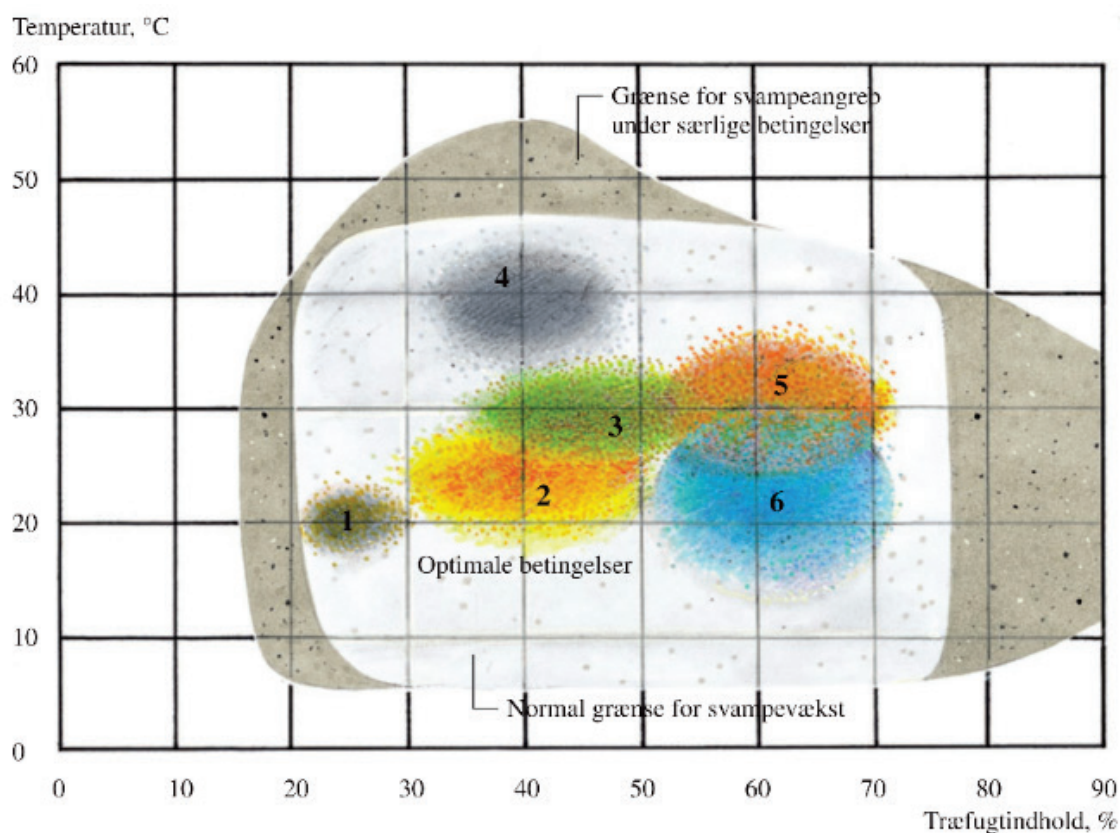
Alle svampe spredes ved hjælp af sporer (tusindedele millimeter store), som dannes på fugtlegemer og spredes ved vindens hjælp. De optræder altså overalt i luften, hvorfor alt træ i virkeligheden inficeres. Det er ikke ensbetydende med at svampesporerne vil spire, dertil kræves stor og vedvarende fugttilgang. Normalt kræves der en træfugt større end 20% i længere perioder, førhen at angrebet og trænedbrydningen kan begynde (Koch & Johansen, 2010, s. 7).

I relation til fugtlæren vedr. absolut- og relativ fugt kan træfugten i vægt [%] bestemmes som:

Træfugtighed, u

$$u = \frac{\text{fugtigt træes vægt} - \text{tørt træes vægt}}{\text{tørt træes vægt}} \times 100 \quad (6.16)$$

De optimale vækstbetingelser er forskellige alt efter svampetype. Fælles for dem alle er dog, at fugt, næring og ilt i passende mængder skal være tilstede. På nedenstående figur fremgår det i hvilket temperatur- og fugtområde, de 6 mest almindelige trænedbrydende svampe trives. En temperatur i intervallet 15-25 °C foretrækkes af de fleste svampe. Korkhat trives dog bedre ved højere temperaturer, og ægte hussvamp kan eksempelvis vokse ved lavere temperaturer (Koch, Larsen, Lund-Johansen & Munck, 2003).



Figur 22. Redegør for de optimale vækstbetingelser som funktion af svampetype (Koch, Johansen, 2010, s. 66).

ID	Svampeart	Optimal træfugt [%]	Optimal temperatur [°C]	Dødelig temperatur [°C]
1	Ægte hussvamp	20 – 30	Ca. 20	35
2	Gul tømmer svamp	30 – 50	Ca. 23	40
3	Hvid tømmer svamp	35 – 55	Ca. 28	45
4	Korkhat	30 – 50	Ca. 35	70
5	Barksvamp	50 – 70	Ca. 28 – 32	45 – 55
6	Viftesvamp	50 – 70	Ca. 22	45

Tabel 1. Redegør for optimale fugtforhold, i kombination med optimale samt dødelige temperaturer (Koch, Johansen, 2010, s. 66).

6.6 Indvendig efterisolering

I det følgende beskrives, hvordan de i rapporten indgående efterisoleringstiltag (forsatsvæg og kapillaraktive plader) påvirker den eksisterende konstruktion, samt hvordan tiltaget virker med baggrund i den netop gennemgåede bygningsfysik. Fælles for de to efterisoleringsprincipper gælder det, at udtørningsbetingelserne for den eksisterende væg reduceres som følge af en begrænset varmestrøm. Konsekvensen er at fugtniveauet øges, med risiko for nedsat holdbarhed til følge. Indvendig efterisolering er grundlæggende en risikobehæftet løsning, som under alle omstændigheder kræver, at facadens udvendige tilstand gennemgås for utætheder, og at den indvendige efterisolering udføres med omhu (Brandt, 2013, s. 172-173).

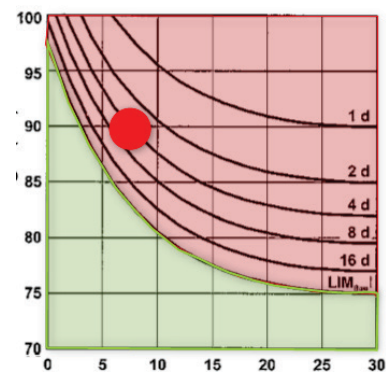
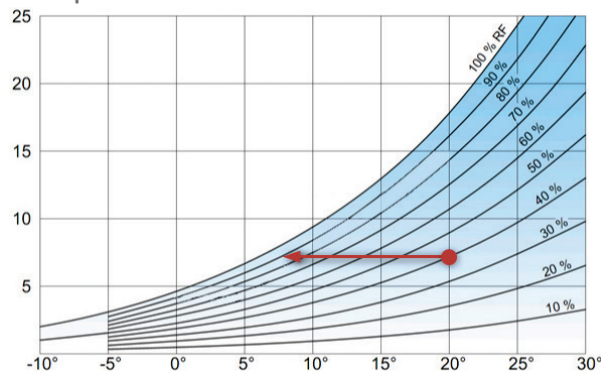
6.6.1 Forsatsvæg - skeletkonstruktion

Indvendig efterisolering af en eksisterende facade kan udføres med en isoleret friholdt skeletkonstruktion. Friholdelsen skyldes ønsket om optagelse af tolerancer, og i tilfælde af at væggen udføres i træ, at separere det fugtsugende materiale fra en potentiel utæt klimaskærm.

Forsatsvæggen skal udføres med et luft- og damptæt plan. Modstanden mod diffusion skal placeres under hensyntagen til konstruktionens samlede isolans. Formålet med at indbygge en spærre i forsatsvæggen, er at modvirke fugtkonvektion og diffusion (Møller, 2012, s. 58).

Følgerne af en defekt eller utilstrækkelig modstand kan resultere i skimmelvækst, grundet tilførslen og efterfølgende nedkøling af varm, fugtig rumluft. Risikoen for at der opstår skimmelvækst eller frostskafer, øges med isoleringsmængden. Normalt anbefales det ikke at benytte mere end 100 mm isolering, hvis ledningsevnen er $0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$. (Christensen, Koch & Møller, 2015).

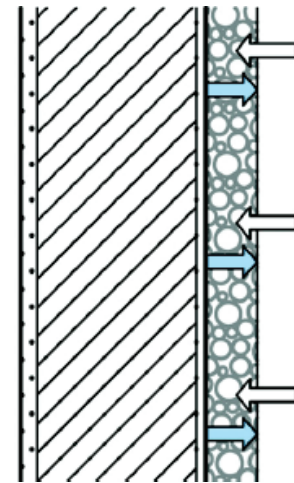
Eksempel



Konsekvenserne af ovenstående kan illustreres ved at inddrage flere elementer fra tidligere i teori afsnittet. Med udgangspunkt i et stationært eksempel kan følgende bestemmes: Temperaturfaldet over forsatsvæggen vil jævnfør varmeteorien være stejlt over forsatsvæggen. Udgangspunktet er en 600 mm teglfacade, efterisoleret med 100 mm ($\lambda = 0,037 \text{ W/m}\cdot\text{K}$). Her vil den oprindelige overfladetemperatur være ca. 8°C ved en temperaturdifferens på 15°C . Luften afkøles igennem en utæthed i det luft- og damptætte plan, hvorfor den relative luftfugtighed stiger fra sin start på 40% til et niveau tæt på mætningstrykket. Den høje vandaktivitet på overfladen, kan jævnfør kapitlet omhandlende skadesmekanismer, resultere i skimmelvækst. Det kan illustreres ved hjælp af skematiske grænseværdier for skimmelvækst. Dette forenklede eksempel giver et billede af skrøbeligheden, som knytter sig til at dampspærren, der selv ved geometriske komplekse forhold, skal udføres efter alle forskrifter. Dette for at undgå potentielle skader som konsekvens af fugtkonvektion.

6.6.2 Kapillaraktive plader

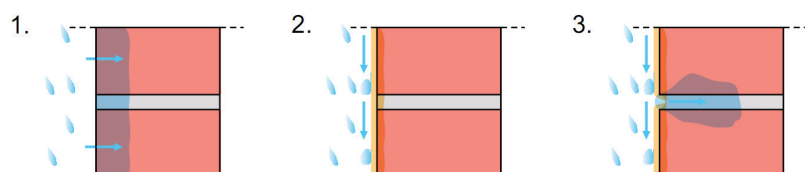
Som alternativ til forsatsvæggen kan den eksisterende facade efterisoleres med kapillaraktive plader. Varmeteknisk er den eneste forskel de to metoder imellem, at varmeledningsevnen er varierende. Varmetabet er generelt større ved anvendelse af kapillaraktive plader. Den fugttekniske påvirkning håndteres dog meget forskelligt. Materialet er åbent for diffusion, og forsøger altså ikke at bremse mekanismen (se Figur 23). Pladerne optager fugten fra indeklimaet, og i tilfælde af kapillarkondensation ved den oprindelige overflade, bevirker porestrukturen at fugt trækkes tilbage mod den indvendige overflade, hvorfra fugten kan fordampe (Møller, 2012, s. 110). Normalt bør der ikke anvendes pladetykkelser på mere end 80 mm, for at undgå for store kondensationsmængder (Brandt, 2013, s. 175). Metoden er i forhold til forsatsvæggen mindre følsom overfor udførelsesfejl. Til gengæld er det vigtigt at bygherre/brugere af rum med pladerne ved, at overfladen skal males med diffusionsåben maling, samt at der ikke må møbleres tæt op ad væggen (Møller, 2012, s. 111).



Figur 23. Viser virkningen ved brug af kapillaraktivt materiale som indvendig efterisolering på en facade (Binder, 2010).

6.7 Hydrofobering

Formålet ved at imprægnere klimaskærmens ydre, er at reducere fugttilførslen ved at begrænse kapillarsugning i materialet. Hydrofobering af materialer må ikke betyde, at det samtidigt bliver diffusionstæt. Vanddamp indefra skal fortsat kunne trænge igennem og til sidst fordampe fra overfladen. Hydrofobering af eksempelvis en teglfacade, er ikke en ubetinget fordel. Ved at hindre den kapillare virkning, kan fugten i teglet kun transporteres på gasform, altså ved diffusion. Konsekvensen er, at fugten bag det imprægnerede område vil være væsentligt længere om at tørre ud, eftersom fugttransport ved diffusion er en langsommelig proces sammenlignet med kapillartransport. En ubehandlet teglvæg vil under regnpåvirkning opfugtes, men også hurtigere tørre ud igen, ved netop at kunne anvende den kapillare virkning når regnpåvirkningen ophører. Imprægnering skal anvendes med omtanke, da midlet normalt kun kan stoppe vandindtrængningen i forbindelse med mindre porer. I tilfælde af utætheder som revner i murværk, kan hydrofoberingen bevirke at vandbelastningen bliver større, samt koncentreret om utætheden. Foruden de bygningsfysiske forhold kan imprægnering også resultere i, at facadens karakter og udtryk ændres (Brandt, 2013, s. 87).



Figur 24. Hydrofoberingsfigurer.

- 1) Viser en jævn fordeling og opfugtning af en ubehandlet tegloverflade.
- 2) Viser en hydrofobieret tegloverflade, hvor fugten preller af.
- 3) Viser hvordan en utæthed stedvis resulterer i kraftigere opfugtning i teglet.

7 Cases i litteraturen

7.1 Slagregn

Det er tidligere erfaret, at de hygrotermiske forhold i forbindelse med indvendig efterisolering omkring bjælkeender i murværk, kan påvirkes af flere faktorer, -deriblandt orientering og den deraf afledte slagregnsbelastning.

Svendsen & Harrestrup (2016) har udført simuleringer med 3 forskellige grader af regneksponeringskoefficient, hvilket viste sig at medføre signifikante forskelle i fugtforholdene omkring bjælkeenden. Forsøget tog udgangspunkt i en teglfacade bestående af 1,5 eller 2 sten, som blev indvendigt efterisoleret med henholdsvis 40 og 80 mm mineraluld. Forholdene blev simuleret med tætomsluttende isolering, samt forsøg hvor bjælken friholdes med 200 mm på begge sider. De forskellige opbygninger blev desuden orienteret med en nord- og vestlig orientering. Under alle betingelser fandt man, at det begrænsede udtørningspotential, som optræder ved en nordlig orientering, medfører en stor risiko for skimmelvækst. Af samme grund anbefales det ikke, at foretage indvendig efterisolering af nordvendte facader. Ved simuleringer mod vest, hvor 40 mm isolering afsluttes 200 mm før bjælkeenden, og regneksponeringskoefficienten er på sit laveste niveau, betragtes det som en fugtsikker løsning, uden risiko for skimmelvækst. I tilfælde af en eksponeringskoefficient højere end minimum, resulterede forsøget i kraftig skimmelvækst, når facaden var orienteret mod vest.

På tilsvarende vis indikerer lignende studier, at slagregnen er af stor betydning ved analyse af fugtrelaterende problematikker i ældre bygninger, hvor bjælkeender er indbygget i murværk (Morelli, Nielsen, Scheffler & Svendsen). Endvidere kan fugtniveauet i bjælkeenden i høj grad relateres til beskyttelsen af murværket, som eksempelvis kunne bestå af en vandafvisende samt diffusionsåben overfladebehandling. I forskellige studier redegøres der for, at vandindholdet i tilfælde af en lav slagregnsbelastning eller ved beskyttelse mod selvsamme påvirkning, ikke bør resultere i skimmelvækst samt trænedbrydning af bjælkeenden. (Kehl, Ruisinger, Plagge, Grunewald, 2013).

Eftersom flere studier har konstateret, at fugtniveauet i teglfacader vil stige som følge af indvendig efterisolering, har et DTU-studie undersøgt muligheden for at nedbringe fugttilskuddet i konstruktionen, ved brug af facadeimprægnering. Analysen tager udgangspunkt i simuleringer bestående af 1-stensvæg (228mm) der indvendigt efterisoleres med 3 forskellige kapillaraktive pladesystemer. Modellen orienteres mod sydvest, og udsættes for slagregnsbelastninger for bygninger højere end 20 meter, og udsat for klimaet i Lund (Sverige). Under disse betingelser fandt man, at ingen af de testede efterisoleringssystemer tilvejebragte acceptable relative luftfugtigheder i området bagved isoleringen. Kritiske forhold blev defineret som $RF > 80\%$ og et mould index > 1 ved benyttelse af VTT-modellen. Alle simuleringer resulterede i mould index 6, som er defineret/svarer til omkring 100% skimmeldækning på overfladen. Når facaden blev simuleret med en ydre imprægnering, og derved beskyttet mod slagregnens indvirkning, resulterede det i markante ændringer. I alle tilfælde mindskes risikoen for skimmelvækst i en sådan grad, at de mest kapillarkivende

materialer opfyldte kriteriet til en fugtsikker konstruktion. For at kunne opnå så positive effekter, vil det kræve, at der ikke indgår fejl i imprægneringen, eksempelvis revner. Det lavere fugtindhold i teglet, bevirkede at den indvendige overfladetemperatur hæves til et acceptabelt niveau, som funktion af fugtbelastningsklasse 2 og 3, samt at varmetabet mindskes grundet reduktion i varmeledningsevnen (Finken, Bjarløv & Peuhkuri, 2016).

7.2 Lufttæthed

Foruden slagregn, kan de hygrotermiske forhold omkring bjælkeender i murværk også påvirkes af fugttilskud fra indeluften, hvis der er forbindelse mellem indeluften og bjælkeenden. Det er eftervist at indvendig efterisolering af murværk indebærer, at det absolutte fugtindhold i bjælkeenden vil stige. Det konvektive tilskud har vist sig udfordrende at beregne, men forsøg er gjort. Med udgangspunkt i en 365 mm pudset (diffusionsåben men vandafvisende) teglfacade med vestlig orientering, undersøgte man vandindholdet i de yderste 5 mm af bjælkeenden, samt den relative luftfugtighed og temperatur i området. Konvektionsbidraget resulterede i at fugtindholdet steg med ca. 1% point, fra 15 til 16 [M-%], når fugtindholdet, i de yderste 5 mm af bjælkeenden var på sit højeste. Tilsvarende billede tegnede sig når samme model blev indvendigt efterisoleret med en forsatsvæg, indeholdende 100 mm mineraluld. Isoleringen bevirkede at fugtindholdet svingede mellem 18 og 19 [M-%], alt efter om konvektionsbidraget blev medtaget (Kehl, Ruisinger, Plagge, Grunewald, 2013).

I tillæg til simuleringerne er der foretaget laboratorieforsøg, der har haft til formål at undersøge vigtigheden af lufttæthed i forbindelse med samling af indvendig efterisolering og træbjælkeender. Under kontrollerede forhold blev 4 testvægge undersøgt. Eksperimentet bestod af et varmt box-koldt box forsøg, hvor temperaturen og den relative luftfugtighed på begge sider af væggen blev styret. På den varme side var det, ved hjælp af en lille ventilator, endvidere muligt at etablere et overtryk. Man testede en 295 mm referencevæg af tegl uden isolering og med 3 forskellige isoleringstiltag, på selv samme konstruktion. Isoleringen bestod af henholdsvis 100 mm kalciumsilikatplader afsluttet med puds, 115 mm mineraluld med fugtadaptivt dampspærre og 80 mm ekspanderet polystyren, begge afsluttet med gipsplader. I alle tilfælde resulterede en lufttæt samling i lavere relativ luftfugtighed i området omkring bjælkeenden.

Kalciumsilikatpladerne resulterede i de højeste relative luftfugtigheder, når samlingen med bjælkeenden ikke var lufttæt, og modsat var der her de laveste luftfugtigheder, når samlingen var lufttæt. Ved etablering af overtryk på den varme side, resulterede det i yderligere opfugtning og en træfugt på 23,8 % (ved brug af kapillaraktive plader). For de diffusionstætte systemer var effekten på træfugten i mindre grad afhængig af lufttætheden, som maksimalt medførte en stigning på 0,7 %, fra 14,8 til 15,5 %. Ud over fugtregistreringerne blev der foretaget temperaturmålinger, der tydeligt kunne underbygge, at fugtkonvektion optræder i området omkring bjælkeenden, når mødet med isoleringen ikke udføres lufttæt (Vereecken, Roels, 2011, s. 664-669).

8 Foranalyse

8.1 Metode

Hensigten med foranalysen er at kunne træffe et kvalificeret materialevalg (tegl og træ) til anvendelse i hovedanalysen, samt at bestemme under hvilken regnbelastning bjælkeenden skal simuleres. Foranalysen undersøger hvordan udvalgte tegl- og træmaterialer, som er tilgængelige i simuleringsværktøjets database, reagerer på varierende orientering samt regnbelastning. Det kan være vanskeligt at gennemskue de præcise materialeegenskaber, og på forhånd vide hvilken indvirkning de har på temperatur- og fugtforholdene. Jævnfør litteraturstudiet er det tidligere undersøgt og fundet, at materialevalg samt regnbelastninger har stor indvirkning på forholdene omkring træbjælkeender i murværk.

Med udgangspunkt i referencen (originaldetaljen) og under hensyntagen til disse forhold, testes teglmateriernes indvirkning på vandindholdet i konstruktionen [kg/m^3]. Endvidere undersøges hvilken temperatur [$^{\circ}\text{C}$] og relativ luftfugtighed [RF] der optræder som konsekvens af vandindholdet i teglstenene, de steder hvor træbjælkeenden optræder. Der udvælges i første omgang 7 teglsten fra databasen med varierende materialeegenskaber, som dækker/repræsenterer et bredt udvalg af mulige teglmaterialer. Teglstenene er blandt andet udvalgt med baggrund i deres fugtlagringssevner, densitet og porøsitet. Det skal ses i lyset af teoriafsnittet omhandlende kapillartransport, hvori det fremgår at store fugtmængder kan flyttes ved mekanismen, og at det blandt andet kan relateres til materialernes porestruktur, struktur samt fordeling.

Efterfølgende udvælges 3 teglsten som findes at tilvejebringe forventelige/rimelige temperatur- og fugtforhold over et normalt år. I dette tilfælde, hvor der tages udgangspunkt i en teglfacade fra 1906, formodes det at teglstenene ikke er hårdtbrændte, hvorfor teglsten som resulterer i de laveste vandindhold fra sorteres. Omvendt har bygningen stået opført i mere end 100 år, hvorfor teglsten der resulterer i temperatur og fugtniveauer, der jævnfør teoriafsnittet vil betyde, at træbjælken skulle være særdeles udsat for nedbrydning, også fravælges. De udvalgte teglsten simuleres efterfølgende med 2 forskellige træmaterialer, der på samme vis som valget af teglsten, beror på forskelle i materialeegenskaber (særligt vandopsugningsevne).

Foranalysen vil slutteligt undersøge hvilken regnbelastning detaljen i hovedanalysen, skal simuleres under. Med udgangspunkt i det valgte teglmateriale undersøges regnbelastningens indvirkning på den relative luftfugtighed to steder i konstruktionen, hvor bjælkeenden vides at befinde sig. Belastningen justeres gradvist i forhold til den umiddelbare standard, som forudsættes i det anvendte simuleringsværktøj. Succeskriteriet er at bestemme et fugtniveau, der placerer træbjælken i en ligevægt, som ikke umiddelbart burde være trænedbrydende. Samtidig forsøges det at beholde belastningen tæt på standarden, der bygger på omfattende studier af slagregns fordelinger (Karagiozis, Hadjisophocleous & Cao, 1997). På baggrund af ovenstående proces og analyser, udvælges altså et teglmateriale, et træmateriale samt regnkoefficienter, som vil medtages og danne grundlag for hovedanalysen.

8.2 Beregningsmetoder

8.2.1 Dynamiske WUFI-simuleringer

For at kunne undersøge konsekvenserne af de forskellige materialer samt regnbelastning, foretages simuleringer med simuleringsværktøjet WUFIpro. WUFIpro er udviklet af Fraunhofer Institute for Building Physics (IBP), og er en forkortelse for Wärme- und Feuchtetransport installation. WUFIpro benytter koblete varme- og fugt-differentialligninger, til at bestemme bygningsfysiske forhold i konstruktioner, bestående af enkelte eller flere lag, i én dimension (wufi.de/en, 2019).

Bestemmelsen af vandindhold, temperatur og relativ luftfugtighed sker ved at opbygge en fælles simuleringsmodel, der afspejler den 600 mm brede eksisterende teglfacade. De 7 forskellige teglsten testes derved under de samme betingelser. Først undersøges vandindholdet i teglstenene med en sydvestlig orientering og regnbelastning svarende til standarden i WUFIpro. Efterfølgende afprøves samme model hvor belastningen svarer til bestemmelserne i ASHRAE Standard 160 (TenWolde, 2009). Slutteligt simuleres modellen med nordøstlig orientering, hvor fugtbelastningen jævnfør teoriafsnittet er mindst. Herved undersøges ydeevne af teglstenene under de ydre belastninger. Efterfølgende anvendes modellen til at undersøge relative luftfugtigheder og temperaturforløb, på baggrund af det sidst simulerede år, 100- og 300 mm fra den indvendige overflade. Forholdene undersøges efter samme metodik som i forbindelse med vandindholdet.

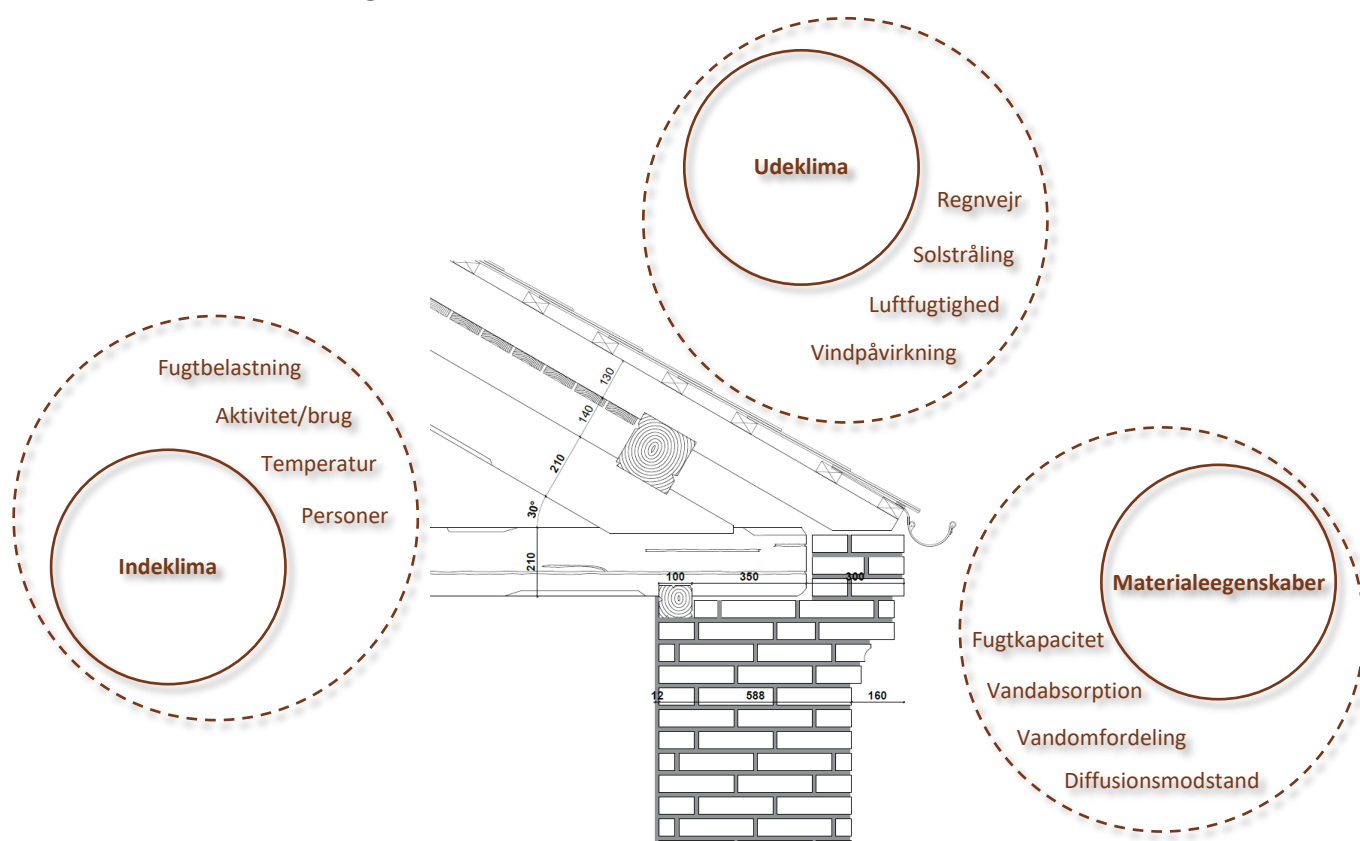
På baggrund af ovennævnte simuleringer udvælges 3 tegltyper der viderebearbejdes i samspil med 2 forskellige trævarianter. Der konstrueres en WUFIpro model bestående af 300 mm teglmateriale og 450 mm træmateriale, hvilket svarer til en 1-dimensional udgave af de originale forhold (se Figur 31). Herved bliver det muligt at undersøge vandindholdet i træbjælken som funktion af tegl- og træmateriale. Resultatet af analyserne danner grundlag for materialevalg til hovedanalysen samt til bestemmelse af slagregnskoefficienten.

Endeligt opbygges en WUFIpro model bestående af den teglsten, som skal benyttes i forbindelse med hovedanalysen. Den testes med varierende fugtbelastning, ved at justere på graden af slagregn (Rain load). Slagregn bestemmes som: $\text{rain} \cdot (R1 + R2 \cdot \text{wind velocity})$ hvor regn, vindhastighed og vindretning læses fra vejrapporten. $R1$ er 0 [-] for vertikale flader og $R2$ er 0,07 [s/m] midt på fladen, for bygninger i 10 meters højde i frit terræn. Koefficienten [$R2$] justeres gradvist, hvorved det bliver muligt at udvælge hvilken samlet slagregnsbelastning, som skal anvendes i hovedanalysen.

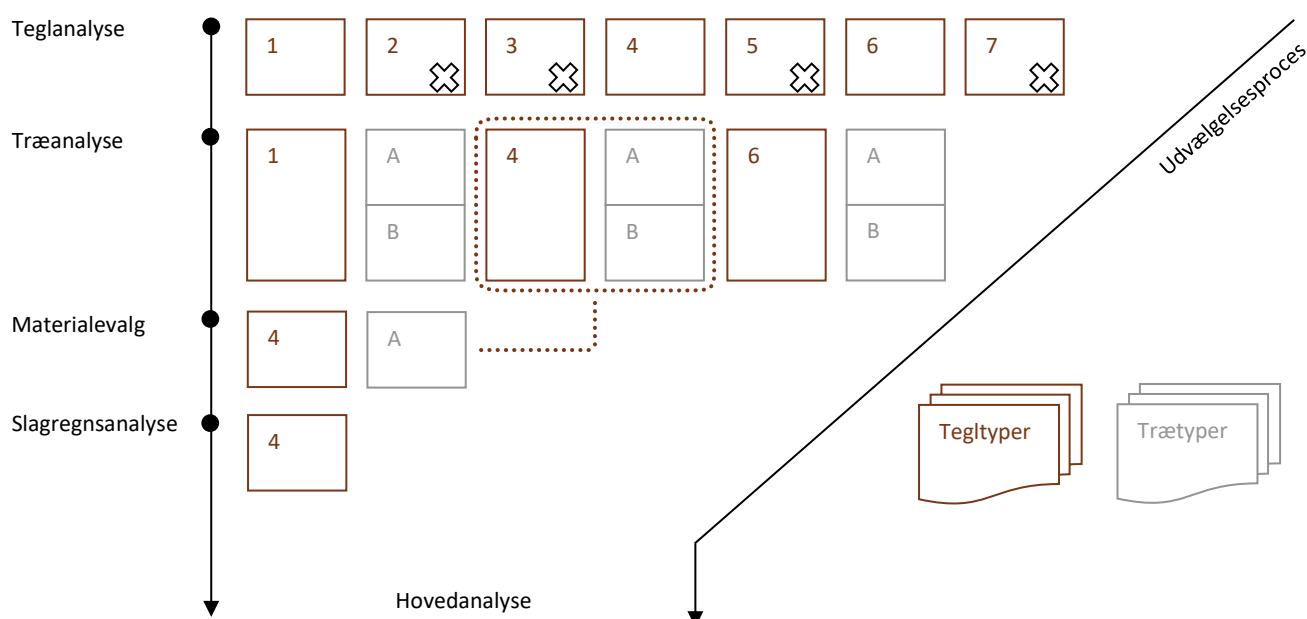
8.2.2 Stationære beregninger

Som supplement til og kontrol af de dynamiske simuleringer foretages stationære analyser ved benyttelse af de i teoriafsnittet anviste formler. Beregningerne medtager kun diffusion, hvorfor de ikke umiddelbart kan sammenlignes med modeller der også medtager fugttransport i væskeform, og i øvrigt udsættes for varierende klimabetingelser mm. Med den viden anvendes beregninger til at vurdere/sandsynliggøre hvorvidt de mere komplicerede dynamiske fugt- og varmesimuleringer, kan være korrekte.

8.2.3 Procesdiagram



Figur 25. Viser et mindre uddrag af de mange forskellige påvirkninger, samt materialeegenskaber der indgår i dynamiske simuleringer af bjælkeenden. Klimabetingelserne såvel ude som inde ændrer sig kontinuerligt, og for mange af materialeegenskaberne er det også tilfældet. Undersøgelser i foranalysen bevirker, at simuleringsarbejdet i forbindelse med hovedanalysen kan nedbringes. Hvis hovedanalysen for eksempel skulle medtage en eller flere materialevarianter, ville de 18 udvalgte, hvoraf 10 af dem er 2D-simuleringer, mindst blive fordoblet. Det er med baggrund i disse betragtninger, fundet nødvendigt at foretage en indledende foranalyse. Procesforløbet er som beskrevet i det foregående afsnit, og som anvist i figurens anden del (nedestående).



8.3 Simuleringsforudsætninger

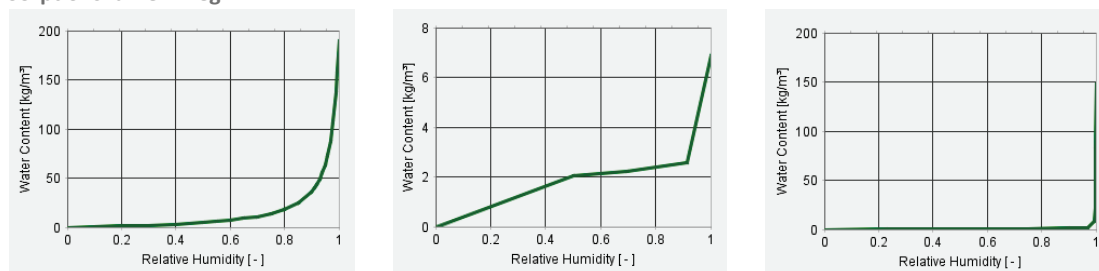
I det følgende redegøres for de udvalgte tegl- og træmaterialers egenskaber. Efterfølgende oplistes simulerings- og klimaforudsætningerne. Til sidst i afsnittet fremgår det hvordan simuleringsmodellerne er opbygget, og hvor i konstruktionen resultaterne er stammer fra.

Materialeegenskaber - Tegl

	Enhed	Red Matt Clay Brick	Brick H	Solid Brick Masonry	Solid Brick Historical	Solid Brick Extruded	Buff Matt Clay Brick	Solid Brick Bernhard
Varmeledningsevne	[W/mK]	0.495	0.955	0.600	0.600	0.600	0.430	0.827
Specifik varmekapacitet	[J/kgK]	800	860	850	850	850	800	839
Densitet	[kg/m ³]	1935	1891	1900	1800	1650	1719	2060
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.217	0.280	0.240	0.310	0.410	0.351	0.25
Vanddampdiffusionsmodstand	[-]	137.8	14	100	15	9.5	29.3	19

Tabel 2. Redegør for tegltyper og udvalgte materialeegenskaber, som anvendes i dynamiske fugtsimuleringer og stationære fugtberegninger.

Sorptionskurver - Tegl



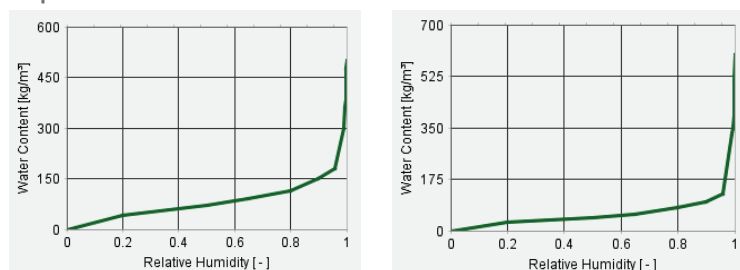
Figur 26. Viser sorptionskurverne tilhørende de 3 tegltyper, som har den største variation. De resterende typer befinder sig indenfor samme interval, eller har tilsvarende forløb.

Materialeegenskaber - Træ

	Enhed	Oak	Spruce
Varmeledningsevne	[W/mK]	0.300	0.230
Specifik varmekapacitet	[J/kgK]	1400	1400
Densitet	[kg/m ³]	685	455
Porøsitet	[m ³ /m ³]	0.72	0.73
Vanddampdiffusionsmodstand	[-]	8	4.3

Tabel 3. Redegør for de 2 anvendte trætyper og deres egenskaber.

Sorptionskurver - Træ



Figur 27. Redegør først Oak's og efterfølgende for Spruce's sorptionskurve.

Simuleringsforudsætninger

Randbetingelser for inde- og udemiljø

Indvendigt:

Lufttemperatur [°C]

Konstant lufttemperatur på 20 °C

Relativ luftfugtighed [%]

Varierende i henhold til fugtbelastningsklasse 2

Udvendigt:

Lufttemperatur [°C]

Lund: LTH Data

Relativ luftfugtighed [%]

Lund: LTH Data

Slagregnsbelastning:

Bestemmes efter beregningsmetoden beskrevet i 8.2.1.

Version [A]

Sydvestlig orientering

Version [C]

Nordøstlig orientering

Slagregnsbelastning:

Bestemmes som: $(\text{rain} \cdot \text{FE} \cdot \text{FD} \cdot 0.2 \text{ s/m} \cdot \text{wind velocity})$ hvor regn, vindhastighed og vindretning læses af vejraprofilet. FE = regn-eksponeringsfaktor og FD = regn-fordelingsfaktor.

Version [B]

 $\text{Rain} \cdot 0.7 \cdot 0.35 \cdot 0.2 \text{ s/m} \cdot \text{wind velocity}$ med sydvestlig orientering

Kortbølgestråling absorptionsevne [-]

0.68 Tegl, rød

Langbølgestråling emissivitet [-]

0.9

Jordbundens kortbølgerefleksivitet [-]

0.2

Regnvandsabsorptionsværdi [-]

0.7

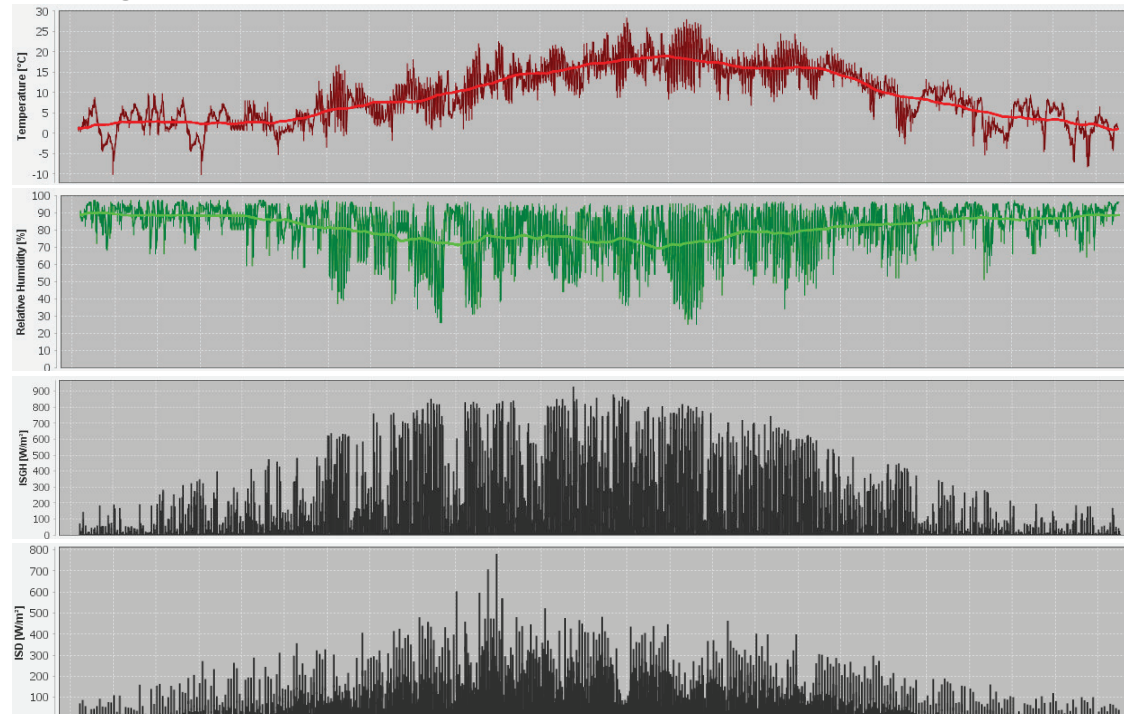
Indbygningsfugt

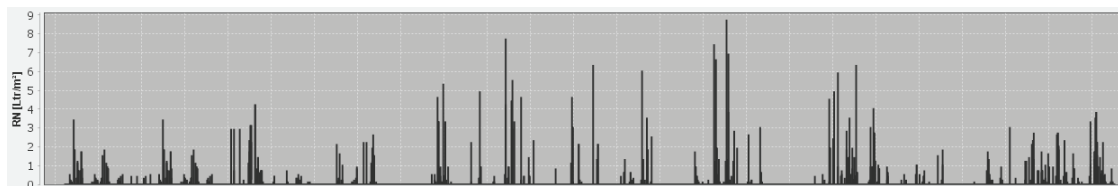
Varierende så ligevægt optræder inden for simuleringsperioden

Simuleringsperiode

01-01-2019 – 01-01-2024 – Resultaterne bygger på data fra 2023

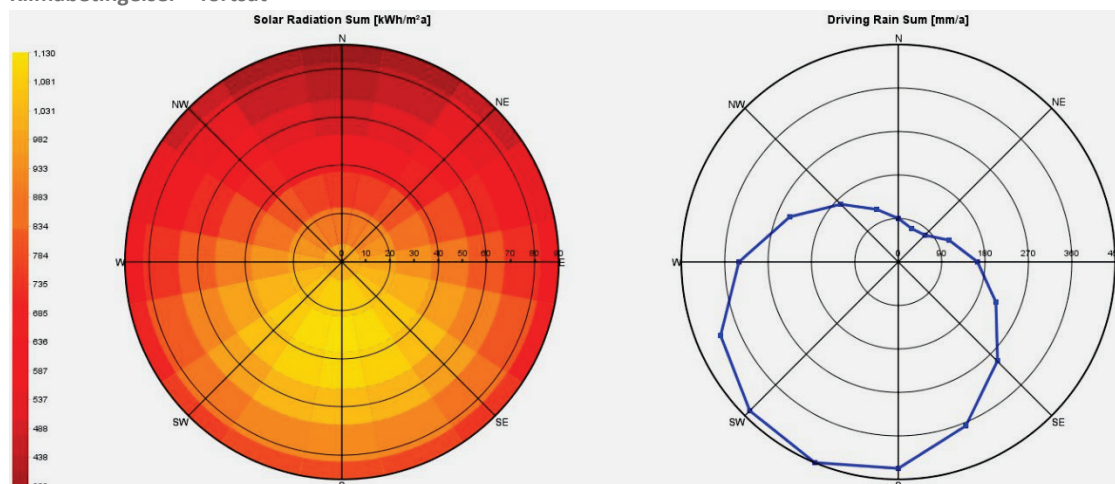
Tabel 4. Redegør for de fællesbetingelser, som samtlige konstruktionsvarianter er simuleret under.

Klimabetingelser



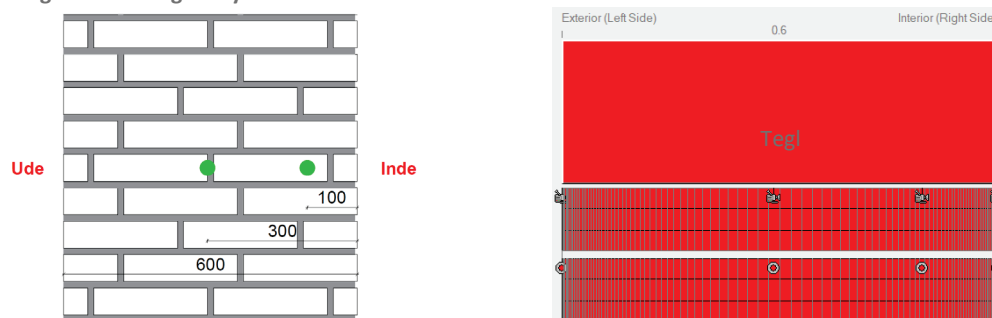
Figur 28. Redegør for temperatur [°C], relativ luftfugtighed [%], global solstråling [W/m²], diffus solstråling [W/m²] samt normal regn [Ltr/m²], der er indeholdt i den anvendte klimaprofil.

Klimabetingelser – fortsat



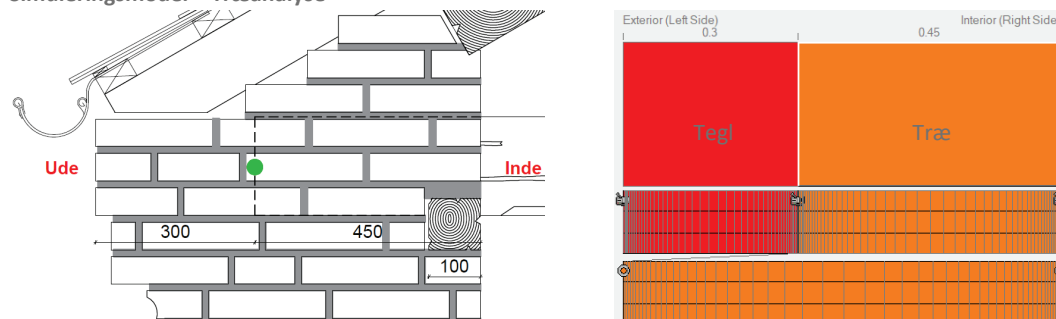
Figur 29. Redegør for sol- og regnpåvirkninger som funktion af orientering i den anvendte klimaprofil.

Simuleringsmodel – Teglanalyse



Figur 30. Redegør for hvordan teglkonstruktionen tager sig ud, og anviser datapositionernes placering (vist med grøn cirkel). Til venstre anvises den virkelige opbygning, og til højre, opbygningen i simuleringsværktøjet WUFIpro.

Simuleringsmodel – Træanalyse



Figur 31. Redegør for hvordan bjælkeenden (stiplet linje) og teglkonstruktionen tager sig ud, samt placering af dataposition (vist med grøn cirkel). Til venstre anvises den virkelige opbygning, og til højre, opbygningen i simuleringsværktøjet WUFIpro.

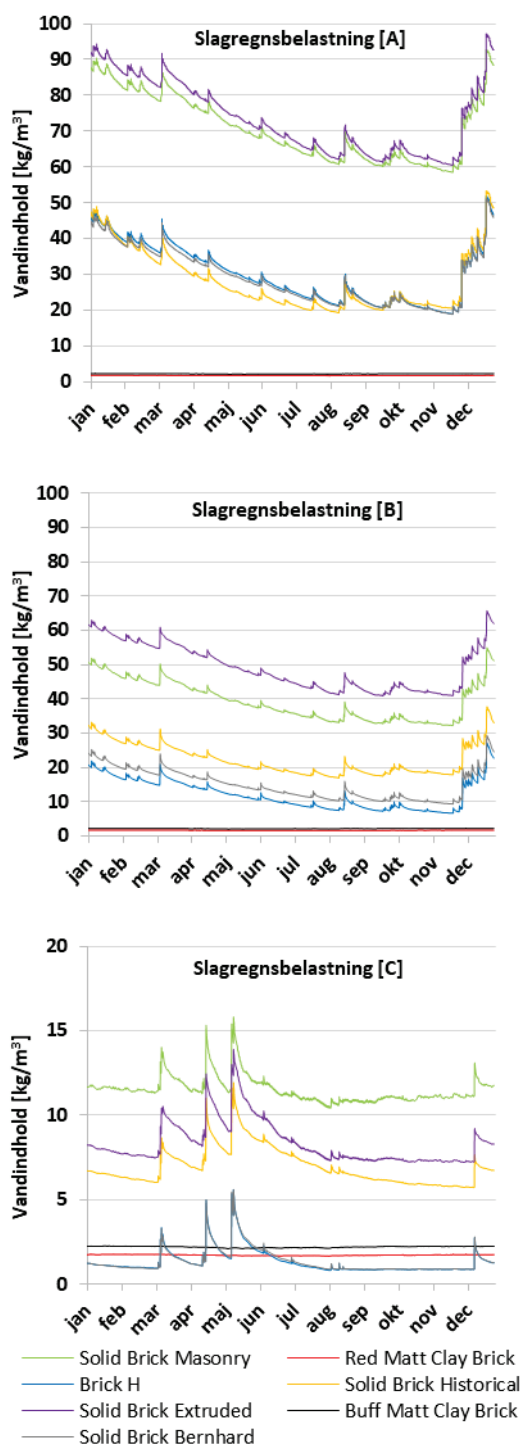
8.4 Resultater

8.4.1 Vandindhold – Tegl

Vandindholdet varierer tydeligt både som funktionen af teglmateriale, og af slagsregnsbelastning. I den første graf hvor konstruktionerne simuleres mod sydvest, og repræsenterer en facade, som indgår i en bygning ≤ 10 meter, er forskellen markant. Særligt den sorte og røde type adskiller sig ved at være upåvirket af årstiderne, og indholder op imod $97 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ mindre vand end den vådeste konstruktion (se øverste graf i Figur 32.)

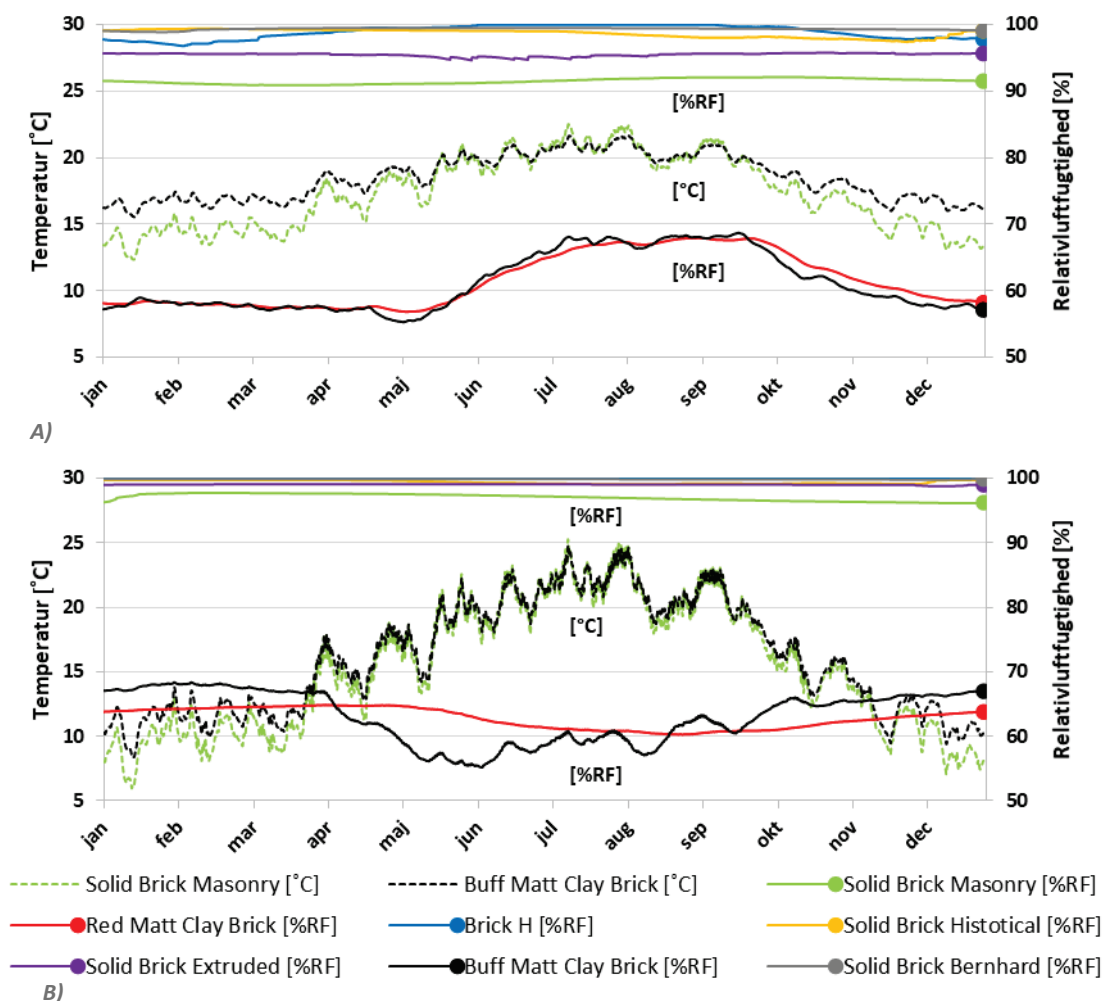
Når forudsætningerne forbliver de samme, men slagsregnsbelastningen følger ASHRAE Standard 160, sænkes vandindholdet for alle tegltyper (på nær den sorte og røde). Forløbet over året ændres ikke, men forskellen mellem sommer og vinter bliver mindre udtalt. For den vådeste tegltype sænkes det maksimale vandindhold i forhold til den første graf, med ca. $30 \text{ [kg/m}^3\text{]}$.

Reduktionen af vand i teglstenen er betydelig, når facaden orienteres mod nordøst. Med enheden i betragtning er forskellene typerne imellem små. Tilsvarende de to første simuleringer indgår konstruktionerne i en bygning ≤ 10 meter, og med indstillinger svarende til den første udgave. Den eneste forskel er altså orintering. For den tidligere vådeste tegltype resulterer denne ene parameter i, at vandindholdet er ca. $90 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ mindre i december måned. Teglmateriernes vandabsorptionsevne viser sig at betyde mest for vandindholdet i konstruktionen, når slagsregnsbelastning er størst. Hvor forskellen ca. er $50 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ ved den første simulering, er forskellen i vandindholdet ca. $10 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ i forbindelse med simuleringen mod nordøst, for de 5 tegl der påvirkes af slagregn.



Figur 32. Redegør for vandindholdet som funktion af slagsregnsbelastning og tegltyper. De to første grafer er orienteret mod sydvest og den sidste er orienteret mod nordøst. Bemærk at skalaen for vandindholdet er ændret på den sidste af graferne.

8.4.2 Temperatur & RF – Slagregnsbelastning [A]



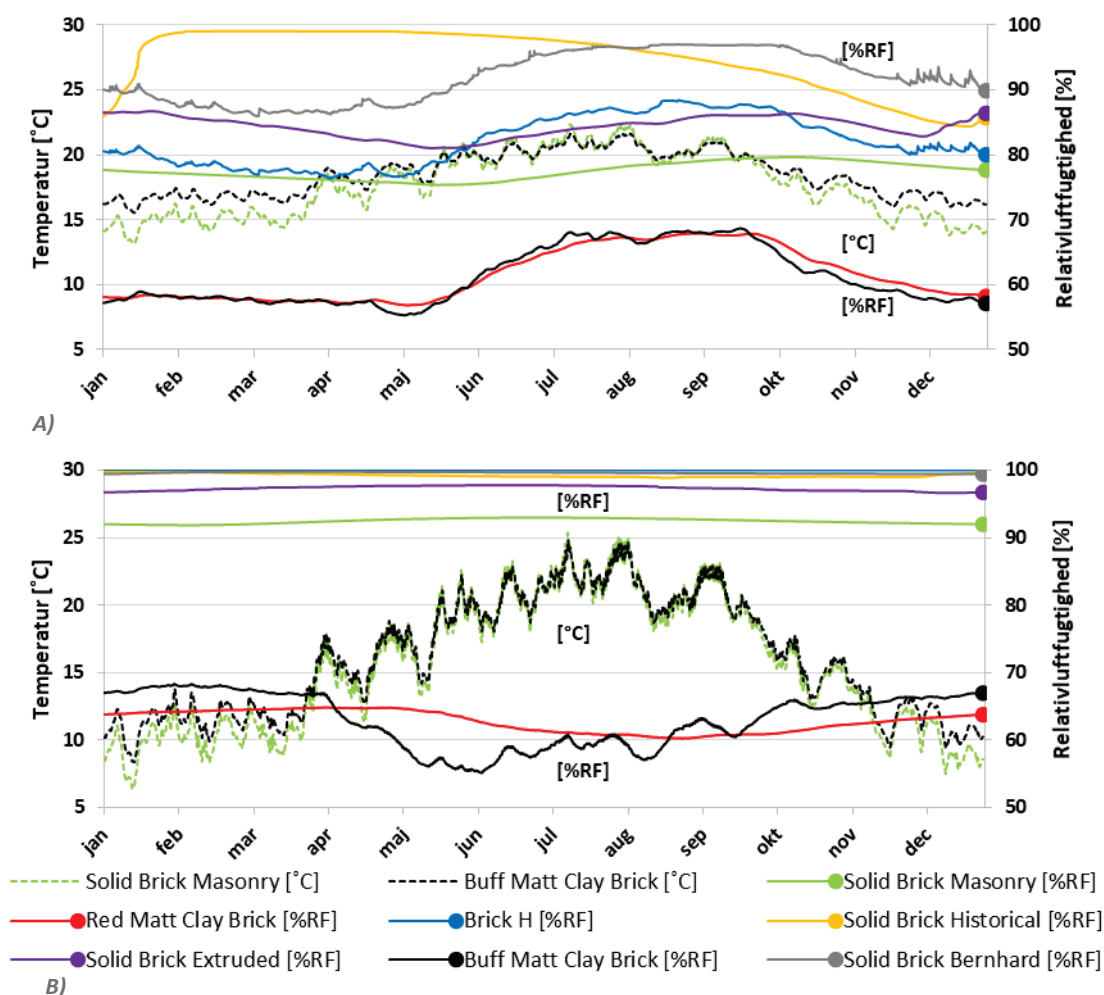
Figur 33. A) Redegør for den højeste og laveste temperaturprofil, samt den relative luftfugtighed 100 mm fra den indvendige overflade. B) redegør for tilsvarende, men 300 mm fra den indvendige overflade. Facadekonstruktionerne er orienteret mod syd/vest og med slagregnsbelastning type [A].

Det netop gennemgåede vandindhold i teglmateriale medfører de i Figur 33 relative luftfugtigheder. Alle tegltyper (på nær sort og rød) resulterer i særdeles kritiske hygrotermiske forhold, som kan resultere i skimmelvækst, eller medføre kritisk træfugt for en bjælkeende i ligevægt med betingelserne. I perioder optræder der egentlig kondensation i forbindelse med de fugtigste tegltyper.

Opmærksomheden henledes på, at slagregnen i ovenstående figurer er bestemt som beskrevet i forudsætningsafsnittet, hvilket svarer til anbefalingen/standardopsætningen i WUFIpro, med sydvestlig orientering.

Valg af teglmateriale under disse betingelser, ændrer maksimalt den relative luftfugtighed med 10 % point. For den sorte og røde type er vandabsorptionskoefficienten 0, eller som minimum meget tæt på. Ved så lille eller ingen påvirkning fra slagregnen, afspejler de ikke et realistisk billede af de oprindelige forhold, hvorfor de ikke omtales yderligere i resultatafsnittet.

8.4.3 Temperatur & RF – Slagregnsbelastning [B]

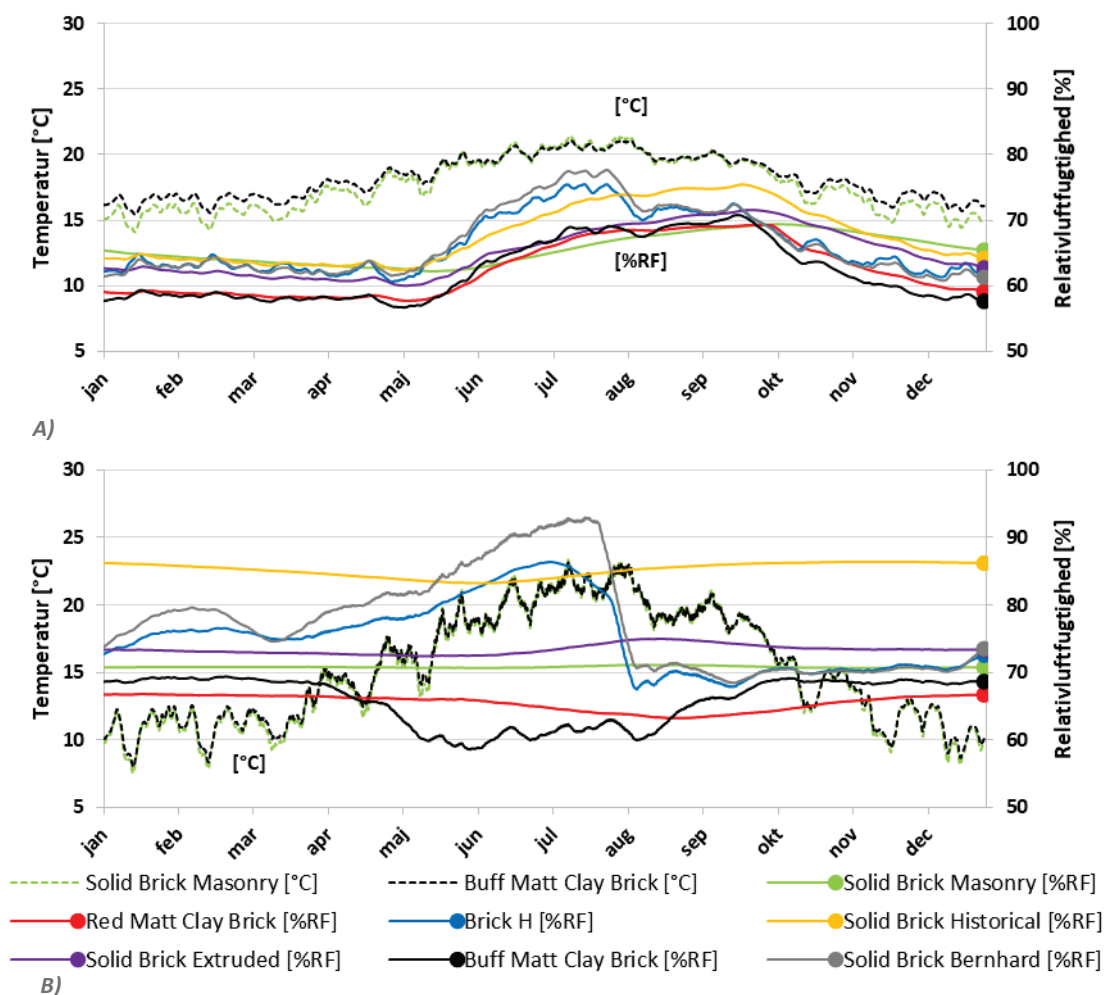


Figur 34. A) Redegør for den højeste og laveste temperaturprofil, samt den relative luftfugtighed 100 mm fra den indvendige overflade. B) redegør for tilsvarende, men 300 mm fra den indvendige overflade. Facadekonstruktionerne er orienteret mod syd/vest og med slagregnsbelastning type [B].

Generelt er den relative luftfugtighed i Figur 34 lavere og udsvingene større, 100 mm fra den indvendige overflade, under disse slagregnsbetingelser. Selvom vandindholdet er 20 [kg/m³] point højere i den grønne type i forhold til den gule type, er den relative luftfugtighed periodevis op imod 20 % point mindre. Materialernes forskellige egenskaber kommer til udtryk i anelige differencer i RF, og med meget varierende opfugtning- samt udtørningsforløb over året.

300 mm inde i væggen, hvilket svarer til ca. midt i bjælkeenden, optræder der også ved denne slagregnsberegning kritiske hygrotermiske forhold. Ved alle tegltyper forekommer der relative luftfugtigheder, som vil medføre en meget høj træfugt og for de fugtigste typer kondensation.

8.4.4 Temperatur & RF – Slagregnsbelastning [C]

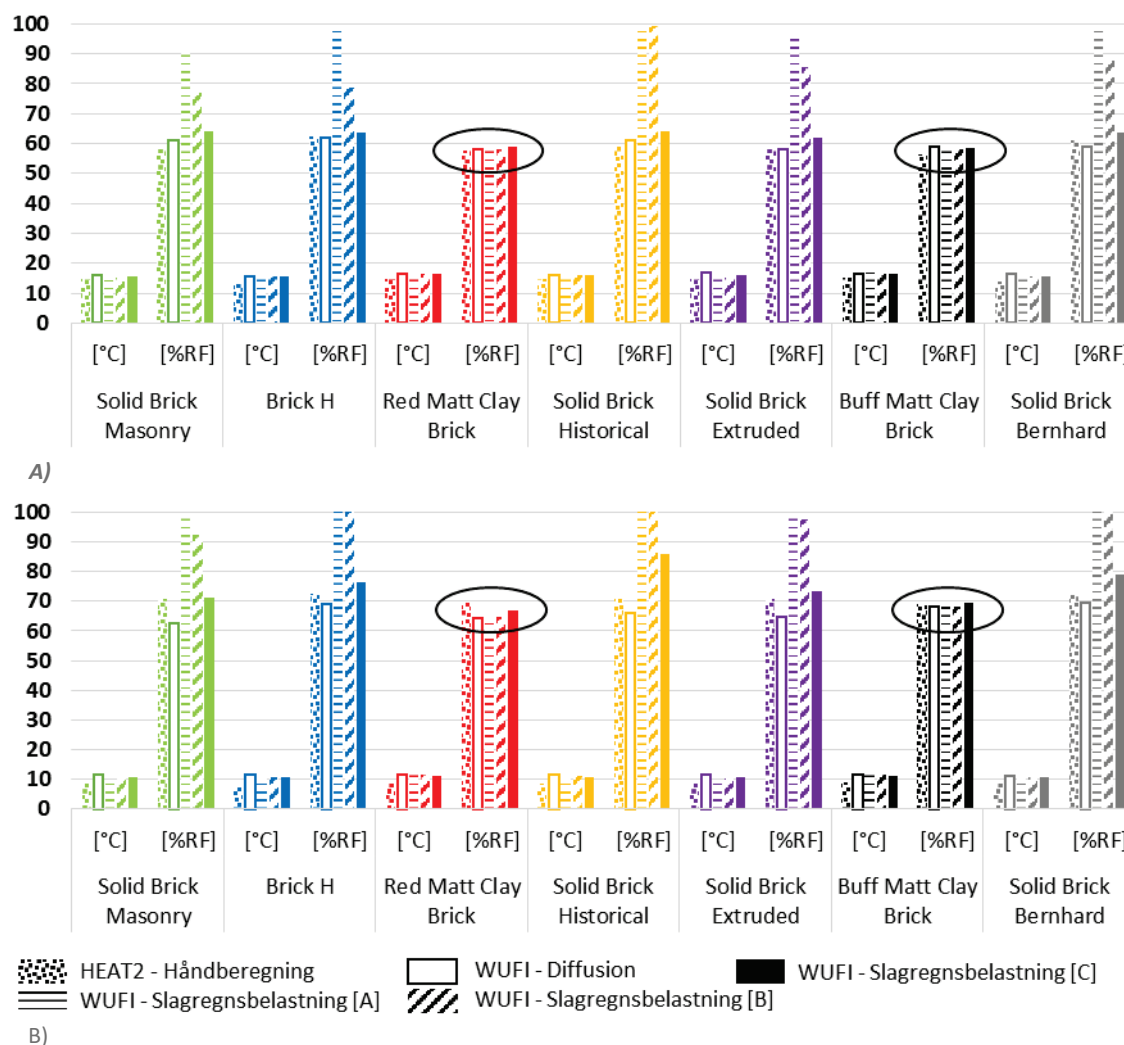


Figur 35. A) Redegør for den højeste og laveste temperaturprofil, samt den relative luftfugtighed 100 mm fra den indvendige overflade. B) redegør for tilsvarende, men 300 mm fra den indvendige overflade. Facadekonstruktionerne er orienteret mod nordøst og med slagregnsbelastning type [C].

I modsætning til de to netop gennemgåede sydvestvendte analyser af teglmaterierne, indebærer en nordøstlig orientering med selv samme slagregnsberegning, i betydeligt ændrede hygrotermiske forhold (se Figur 35). 100 mm fra den indvendige overflade medfører alle tegltyper hygrotermiske forhold under kritiske skimmel- og træfugtsniveauer. De indbyrdes forskelle er generelt meget små, og i modsætning til tidligere er opfugtning- samt udtørningsforløbene ensartede. Hvis analysen alene fokuserede på forholdende 100 mm inde i konstruktionen, var vigtigheden af materialeegenskaberne, i fugtmæssige henseende, af mindre betydning ved nordøstlig orientering.

Midt i væggen tilvejebringer den gule type dog en konstant kritisk RF i forhold til skimmelvækst, og tilsvarende er tilfældet for den blå og grå type, i den første del sommerperioden.

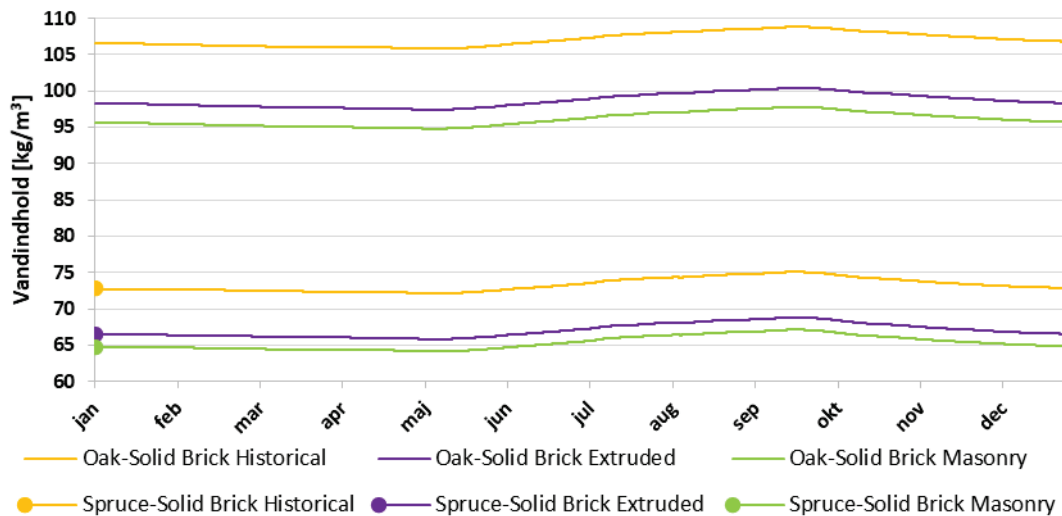
8.4.5 Sammenligning – Teglmateriale



Figur 36. A) Redegør for den relative luftfugtighed (månedsmiddelværdi) 100 mm fra den indvendige overflade. B) redegør for tilsvarende, men 300 mm fra den indvendige overflade. Beregningerne afspejler forholdene i februar. Resultaterne i figurene er tilvejebragt ved benyttelse af HEAT2 i kombination med formlerne fra teoriafsnittet. I tillæg til de 3 gennemgåede simuleringer er der foretaget en dynamisk simulering, der kun medtager diffusion.

Sammenligningen mellem diffusionsberegningerne og de dynamiske simuleringer bekræfter, at den røde og sorte tegltype ikke påvirkes af slagregnen (se Figur 36). Som det fremgår af ovenstående søjler, er den relative luftfugtighed den samme, som kan bestemmes hvis der alene medtages diffusion som fugttransportform. Det gælder både hvis WUFIpro som værktøj benyttes, eller hvis beregningerne foretages i hånden ved benyttelse af formlerne i teoriafsnittet. Tilsvarende beregninger af årets varmeste måned, august, viser samme billede (se Figur 143 og Figur 144 i rapportens appendiks). Den blå, gule og grå type tilvejebringer generelt meget sammenlignelige forhold. Der optræder periodevist kondensation i forbindelse med den blå og grå type hvorfor de fravælges (se Tabel 14 i rapportens appendiks). Den grønne, gule, og lilla tegltype befinder sig imellem de to ydre grupper. De undersøges i det følgende sammen med to trætyper, inden der foretages et egentligt materialevalg.

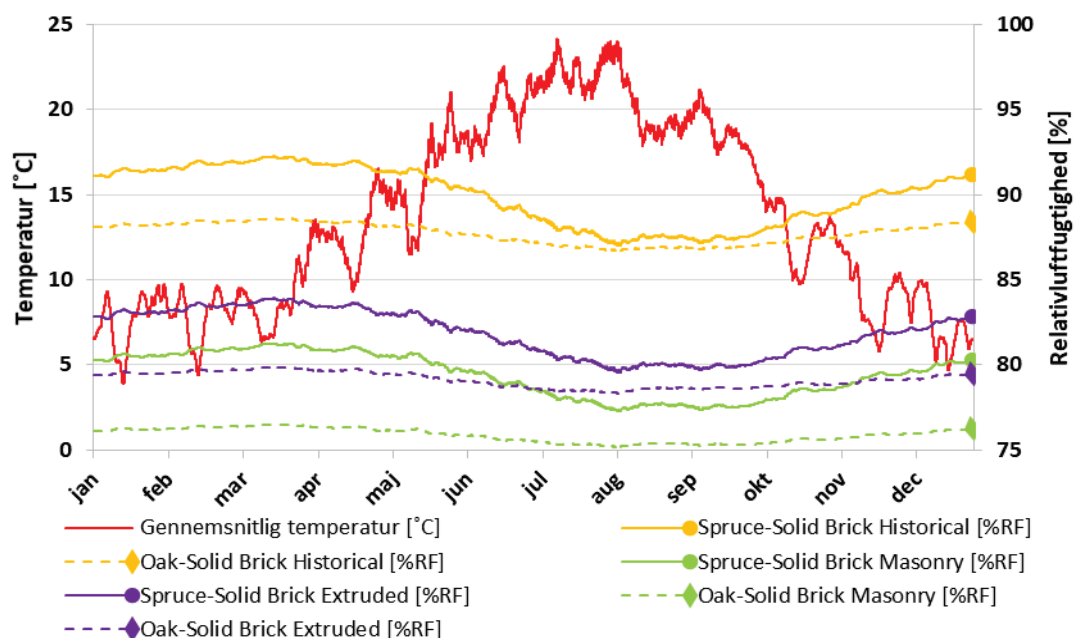
8.4.6 Vandindhold – Bjælkeenden



Figur 37. Redegør for det gennemsnitlige vandindhold i den simulerede konstruktion. Konstruktionerne er orienteret mod nord/øst, og slagsregnsbelastningen er dermed type [C].

Teglmaterialernes vandabsorptions- og fugtomfordelingsegenskaber påvirker vandindholdet i bjælkeenden. Jævnfør Figur 37 kan forskellen være op imod 10 kg/m^3 . Forskellen i træmaterialernes egenskaber (Oak og Spruce) bevirker, at vandindholdet opgjort i kg/m^3 er forskelligt. Kurverne er mere eller mindre parallelforskuet og den vådeste og tørreste teglsten forbliver den samme.

8.4.7 Temperatur & RF – Bjælkeenden



Figur 38. Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed ved bjælkeendens ydre. Temperaturforløbet imellem de 6 simulerede typer varierer meget lidt, hvorfor der er angivet en gennemsnitlig værdi. Konstruktionerne er orienteret mod nord/øst, og slagsregnsbelastningen er dermed type [C].

Den relative luftfugtighed er konsekvent højest i området omkring bjælkeenden ved anvendelse af spruce, som simuleringsmateriale til bjælkeende (se Figur 38). Når forskellen er størst i vinterperioden svarer den til ca. 5 % point for de 3 kombinationer. Den tørreste tegl- og træmaterialekombination (grøn) resulterer i relative luftfugtigheder, der ca. er 15 % point lavere end den vådeste (gul).

Opmærksomheden henledes på, at ovenstående er et udtryk for hvordan forholdene tager sig ud ved en nordøstlig orientering. Tilsvarende analyse foretaget mod sydvest, og med slagregnsbelastning svarende til den umiddelbare standard (A i indeværende rapport), bevirker at RF i alle tilfælde er stabilt over 95%. For at kunne undersøge nuancerne, og de enkelte materials indvirkning på de hygrotermiske forhold, er det valgt at benytte den nordøstvendte orientering til dette formål. Korrigering af slagregnets påvirkning, af den oprindelige konstruktionsopbygning orienteret mod sydvest, fremgår af foranalysens sidste resultatafsnit.

Konsekvenserne af vandindholdet og den relative luftfugtighed som de 3 kombinationer afstedkommer, kan anvendes til at bestemme det absolutte fugtindhold i bjælkeenden, som anvist i Tabel 5.

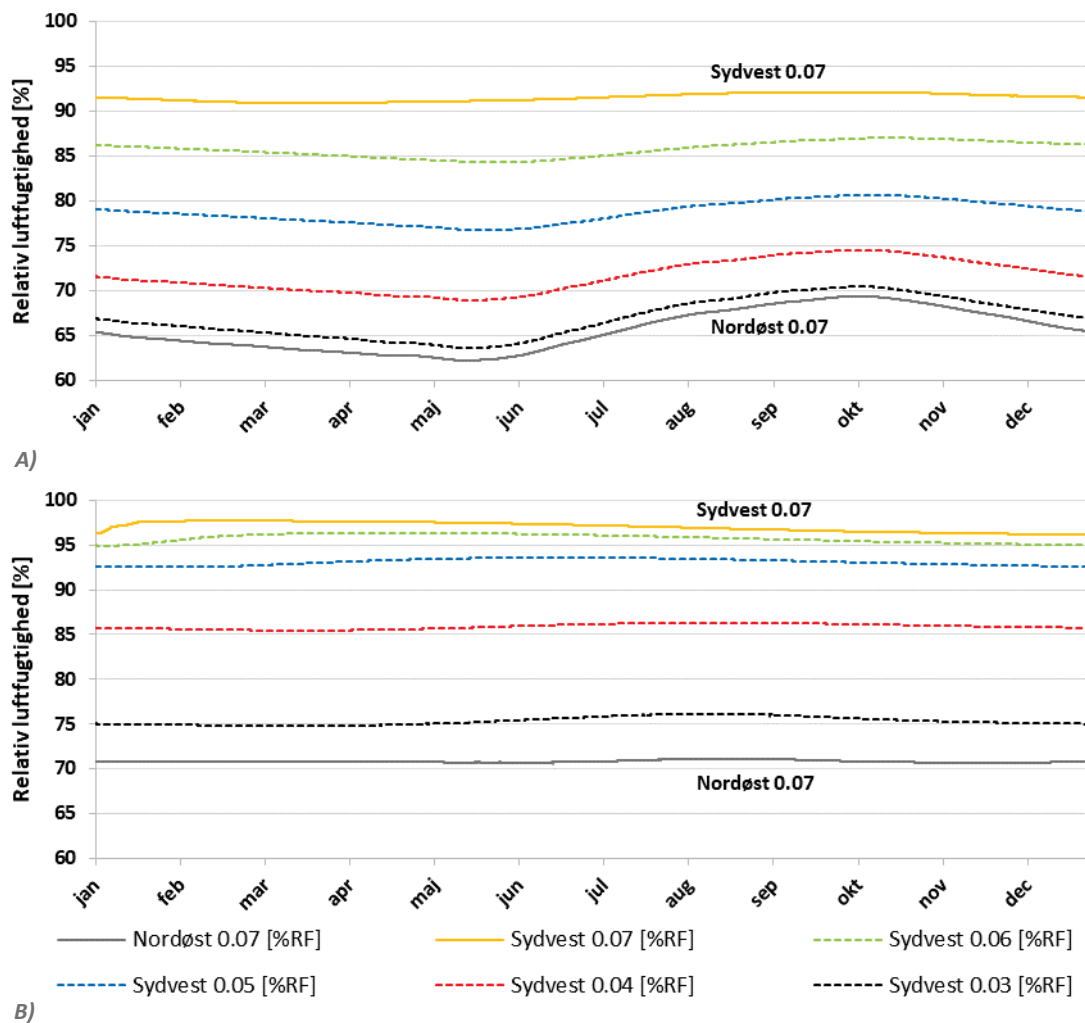
Træanalyse		Figur 37		Figur 38	
Graffarve	Type	Vandindhold [kg/m ³]	Vægt [%]	RF [%]	Vægt [%]
Orange	Oak-Solid Brick Historical	107-109	15,5	87-88	21
	Spruce-Solid Brick Historical	72-75	16	87-92	21-23
Lilla	Oak-Solid Brick Extruded	98-100	14,5	79	17
	Spruce-Solid Brick Extruded	67-69	15	80-84	17-20
Grøn	Oak-Solid Brick Masonry	95-97	14	76	16
	Spruce-Solid Brick Masonry	65-67	14,5	77-81	16-17

Tabel 5. Redegør for hvad det gennemsnitlige vandindhold [kg/m³] i den simulerede træbjælke svarer til i vægt [%]. Desuden omregnes den relative luftfugtighed som optræder i området, hvor træbjælkens yderste del befinder sig.

Omsættes det gennemsnitlige vandindhold i bjælkeenden til vægt [%], er de indbyrdes forskelle små. Antages det, at den yderste del af bjælkeenden er i ligevægt med de simulerede relative luftfugtigheder, vil træfugten for den gule kombination være over 20 vægt [%]. Den kontinuerlige omfordeling af fugt fra vådere til tørrere områder, vil formentlig betyde, at den reelle træfugt i området er lidt lavere.

Ovenstående undersøgelser understreger at alene valg af materialeegenskaber, kan have betydelig indvirkning på simuleringsresultaterne. Med tanke på at analyserne afspejler de oprindelige forhold (ingen efterisolering), og påvirkningen fra slagregnen er den mildeste, findes den grønne kombination at medføre de mest realistiske hygrotermiske forhold. I hovedanalysens undersøgelser benyttes derfor WUFI-materialerne Solid Brick Masonry og Spruce til henholdsvis teglfacade samt bjælkeende.

8.4.8 Sammenligning – Regnkoefficient



Figur 39. A) Redegør for den relative luftfugtighed 100 mm fra den indvendige overflade, som funktion af regnkoefficient samt orientering. B) redegør for tilsvarende, men 300 mm fra den indvendige overflade. Kurverne afspejler forholdene som den, for hovedanalysen, valgte teglsten tilvejebringer.

I ovenstående figur korrigeres slagregnen ved at ændre på en (R2) af de koefficienter som bestemmer slagregnen i hvert simulerede tidskridt. Når der ingen ændringer af slagregnen foretages, og man derved benytter anbefalingen/standardopsætningen i simuleringstværværktøjet WUFIpro, er koefficienten [R2] 0.07 [s/m] ved alle orienteringer. Som reference er det mindst slagregnsbelastede verdenshjørne i Danmark (nordøst), indlagt i graferne. Ved at ændre på koefficienten til 0.03 følger der en kraftig reduktion, så den relative luftfugtighed 100 mm fra den indvendige overflade, omtrent svarer til nordøstlige forhold. Ændres koefficienten i mellem 0.06-0.05 vil der ca. midt i bjælkeenden fortsat optræde særdeles kritiske hygrotermiske forhold. Den røde version (0.04) tilvejebringer 15 % point i forskel til nordøst, samtidigt med at der udelukkende optræder relative luftfugtigheder som er kritiske for skimmelvækst. Sydvestvendte simuleringer i hovedanalysen vil derfor tage udgangspunkt i en slagsregnsbelastning, hvor koefficienten [R2] sættes til 0.04 og 0.07 for nordøstlig orientering.

8.5 Diskussion

Undervejs i foranalysen er indvirkningen af forskellige tegl- og træmaterialer samt slagregnsbelastninger undersøgt. På baggrund af undersøgelserne var hensigten med analysen at bestemme, hvilke materialer som referencemodellen i hovedanalysen skal bestå af. Endvidere var formålet at regulere slagregnsbelastningen, således at de hygrotermiske forhold omkring bjælkeenden ikke resulterede i en kritisk træfugt. Det med begrundelse i at den konkrete indbygning og teglfacade i mere end 100 år ikke har bevirket at bjælkeenden er nedbrudt.

Eftersom de faktiske materialeegenskaber ikke er kendte, kan det ene testede materiale i princippet være ligeså rigtigt som det andet. De to typer der ikke påvirkes af slagregnen, må dog antages at være urealistiske bud på en teglsten fra 1906. Jævnfør teoriafsnittet indeholder teglsten almindeligvis et kanalsystem af åbne porer, som bevirker at de er vandsugende, og derfor bør reagere på udefrakommende vandbelastning. Det bekræftes også af litteraturstudiet, hvor alle lignende studier konkluderer, at vandpåvirkede teglfacader resulterer i et højt vandindhold. Det kan i højere grad diskuteres hvorvidt det lettere konservative valg, ved at vælge den teglsten som medfører den laveste træfugt, er korrekt (se Tabel 5). Det med tanke på at teglsten fra 1906 må forventes at være porøse. Omvendt taler det forhold, at bygningen har stået opført i mere end 100 år, for at kombinationen som i lange perioder medfører relative luftfugtigheder over 90% ved en nordøstlig orientering, er for vandsugende (se Figur 38). I givet fald vil selv samme opbygning indebære særdeles kritiske hygrotermiske forhold omkring bjælkeenden, ved kraftigere slagregnsbelastning end den nordøstvendte analyse medfører.

Tidligere undersøgelser har jævnfør litteraturstudiet undersøgt konsekvenserne af varierende slagregnsbelastninger, og fundet det afgørende for de hygrotermiske forhold. Den faktiske påvirkning kan desuden tilskrives bygningens geometri, omgivelserne, placeringen i landskabet og meget mere. Omend at slagregnen i simuleringsværktøjet bygger på omfattende studier, og medtager mange af de indgående parametre, er det en forenklet beregningsmetode. Det synes sandsynligt, at slagregns påvirkning midt på en 10 meter høj væg afviger fra den belastning tagfoden i indeværende rapport tager afsæt i. Det kan altså diskuteres, hvorvidt det er muligt at bestemme den korrekte slagregnsbelastning, og hvor præcis indvirkningen er. Succeskriteriet om at bringe den relative luftfugtighed ned på et niveau som ikke medfører kritisk træfugt, kan resultere i at belastningen fra slagregnen undervurderes. Den valgte belastning er mindst 10 % point lavere end anbefalingen/standartopsætningen medfører. Yderligere kunne det faktum, at bjælkeenden indgår i en muret tagfod uden udhæng eller anden konstruktiv beskyttelse, godt betyde at belastningen netop her er højere end det valgte. Dog må relative luftfugtigheder ≥ 93 % for de 3 mest slagregnspåvirkede beregninger, med udgangspunkt i den mindst kapillarsugende teglsten, betragtes som værende meget høj (se Figur 39).

På baggrund af foranalysen, besluttes det at anvende WUFI-materialet Solid Brick Masonry og WUFI-materialet Spruce, til at udgøre henholdsvis tegl og træbjælkeende i hovedanalysen. Slagregnsbelastningen simuleres efter standartopsætningen ved simuleringer mod nordøst, og på tilsvarende vis ved sydvestlig orientering, dog med justeret [R2] koefficient på 0,04.

9 Hovedanalyse

9.1 Metode

For at kunne bestemme hvilke parametre som særligt påvirker de hygrotermiske forhold og fastslå de væsentligste, samt at undersøge om de medfører en risiko for skader på bjælkeenden, foretages der 18 varierende koblede varme- og fugtberegninger. Der findes mange forskellige parametre som kunne være interessante at undersøge, hvilket også omtales i afgrænsningen, men i denne rapport udvælges og undersøges følgende:

- **Orientering**
 - Sydvest
 - Nordøst
- **Dampspærre**
 - Tæt
 - Med revne
- **Hydrofobering**
 - Ingen
 - Med revne
 - Tæt

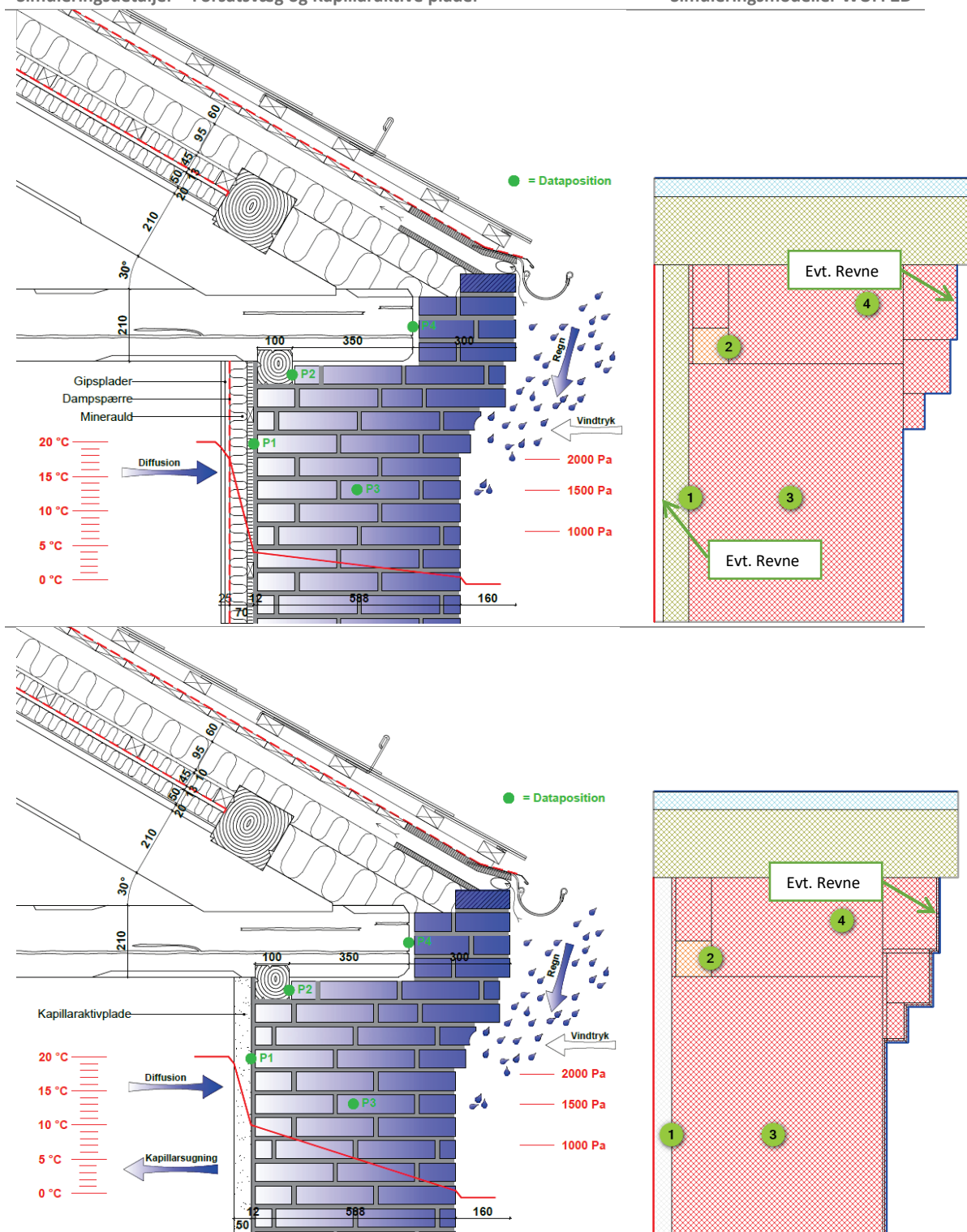
Der indgår altså 3 overordnede parametre, der medfører 7 parametervariationer. I kombination med de to indvendige efterisoleringsprincipper (forsatsvæg og kapillaraktive plader), resulterer det i 18 forskellige scenarier i henhold til nedstående nøgle.

Kombinationsnøgle								
Princip	ID	Orientering		Dampspærre		Hydrofobering		
		Sydvest	Nordøst	Tæt	Revne 10 mm	Ingen	Revne 10 mm	Tæt
Forsatsvæg	F1	•		•		•		
	F2*	•		•			•	
	F3	•		•				•
	F4*	•			•	•		
	F5*	•			•		•	
	F6*	•			•			•
	F7		•	•		•		
	F8*		•	•			•	
	F9		•	•				•
	F10*		•		•	•		
	F11*		•		•		•	
	F12*		•		•			•
Kapillaraktive plader	K1	•				•		
	K2*	•					•	
	K3	•						•
	K4		•			•		
	K5*		•				•	
	K6		•					•

Tabel 6. Nøglen skal aflæses på den måde, at simuleringsmodel [F1] består af den eksisterende teglfacade med sydvestlig orientering, og at der tilføjes en forsatsvæg. I dette tilfælde er dampspærren tæt og facaden hydrofobieres ikke. I forbindelse med [F2] er forholdene de samme, foruden at facaden hydrofobieres med en revne. På den måde er det muligt at aflæse opbygningen af hver enkel simuleringsmodel. Kombinationer der angives med [*] indikerer at scenariet er simuleret i to dimensioner. De resterende simuleres under 1-dimensionale forhold.

Simuleringsdetaljer – Forsatsvæg og Kapillaraktive plader

Simuleringsmodeller WUFI 2D

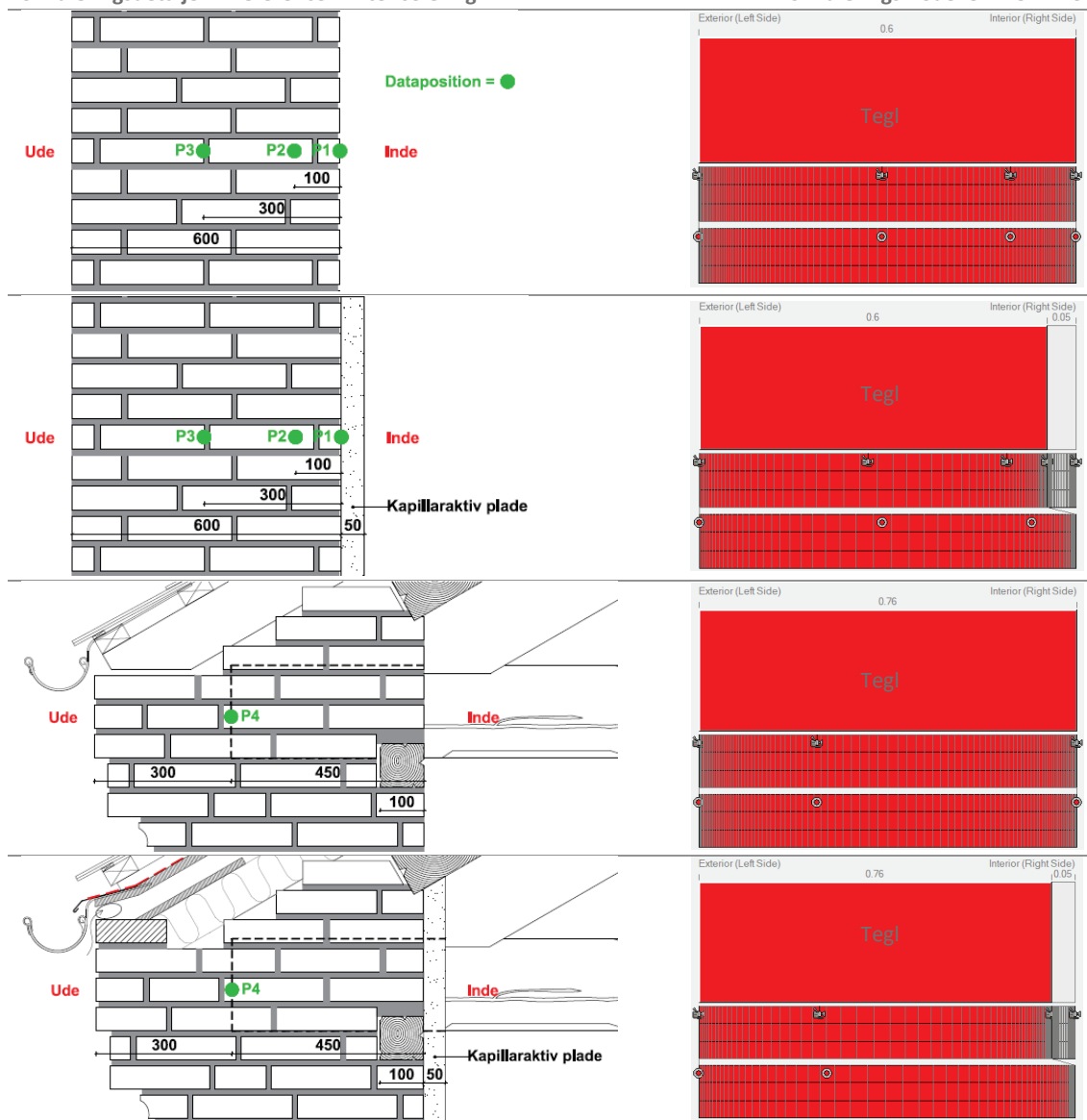


Figur 40. Redegør for opbygning af 2D-simuleringsmodellerne og datapositionernes placering i konstruktionen.

Simuleringsmodellerne udføres forenklet med et fladt tag. Det skyldes at WUFI 2D ikke kan modellere skråflader. Til gengæld er det beregningsteknisk muligt, at lade udeklimaet vide at tagfladen har en 30 graders hældning, og på den måde komme omkring udfordringen samt tættere på de faktiske forhold.

Simuleringsdetaljer – Reference – Efterisolering

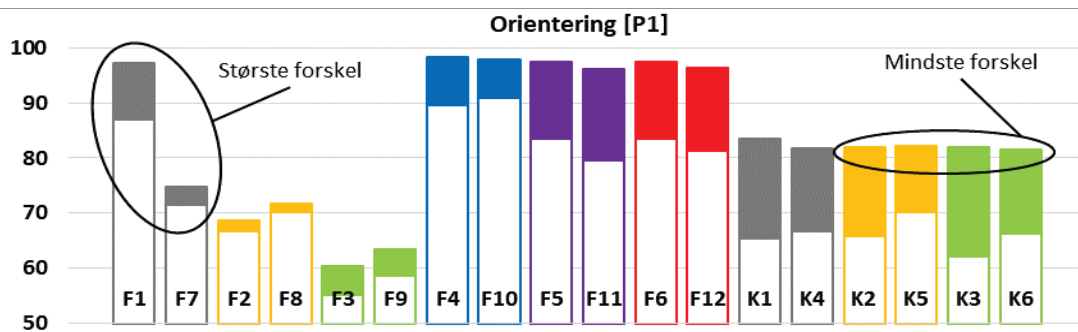
Simuleringsmodeller WUFI Pro



Figur 41. Redegør for opbygningerne af 1D-simuleringsmodellerne og datapositionernes placering i konstruktionen. Det fremgår hvordan referencemodellen (oprindelige forhold) er opført, og hvordan kapillaraktive plader efterfølgende tillægges. Forsatsvæggen er ikke vist, men er udført på samme vis. Resultater fra de 3 første datapositioner tager udgangspunkt i en model bestående af 600 mm tegl. Den 4. position, i slutningen af bjælkeenden bygger på data fra en model, hvor væggen øges til 760 mm, så der er 300 mm tegl, mellem bjælkeenden og ydersiden af facaden.

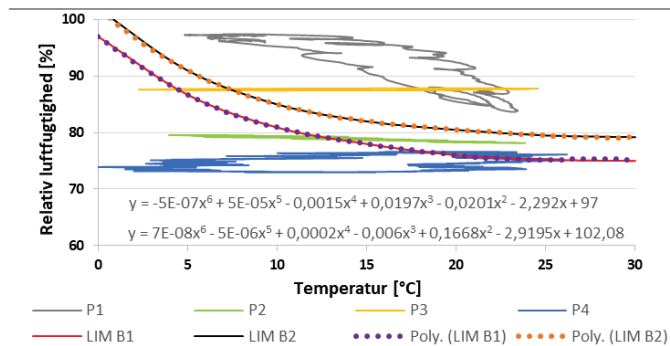
Simuleringerne udføres ved benyttelse af WUFIpro (1D) i det omfang hvor 1-dimensionale betragtninger er tilstrækkelige. Et eksempel på det kunne være model [F1], hvor fugt- og varmestrømmene i konstruktionen kan eftervises tilstrækkeligt præcist i 1 dimension, vel vidende at fugt kan vandre i flere retninger. Simuleringer i 1D er ikke tilstrækkelige når det ønskes at undersøge konsekvenserne af fejl i konstruktionen. Derfor anvendes WUFI 2D ved scenarier, hvori der indgår revner i dampspærren og/eller manglende hydrofobering af facadens ydre.

Med 18 forskellige simuleringsmodeller i henhold til den netop anviste simuleringssnøgle, og med data fra 4 forskellige steder i konstruktionen, jævnfør ovenstående detaljetegninger/modelopbygninger, resulterer det i et omfangsrigt datasæt. I første omgang benyttes resultaterne fra simuleringerne til at undersøge forskellene imellem sammenlignelige modeller. Her tænkes der på simuleringsvariationer, der bortset fra et enkelt parameter er helt ens. Det kunne for eksempel være [F1] - [F7] og [F2] - [F8], hvis eneste forskel er orientering. Herved isoleres påvirkningen i [%] point, for alle modeller, parametre samt datapositioner.



Figur 42 er et eksempel på et diagramformat, som læseren af indeværende rapport præsenteres for i det følgende resultatafsnit. Af X-aksen fremgår simuleringstyperne, og Y-aksen viser relativ luftfugtighed. Søjlerne redegør for de laveste og højeste simulerede relative luftfugtigheder (udfyldte område) for alle simuleringsmodeller. I dette eksempel isoleres konsekvensen af parameteret orientering i position [P1]. Eksempelvis kan det udledes, at orientering alene, påvirker den relative luftfugtighed med ca. 23 procentpoint imellem simuleringssparret [F1-F7].

Foruden at fastslå hvilke parametre der har den største indvirkning på de hygrotermiske forhold, benyttes resultaterne til at udvælge de modeller, som er særligt interessante at præsentere. De udvalgte modeller benyttes til at undersøge hvilke konsekvenser efterisoleringsskemaet, og de indgående parametervariationer har på området omkring bjælkeenden. Det sker ved anvendelse af forskellige skimmelmodeller, aftegninger af temperatur- og relativ luftfugtighedsforløb, samt rumlige modeller. Jævnfør teori-afsnittet findes der mange forskellige skimmelmodeller, der alle peger på at skimmelvækst kan relateres til temperatur, relativ luftfugtighed og egenskaberne af materialeoverfladen (Ramberg, Jepsen & Wang, 2015, s. 728). I simuleringsværktøjet WUFI håndteres dette ved en isopleth-model. På baggrund af den simulerede temperatur og RF i hvert tidsskridt, plottes en kurve i relation til laboratorie-bestemte grænseværdier for skimmelvækst. Kurverne navngives LIM B1 og LIM B2, der repræsenterer grænsen for, hvornår der kan opstå skimmelvækst på organiske og ikke organiske overflader. Aftegninger som befinder sig over disse kurver i længere perioder, betyder der er risiko for udvikling af skimmel på overfladen.



Figur 43. Viser de hygrotermiske konditioner for de 4 datapositioner, placeret som anvist i Figur 40 og Figur 41. De plottes i forhold til LIM B1 og LIM B2. Af formidlingsgrunde- og for at lette læsbarheden er timeværdierne eksporteret fra WUFI til Excel, hvorefter de omsættes til grafer som denne. I dette eksempel er forholdene i P1 og P3 betragteligt over begge grænseværdier, og derfor kritiske i forhold til skimmelvækst.

Foruden isopleth-metoden anvendes WUFI Mould Index VVT til at bestemme hvilken grad af skimmelvækst, der potentielt kan optræde, i området hvor datapositionerne er placeret. WUFI Mould Index VVT er en matematisk-empirisk model, der forudser skimmelvækst som funktion af substratmateriale, temperatur, eksponeringstid og relativ luftfugtighed. I valg af substratmateriale, indgår betragtninger vedr. følsomhedsklasse, materialeklasse, overfladetype og evt. trætype, samt i hvilken grad overfladen er eksponeret for mennesker (eksponeringsklasse).

Indstillingsmulighederne i modellen er mange. I dette projekt tager VTT-diagrammer udgangspunkt i de farvede rækker i Tabel 7. Det er lig med standartopsætningen "worst case: building material" som endvidere forventes at være i kontakt med indeluften.

VTT-Indstillinger	
Occupant exposition class	No impact to users/inhabitants expected
	Interior surface and/or positions in contact to interior air
	Inside constructions/exterior surfaces without direct contact to interior air ASHRAE 160 requirements
Sensitivity class	Very sensitive
	Sensitive
	Medium resistant
	Resistant
Material class	Significant decline
	Relevant decline
	Relatively low decline
	Almost no decline
Type of surface	Cleaned
	Soiled
	User defined

Tabel 7. Viser de bagvedliggende indstillinger som VVT-grafer i resultatet afsnittet bygger på.

Modellen kategoriserer niveauet af skimmelvækst efter en 6 points-skala. Index 0 indikerer ingen vækst og index 6 omkring 100 % dækning. Herimellem findes der 5 varierende niveauer af skimmelgrad. (Ojanen, Viitanen, Peuhkuri, Lähdesmäki, Vinha & Salminen, 2010, s. 3-7).

VVT-Index Levels	
Mould Index	Description of the growth rate
0	No growth
1	Small amounts of mould on surface (microscope), initial stages of local growth
2	Several local mould growth colonies on surface (microscope)
3	Visual findings of mould on surface, < 10% coverage, or, < 50% coverage of mould (microscope)
4	Visual findings of mould on surface, 10 – 50% coverage, or, > 50% coverage of mould (microscope)
5	Plenty of growth on surface, > 50% coverage (visual)
6	Heavy and tight growth, coverage about 100 %

Tabel 8. Mould Index for Experiments and Modelling (Ojanen, Viitanen, Peuhkuri, Lähdesmäki, Vinha, Salminen, 2010, s. 3).

I grafer der aftegner forløb af temperatur og relativ luftfugtighed, er den kritiske relative luftfugtighed indført. Som det fremgår af formelen, er RF_{krit} 80 % når temperaturen er ≥ 20 °C og ellers temperaturafhængig efter nedenstående formel:

$$RF_{krit} = 0,00267 \times T^3 + 0,160 \times T^2 - 3,13 \times T + 100, \text{ når } T \leq 20 \text{ } RF_{min} \text{ når } T > 20 \quad (9.1)$$

Da temperaturen spiller en vigtig rolle, både i forbindelse med vækstbetingelser og på fugtniveauer, undersøges konsekvensen af forenklingen af tagkonstruktionen i WUFI 2D. Til formålet anvendes HEAT2, hvor det er muligt at modellere skråflader. Der udføres en model med korrekt taghældning og isoleringsmængde svarende til de tidligere anviste tegninger. I begge modeller bestemmes temperaturgradienten i det samme tværsnit, hvorefter de sammenlignes. Der anvendes den stationære beregningsfunktion i HEAT2, med udgangspunkt i randbetingelserne fra DRY, og tilsvarende månedsmiddelværdi simuleret i WUFI 2D.

9.2 Forudsætninger

Materialeegenskaber – Reference- og tillægsmaterialer

	Enheden	Tegl	Træbjælke	Mineraluld	Kapillarakktivplade	PE- Folie	Gipsplade
Varmeledningsevne	[W/mK]	0.600	0.230	0.032	0.043	2.3	0.3
Specifikvarmekapacitet	[J/kgK]	850	1400	850	850	2300	850
Densitet	[kg/m³]	1900	455	73	112	130	1009
Porøsitet	[m³/m³]	0.240	0.73	0.95	0.94	0.001	0.743
Vanddampdiffusionsmodstand	[-]	100	4.3	1.1	5.2	50000	11.2

Tabel 9. Redegør for de i hovedanalysen indgående materialeegenskaber, som anvendes i dynamiske fugtsimuleringer og HEAT2-beregninger.

Materialeindstillinger

Hydrofobering	Hydrofoberingen af teglfacadens yvendige overflade er bestemt efter tyske guidelines fra WTA (WUFI-forum, 2011). De yderste 10 mm af teglfacaden er opdelt i 2 x 5 mm lag, hvor de to følgende materialeegenskaber justeres: Liquid Transport Coefficient Suction & Redistribution justeres fra 0.1 til 0.00166667 kg/m²s¹/² for det yderste lag, og til 0.0166667 kg/m²s¹/² for det inderste lag. I henhold til teori af snittet, vil justeringen af disse parametre medføre, at teglets evne til at transportere vand ved kapillarsugning, begrænses. Slagregnsens indvirkning på facadestrukturen reduceres herved, når teglets kapillareffekt justeres. De resterende materialeegenskaber forbliver de samme som for resten af teglfacaden. Simuleringsmodeller indeholdende en revne i hydrofoberingen, etableres ved at erstatte hydrofoberingen med standardteglets materialeegenskaber.
Revne i dampspærre	Revnen i dampspærren etableres ved at erstatte denne i et udvalgt område, med en "dampspærre" hvor Z-værdien/vanddampdiffusionsmodstand justeres til 1.00E-07. Ved at indføre en mangelfuld og utilstrækkelig modstand, bør det jævnfør teori af snittet betyde, at indeluften vil kunne trænge ud i konstruktionen, og herved påvirke de hygrotermiske forhold.

Tabel 10. Beskriver hvordan imprægnering og indbygningsfejl indføres i simuleringsmodellerne.

Simuleringsforudsætninger – Facade

Randbetingelser for inde- og udemiljø

Indvendigt:

Lufttemperatur [°C]

Konstant lufttemperatur på 20 °C

Relativ luftfugtighed [%]

Varierende i henhold til fugtbelastningsklasse 2

Udvendig facade:

Lufttemperatur [°C]

Lund: LTH Data

Relativ luftfugtighed [%]

Lund: LTH Data

Slagregnskoefficient, Syd/vest [-]

Rain · (0 + 0.04 · wind velocity) med sydvestlig orientering

Slagregnskoefficient, Nord/øst [-]

Rain · (0 + 0.07 · wind velocity) med nordøstlig orientering

Kortbølgestråling absorptionsevne [-]

0.68 Tegl, rød

Langbølgestråling emissivitet [-]

0.9

Jordbundens kortbølgerefleksivitet [-]

0.2

Regnvandsabsorptionsværdi [-]

0.7

Simuleringsforudsætninger – Tag

Randbetingelser for inde- og udemiljø

Udvendig tagkonstruktion:

Lufttemperatur [°C]

Lund: LTH Data

Relativ luftfugtighed [%]

Lund: LTH Data

Taghældning [°]

30

Slagregnskoefficient, Syd/vest [-]

Rain · (1 + 0.04 · wind velocity) med sydvestlig orientering.

Slagregnskoefficient, Nord/øst [-]

Rain · (1 + 0.07 · wind velocity) med nordøstlig orientering.

Kortbølgestråling absorptionsevne [-]

0.87 Roof, Sheet, Black Matt Surface

Langbølgestråling emissivitet [-]

0.9

Jordbundens kortbølgerefleksivitet [-]

0.2

Regnvandsabsorptionsværdi [-]

0.7

Jordbundens langbølgeemissionsevne [-]

0.9

Jordbundens langbølgereflektivitet [-]

0.1

Sky-indeks [-]

0.66

Materialernes indbygningsfugt [kg/m³]

Tegl

10 – 85 varierer alt efter simuleringsmodel, for opnåelse af ligevægt.

Træbjælke

55 – 80 varierer alt efter simuleringsmodel, for opnåelse af ligevægt.

Mineraluld

0.2

Kapillaraktiv plade

4

PE-folie

0

Gipsplade

6.3

Simuleringsperiode

01-01-2018 – 31-12-2027

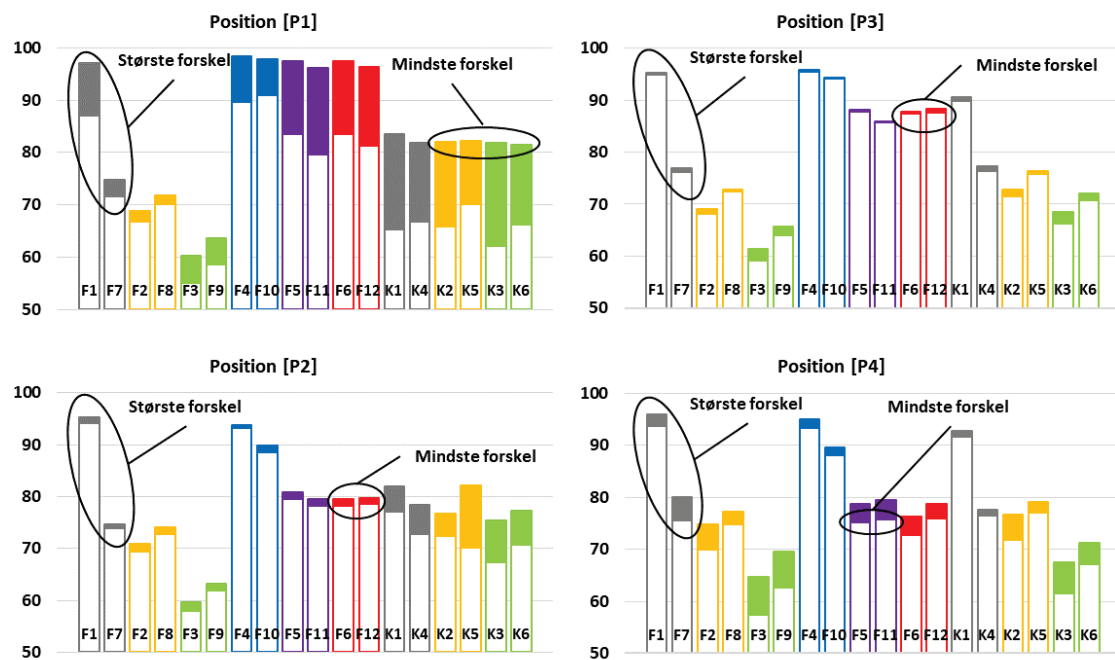
Tabel 11. Redegør for de fællesbetingelser, som samtlige kombinationer er simuleret under.

Klimabetingelser

Der anvendes den samme klimaprofil til hovedanalysen som i forbindelse med foranalysen. Det betyder at temperaturforløb [°C], relativ luftfugtighed [%], global solstråling [W/m²], diffus solstråling [W/m²] sum af solstråling [kWh/m2a], normal regn [Ltr/m²], og sum af slagregn [mm/a] fremgår Figur 28.

9.3 Resultater

9.3.1 Orienterings indvirkning

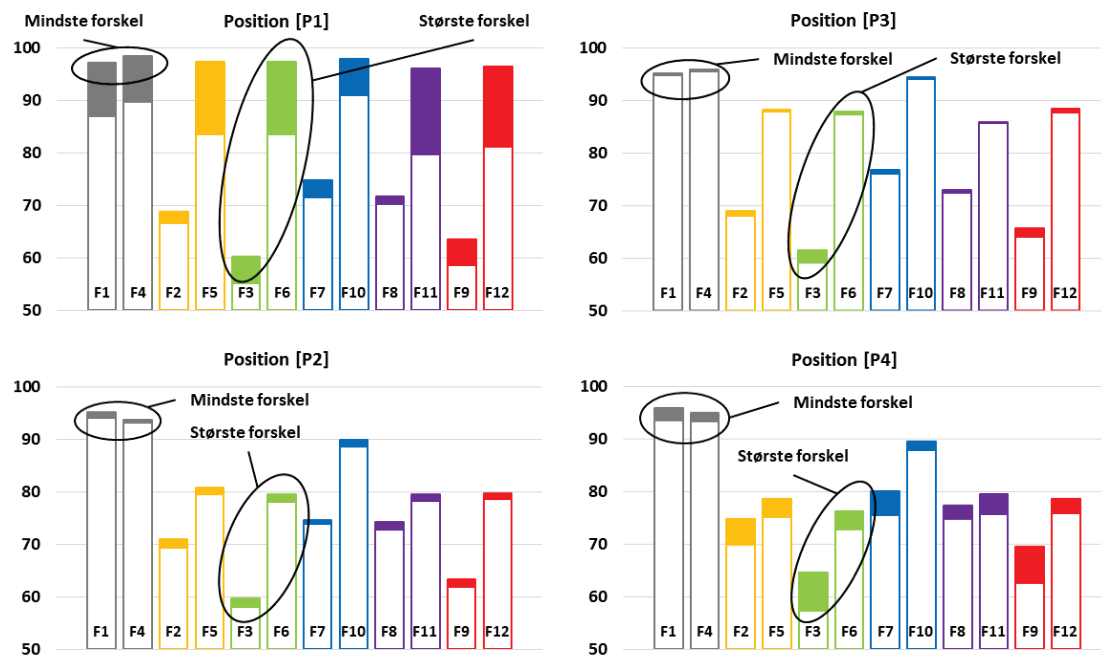


Figur 44. Af ovenstående grafer kan den maksimale og minimale relative luftfugtighed (farvefyldte område), som optræder over året for hver af de 18 simuleringsskemaer samt 4 datapositioner, udledes. Til eksempel fremgår det af model [F1], at den laveste simulerede RF er 87% og den højeste simulerede RF er 97% i position [P1]. Endvidere fremgår forskellen i % point datasættene imellem, som konsekvens af orienteringen. Bemærk at det kun er muligt at sammenligne modellerne parvis, altså [F1] Vs [F7], [F2] Vs [F8] og så fremdeles.

For at kunne isolere konsekvenserne af orienteringens indvirkning på de hygrotermiske forhold omkring bjælkeenden, sammenlignes kun modeller med orientering som variabel. På baggrund af ovenstående grafer henledes opmærksomheden på, at den største forskel optræder imellem simuleringsskemaet [F1] og [F7] (tæt dampspærre, ingen hydrofobering). Det er konsekvent tilfældet i alle 4 datapositioner. Den mindste forskel optræder derimod ved anvendelse af kapillaraktive plader i position [P1] for model [K2] og [K5], og ved skiftende modeller indeholdende en forsatsvæg i positionerne P2 og P4.

Orienteringen alene kan altså medføre en forskel på 23 % point, som er forskellen imellem [F1] og [F7] i position [P1], og kan modsat være betydningsløs i samme position for modeller som [K2] og [K5].

9.3.2 Dampspærrens indvirkning

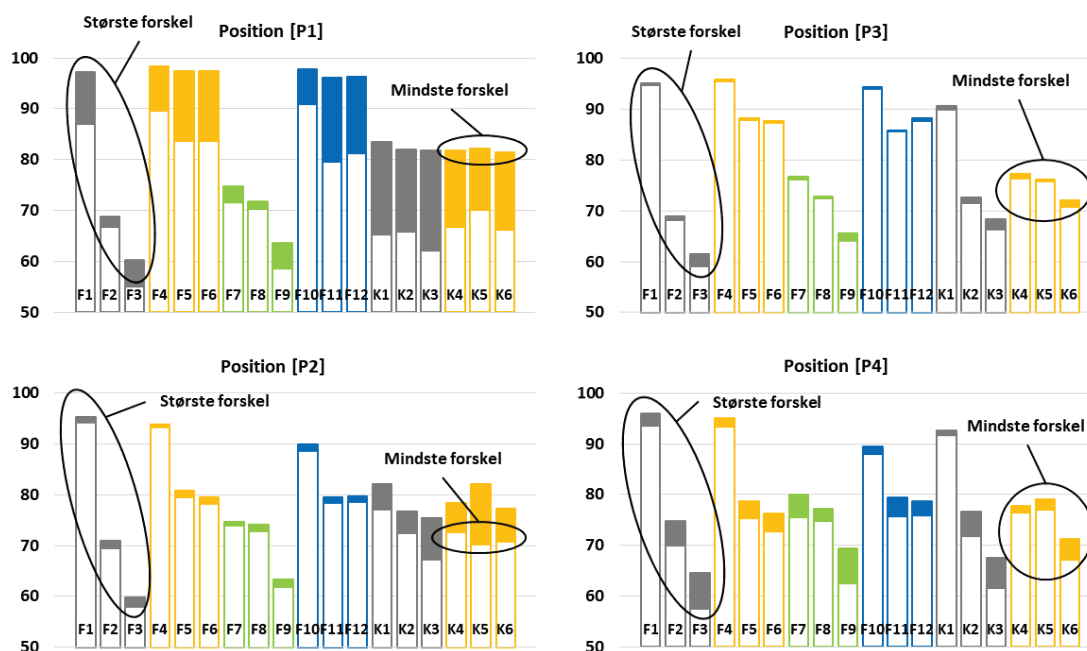


Figur 45. Af ovenstående grafer kan den maksimale og minimale relative luftfugtighed (farvefyldte områder), som optræder over året for hver af de 18 simuleringsskemaer samt 4 datapositioner, udledes. Til eksempel fremgår det af model [F1], at den laveste simulerede RF er 87% og den højeste simulerede RF er 97% i position [P1]. Endvidere fremgår forskellen i % point datasættene imellem, som konsekvens af dampspærrens tæthed. Bemærk at det kun er muligt at sammenligne modellerne parvis, altså [F1] Vs [F4], [F2] Vs [F5] og så fremdeles. Eftersom der ikke indgår en dampspærre i modellerne med kapillaraktive plader, viser ovenstående kun tiltag med en forsatsvæg.

Som tilfældet var med orienteringens indvirkning på de hygrotermiske forhold, isoleres påvirkningen af en dampspærre med og uden revne, ved at sammenligne modeller med netop det parameter som den eneste variabel. Den største forskel i % point optræder naturligt i position [P1], altså positionen tættest på dampspærren og derfor også revnen, i modeller hvor en sådan er indeholdt. Bemærkelsesværdigt er det, at påvirkningen generelt er betragtelig i alle 4 datapositioner. Det med tanke på, at position [P1] og [P4] er adskilt både i X- og Y-aksen, som det fremgår af modelopbygningerne i metodeafsnittet. Endvidere kan det udledes, at revnen i dampspærren har betragtelig indvirkning på den relative luftfugtighed for alle simuleringsskemaerne (på nær [F1] og [F4]).

Forskellen er altid størst mellem [F3] og [F6] (sydvestlig orientering, med hydroforbering) og mindst mellem [F1] og [F4] (sydvestlig orientering, ingen hydroforbering). Hvor revnen maksimalt resulterer i en stigning på et par % point for [F1] og [F4], kan revnen flytte den relative luftfugtighed op imod 37 % point for [F3] og [F6]. Eftersom de to modeller med tætte dampspærre ([F1] og [F3]) medfører vidt forskellige relative luftfugtigheder, er potentialet når tilsvarende modeller simuleres med en revne ([F4] og [F6]) også forskelligt. Fugttilskuddet kan af samme grund medføre en større stigning i relative luftfugtigheder, hvilket så også er tilfældet i alle 4 positioner.

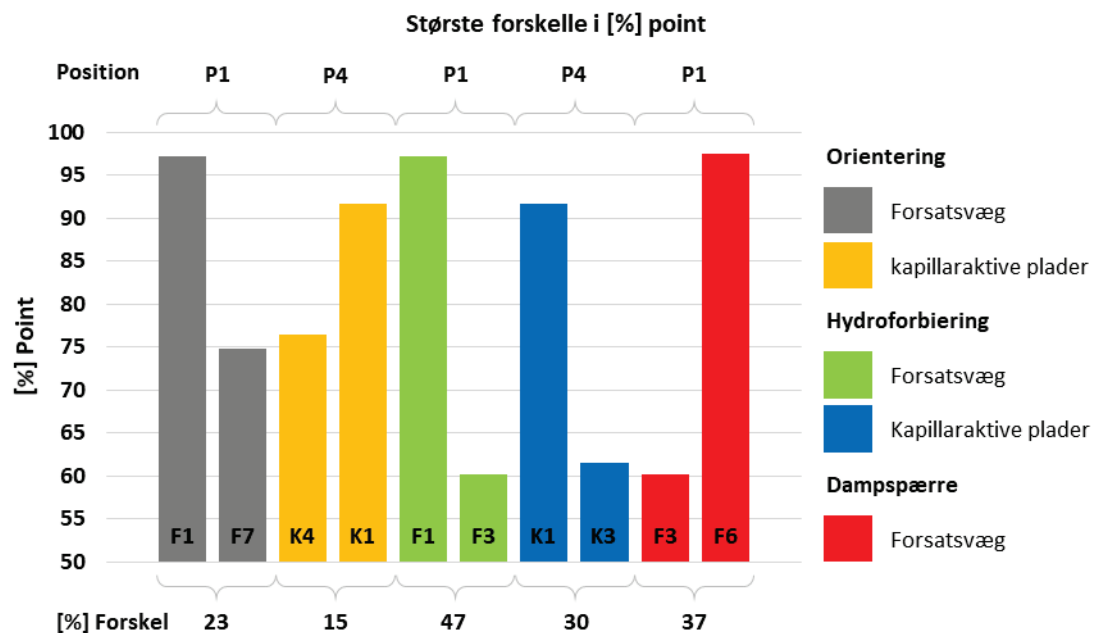
9.3.3 Hydrofoberingens indvirkning



Figur 46. Af ovenstående grafer kan den maksimale og minimale relative luftfugtighed, som optræder over året for hver af de 18 simuleringsskemaer samt 4 datapositioner, udledes. Til eksempel fremgår det af model [F1], at den laveste simulerede RF er 87% og den højeste simulerede RF er 97% i position [P1]. Endvidere fremgår forskellen i % point datasættene imellem, som konsekvens af hydrofobering. Bemærk at det kun er muligt at sammenligne modeller i samme datasæt. [F1] / [F2] / [F3] kan sammenlignes, på tilsvarende vis kan [F4] / [F5] / [F6] og så fremdeles.

Tilsvarende de to tidligere gennemgåede parameterindvirkninger, isoleres påvirkningerne ved imprægnering af facadens ydre ved at sammenligne modeller, hvis eneste forskel er, hvorvidt facaden er 100 % hydrofobieret, med en revne indeholdt eller helt uden. Graferne tegner et billede af at de højeste relative luftfugtigheder findes i den uimprægnerede facade, og de laveste i facaden med intakt imprægnering. Derimellem findes modellen med en revne i imprægneringen. Effekten af imprægneringen påvirkes også af slagregnsmængden facaden udsættes for. Tages der udgangspunkt i datasættene [F1] / [F2] / [F3] (sydvestlig orientering) og [F7] / [F8] / [F9] (nordvestlig orientering) kan det af graferne udledes, at effekten er betydeligt større, når facaden imprægneres ved en sydvestlig orientering, frem for nordøstlig. Fugtniveauet ender lavere i de sydvestlige udgaver, selvom en uimprægneret facade mod sydvest indeholder ca. 20 % point mere fugt, end en nordøstvendt (se [F1] og [F7]). Hydrofobering har særligt indvirkning på udgaverne hvor teglfacaden samtidigt efterisoleres med en forsatsvæg. Imprægneringen bevirker at fugtindholdet reduceres anseeligt for datasættet [F1] / [F2] / [F3]. I vinterperioden hvor fugtindholdet er højest, reducerer imprægneringen med en revne indeholdt fugtniveauet svarende til 28 % point. Når revnen fjernes og imprægneringen er tæt, falder den relative luftfugtighed yderligere med 9% point, i positionen tættest på indeklimaet [P1]. I simuleringer hvor den eksisterende teglfacade indvendigt efterisoleres med en kapillaraktiv plade, har imprægneringen begrænset indvirkning i position [P1] og [P2]. I de to positioner tættest på udeklimaet, er effekten dog også mærkbar for dette efteriseringsprincip.

9.3.4 Samlet parameterindvirkning

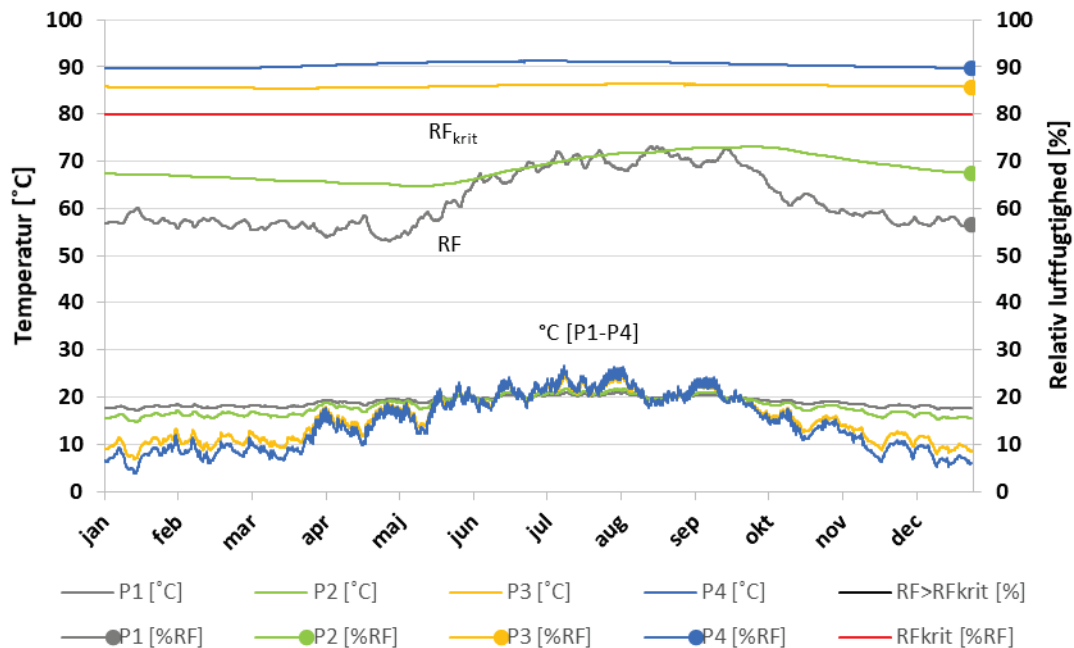


Figur 47. Redegør for de største forskelle, som optræder på tværs af alle simuleringsvariationer, datapositioner og efterisoleringsprincip.

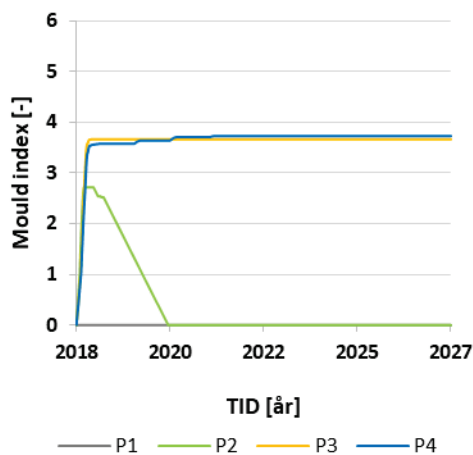
Ovenstående graf samler simuleringsvarianter fra de netop gennemgåede grafer, der resulterer i det største udslag, som konsekvens af de i projektet indgående parametre. Det kan af Figur 47 udledes, at facadens orientering alene kan medføre en forskel på henholdsvis 23- og 15 % point, når facaden efterisoleres med en forsatsvæg eller ved brug af kapillaraktive plader. Hvor det er i position [P1], at orienteringen har den største indvirkning ved benyttelse af en forsatsvæg, er indvirkningen størst i den yderste position [P4] ved anvendelse af kapillaraktive plader. På tilsvarende vis kan de største forskelle som funktion af imprægneringens og dampspærrens tæthed aflæses i figuren.

Endvidere henledes opmærksomheden på, at tre simuleringsvarianter optræder i to forskellige parameterkategorier. [F1] og [K1] indgår i forbindelse med orientering samt hydrofobering, og [F3] indgår både i forbindelse med dampspærrens og hydrofoberingens tæthed. I det følgende behandles resultaterne af de i figuren indgående simuleringsmodeller. Der præsenteres altså 7 modeller plus to referencer af de oprindelige forhold (uisolerede forhold). I rapportens appendiks findes resultaterne tilhørende de resterende 10 simuleringsmodeller.

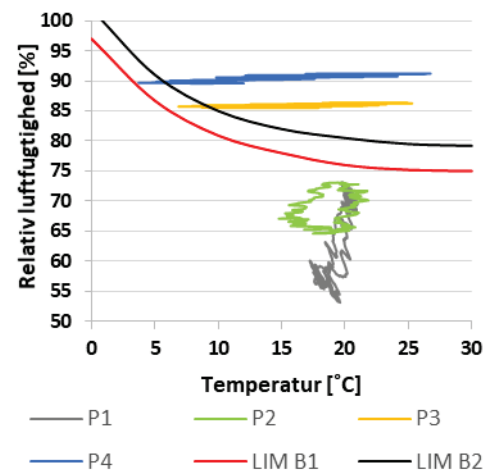
9.3.5 Reference [R1] – Sydvest



Figur 48 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



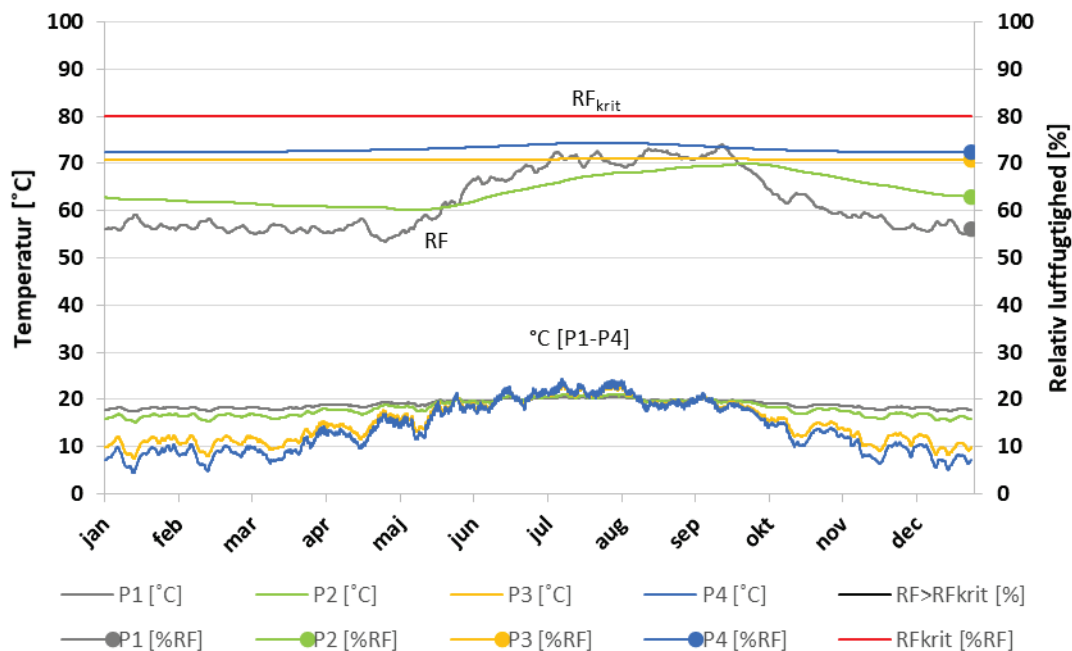
Figur 49 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



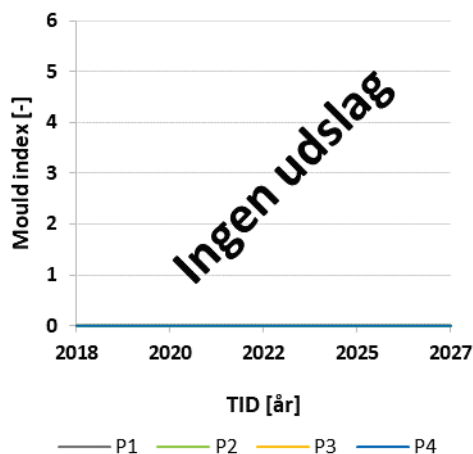
Figur 50 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Ved simulering af de originale forhold, med de i foranalysen bestemte materialeegenskaber og slagregnsbelastninger, fremgår det af ovenstående grafer, at de to datapositioner tættest på indeklimaet konsekvent befinder sig under RF_{krit} . [P3] og [P4] der repræsenterer forholdene i midten samt enden af bjælken, er altid over RF_{krit} . Opmærksomheden skal her henledes på, at RF_{krit} er bestemt efter temperaturudviklingen tilhørende [P1], hvorfor RF_{krit} er meget tæt på 80 % året rundt. Når RF_{krit} eksempelvis bestemmes efter temperaturen i [P4] vil RF_{krit} i vinterperioden være højere og overskridelsen derved mindre. Overskridelsen er dog konsekvent, og lange perioder med temperatur omkring 20 °C og 90% RF medfører, at både VVT- og Isopleth-modellen indikerer gunstige skimmelvækstforhold.

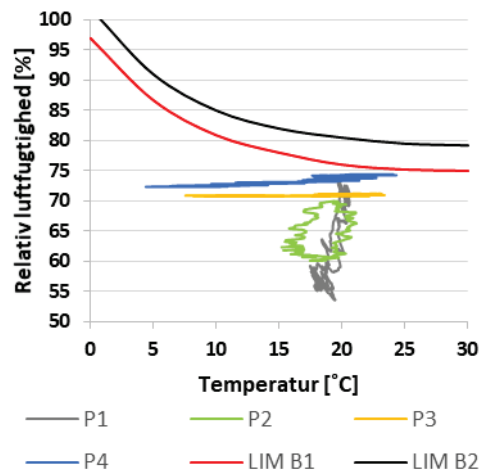
9.3.6 Reference [R2] – Nordøst



Figur 51 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



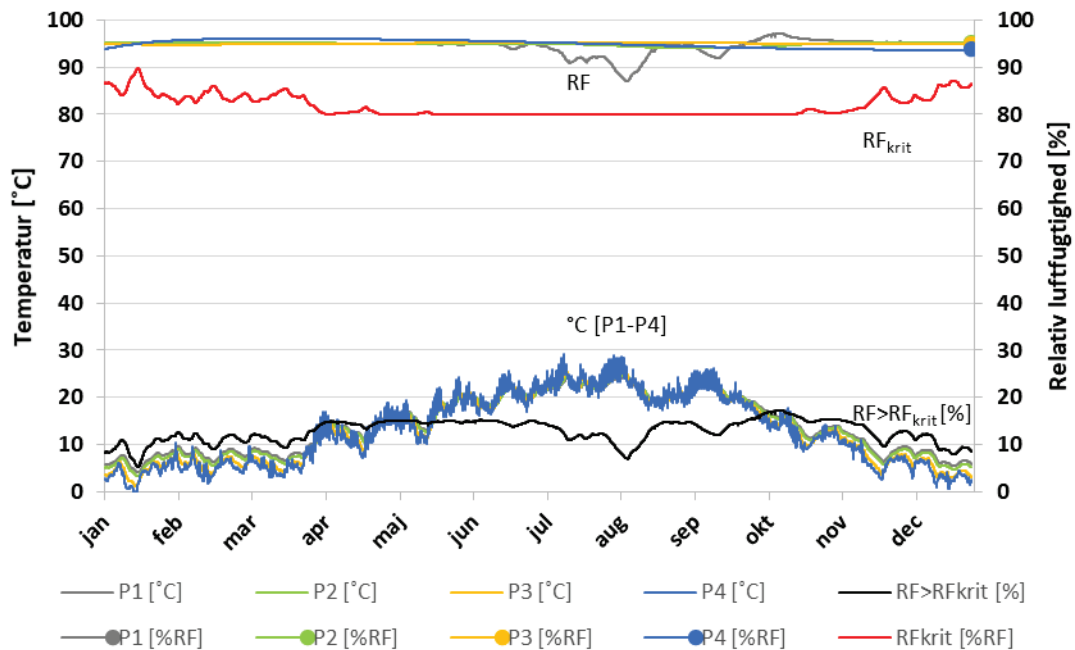
Figur 52 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



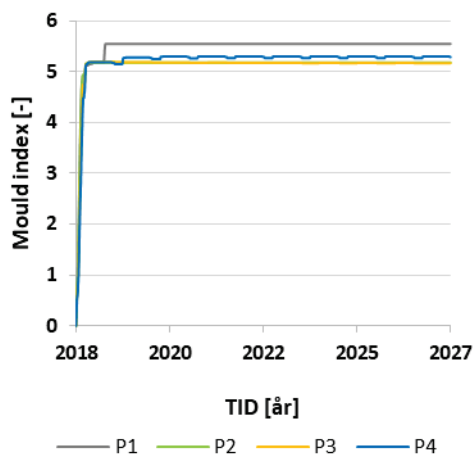
Figur 53 Isopleth-model af det sidst simulerede år

Når orienteringen ændres til nordøst, udsættes facaden for mindre slagregn, hvorfor særligt forholdene omkring [P3] og [P4] ændres. Der er tale om en forskel i omegnen af 20 % point. Hele bjælkeenden befinder sig derved i ligevægt med forhold under den kritiske relative luftfugtighed.

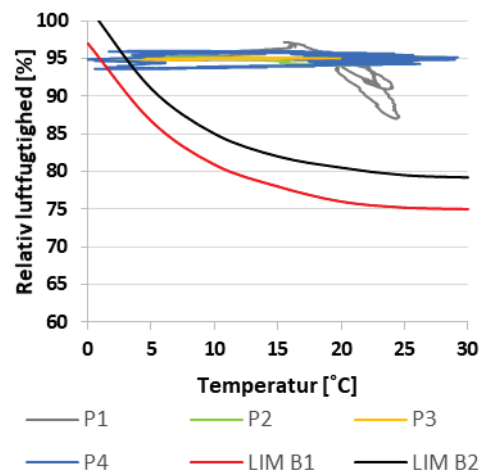
9.3.7 Forsatsvæg [F1] – Sydvest – Tæt dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 54 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



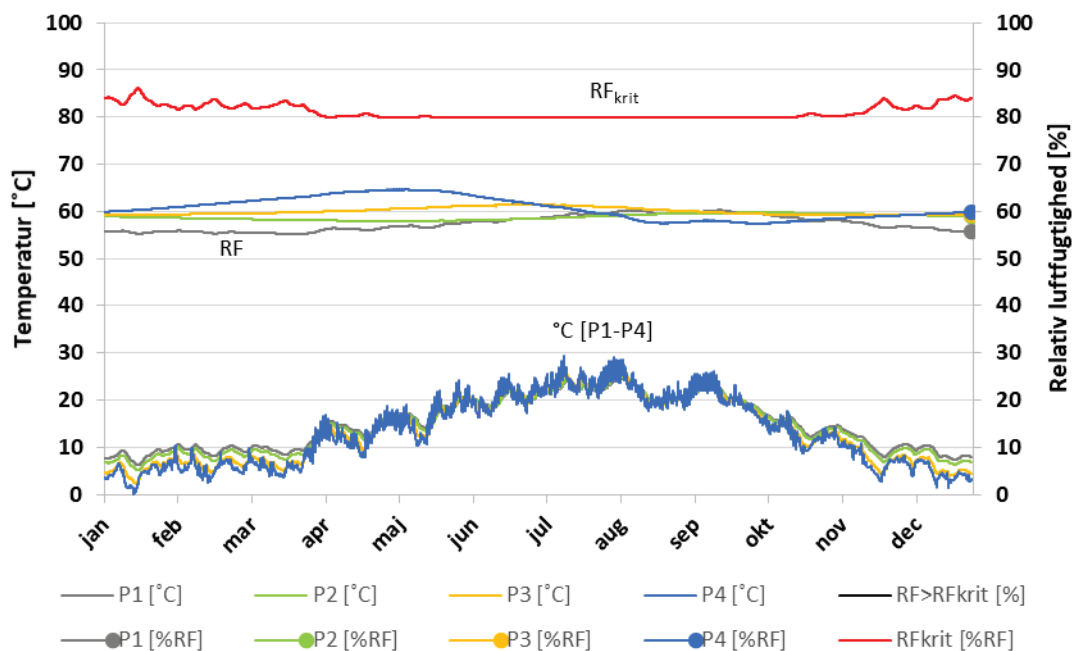
Figur 55 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



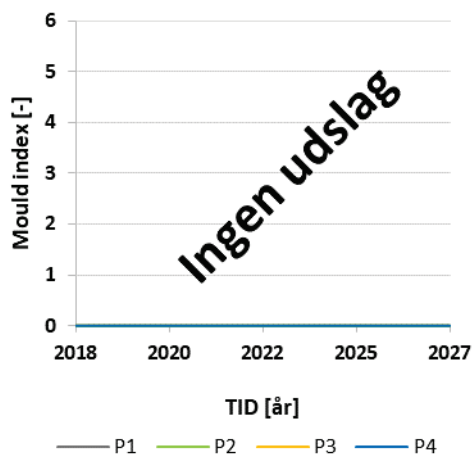
Figur 56 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Det fremgår tydeligt af Figur 54, at den relative luftfugtighed i alle 4 datapositioner befinder sig betragteligt over RF_{krit} . Langt størstedelen af året er overskridelsen på mere end 10 % point. En så markant overskridelse medfører store udslag i begge skimmelmodeller. VTT-modellen viser udslag på mere end index 5, og timeværdierne befinder sig langt over grænsen, hvorved skimmelvækst i forbindelse med uorganiske materialer kan optræde (LIM B2). Foruden skimmelproblematikken henledes opmærksomheden på, at en bjælkeende i ligevægt med relative luftfugtigheder på ca. 95 % ved temperaturer omkring 20 °C, befinder sig i området hvor ægte hussvamp i princippet kan vokse.

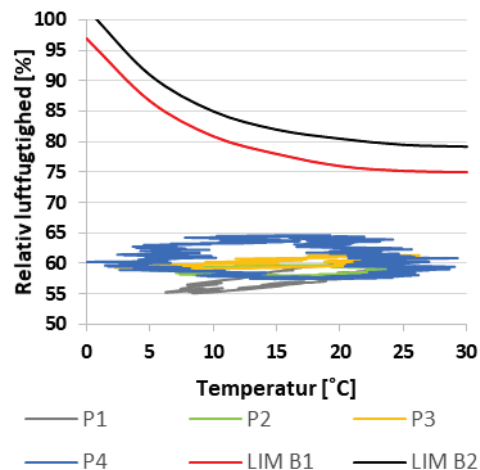
9.3.8 Forsatsvæg [F3] – Sydvest – Tæt dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 57 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



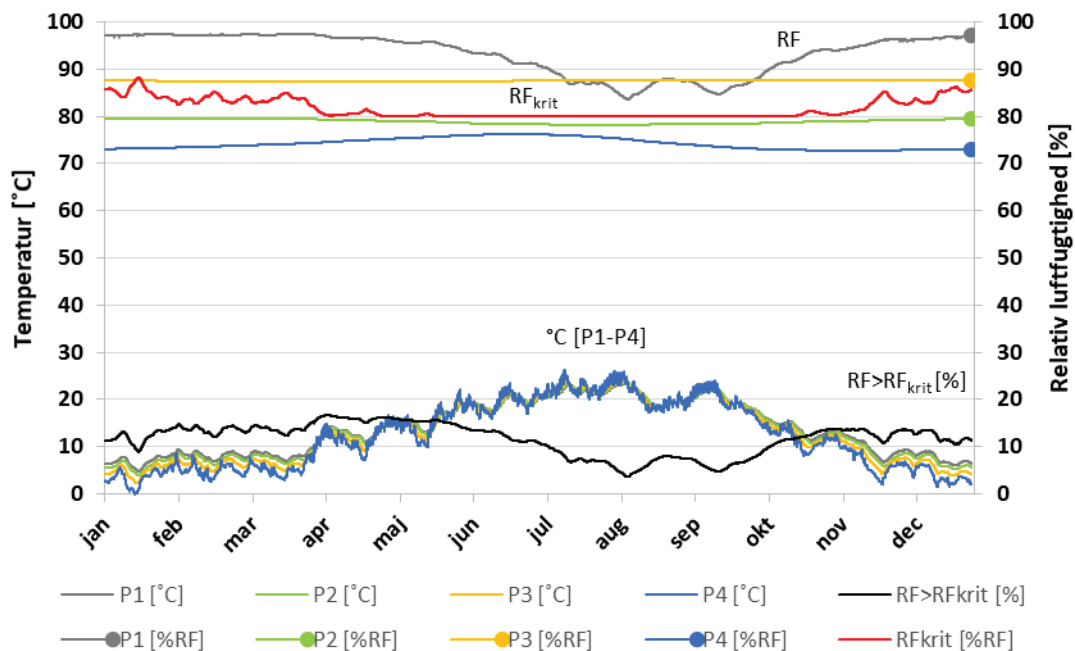
Figur 58 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



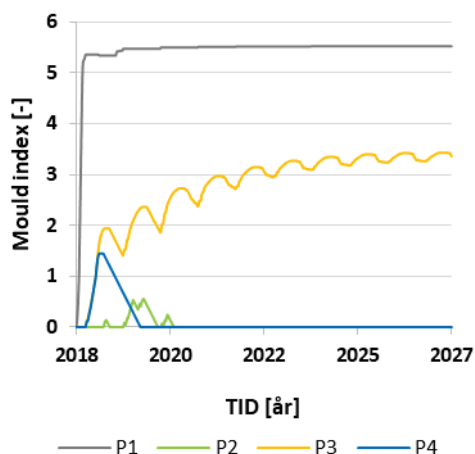
Figur 59 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Når facaden hydrofobieres og dampspærren er helt tæt, sænkes den relative luftfugtighed med mere end 30 % point. Beregningsmæssigt er der ingen eller meget begrænset fugttilførsel fra både inde- og udeklimaet i konstruktionen. Den relative luftfugtighed i alle 4 positioner svarer nærmest til udeluftens fugtindhold, hvis denne temperatur reguleres.

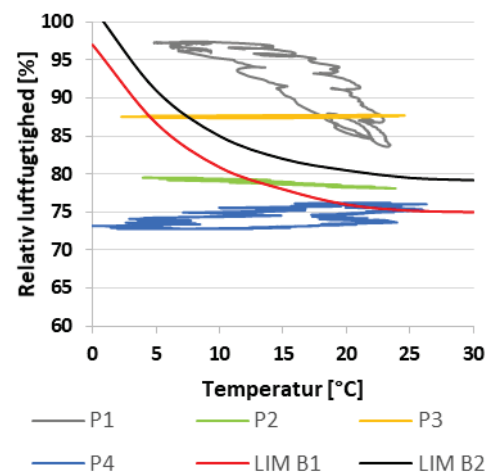
9.3.9 Forsatsvæg [F6] – Sydvest – Revne i dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 60 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



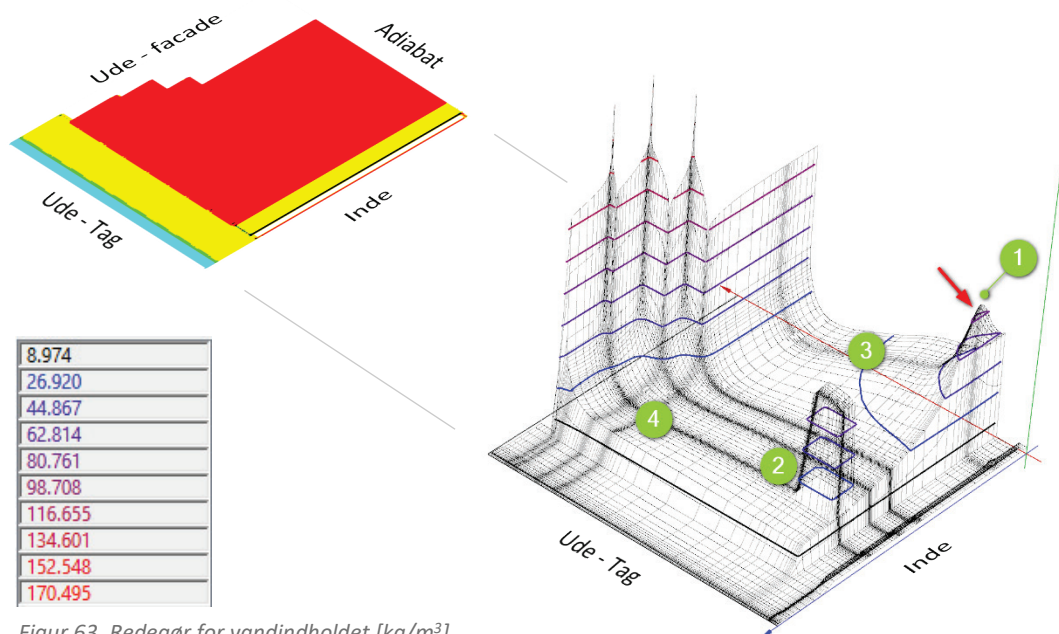
Figur 61 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



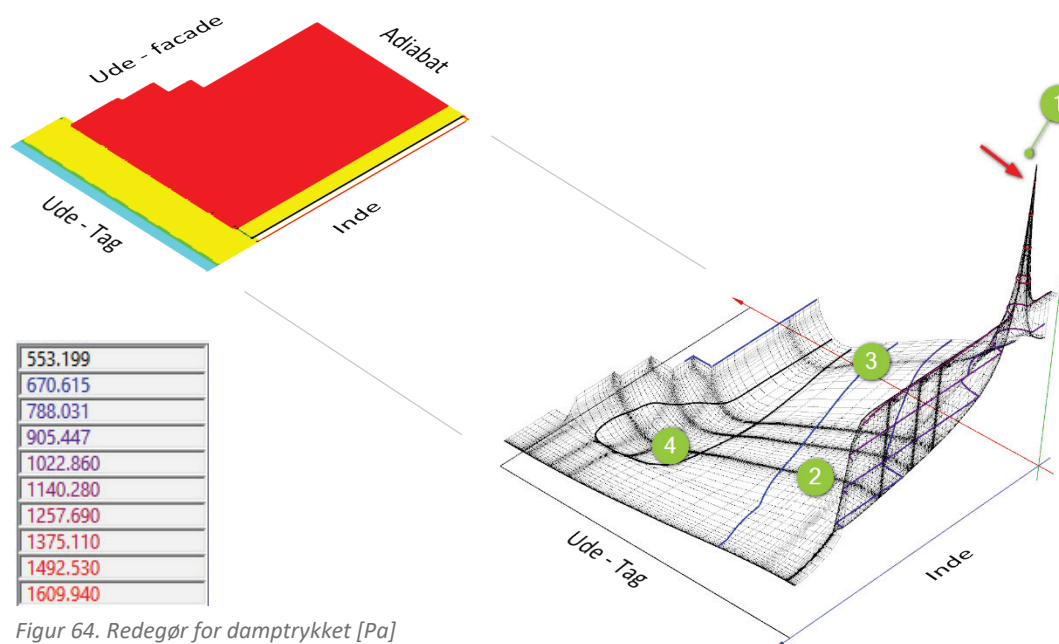
Figur 62 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Ved indførelse af en revne i dampspærren, fremgår det af ovenstående grafer, at denne har stor indvirkning på den relative luftfugtighed. Særligt i positionen [P1] tættest på revnen, svinger RF med ca. 15 % point over året, og befinder sig aldrig under RF_{krit} . Revnen er placeret midt på facaden hvorfor [P1] og [P3] påvirkes i højere grad end [P2] og [P4]. Det skal ses i lyset af datapositionernes placering på tegningen i metodeafsnittet. Optræder revnen i forbindelse med bjælkeenden, vil den relative luftfugtighed være højere i [P2] og [P4] end her anvist, og træfugten ligeså. Både af VVT-indexet og Isopleth-modellen fremgår det, at de to positioner tættest på revnen resulterer i gunstige forhold for skimmelvækst. De to andre positioner ([P2] og [P4]) overskrider periodevist LIM B1 i isopleth-modellen, men ikke i en grad som VTT-modellen reagerer på. Konsekvenserne af revnen i dampspærren, kan også anvises ved hjælp

af Isoline-modeller. Nedestående viser først den opbyggede simuleringsmodel og resultatet som rejst model. Modellerne er et udtryk for, hvordan forholdene tager sig ud i simuleringsmodellen, det sidst simulerede tidsskridt (31-12-2027 Kl: 23:59).



Figur 63. Redegør for vandindholdet [kg/m^3]



Figur 64. Redegør for damptrykket [Pa]



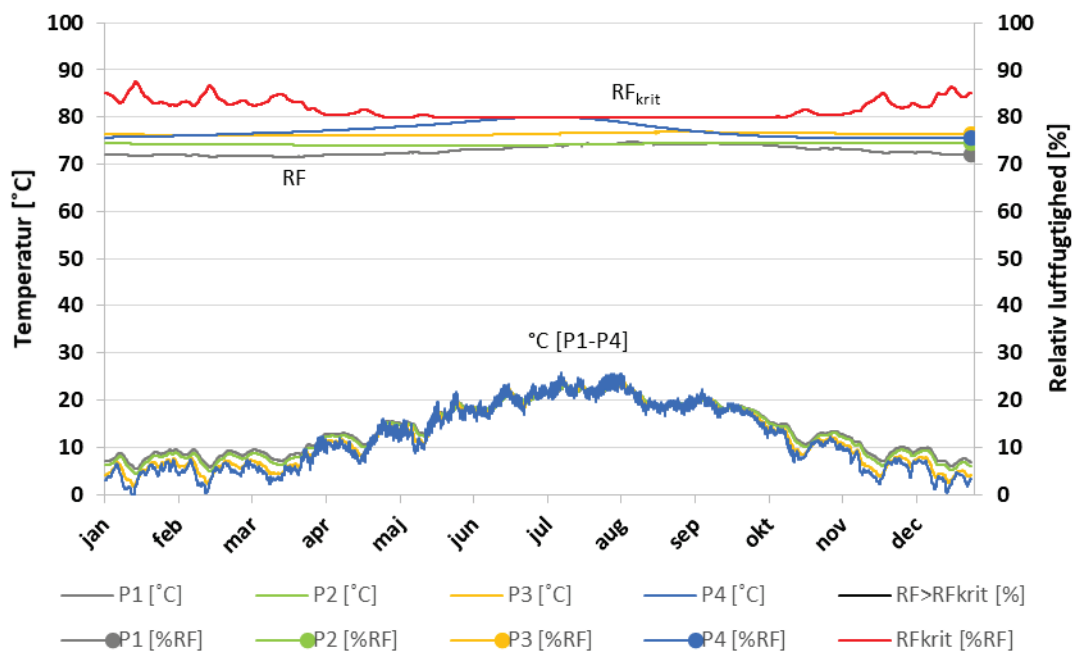
Anviser konsekvenserne af revnens placering i dampspærren.

1

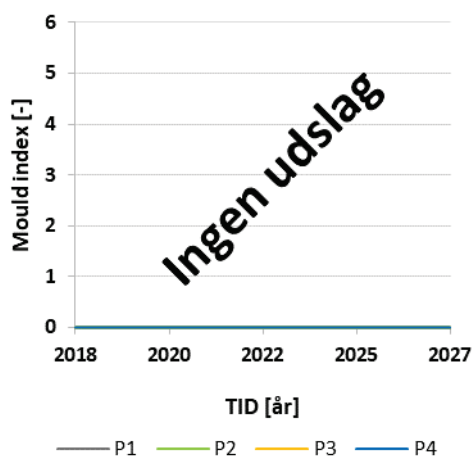
Datapositioner svarende til angivelserne på tegningerne i forudsætningsafsnittet.

Revnen i dampspærren resulterer i, at damptrykket og vandindholdet lokalt er betydeligt større, end tilfældet er, hvor dampspærren fungerer efter hensigten. Det forklarer også, hvorfor den relative luftfugtighed er betragtelig højere i position [P1] og [P3] end i [P2] og [P4].

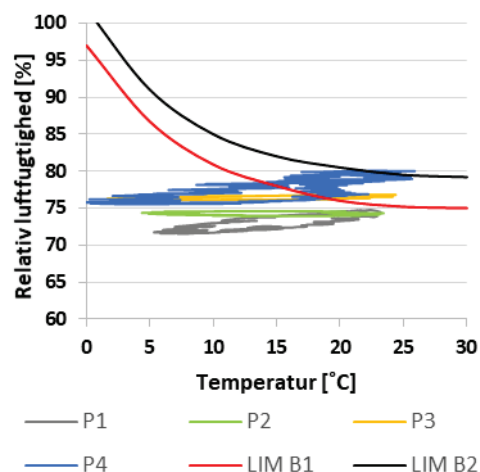
9.3.10 Forsatsvæg [F7] – Nordøst – Tæt dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 65 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



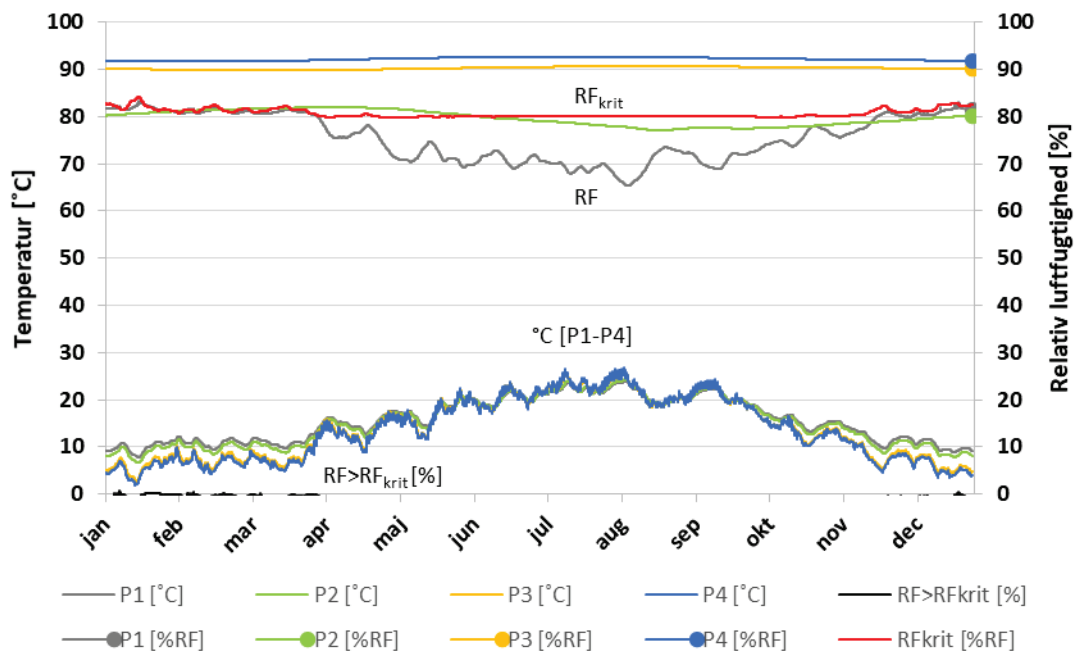
Figur 66 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



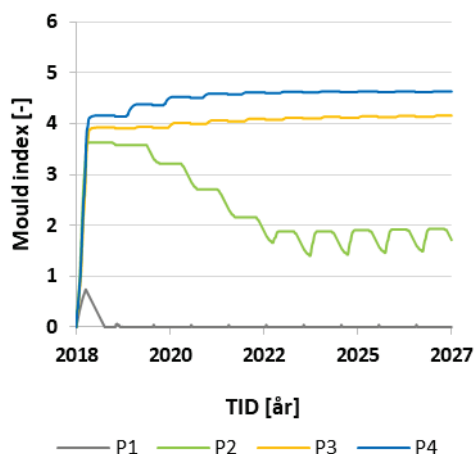
Figur 67 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Hvis facadens orientering ændres til det nordøstlige verdenshjørne, medfører det en anselig ændring af den relative luftfugtighed. Selv uden at facaden imprægneres, resulterer forsatsvæggen med en tæt dampspærre i relative luftfugtigheder under RF_{krit} . Det gælder for alle 4 datapositioner. Det er en mærkbar ændring i forhold til selvsamme model orienteret mod sydvest (F1), hvor alle 4 datapositioner befandt sig over RF_{krit} . VTT-modellen (Figur 66) har intet udslag når $RF < RF_{krit}$, hvorimod den mere konservative isopleth-model (Figur 67) indikerer der er risiko for skimmelvækst, særligt i forbindelse med den yderste del af bjælkeenden.

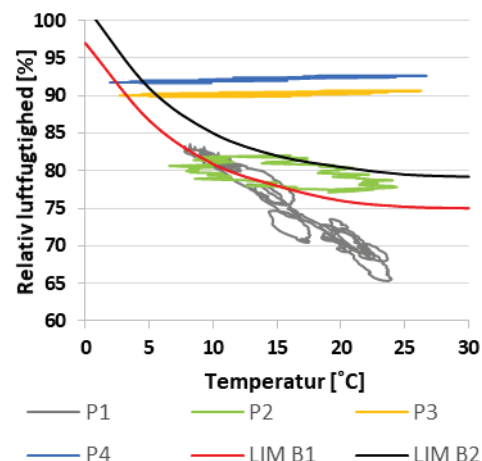
9.3.11 Kapillaraktive plader [K1] – Sydvest – Ingen hydrofobering



Figur 68 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



Figur 69 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

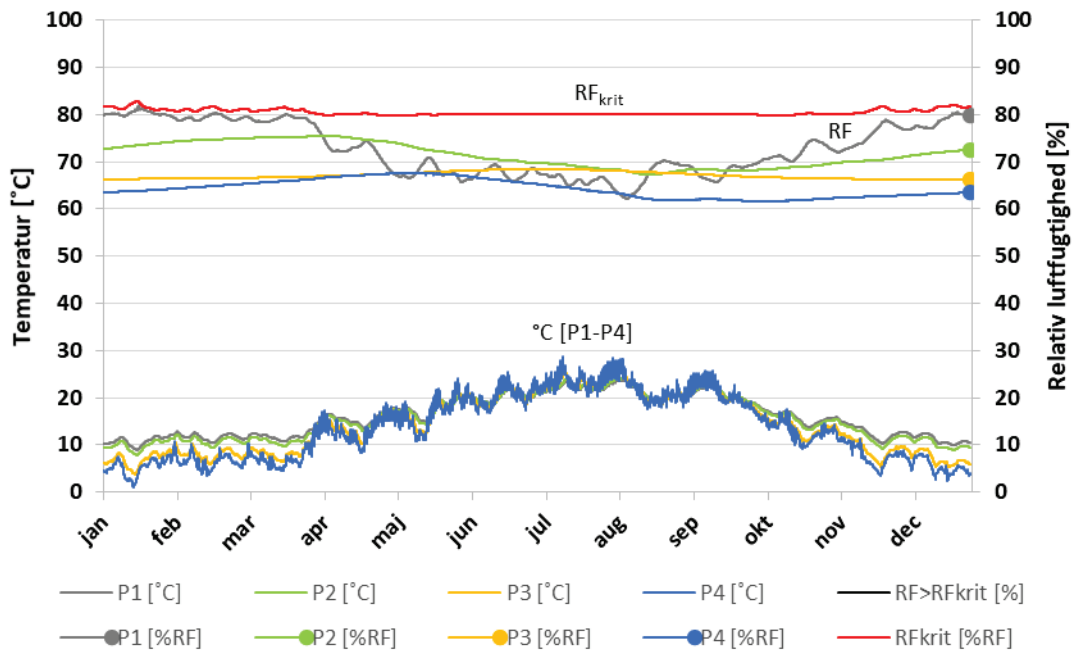


Figur 70 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

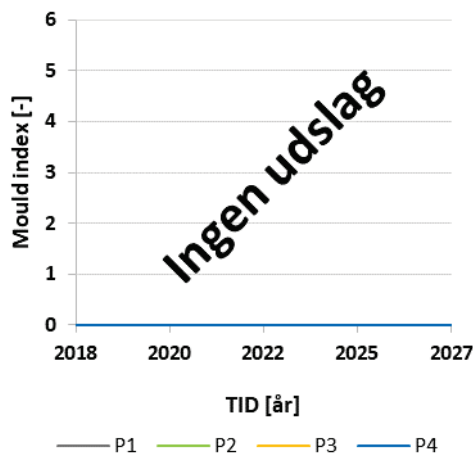
Når teglfacaden indvendigt efterisoleres med kapillaraktive plader, er der jævnfør ovenstående grafer større udsving i den relative luftfugtighed end tilsvarende model med en forsatsvæg (F1). Temperaturen er højere, særligt i de to første datapositioner, som konsekvens af en mindre isoleringstykkelse, samt større varmeledningsevne. De to positioner tættest på indeklimaet [P1] og [P2] har periodevis en mindre overskridelse af RF_{krit} , hvor de to positioner tættest på udeklimaet ligger stabilt over RF_{krit} med en RF omkring 90% hele året. Relative luftfugtigheder over 90% resulterer i, at begge skimmelmodeller har høje udslag, og betyder samtidigt, at bjælkeendens træfugt er omkring 20 vægt [%]. Position [P2], der er placeret bagved den gennemgående rem, befinder sig i et grænseniveau. Placeringen er 150 mm inde i konstruktionen, hvilket betyder at op til index 2 anses for tilfredsstillende forhold jævnfør VTT-

modellen. Som det fremgår af isopleth-modellen er det dog på grænsen af det acceptable, da næsten alle timeværdier befinder sig over LIM B1 grænse.

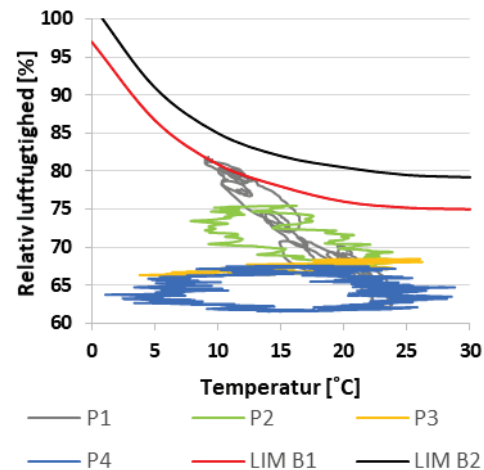
9.3.12 Kapillaraktive plader [K3] – Sydvest – Tæt hydrofobering



Figur 71 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



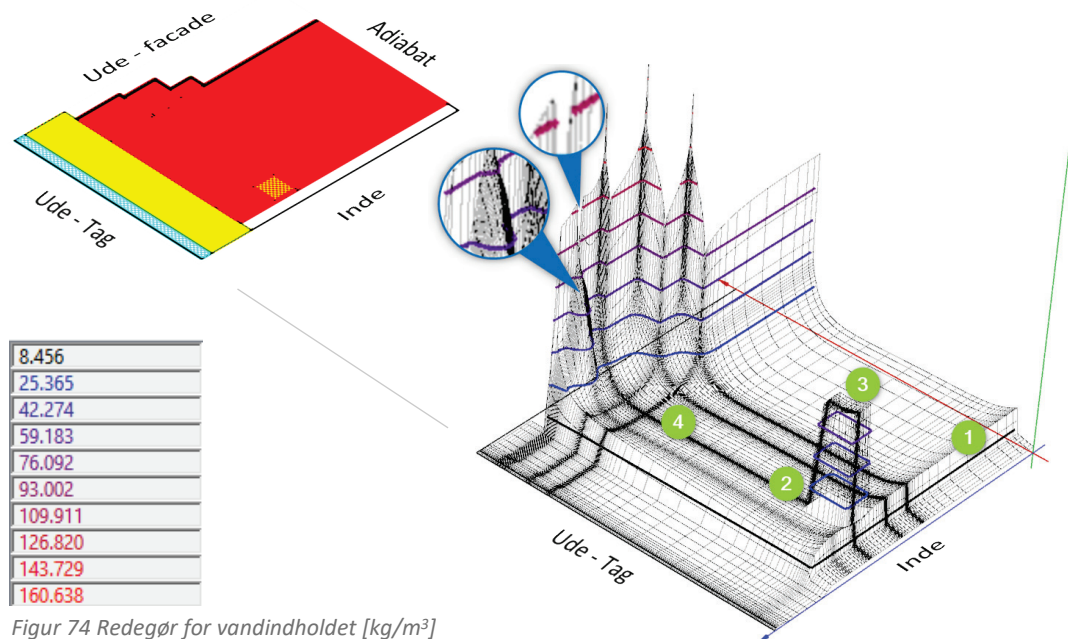
Figur 72 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



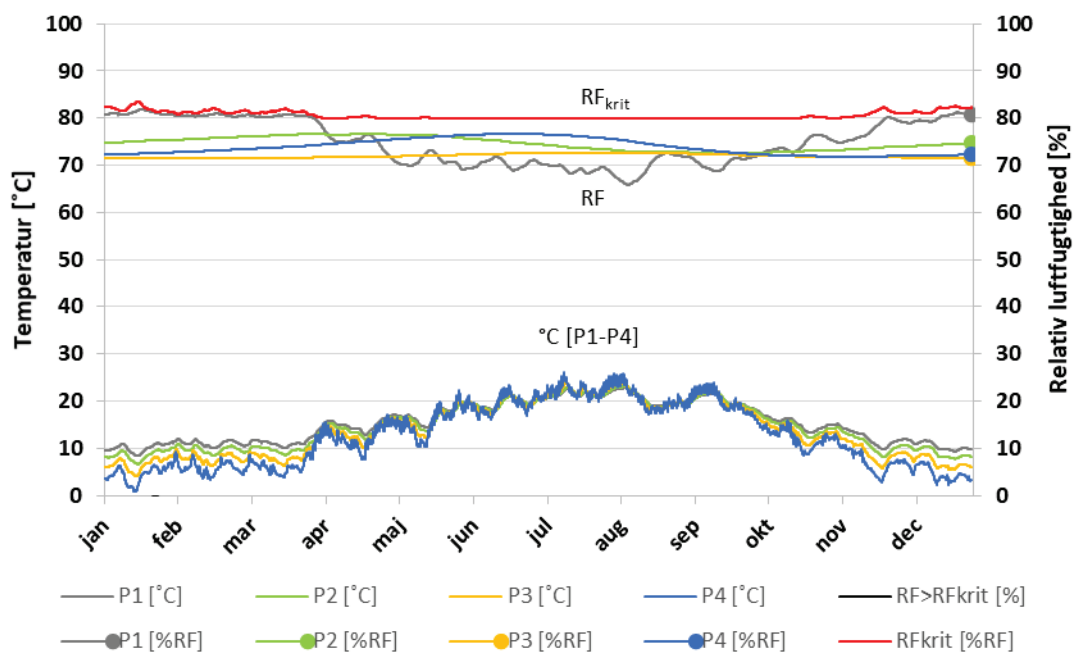
Figur 73 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Når samme model hydrofobieres reduceres fugtindholdet i en grad, så alle 4 datapositioner befinder sig under RF_{krit} . Påvirkningen er størst for positionerne tættest på udeklimaet (se Figur 71). Imprægneringen bevirker at [P3] og [P4] overvejende er tørrere end [P1] og [P2], som er tættere på indeklimaet. Det bekræfter tendensen fra [F3], som resulterede i meget lave fugtigheder i alle positioner. Bevæggrunden for at den relative luftfugtighed er 10-15 % point højere i dette tilfælde, skal findes i at de kapillaraktive plader ikke stopper al fugttilskud fra

indeklimaet, som den tætte dampspærre i princippet gør i model [F3]. Imprægneringens effekt og evt. revnen kan også anvises ved hjælp af en isoline-model.

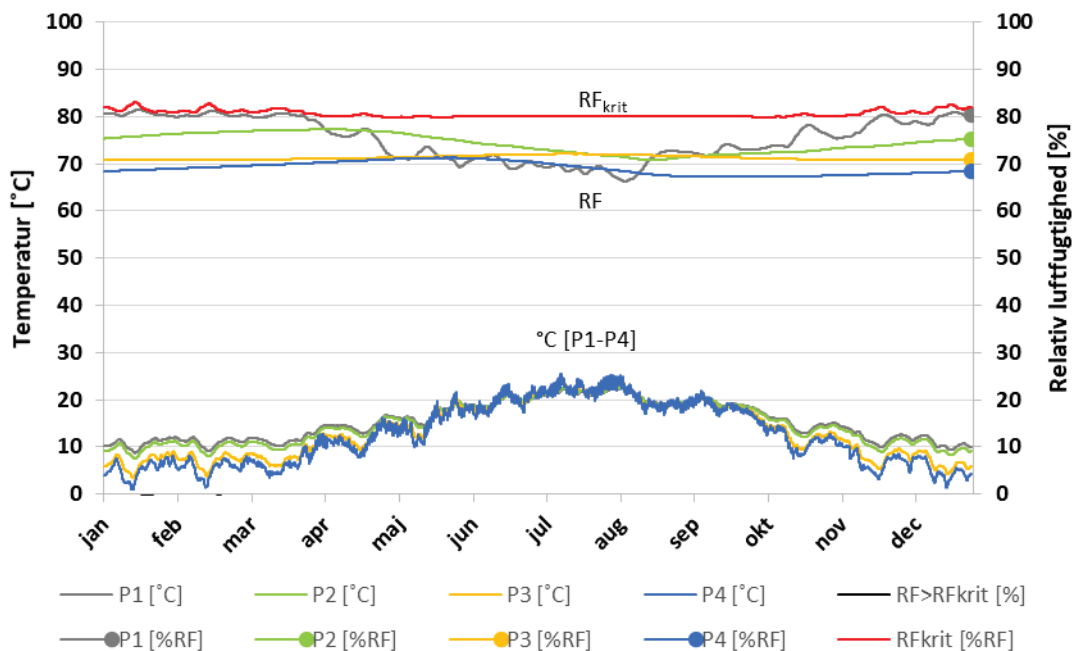


1 Datapositioner svarende til angivelserne på tegningerne i forudsætningsafsnittet.

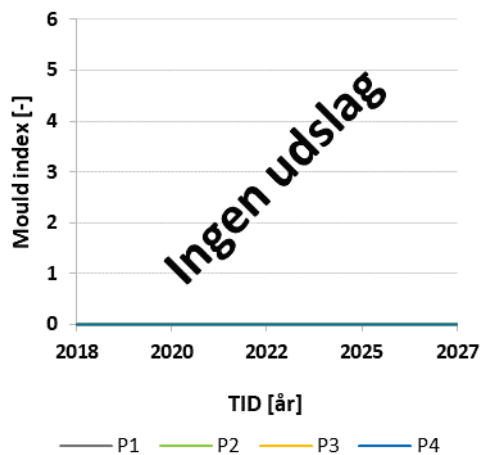


Af Figur 74 fremgår det at vandindholdet umiddelbart efter de første 10 mm, hvor facaden imprægneres, er lavt. Lokalt omkring revnen stiger vandindholdet, hvilket resulterer i at kurven for [P4] hæves mellem 5- og 10 % point. Materialernes evne til at omfordele fugten, bevirker endvidere, at den relative luftfugtighed stiger i alle positioner, på trods af at placeringerne er adskilt både i x- og y-aksen (se Figur 40).

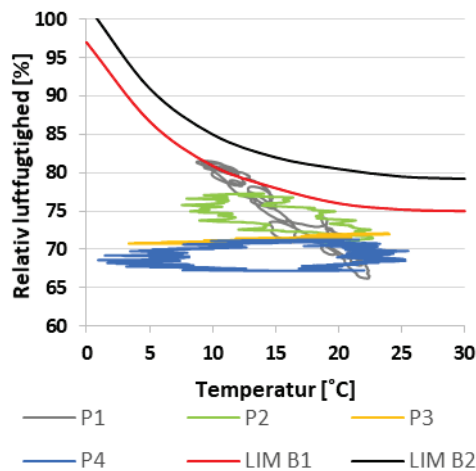
9.3.13 Kapillaraktive plader [K6] – Nordøst – Tæt hydrofobering



Figur 76 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



Figur 77 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



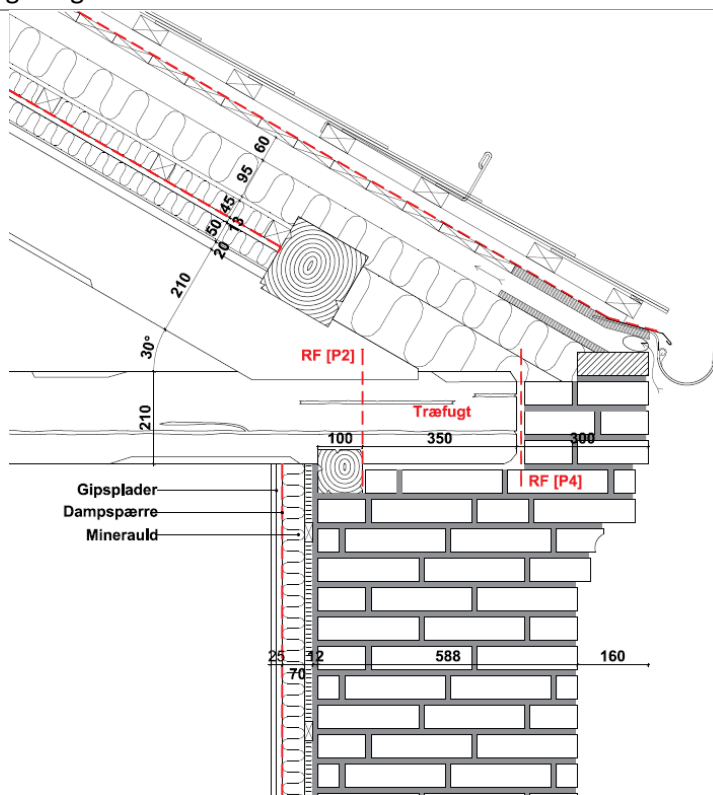
Figur 78 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

Når orienteringen ændres fra sydvest til nordøst, har imprægnering af facadens ydre ikke samme effekt. Den relative luftfugtighed i [P3] og [P4] sænkes dog som konsekvens af imprægneringen, men indvirkningen på de to positioner tættest på indeklimaet, ændres ikke nævneværdigt. Den relative luftfugtighed befinder sig under RF_{krit} , men er generelt højere og tættere på grænsen end den sydvestvendte udgave. Se desuden model [K4] uden imprægnering i appendikset.

9.3.14 Kritisk træfugt

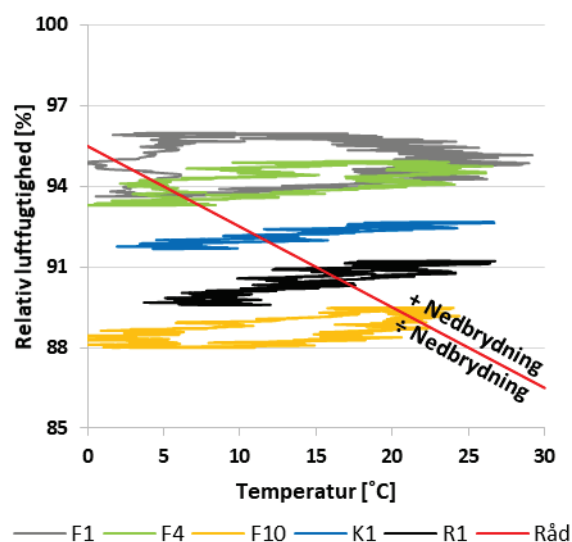
Med udgangspunkt i den laveste og højeste relative luftfugtighed over året, imellem position [P2] og [P4], er bjælkeendens fugtligevægt bestemt i henhold til nedestående tabel.

ID	%RF		Træfugt [%]
	[P2]	[P4]	
R1	86	91	20-23
R2	61	74	12-15
F1	94	96	24-25
F2	69	75	14-15
F3	59	65	12-14
F4	93	95	23-24
F5	81	75	17-15
F6	80	73	17-15
F7	74	80	15-17
F8	73	77	15-16
F9	62	69	12-14
F10	90	88	23
F11	79	76	17-16
F12	80	76	17
K1	77	93	16-22
K2	72	77	15-16
K3	75	62	15-12
K4	73	78	15-16
K5	82	77	17-16
K6	77	67	15-13



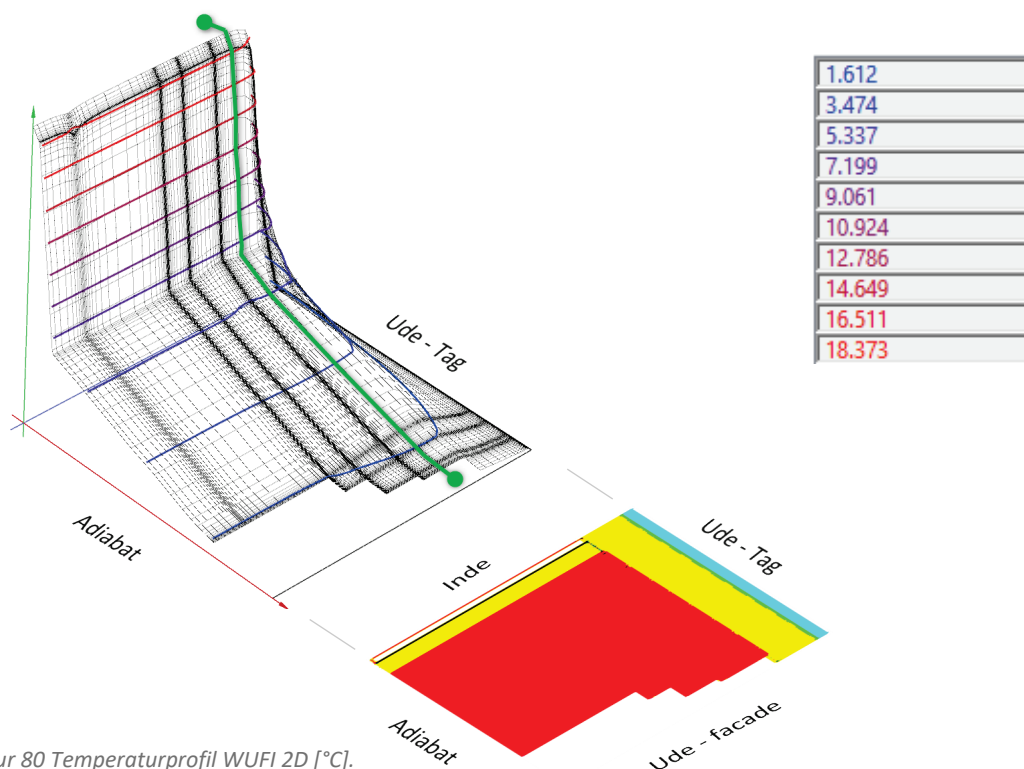
Figur 79. Anviser området imellem [P2] og [P4], hvor træfugten omtrent er som angivelserne i tabellen. Området er det samme ved benyttelse af kapillaraktive plader og for referencemodellerne.

Fælles for scenarierne med kritiske træfugtigheder er, at de alle er orienteret mod sydvest med undtagelse af [F10], samt at facaden ikke er imprægneret. Træfugten er altid under det kritiske niveau ved nordøstlig orientering, under de forudsætninger at efterisoleringstiltaget simuleres uden en revne i dampspærren. Netop [F10] har en sådan indeholdt, hvilket bevirker at den relative luftfugtighed stiger med ca. 10 % point, i forhold til [F7] hvor revnen ikke indgår. Ligevægtsbetingelserne indebærer at træfugten stiger til et kritisk niveau.

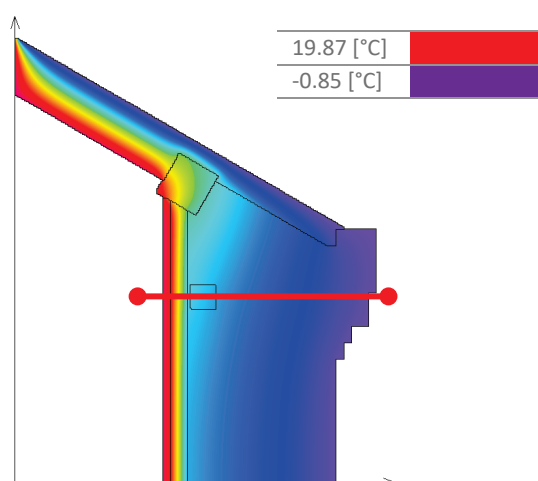


Graf 1. Redegør for de hygrotermiske forhold som funktion af kritisk træfugt. Der er taget udgangspunkt i position [P4], hvorfor typen [K1] tegner et lidt værre billede end de relative luftfugtigheder i tabellen angiver.

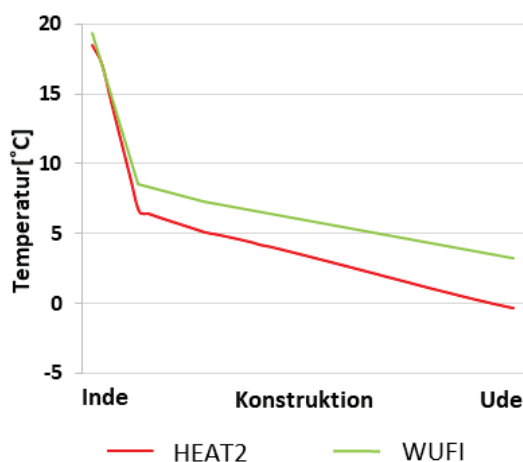
9.3.15 Temperaturvalidering



Figur 80 Temperaturprofil WUFI 2D [°C].



Figur 81 Temperaturprofil HEAT2 [°C].



Figur 82 Temperaturgradienter i februar [°C].

Ovenstående figurer indikerer, at forenklingen i form af det flade tag i WUFI 2D-modellen, kan medføre en lidt varmere konstruktion. Forskellen er størst ved den udvendige overflade, som ikke er bestemt under samme udeklima. Ved korrigeret af HEAT2-modellen, således at denne tager udgangspunkt i samme udvendige overfladetemperatur, er temperaturforløbet uden forskel de to modeller imellem. Nuancerne i temperaturen må i højere grad tilskrives varierende udeklima, fremfor modelopbygning. Ovenstående udtrykker forholdene når temperaturforskellen mellem inde og ude er størst, hvorfor forskellen de to modeller imellem generelt må forventes mindre, end her anvist.

9.4 Diskussion

9.4.1 Forsatsvæg

Studiets formål har været at undersøge, hvornår det er fugtteknisk forsvarligt at indvendigt efterisolere omkring træbjælkeender med vederlag i fuldmurede teglfacader. Almindeligvis bør man være godt stillet, når man er bekendt med det almene tekniske fælleseje. Det kan betragtes som et sæt af hjælpemidler, der blandt andet bygger på praktiske erfaringer og faglitteratur som f.eks. SBI-anvisninger eller BYG-ERFA's erfaringsblade (byg-erfa.dk). Simuleringer i dette projekt tager afsæt i kendt viden, om hvordan man bør kunne udforme indvendig efterisolering omkring træbjælkeender i murværk ved benyttelse af en forsatsvæg. Studiets forsatsvæg er konstrueret efter anvisninger fra membran-erfa.dk. og væggens isolans er holdt mindre, end det maksimalt anbefalede (Christensen, Koch & Møller, 2015).

Den sydvestlige udgave [F1] resulterer i stabile relative luftfugtigheder på omkring 95 % i hele konstruktionen. De hygrotermiske forhold påvirkes ikke nævneværdigt som følge af årstidernes varierende klima. Det betyder, at der er gunstige vækstbetingelser for skimmel, og at træfugten i bjælkeenden er kritisk. I tilsvarende projekter, beskrevet i litteraturstudiet, opleves der samme tendens og påvirkning af de hygrotermiske forhold. Af rapportens bygningsfysiske teoriafsnit fremgår det, at den begrænsede varmestrøm bør bevirke, at udtørningspotentialet mindskes, og at fugtindholdet i den eksisterende konstruktion stiger. Det synes at være tilfældet, hvorfor både litteraturstudie og teoriafsnit underbygger indeværende projekts resultat.

Med tanke på forstudierne, og beslutningen om at benytte den mindst kapillarsugende teglsten i kombination med et reduceret fugttilskud (mindre slagregn), er det alligevel bemærkelsesværdigt, at standardløsningen medfører så kritiske hygrotermiske forhold. Noget kunne tyde på, at simuleringerne generelt overvurderer følgerne af slagregn. Præcis hvilke af de indgående parametre, som bevirker at slagregnsmængden måske overgøres, er svært at svare på. Men et bud kunne være, at simuleringsværktøjets bagvedliggende slagregnsstudie tager udgangspunkt i fritstående bygninger og derfor ikke afspejler projekter i bymæssig bebyggelse. I nogle tilfælde, kan det så medføre, at den simulerede konstruktion, påvirkes af store vandmængder, og derved indikerer, at konstruktionen indebærer kritiske hygrotermiske forhold. Endvidere begrundes det i, at konstruktionsopbygningen som nævnt følger anerkendte publikationer (SBI-anvisninger & BYG-ERFA's erfaringsblade), og derfor må forventes at være en afprøvet, samt dokumenteret velfungerende løsning. Hvis simuleringens estimering af fugtpåvirkningen er korrekt, må det med tanke på skimmelvækst og træfugt, betragtes som værende et særdeles kritisk indgreb at opføre forsatsvægge, i forbindelse med fuldmurede teglfacader, med sydvestvendt orientering.

Indeværende projekts resultat af den nordøstvendte simulering [F7] viser, at det er muligt at benytte en forsatsvæg, uden at det medfører kritiske relative luftfugtigheder. I den yderste del af bjælkeenden er der en lille risiko, for at der kan optræde et mindre omfang af skimmelvækst. Det vil i så fald være 550 mm fra- og uden kontakt til indeklimaet. Det vurderes betydningsløst, hvilket også fremgår af VTT-Indexet (se Figur 65). Den eksisterende væg i dette

studie består af 2½ sten. I tilfælde hvor væggen er tyndere og f.eks. består af 1½ sten, vil det formentligt påvirke de hygrotermiske forhold i en negativ retning. Det kan godt betyde at skimmelproblematikken under sådanne forhold er betydningsfuld. Desuden fremgår det af teoriafsnittet, og som eftervist i foranalysen, at teglmaterialets vandopsugnings- og fugtomfordelings-kapacitet, har stor indvirkning på fugtindholdet, og derved den relative luftfugtighed. Eftersom resultatet er på grænsen af det kritiske, bør det konkrete tilfælde undersøges, inden der udføres en forsatsvæg på nordøstvendte facader.

Opmærksomheden henledes på, at der indtil videre er diskuteret en udførelsmæssig fejlfri simuleret forsatsvæg. Det synes sandsynligt at kompleksiteten og tilslutningen omkring en bjælkeende med vindridser og bomkanter, kan resultere i revner eller slip af dampspærre, som yderligere forværrer forholdene. Det bekræfter alle simuleringer i dette projekt, hvor der indgår en revne i dampspærren. Her øges den relative luftfugtighed som minimum med et par % point, og op imod 37 % point, alt efter simuleringsmodel samt datapositionens placering i konstruktionen.

Med udgangspunkt i tilsvarende simuleringsmodel, med en utæthed i dampspærren [F10] (se appendiks), kan det udledes, at fugttilskuddet/vandringen som finder sted gennem utætheden, har stor indvirkning. Den relative luftfugtighed stiger minimum med 10 % point, hvilket bevirker, at de hygrotermiske forhold er tilsvarende den fejlfrie simulering af forsatsvæggen, orienteret mod sydvest [F1]. Stigningen i RF kan være overgjort som følge af ”opbygningen” af revnen i simuleringsmodellen. Fugtvandringen sker igennem 10 mm af dampspærren, hvor diffusionsmodstanden er justeret til 0, med et åbningsareal som er kontinuerligt, når der simuleres i 2 dimensioner. Omvendt tilsiger fugtteorien, at fugtkonvektion er den dominerende transportmekanisme, ved revner eller huller som er $\geq 0,1$ mm. I indeværende projekt er der ikke etableret egentlig fugtkonvektion i utætheden, hvorfor fugttilskuddet igennem revnen alene kan tilskrives diffusion. Der kunne herved argumenteres for, at stigningen i den relative luftfugtighed er større end simuleringens resultat angiver. I litteraturstudiet refereres der til et laboratorieforsøg, hvor lufttætheden omkring efterisolerede træbjælkeender undersøges, og her oplevede man stigninger i RF på mellem 10-15 %. Endvidere konkluderer Svendsen & Harrestrup (2016) at det begrænsende udtørningspotentiale af indvendigt efterisolerede teglfacader (1½ & 2 sten) orienteret mod nord, medfører kritiske hygrotermiske forhold.

Der er altså flere indikationer på, at en given utæthed i det luft- og damptætte plan samt solens begrænsende indvirkning, kan påvirke området omkring træbjælkeenderne i en negativ retning. Skal der derfor etableres en forsatsvæg på nordøstvendte facader, lignende dette projekt, synes det at være afgørende, at denne udføres fejlfrit, hvilket i praksis kan være en udfordring.

Der tegner sig et generelt billede af, at opførelse af en forsatsvæg på en fuldmuret teglfacade indeholdende træbjælkeender, er et usikkert tiltag. Dette kan udledes af skimmelmodellerne, som i alle tilfælde, på nær [F7], medfører kritiske værdier. Som redegjort for i teoriafsnittet, er skimmelvækst en kompleks proces, hvorfor der ikke kan sættes lighedstegn imellem skimmelmodellernes risikovurdering og skimmelvækst i den virkelige verden. For VTT-modellens vedkommende henledes opmærksomheden på, at denne jævnfør metodeafsnittet,

tager udgangspunkt i worst case indstillinger. Det betyder at området tættest på indeklimaet [P1] og området ved bjælkeendens ydre [P4], vægtes ligeværdigt. Der kan argumenteres for, at en differentieret opsætning vil afspejle et mere nuanceret og rimeligt skimmelniveau/index. Den generelle opfattelse af konstruktionens hygrotermiske ydeevne, vil dog ikke være anderledes i dette projekt, eftersom den relative luftfugtighed generelt er meget høj.

Tre af simuleringsmodellerne, og i nogen grad referencemodellen mod sydvest [R1], medfører hygrotermiske forhold omkring træbjælkeenden, som bevirker, at træfugten er kritisk høj. I henhold til teoriafsnittet vedrørende skadesmekanismer fremgår det at længerevarende træfugt over 20 % og temperaturer imellem 20-30 °C, kan resultere i trænedbrydende svampeangreb. Det er eksempelvis tilfældet i sommerperioden for model [F1]. Dog må man stille sig kritisk overfor, om forsatsvæggen nu også tilvejebringer helt så kritiske forhold. Igen med tanke på, at løsningen fremgår af flere SBI-anvisninger og BYG-ERFA's erfaringsblade. I fald resultaterne i indeværende projekt afspejler virkelige forhold, er der formentlig en del træbjælkeender i Danmark, deriblandt kedelhusets, som er i risiko for nedbrydning.

Projektet indeholder simuleringer, hvor forsatsvæggen kombineres med imprægnering af teglet. Det har en positiv indvirkning på de hygrotermiske forhold. I tilfælde af, at forsatsvæggen samtidigt simuleres uden fejl, sænkes fugtindholdet i teglet, hvilket bevirker at den relative luftfugtighed i alle modeller, er mindre end RF_{krit} . Studiet medtager undersøgelser, hvor der indgår en revne i imprægneringen. Revnen er skabt ved at udskifte den 10 mm dybe imprægnering med teglmaterialets egenskaber. Det er en forenklet metode til at eftervise hvordan en virkelig revne påvirker de hygrotermiske forhold. Hvorvidt simuleringen over- eller undervurderer konsekvenserne af revnen er usikkert, men et lignende studie har fundet særdeles positive effekter af facadeimprægnering (Finken, Bjarløv & Peuhkuri, 2016). Projektet efterviser imprægneringen ved anden metode, men da indeværende studie oplever sammenlignelige resultater, kunne det indikere at effekten eftervises forholdsvis præcist. Beregningsteknisk viser imprægnering sig som en fordelagtig løsning, men om det også er tilfældet i den virkelige verden, synes mere tvivlsomt. Den indeholdte utæthed i dette projekt, viser at fugtindholdet i området bagved revnen stiger, som teoriafsnittet tilsiger. Det virker sandsynligt, at de mange påvirkninger facader udsættes for, over tid vil medføre utætheder. I så fald kan det diskuteres, om det var bedre for konstruktionen at undlade imprægneringen. Foruden holdbarhedsdiskussionen, kan der stilles spørgsmålstejn ved, om facaden vil patinere anderledes og derved ændre karakter.

9.4.2 Kapillaraktive plader

Projektet har undersøgt, hvilken indvirkning kapillaraktive plader har på de hygrotermiske forhold i området omkring bjælkeenden. Efterisoleringsprincippet er i dansk sammenhæng mindre benyttet end forsatsvæggen, og erfaringsgrundlaget begrænset (Møller, 2012, s. 111). Der findes dog erfaringsblade, der tydeligt redegør for, hvilke facadekonstruktioner som pladerne kan anvendes på, og hvilke dimensioner de maksimalt bør indbygges med (Christensen, Koch & Møller, 2015). I dette studie er der benyttet 50 mm kapillaraktive plader, hvilket er 30 mm mindre end det maksimalt anbefalede, og ellers er simuleringerne foretaget under samme betingelser som forsatsvæggen.

Der optræder markante forskelle på forholdene omkring træbjælkeenden, når der benyttes kapillaraktive plader fremfor en forsatsvæg. Dette kan udledes, når de to ellers ensartede simuleringmodeller [K1] og [F1] sammenlignes. Hvor der ved forsatsvæggen kunne registreres særdeles kritiske hygrotermiske forhold i hele konstruktionen, er billedet mere nuanceret ved brug af kapillaraktive plader. I de to positioner tættest på indeklimaet er den relative luftfugtighed mellem 15-25 % point lavere i model [K1]. I området mellem den oprindelige overflade og de kapillaraktive plader [P1], er risikoen for skimmel lille. I [P2], der afspejler forholdene bagved den gennemgående trærem, er forholdene på grænsen til det kritiske. 90 % af timeværdierne befinder sig over grænseværdien for skimmelvækst på organiske materialer jævnfør isopleth-modellen, og VTT-index er tæt på 2 (se Figur 69 & Figur 70). Det betyder, at der i position [P2] optræder hygrotermiske forhold, som jævnfør VTT-indexet, akkurat betragtes acceptable, og kritiske ifølge isopleth-modellen. I dette studie hvor bjælkeenden er ført yderligere 350 mm ud i murværket, og der her konsekvent optræder RF over 90%, synes det rimeligt at betragte modellen risikobehæftet i sin helhed. I projekter med tilsvarende forhold, hvor der ikke indgår organisk materiale, eller i tilfælde hvor bjælkeenden er betydeligt kortere, er de hygrotermiske forhold ikke nær så kritiske, som ved brug af forsatsvæg. Det er på trods af slagregns kraftige indvirkning på sydvestvendte facader.

Når facaden i samme model imprægneres, falder den relative luftfugtighed med 15-20 % point, i de to kritiske ydre positioner [P3] og [P4]. Generelt er fugtindholdet i konstruktionen ikke så lavt, som tilfældet var for samme model med en forsatsvæg. Det må tilskrives fugttilskuddet fra indeklimaet, eftersom de kapillaraktive plader er åbne for diffusion. Når der indføres en revne i imprægneringen, stiger den relative luftfugtighed med 5-10 % point. Stigningen ændrer ikke på opfattelsen af den hygrotermiske ydeevne, da RF i alle områder i konstruktionen befinder sig under kritiske niveauer.

De 3 tilsvarende simuleringer med nordøstlig orientering afspejler samme tendenser som de sydvestvendte. Den mest i øjefaldende forskel, kan tilskrives når simuleringen foretages uden imprægnering [K4]. Særligt i området omkring [P3] og [P4] sænkes den relative luftfugtighed med ca. 12 % point. Det betyder at hele konstruktionen, uden brug af imprægnering, medfører hygrotermiske forhold, der befinder sig under det kritiske niveau. Selvom udtørringspotentialer er beskedent, så er det i kombination med kapillaraktive plader tilstrækkeligt til at modvirke slagregns og indeklimaets fugttilskud. I området mellem den oprindelige overflade og de kapillaraktive plader er forskellen på RF og RF_{krit} i vinterperioden meget lille. Er fugttilskuddet lidt større i virkeligheden, eller er f.eks. den kapillarsugende effekt af pladerne mindre end simuleringen i dette studie forventer, virker det sandsynligt, at RF ville overskride RF_{krit} i længere perioder. Endvidere henledes opmærksomheden på, at valg af teglmateriale, jævnfør foranalysen, har en væsentlig indvirkning på den relative luftfugtighed, og at der i dette studie er taget udgangspunkt i den mindst kapillarvirkende teglsten. Den lufttætte samling mellem bjælkeenden og de kapillaraktive plader er ikke undersøgt i dette projekt. Men litteraturstudiet peger på, at lufttæthed kan have betydende indvirkning på de hygrotermiske forhold, når der efterisoleres med kapillaraktive plader. I alt viser det, at mindre bygningsfysiske forskelle, kan ændre indeværende projekts ellers positive resultat.

10 Konklusion

Studiet havde til hensigt at svare på, under hvilke betingelser det kan vurderes fugtteknisk forsvarligt at foretage indvendig efterisolering omkring træbjælkeender med vederlag i fuldmurede teglfacader. I den sammenhæng er der foretaget et parameterstudie, med henblik på at fastslå hvilke af de indgående parametre som er de væsentligste. Der er foretaget 18 forskellige koblede varme- og fugtsimuleringer, der med udgangspunkt i to efterisoleringsprincipper undersøger de hygrotermiske følger, og dermed fastslår, om der er risiko for skader på bjælkeenden. I projektet blev der taget udgangspunkt i en bygning beliggende i Botanisk Have i København. Simuleringerne tog udgangspunkt i en klimaskærm bestående af 2½ sten, hvor bjælkeenden er ført 450 mm ud i konstruktionen.

10.1 Forsatsvæg

Grundlæggende har det vist sig udfordrende at tilvejebringe en fugtteknisk forsvarlig løsning, når facaden og derved området omkring bjælkeenden efterisoleres med en forsatsvæg. Mod sydvest optræder der hygrotermiske forhold, som er særdeles kritiske i forhold til skimmelvækst. Selvom konstruktionen simuleres opført uden byggetekniske fejl, medfører forsatsvæggen relative luftfugtigheder, der bringer bjælkeenden i fare for nedbrydning. Kun i tilfælde af, at facaden samtidigt imprægneres, kan det fugtteknisk forsvares at etablere en forsatsvæg. Det kræver endvidere at det luft- og damptætte plan udføres uden fejl/utætheder. Analysen viser at det er muligt at udføre en forsatsvæg på en nordvestvendt facade. I dette tilfælde kan der uden anvendelse af imprægnering tilvejebringes hygrotermiske forhold, som kun medfører en lille risiko for skimmelvækst i bjælkeendens ydre del. Men det kræver på tilsvarende vis, at det luft- og damptætte plan udføres korrekt omkring bjælkeenden. Er det ikke tilfældet, vil det indebære en kraftig stigning i den relative luftfugtighed, og uacceptable hygrotermiske forhold.

Den væsentligste parameterindvirkning i forbindelse med forsatsvæggen kan tilskrives, hvorvidt dampspærren er tæt eller ej. Det er underordnet mod hvilket verdenshjørne, konstruktionen er orienteret, og- eller om facaden imprægneres, hvis dampspærren ikke er tæt. Ingen simuleringsmodeller med en revne indeholdt kan vurderes fugtteknisk forsvarlige. Herefter er orientering det betydende parameter, da konstruktioner mod sydvest skal imprægneres for at være fugtteknisk forsvarlige, mens det ikke er tilfældet for nordøstvendte.

10.2 Kapillaraktive plader

I studiets analyser hvori der indgår kapillaraktive plader som det indvendige efterisoleringsprincip, er konstruktionen overvejende sundere, end ved brug af forsatsvæg. Det er dog ikke i alle tilfælde, at pladerne medfører tilfredsstillende hygrotermiske forhold. Pladerne medfører relative luftfugtigheder omkring bjælkeenden, som er kritiske i forhold til skimmelvækst, når de indgår i en sydvestvendt facadekonstruktion. De vil endvidere bevirke at træfugten i bjælkeendens ydre, bliver kritisk høj. Pladerne skal kombineres med imprægnering, for at konstruktionen kan anses for fugtteknisk forsvarlig. Under de forudsætninger som

indeværende projekt tager udgangspunkt i, tilvejebringer de kapillaraktive plader tilfredsstillende hygrotermiske forhold ved nordøstlig orientering. Men der skal ikke justeres på mange forhold, før konstruktionen ikke kan vurderes fugtteknisk forsvarlig. Særligt i området tættest på indeklimaet, er den relative luftfugtighed tæt på skimmelgrænsen.

Den væsentligste parameterindvirkning i forbindelse med kapillaraktive plader kan tilskrives orientering. Hvor det er nødvendigt at facaden imprægneres mod sydvest, for at konstruktionen kan vurderes fugtteknisk forsvarlig, er det ikke nødvendig for samme konstruktion orienteret nordøst.

10.3 Opsummering

Kombinationsnøgle								
Princip	ID	Orientering		Dampspærre		Hydrofobering		
		Sydvest	Nordøst	Tæt	Revne 10 mm	Ingen	Revne 10 mm	Tæt
Forsatsvæg	F1	•		•		•		
	F2*	•		•			•	
	F3	•		•				•
	F4*	•			•	•		
	F5*	•			•		•	
	F6*	•			•			•
	F7		•	•		•		
	F8*		•	•			•	
	F9		•	•				•
	F10*		•		•	•		
	F11*		•		•		•	
	F12*		•		•			•
Kapillaraktive plader	K1	•				•		
	K2*	•					•	
	K3	•						•
	K4		•			•		
	K5*		•				•	
	K6		•					•
	R1	•						
	R2		•					

Tabel 12. Viser med grøn, hvilke kombinationer, som i indeværende projekt har vist sig fugtteknisk forsvarlige. Den gule markering af referencemodellen mod sydvest indikerer, at den i sig selv tilvejebringer hygrotermiske forhold som i udvalgte områder er kritiske. Ingen markering betyder, at kombinationen ikke er fugtteknisk forsvarlig.

Konklusionen bygger på et konkret eksempel/projekt, og selvom andre projekter kan ligne dette, indgår der mange bygningsfysiske parametre, der kan variere betydeligt og derfor påvirke den hygrotermiske ydeevne. Af samme grund kan konklusionen ikke overføres en-til-en i andre sammenhænge. Projekter som står overfor lignede problemstilling, kan benytte dette studie som reference. I forbindelse med indeværende projekt er der foretaget flere konservative valg, vedrørende teglmateriale, slagregnsbelastning, isoleringsmængder og fugtbelastningsklasse mm. Desuden bygger resultaterne på en 2½ stensvæg, som indgår i en

lav bygning. Samlet trækker disse betingelser resultaterne i en bygningsfysisk, sikrere retning. Projekter som eksempelvis indeholder en tyndere facade, større isoleringsmængder eller fugtbelastning, vil sandsynligvis opleve tilsvarende eller værre hygrotermiske forhold. Slutteligt er det vigtigt at understrege, at konklusionerne er draget på baggrund af et dansk-lignende klima. Projekter hvor klimaet afviger væsentligt, kan ikke forvente samme resultat.

10.4 Perspektivering

Projektet har konsekvent fokuseret på, hvordan indvendig efterisolering påvirker de hygrotermiske forhold omkring de indmurede træbjælkeender. Det ville være nærliggende at foretage yderligere undersøgelser, hvor fokus er rettet mod tiltagenes varmetabsmæssige ydeevne. Udgravningen til etableringen af det nye naturhistoriske museum betyder samtidig, at kældervæggene kan isoleres udvendigt, og i projektet indgår der desuden etablering af nyt terrændæk, samt efterisolering af tagkonstruktion. Det kunne vise sig, at disse energiforbedrende tiltage betyder, at efterisoleringen af facaderne kan nedbringes, eller måske helt undlades omkring træbjælkeenderne. Det kunne være spændende at foretage denne analyse, og på den baggrund vurdere, om effekten af efterisoleringen, står mål med den risiko der løbes.

Indeværende projekt tog afsæt i, og kunne drage konklusioner på baggrund af fugtsimuleringer. Det står klart, at klimaets indvirkning på disse resultater er betragtelig. Det næste skridt ville nærliggende være, at undersøge hvorvidt det på nuværende tidspunkt er muligt at eftervise effekten af slagregn tilstrækkeligt præcist. Fugtsimuleringer af et-trins facadeløsninger viser sig kraftigt påvirket af klimaprofilen, og første skridt til at nedbringe usikkerheden er at udvikle danske klimaprofiler til simuleringsværktøjerne. På trods af Danmarks størrelse kunne der godt argumenteres for mindst to profiler. Hvor den ene afspejler kystnære forhold, og den anden klimaet midt i landskabet. Endvidere ville et studie der undersøger om den anvendte beregningskerne, overdimensionerer slagregnsmængden, være interessant. For projekterende eller andre der arbejder med fugtdimensionering af bygningers klimaskærm, ville det være værdifuldt hvis denne undersøgelse blev foretaget, og det i fremtiden blev muligt at arbejde med et dansk klima.

11 Kilde- og Litteraturliste

Binder, A., Zirkelbach, D., Künzel, H. (2010). *Test Method to Quantify the Wicking Properties of Insulation Materials Designed to Prevent Interstitial Condensation*.

Brandt, E. (2013). *Fugt i bygninger*, (SBI-anvisning 224, 2. Udgave). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.

Cappelen, J., Jørgensen, B. (1999). *Observeret vindhastighed og -retning i Danmark - med klimanormaler 1961-90*. Danish meteorological institute.

Christensen, G., Koch, A. P., Møller, E.B. BYG-ERFA. (2015). *indvendig efterisolering - Ældre ydervægge af murværk* (BYG-ERFA-blad (31) 151115).

D. Kehl., U. Ruisinger., R. Plagge., J. Grunewald. (2013). *Wooden Beam Ends in Masonry with Interior Insulation – A Literature Review and Simulation on Causes and Assessment of Decay*. Dresden University of Technology, Department of Architecture - Institute of Building Climatology, Dresden, Germany.

Fabricius, A., Blands, J. (2009). *Personers ophold i bygninger med fugt og skimmelsvamp - anbefalinger for sundhedsfaglig rådgivning* - Version 2,0. Sundhedsstyrelsen.

Finken, R. G., Bjarløv, S. P., Peuhkuri, R. H. (2016). *Effect of facade impregnation on feasibility of capillary active thermal internal insulation for a historic dormitory - A hygrothermal simulation study*. Construction and Building materials, 113, 202-214.

EKJ. (2019). *K01_C08_N403-Nedbrydning & miljøsanering*.

Elgaard, P., Stougaard L., Hammer, G - ERIK MØLLER Arkitekter. (Marts 2011). *Sølvtorvskomplekset - Vurdering af bevaringsværdier*.

ERIK MØLLER Arkitekter. (2011). *BR 722_BILAG 7 oprindelige tegninger*.

Karagiozis, A., Hadjisophocleous, G., Cao, S. (1997). *Wind-driven rain distributions on two buildings*. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vols 67-68, April-June 1997, p. 559-572.

Koch, A. P., Johansen, B. L. (2010). *TRÆ62, Skadet træværk, reparation og vedligeholdelse*. Træinformation.

Koch, A. P., Larsen, J. H., Lund-Johansen, B., Munck, O. BYG-ERFA (2003). *Svampevækst i trækonstruktioner* (BYG-ERFA-blad (29) 030724).

- Koch, A. P., Larsen, J. H., Munck, O. BYG-ERFA. (2003). *Trænedbrydende svampe-forekomst i bygninger* (BYG-ERFA-blad (29) 031219).
- Morelli, M., Nielsen, T. R., Scheffler, G. A., Svendsen, S. (2010). *Internal Insulation of Masonry Walls with Wooden Floor Beams in Northern Humid Climate*.
- Møller, E.B. (2012). *Efterisolering af småhuse - Byggetekninske løsninger* (SBI-anvisning 240 - 1 udgave). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Møller, E.B. (2012). *Efterisolering af småhuse - Energibesparelser og planlægning* (SBI-anvisning 239 - 1 udgave). Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet.
- Nielsen, A., Møller, E.B. (2017). *Master i bygningsfysisk - Varmelære teori*.
- Ojanen, T., Viitanen, H., Peuhkuri, R., Lähdesmäki, K., Vinha, J., Salminen, K. (2010). *Mold Growth Modeling of Building Structures Using Sensitivity Classes of Materials*.
- Ramberg, D. T. K., Jepsson, P., Wang, A. (2015). *SIMULATION OF RELATIVE HUMIDITY, TEMPERATURE AND MODELLING OF MOULD GROWTH IN EXTERIOR WALLS ISOLATED WITH STRAW BALES IN A SOUTHERN SWEDISH CLIMATE*. Lund University, Sweden.
- Skov- og Naturstyrelsen. Kontoret for bybevaring. (1996). *Indre By/Christianshavn Bydelsatlas - Bevaringsværdier i byer og bygninger*.
- Svendsen, S., Harrestrup, M. (2016). *Internal insulation applied in heritage multi-storey buildings with Wooden beams embedded in solid masonry brick facades*.
- Silvestru, A., Olsen, H. H., Jahr, T. C., Møller, T. K. B. (2018). *Tilstandsrapport*.
- Tenwolde, A. (2009). *A Review of ASHRAE Standard 160—Criteria for Moisture Control Design Analysis in Buildings*. Vol. 114, Part 1.
- Vadstrup, S., (2014). *Energiforbedring af fredede og bevaringsværdige bygninger*. Kulturstyrelsen, Kulturministeriet.
- Valbjørn, O. (2003). *Undersøgelse og vurdering af fugt og skimmelsvampe i bygninger* (By og Byg Anvisning 204 - 1 Udgave).
- Vej-Hansen, C., Rode, C. (2010). *Varmetransmission ved ledning, konvektion og stråling*.
- Vereecken, E., Staf, R. (2011). *Review of mould prediction models and their influence on mould risk evaluation*.

Vereecken, E., Staf, R. (2017). *Wooden beam ends in combination with interior insulation: the importance of an airtight sealing. KU Leuven, Department of Civil Engineering, Building Physics Section. Belgium.*

Wagner, M. H., Maagaard, S. E., Worm, A. S., Thamdrup, J., Weitzmann, P., Kamper, M. G., Knudsen, M. E., (2018). *Kuldebroer og deres indflydelse på klimaskærmens varmetab.*

Bygningsreglementet. (u.å). Tilgået 2019 på: <http://bygningsreglementet.dk/>

BYG-ERFA. (u.å). Tilgået 2019. <https://byg-erfa.dk/ordbog/alment-teknisk-faelleseje>

Historiskehuse. (u.å). Tilgået 2019. <https://historiskehuse.dk/at-eje-et-bevaringsvaerdigt-hus/>

Kulturarv. (u.å). Tilgået 2019. <https://www.kulturarv.dk/fbb/omfbb.htm>

Skimmel. (u.å). Tilgået 2019. <https://www.skimmel.dk/>

WUFI. (u.å). Tilgået 2019. <https://wufi.de/en/software/wufi-pro/>

WUFI-forum. (u.å). Tilgået 2019. <https://www.wufi-forum.com/viewtopic.php?t=396&highlight=hydrophob%2A>

12 Appendiks

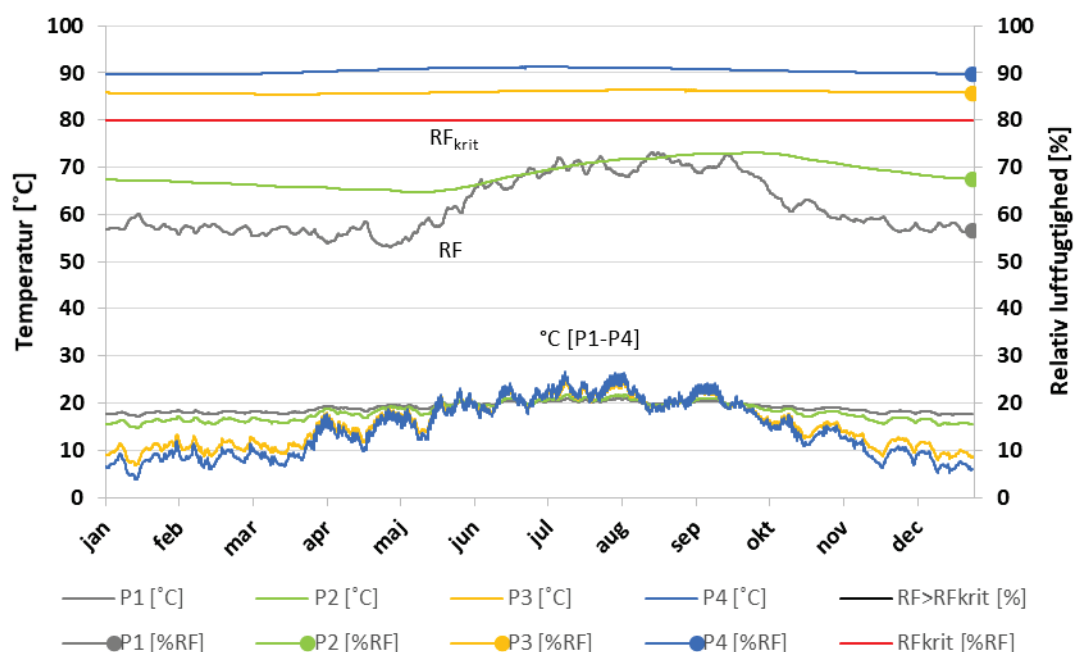
I det følgende afsnit, fremgår resultaterne af alle simuleringsmodeller. Dem som ikke er præsenteret i sin helhed i forbindelse med resultatafsnittet, er markeret med grå. Resultaterne er inddraget i diskussionen, og rapportens konklusion bygger både de i resultatafsnittet præsenterede simuleringresultater, samt resultaterne i forbindelse med modellerne i dette afsnit.

Kombinationsnøgle								
Princip	ID	Orientering		Dampspærre		Hydrofobering		
		Sydvest	Nordøst	Tæt	Revne 10 mm	Ingen	Revne 10 mm	Tæt
Forsatsvæg	F1	•		•		•		
	F2*	•		•			•	
	F3	•		•				•
	F4*	•			•	•		
	F5*	•			•		•	
	F6*	•			•			•
	F7		•	•		•		
	F8*		•	•			•	
	F9		•	•				•
	F10*		•		•	•		
	F11*		•		•		•	
	F12*		•		•			•
Kapillaraktiv plader	K1	•				•		
	K2*	•					•	
	K3	•						•
	K4		•			•		
	K5*		•				•	
	K6		•					•
	R1	•			Referencemodel med sydvestlig orientering			
	R2		•		Referencemodel med nordøstlig orientering			

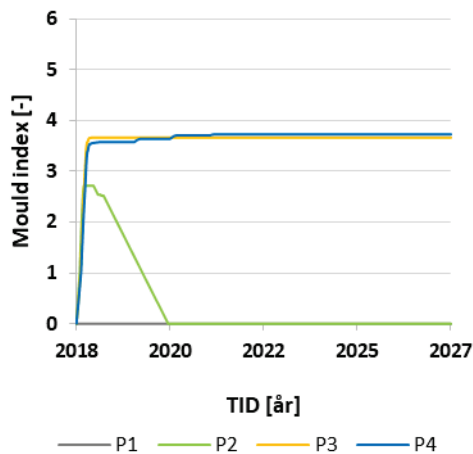
Tabel 13. Viser alle simuleringsofbygninger og hvilke (gråfarvede) som ikke er præsenteret i sin helhed i resultatafsnittet.

12.1 Simuleringsmodeller – Referencer

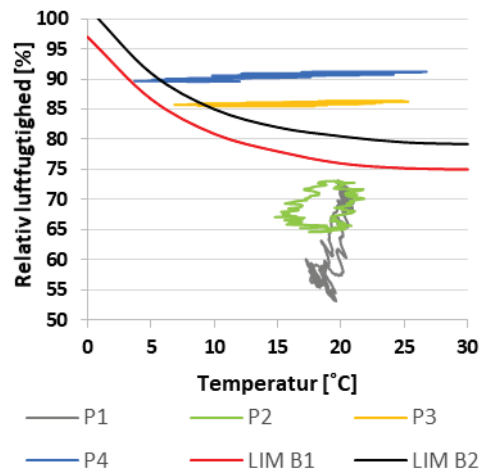
12.1.1 [R1] – Sydvest



Figur 83 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

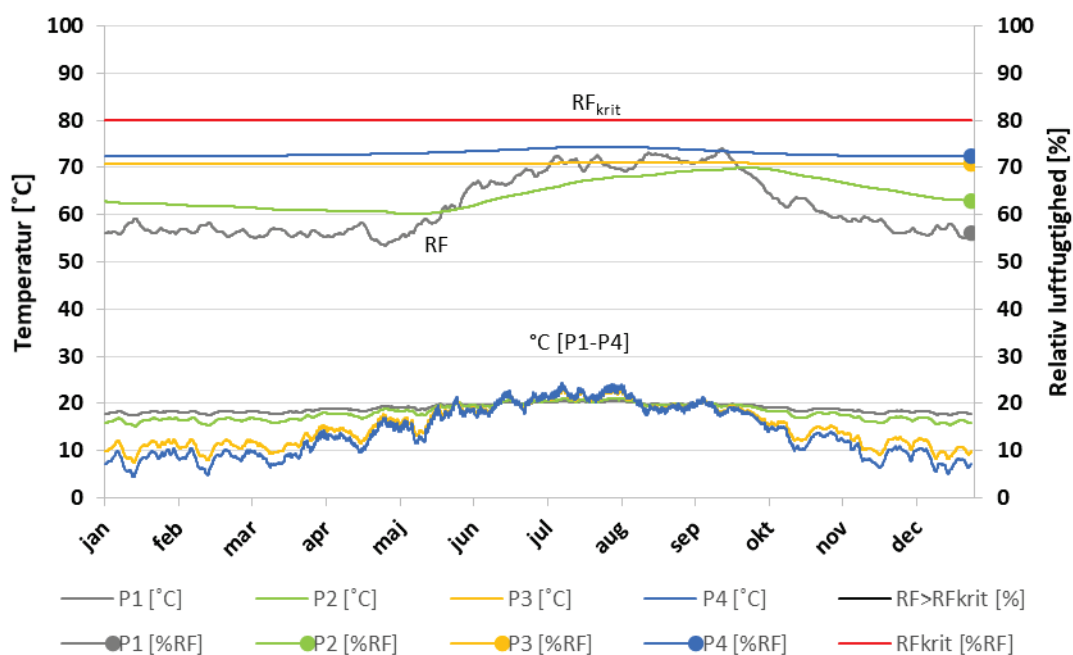


Figur 84 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

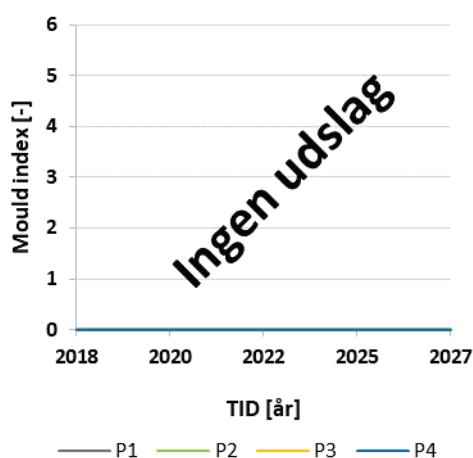


Figur 85 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

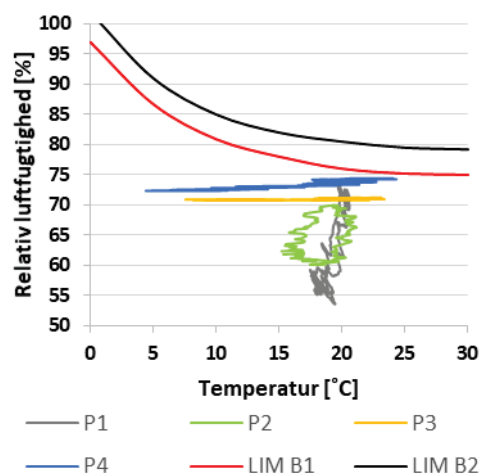
12.1.2 [R2] – Nordøst



Figur 86 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



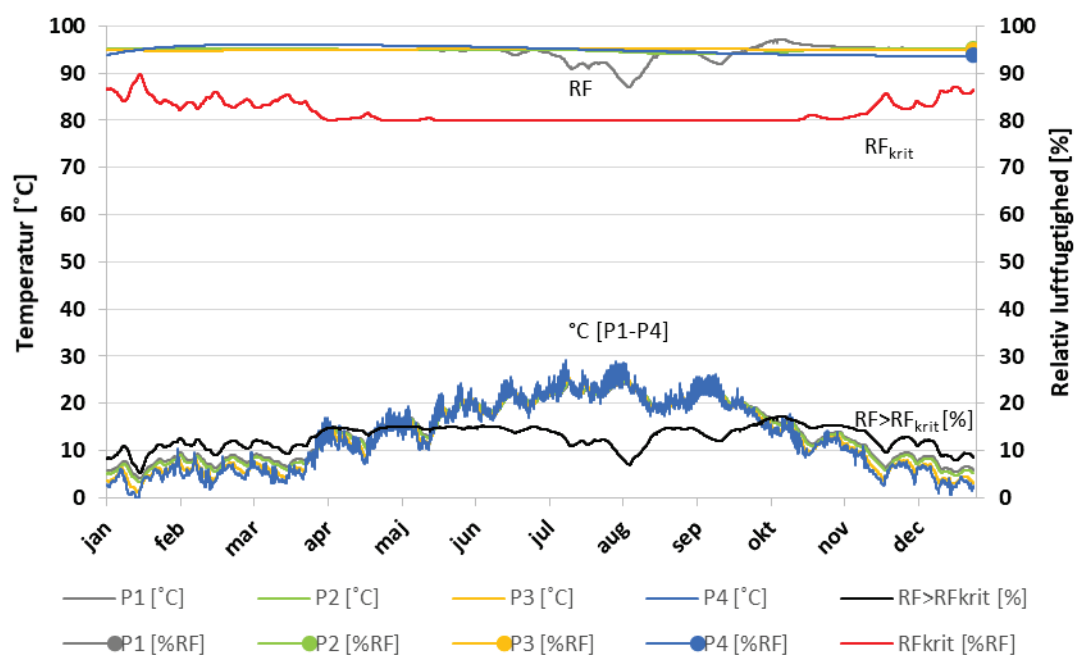
Figur 87 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



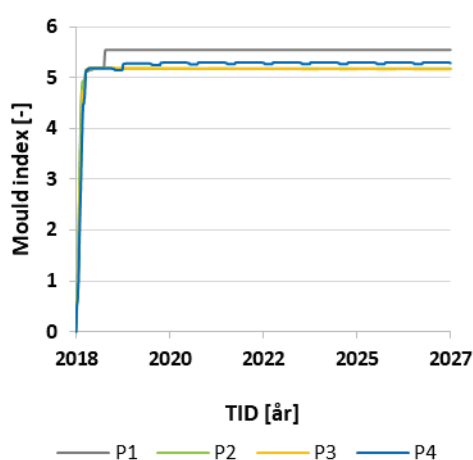
Figur 88 Isopleth-model af det sidst simulerede år

12.2 Simuleringsmodeller – Forsatsvæg

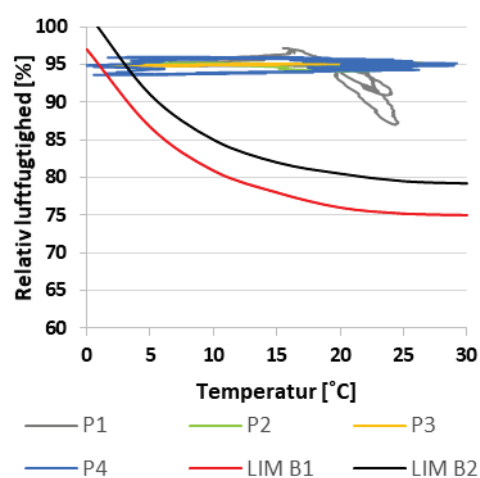
12.2.1 [F1] – Sydvest – Tæt dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 89 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

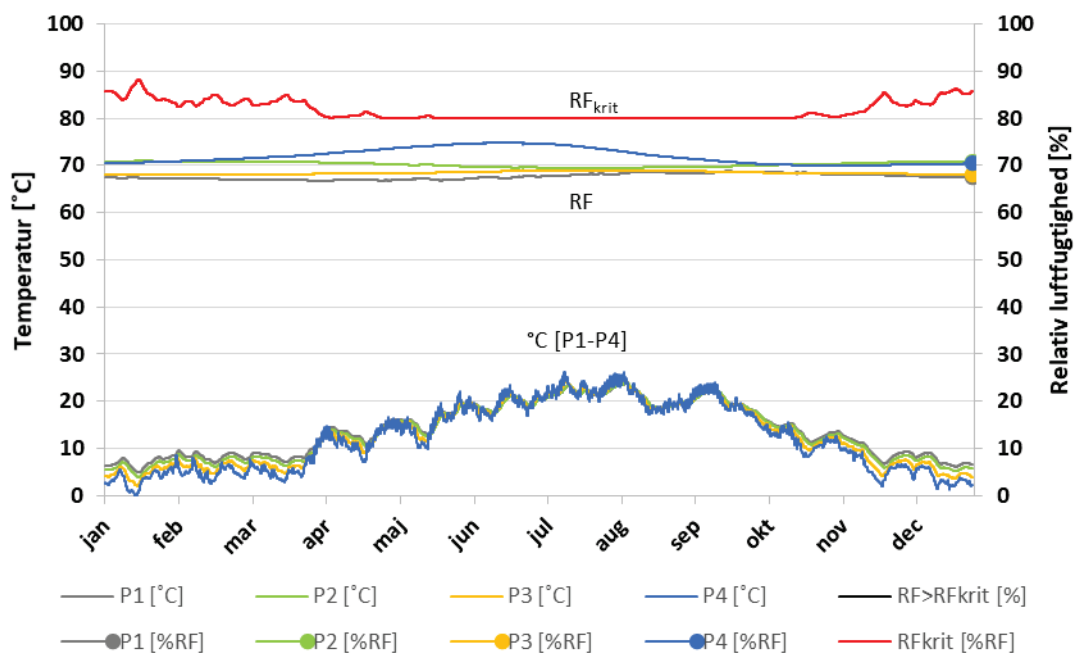


Figur 90 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

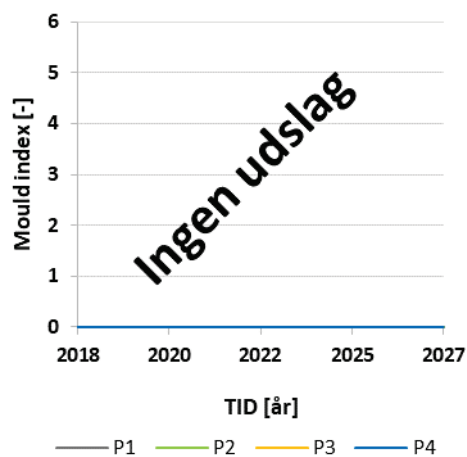


Figur 91 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

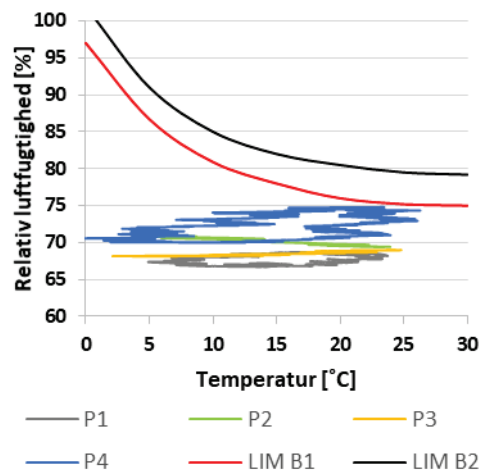
12.2.2 [F2] – Sydvest – Tæt dampspærre – Revne i hydrofobering



Figur 92 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

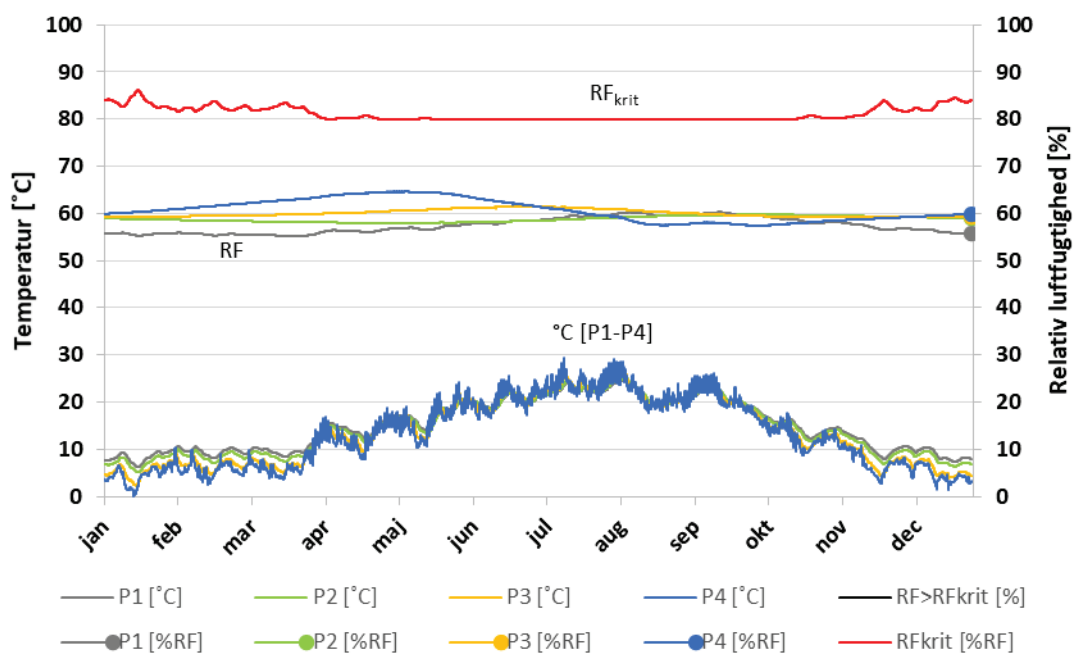


Figur 93 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

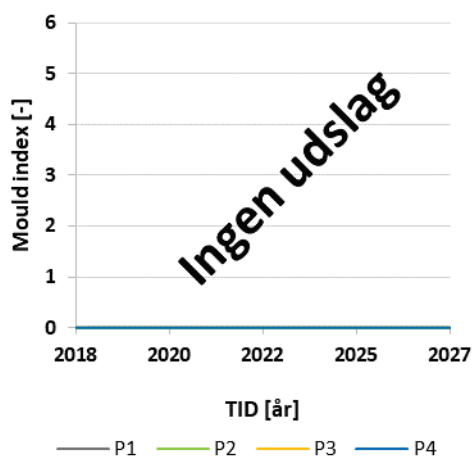


Figur 94 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

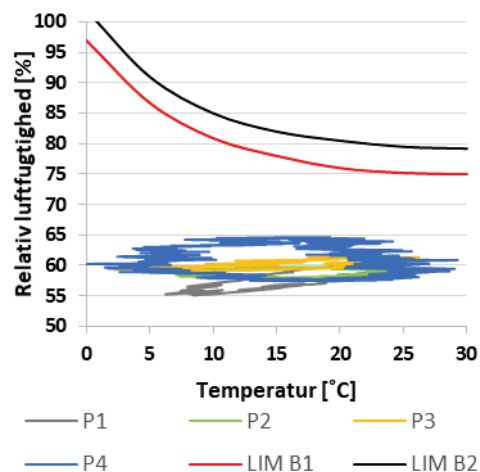
12.2.3 [F3] – Sydvest – Tæt dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 95 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

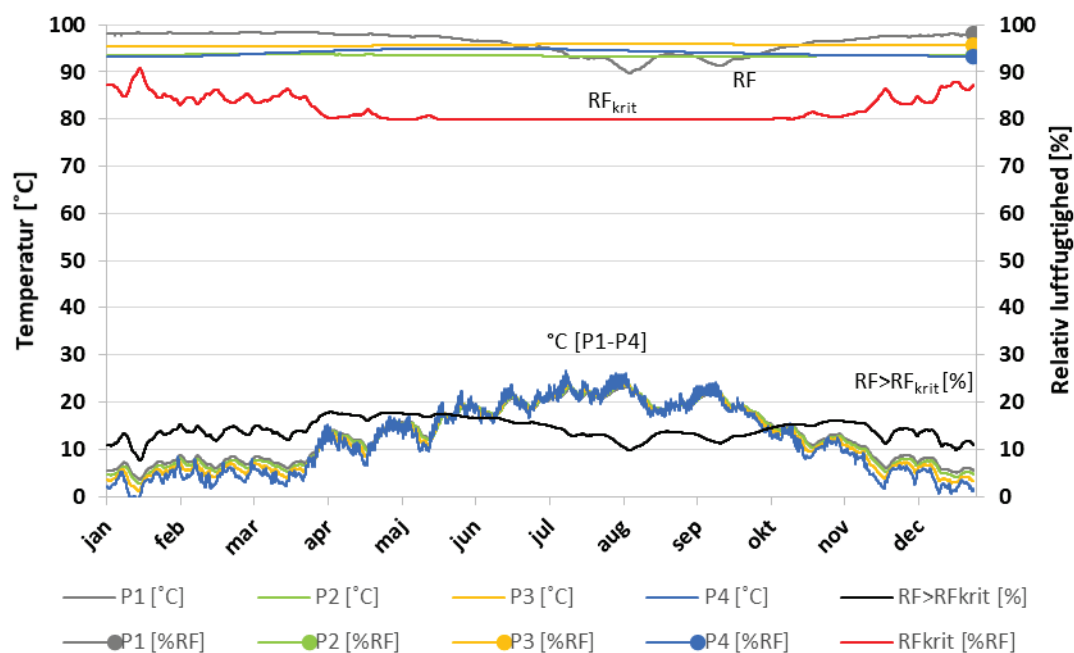


Figur 96 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

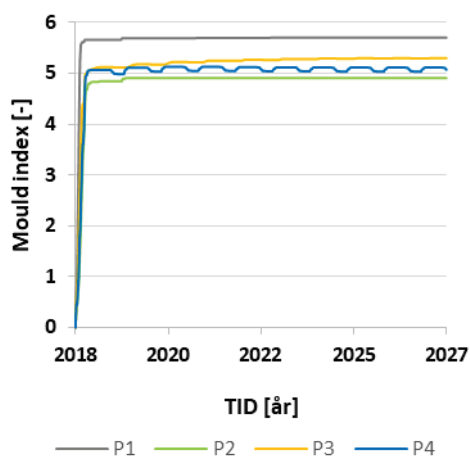


Figur 97 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

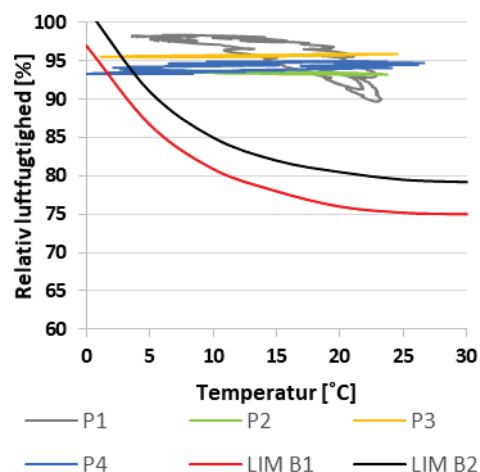
12.2.4 [F4] – Sydvest – Revne i dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 98 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

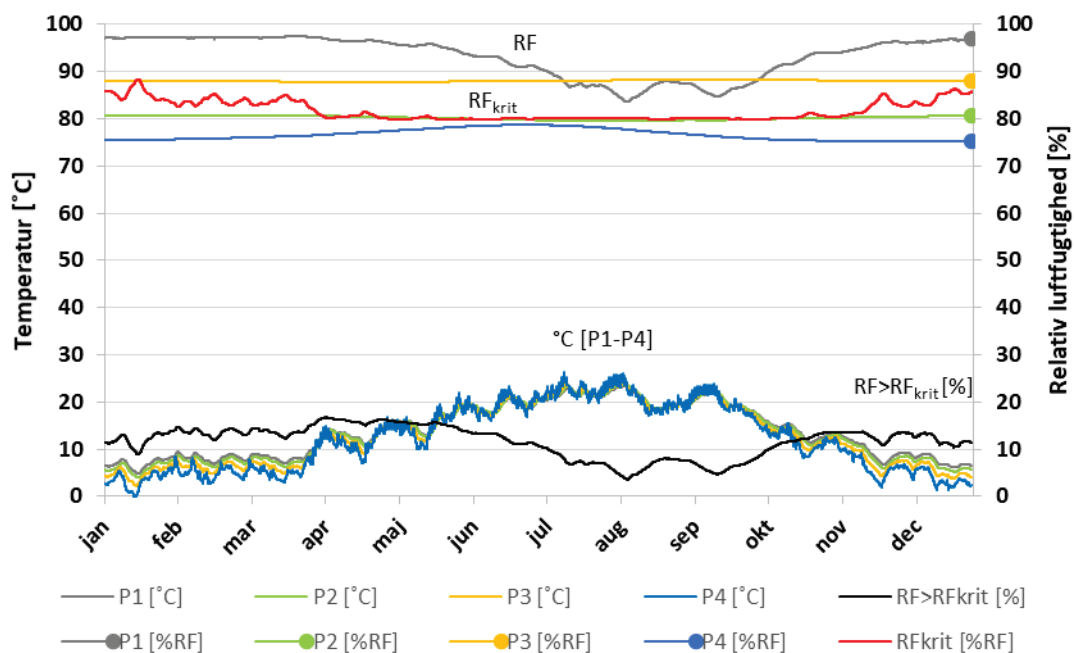


Figur 99 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

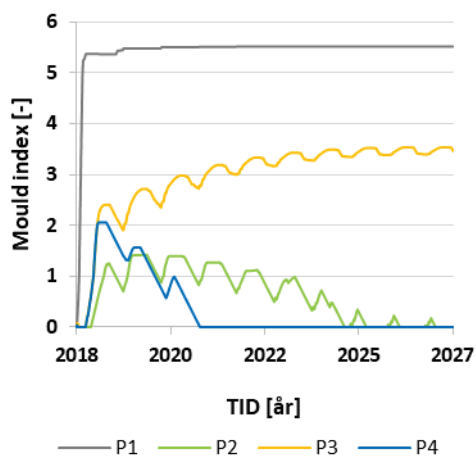


Figur 100 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

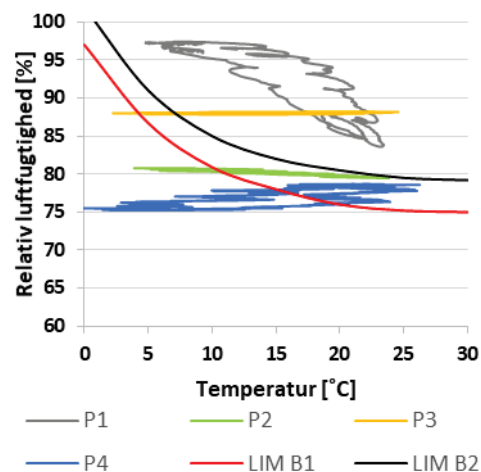
12.2.5 [F5] – Sydvest – Revne i dampspærre – Revne i hydrofobering



Figur 101 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

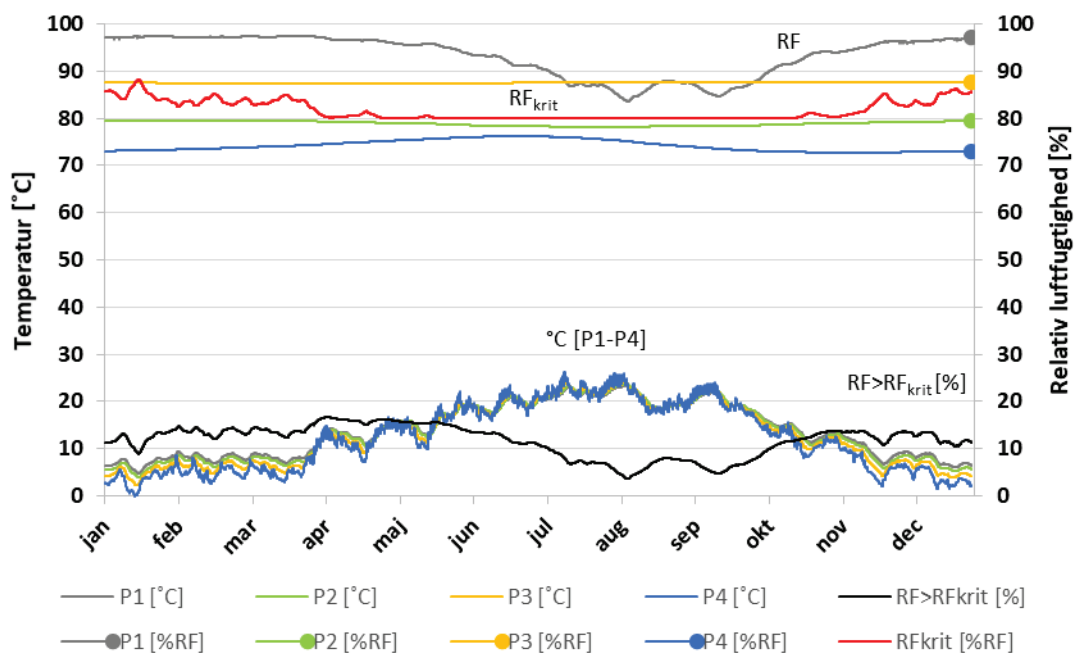


Figur 102 VTT Mould index for hele simuleringsperioden

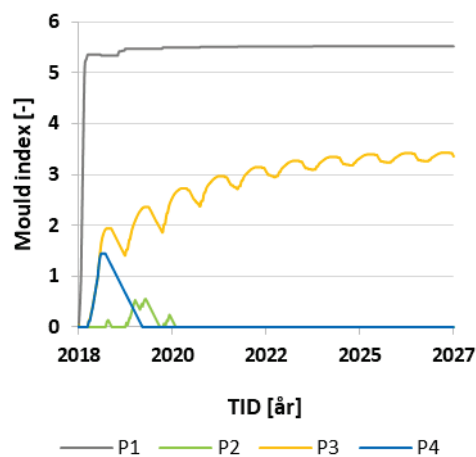


Figur 103 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

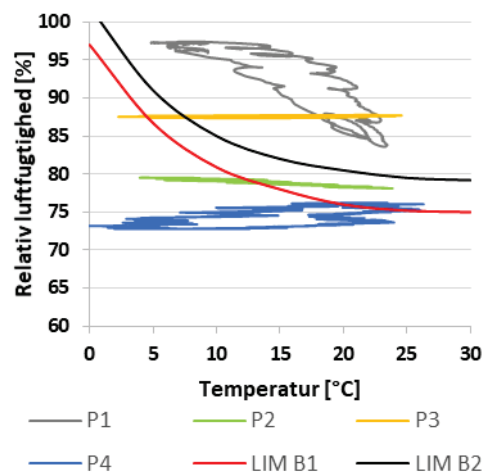
12.2.6 [F6] – Sydvest – Revne i dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 104 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

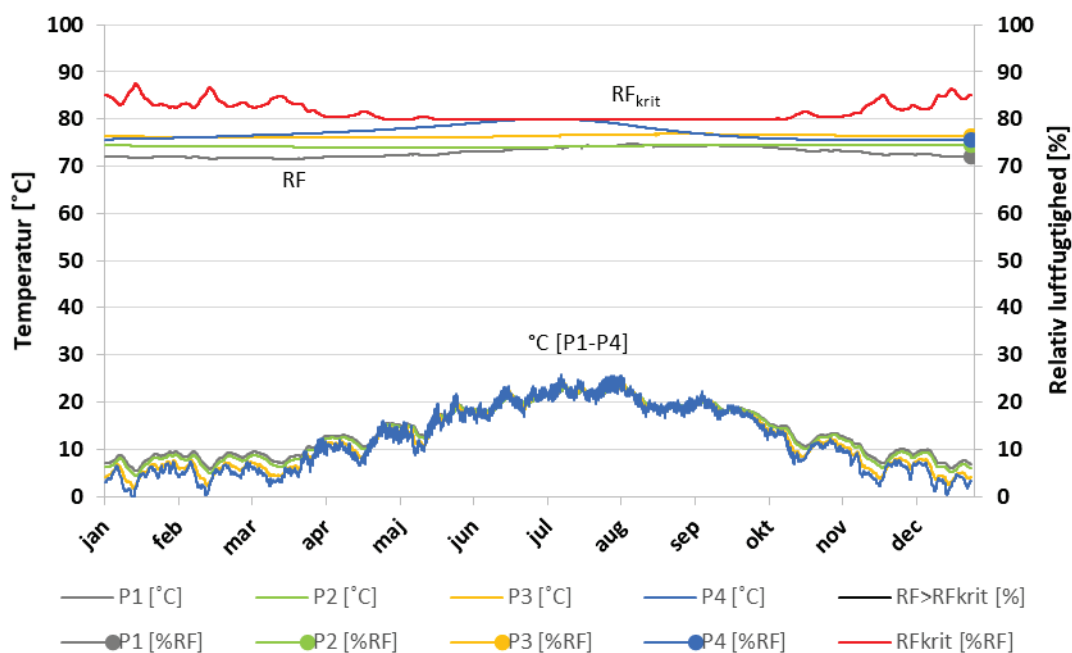


Figur 105 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

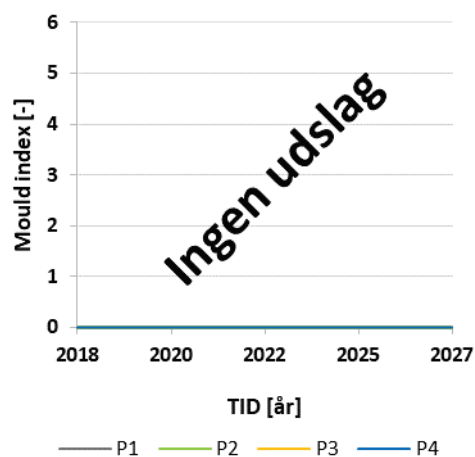


Figur 106 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

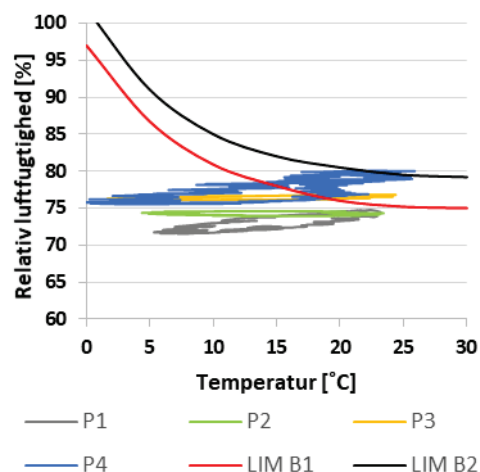
12.2.7 [F7] – Nordøst – Tæt dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 107 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

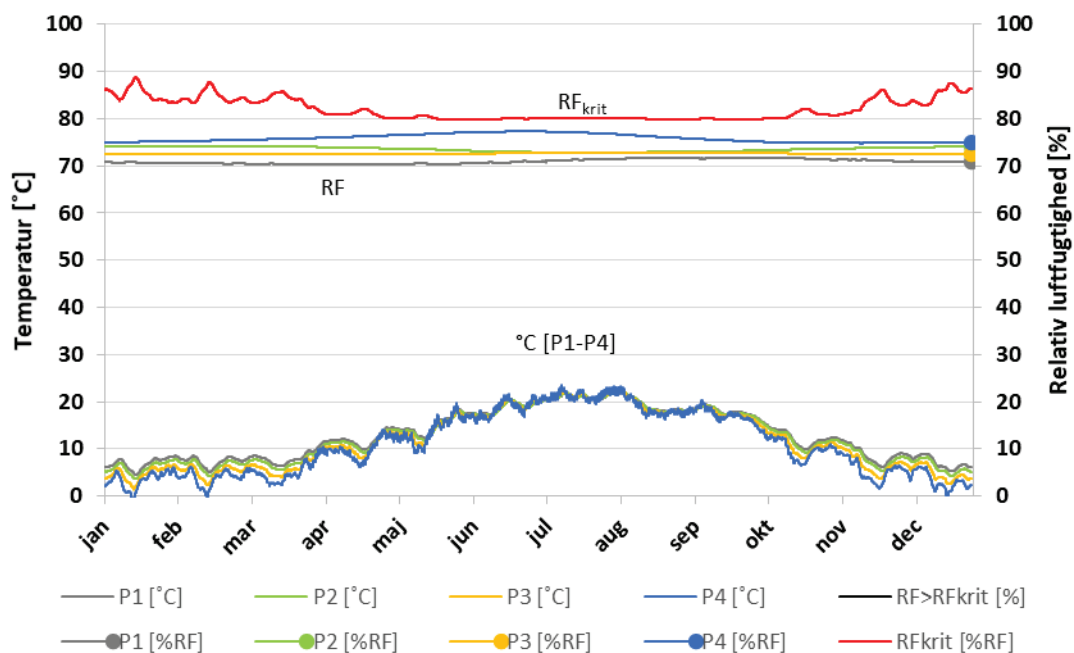


Figur 108 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

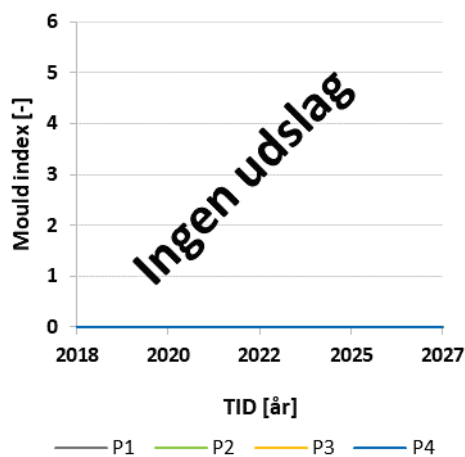


Figur 109 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

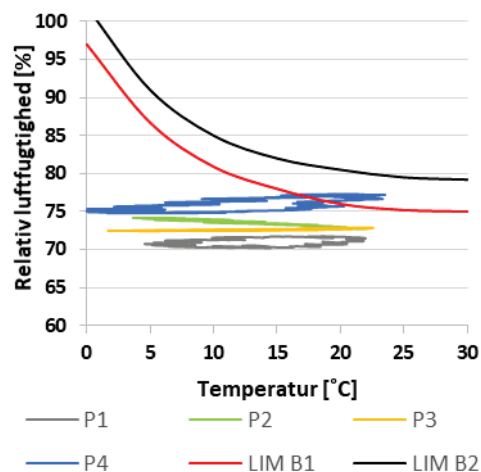
12.2.8 [F8] – Nordøst – Tæt dampspærre – Revne i hydrofobering



Figur 110 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

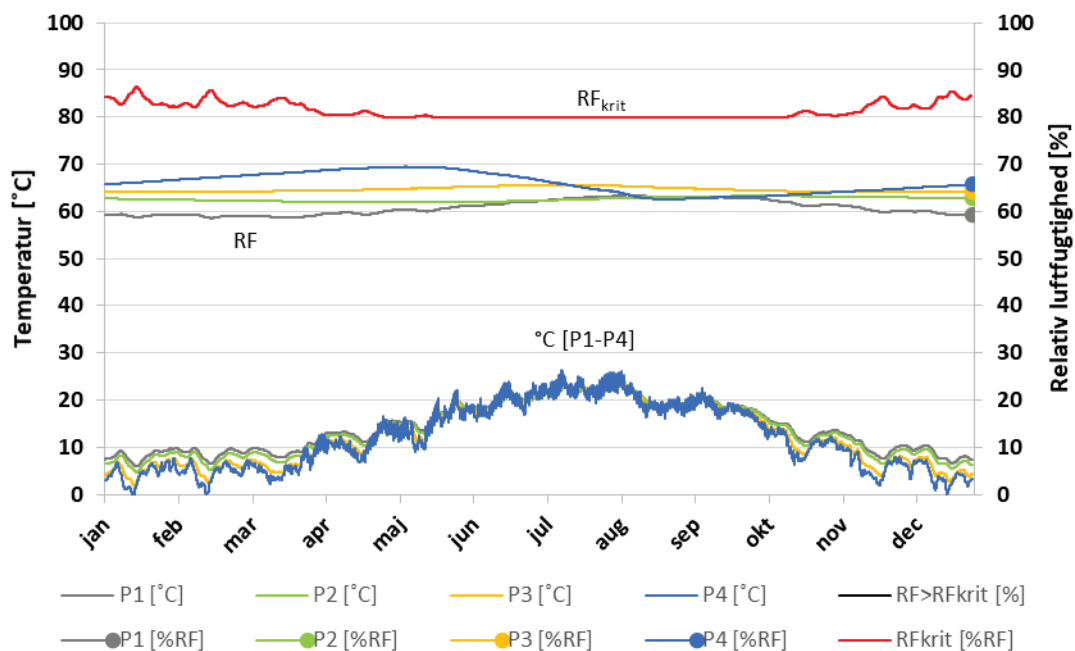


Figur 111 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

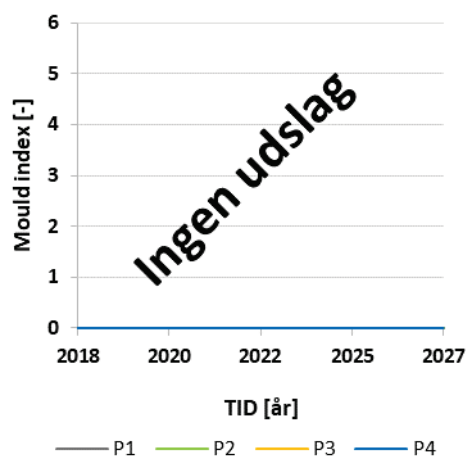


Figur 112 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

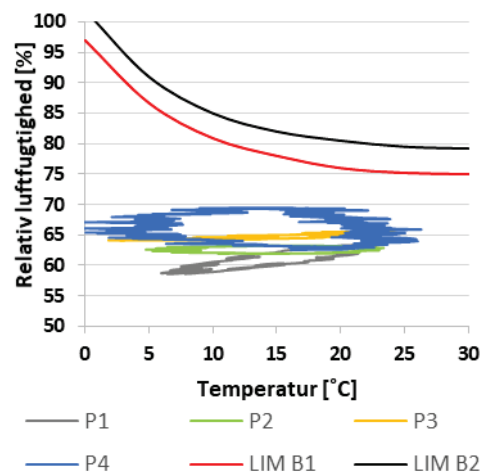
12.2.9 [F9] – Nordøst – Tæt dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 113 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

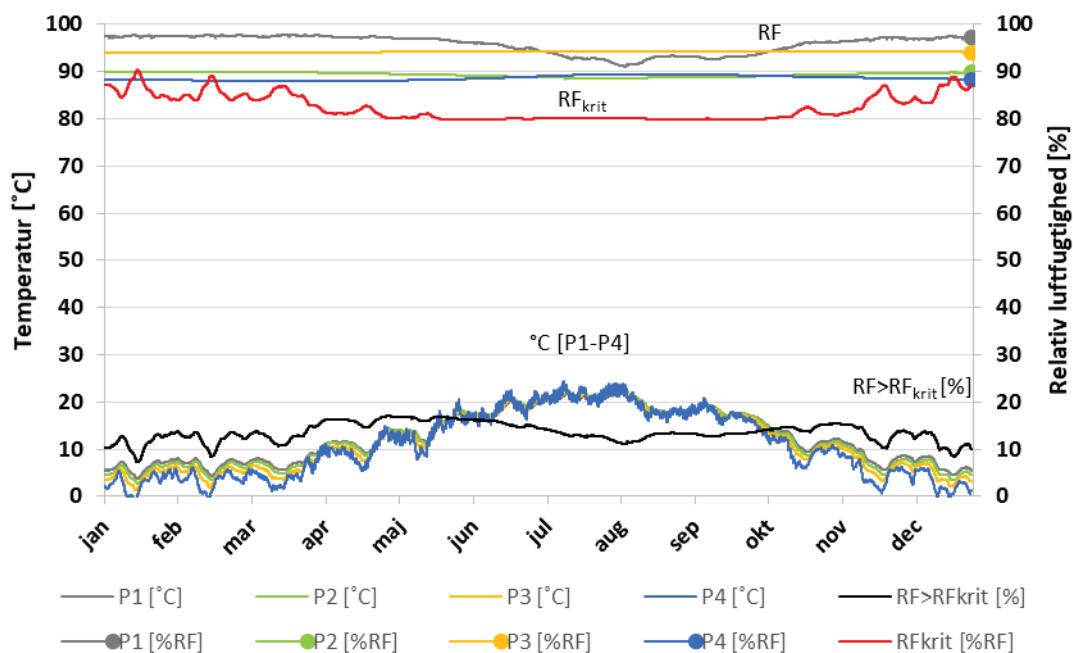


Figur 114 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

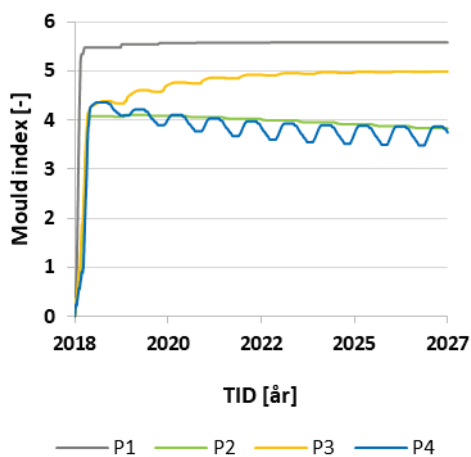


Figur 115 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

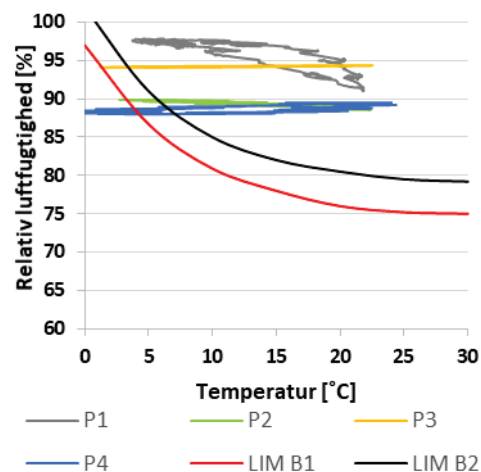
12.2.10 [F10] – Nordøst – Revne i dampspærre – Ingen hydrofobering



Figur 116 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

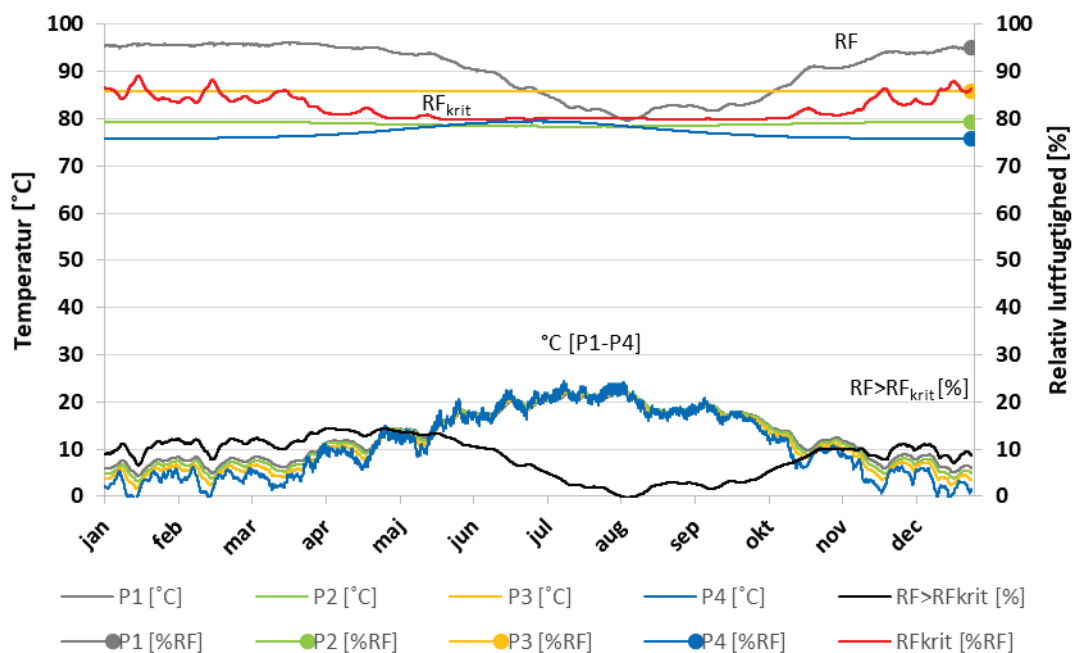


Figur 117 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

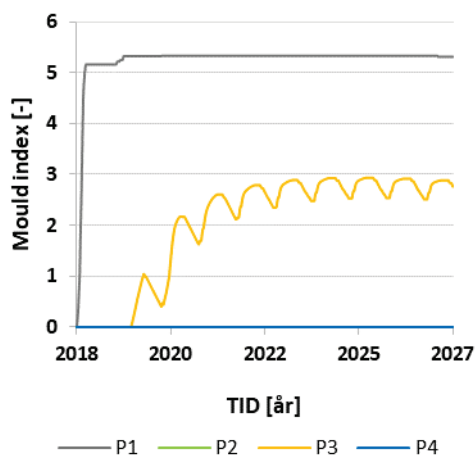


Figur 118 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

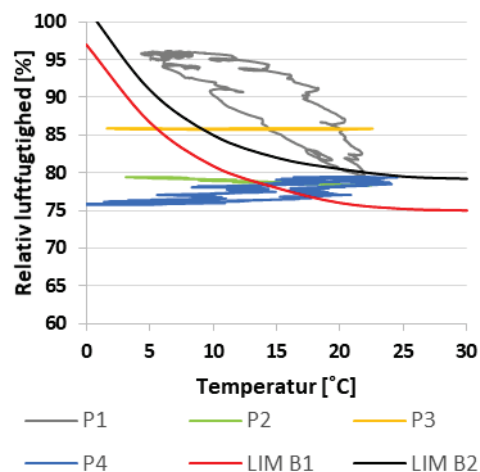
12.2.11 [F11] – Nordøst – Revne i dampspærre – Revne i hydrofobering



Figur 119 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

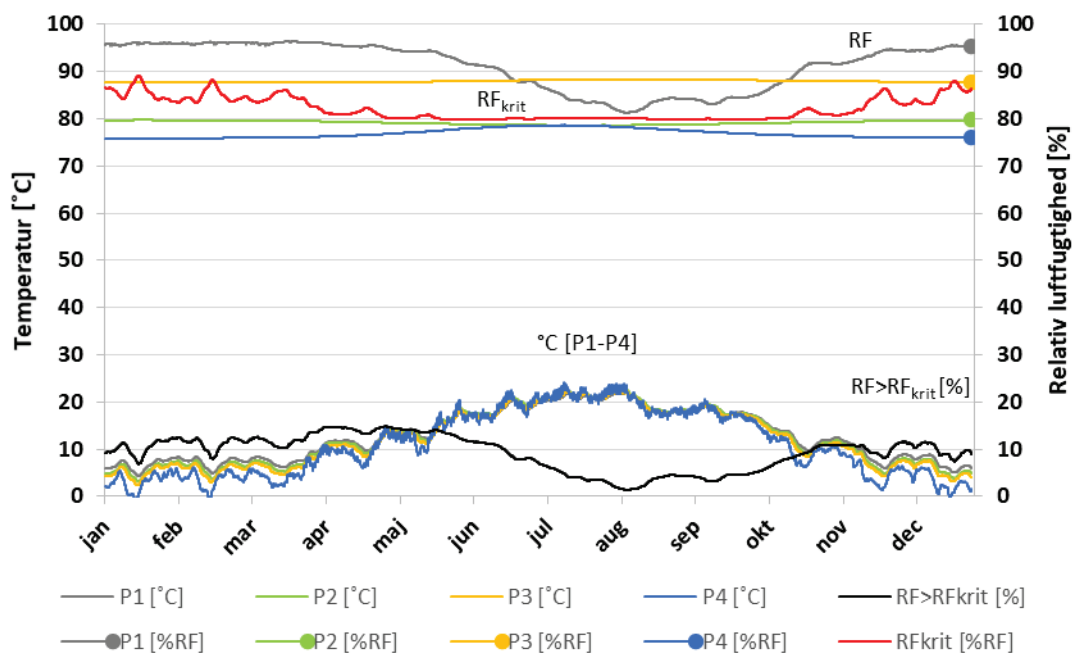


Figur 120 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

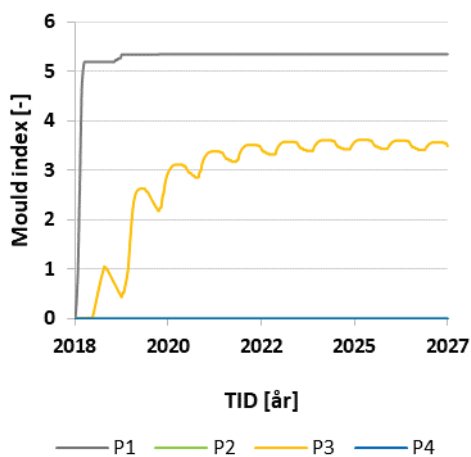


Figur 121 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

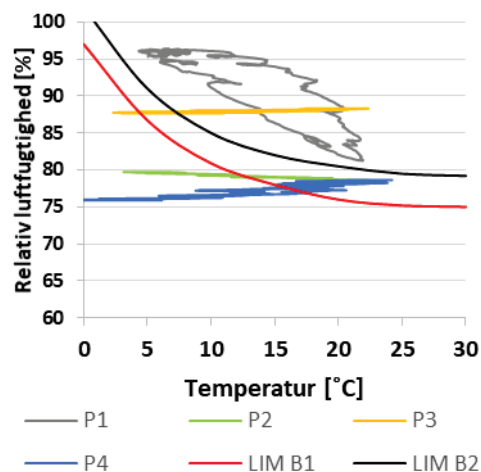
12.2.12 [F12] – Nordøst – Revne i dampspærre – Tæt hydrofobering



Figur 122 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



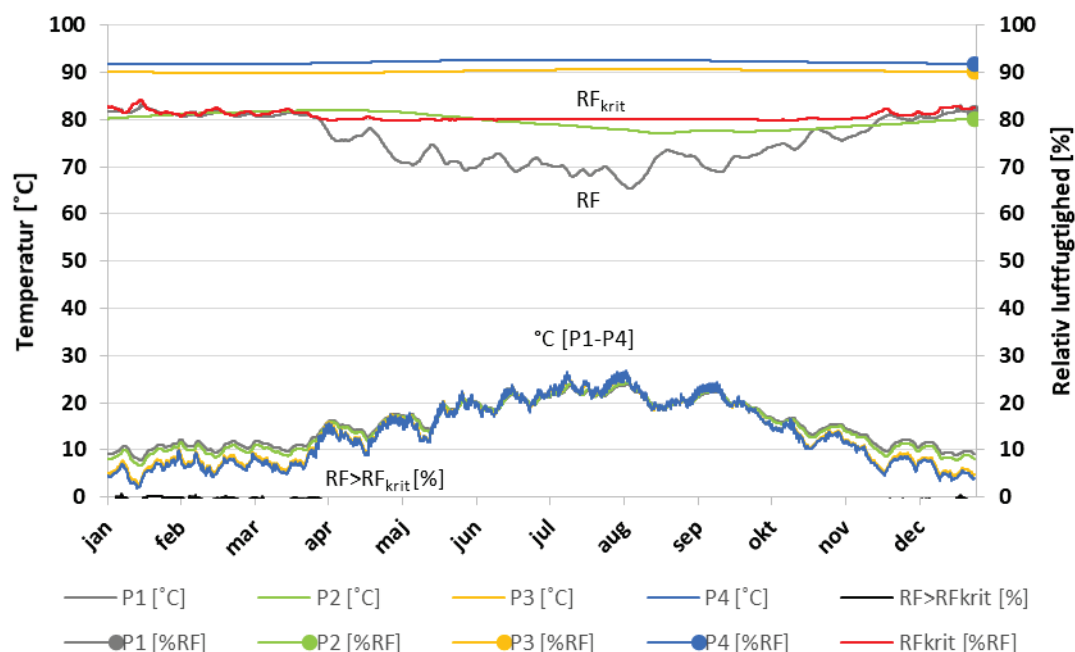
Figur 123 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



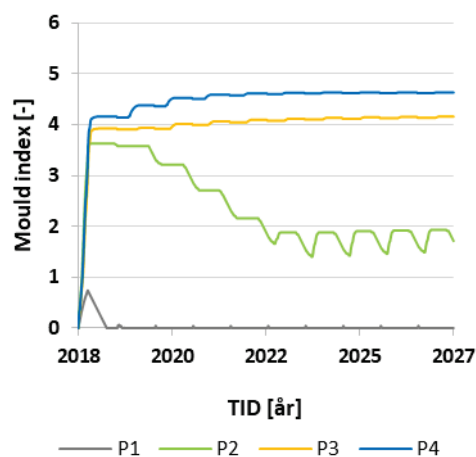
Figur 124 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

12.3 Simuleringsmodeller – Kapillaraktive plader

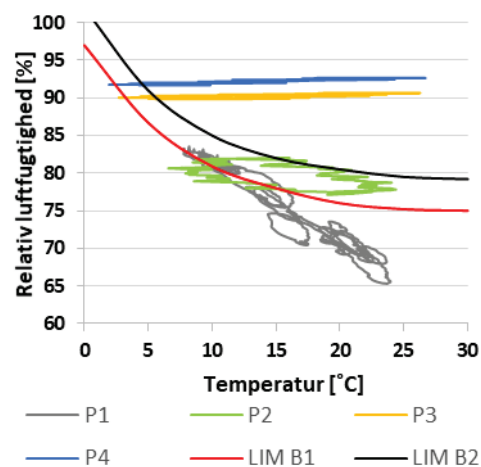
12.3.1 [K1] – Sydvest – Ingen hydrofobering



Figur 125 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

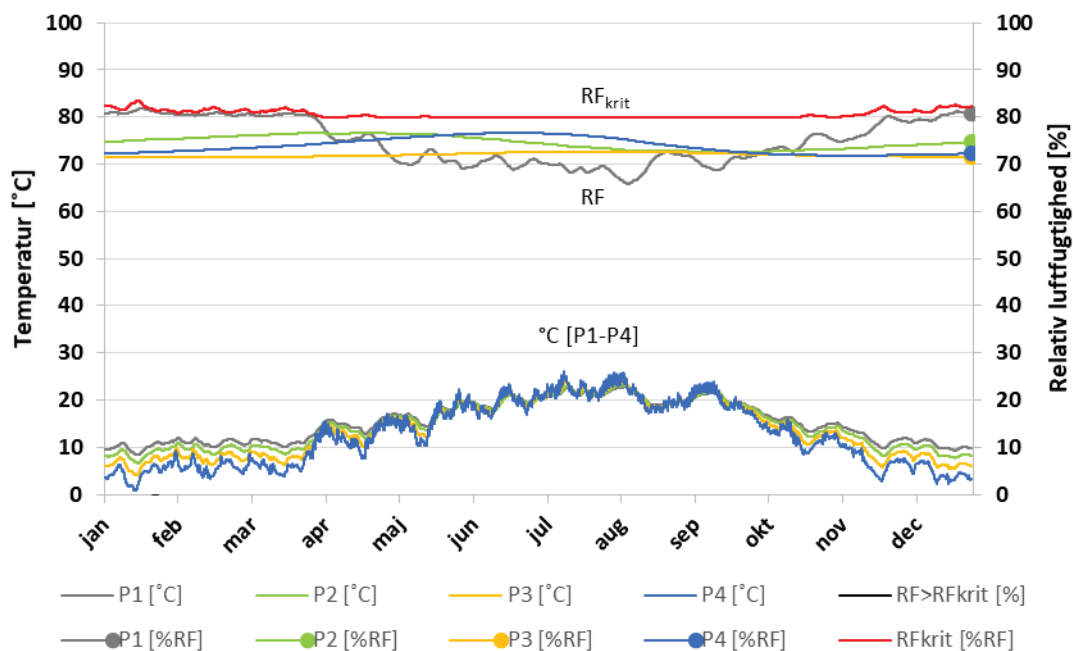


Figur 126 VTT Mould index for hele simuleringsperiode.

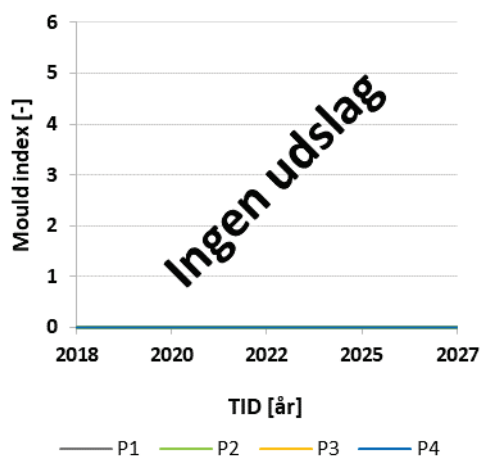


Figur 127 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

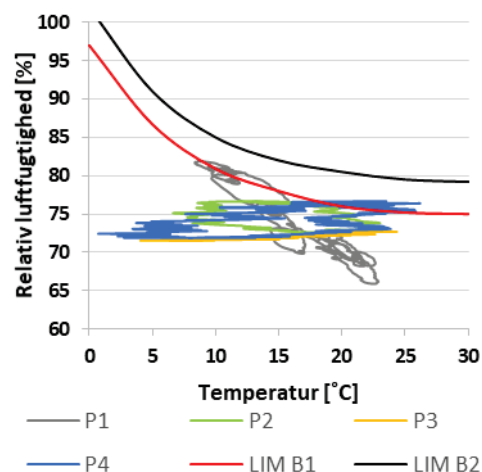
12.3.2 [K2] – Sydvest – Revne i hydrofobering



Figur 128 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

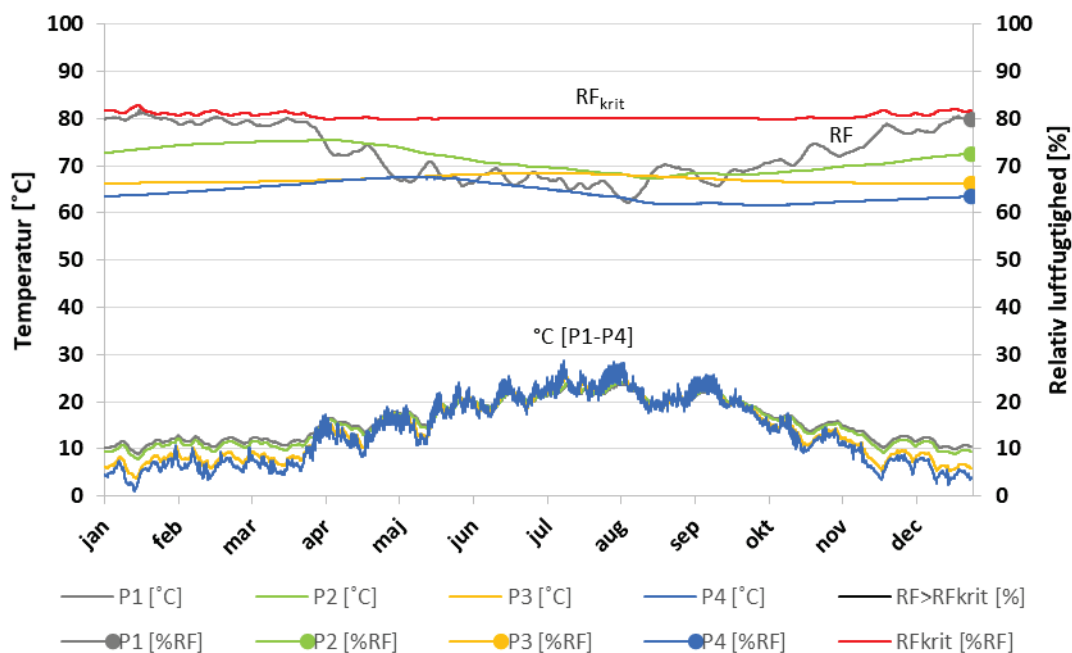


Figur 129 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

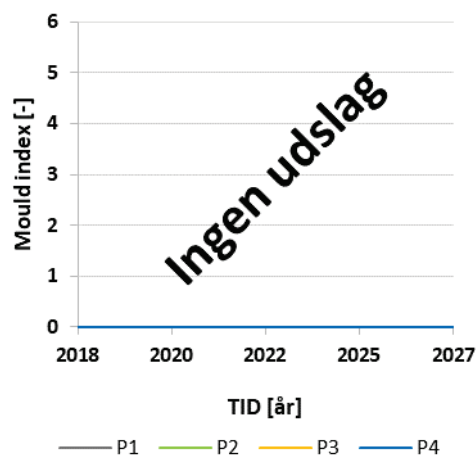


Figur 130 Isoleth-model af det sidst simulerede år.

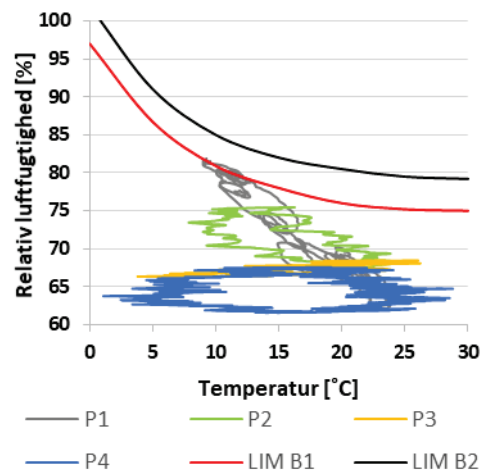
12.3.3 [K3] – Sydvest – Tæt hydrofobering



Figur 131 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

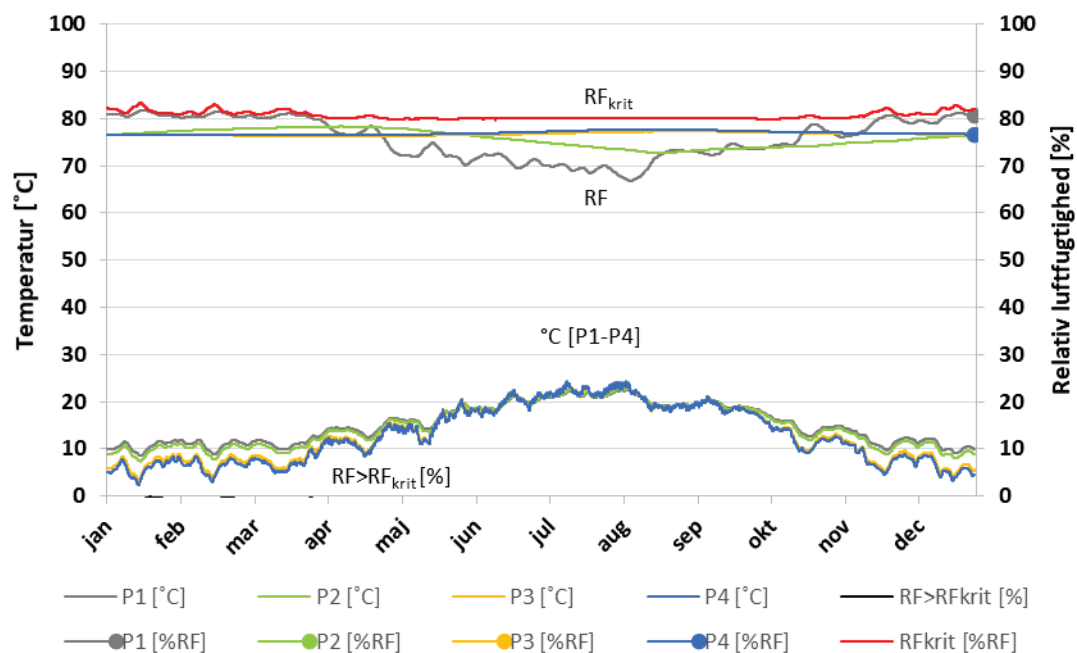


Figur 132 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

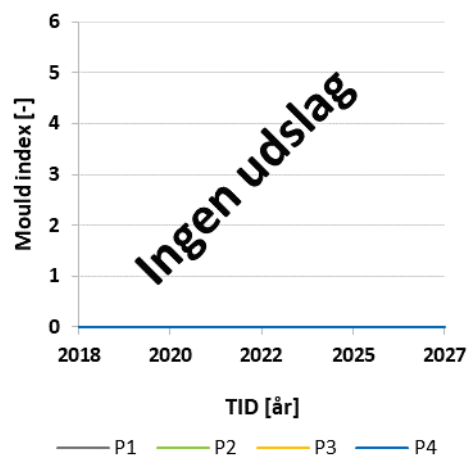


Figur 133 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

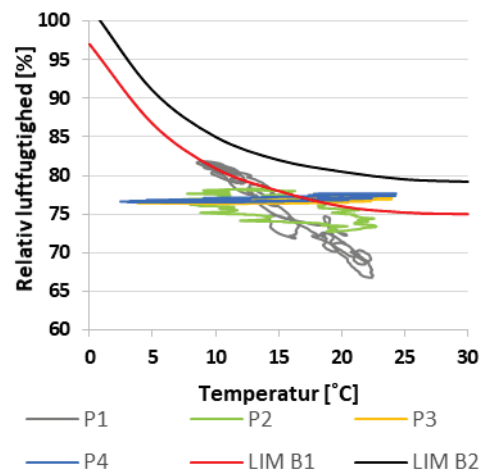
12.3.4 [K4] – Nordøst – Ingen hydrofobering



Figur 134 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

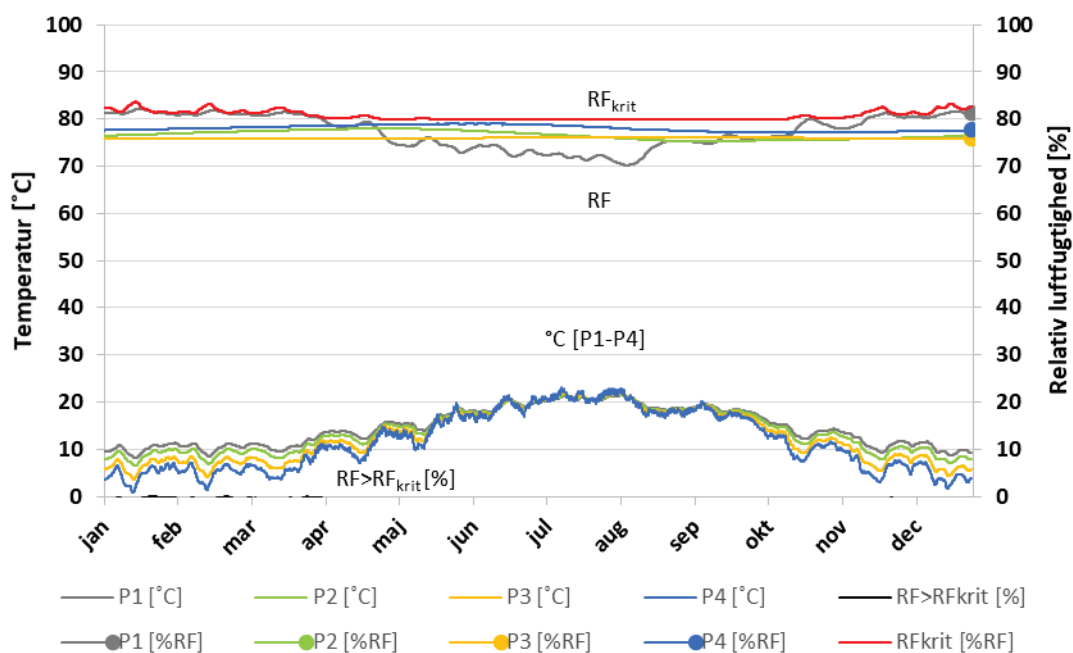


Figur 135 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

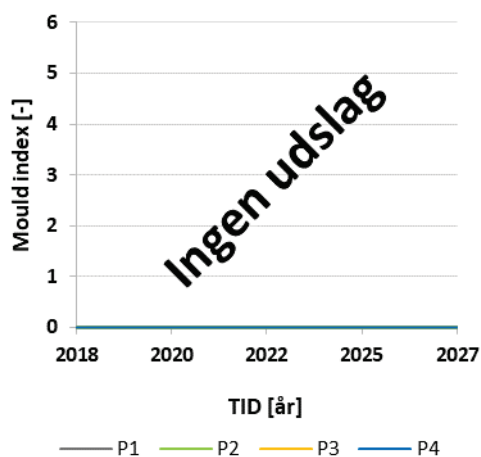


Figur 136 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

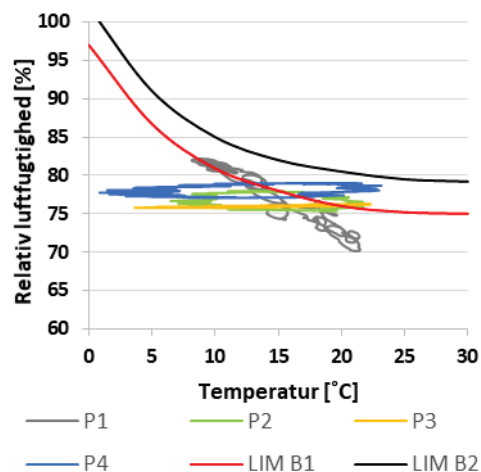
12.3.5 [K5] – Nordøst – Revne i hydrofobering



Figur 137 Redegør for temperatur og relative luftfugtighed, i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.

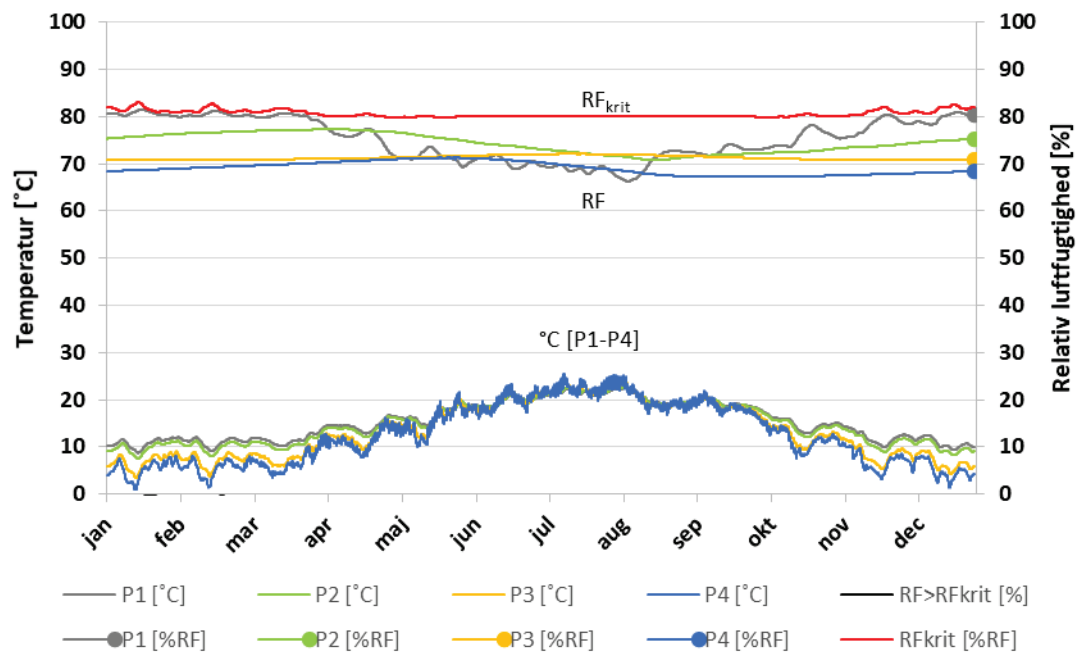


Figur 138 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.

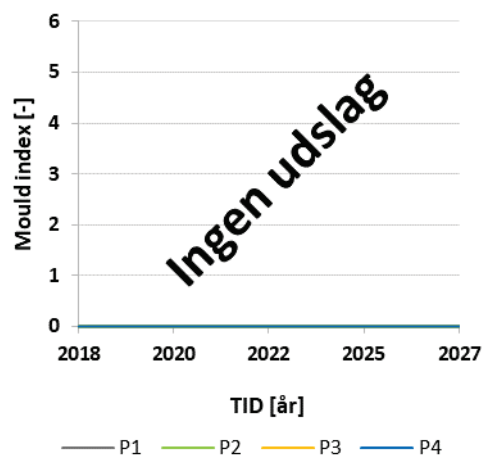


Figur 139 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

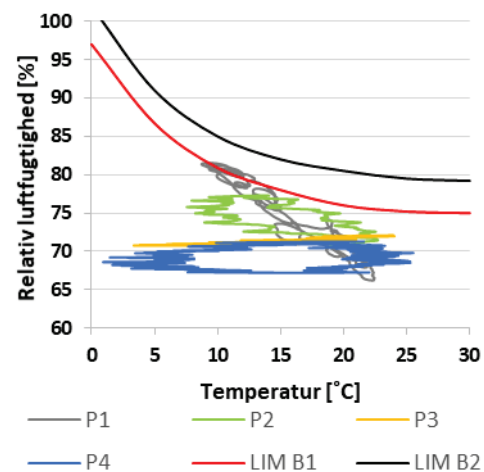
12.3.6 [K6] – Nordøst – Tæt hydrofobering



Figur 140 Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed i de 4 datapositioner, for det sidst simulerede år.



Figur 141 VTT Mould index for hele simuleringsperioden.



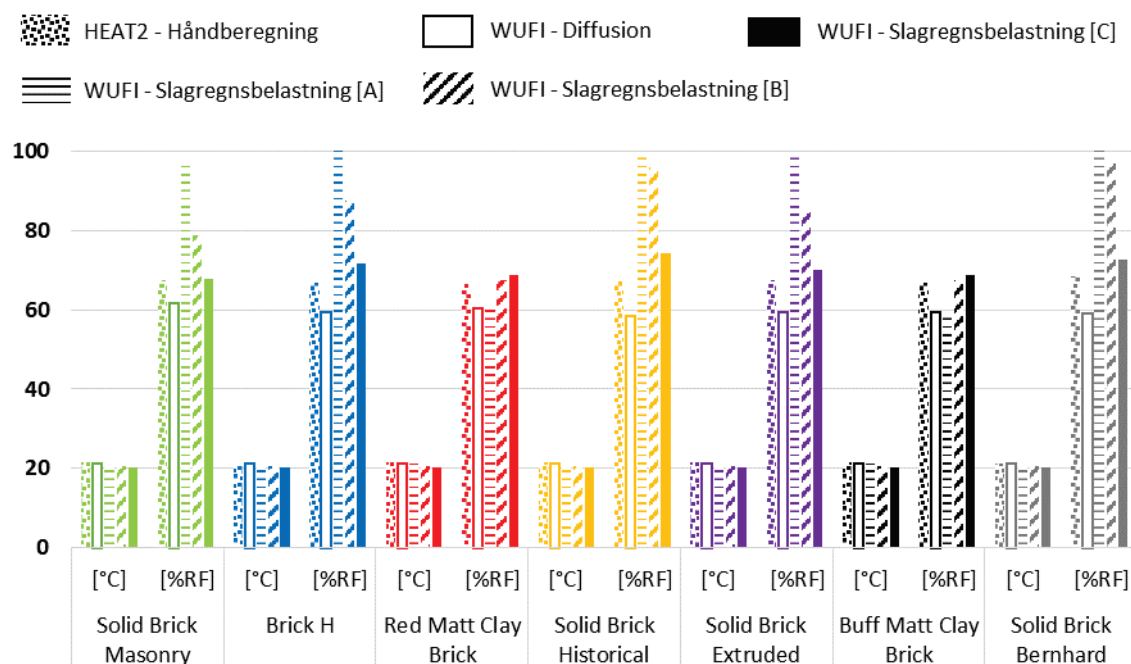
Figur 142 Isopleth-model af det sidst simulerede år.

12.4 Tegl-sammenligning

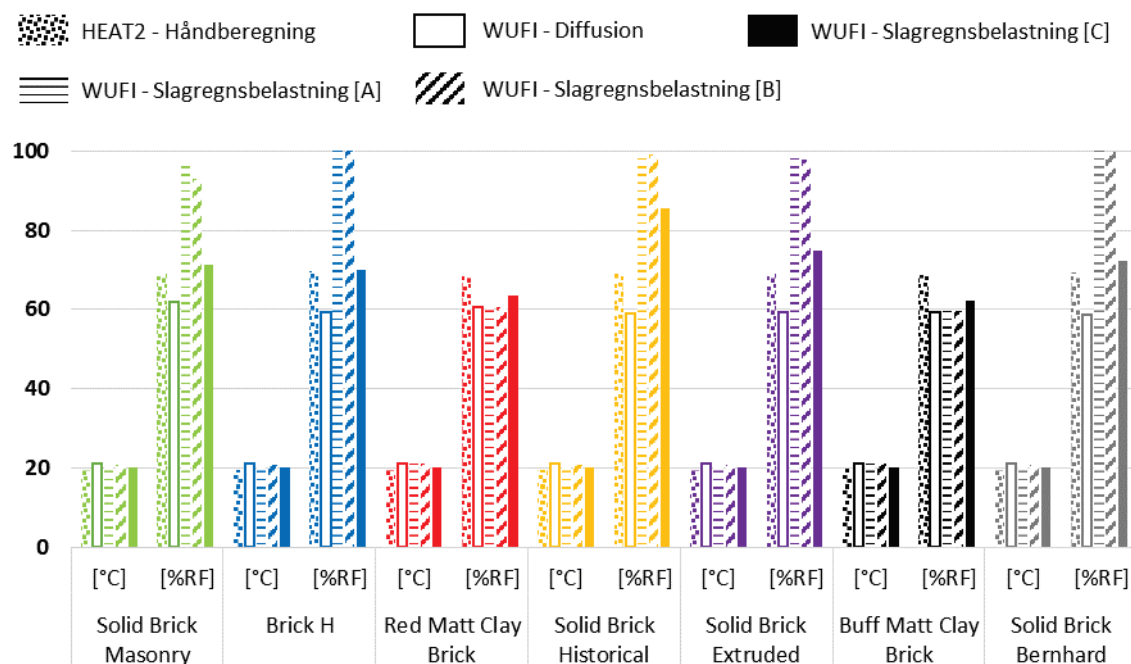
Teglanalyse

		Februar				August			
Afstand fra indv. overflade		100 mm		300 mm		100 mm		300 mm	
Graffarve	Tegltype	[°C]	[%RF]	[°C]	[%RF]	[°C]	[%RF]	[°C]	[%RF]
	Solid Brick Masonry								
	WUFI – Diffusion #	15.9	60.9	11.8	62.8	20.6	64.6	21.1	61.8
	HEAT2 – Håndberegning *	14.6	58.8	8.6	70.7	21.4	67.6	19.6	69.0
	WUFI – Slagregnsbelastning A	14.5	91.3	10.1	98.0	20.5	92.1	20.8	97.0
	WUFI – Slagregnsbelastning B	15.1	77.2	10.4	92.2	20.5	78.7	20.9	92.9
	WUFI – Slagregnsbelastning C	15.6	64.3	10.8	71.0	20.2	67.8	20.2	71.2
	Red Matt Clay Brick								
	WUFI – Diffusion #	16.7	58.1	11.6	64.5	20.5	67.4	21.2	60.5
	HEAT2 – Håndberegning *	14.9	57.8	8.8	70.1	21.5	67.3	19.6	68.8
	WUFI – Slagregnsbelastning A	16.7	58.1	11.6	64.6	20.5	67.4	21.2	60.6
	WUFI – Slagregnsbelastning B	16.7	58.1	11.6	64.6	20.5	67.5	21.2	60.6
	WUFI – Slagregnsbelastning C	16.4	59.0	11.0	66.8	20.2	68.7	20.3	63.6
	Brick H								
	WUFI – Diffusion #	15.8	61.9	11.6	69.1	20.6	66.7	21.1	59.2
	HEAT2 – Håndberegning *	13.8	62.2	8.3	72.5	21.1	68.7	19.5	69.5
	WUFI – Slagregnsbelastning A	15.2	97.6	10.5	100	20.4	100	20.8	100
	WUFI – Slagregnsbelastning B	15.6	78.5	10.8	100	20.5	87.6	20.9	100
	WUFI – Slagregnsbelastning C	15.6	63.6	10.7	76.5	20.1	71.7	20.2	70.0
	Solid Brick Historical								
	WUFI – Diffusion #	16.4	59.0	11.5	66.0	20.5	66.9	21.1	58.5
	HEAT2 – Håndberegning *	14.6	58.8	8.6	70.7	21.4	67.6	19.6	69.0
	WUFI – Slagregnsbelastning A	15.6	99.7	10.8	100	20.4	98.5	20.8	99.2
	WUFI – Slagregnsbelastning B	15.9	99.3	11.0	99.3	20.4	95.9	20.9	99.1
	WUFI – Slagregnsbelastning C	16.1	64.1	10.7	85.8	20.1	74.3	20.2	85.5
	Solid Brick Extruded								
	WUFI – Diffusion #	16.4	59.1	11.5	64.6	20.5	66.8	21.1	59.3
	HEAT2 – Håndberegning *	14.6	58.8	8.6	70.7	21.4	67.6	19.6	69.0
	WUFI – Slagregnsbelastning A	14.8	95.9	9.8	99.3	20.4	95.6	20.8	99.2
	WUFI – Slagregnsbelastning B	15.2	85.6	10.2	97.5	20.5	85.2	20.9	99.7
	WUFI – Slagregnsbelastning C	16.1	62.2	10.8	73.3	20.1	70.0	20.2	75.0
	Buff Matt Clay Brick								
	WUFI – Diffusion #	16.8	58.1	11.6	68.0	20.5	67.6	21.2	59.5
	HEAT2 – Håndberegning *	15.4	56.2	9.0	69.1	21.6	66.7	19.7	68.6
	WUFI – Slagregnsbelastning A	16.8	58.1	11.6	68.1	20.5	67.6	21.2	59.5
	WUFI – Slagregnsbelastning B	16.8	58.1	11.6	68.1	20.5	67.5	21.2	59.5
	WUFI – Slagregnsbelastning C	16.6	58.7	11.0	69.4	20.2	68.7	20.3	62.2
	Solid Brick Bernhard								
	WUFI – Diffusion #	16.1	61.1	11.4	69.3	20.6	66.8	21.1	59.0
	HEAT2 – Håndberegning *	14.1	61.0	8.4	71.9	21.2	68.3	19.5	69.3
	WUFI – Slagregnsbelastning A	15.5	99.5	10.7	100	20.4	99.6	20.8	100
	WUFI – Slagregnsbelastning B	15.7	87.5	10.9	100	20.5	96.9	20.9	99.7
	WUFI – Slagregnsbelastning C	15.8	63.6	10.8	79.0	20.1	72.7	20.2	72.2

Tabel 14. Redegør for temperatur og relativ luftfugtighed som funktion af tegltyper. Værdierne er månedsmiddelværdier fra dynamiske og stationære fugtberegninger. Rækker/værdier med symbolet [*] er tilvejebragt ved anvendelse af formlerne angivet i teori afsnittet. Temperaturen er bestemt ved HEAT2. De resterende rækker er udtræk fra dynamiske fugtberegninger. Rækker/værdier med symbolet [#] medtager kun diffusion samt varmeledning. Kapillartransport og latent varme er altså ikke medtaget i disse dynamiske fugtberegninger.



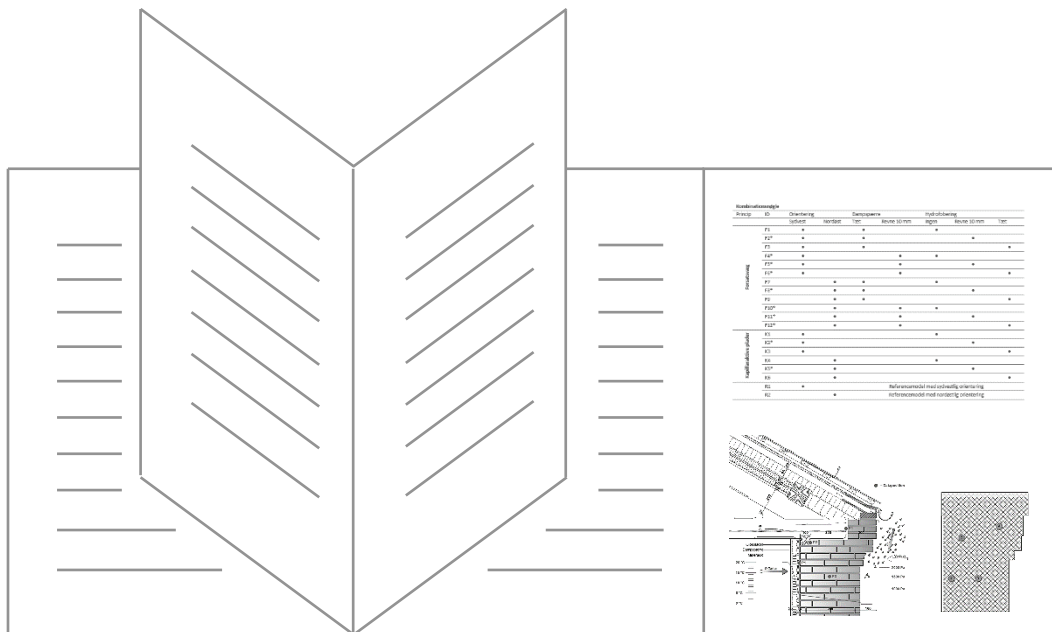
Figur 143. Redegør for temperatur og RF som funktion teglmateriale 100 mm fra indeklimaet i august. Resultaterne er tilvejebragt ved benyttelse af HEAT2 i kombination med formlerne fra teori afsnittet. I tillæg til de 3 gennemgåede simuleringer, er der foretaget en dynamisk simulering der kun medtager diffusion.



Figur 144. Redegør for temperatur og RF som funktion teglmateriale 300 mm fra indeklimaet i august. Resultaterne er tilvejebragt ved benyttelse af HEAT2 i kombination med formlerne fra teori afsnittet. I tillæg til de 3 gennemgåede simuleringer, er der foretaget en dynamisk simulering der kun medtager diffusion.

Print denne side som A3 liggende. Efterfølgende placeres og fastgøres resten af rapporten til den venstre del af denne side. Siden foldes på midten, og kan herefter benyttes som bogmærke, og som oversigt i forbindelse med hovedanalysens resultatafsnit.

Rapporten placeres og fastgøres her



Kombinationsnøgle

Princip	ID	Orientering		Dampspærre		Hydrofobering		
		Sydvest	Nordøst	Tæt	Revne 10 mm	Ingen	Revne 10 mm	Tæt
Forsatsvæg	F1	●		●		●		
	F2*	●		●			●	
	F3	●		●				●
	F4*	●			●	●		
	F5*	●			●		●	
	F6*	●			●			●
	F7		●	●		●		
	F8*		●	●			●	
	F9		●	●				●
	F10*		●		●	●		
	F11*		●		●		●	
	F12*		●		●			●
Kapillaraktive plader	K1	●				●		
	K2*	●					●	
	K3	●						●
	K4		●			●		
	K5*		●				●	
	K6		●					●
	R1	●			Referencemodel med sydvestlig orientering			
	R2		●		Referencemodel med nordøstlig orientering			

Datapositionernes placering

