



AALBORG UNIVERSITY
DENMARK

Aalborg Universitet

Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner

Litteraturstudier, målinger og beregninger

Morelli, Martin; Nielsen, Anker; Vanhoutteghem, Lies

Publication date:
2017

Document Version
Også kaldet Forlagets PDF

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):

Morelli, M., Nielsen, A., & Vanhoutteghem, L. (2017). *Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner: Litteraturstudier, målinger og beregninger*. (1 udg.) SBI Forlag. SBI Forskning Nr. 2017:20

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



DANISH BUILDING RESEARCH INSTITUTE
AALBORG UNIVERSITY COPENHAGEN

FUGTPROBLEMER I HØJISOLEREDE KONSTRUKTIONER

LITTERATURSTUDIER, MÅLINGER OG BEREGNINGER

SBI 2017:20



Fugtproblemer i højsolerede konstruktioner

Litteraturstudier, målinger og beregninger

Martin Morelli
Anker Nielsen
Lies Vanhoutteghem

Titel	Fugtproblemer i højisolerede konstruktioner
Undertitel	Litteraturstudier, målinger og beregninger
Serietitel	SBi 2017:20
Udgave	1. udgave
Udgivelsesår	2017
Forfattere	Martin Morelli, Anker Nielsen & Lies Vanhoutteghem
Redaktion	Dea Lindegaard
Sprog	Dansk
Sidetæl	93 sider
Litteraturhenvi- sninger	Side 63
Emneord	Fugt, fundament, isolering, klimaskærm, konstruktioner, kældere, tag, vægge
ISBN	978-87-563-1869-3
Tegninger	Lars Schjøtt Sørensen
Fotos	Anker Nielsen & Lars Schjøtt Sørensen
Omslag	Martin Morelli
Udgiver	Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, A.C. Meyers Vænge 15, 2450 København SV E-post sbi@sbi.aau.dk www.sbi.dk

Der gøres opmærksom på, at denne publikation er omfattet af ophavsretsloven

Indhold

Indhold	3
Forord	4
1 Sammenfatning	5
2 Introduktion	6
2.1 Formål	8
2.2 Metode	8
3 Konklusion	10
4 Konstruktioner i højsolerede huse	12
4.1 Tagkonstruktioner	12
4.2 Ydervægge	14
4.3 Terrændæk	15
4.4 Krybekælder	16
4.5 Vinduer og døre	16
5 Erfaringer fra Danmark	17
5.1 Tidligere erfaringer ved ændringer i krav til varmeisolering	17
5.2 Andre danske undersøgelser	18
6 Erfaringer fra udlandet	19
6.1 Fugtforhold i norske højsolerede konstruktioner	19
6.2 Fugtforhold i svenske højsolerede konstruktioner	24
6.3 Opsamling på norske og svenske erfaringer	31
7 Beregninger af danske konstruktioner	33
7.1 Ydervægge	33
7.2 Tagkonstruktioner	41
8 Fugtmålinger	50
8.1 Højsoleret hus i lette konstruktioner	50
8.2 Pulttage med ventileret paralleltag	52
8.3 Ventileret tagrum	53
8.4 Krybekælder	55
9 Diskussion	58
9.1 Tage	58
9.2 Ydervægge	60
9.3 Krybekælder	61
9.4 Perspektivering	62
Referencer	63
Appendiks 1. Beregningsresultater	65
Appendiks 2. Målinger i ventileret tagrum	71
Appendiks 3. Målinger i nyt enfamiliehus	84
Appendiks 4. Målinger i ventileret krybekælder	90

Forord

Gennem de seneste år har der været stor fokus på at forbedre bygningers klimaskærm for at minimere energiforbruget. Forbedringerne har hovedsageligt været rettet mod øget isoleringstykkelse eller anvendelsen af nye produkter med lavere varmeledningsevne. At øge konstruktionernes isoleringsevne kan have en negativ påvirkning af deres robusthed, idet dele af konstruktionerne kan blive koldere og dermed udsættes for lokale temperatur- og fugtforhold, som fx fremmer vækst af skimmelsvamp, råd i træbaserede materialer eller frostskafer i murværk.

Denne rapport er udarbejdet i forbindelse med en myndighedsopgave rekvireret af Energistyrelsen og afsluttet for Trafik, Bygge- og Boligstyrelsen af Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) ved Aalborg Universitet. Opgaven har bestået i at undersøge, om de øgede isoleringstykkelse i forbindelse med stramninger af energikravene i bygningsreglementet vil give øget fugtproblemer i klimaskærmens konstruktioner.

Projektet blev startet i 2011, hvor Bygningsreglement 2010 var gældende, og to stramninger af energikravene frem mod 2020 var forventet. Ved projektets start var opfattelsen, at en højisoleret konstruktion svarede til bygningsdelens krav i det forventede Bygningsreglement 2015. Som projektet udvikledes sig, ændredes opfattelsen af en højisoleret konstruktion, således at isoleringstykkelse også var mere vidtgående end det, der kan forventes frem mod 2020.

Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet
Afdelingen for Byggeteknik og Proces
December 2017

Ruut Peuhkuri
Forskningschef

1 Sammenfatning

Med indførelsen af energirammer i Bygningsreglementet 2006 har der ca. hvert 5. år været stramninger i kravene til bygningers samlede energiforbrug og transmissionstab gennem klimaskærmen (eksklusiv vinduer og døre). Konsekvensen af de øgede krav til bygningers samlede energiforbrug og transmissionstab har været, at konstruktioner varmeisoleres mere. Det kan dog have en negativ effekt at isolere konstruktionerne bedre, da de bliver koldere, og dermed øges risikoen for fugtrelaterede skader.

Dette projekt har til formål at belyse, hvilke fugtforhold der kan forventes i fremtidens højisolerede klimaskærm med fokus på tage, ydervægge og krybekældre. Analyserne sker med henblik på at forebygge de fugtproblemer, der kan opstå, når klimaskærmen udsættes for mere ekstreme påvirkninger, som følge af reduceret varmestrøm gennem konstruktionerne. Højisolerede konstruktioner skal forstås som de isoleringstykkelser, der forventes brugt for at opfylde Bygningsreglement 2020 og frem over. Konklusionerne gælder for bygninger med normal fugtbelastning som boliger og kontorer.

På spørgsmålet om, hvorvidt øgede isoleringstykkelser vil udsætte klimaskærmens konstruktioner for en øget risiko for fugtrelaterede skader, fx skimmelsvamp og frostsprængninger, er svaret i korthed:

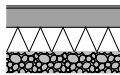

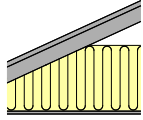
- En forøget isoleringstykkelse som eneste ændring i konstruktionen giver ikke umiddelbart anledning til et forhøjet fugtindhold i konstruktionerne.
- Faktorer som tæthed af vind- og dampspærre, høje fugtbelastninger i boliger og lækager til konstruktionen samt ventilering af konstruktionen har væsentlig betydning for fugtforholdene i konstruktionerne.
- Konstruktionerne kan sikres gennem korrekt dimensionering og udførelse, så ovennævnte negative faktorer ikke optræder.
- De større isoleringstykkelser medfører en langsommere udtørring af fugt, som er kommet ind i konstruktionerne. Det betyder, at det er vigtigt, at materialer og konstruktioner holdes tørre i byggefasen.
- Der bliver ikke mange flere timer med frostgrader og kritiske vandindhold i murværket ved at øge isoleringen fra nuværende tykkelser, så det vurderes, at frostsprængninger i murværk ikke bliver et større problem ved øgede isoleringstykkelser.

Ovenstående resultater er baseret på litteraturstudier af danske, svenske og norske undersøgelser af fugtforhold i højisolerede konstruktioner, simuleringer af typiske danske konstruktioner samt målinger i boliger.

2 Introduktion

Med indførelsen af energirammer i Bygningsreglementet 2006 har der ca. hvert 5. år været stramninger i kravene til bygningsers samlede energiforbrug og transmissionstab gennem klimaskærmen eksklusiv vinduer og døre. Konsekvensen af stramningerne til bygningernes samlede energiforbrug og transmissionstab har været, at konstruktioner varmeisoleres mere, se tabel 1. For en bolig vil det normalt betyde, at større isoleringstykkelser benyttes i taget, da dette i mange tilfælde kan gøres uden at ændre tagkonstruktionen, samt at løsningen ofte er billigere end at øge isoleringstykkelserne i vægge og gulve. Vælges der en større isoleringstykkelse i ydervægge, betyder det, at enten reduceres netto boligarealet, eller også øges ejendomsbeskatningen pga. et større bruttoareal ved samme nettoareal.

Tabel 1. Typisk opbyggede bygningsdele med angivelse af maksimal U-værdi med tilhørende tykkelser på varmeisolering. Desuden er der angivet vejledende isoleringstykkelser i de enkelte bygningsdele for at overholde energikravene for forskellige energiklasser. Det er et sæt sammenhængende og tilnærmede U-værdier og varmeisoleringstykkelser. Disse værdier kan ikke erstatte en energiberegning, men kan bruges til indledende skitsering og overslagsberegninger.

	Terrændæk/kældergulv	Ydervæg	Tag
Energi- Opbygning klasse			
	Flisebelægning 100 mm beton Varmeisolering 150 mm letklinker	110 mm skalmur Varmeisolering 100 mm porebeton	Tagsten Undertag Hulrum Varmeisolering Dampspærre Spredt forskalling 26 mm gips
U_{maks} (W/m ² K)	0,20	0,30	0,20
Minimum tykkelse på varmeisolering [mm]	50	150	200
2010 Tykkelse på varmeisolering (mm)	150	200	250
2015 Tykkelse på varmeisolering (mm)	250	200	350
2020 Tykkelse på varmeisolering (mm)	250	250	400

Note: Der er anvendt varmeisolering med en varmeledningsevne (λ -værdi) på 0,036 W/mK. Anvendes der varmeisolering med en anden varmeledningsevne skal tykkelsen ændres tilsvarende.

Når klimaskærmen opbygges med store isoleringstykkelser (herefter kaldt højisolerede), ændres betingelserne for udtørring af fugt sig sammenlignet med dårligt isolerede konstruktioner. Derfor kan de øgede isoleringstykkelser have negativ indflydelse på klimaskærmens og konstruktionernes holdbarhed. I dag benyttes SBI-anvisning 224, *Fugt i bygninger* (Brandt, 2013) som grundlag for vurdering af forskellige løsninger i forhold til fugtproblemer. For højisolerede konstruktioner mangler der erfaringer med og viden om konsekvensen af at de udvendige overflader bliver koldere og fugtigere pga.

reduceret varmegennemstrømning, og at de udvendige konstruktionsdele bliver udsat for et koldere mikroklima med risiko for øget relativ fugtighed.

Problemer med øget fugtindhold kombineret med lavere temperatur i de kolde dele af konstruktionen kan opstå i flere bygningsdele fx:

– *Tagkonstruktioner.*

a) Ventilerede tagrum

I ventilerede tagrum kan kritiske fugtforhold formentlig let optræde, når isoleringen på loftet øges. I dårligt isolerede loftkonstruktioner vil tagrummet være flere grader varmere end udeluften på grund af varmetabet fra underliggende rum. Ventilering med udeluft betyder, at den opvarmede udeluft optager den overskydende fugt fra underliggende rum. For højisolerede konstruktioner er opvarmningen af tagrummet yderst begrænset, og den overskydende fugt i tagrummet kan ikke optages og bortventileres som for dårligt isolerede konstruktioner. Samtidig kan udstråling til himmelrummet betyde, at tagets underside underafkøles så meget, at der nemt opstår kondens.

b) Paralleltage

I paralleltage vil fugten fra underliggende rum trænge op i tagkonstruktionen, hvis der er små utætheder i fx dampspærren. Denne konvektion kan øges ved undertryk på tage med lille hældning. I højisolerede konstruktioner vil der være risiko for, at der sker kondensdannelse i konstruktionen, da varmemstrømmen reduceres med isoleringstykkelsen.

– *Facader.*

a) Teglfacader

Den lavere temperatur af teglfacaderne kan have konsekvenser for stenenes mulighed for at tørre ud, da udtørring af fugt vil gå langsommere ved store isoleringstykkelser. Det kan føre til afskalning i forbindelse med frost og dermed nedbrydning af teglfacader.

b) Lette ydervægge

Ydervægge skal opbygges, så fugt, der eventuelt trænger ind i væggen i form af vanddamp, kan tørre ud, uden at der er risiko for opfugtning. I lette ydervægge skal der være dampspærre og denne skal udføres lufttæt for at hindre at fugtig rumluft strømmer ud i konstruktionen. For at sikre mod risikoen for fugtophobning og kondensdannelse skal vindspærre, pladelag etc. længere ud i væggen normalt være mindst 10 gange mere åbne for vanddampdiffusion end dampspærren. I højisolerede lette ydervægge kan den relative fugtighed i de yderste dele blive høj, og dermed øges risikoen for skimmelsvamp eller råd.

– *Krybekældre.*

Problematikken i ventilerede krybekældre svarer delvist til situationen i ventilerede tagkonstruktioner, hvor varmetabet er reduceret på grund af øgede isoleringstykkelser. Om sommeren vil overfladerne i krybekælderen være koldere end udeluftens temperatur, og derfor vil fugtproblemer være mere udpræget i denne periode. I SBI-anvisning 224, *Fugt i bygninger* (Brandt, 2013), frarådes det at udføre traditionelle krybekældre, hvor der er brugt organiske materialer i konstruktionerne. Byggerier af industrielt fremstillede, rumstore træbokselementer eller gulvelementer af træ monteres ofte på en krybekælderkonstruktion for hurtig montage. Disse krybekældre ligger ofte under terræn af hensyn til niveaufri adgang. Det bør derfor sikres, at vand kan ledes bort, fx hvis der trænger vand ind i krybekælderen ved skybrud (Møller et al., 2016).

2.1 Formål

Projektet har til formål at belyse hvilke fugtforhold, der kan forventes i fremtidens højisolerede klimaskærm med fokus på tage, ydervægge og krybekældre. Analyserne sker med henblik på at forebygge eventuelle fugtproblemer, der måtte opstå, forårsaget af reduceret varmestrøm gennem konstruktionerne.

Projektet inkluderer erfaringer fra andre lande, målinger i nyere højisolerede boliger samt simuleringer, der synliggør betydningen af øgede isoleringstykkelser. Dermed kan projektet bruges til at beskrive temperatur- og fugtforhold i udvalgte højisolerede konstruktioner. Disse oplysninger danner grundlag for en vurdering af, hvorledes fugtforhold i og holdbarhed (fx risiko for skimmelsvamp) af højisolerede konstruktionerne ændres i forhold til de i dag typisk anvendte konstruktioner.

2.2 Metode

Til analysen af fugtforhold i fremtidige højisolerede konstruktioner er blandt andet anvendt litteraturstudier af erfaringer og resultater fra danske og udlandske projekter, hvor varme- og fugtforhold i højisolerede konstruktioner er undersøgt. Litteraturstudiet er hovedsageligt baseret på studier fra Danmark, og Sverige og Norge, der har et klima der delvist ligner det danske klima.

Varme- og fugtsimuleringer blev anvendt til undersøgelse af isoleringstykkelsens betydning på konstruktionernes varme- og fugtforhold. Simuleringerne blev udført med WUFI (WUFI, 2009a) og BSim (Wittchen et al., 2008), idet begge simuleringsværktøjer kan regne på sammensatte konstruktioner med ikke stationære forhold. WUFI blev anvendt til beregning af varme- og fugtforhold i ydervægge samt tagkonstruktioner med flade eller paralleltag. BSim kan regne på hele bygninger, men for konstruktioner kun i en-dimension. BSim blev anvendt til at undersøge varme- og fugtforholdene i ventilerede tagrum, idet tagrummet kunne modelleres, og dermed blev der taget højde for både forholdene i boligen og udeklimaet.

Til at understøtte resultaterne fra litteraturstudierne og simuleringerne blev der udført målinger af varme- og fugtforhold i flere højisolerede bygningsdele. Målinger blev foretaget i en træskelet væg med pudset facade, et 20° ventileret paralleltag med tagpap, et ventileret tagrum, 3 identiske pulttage med ventileret paralleltag og en ventileret krybekælder.

Til bestemmelse af konstruktionernes varme- og fugtforhold samt inde- og udeklima blev der anvendt forskelligt måleudstyr.

- Indbyggede følere til registrering af temperatur og fugtindhold i form af fugtmålerondeller eller –dyvler.
Føleren består af et stykke krydsfiner eller træ forsynet med indborede elektroder. Modstanden mellem elektroderne afhænger af træets fugtindhold. Måling af modstanden sker med et ohmmeter, hvorefter fugtindholdet i føleren bestemmes ved hjælp af en kalibreringskurve. Samtidig registreres også temperaturforholdene.
- Dataloggere til opsamling af temperatur- og fugtmålinger.
Dataloggere er meget velegnede, hvor der er behov for at følge virkningen af fx årstidsvariationer eller brugeradfærd på fugtforhold. I dette projekt blev dataloggere brugt til at måle indeklima i boligen og klimaet i den ventileret krybekælder.

2.2.1 Vurdering af kritiske fugtforhold

Til vurdering af kritiske fugtforhold i konstruktioner ses der på risikoen for skimmelsvampevækst eller råd, hvor temperaturen er sammenholdt med enten træfugten eller den relative fugtighed. I SBI anvisning 224 (Brandt, 2013) angives det, at flere forhold skal være til stede samtidig for at skimmel eller råd kan opstå. For eksempel kræver skimmelvækst på træbaserede materialer en relativ fugtighed over 75-80 % (svarende til 15 vægt% træfugt), temperaturer på 0-50 °C, hvor vækstbetingelserne er bedst omkring 20-30 °C, og klinger af uden for dette interval, og under 10 °C er processen meget langsom. Derudover kræves tilstedeværelsen af næringsstoffer og den fornødne tid for at starte skimmelvækst. Det komplekse samspil mellem temperatur, fugtighed, og tid for vurderingen af skimmelvækst kan mere detaljeret analyseres ved brug af WUFI Bio.

I resultaterne benyttes en nedre temperaturgrænse på 10 °C og 75 % relativ fugtighed som kriterier for kritiske forhold i konstruktionerne i forhold til skimmelsvamp. Det kritiske fugtindhold for træ i forhold til nyangreb af råd i træ sættes normalt til 20 vægt%, hvilket svarer til 87 % relativ fugtighed.

Frostsprængninger i murværk er vurderet ud fra udviklingen i det maksimale vandindhold samt antal timer, hvor temperaturen er lavere end 0 °C, når konstruktioner med forskellig isoleringstykkelse sammenlignes.

3 Konklusion

Der er udført litteraturstudier af erfaringer fra Danmark, Sverige og Norge på højisolerede konstruktioner, hvor højisolerede konstruktioner dækker over konstruktioner som opfylder de forventede isoleringskrav i Bygningsreglement 2020 og endnu længere frem. Derudover er der udført simuleringer af typiske konstruktioner for tagkonstruktioner, ydervægge og krybekældre for at undersøge fugtforholdene ved disse øgede isoleringstykkelser. Simuleringerne og erfaringerne opsamlet fra andre lande blev kombineret med målinger i faktiske boliger. De overordnede konklusioner omhandler tage, ydervægge og krybekældre.

Generelt kan det konkluderes, at der ikke er tegn på signifikant forværrede fugtforhold i konstruktioner, når isoleringstykkelserne forøges yderligere fra den nuværende praksis. Det konkluderes desuden, at for flere af konstruktionerne er dimensioneringen og udførelsen yderst vigtige parametre, for at konstruktionerne fungerer efter hensigten. Er dimensioneringen eller udførelsen mangelfuld, vil det kunne få store konsekvenser for fugtforholdene i konstruktionerne. For eksempel er konstruktionernes lufttæthed af stor betydning for at minimere risikoen for skimmelvækst.

Det kan også konkluderes, at større isoleringstykkelser medfører en langsommere udtørring af fugt, som er kommet ind i konstruktionerne. Det betyder, at det er vigtigt, at materialer og konstruktioner holdes tørre i byggefasesen.

Den overordnede konklusion er derfor, at en øget isoleringstykkelse, som eneste ændring i konstruktionerne, ikke vil give anledning til at konstruktionerne udsættes for kritiske fugtniveauer.

- For tagkonstruktioner konkluderes det, at tagkonstruktionerne påvirkes mere af øgede isoleringstykkelser end krybekældre og ydervægge gør. Årsagen kan findes i, at tagkonstruktioner ofte isoleres mere end ydervægge og krybekældre, da det er et nemt sted at isolere. Ofte antages det, at et reduceret varmetab gennem taget medfører fugtproblemer i taget. Undersøgelserne peger mere på, at andre faktorer som tætheden af dampspærren og ventilering af tagkonstruktionen har større betydning for fugtforholdene end den øgede isoleringstykkelse.

For tagkonstruktioner er det især foråret og efteråret, som er kritiske perioder, hvor solen ikke varmer taget tilstrækkeligt op til at sænke fugtindholdet tilstrækkeligt for at undgå kritiske forhold. Om vinteren vil tagets temperatur være tilstrækkelig lav til at temperaturen ikke medfører skimmelvækst, mens sommeren vil tillade tagkonstruktionen at tørre ud ved solens opvarmning, og dermed sænke fugtindholdet under det kritiske fugtindhold.

Det konkluderes, at den øgede isolering ikke nødvendigvis i sig selv medfører et kritisk fugtniveau i konstruktionen, hvis den er dimensioneret og udført korrekt.

- For ydervægge er der ikke tegn på at den øgede isolering vil give nye udfordringer med fugtproblemer. Ydervæggene kan deles i tunge (typisk uorganiske) og lette (indeholdende organiske komponenter). I de lette ydervægge konkluderes det, at en forøgelse af isoleringstykkelsen i sig selv ikke er kritisk, så længe vind- og dampspærre sikrer tæthed mod indtrængende fugt, til de organiske materialer. For lette ydervægge er perioderne, hvor kritiske fugtforhold kan fremkomme typisk forår og efterår, hvor der sker ændringer i udeklimaet. Simuleringerne viste, at der er en minimal forlængelse af perioderne, hvor der er kritiske forhold for skimmelvækst ved større isoleringstykkelse. I de tunge ydervægge med teglfacader, er frostsprængning et muligt problem, som kunne opstå ved de øgede isoleringstykkelser. På baggrund af simuleringer af fugtindhold og antal timer under 0 °C, er der ikke nogle tegn på en forværring af risiko for frostsprængning forårsaget af øgede isoleringstykkelser.
- For krybekældre optræder de kritiske forhold om sommeren og i efteråret, når den varme fugtige udeluft køles af i krybekælderen. I rapporten er der vist flere løsninger med gennemtænkte udformninger af krybekældre, som har vist sig at fungere. Det er blandt andet vigtigt at anvende komponenter som ikke er fugtfølsomme, eller at komponenterne beskyttes mod fugt. Målinger fra to forskellige konstruktionsopbygninger viste, at 50 mm isolering på undersiden af krybekælderdekke kan sikre, at konstruktionen ikke udsættes for kritiske fugtforhold, der kan give vækst af skimmelsvampe og rådangreb.

4 Konstruktioner i højisolerede huse

Konstruktionerne er beskrevet ud fra, at de skal kunne overholde de ønskede krav til bygninger opført efter Bygningsreglement 2015. Da det er energirammen og transmissionstabt gennem klimaskærmen eksklusiv vinduer og døre, der er med til at definere kravene til isoleringstykkelser, kan disse afvige fra de tykkelser der er angivet for konstruktioner i andre af rapportens afsnit. Isoleringstykkelserne er generiske størrelser, som ikke favoriserer en producent frem for en anden.

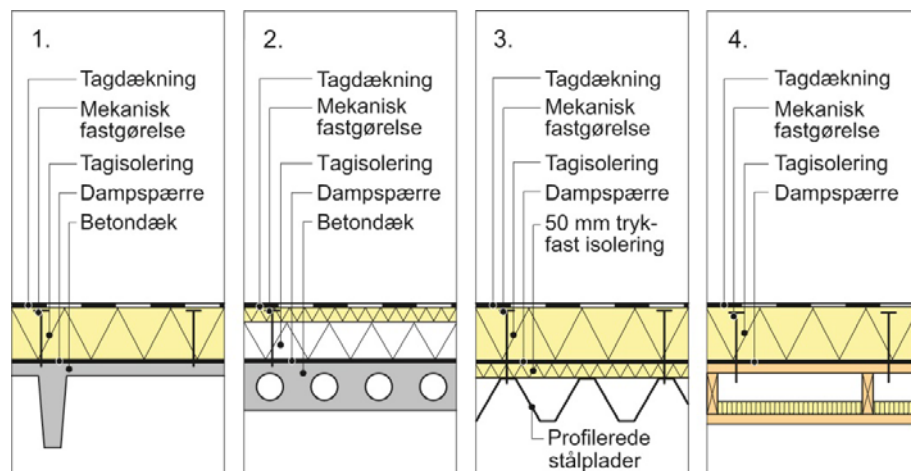
For at opfylde energirammen kan tykkelsen af isoleringen øges i både tag, væg og gulv. I praksis holdes vægisoleringen på 200-300 mm og til gengæld øges tykkelsen i tag og gulv. Dette skyldes, at en større isoleringstykkel i væggen vil reducere boligens nettoareal ved fastholdelse af bruttoarealet. Husets størrelse defineres i bygningsreglementet efter det udvendige areal, mens brugeren er interesseret i det indvendige areal.

4.1 Tagkonstruktioner

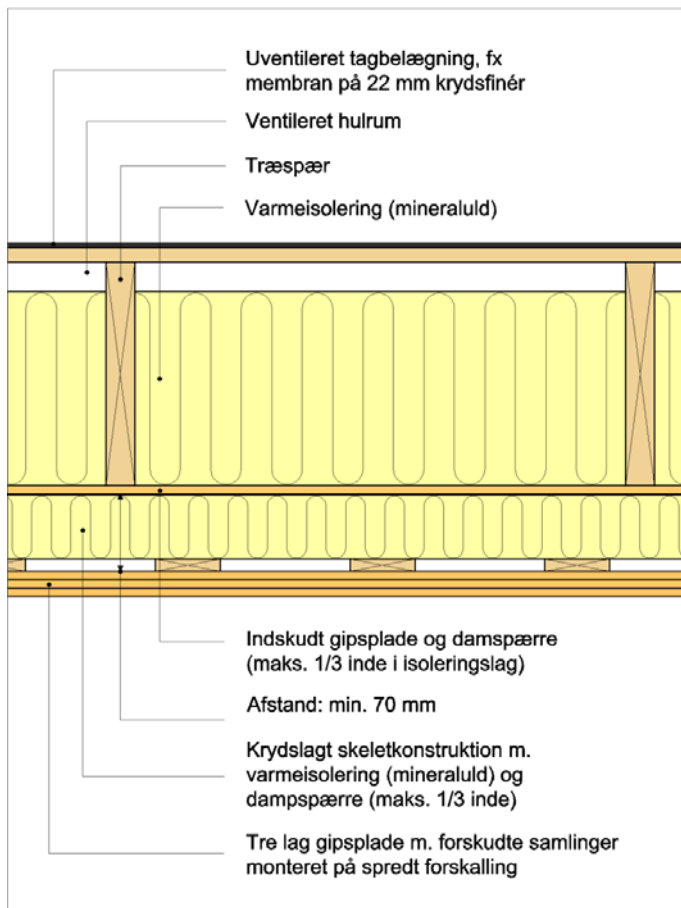
Tagkonstruktioner kan opbygges på mange måder, men generelt kan tage deles op i flade tage og tage med hældning. Tage med hældning kan enten være udført som paralleltag eller med ventileret tagrum, hvor isoleringen udlægges på loftet. Flade tage kan være et koldt tag, som typiske er en ventileret konstruktion, hvor isolering er placeret i den bærende konstruktion eller som et uventileret varmt tag, hvor isolering er placeret ovenpå den bærende konstruktion.

4.1.1 Flade tage

Figur 1 viser fire eksempler på opbygningen af varme tage udført enten som lette eller tunge konstruktioner. Figur 2 viser et eksempel på opbygningen af et ventileret koldt tag. Isoleringstykkelsen i kolde og varme flade tage vil ofte være omkring 300-500 mm.



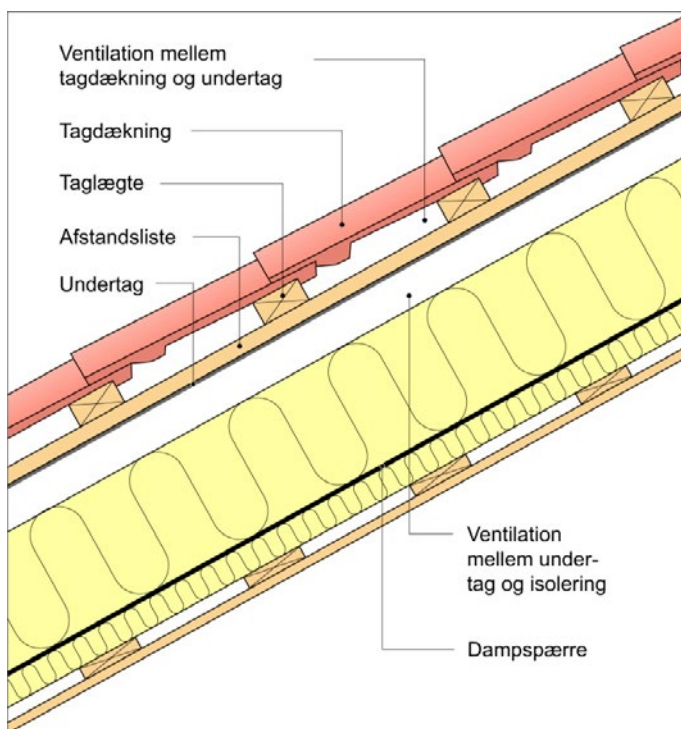
Figur 1. Opbygning af varmt tag. 1) og 2) principopbygning af varmt tag på betonelementer. Ved fugtig beton, fx nystøbt, anbringes en dampspærre over betonen. 3) Principopbygning af varmt tag på stålplader. Der skal bruges en effektiv dampspærre, som bedst placeres mellem de to isoleringslag. 4) Varmt tag opbygget på trædæk. Dampspærren skal være effektiv, dvs. både lufttæt og med høj diffusionsmodstand (høj Z-værdi), fx en eksisterende tagpap (Brandt, 2013).



Figur 2. Principopbygning af et ventileret koldt tag.

4.1.2 Paralleltage

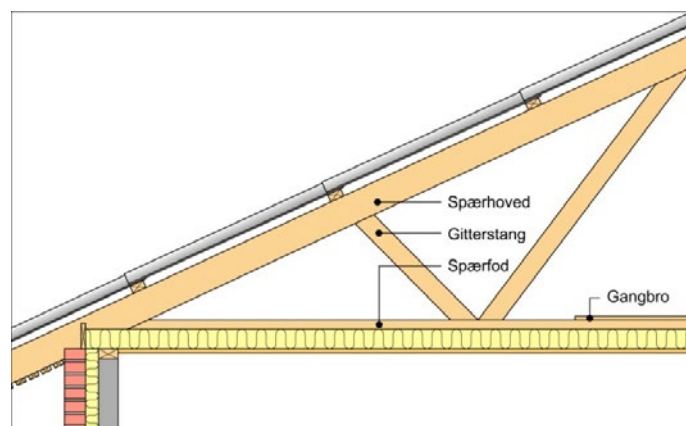
Figur 3 viser princippet på et ventileret paralleltag med 300-500 mm isolering. På den indvendige side af dampspærren er der ca. 50 mm isolering og loftbeklædning.



Figur 3. Princip for opbygning af ventileret paralleltag med ventileret belægning med 300-500 mm isolering (Møller, 2012). I et uventileret paralleltag er der ingen ventilationsspalte mellem undertag og isolering, hvorved der kan spares på konstruktionshøjde, eller ventilationsspalten kan fyldes op med mere isolering.

4.1.3 Tage med ventilerede tagrum

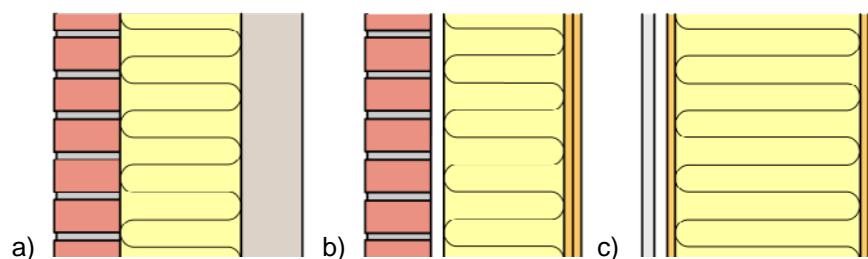
Figur 4 viser et ventileret tagrum, hvor isoleringen er udlagt på loftet i 300-500 mm tykkelse. Dampspærren er placeret på den varme side 50 mm inde i isoleringen.



Figur 4. Principudsnit i gitterspærtag med ventileret, uudnyttet tagrum, hvor loftisoleringen er 300-500 mm (Møller, 2012).

4.2 Ydervægge

Traditionelt skelnes der mellem tunge og lette ydervægge. I praksis betyder det, at der skelnes mellem vægge, der er opbygget af tegl eller beton, og vægge opbygget med skeletkonstruktion i træ eller stål. Dertil forekommer der kombinationstyper, fx tung formur og bagvæg udført som skeletvæg, og i mindre grad opføres ydervægge som blokke. Figur 5 viser de oftest anvendte løsninger for ydervægge.



Figur 5. Principopbygninger af ydervægskonstruktioner. a) Tung ydervæg af murværk, 200-400 mm isolering, bagmur. b) Kombinations ydervæg af udvendig murværk, 20 mm hulrum, vindspærre, 200-400 mm isolering og træ inklusiv dampspærre, beklædning som fx krydsfiner og gips. c) Let ydervæg af udvendig ventileret facadebeklædning, vindspærre, isolering og træ med dampspærre og indvendig beklædning.

4.2.1 Tunge vægge

Tunge ydervægge er karakteriserede ved at både formur og bagvæg er opbygget af tungt materiale. Ofte består formuren af en teglstensvæg eller porebeton, hvor overfladen kan være blank, pudset, filtset, sække- eller vandskuret. Bagvæggen er typisk af teglsten eller opbygget af porebeton, letklinkerbeton eller lignende. Konstruktionen er isoleret med 200-400 mm isolering, og der anvendes ikke dampspærre. Med de strammede isoleringskrav er nyere opbygninger af tunge ydervægge lanceret på markedet. En løsning er med 80 mm tegl, 200-400 mm isolering med lav varmelednings-eve og traditionel bagmur.

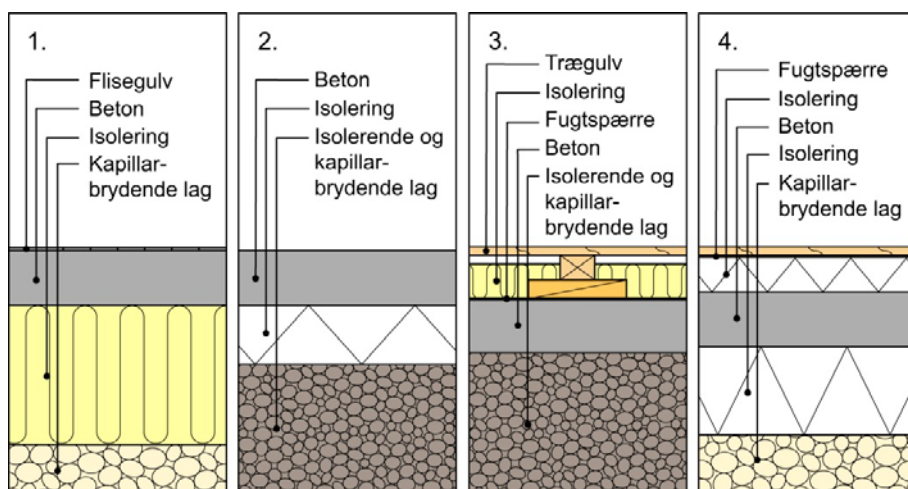
4.2.2 Lette vægge med træskelet

Lette ydervægge består typisk af et skelet af træ eller stål. Som regnskærm anvendes forskellige former for let beklædning, fx træbeklædning, eller plader af metal eller fibercement. Normalt opbygges lette vægge, så der er et hulrum mellem beklædning og vindspærre. Nødvendigheden af at ventilere hulrummet, afhænger af beklædningen og fugtbelastningen. Især træbeklædninger er følsomme overfor fugt, da de er opbygget af organisk materiale, som nedbrydes ved for store fugtpåvirkning.

4.3 Terrændæk

Normalt udføres terrændæk som en tung konstruktion med et betondæk (Figur 6), men i småhuse, hvor belastningen på gulvet ikke er stor kan terrændækket også udføres som en let konstruktion. Et terrændæk uden betondæk vil bestå af trykfaste/hårde isoleringsmaterialer, der bruges direkte som underlag for gulvet. Denne konstruktion behandles ikke yderligere her, da løsninger med betondæk er oftere forekommende.

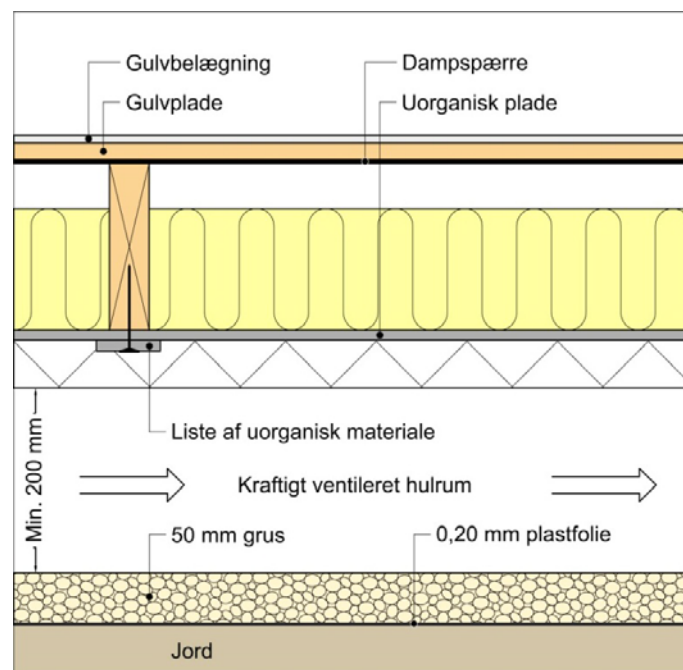
Terrændæk er typisk indvendigt udført med trægulv eller klinker, fugt-/radonspærre, 100 mm armeret beton, 300-400 mm isolering evt. som kapillarbrydende lag, eller et separat kapillarbrydende lag af letklinker eller singles.



Figur 6. Forskellige opbygninger af moderne terrændæk. Fælles for opbygningen er, at de indeholder et betonlag (Brandt, 2013).

4.4 Krybekælder

Figur 7 viser en principopbygning af en ventileret krybekælder. Gulvpladen kan være erstattet af et betondæk, hvor der ønskes større sikkerhed som ved vådrum og køkkener. Isoleringstykkelsen vil være omkring 300 mm.



Figur 7. Eksempel på kraftigt ventileret krybekælder udført som pavillonbyggeri af præfabricerede elementer. Samlinger skal kunne udføres oppefra. Opstigning af grundfugt forhindres af en plastfolie holdt på plads af et lag grus (Brandt, 2013).

4.5 Vinduer og døre

Højsolerede vinduer er typisk med 3 lags ruder med lavemissionsbelægninger og gasfyldning. I mange tilfælde anvendes samme rudetyper for vinduer og døre. Der vil normalt ikke opstå fugtproblemer ved at anvende bedre varmeisolerede vinduer og døre. Det vil tværtimod være en fordel for indeklimaet, da overfladetemperaturen bliver højere.

Der kan forekomme kondens udvendigt på glasset om morgenen efter kolde klare nætter, da det udvendige glas kan blive koldere end udeluften. Dette kan være generende for udsyn, men er et tegn på at vinduet er godt varmeisoleret. Kondensen udvendigt vil typisk forsvinde, når udeluften bliver varmere, eller der kommer sol.

5 Erfaringer fra Danmark

5.1 Tidligere erfaringer ved ændringer i krav til varmeisolering

Ved tidligere ændringer i krav til varmeisolering har Statens Byggeforskningsinstitut (SBI) undersøgt, hvilke løsninger der kan bruges, og hvordan de vil fungere under de nye betingelser (Nielsen & Andersen, 1982; Andersen, 2000; Andersen et al., 2002). I den forbindelse blev der i 1976 opført et fugtforsøgshus på SBI i Hørsholm.

5.1.1 Ydervægge

I det oprindelige forsøg blev betydningen af lufttæthed, diffusionstæthed af forskellige beklædninger og orientering undersøgt i træskeletkonstruktioner med 200 mm isolering. Resultaterne blev samtidig sammenlignet med resultaterne fra hulmurskonstruktioner med forskellige isoleringsmaterialer.

Skeletkonstruktionerne i det oprindelige forsøg var opbygget som følgende udefra:

- Regnskærm af malet træfiberplade
- 50 mm ventileret hulrum
- 12 mm krydsfiner
- 200 mm mineraluld
- 12 mm krydsfiner

De forskellige grader af lufttæthed var opnået på følgende måde:

- Ingen spalter i den udvendige eller indvendige krydsfiner
- 2 stk. 1 mm vandrette spalter i både den udvendige og indvendige krydsfiner
- 4 stk. 1 mm vandrette spalter i både den udvendige og indvendige krydsfiner.

Resultaterne af målinger af fugtindhold i den yderste krydsfiner viste, at jo større utætheder i væggen, jo mere opfugtning og højere fugtindhold er der i konstruktionen om vinteren, og især i nordvendte konstruktioner. Samtidig var isoleringsevne i de utætte konstruktioner nedsat ganske betydeligt. Det skal bemærkes, at selv i en lufttæt væg med krydsfinerbeklædning på begge sider, vil der blive lidt for højt fugtindhold i vinterperioden.

I forbindelse med start af nye forsøg i 1997, blev de oprindelige nordvendte konstruktioner undersøgt. Resultaterne viste en misfarvning af isoleringen og skimmelvækst for de træskeletkonstruktioner med luftspalter, hvorimod isolering i den tætte konstruktion uden luftspalter så ud som ny, og der blev ikke konstateret skimmelvækst indefra.

De nye forsøg i 1997 havde fokus på at afklare indflydelse af øget isoleringstykkel på fugtindhold i træskeletkonstruktioner. Undersøgelse af isoleringstykkelse på 190, 285 og 485 mm viste, at isoleringstykkelsen kun havde en begrænset indflydelse på fugtindholdet i konstruktionerne. Samtidig viste test med forskellige typer af isoleringsmaterialer (mineraluld og celluloseuld) inde i konstruktionerne at valget af isoleringsmateriale ikke havde betydning for det målte fugtindhold i konstruktionerne, under forudsætning af at der var anvendt en dampspærre.

5.2 Andre danske undersøgelser

Knudsen og Kragh (2014) opsamlede erfaringer fra 370 boliger opført efter energirammerne 2015 og 2020. Undersøgelsen gik primært på energiforbrug og indeklima, hvor der generelt var stor tilfredshed med indeklimaet (90 %) og varmekonsumet (59 %). I undersøgelsen indgik ikke om der havde været fugtproblemer i forbindelse med konstruktionerne. Flere oplevede, at den relative fugtighed var nede på ca. 25 % om vinteren i boligen på grund af mekanisk ventilation. Ved denne lave relative fugtighed vil det ikke være kritisk, hvis der er utætheder i dampspærren. Derimod vil der kunne opstå skimmel i konstruktionen, hvor den relative fugtighed mindst er 75 % og temperaturen over 10 °C tilstrækkeligt længe. Sådanne forhold kan optræde, når indeklimaet er omkring 40 % relativ fugtighed og 22 °C, da relativ fugtighed stiger i takt med luften afkøles ud gennem konstruktionen.

6 Erfaringer fra udlandet

Der findes en række undersøgelser dels beregninger og dels målinger på højisolerede konstruktioner i Norge og Sverige. I det følgende gennemgås nogle af disse.

6.1 Fugtforhold i norske højisolerede konstruktioner

Det norske byggeforskningsinstitut (SINTEF Byggforsk) har gennem de seneste år foretaget en kortlægning af, om der er øget risiko for fugtskader og skimmelsvamp i konstruktioner, når isoleringstykkelsen øges (Geving & Holme, 2010; Gullbrekken et al., 2015). Kortlægningen omfatter både beregninger af fugtforholdene i konstruktionerne ved brug af simuleringværktøjerne WUFI og Tagfugt, målinger og laboratorieforsøg. Kortlægningen bygger på norske konstruktioner, som ikke anvendes så ofte i Danmark. I de følgende afsnit bliver resultaterne for relevante konstruktioner i Danmark præsenteret. Beregningerne er foretaget med klimadata fra Norge, hvor det typisk er koldere om vinteren end i Danmark.

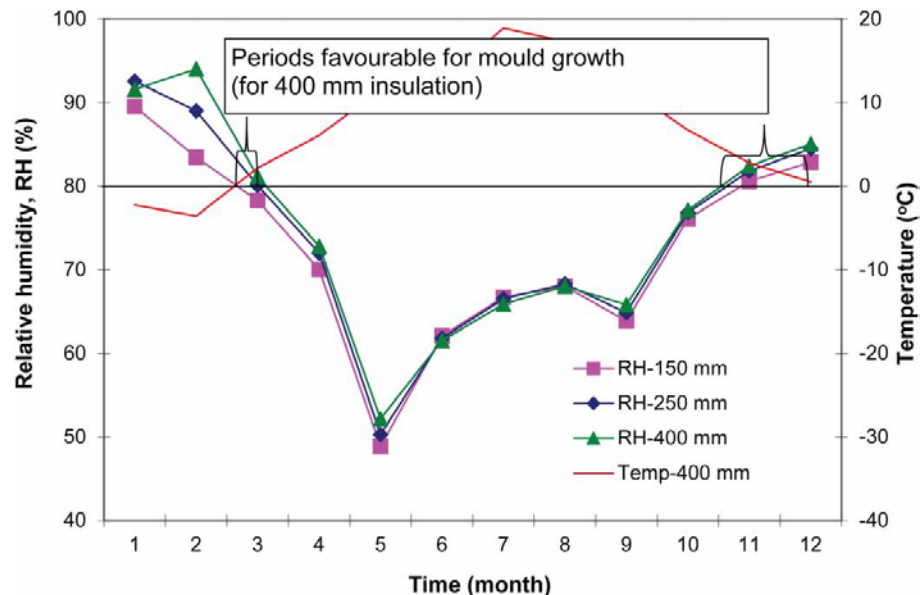
6.1.1 Lette ydervægge med træskelet

I Norge er det almindeligt at bygge huse i træ og derfor anvendes lette trækonstruktioner meget. Simuleringer af fugtforhold blev foretaget i WUFI for en nordvendt ydervægskonstruktion som illustreret i figur 8. Simuleringer blev foretaget for 3 forskellige geografiske placeringer hhv. Oslo, Bergen og Karasjok, og med et fugttilskud i indeklimaet på 4 g/m³ om vinteren og 1,5 g/m³ om sommeren.



Figur 8. Konstruktionsopbygning på en let ydervæg med træskelet.

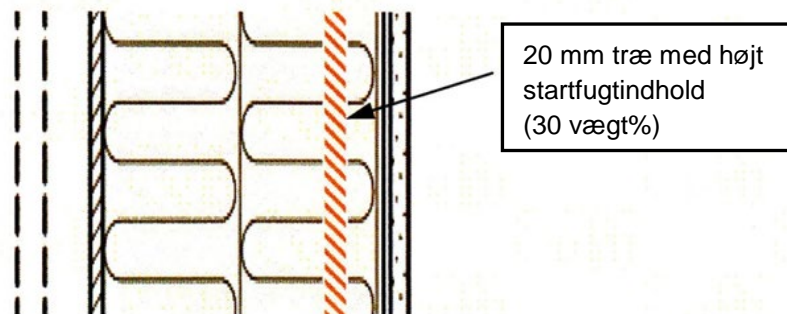
Resultaterne i figur 9 viser, at den relative fugtighed ved forskellige isoleringstykkelser er næsten ens det meste af året. I vinterperioden stiger den relative fugtighed i takt med isoleringstykkelsen. En kritisk relativ fugtighed forekommer i vinterperioden, men samtidig er temperaturen så lav, at der ikke sker skimmelvækst. En øget isoleringstykkelse resulterer i en marginal højere risiko for skimmelvækst i nogle korte perioder af året. Supplerende undersøgelser i rapporten viste, at andre faktorer såsom fugttilskud i indeklima, og diffusionsmodstand af vind- og dampspærre har større indflydelse på om forholdene for skimmelsvampe vækst er til stede i konstruktionen end den øgede isoleringstykkelse.



Figur 9. Effekt af øget isoleringstykkelse på temperatur og relativ fugtighed på indersiden af vindspærren (asfalt imprægneret træfiberplade) i Oslo.

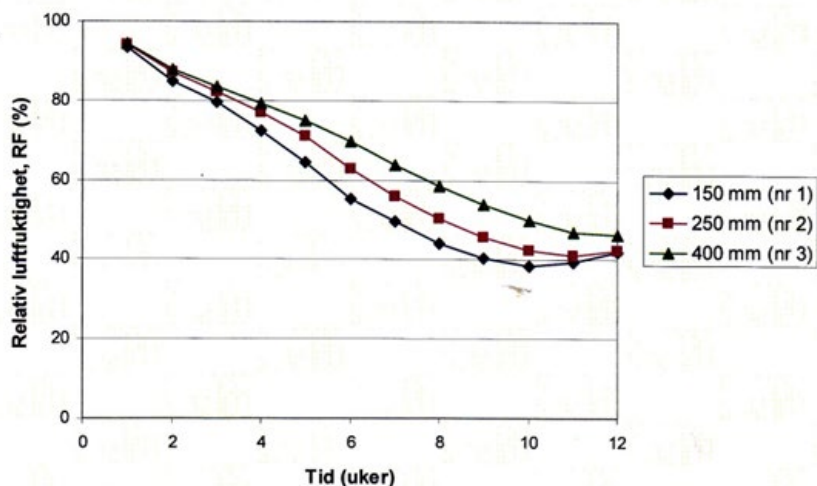
Udtørring af lette ydervægge med træskelet

Udover fugtforhold og risiko for skimmelsvampevækst blev der også lavet simuleringer og målinger i laboratorie for at estimere udtørringstid, i tilfælde af at fugtige eller våde lægter bygges ind i en højisoleret konstruktion. Simuleringerne er foretaget for en let træydervægskonstruktion som tidligere beskrevet i figur 8, men nu med 20 mm træ med en startfugt på 30 vægt% placeret 20 mm inde i isoleringen, se figur 10. Beregningerne af udtørringen blev foretaget over en periode af 12 uger, fra den 1. april – 30. juni.



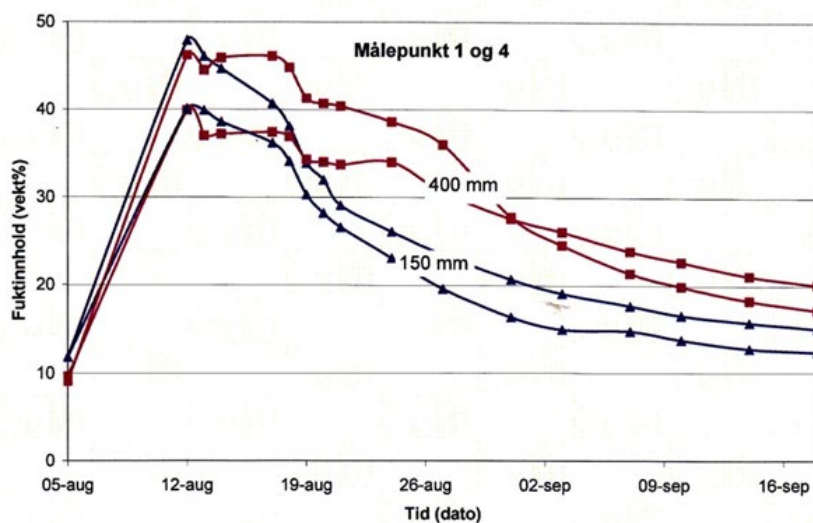
Figur 10. Let ydervæg med træskelet, hvor der er indbygget 20 mm træ med et fugtindhold på 30 vægt% til undersøgelse af udtørringstid. Opbygget som beskrevet i figur 8.

Resultaterne for den opnåede relative fugtighed i det indbyggede træ (30 mm fra dampspærren) for forskellige isoleringstykkelse fremgår af figur 11.



Figur 11. Simuleringsresultater for relativ fugtighed i det indbyggede træ, 30 mm fra dampspærren for forskellige isoleringstykkelser.

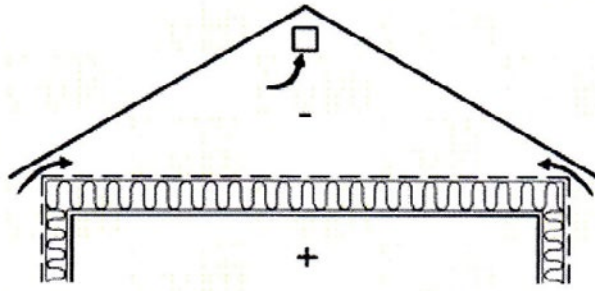
Simuleringsresultaterne i figur 11 viser, at udtørring går langsommere ved større isoleringstykkelser, fx tager det 2 uger mere at opnå 60 % relativ fugtighed for 400 mm isolering i stedet for 150 mm. Til sammenligning med simuleringer, blev der udført udtørningsforsøg i laboratoriet, se figur 12, der stemmer godt overens med resultaterne fra simuleringerne.



Figur 12. Udviklingen af fugtindholdet i træ placeret 30 mm inde i konstruktionen (fra den varme side) for isoleringstykkelser 150 mm og 400 mm og to målepunkter.

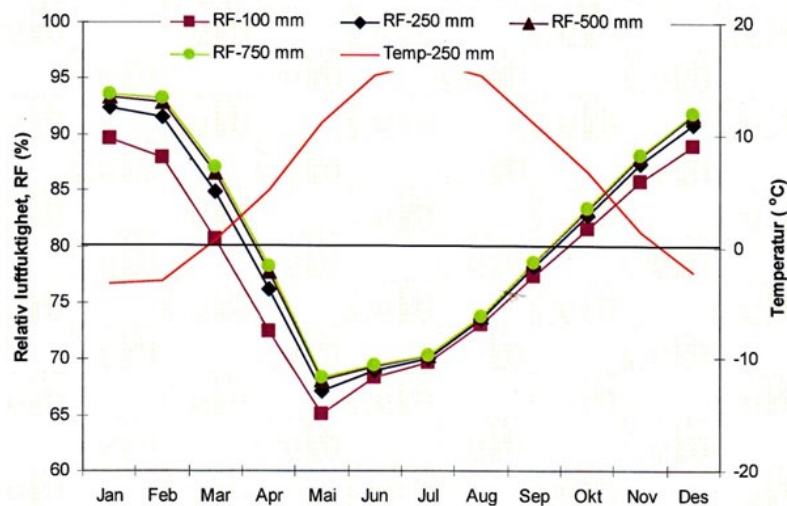
6.1.2 Ventileret tagrum

Fugtforhold i højisolerede ventilerede tagrum blev undersøgt ved brug af SINTEF Byggforsk simuleringsværktøj Tagfugt. En principskitse af det ventilerede tagrum er illustreret i figur 13. Indflydelse af isoleringstykkelser på 100, 250, 500 og 700 mm på gulvet i tagrummet blev undersøgt med udeklimadata for Oslo. I indeklimaet blev der regnet med en fugtbelastning af 10 kg/dag. Samtidig regnes der med nogle utætheder i dampspærren, ved at sætte husets lufttæthed til 4,0 m³/m³h ved 50 Pa. En beregning af ventilationsmængden i det ventilerede tagrum er indregnet i programmet baseret på størrelsen af ventilationsåbningerne i tagrummet.



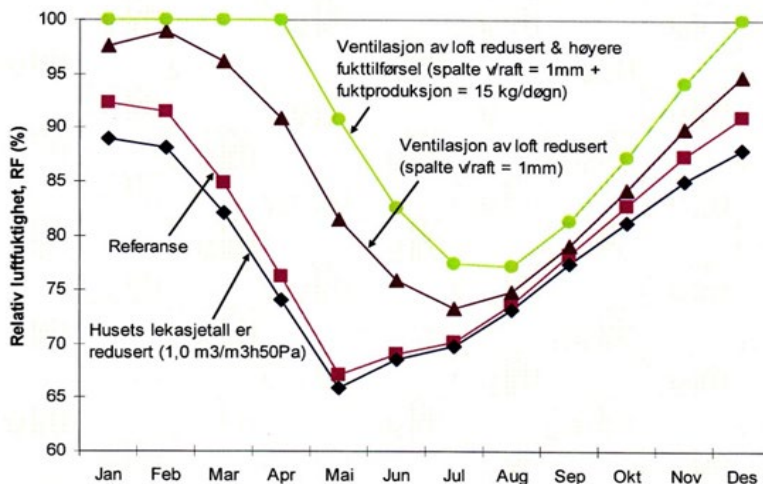
Figur 13. Principskitse af simuleringsmodel for tagrum, hvor isoleringstykkelsen på loftet blev varieret.

Temperaturen og den relative fugtighed på indersiden af undertaget for de forskellige isoleringstykkelser, er vist i figur 14. Beregningerne viser, at den relative fugtighed i alle tilfælde er størst om vinteren og lavest om sommeren. Om vinteren stiger den relative fugtighed op til 95 % i januar, men til gengæld er temperaturen lav og ugunstig for skimmelvækst. Om sommeren er den relative fugtighed lav men temperaturen er høj. De kritiske perioder for den ventilerede tagkonstruktion er i overgangsmånederne marts til april og september til november. Den største ændring i relativ fugtighed i overgangsmåneder sker ved at gå fra 100 til 250 mm isolering, mens der for tykkelser på 500-750 mm kun resulterer i små ændringer i relativ fugtighed.



Figur 14. Effekt af øget isoleringstykkelser på temperatur og relativ fugtighed på indersiden af undertag i et ventileret tagrum med udeklimadata for Oslo.

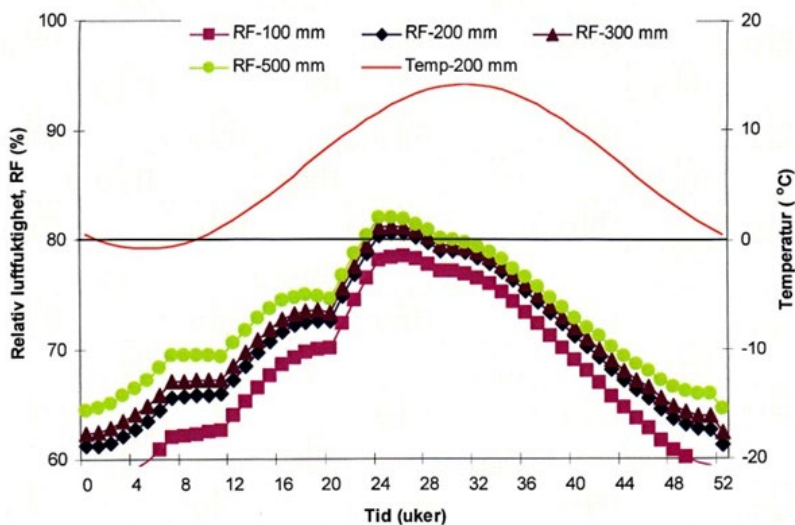
I modsætning til de små ændringer i den relative fugtighed ved ændring af isoleringstykkelsen, viser figur 15, en væsentlig større påvirkning fra fx ventilationsmængden i tagrummet, fugtbelastningen i indeklimaet og lækager i dampspærren. Jo større luftskifte, og jo mere tæt dampspærren er udført, samt mindre fugtbelastning i indeklimaet, jo lavere risiko på skimmelvækst. Kritisk vil det være, hvis ventilationsmængden sænkes og fugttilskuddet fra indeklimaet øges.



Figur 15. Indflydelse af ventilationsmængde i det ventilerede tagrum, fugtbelastningen i indeklima og lækager i dampspærren. Den relative fugtighed er målt på indersiden af undertaget for klimadata for Oslo og 250 mm loftisolering.

6.1.3 Krybekælder

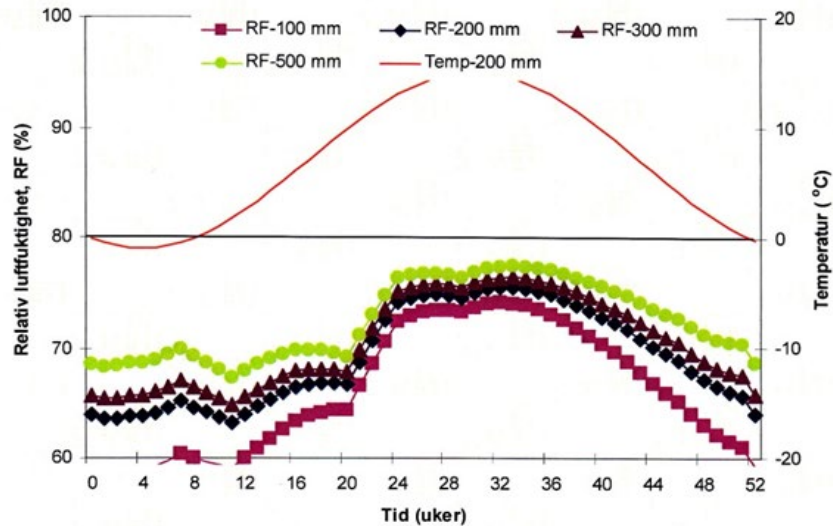
Fugtforhold i krybekælder blev evalueret baseret på simulering af en krybekælder i simuleringværktøjerne CRAWL og CRAWLL. Den simulerede krybekælder er en krybekælder ventileret med udeluft (2 h^{-1}), og med plastfolie lagt ud på jorden i krybekælderen, så fordampningen reduceres. Indflydelse af isoleringstykkelser på 100, 200, 300, 500 mm er undersøgt for krybekælderen ved brug af udeklimadata for Oslo.



Figur 16. Effekt af øget isoleringstykkelser på relativ fugtighed i midten af krybekælderen i Oslo.

Som det fremgår af figur 16, varierer temperaturen i krybekælderen over året og er højest om sommeren. Temperaturvariationen har vist sig at være størst ved anvendelse af 200 mm isolering, og det er derfor kun denne temperaturvariation der er vist i figur 16. Den beregnede relative fugtighed for forskellige isoleringstykkelser følger temperaturprofilen, dvs. den er også højest om sommeren, hvilket kan medføre en klar risiko for skimmelvækst. Når isoleringstykkelsen øges, vil perioden forlænges, hvor den relative fugtighed overstiger 80 %, og det øger risikoen for skimmelvækst.

En alternativ løsning til at forbedre forholdene i krybekælderen blev derfor at udlægge 50 mm isolering på jorden. Resultaterne i figur 17 viser, at den relative fugtighed i krybekælderen derved reduceres til under 80 % om sommeren. Men de er stadig sådan at en stor isoleringstykkelse giver en større relativ fugtighed i krybekælderen.



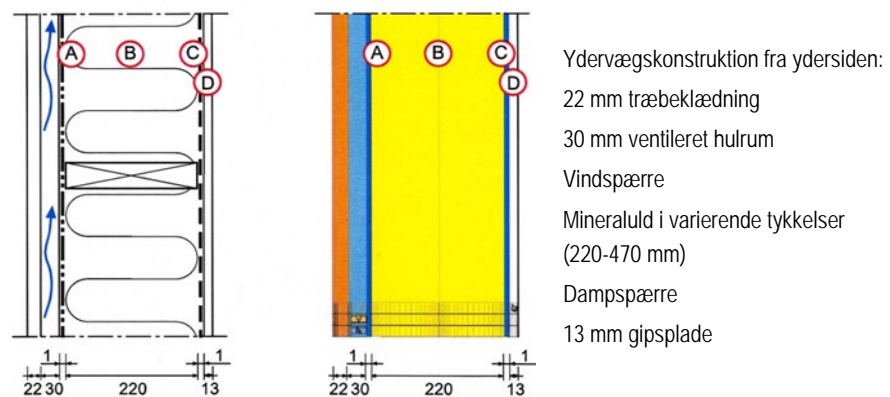
Figur 17. Effekt af øget isoleringstykkelse på temperatur og relativ fugtighed i midten af krybekælderen med 50 mm isolering på jorden med udeklimadata for Oslo.

6.2 Fugtforhold i svenske højisolerede konstruktioner

I Sverige findes der en del erfaringer og undersøgelser af fugtforhold i højisolerede konstruktioner fra Sveriges Tekniske Forskningsinstitut (SP), Chalmers Tekniske Højskole (Chalmers) og Lunds Tekniske Højskole (LTH). Undersøgelser fra LTH inkluderer målinger og simuleringer i WUFI af fugtforhold i lette ydervægskonstruktioner, ventilerede tagrum og paralleltag (Hägerstedt, 2012; Mundt-Petersen, 2013; Mundt-Petersen & Harderup, 2015). Derimod lægger undersøgelser fra SP og Chalmers vægt på fugtforhold i ventilerede tagrum (Samuelson, 1995; Kalagasidis, 2004).

6.2.1 Lette ydervægge med træskelet

Ved simuleringer i WUFI blev der undersøgt hvor stor risikoen er for skimmelsvamp forskellige steder i en let ydervæg med træskelet og varierende isoleringstykkelse på 220, 270, 370 og 470 mm mineraluld, se figur 18. Som udeklima anvendtes klimadata for Lund, og der undersøgtes i nogle tilfælde slagregns betydning. Derudover blev forskellige orienteringer af ydervæggen undersøgt, samt ventilationsmængden i det ventilerede hulrum.



Figur 18. Vægopbygning og angivelse af undersøgte steder (A-D) i en let ydervæg med træskelet.

Generelt viser resultaterne, at den kritiske periode for skimmelvækst er lidt større ved større isoleringstykkelse. I det følgende bliver simuleringresultaterne derfor kun vist for ydervæggen med den største isoleringstykkelse, dvs. 470 mm isolering.

Indflydelse af orientering og slagregn

Figur 19 viser den relative fugtighed og temperatur bagved vindspærren for ydervæggen orienteret mod nord og syd, og med eller uden slagregn. Det fremgår at slagregn som ventet giver en forøget risiko på skimmelvækst, men ændringen er tydeligst for syd facaden. Det ses desuden, at nordfacaden har større risiko for skimmelvækst end syd facaden på grund af lavere temperaturer pga. manglende solstråling.

Nordfasader

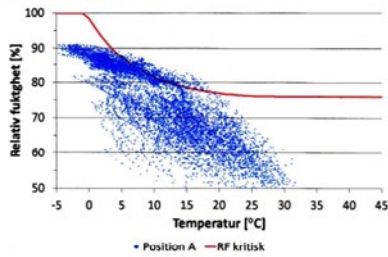


Diagram 5. RF jämfört med RF_{krit} för nordfasad i position A i Lund (turkos) med inverkan av slagregn. RF_{krit} (röd). Utgångsfallet.

Sydfasader

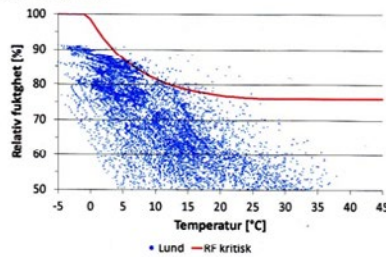


Diagram 6. RF jämfört med RF_{krit} för sydfasad i position A i Lund (turkos) med inverkan av slagregn. RF_{krit} (röd).

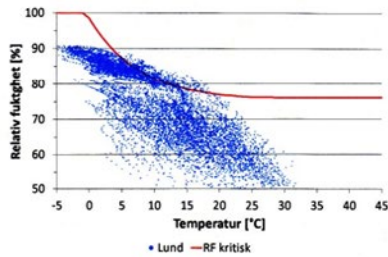


Diagram 7. RF jämfört med RF_{krit} för nordfasad i position A i Lund (turkos) utan inverkan av slagregn. RF_{krit} (röd).

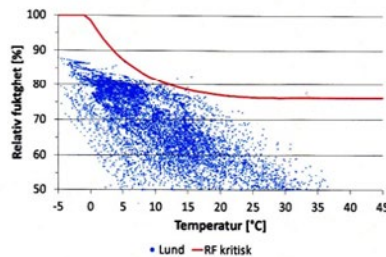
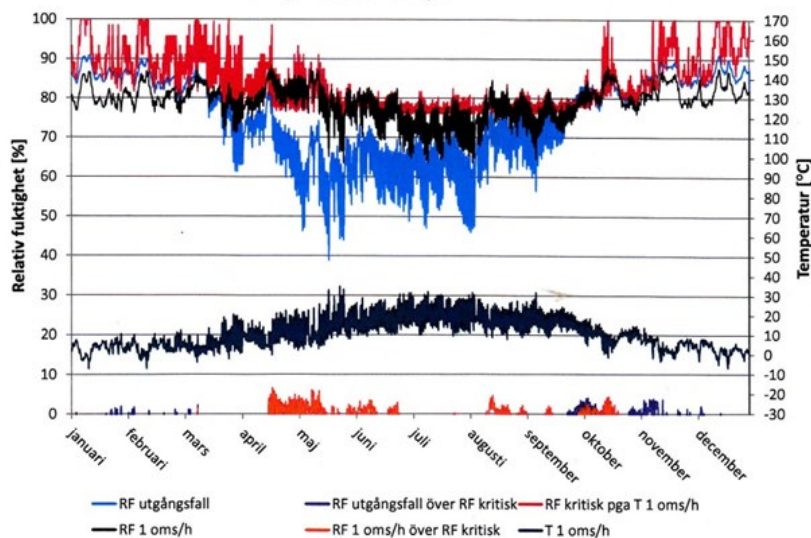


Diagram 8. RF jämfört med RF_{krit} för sydfasad i position A i Lund (turkos) utan inverkan av slagregn. RF_{krit} (röd).

Figur 19. Fugtforhold bag vindspærren i en træskelet konstruktion med 470 mm isolering orienteret mod nord og syd og slagregns indflydelse på fugtforholdene.

Indflydelse af luftskiftet i hulrum

Figur 20 viser betydningen af luftskiftet i hulrummet bagved den udvendige beklædning.



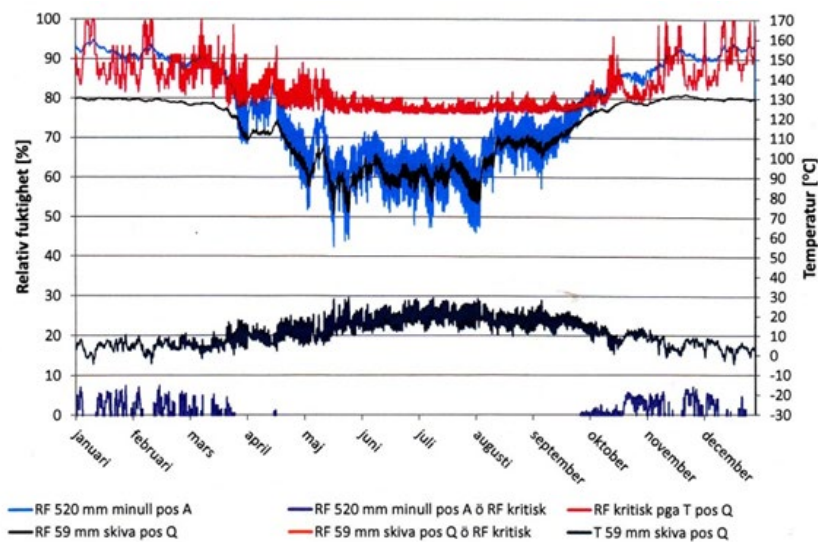
Figur 20. Luftskiftets indflydelse på fugtforholdene bag vindspærren i det ventilerede hulrum ved luftskifte på hhv. 1 h^{-1} og 30 h^{-1} i en træskelet konstruktion med 470 mm isolering. "Utgångsfall" = luftskifte på 30 h^{-1} .

Lave luftskifter på 1 h^{-1} medfører lange perioder med relativ fugtighed over det kritiske niveau på 80 % relativ fugtighed. Ved et luftskifte på 30 h^{-1} bliver perioderne med relativ fugtighed over kritisk niveau meget begrænset. Hvor stort luftskifte der vil være i praksis vil afhænge af vind- og temperaturforhold. Et luftskifte på 30 h^{-1} svarer til en godt ventileret luftspalte.

Variation: isolering på ydersiden af træskelet

I stedet for at benytte en træskeletkonstruktion hvor træskelettets tykkelse er det samme som isoleringstykkelser, er der undersøgt om et slankere træskelet, dvs. et træskelet med mindre tykkelse, der mod ydersiden er dækket af isolering, kunne mindske risiko for skimmelvækst, se også konstruktionsopbygning i figur 22.

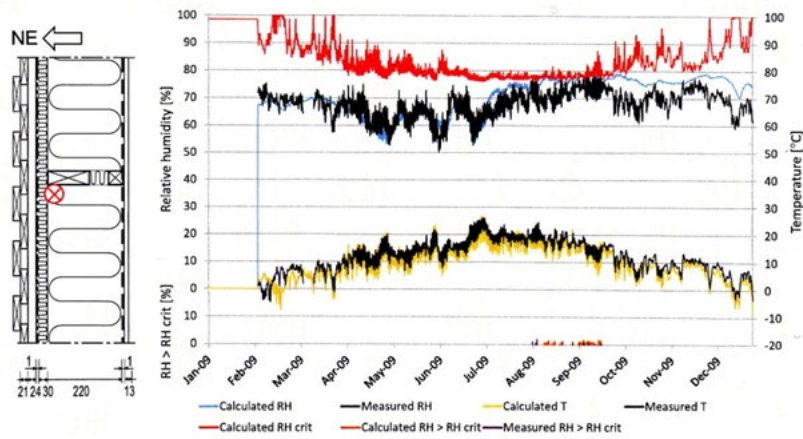
Figur 21 viser temperatur og relativ fugtighed for en væg med 520 mm isolering, hvoraf 59 mm er placeret på ydersiden af træskelettet. Analyse af resultaterne har vist, at der forekommer kortere perioder med relativ fugtighed over det kritiske niveau. En sammenligning med mindre isoleringstykkelser viser dog stadig en lidt større risiko ved anvendelse af større isoleringstykkelser end ved mindre isoleringstykkelser.



Figur 21. Sammenligning af fugtforhold ved placering af træskelet 59 mm inde i isoleringen i en væg med 520 mm isolering. Pos A angiver resultaterne direkte bagved vindspærre, pos Q angiver resultaterne 59 mm inde i isoleringen bagved vindspærren.

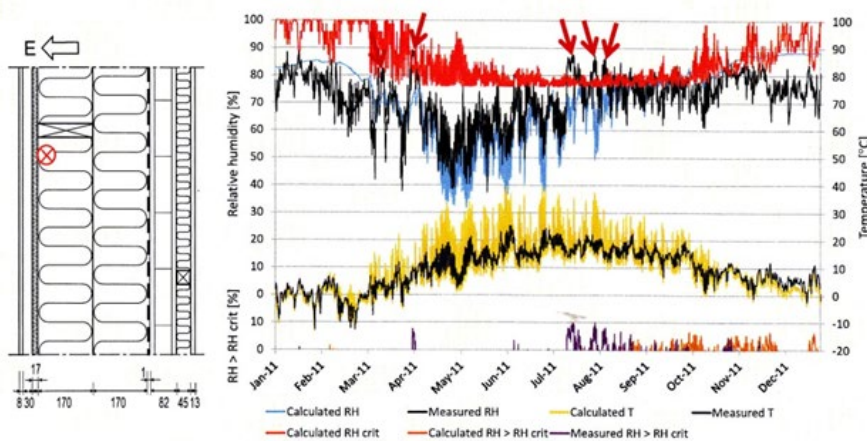
Sammenligning af simuleringer med målinger

I forbindelse med projektet Moisture Safety in Wood Frame Buildings, blev der foretaget målinger og beregninger på 5 huse med forskellige konstruktioner og med forskellig geografisk placering (Mundt-Petersen, 2013a-e). En sammenligning mellem simuleringer og målinger blev foretaget på måleresultater fra flere huse, så det ikke var baseret på målinger i et enkelt veludført hus. Desuden var der ikke kendskab til måleresultaterne, da simuleringerne blev udført. Det betød, at måleresultaterne også var med til at vurdere anvendeligheden af simuleringerne.



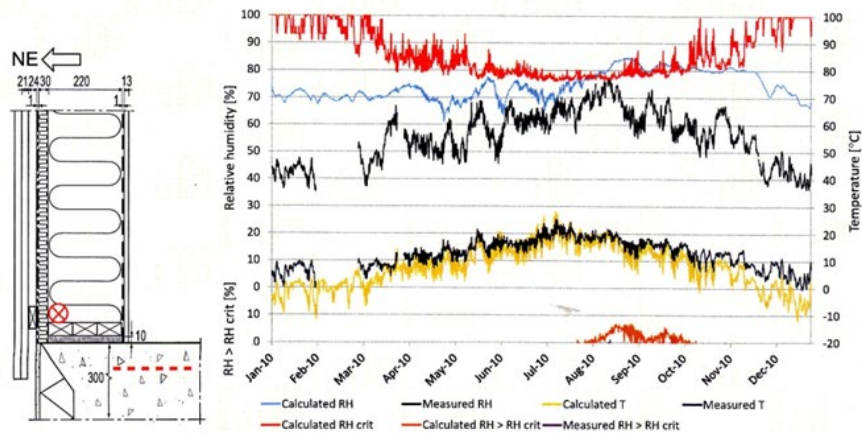
Figur 22. Sammenligning af simulerede og målte temperaturer og relative fugtigheder i en træskelet væg med 220 mm isolering.

Figur 22 viser at sammenligning mellem beregnede og målte temperaturer og relative fugtigheder stemmer godt overens for en 220 mm isoleret væg. Samtidig ses det, at der næsten ingen perioder er med relativ fugtighed over det kritiske niveau.



Figur 23. Sammenligning af beregnede og målte temperaturer og relative fugtigheder i en træskelet væg med 340 mm isolering.

Ved anvendelse af en isoleringstykkelse på 340 mm, se figur 23, viser målingerne, at der forekommer fire perioder, hvor fugtindholdet kommer over den beregnede kritiske relative fugtighed. Der blev dog i dette tilfælde vurderet, at dette må skyldes slagregn, og ses som tydelige spidser i målingerne – markeret med røde pile på figur 23. Det giver anledning til, at der i dette tilfælde er perioder i april og august, hvor beregningen ikke viser relativ fugtighed over det kritiske niveau, mens målingerne viser det. Dette viser, betydningen af en korrekt udført konstruktion, så vand fra slagregn ikke trænger ind i konstruktionen.



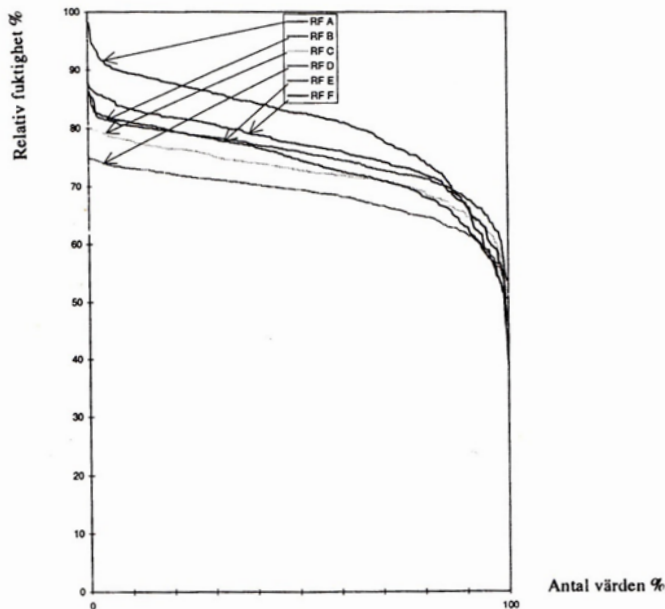
Figur 24. Sammenligning af simulerede og målte temperaturer og relative fugtigheder ved oversiden af bundtræet ved fundamentet i en træskelet væg med 220 mm isolering.

Figur 24 viser en sammenligning mellem temperatur og relativ fugtighed beregnet og målt ved oversiden af bundtræet ved fundamentet. Der er rimelig overensstemmelse mellem målte og beregnede værdier. Periodelvis er der beregnet en relativ fugtighed over det kritiske niveau i august til september, hvorimod målinger ikke viser en overskridelse i samme perioder. Det vil sige at beregningen er på den sikre side. Sammenligninger mellem måleresultaterne fra de 5 huse i projektet og beregninger, bekræfter at beregningerne er på den sikre side. Resultaterne fra beregning af temperatur og relativ fugtighed i ventilationsspalten af en træskeletvæg har fx vist at beregningerne resulterer i længere perioder med relativ fugtighed over det kritiske niveau end målt.

6.2.2 Ventileret tagrum fra SP

Allerede i 1994-95 blev der ved SP udført målinger af temperaturer og fugtforhold i ventilerede tagrum, hvor der anvendtes forskellige typer af isoleringsmaterialer (mineraluld og celluloseuld) og forskellige luftskifter (uventileret, naturligt ventileret og styret ventilation) (Samuelson, 1995). Målinger blev gennemført over 1 år og senere sammenlignet med simuleringer i forskellige beregningsprogrammer. Sammenligning af målinger og simuleringresultaterne viste, at simuleringresultaterne gav lavere relativ fugtighed, end det som blev målt som følge af definition af luftskifte i de forskellige beregningsprogrammer.

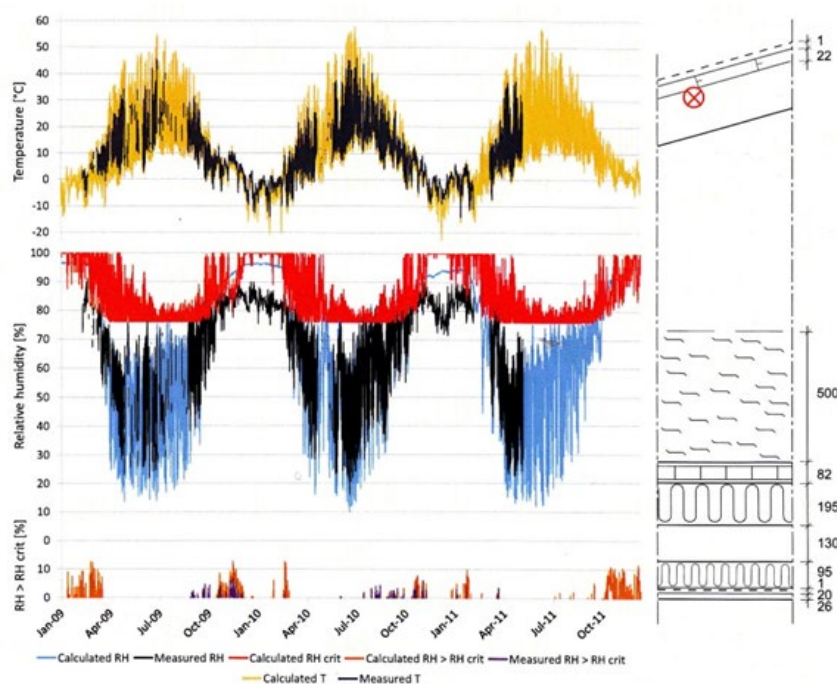
Resultaterne af målingerne (Figur 25), illustreret i form af diagrammer over hvor ofte den relative fugtighed overskrider bestemte værdier, viser en klar effekt af luftskiftet. Den relative fugtighed er højest, hvor der er anvendt styret ventilation og lavest ved uventilerede løsninger, da en større ventilation med udeluft giver anledning til en større variation i temperatur og fugtforhold. Det betyder ikke, at brug af en uventileret løsning altid vil være en god løsning i praksis, da der i et normalt hus kan være en risiko for tilførsel af fugt indefra gennem utætheder i dampspærren eller gennemføringer mellem tagrum og underliggende rum.



	A	B	C	D	E	F
ventilation	2 oms/h	2 oms/h	nej	nej	naturlig	naturlig
underlagstak	folie	plywood	plywood	plywood	plywood	plywood
isolering	Vitull	Termoträ	Rockwool	Ekofiber	Vitull	Ekofiber

Figur 25. Relativ fugtighed i et ventileret tagrum ved brug af forskellige isoleringsmaterialer og luftskifte i september måned 1994.

Målingerne er senere blevet brugt til at verificere andre beregningsprogrammer, fra fx Chalmers. Her blev der udviklet en beregningsmodel, der giver mulighed for at undersøge effekt af ændring i luftskifte i tagrummet samt af mængden af tilført fugt fra bygningen (Kalagasidis, 2004). Samtidig blev der også foretaget feltundersøgelser af ventilerede tagrum, hvor det har vist sig, at der er en forøget risiko for skimmelvækst på undersiden af undertaget af træ. Problemet optræder i vintermåneder og overgangsperioder, hvor der er for lille ventilation i tagrummet. I denne sammenhæng blev der udført forsøg med kontrolleret mekanisk ventilation, som sættes i drift, når den naturlige ventilation er for lille.

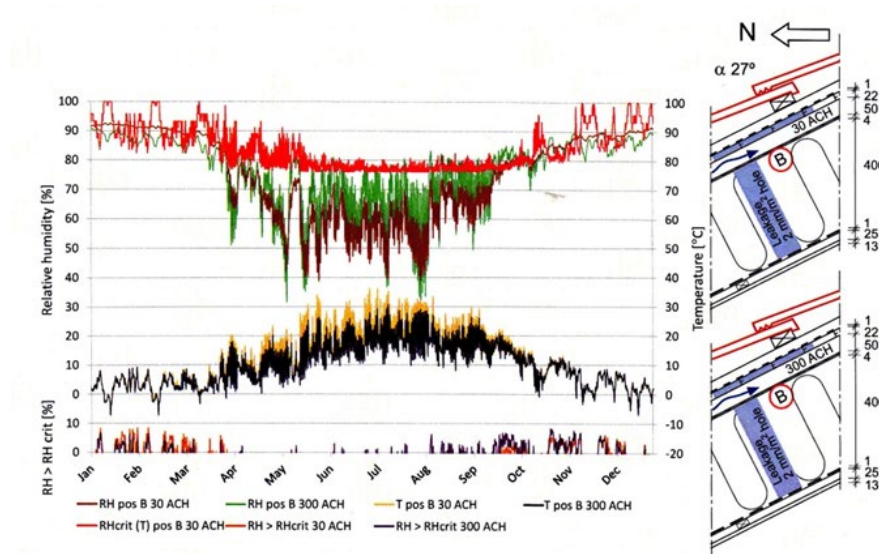


Figur 26. Sammenligning af beregnede og målte temperature og relativ fugtighed i et ventileret loftrum. Målepunktet er under tagfladen.

Resultater af forsøgene viser, at metoden kan fungere, men det kræver, at ventilationen styres efter behov (Hagentoft & Kalagasidis, 2014). Nyere beregninger, end dem udført af SP, og målinger af forholdene i højisolerede ventilerede tagrum blev foretaget ved LTH (Hägerstedt, 2012), i et koldt tag – let ventileret gennem en 3 års periode. Det ses af figur 26, at der også i højisolerede ventilerede tagrum optræder perioder med relativ fugtighed over det kritiske niveau. Beregningerne giver større udsving end målinger, hvilket tyder på, at beregningerne er på den sikre side. Men beregningen kan ikke tage hensyn til risiko for taglækager.

6.2.3 Paralleltag fra LTH

Beregninger for luftskiftet i luftspalten på et ventileret paralleltag med 400 mm isolering, hvor luftskiftet er på hhv. 30 h⁻¹ og 300 h⁻¹, er vist i figur 27.

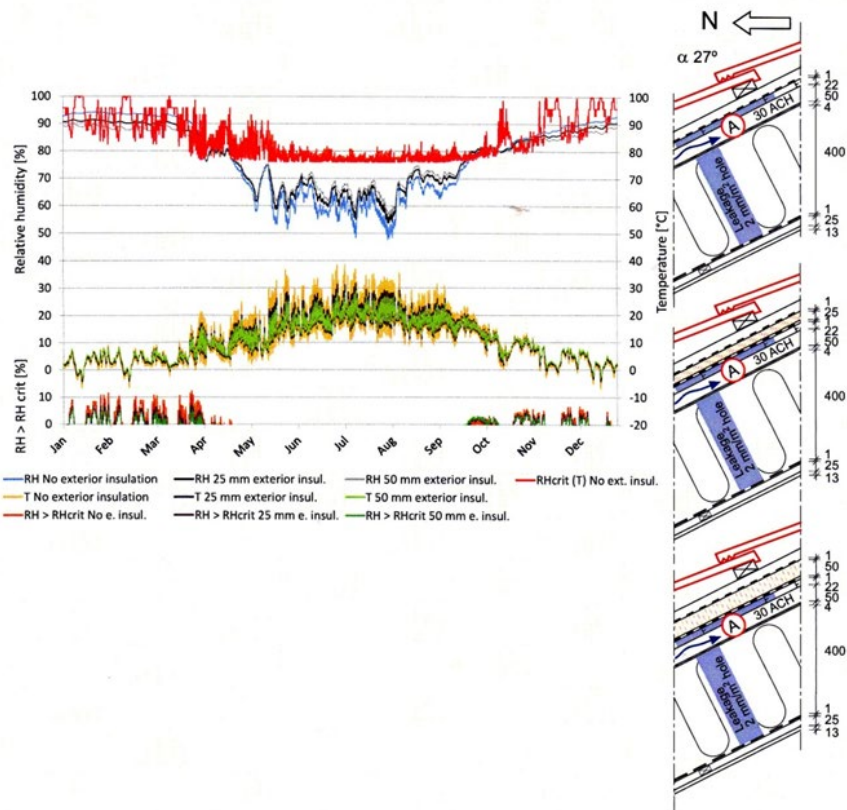


Figur 27. Sammenligning af fugtforholdene under den ventilerede spalte i et paralleltag isoleret med 400 mm og luftskifter på hhv. 30 og 300 h⁻¹.

Beregningerne viser, at en mindre ventilation (30 h⁻¹) i hulrummet over isoleringen øger den relative fugtighed om vinteren, men den er lavere om sommeren sammenlignet med en stor ventilation på 300 h⁻¹. Men umiddelbart ser det ud til, at det er vigtigere, at der etableres ventilation end at luftskiftet er højt.

Alternativ løsning med udvendig isolering af ventilationsspalte

Fugtforholdene i ventilationsspalten kunne påvirkes af solens opvarmning af tagkonstruktionen, og der blev undersøgt en løsning med udvendig isolering af ventilationsspalten over isoleringen, se figur 28. Eksemplet viser, at der om sommeren er en stor påvirkning på temperaturen i luftspalten, når der ikke isoleres, og at denne solpåvirkning reduceres med isoleringstykkelsen. Derimod tyder det ikke på at have indflydelse på fugtforholdene i spalten, hvor det primært er kortere perioder om vinteren, at temperatur og relativ fugtighed er på et kritisk niveau for skimmelvækst.



Figur 28. Sammenligning af fugtforholdene i det ventilerede hulrum hvis der isoleres 25 eller 50 mm på den udvendige side af luftspalten, der ventileres med 30 h^{-1} .

6.3 Opsamling på norske og svenske erfaringer

På baggrund af de norske og svenske studier af fugtforholdene i højisoleerede konstruktioner, danner sig et generelt billede af, at en øget isoleringstykkel ikke forværrer fugtforholdene væsentligt i konstruktionerne. Der er andre parametre som fugttilskud fra indeklima, diffusionsmodstand af vind- og dampspærre, tæthed af dampspærren og ventilation af konstruktionen, der har større betydning for fugtforholdene i højisoleerede konstruktioner.

Studierne har også vist, at der kan opnås god overensstemmelse mellem målte og beregnede temperatur- og fugtforhold. Dette gælder specielt, hvis der er kendskab til inde- og udeklimaforhold. En vigtig parameter for at opnå en god overensstemmelse er, at konstruktionerne er dimensioneret og udført korrekt for at hindre fx slagregn i at trænge ind i konstruktionen. Dette afspejles ved, at beregninger normalt er på den sikre side i forhold til målinger i praksis.

For lette ydervægge vil der normalt ikke være behov for at ændre på konstruktionerne, når isoleringstykkel øges. Der vil optræde længere udtøringsperioder, hvis der indbygges fugtige materialer i konstruktionen. Samtidig vil der være en marginal forøgelse af perioderne, forår og efterår, hvor der opstår høje relative fugtigheder over 75 %, samtidig med at temperaturen er over $10 \text{ }^\circ\text{C}$, og risikoen for skimmel er til stede. For ydervægge har slagregnen også stor betydning for fugtindholdet og de største påvirkninger ses på facader orienteret mod sydvest, men disse fugtforhold kan begrænses ved luftskiftet bag regnskærmen.

Resultaterne fra simuleringer af fugtforhold i ventilerede tagrum har vist, at der ikke er en væsentlig større risiko for skimmelvækst ved at gå fra 250 mm

til 750 mm isolering på loftet, under forudsætning af, at dampspærren udføres korrekt, og at der sikres ventilering af tagrummet. I tagrummet tyder det på, at luftskiftet har meget stor betydning for hvorledes fugtforholdene er.

I ventilerede krybekældre medfører en øget isoleringstykkelse en større risiko for skimmelvækst, som optræder om sommeren i modsætning til vægge og tage. En alternativ løsning kunne være at lægge isolering ud på jorden, hvorved temperaturen i krybekælderen øges, og den relative fugtighed falder.

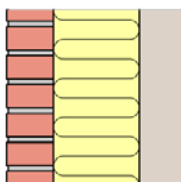
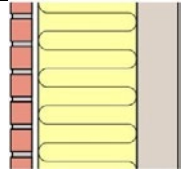
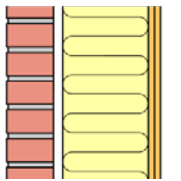
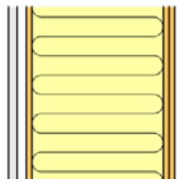
7 Beregninger af danske konstruktioner

7.1 Ydervægge

For at undersøge varme- og fugtforhold er der udført 1D simuleringer for 4 forskellige ydervægskonstruktioner i WUFI Pro. Konstruktionerne er baseret på de typiske konstruktioner i højsolerede bygninger, se afsnit 4 *Konstruktioner i højsolerede huse*, hvor tunge og lette ydervægskonstruktioner er betragtet. I de tunge vægkonstruktioner er der ingen organiske materialer indbygget, og derfor bliver resultaterne analyseret med fokus på udtørring af murværk og fryse-tø skader, mens det er vigtigt for de lette ydervægskonstruktioner at undersøge risiko for skimmelvækst, da der er indbygget organiske materialer i disse konstruktioner.

Opbygning af de forskellige ydervægskonstruktioner er illustreret i tabel 2. Varme- og fugtforholdene i hver af konstruktionerne er blevet beregnet med isoleringstykkelser på hhv. 200 mm, 300 mm og 400 mm mineraluld ($\lambda = 0,04$ W/mK). I de ydervægskonstruktioner med hulrum regnes der desuden med forskellige luftskifte på hhv. 0 h^{-1} , 5 h^{-1} , 20 h^{-1} og 100 h^{-1} , baseret på de Svenske undersøgelser, se afsnit 6.2 *Fugtforhold i svenske højsolerede konstruktioner* og målinger af Falk og Sandin (2013).

Tabel 2. Principopbygning af de simulerede ydervægskonstruktioner.

Betegnelsen	Beskrivelse
 Ydervæg 1 – Tung ydervæg	Bagmur af letbeton og formur af tegl holdt sammen af trådbindere
 Ydervæg 2 – Tung ydervæg	Bagmur af letbeton og formur af tegl med reduceret tykkelse og ventilationsspalte
 Ydervæg 3 – Let ydervæg m. skalmur	Bagmur af bærende, isoleret skeletkonstruktion i træ og formur af tegl
 Ydervæg 4 – Let ydervæg	Isoleret skeletkonstruktion i træ med ventileret let facadebeklædning

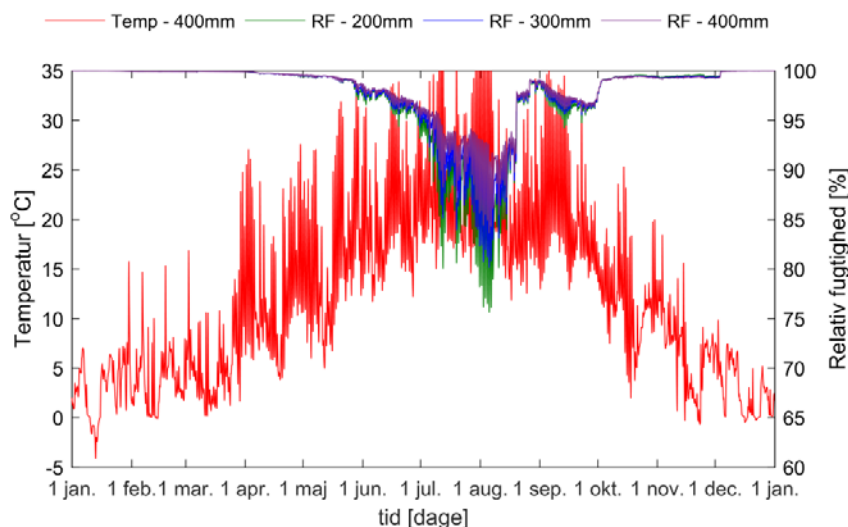
Simuleringer foretages for et udeklima svarende til danske forhold (Lund) og udføres over mindst 3 år med start i oktober (1/10). I figur 29-figur 39 er afbilledet temperaturer og relative fugtigheder for det andet hele år fra simuleringerne, hvilket starter 15 måneder efter start af simuleringerne.

Som fugtbelastningsklasse i indeklimaet anvendes fugtbelastningsklasse 2 for boliger i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) og SBI-anvisning 224 (Brandt, 2013).

Konstruktionsmaterialer er valgt ud fra foruddefinerede materialer i WUFI's materialedatabase (WUFI, 2009b). Som udgangspunkt er alle ydervægge med formure af tegl (ydervæg 1-3) orienteret mod sydvest, da det er den orientering der er mest udsat for slagregn. Slagregn er dog indregnet for en lav bygning. I nogle enkelte tilfælde er slagregn indregnet for en høj bygning, eller er slagregn ikke medregnet for sammenligning mellem forskellige scenarier. Samtidig blev der i nogle enkelte tilfælde udført simuleringer for ydervægge orienteret mod nord. For lette ydervægge (ydervæg 4) blev simuleringer i alle tilfælde foretaget med ydervæggen orienteret mod syd og nord.

7.1.1 Tunge ydervægge af tegl (Ydervæg 1 og 2)

Figur 29 viser resultaterne for relativ fugtighed for de forskellige isoleringstykkelser for ydervæg 1, 100 mm inde i konstruktionen (bag formuren af tegl). Temperatur er vist for konstruktionen med 400 mm isolering, da et sammenligneligt profil følges for de andre tykkelser.

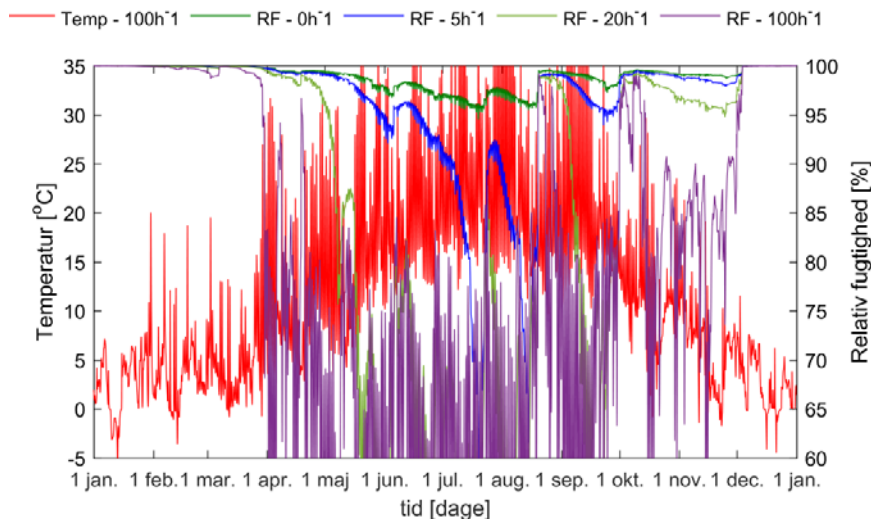


Figur 29. Temperatur og relativ fugtighed 100 mm inde i ydervæg 1 for forskellige isoleringstykkelser. Temperaturen er angivet for en konstruktion med 400 mm isolering.

Resultaterne viser, at en øget isoleringstykkelser ikke har stor indflydelse på fugt- og varmekonforhold i konstruktionen. I vinterperioden ligger den relative fugtighed på det samme høje niveau uanset isoleringstykkelser. I modsætning til vinteren er den relative fugtighed om sommeren lavest for de konstruktioner med mindst isolering, men for alle isoleringstykkelser er den relative fugtighed over 75 %.

Slagregnen opfugter murværket. En del af det opsugede vand i murværket vil fordampe til det fri om sommeren, og murværket vil tørre ud. Ved brug af større isoleringstykkelser vil udtørringen ske langsommere, og ydervæggen opnår ikke samme grad af udtørring. Undersøgelse af fugtforhold i isoleringen har ikke vist opfugtning af isolering, så der opstår ikke problemer med fugtophobning.

For ydervæg 2 med en reduceret murstenstykkelser og et hulrum bag murværket, har forøgelsen i isoleringstykkelser heller ikke markant indflydelse på fugt- og varmekonforholdene. Resultaterne i figur 30 er derfor kun vist ved bagsiden af murværket ved anvendelse af den højeste isoleringstykkelser (400 mm), men ved forskellige luftskifter af det ventilerede hulrum. Resultaterne for de andre isoleringstykkelser findes i *Appendiks 1. Beregningsresultater*, og viser samme udvikling i resultaterne som vist i nærværende afsnit.



Figur 30. Temperatur og relativ fugtighed 80 mm inde i ydervæg 2 med isoleringstykkelse på 400 mm og forskellige luftskifte.

Figur 30 viser, at luftskiftet i ventilationsspalten har større indvirkning på den relative fugtighed og dermed udtørring af murværket i sommerperioden end isoleringstykkelsen i figur 29. Ventilation er nødvendigt for at murværket kan udtørre. Jo højere luftskifte, jo hurtigere udtørring og dermed kortere perioder med en høj relativ fugtighed.

Risiko for frostsprængning i murværk

Selvom resultaterne ikke viser store forskelle i varme- og fugtforhold på murværkets bagside ved øget isoleringstykkelse, er der også risiko for frostsprængninger i det yderste af murværket. Resultaterne fra analysen af risikoen for frostsprængninger ved øgede isoleringstykkelse er vist i tabel 3. Antallet af fryse-tø cykler som murværket udsættes for er undersøgt i tilfælde med almindelig regnpåvirkning, med en højere regnpåvirkning og uden regnpåvirkning, og for ydervæggen orienteret mod sydvest og nord.

Fryse-tø cyklerne er undersøgt ved at analysere, hvor mange gange temperaturen er mindre end 0 °C ca. 3 mm inde i murværket og hvad det maksimale vandindhold i det yderste lag af murstenen (0-3 mm) er i disse tilfælde.

Resultaterne i tabel 3 er vist for ydervægskonstruktion 2, dvs. den konstruktion med den tyndeste mursten for et luftskifte på 20 h⁻¹ i ventilationsspalten. Den samme trend ses også for andre luftskifter og for ydervæg 1.

Resultaterne i tabel 3 viser, at antallet af timer som er lavere end 0 °C og maksimal vandindhold i det yderste lag af murværket kun er marginalt højere for konstruktioner med 400 mm end med 200 mm isolering. Orientering og regnpåvirkningen har stor betydning for vandindholdet i murværket, hvor den sydvestlige orientering med regnpåvirkning er markant højere end for ydervæggen orienteret mod nord. Dog ses det, at når der ikke er regn på ydervæggene, så er vandindholdet og antal timer med temperaturer under 0 °C størst i murværket orienteret mod nord.

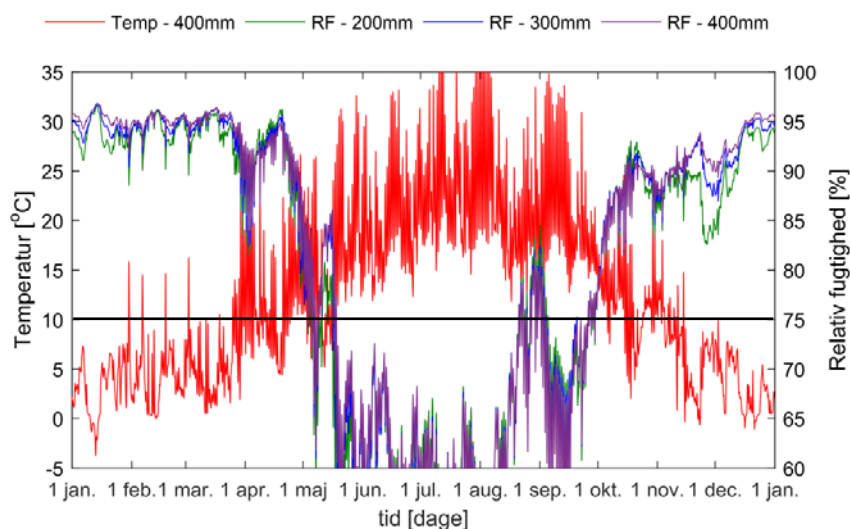
Tabel 3. Antal timer med temperatur under 0 °C og maksimal vandindhold (kg/m³) i det yderste lag af murværket for forskellige isoleringstykkelser, orienteringer og regnpåvirkninger.

		200 mm	300 mm	400 mm
SV - ingen regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	367	369	373
	Maks. vandindhold i det yderste lag af murværket	6,2	6,4	6,5
SV – alm. regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	482	484	490
	Maks. vandindhold i det yderste lag af murværket	200,0	200,0	200,0
SV - meget regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	528	529	538
	Maks. vandindhold i det yderste lag af murværket	200,0	200,0	200,0
N - ingen regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	456	462	465
	Maks. vandindhold i det yderste lag af murværket	8,3	9,5	9,8
N - alm. regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	457	464	469
	Maks. Vandindhold i det yderste lag af murværket	31,1	31,2	31,7
N - meget regn	Antal timer med temperatur < 0 °C	467	474	478
	Maks. vandindhold i det yderste lag af murværket	145,7	145,7	147,8

7.1.2 Lette ydervægge med skalmur (Ydervæg 3)

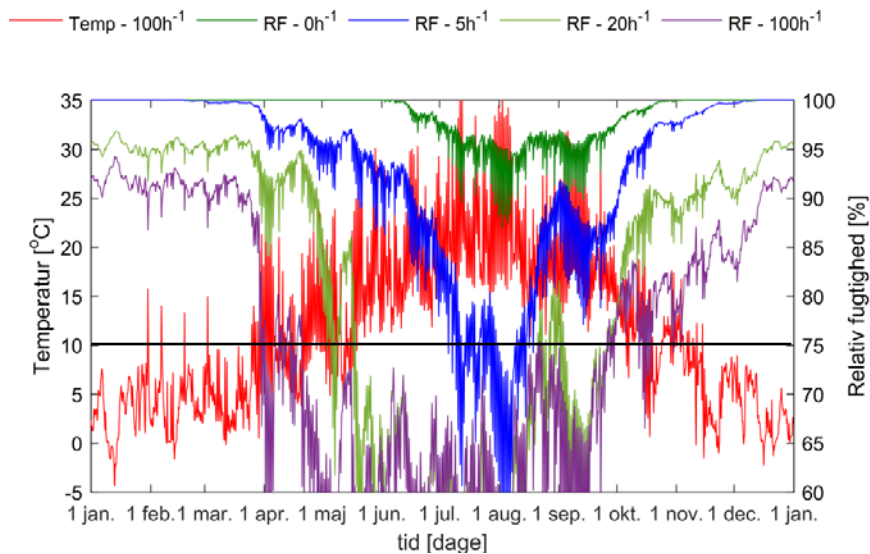
Skalmurede træskeletvægge udføres med et hulrum, fx 50 mm bredt, for at undgå, at mørtelspild giver "mørtelbroer" mellem skalmur og bagvæg, som ofte har en vindspærre af fugtfølsomt materiale. Vindspærren i ydervæg 3 blev simuleret med et ikke fugtfølsomt materiale. En sammenligning mellem forskellige vindspærre er lavet for ydervægskonstruktion 4.

Resultaterne i figur 30 for en tung ydervæg med ventilationsspalte har vist betydningen af luftskiftet for udtørring af murværket. Figur 31 viser derfor resultaterne for den relative fugtighed og temperatur bag vindspærren, for forskellige isoleringstykkelser og et luftskifte på 20 h⁻¹.



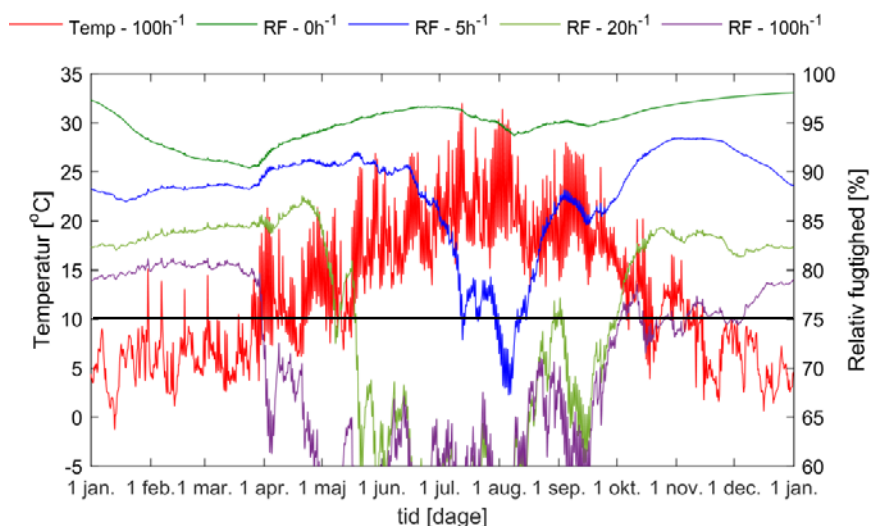
Figur 31. Temperatur og relativ fugtighed bag vindspærre i ydervæg 3 for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h⁻¹.

Resultaterne i figur 31 viser, at den periode konstruktionen har en øget risiko for skimmelvækst, er ens for alle isoleringstykkelser. Der er to perioder, april-maj og oktober-november, hvor temperatur og relativ fugtighed giver gode vækstbetingelser for skimmelsvampevækst. Hvis temperaturer over 0 °C vurderes at være kritiske, vil perioden strække sig fra ca. 1. oktober til 15. maj. Resultaterne i figur 32 for forskellige luftskifter viser, at en øget ventilation nedsætter længden af perioden med øget risiko for skimmelvækst, og at ventilationen har en større indflydelse end isoleringstykkelse.

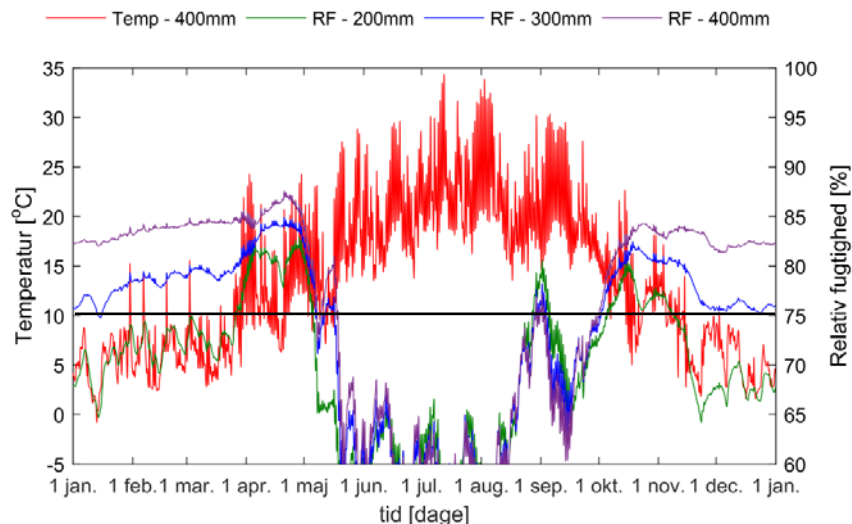


Figur 32. Temperatur og relativ fugtighed bag vindspærren i ydervæg 3 med isoleringstykkelse på 400 mm og forskellige luftskifter.

I stedet for at opbygge væggen med et træskelet, der har samme tykkelse som isoleringslaget mellem vindspærre og dampspærre, kan træskelettet udføres fx 50 mm slankere. Herved kan der være 50 mm ubrudt isolering mellem vindspærren og træskelettet. Da alle simuleringer er foretaget som 1D simuleringer, bliver indflydelse af et 50 mm slankere træskelet undersøgt ved at vurdere varme- og fugtforhold i samme ydervægskonstruktion som før, men 50 mm længere inde i isoleringslaget bag vindspærren, se figur 33. Luftskiftet bag formuren har stadig stor betydning for den relative fugtighed, og perioden med risiko for skimmelvækst. Samtidig har isoleringstykkelse i træskelettet større indflydelse på den relative fugtighed 50 mm inde i isoleringslaget. Den relative fugtighed øges ved øget isoleringstykkelse i træskelettet, hvilket øger risikoen for skimmelvækst, se figur 34. Perioden med risiko for skimmelvækst er dog ens for de forskellige isoleringstykkelser.



Figur 33. Temperatur og relativ fugtighed 50 mm bag vindspærre i ydervæg 3 med isoleringstykkelse på 400 mm og forskellige luftskifte.

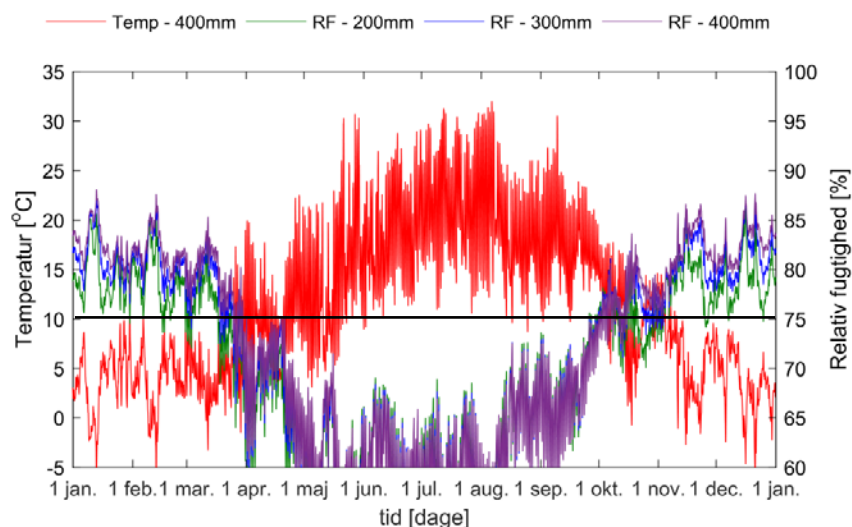


Figur 34. Temperatur og relativ fugtighed 50 mm bag vindspærre i ydervæg 3 for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte på 20 h^{-1} .

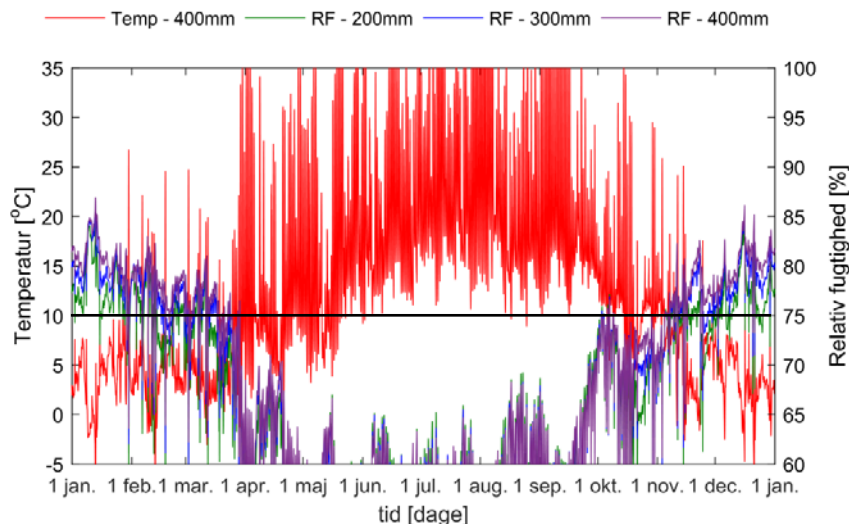
7.1.3 Lette ydervægge med facadebeklædning (Ydervæg 4)

Lette ydervægge med træskelet og pladebeklædning er forsynet med en udvendig vindspærre, der kan være af forskellige materialer fx gipsplader til udvendig brug. For denne ydervægskonstruktion undersøges det, om der er forskel mellem anvendelse af hhv. en diffusionsåben banevare ($Z = 1,1 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$), krydsfiner ($Z = 11,9 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$) og en vindgipsplade ($Z = 0,4 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}/\text{kg}$) som vindspærre. Derudover undersøges generelt indflydelse af isoleringstykkelser, orientering, luftskifte, og anvendelse af et slankere træskelet. Simuleringerne tager højde for slagregn, men vindspærren udsættes normalt ikke for regn, da facadebeklædningen tager denne, hvilket er bekræftet ved indledende simuleringer. Fugtforholdene i facadebeklædningen undersøges ikke, da det forventes, at denne er modstandsdygtig overfor regn eller kan nå at udtørres ved hjælp af ventileringen af facaden.

Figur 35 og figur 36 viser resultaterne for relativ fugtighed og temperatur bagved en diffusionsåben banevare som vindspærre, for en ydervæg med træskelet med et luftskifte på 20 h^{-1} i ventilationsspalten orienteret mod nord og syd.



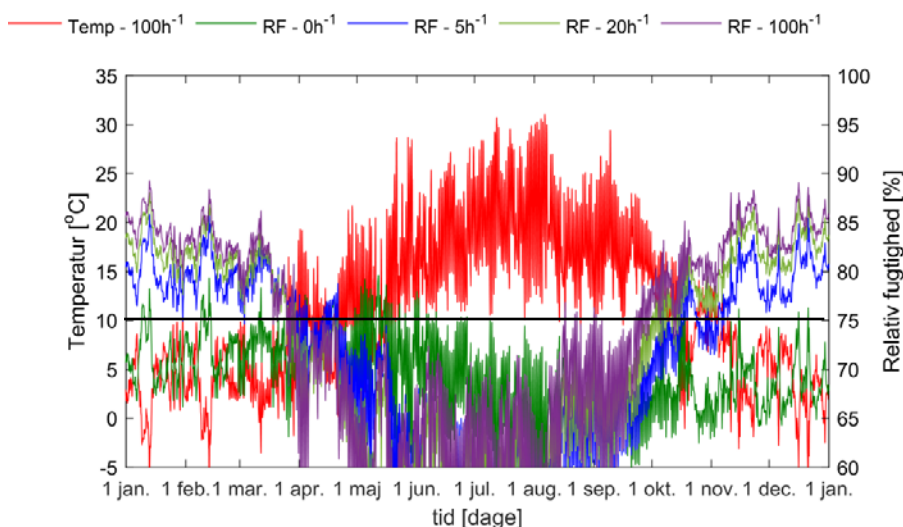
Figur 35. Temperatur og relativ fugtighed bagved diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod nord for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h^{-1} .



Figur 36. Temperatur og relativ fugtighed bagved diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod syd for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h^{-1} .

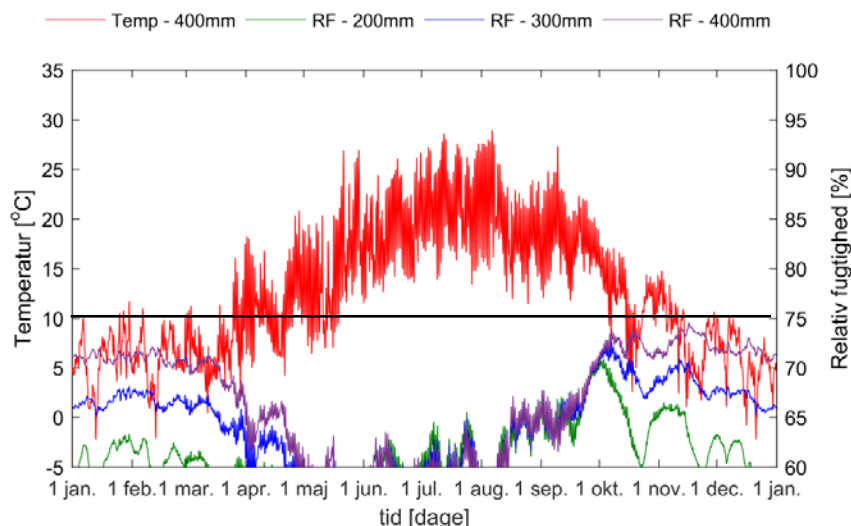
Sammenligning af resultaterne i figur 35 og figur 36 viser, at den relative fugtighed generelt er lidt højere mod nord end mod syd, hvilket tydeligt ses i april og oktober. Samtidig er temperaturene generelt under $10 \text{ }^\circ\text{C}$, når den relative fugtighed overstiger 75 %. For begge orienteringer gælder, at en øget isoleringstykkelse resulterer i lidt højere relative fugtigheder. Ved brug af mindre isoleringstykkelser er temperaturen bag vindspærren i ydervæggen orienteret mod syd meget høj, hvilket betyder, at den relative fugtighed falder til et niveau, så der største dele af året ikke er risiko for skimmelvækst.

Betragtes indflydelsen af forskellige luftskifter i ventilationsspalten, jf. figur 37 for en ydervæg orienteret mod nord, ses det at jo højere luftskifte desto højere relativ fugtighed. Forskellen i den relative fugtighed ved de forskellige luftskifter ($5\text{-}100 \text{ h}^{-1}$) er dog lille og temperaturen er samtidig lav. Derudover viser figur 37, at luftskiftet ($5\text{-}100 \text{ h}^{-1}$) kun har en meget lille betydning på perioden med risiko for skimmelvækst. I tilfælde af ventilationsspalten ikke ventileres, dvs. at luftskiftet er sat til 0 h^{-1} , er den relative fugtighed om vinteren lavere og om sommeren højere end, hvis luftskiftet er på $5\text{-}100 \text{ h}^{-1}$.



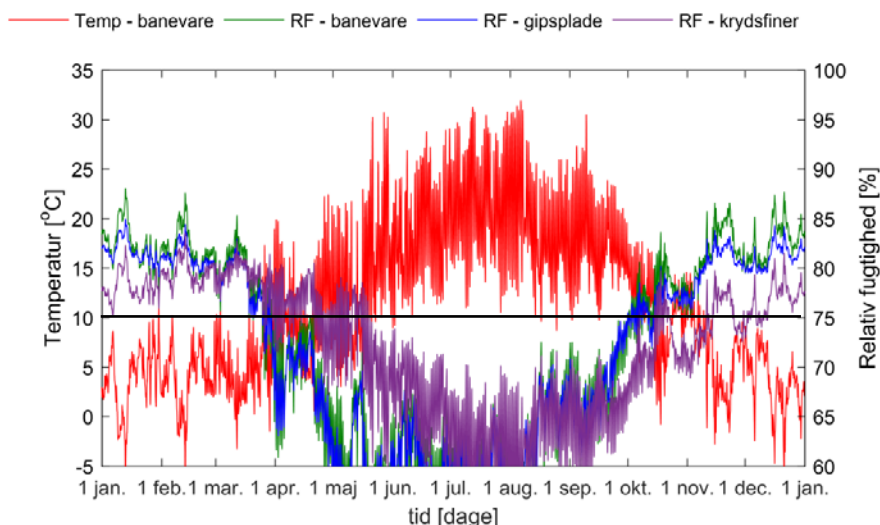
Figur 37. Temperatur og relativ fugtighed bagved diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod nord med isoleringstykkelse på 400 mm og forskellige luftskifter.

I lette konstruktioner hvor træskeletet har samme tykkelse som isoleringen mellem vindspærre og dampspærre optræder ikke længere perioder med risiko for skimmelvækst. Det forventes derfor heller ikke at anvendelsen af et slankere træskelet giver problemer med skimmel, hvilket bekræftes gennem undersøgelse af varme- og fugtforhold inde i isoleringslaget, 50 mm bag vindspærren. I ingen af tilfældene (både vedrørende isoleringstykkelser, orientering eller luftskifter) overstiger den relative fugtighed 75 %, samtidig med at temperaturen er højere end 0 °C, se figur 38 for ydervæggen orienteret mod nord.



Figur 38. Temperatur og relativ fugtighed 50 mm bag diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod nord for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h⁻¹.

Som nævnt er der foretaget en undersøgelse ved anvendelse af forskellige materialer som vindspærre ved siden af indflydelse af isoleringstykkelse, orientering, luftskifte, og anvendelse af et slankere træskelet. Resultaterne i figur 39 for ydervæggen med 400 mm isolering orienteret mod nord viser en lavere relativ fugtighed ved anvendelse af krydsfiner som vindspærre, end ved anvendelse af en diffusionsåben banevare eller gipsplade. Da tidligere resultater ved anvendelse af en diffusionsåben banevare som vindspærre viser en begrænset risiko for skimmelvækst, og fordi dens relative fugtighed er højest, vurderes risiko for skimmelvækst bagved vindspærre af gipsplader eller krydsfiner også at være begrænset.



Figur 39. Temperatur og relativ fugtighed bag vindspærre i ydervæg 4 mod nord med isoleringstykkelse på 400 mm og luftskifte 20 h⁻¹ ved anvendelse af forskellige typer vindspærre.

7.2 Tagkonstruktioner

Der er udført simuleringer for tre forskellige tagtyper

- Paralleltage
- Flade tage
- Tag med ventileret tagrum

Konstruktionerne for paralleltage og flade tage er undersøgt ved 1D simuleringer i WUFI Pro, og opbygningerne af tagkonstruktionerne er baseret på beskrivelserne i afsnittet 4, *Konstruktioner i højsolerede huse*. Varme- og fugtforholdene i de to typer tagkonstruktioner er undersøgt for isoleringstykkelser på 300-500 mm, med materialer fra WUFIs materialedatabase (WUFI, 2009b). I de tagkonstruktioner der er ventilerede regnes der med forskellige luftskifter på hhv. 0 h⁻¹, 5 h⁻¹, 20 h⁻¹ og 100 h⁻¹, baseret på svenske undersøgelser, se afsnit 6.2, *Fugtforhold i svenske højsolerede konstruktioner*. Simuleringer foretages i WUFI med start 1. oktober og beregnes over mindst 3 år med et dansk udeklima. Som fugtbelastningsklasse i indeklimaet anvendes fugtbelastningsklasse 2 for boliger i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) og SBi-anvisning 224 (Brandt, 2013).

Til beregning af temperaturforhold i et ventileret tagrum blev BSim anvendt, som er et program der kan regne på hele bygningers termiske indeklima, fugtforhold etc. I BSim kan tagrummet modelleres, og dermed kunne der tages højde for boligens indeklima, udeklimaet og deres indvirkning på temperaturforholdene over tid i tagrummet. Modellen er opbygget så den svarer til det ventilerede tagrum, hvor der blev udført målinger jf. afsnit 8.3, *Ventileret tagrum*. Tagrummet er opbygget efter princippet beskrevet i figur 4.

Simuleringerne i BSim tager udgangspunkt i en bygning med ventileret tagrum på 80 m² og et tag med 45°, hvor tagfladerne vender mod nord og syd. Temperaturen i boligens indeklima holdes konstant på 20 °C, og der regnes med en tæt dampspærre mod tagrummet, og derfor ingen fugttilførsel fra boligen til tagrummet. Udeklimaet er det danske referenceår i BSim, og luftskiftet er som udgangspunkt sat til 0,5 h⁻¹. Varme- og fugtforhold i den ventilerede tagkonstruktion er undersøgt for isoleringstykkelser på 50, 150 og 450 mm mineraluld isolering ($\lambda = 0,036 \text{ W/mK}$) på loftet.

7.2.1 Paralleltage med hældning

Der skelnes mellem 2 typer af undertagskonstruktioner for parallelle tage med hældning baseret på deres fugttekniske funktion:

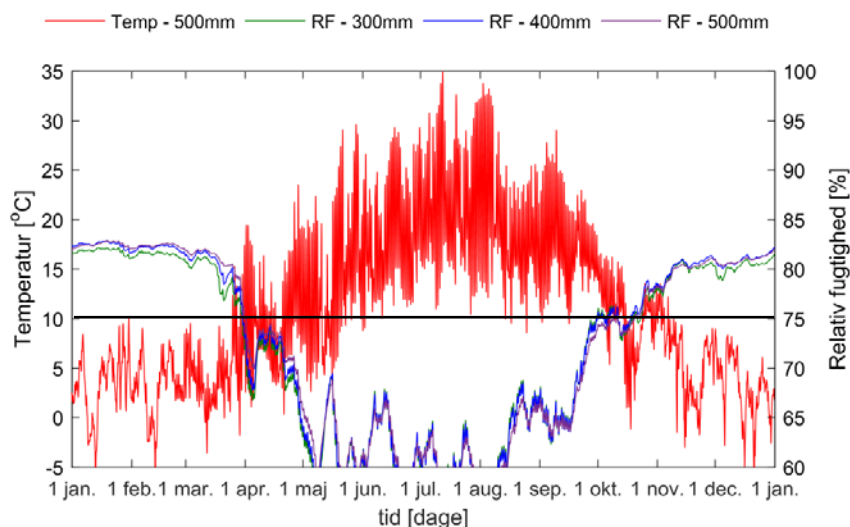
- *Paralleltage med ventileret undertag*, se figur 3.
Her fjernes fugt indefra ved ventilation under undertaget. Der anvendes et diffusionstæt undertag.
- *Paralleltage med uventileret undertag*. Fugten indefra fjernes ved anvendelse diffusionsåbne undertage, dvs. produkter, som er så diffusionsåbne/gennemtrængelige for vanddamp, at fugten indefra kan trænge ud gennem materialet.

Begge disse undertagskonstruktioner blev modelleret i WUFI med en taghældning på 25°. Som undertag i paralleltaget med ventileret undertag blev der brugt et fast undertag af tagpap på krydsfiner. Ventilationsspalten mellem undertag og isolering blev sat til 50 mm. I tilfælde af et uventileret undertag blev der brugt en diffusionsåben folie/banevare.

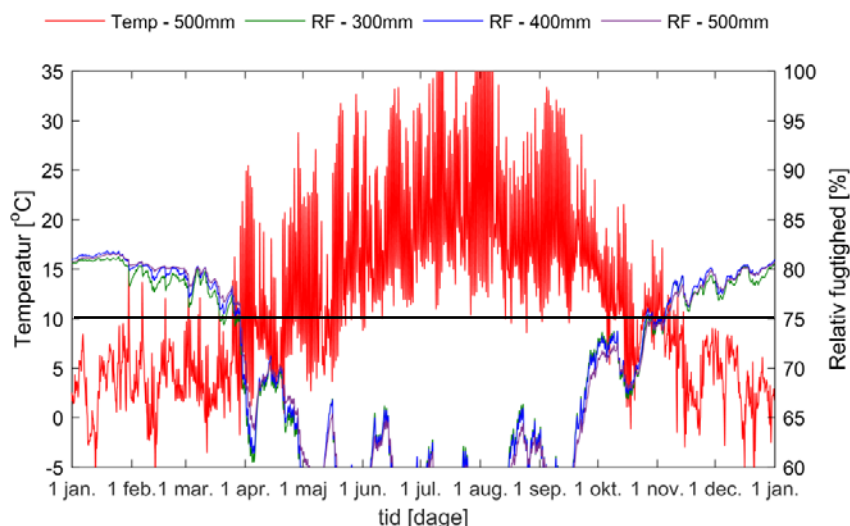
Paralleltag med ventileret undertag

Resultaterne for de forskellige isoleringstykkelser og det ventilerede paralleltag orienteret mod hhv. nord og syd er vist i figur 40 og figur 41. Resultaterne viser en lille forskel i den relative fugtighed ved øget isoleringstykkelse. Samtidig er forskellen i relativ fugtighed i vinterperioden mellem nord- og sydvendte tage lille og i begge tilfælde, er der kun 2 meget korte perioder med risiko for skimmelvækst i foråret og efteråret.

For det nordvendte tag er temperaturen lavere under krydsfineren end for det sydvendte tag, og derfor er risikoen for skimmelsvamp lidt større om efteråret for det nordvendte tag. De korte perioder med risiko for skimmel bekræftes også ved det lave vandindhold i krydsfinerpladen (ikke illustreret her) og viser at paralleltage med ventileret undertag kan fungere korrekt.

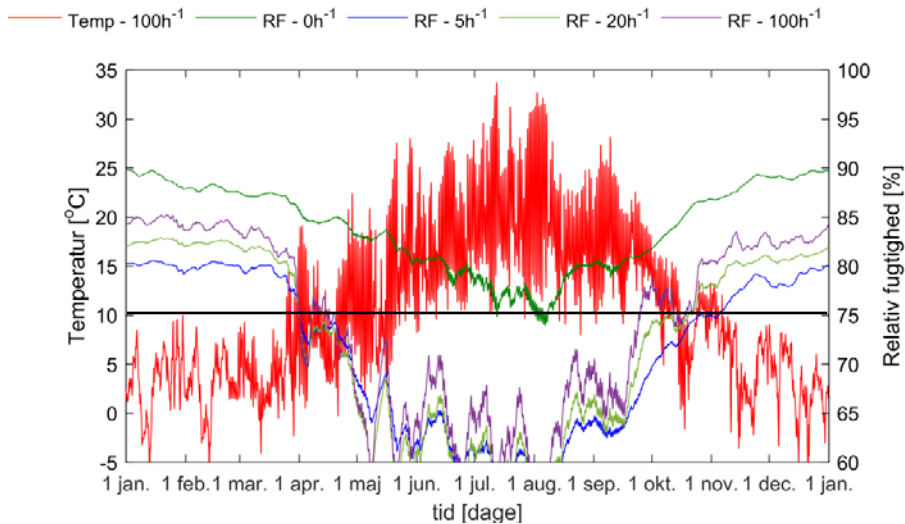


Figur 40. Temperatur og relativ fugtighed under undertaget i et nordvendt paralleltag med ventileret undertag for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h⁻¹.



Figur 41. Temperatur og relativ fugtighed under undertaget i et sydvendt paralleltag med ventileret undertag for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h⁻¹.

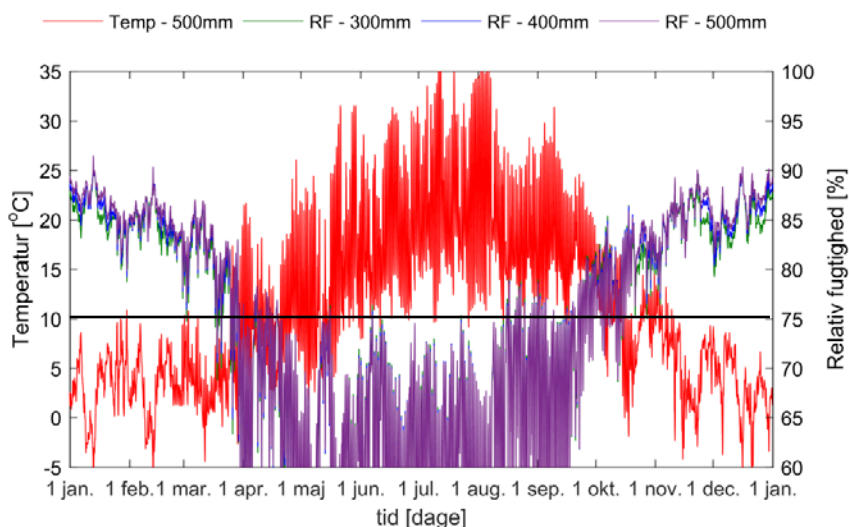
Figur 42 viser resultaterne for forskellige luftskifter i et 500 mm isoleret paralleltaget med ventileret undertag mod nord. Fugtforholdene under krydsfineren påvirkes betydeligt af luftskifte i tagkonstruktionen. I foråret og efteråret, hvor der er en lille risiko på skimmelvækst, er denne forskel mindre end om vinteren. Samtidig ses det, at den relative fugtighed bag krydsfineren ikke udelukkende afhænger af luftskiftet men også af udeluftens fugtindhold, da de laveste relative fugtigheder opnås ved 5 h⁻¹ og 20 h⁻¹ sammenlignet med luftskifter på 0 h⁻¹ og 100 h⁻¹.



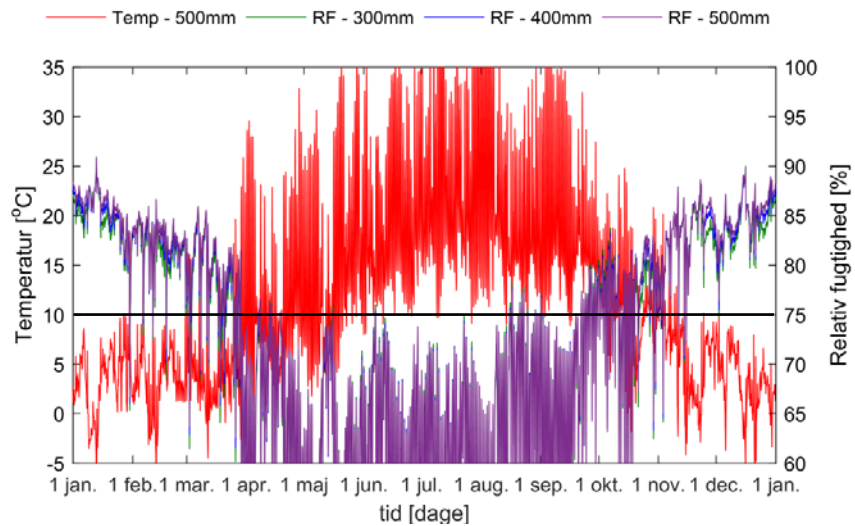
Figur 42. Temperatur og relativ fugtighed under undertaget i et nordvendt paralleltag med ventileret undertag med isoleringstykkelse på 500 mm og forskellige luftskifter.

Paralleltag med uventileret undertag

Resultaterne fra paralleltag med uventileret undertag mod hhv. nord og syd er vist på figur 43 og figur 44. Sammenlignet med et ventileret paralleltag, ses det, at den relative fugtighed er markant højere om vinteren, når undertaget ikke ventileres. Da den høje relative fugtighed forekommer om vinteren, hvor temperaturen samtidig er 0-10 °C, vil konstruktionen få mulighed for at tørre ud om sommeren ved korrekt anvendelse af dampspærren. Forskellen i relativ fugtighed for de forskellige isoleringstykkelser er igen lille, og samtidig er forskellen mellem nord og syd orientering meget lille.



Figur 43. Temperatur og relativ fugtighed under undertaget i et nordvendt paralleltag med uventileret undertag for forskellige isoleringstykkelse.



Figur 44. Temperatur og relativ fugtighed under undertaget i et sydvendt paralleltag med uventileret undertag for forskellige isoleringstykkelse.

7.2.2 Flade tage

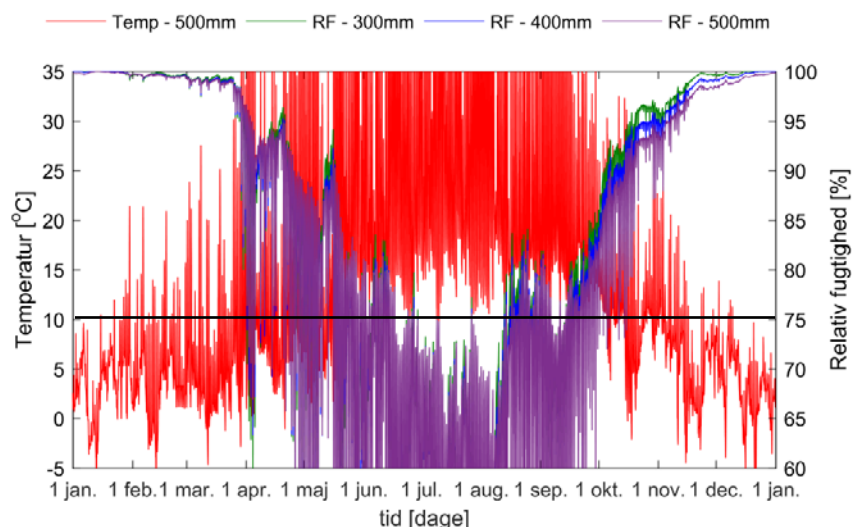
Flade tage kan i fugtteknisk henseende opdeles i to typer

- *Varme tage*. Isoleringen ligger helt eller delvis over den bærende konstruktion, som derfor holdes varm. Tagkonstruktionen er uventileret, se figur 1.
- *Kolde tage*. Isoleringen ligger inde i konstruktionen, så en del af den bærende konstruktion bliver kold om vinteren. Tagkonstruktionen er normalt ventileret, se figur 2.

Varme tage

Varme tage anses for fugtteknisk sikre konstruktioner, da der normalt ikke er risiko for kondens og fugtophobning hvis konstruktionen er tæt. Konstruktionsopbygning af de undersøgte varme tage i WUFI følger princippet som illustreret i figur 1.2 og figur 1.4, hvor der både betragtes et betondæk, samt træ som underlag for isoleringen. I begge tilfælde anvendes der tagpap som dampspærre.

Resultaterne for forskellige isoleringstykkelse ved anvendelse af et betondæk som underlag er vist i figur 45. Resultaterne ved anvendelse af træ som underlag viser de samme tendenser, og er derfor ikke vist.



Figur 45. Temperatur og relativ fugtighed under tagpappen i et varmt tag med betondæk som underlag for forskellige isoleringstykkelse.

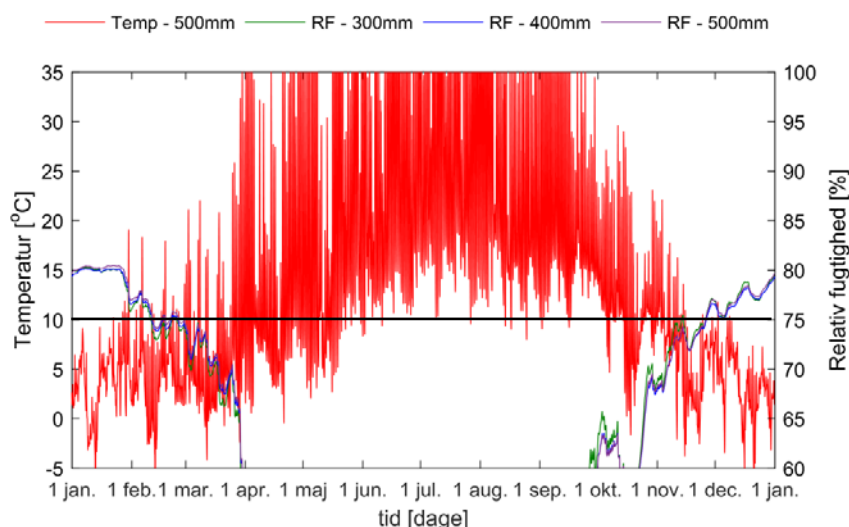
Figur 45 viser at en øget isoleringstykkelse resulterer i en lidt lavere relativ fugtighed om vinteren, men især i sommerperioden. I vinterperioden ligger den relative fugtighed generelt højt i en kort periode, men sammenligning af temperaturene og dugpunktstemperaturer under tagpappen har vist, at temperaturene ligger en del højere end dugpunktet, og at der derfor ikke er risiko for kondens eller fugtphobning. Samtidig får konstruktionen mulighed til at tørre ud om sommeren.

Kolde tage med ventilation

Kolde tage anses for en mere risikofyldt tagkonstruktion end varme tage, da der kan opstå kondens, hvis fugtig rumluft rammer de kolde overflader i tagkonstruktionen. Det skyldes, at isoleringen ligger inde i konstruktionen, så dele af den bærende konstruktion om vinteren udsættes for lave temperaturer. Ventilation på den kolde side af isoleringen er derfor et vigtigt element til at fjerne/bortventilere fugt.

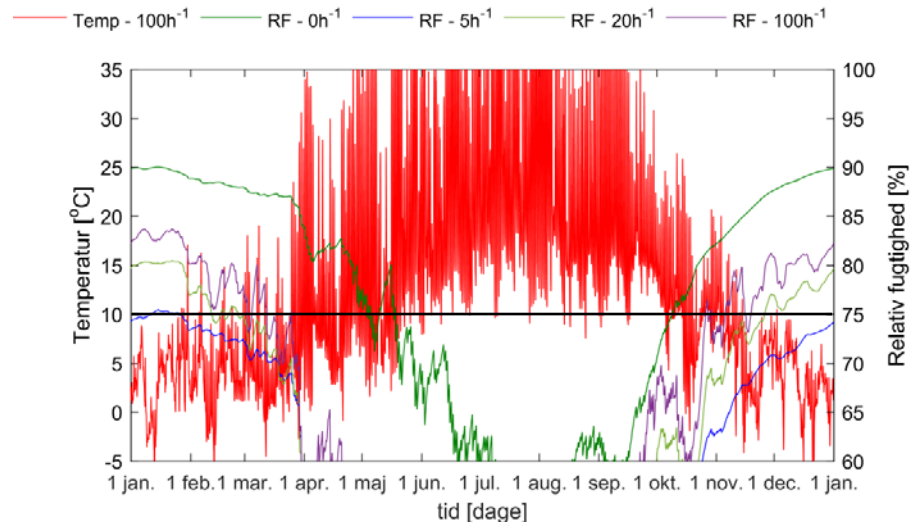
Det undersøgte kolde tag er modelleret i WUFI efter konstruktionsprincippet illustreret i figur 2. Fugtforholdene ved forskellige isoleringstykkelser og luftskifter er undersøgt både i undersiden af krydsfineren, og ved oversiden af dampspærren.

Resultaterne på undersiden af krydsfineren, se figur 46, viser at en øget isoleringstykkelse har stor set ingen betydning på den relative fugtighed og risiko for skimmelvækst.



Figur 46. Temperatur og relativ fugtighed på undersiden af krydsfineren i det ventilerede kolde tag for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h^{-1} .

Figur 47 viser resultaterne for forskellige luftskifter ved anvendelse af 500 mm isolering i det ventilerede kolde tag. Her ses det, at der er behov for en ventilering af taget for at fjerne de fugtmængder, som trænger op i konstruktionen. Det ses desuden at store luftskifter (100 h^{-1}) vil medføre, at den relative fugtighed vil stige i konstruktionen sammenlignet med middel luftskifter (5 og 20 h^{-1}).



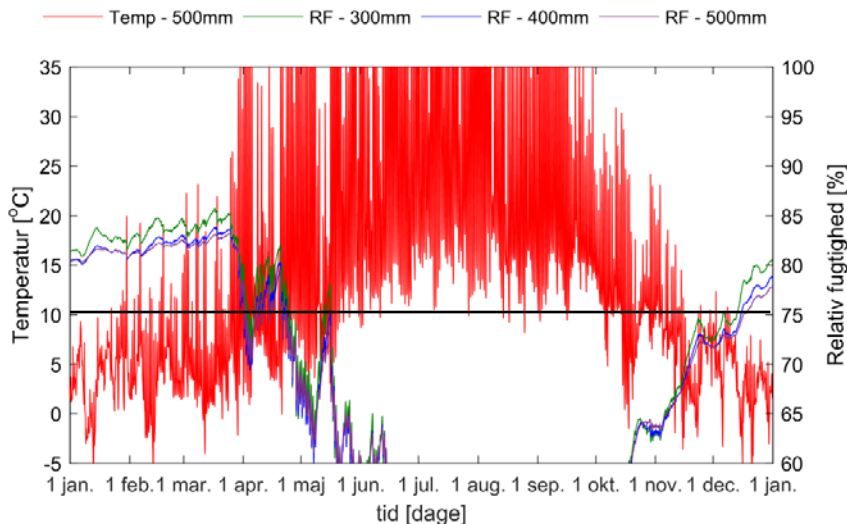
Figur 47. Temperatur og relativ fugtighed på undersiden af krydsfineren i det ventilerede kolde tag med 500 mm isolering og forskellige luftskifter.

Ud over fugtforholdene på undersiden af krydsfineren, er fugtforholdene i isolering på oversiden af dampspærren undersøgt. Analyse af resultaterne viste, at den relative fugtighed er under 75 % ved alle isoleringstykkelser og luftskifter større end 0 h⁻¹.

Tage med fugtadaptiv dampspærre

Fugtadaptive dampspærre er betegnelsen for specialfolier, hvor diffusionsmodstanden afhænger af omgivelsernes relative luftfugtighed. De aktuelt markedsførte produkter har højst diffusionsmodstand ved lav RF, hvor de fungerer som dampspærre. Ved høj relative fugtigheder har de derimod lav diffusionsmodstand, dvs. at de ikke længere fungerer som dampspærre, men derimod tillader fugt at passere. Fugtadaptive dampspærre kan i nogle sammenhænge bidrage til at fjerne fugt fra konstruktioner. Anvendt i tagelementer kan de fx om sommeren tillade passage af fugt, som af solen er drevet ned på oversiden af dampspærren. Det forudsættes, at tagfladen ikke ligger i skygge.

Der undersøges i dette tilfælde, om en øget isoleringstykkelse har betydning på fugtforhold ved anvendelse af en fugtadaptiv dampspærre under krydsfineren i et uventileret tag. Resultaterne i figur 48 viser, at en øget isoleringstykkelse faktisk medvirker til en lavere relativ fugtighed ved anvendelse af fugtadaptive dampspærre. Der er en lille periode om foråret hvor anvendelse af den fugtadaptive dampspærre kan resultere i en risiko for skimmelvækst på undersiden af krydsfineren. Analyse af vandindholdet i krydsfineren har vist at denne ligger under 15 vægt% efter det første år, og at der ingen risiko er for skimmelvækst.



Figur 48. Temperatur og relativ fugtighed under krydsfineren ved anvendelse af et fugtadaptiv dampspær for forskellige isoleringstykkelser.

7.2.3 Tage med ventileret tagrum

Et af de forhold som drøftes i forbindelse med fugtforhold i et ventileret tagrum er, at større isoleringstykkelser vil reducere temperaturen i tagrummet om vinteren og samtidig øge risiko for skimmelvækst, på grund af den reducerede varmetilførslen fra boligen til tagrummet.

Det undersøgte ventileret tagrum blev modelleret i BSim (Wittchen et al., 2008) med isoleringstykkelser på 50, 150 og 450 mm mineraluld på loftet. Som udgangspunkt er luftskiftet i tagrummet sat til $0,5 \text{ h}^{-1}$, men luftskifter på 2 h^{-1} og 5 h^{-1} er også simuleret.

Temperatur og fugtforhold i tagrummet er undersøgt ved forskellige isoleringstykkelser af dækket mod tagrummet. Yderligere er de indvendige overfladetemperaturer på de 2 tagflader mod nord og syd undersøgt.

Tabel 4 viser månedsmiddeltemperaturen i tagrummet i januar, april, juli og oktober for de forskellige isoleringstykkelser. Modsat forventningerne viser resultaterne kun mindre forskelle i tagrummets temperatur ved øget isoleringstykkelser.

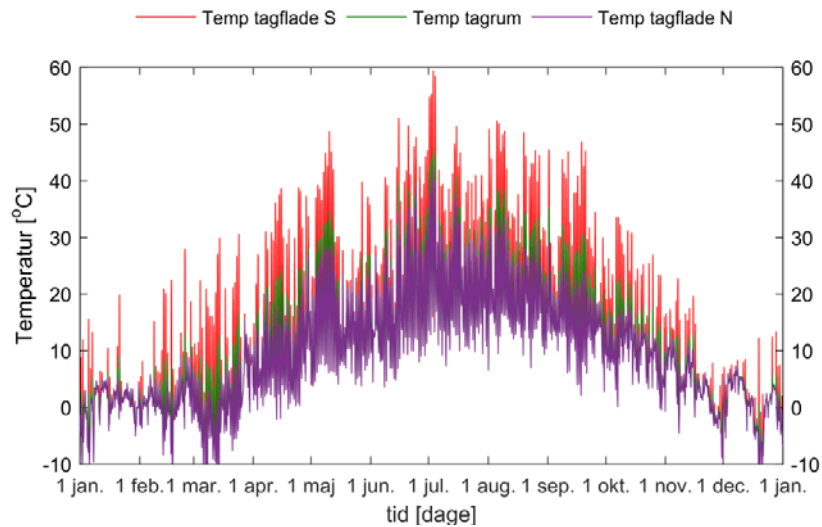
For januar måned bliver middeltemperaturen $0,4 \text{ °C}$ koldere, hvis varmeisoleringen i loftet øges fra 150 mm til 450 mm. Til sammenligning så stiger temperaturen i tagrummet med $0,9 \text{ °C}$, hvis isoleringstykkelsen reduceres fra 150 mm til 50 mm. I foråret og efteråret er der mindre temperaturforskelle mellem tagrummet og boligens temperatur, og dermed bliver isoleringstykkelsen også mindre betydningsfuld. Om sommeren er der praktisk taget ingen forskel på temperaturen, da tagrummet vil være varmere end boligen. Dette tyder på, at tagrummets temperatur i stedet i større grad afhænger af solens opvarmning af taget og ventilation i tagrummet end af varmetilskuddet fra huset.

Tabel 4. Månedsmiddeltemperaturer for tagrummet i januar, april, juli og oktober ved forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte $0,5 \text{ h}^{-1}$.

Isoleringstykkelse	Januar	April	Juli	Oktober
50 mm	2,1	10,8	22,4	11,3
150 mm	1,2	10,4	22,5	10,9
450 mm	0,8	10,2	22,5	10,8

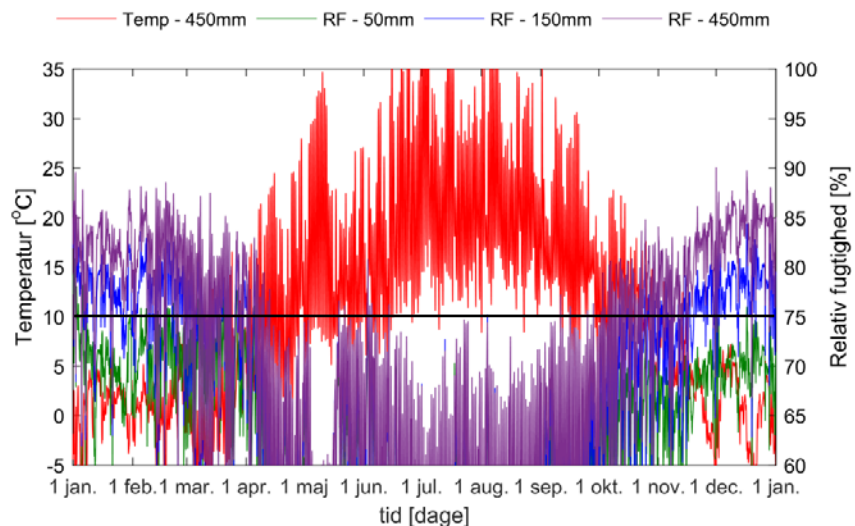
Betydningen af solinfald blev yderligere undersøgt ved at sammenligne temperaturen i tagrummet med den indvendige overfladetemperatur på de to tagflader. Resultaterne i figur 49 for 450 mm isolering, viser tydelig betydningen af

solindfald på de to tagflader, idet den indvendige overfladetemperatur på den solbeskinnede tagflade kan være op til 10-20 °C højere end på tagfladen i skyggesiden i perioden forår til efterår. Om vinteren er der dog ikke den store forskel mellem de indvendige overfladetemperaturer.



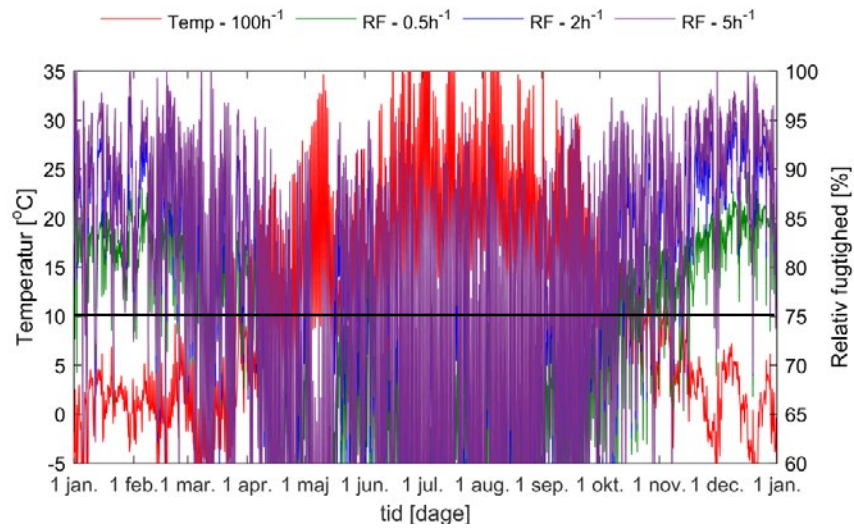
Figur 49. Temperatur i tagrummet og indvendige overfladetemperaturer på de to tagflader i det ventilerede tagrum med 450 mm isolering på loftet og med luftskifte 0,5 h⁻¹.

Figur 50 viser resultaterne for relativ fugtighed og temperatur i tagrummet for de forskellige isoleringstykkelser. Det ses tydeligt, at den relative fugtighed øges med øgede isoleringstykkelser. Stigning i den relative fugtighed er dog størst for en konstruktion med lille isoleringstykkelse (50 mm) til en konstruktion med isoleringstykkelse på 150 mm. Risikoen for skimmelvækst kan opstå i korte perioder forår/efterår, når der anvendes store isoleringstykkelser.



Figur 50. Temperatur og relativ fugtighed i det ventilerede tagrum for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 0,5 h⁻¹.

Resultaterne i figur 51 for forskellige luftskifter i det ventilerede tagrum viser, at et let-ventileret tagrum er den mest fugtsikre konstruktion. Der gøres dog opmærksom på, at der i simuleringen af tagrummet regnes med en tæt dampspærre mod tagrummet, og derfor ingen fugttilførsel fra boligen til tagrummet.



Figur 51. Temperatur og relativ fugtighed i det ventilerede tagrum med 450 mm isolering på loftet og forskellige luftskifter.

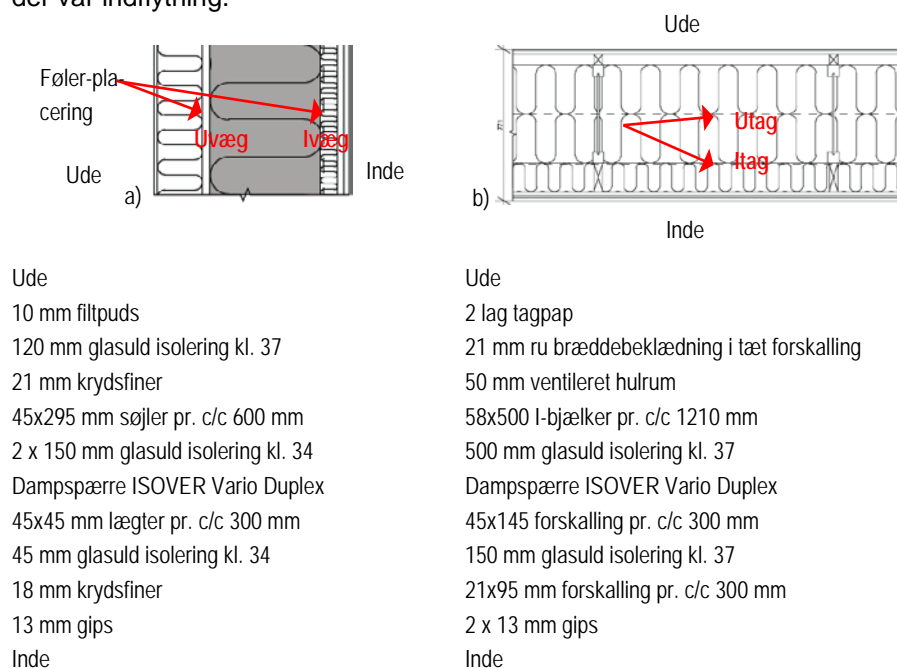
8 Fugtmålinger

Resultaterne fra fugtmålingerne fra ydervægge og tage i hhv. et nybygget hus, en ventileret krybekælder og et efterisoleret ventileret tagrum præsenteres i nærværende afsnit. Afsnittet samler op på de vigtigste resultater og supplerende informationer findes i *Appendiks 2-4*.

8.1 Højsoleret hus i lette konstruktioner

Målingerne er udført i et enfamiliehus på 2 etager opført i 2012/2013. Huset er opført med store isoleringstykkelser og lufttætte konstruktioner. Ydervæggen består af en let ydervæg med 465 mm isolering og tagkonstruktionen er et paralleltag med 650 mm isolering. Konstruktionerne i huset er opbygget som givet i figur 52. I *Appendiks 2. Målinger i ventileret tagrum* er flere målinger og billeder vist.

Følerne for måling af temperatur og fugtighed blev indbygget i væg- og tagkonstruktionen i maj 2013 og målingerne blev startet i oktober 2013, hvor der var indflytning.

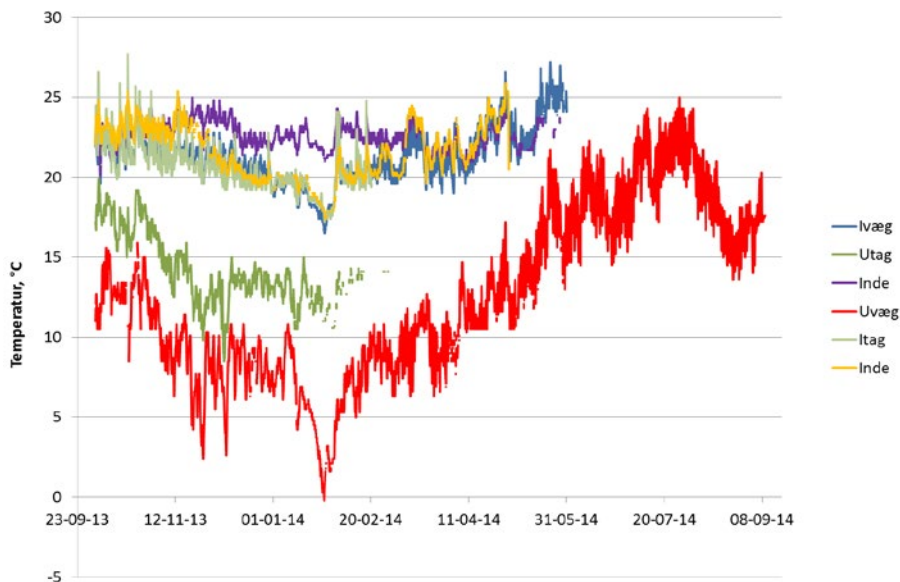


Figur 52. Opbygning og snit i a) ydervæg med 465 mm isolering og b) tag med 650 mm isolering.

Målepunkterne i ydervægge er placeret i det yderste isoleringslag (kaldet Uvæg) op mod krydsfineren og i det indvendige isoleringslag op mod dampspærren (kaldet Ivæg). I taget er målepunkterne placeret omkring midten af det tykke isoleringslag på 2 x 250 mm (kaldet Utag) og i det inderste isoleringslag (kaldet Itag). Placeringen af målepunkter er angivet også i figur 52 (følerplacering).

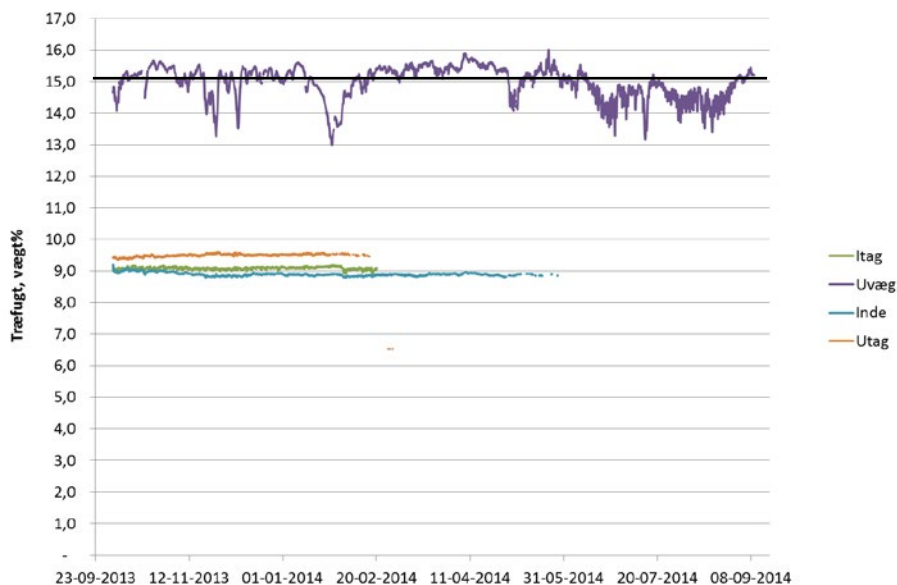
8.1.1 Ydervæg og tag

Figur 53 viser temperaturforløbet i ydervæggen og tagkonstruktionen. For målepunkterne, som er placeret i den inderste del af konstruktionerne, er temperaturerne som forventet næsten sammenfaldende med indeklimaet. Målepunktet yderst i væggen er markant lavere og følger udetemperaturen. Det yderste målepunkt i taget er placeret inde i isoleringen, hvorfor temperaturen ikke er helt så lav som for det yderste målepunkt i væggen.



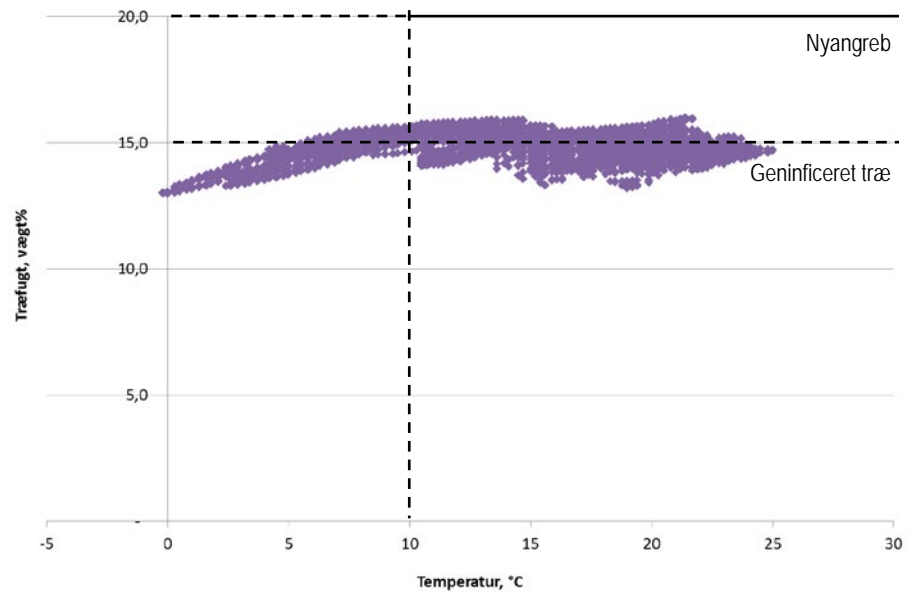
Figur 53. Temperaturer i ydervæg og tagkonstruktion samt i indeklimaet. Den udvendige føler i tagkonstruktionen har ikke logget data fra omkring marts 2014.

Fugtindholdet i indeklimaet ligger meget konstant på 9 vægt% (figur 54), hvilket svarer til en relativ fugtighed på omkring 50 %. Dette er normal indvendig fugtighed. Fugtighed i taget (både ltag og Utæg) viser ca. 9,2 vægt%. Dette er en anelse højere end fugtindholdet inde, men der er ingen væsentlig stigning i vinterperioden. Fugtindholdet yderst i ydervæggen (Uvæg) ligger på 14-16 vægt%, svarende til en relativ fugtighed på 75 %.



Figur 54. Træfugten i ydervæg og tagkonstruktion samt i indeklimaet.

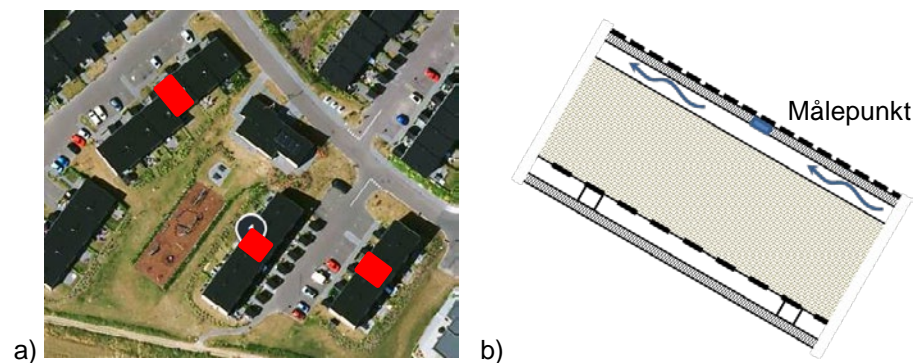
Risikoen for vækst af skimmelsvamp på den udvendige krydsfiner i væggen er vist på figur 55. Det kritiske fugtindhold for træ i forhold ved nyangreb af råd i træ sættes normalt til 20 vægt%. Ved geninficeret træ sættes grænsen til 15 vægt%. Da huset er nyopført, vurderes risikoen for skimmelvækst at være lille.



Figur 55. Sammenhæng mellem temperatur og fugtighed i yderste målepunkt i ydervæggen for vurdering af skimmelrisiko. Stregerne afgrænser det kritiske område.

8.2 Pulltage med ventileret paralleltag

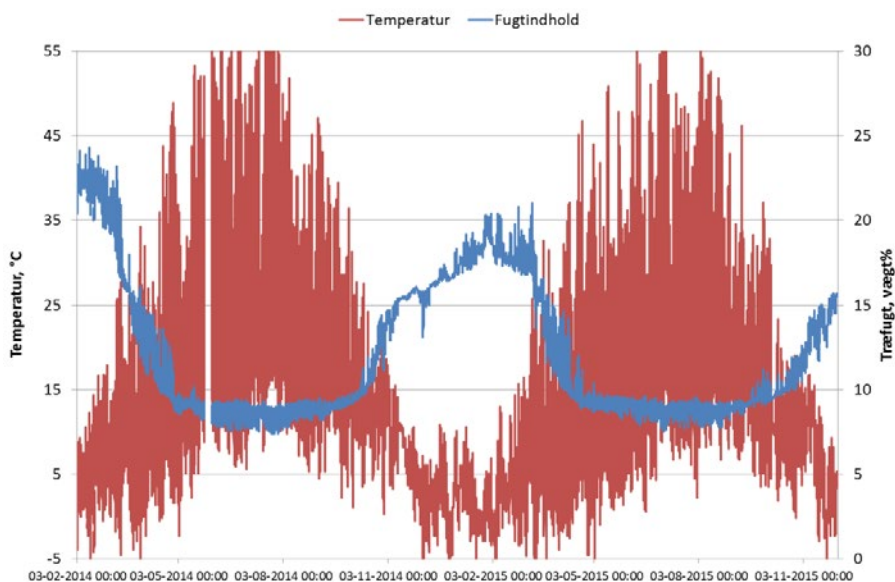
Målingerne er udført i tre tagkonstruktioner i et bebyggelsesområde med flere sammenbyggede boliger. Tagkonstruktionerne er ens opbygget som ventileret paralleltag med træskelet og 360 mm mineraluld isolering ($\lambda = 0,034 \text{ W/mK}$) og har en ensidig hældning på 6° mod nordvest. Taget er beklædt med 2 lag tagpap på 18 mm tagkrydsfiner og en 50 mm ventilationspalte over isoleringen. Målinger af temperatur og relativ fugtighed blev foretaget i den ventilerede tagkonstruktion, hvor føleren sad mellem tagbelægningen og det ventilerede hulrum, se figur 56.



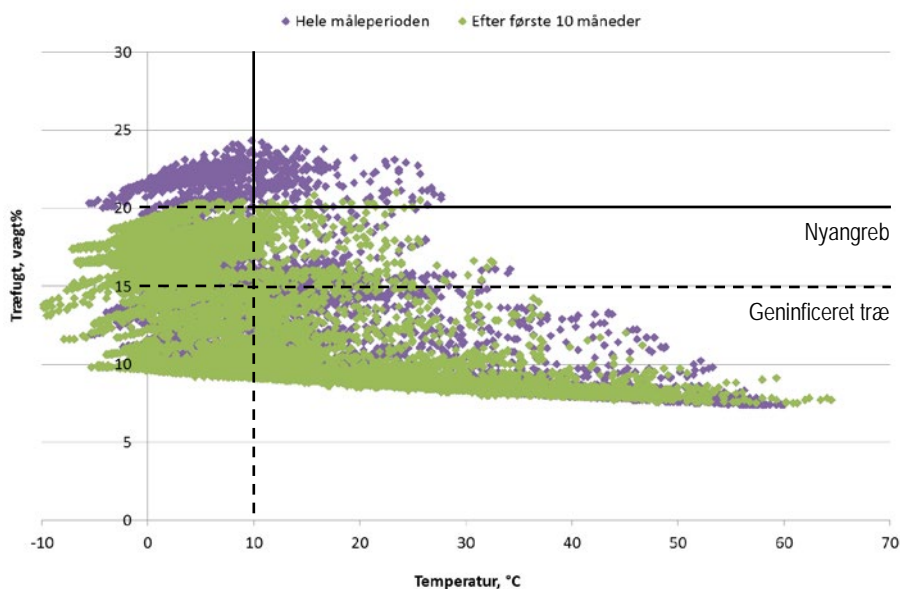
Figur 56. a) Placering af boliger med pulltage med 6° ensidig-hældning mod nordvest. b) Opbygning af pulltag med målepunkt (blå) placeret mellem den ventilerede spalte og tagbelægning.

Temperatur- og fugtforhold i de tre tagkonstruktioner er meget ens, og figur 57 viser målingerne for tagkonstruktionen, hvor forholdene ligger i mellem de målte værdier i de andre to tagkonstruktioner. Temperaturen svinger mellem -5°C og 60°C , og fugtindholdet varierer mellem 5 og 20 vægt%. Når temperaturen er høj, er fugtindholdet lavt og tilsvarende omvendt. I de to andre tagkonstruktioner, der ikke er vist, er det maksimale fugtindhold målt til hhv. 17 og 22 vægt%.

For alle tre tagkonstruktionerne er der perioder med risiko for skimmelvækst, og disse perioder er typisk placeret i foråret og efteråret som for de øvrige tagkonstruktioner, der er undersøgt. For pulntagene var startfugtindholdet meget højt og blev slet ikke matchet i den efterfølgende vinter. Dette tyder på eventuelt indbygget byggefugt. Disse høje startniveauer er med til at forværre antallet af punkter i figur 58 i det kritiske område ved nyangreb. Når kun målinger fra det andet år betragtes (efter 10 måneder), viser figur 58 næsten ingen punkter i det kritiske område.



Figur 57. Temperatur og fugtindhold for en af de tre pulttage med tagflade med 6° hældning mod nord-vest.



Figur 58. Sammenhæng mellem temperatur og fugtighed i pulthead for vurdering af skimmelisiko for forskellige længder af måleperioden. Øverste højre hjørne afgrænset af stregerne er det kritiske område ved nyangreb.

8.3 Ventileret tagrum

Målinger blev foretaget i et ventileret tagrum på 80 m² i et 1½ plans hus fra 1962. Opbygningen af tagkonstruktionen er traditionel med tagsten på lægter og loftet er isoleret med 200 mm isolering, se fx figur 4. Denne isoleringstykkel kan ikke betragtes som højisolering i dette projekt, men mere som en

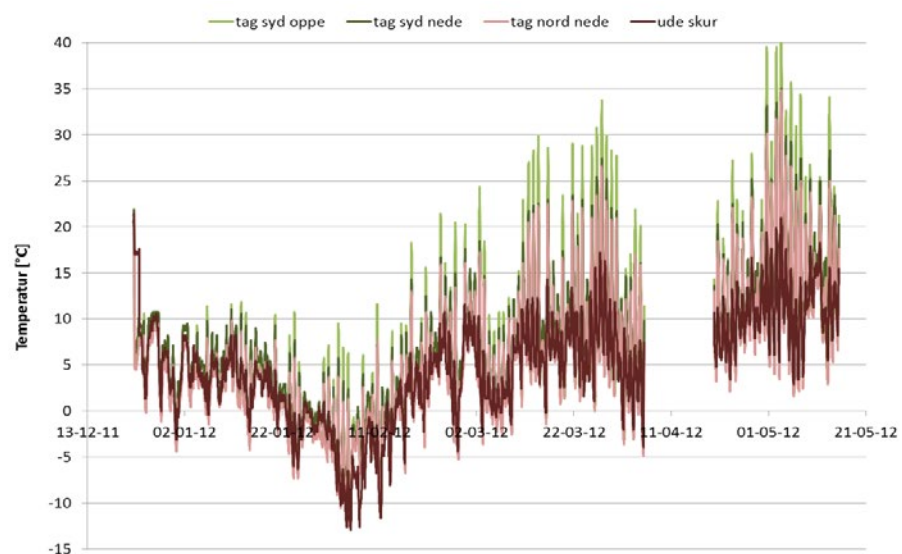
velisoleret tagkonstruktion. Simuleringsresultater og litteratur har dog vist, at en velisoleret tagkonstruktion kan opnå lignende forhold som en højisole-rede tagkonstruktion.

Tagfladerne er orienteret mod nord og syd, og har en hældning på 45°. Målingerne af varme- og fugtforholdene i tagrummet blev udført ved at placere følere på gulvet i tagrummet og på spær lige under tagryggen. Målinger af temperatur og relativ fugtighed blev foretaget i perioden december 2011 til maj 2012. I *Appendiks 3. Målinger i nyt enfamiliehus* kan fotos af huset og måleudstyr samt flere resultater ses.

Resultater for temperaturer i tagrummet og ude fremgår af figur 59. For målepunkterne på den nordlige tagflade er de øverste målepunkter 1-10 °C varmere end det nederste. Tilsvarende gør sig gældende for de sydvendte målinger hvor forskelle er 1-6 °C, hvor forskellen er størst om sommeren. For de øverste målepunkter er temperaturen sammenfaldende.

Det ses, at der er meget store temperatursvingninger, når solen opvarmer taget. Eksempelvis stiger temperaturen i tagrummet i løbet af et par timer med 10 °C i vinteren og omkring 20 °C om foråret. Det betyder, at der er store døgnvariationer i temperaturer i tagrummet, som overstiger variationerne i udeluften på grund af solindfaldet på taget.

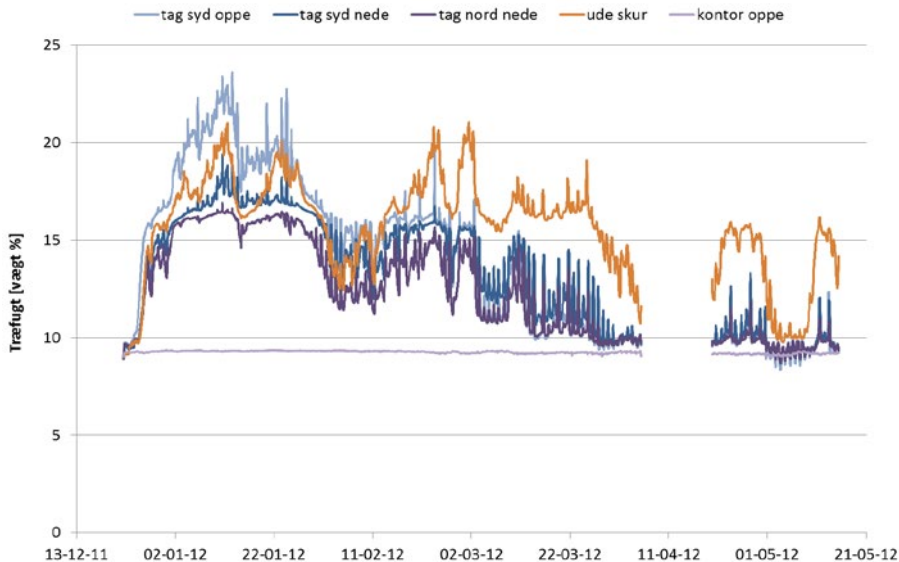
Om vinteren kan temperaturen i tagrummet nå ned på -10 °C, men den er typisk lidt højere end udetemperaturen. Det skal bemærkes, at udetemperaturen er målt i et uopvarmet skur, som er et par grader varmere end udetemperaturen, hvorfor tagrummets temperatur ser koldere ud en udetemperaturen på figur 59. Om sommeren bliver temperaturen i tagrummet væsentlig højere end udeluften, hvor temperaturen er registreret op mod 50 °C ved sol og udetemperaturer på 25-30 °C. Desuden ses det, at temperaturen øverst i tagrummet stiger mere end i bunden af tagrummet, hvilket er mest udbredt om sommeren, når solen opvarmer taget.



Figur 59. Temperaturmålinger i tagrum og uopvarmet skur fra december 2011 til maj 2012.

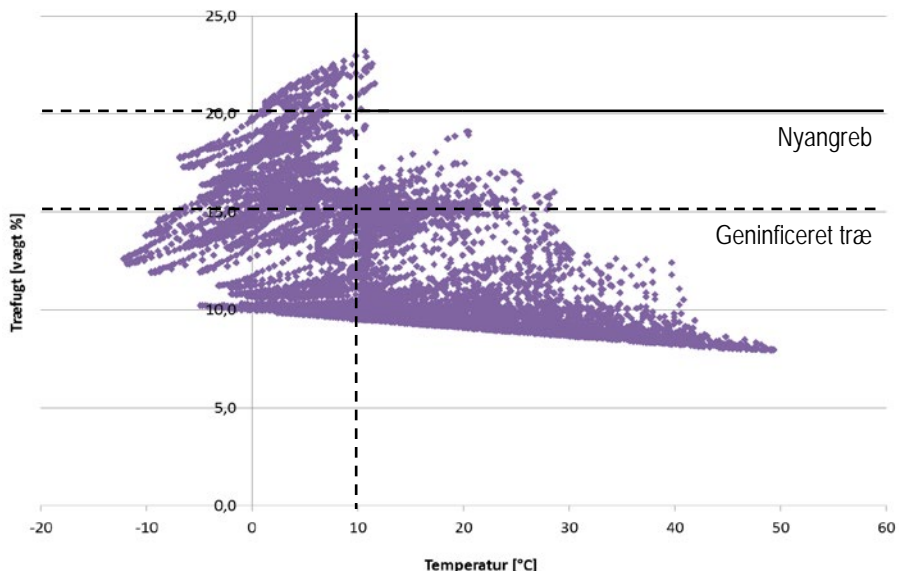
Fugtmålingerne på figur 60 viser, at fugtindholdet er højere om vinteren end om sommeren, men også at temperaturvariationerne påvirker fugtmålingerne. Det ses, at fugtniveauet er højere i et ikke opvarmet skur i perioden februar til maj sammenlignet med tagrummet. Dette skyldes, at solen opvarmer tagrummet og dermed tørrer fugten ud, hvilket kan ses i figur 59, hvor forskellen mellem temperaturen i skuret og tagrummet øges fra februar og frem.

I vinterperioden ligger fugtindholdet lidt højere i tagrummet end i skuret, hvilket kan tyde på, at der tilføres fugt fra huset til tagrummet. Fugtindholdet i indeluften er målt 4 steder og viser en stabil værdi på omkring 9 vægt%, som svarer til normalt tørt indeklima. I januar hvor temperaturen er under 10 °C er fugtindholdet i tagkonstruktionen over 17 vægt%, men falder ned til under 15 vægt% fra marts og frem, det er også i denne periode at temperaturen stiger i tagrummet.



Figur 60. Fugtmålinger i tagrum, uopvarmet skur og kontor i huset fra december 2011 til maj 2012.

Figur 61 viser risikoen for skimmel og rådangreb øverst i tagkonstruktionen. Det interessante er at se på, hvornår der optræder høje fugtindhold over 15 og 20 vægt%. Med undtagelse af et par enkelte værdier sker det ved temperaturer under 10 °C. Dette viser, at der ikke bør være skimmelsvamp i taget, hvilket heller ikke er set ved visuel inspektion.

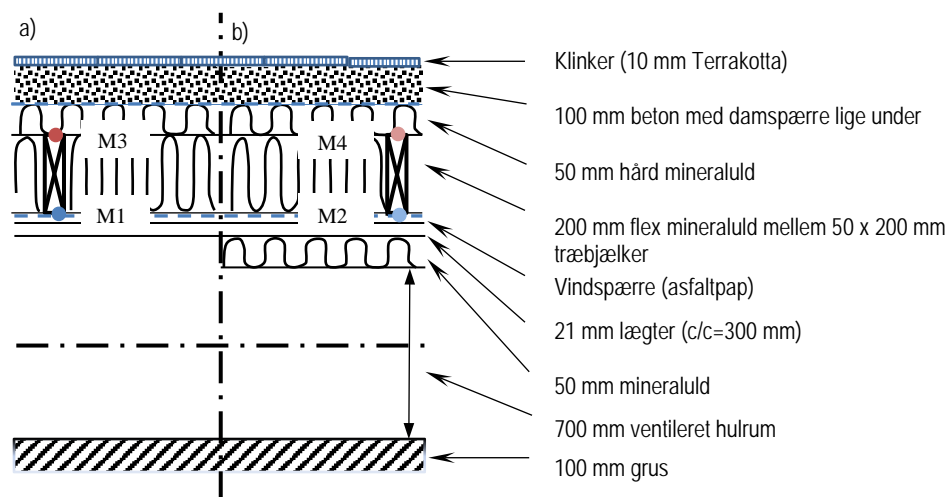


Figur 61. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træfugt i vægt% i top af tagfladen mod nord.

8.4 Krybekælder

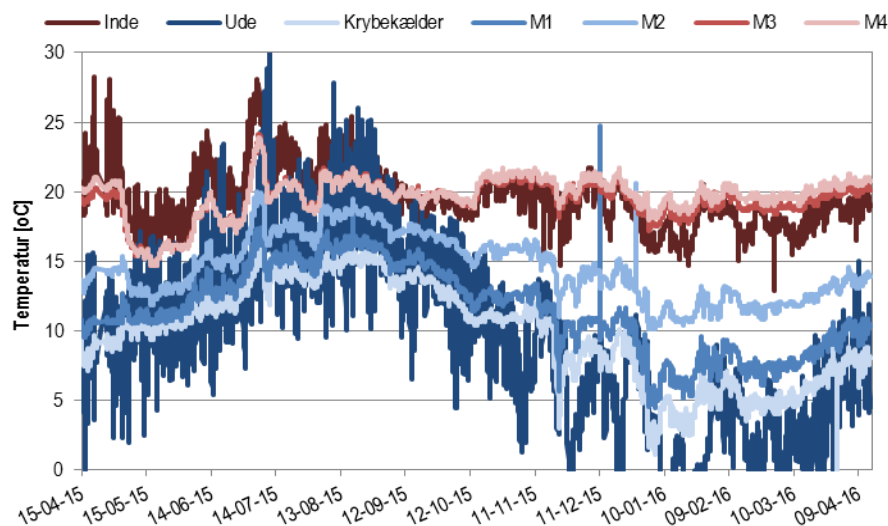
Målingerne er udført i et enfamiliehus opført over flere år og taget i brug i 2014. Temperatur- og fugtighedsfølere er monteret 15. marts 2015 fire steder i dækket over krybekælderen, i krybekælderen, og i huset. Måleresultaterne er vist for perioden 15/4/2015-15/4/2016.

Konstruktionen er oprindelig opbygget som angivet på figur 62. For at undersøge betydningen af de nederst 50 mm isolering mod krybekælder, er disse fjernet i den ene måling. Der er placeret to temperatur- og fugtighedsfølere i toppen af isoleringen ved overkanten af bjælkerne, og yderligere to på undersiden af bjælkerne men over vindpappen. *Appendiks 4. Målinger i ventileret krybekælder* indeholder billeder fra opsætningen af måleudstyr.



Figur 62. Opbygning og snit i krybekælder med hhv. 50 mm isolering på undersiden af vindpappen. Målepunkter M2 og M4 er med 50 mm isolering mod det ventilerede hulrum, mens målepunkter M1 og M3 er uden de nederste 50 mm isolering. Det ventilerede hulrum er ca. 70 cm højt.

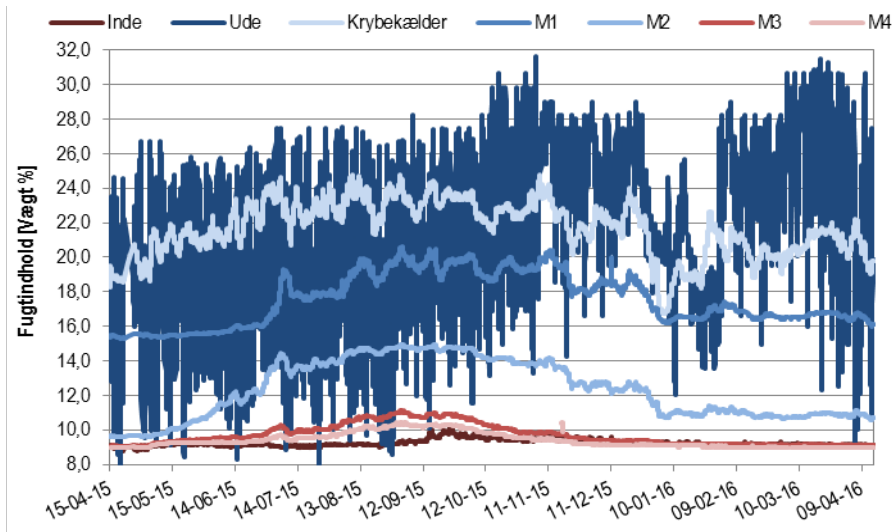
Temperaturprofilerne i figur 63 viser, at temperaturen for målepunkterne placeret øverst i konstruktionen (M3 og M4) svarer til forholdene i det overliggende køkken. Der er lidt større udsving på temperaturen i det overliggende rum. For de nederste målepunkter der er med og uden isolering (M2 og M1), er temperaturforløbet for det uisolerede målepunkt (M1) placeret mellem temperaturerne for målepunkterne med isolering (M2) og krybekælderens forhold (Krybekælder).



Figur 63. Temperaturer i krybekælder, konstruktionen og ude- og indeklime for perioden 15/4/2015-15/4/2016.

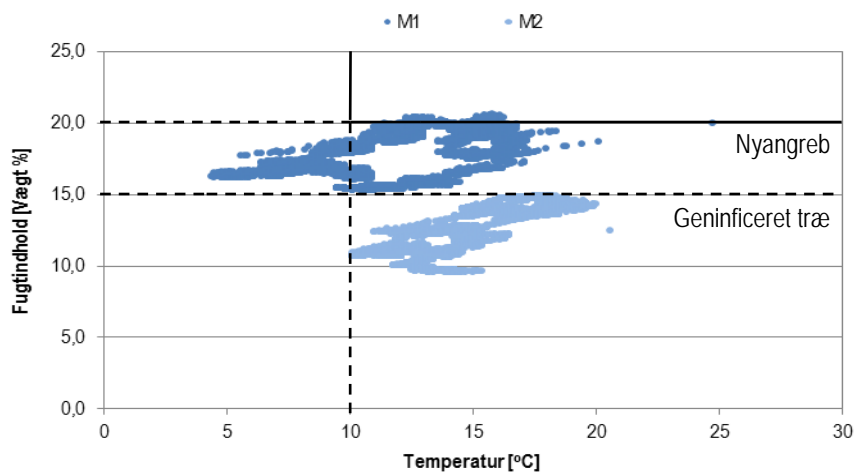
Fugtindhold viser også stort sammenfald mellem målepunkterne i boligen og de øverste målepunkter i isolering ved overkanten af bjælkerne. Her ligger målingerne omkring 9-10 vægt% træfugt, som vist i figur 64. Ved undersiden af bjælkerne ligger fugtindholdet for det uisolerede målepunkt mod krybe-

kælderen over 15 vægt% i hele perioden, og under 15 vægt% i samme periode, når der isoleres på undersiden af dækket mod krybekælderen. Især er det sommeren og sensommeren, der er kritisk for krybekælderen, hvor træfugten stiger til et kritisk niveau omkring 20 vægt%. I foråret ses rimelige konstante forhold omkring 15 vægt% for den uisolerede fugtmåler.



Figur 64. Fugtforholdene i krybekælder, konstruktionen og ude- og indeklime for perioden 15/4/2015-15/4/2016.

Risikoen for råd og trænedbrydende svampe samt vækst af skimmel svamp er vist i figur 65, hvor betydningen af isoleringen ses tydeligt når læsningerne sammenlignes. I flere perioder når træfugten op omkring 20 vægt% for det uisolerede målepunkt mens temperaturen er over 10°C.



Figur 65. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træfugt i vægt% i nederste målepunkter i dækket (M1 – uden isolering og M2 – med isolering mod krybekælderen) for perioden 15/4/2015-15/4/2016.

9 Diskussion

På baggrund af danske, norske, og svenske litteraturstudier, simuleringer af typiske konstruktioner, samt temperatur og fugtmålinger i klimaskærms konstruktioner som kan betragtes som højisolerede, diskuteres det, om øgede isoleringstykkelser resulterer i kritiske fugtforhold i konstruktionerne i forhold til udviklingen af skader som skimmelsvamp, råd og frostsprængninger. Af-snittet er delt op i klimaskærmens enkelte dele, som er tag, ydervæg og kry-bekælder.

9.1 Tage

I højisolerede tagkonstruktioner øges varmeisoleringen fra fx 150 mm til 450-500 mm. For sommerperioden giver den øgede isolering give anledning til lidt højere temperatur, men det meste af varmen forsvinder via ventilation eller gennem tagfladen. Typiske er det ikke om sommeren der opstår kritiske forhold med fugtproblemer, da opvarmningen og ventilering af tage er med til at holde dem tørre. Om vinteren er situationen anderledes, da der er et mindre varmetab fra huset til tagrummet eller gennem tagkonstruktionen. Dermed kommer temperaturen i tagets yderste dele tæt på udetemperatur.

For de undersøgte tagkonstruktioner optræder de højeste fugtindhold i vintermånederne. Om sommeren falder fugtindholdet, hvilket blandt andet skyldes, at solen opvarmer taget og muliggør udtørring. Til trods for at fugtigheden er høj om vinteren, så er det ikke kritisk, da temperaturen oftest er lav samtidigt. De kritiske perioder for ventilerede tagkonstruktioner optræder om foråret og efteråret. Her vil den relative fugtighed være omkring 80 %, mens temperaturen typisk stiger til over 10 °C. De største ændringer i fugtindhold sker, når små isoleringstykkelser på 50-100 mm øges til isoleringstykkelser på 150-200 mm, i modsætning til at øge isoleringstykkelser fra 150-200 mm til de store isoleringstykkelser over fx 500 mm. Simuleringerne viser, at reduceres ventilationsmængden, så øges fugtindholdet i tagkonstruktionen, hvis varm fugtig luft strømmer op i tagkonstruktionen fra boligen, og ikke kan optages af ventilationsluften i tagkonstruktionen.

Ventileret tagrum

De norske beregninger har vist, at de største ændringer sker når helt små isoleringstykkelser forøges. Ændringer i isoleringstykkelserne fra godt isoleret til højisoleret blev ikke vurderet til at være den parameter med størst betydning for fugtforholdene, hvorimod luftskiftet i tagrummet samt fugtbelastningen fra boligen gennem utætheder i dampspærren vurderes til at have stor betydning. En kombination af flere faktorer vil kunne forværre situationerne mere end, hvis der kun ses på en enkelt faktor som fx isoleringstykkelsen.

Sammenligninger af svenske beregninger og målinger viser gode overensstemmelser mellem temperatur og relativ fugtighed, men simuleringerne var følsomme over for det givne luftskifte af tagrummet. En god overensstemmelse er også opnået i de danske målinger og beregninger i et ventileret tagrum. Simuleringerne indikerede, at undlades ventilationen af tagrummet opnås de laveste relative fugtigheder i tagrummet, hvilket ikke kan anbefales, da det ikke kan udelukkes, at der kommer fugt fra underliggende boliger

på grund af utæthed ifm. dampspærren. Det er derfor vigtigt, at finde en god balance mellem for lidt og for meget ventilation, idet for store luftskifter heller ikke vil være godt for tagrummet.

I begge tilfælde ses det, at de kritiske tidspunkter i forhold til relativ fugtighed for tagkonstruktionen er fra omkring oktober til april, hvilket kan betragtes som de kolde måneder af året. Det er dog kun i foråret og efteråret, at temperaturen har et niveau, hvor det sammenlignet med den relative fugtighed når et kritisk niveau. Om sommeren kan temperaturen nå op på 50 °C, hvilket er med til at udtørre tagrummet, mens temperaturen kan nå ned omkring -10 °C om vinteren. Lignende resultater er opnået ved målinger og beregninger af et ventileret tagrum.

Målinger i et ventileret tagrum med 200 mm isolering viser, at fugtindholdet stiger i vinterperioden, men at det ret hurtigt tørrer ud igen, og i hele sommerperioden er fugtindholdet næsten som inde i huset. Det lave fugtindhold om sommeren skyldes i meget stor grad, at taget varmes op af solen. Det ses, at temperaturen kan stige 10-25 °C på nogle få timer, og at temperaturen kan nå op på 45 °C. Fugtforholdene i taget når allerede ned på 15 vægt% i marts, hvorefter det falder til et niveau svarende til boligens. Det vil sige, at solindfaldet på tagfladen medvirker til at give højere temperatur i tagrummet og dermed udtørring. Til sammenligning er fugtindholdet om vinteren i tagrummet omkring 15-20 vægt% svarende til udeklimaets fugtindhold.

For et ventileret tagrum tyder det således ikke på, at en øget isoleringstykelse vil have negativ indvirkning på fugtforholdene i tagkonstruktionen. Det er vigtigt at være opmærksom på nogle af de andre faktorer, som kan have større betydning som lækager i dampspærren, som tillader fugtig luft fra boligen at strømme op i tagrummet samt ventilationsmængden af tagrummet.

Paralleltage

Paralleltage er undersøgt primært med fokus på undersiden af undertage af krydsfiner. Svenske beregningerne har vist, at ventilationen af konstruktionen er en vigtig faktor for udviklingen af fugtforholdene. Ved lave luftskifter (30 h⁻¹) om sommeren vil temperaturen stige i hulrummet og den relative fugtighed falde, hvorved der vil komme færre perioder med kritiske fugtforhold sammenlignet med store luftskifter (300 h⁻¹). Det blev undersøgt, om en udvendig isolering af hulrummet kunne forbedre paralleltaget, men det tyder ikke på at have en signifikant betydning. Det er stadigvæk i de koldere måneder, hvor konstruktionen er udsat for kritiske forhold. Simuleringerne udført for typiske danske konstruktioner har samme tendenser som de svenske, og det tyder på, at luftskiftet har stor betydning for fugtforholdene i konstruktionen. Simuleringer indikerer at et moderat luftskifte (5-20 h⁻¹), i modsætning til et meget stort eller intet luftskifte, reducerer risikoen for skimmelvækst.

Tre ens pulttage fik målt temperatur og relativ fugtighed i krydsfineren under tagpappen, og der blev målt over 20 vægt% i to af tagkonstruktionerne om vinteren. På samme tidspunkt var temperaturerne lave. For alle tagkonstruktionerne var der perioder med risiko for skimmelvækst, men disse er typisk placeret i foråret og efteråret som for de øvrige tagkonstruktioner, der er undersøgt. For pulttagene var start fugtindholdet dog meget højt og blev slet ikke opnået samme niveau i den efterfølgende vinter. Dette kan skyldes byggefugt. Når kun målinger fra det andet år betragtes (efter 10 måneder), var der ingen risiko for skimmelvækst.

Målingerne udført i et paralleltag med 650 mm isolering, hvor målepunktet var placeret omtrent midt i isoleringen, viste ingen tegn på ekstreme fugtforhold, tværtimod.

Generelt for paralleltagene er de korte perioder med risiko for skimmelvækst i foråret og efteråret, hvor temperaturen enten stiger eller falder samtidig med, at fugtforholdene også ændres modsat. Resultaterne om paralleltage giver klare indikationer af, at tagløsningerne kan fungere, såfremt de er dimensioneret og udført korrekt, herunder at dampspærren er tæt, og det fornødne luftskifte etableres i ventilerede konstruktioner.

Flade tage

Resultaterne for de flade tage minder meget om dem opnået for paralleltage, men hvor den varme tagkonstruktion synes meget robust over for fugtpåvirkninger indefra, så er det kolde tag mere følsomt over for fugtpåvirkninger, idet der ofte er bærende konstruktioner af organisk materiale. Ud fra litteraturstudier og beregninger er der ikke noget, der indikerer, at der bliver større risiko for kritiske fugtforhold i konstruktionen ved isoleringstykkelser på 400-600 mm end ved 100-200 mm, så længe konstruktion er udført korrekt. For det varme tag er det en forudsætning, at konstruktionen holdes tør både under udførelse og i brug, da indtrængen af fugt ikke let kan tørre ud på grund af de diffusionstætte tagdækninger og dampspærre. For det kolde tag vil der være en risiko for skimmelvækst, når det bærende system består af organiske materialer som træ. Især kan fugtig rumluft trænge op i taget fx på grund af utætte samlinger eller gennemføringer. Denne fugtige luft bliver kølet af i takt med, luften når længere ud i isoleringslagene og kan kondensere på kold overflader.

For det kolde tag gælder det samme som for paralleltaget, at meget store luftskifter giver en forøgelse af den relative fugtighed, mens moderate luftskifter holder fugtigheden nede om sommeren. Risikoen for skimmelvækst vurderes desuden til at være meget lille ved korrekt anvendelse og installation af dampspærren, når der udelukkende ses på en øgning af isoleringstykkelsen.

9.2 Ydervægge

På baggrund af svenske og norske erfaringer fra litteraturstudier, samt simuleringer og målinger udført til denne rapport vurderes det, at de øgede isoleringstykkelser i yderst begrænset omfang påvirker ydervægskonstruktioner i negativ retning i forhold til kritisk fugtniveau.

Lette ydervægge

De norske studier peger på, at andre faktorer har større betydning for fugtforholdene fx fugttilskud fra indeklimaet og diffusionsmodstanden af vind- og dampspærre frem for en øgning af isoleringstykkelsen. Når isoleringstykkelser overstiger ca. 250 mm, tyder det på, at fugtforholdene ikke påvirkes af den øgede isolering. Det vil sige, at der ikke er den store forskel i fugtindholdet ved fx 250 mm og 400 mm isolering, og at perioden, hvor der er risiko for skimmelvækst, kun er øget i begrænset omfang fra fx 250 mm til 400 mm isolering sammenlignet med 150 mm isolering. Det reducerede varmetab gennem konstruktionen reducerer dog udtørringspotentialet og er med til at holde konstruktionen fugtig i længere tid.

For ydervægge af træskelet med ventileret facadebeklædning, har slagregn ikke stor indvirkning på risikoen for fugtskader på den indvendige side af vindspærren. Det er vigtigt, at der sikres et tilstrækkelig stort luftskifte bag facadebeklædningen for at fjerne den indtrængende fugt. Et ventileret hulrum bag facaden må betragtes som en god sikkerhed, mod fugt som trænger gennem regnskærmen og dermed kan ledes videre ind i konstruktionen.

Målinger i en træskelet ydervæg med 460 mm isolering viser, at fugtindholdet i den yderste krydsfiner er på 14-16 vægt%, hvilket svarer til ca. 75 % relativ fugtighed. Målingerne ligger nogenlunde på niveau med de beregnede resultater fra Sverige, hvor der også var inkluderet slagregn. Hvis den relative fugtighed i den yderste del af konstruktionen holdes under 75 %, er der ingen risiko for vækst af skimmelsvamp. Dette er kun muligt, hvis konstruktionen er udført håndværksmæssigt rigtig, og har en tæt vind- og dampspærre. Fra tidligere danske studier var det tydeligt, at huller i vindspærren medførte skimmelsvamp omkring hullerne til sammenligning med konstruktionerne, hvor der ikke var utætheder, og ingen skimmelsvampevækst blev registreret.

Beregningerne af typiske danske lette ydervægge indikerer, at en øgning i isoleringstykkelsen medfører en mindre stigning i relativ fugtighed om vinteren, hvor temperaturen er lav. En øgning i isoleringstykkelsen vil forlænge perioden om foråret og efteråret en smule, hvor der kan opstå kritiske temperatur og relative fugtheder, som kan give anledning til skimmelvækst.

Tunge ydervægge

For tunge ydervægge af tegl, porebeton eller andre tunge uorganiske materialer, er risikoen for skimmelvækst og råd minimal. Øgningen af isoleringen i disse konstruktioner har ikke betydning for fugtindholdet. En løsning med en slankere ydervæg og ventilationsspalte giver en bedre udtørring af murværket, men denne ventilationsspalte kan ligeså godt fyldes op med et vandafvisende isoleringsmateriale og derved opnå en endnu lavere U-værdi, eller spalten kan udelades for at resultere i en slankere løsning total set.

En udfordring med murværk er frostsprængninger i det yderste af teglstenen. Årsagen til frostsprængninger er, at vandet i det yderste af murværket ikke tørrer ud, inden det fryser til is. Vandoptaget i murværket afhænger af murværkets egenskaber og udfyldning af fuger, men forekommer også ved høje slagregns mængder, hvor murværkets evner til at optage vand er utilstrækkelige og vandet fx vil løbe ned på bagsiden af formuren. Slagregnsbelastninger på ydervægge kan i nogle tilfælde reduceres ved at bygge med store udhæng på taget. Den beregnede høje relative fugtighed på bagsiden af murværket i vinterperioden tyder på, at vand trænger igennem murværket. På baggrund af de udførte simuleringer er der ikke væsentlige stigninger i antallet af timer med temperatur under 0 °C og maksimal vandindhold i det yderste lag af murværket. Det betyder, at hvis konstruktionerne ikke har frostsprængninger i dag, forventes de heller ikke at have det, hvis isoleringstykkelsen øges. Om der så rent faktisk opstår frostsprængning i murværket er svært at forudsige, da det også afhænger af kvaliteten af mursten, vejrforhold etc. For mursten er der et kritisk vandmætningsindhold, som skal overskrides, for at der er risiko for frostsprængninger, men dette kritiske vandmætningsindhold er blandt andet afhængigt af materialet, og kræver derfor laboratorieundersøgelser.

9.3 Krybekældre

Til forskel fra de øvrige konstruktioner, så opstår de kritiske fugtforhold i krybekældre om sommeren eller i overgangsperioder og især om efteråret, hvor den varme fugtige luft køles ned i krybekælderen, hvorved den relative fugtighed stiger. De norske undersøgelser viste, at en forøgelse af isoleringstykkelsen vil have negativ påvirkning på fugtforholdene, som vil nærme sig de kritiske 80 % relativ fugtighed samtidig med at temperaturen overstiger 10 °C. De norske undersøgelser tyder på, at store isoleringstykkelser på 500

mm vil medføre en øget risiko for skimmelvækst. Dette skyldes især en længere periode med kritiske fugtforhold i krybekælderkonstruktioner ved øgning af isoleringstykkelse.

På baggrund af målingerne udført i en ventilerede krybekælder med 250 mm isolering, hvor effekten af 50 mm isolering placeret på undersiden af dækket viste at temperaturen stiger med 3-5 °C på bjælkerne over isoleringen, og at træfugten i bjælkerne mod krybekælderen er omkring 5 vægt% lavere end, hvis der ikke opsættes isolering. Trækonstruktionen i den isolerede løsning holder sig i hele måleperioden under 15 vægt%, hvilket svarer til ca. 75 % relativ fugtighed, hvorfor løsningen vurderes til at være en sikker løsning. Fra målingerne ses en tydelig stigning af fugtindholdet fra foråret op gennem sommeren og henover efteråret, men forholdene overstiger ikke de kritiske forhold. Til forskel har løsningen uden 50 mm isolering fra juni til december 2015 et fugtniveau, som svinger mellem 18 og 20 vægt%. Dette niveau er både kritisk for angreb af skimmelsvamp og råd, og det vurderes at tid og temperatur, hvor dette kan forekomme, er til stede. Der bemærkes ligeledes, at fugtindholdet målt i krybekælderen når op til 15 vægt% over sommer. Perioden med et fugtindhold på 15 vægt% er dog kort.

Sammenholdes de norske simuleringer med de danske målinger, er der god overensstemmelse på resultaterne for den relative fugtighed for løsninger med 200-300 mm isolering, når det tages i mente at konstruktionerne er placeret i forskellige udeklimaer. På baggrund af de norske studier og målingerne udført i den ventilerede krybekælder med 200 mm hhv. 250 mm isolering, har resultaterne vist, at gennemtænkte krybekælderløsninger, fx ved anvendelse af uorganisk isolering under bjælkerne, vil kunne sikre acceptable fugtforhold i konstruktionen. Dermed kan det undgås, at der optræder forhold, der er gunstige for vækst af skimmelsvampe eller begyndende rådangreb.

9.4 Perspektivering

På baggrund af resultaterne fra undersøgelsen af fugtforholdene i højisolerede konstruktioner, så bør det overvejes om nedenstående faktorer skal undersøges nærmere, for at opnå mere viden om de faktorer som kombineret med en øget isoleringstykkelse kan give fugtrelaterede skader i konstruktionerne:

- Størrelsen på ventilering af konstruktionerne har i følge litteraturstudier og simuleringer vist sig at væsentlig betydning for udviklingen af fugtforholdene i de yderste dele af konstruktionerne.
- Maksimal tilladelig utæthed af dampspærre / maksimal tilladelig fugtstrøm ud i konstruktionen. I litteraturstudierne er det fundet frem til, at fugten i indeklimaet har stor betydning, men tætheden af dampspærren har blandt andet betydning for, hvor meget fugtig luft der strømmer ud i konstruktionen.
- Fryse-tø analyser af murværk er et område som ofte nævnes som en følgeskade af øget isolering og koldere murværk. Frostskader kan være svære at vurdere ud fra simuleringer, da skaderne hænger sammen med materialets egenskaber og især vandoptaget i den yderste del af facaden.

Referencer

Andersen, T. (2000). Fugt i træskeletvægge – Korttidsmålinger og tilstanden efter 20 år. SBI meddelelse 131, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm

Andersen, T., Fynholm, P., Hansen, M.H.; & Nicolajsen, A. (2002). Fugtsikre træfacader – fugtindhold i højisolerede træfacader. By og Byg Dokumentation 025. Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm

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

Dansk Standard. (2013). Byggekomponenter og -elementers hygrotermiske ydeevne: Indvendig overfladetemperatur for at undgå kritisk overflade- og mellemrumskondens – Beregningsmetode (DS/EN ISO 13788:2013). Charlottenlund

Falk, J., & Sandin, K. (2013). Ventilated rainscreen cladding: Measurements of cavity air velocities, estimation of air change rates and evaluation of driving forces. *Building and Environment* 59 (2013), pp. 164-176

Geving, S., & Holme, J. (2010). Høyisolerte konstruksjoner og fukt. Analyse av fukttekniske konsekvenser av økt isolasjonstykkelse i yttervegger, tak, kryperom og kalde loft. Sintef prosjektrapport 53, Trondheim, Norge

Gullbrekken, L., Geving, S., Time, B., Andresen, I., & Holme, J. (2015). Moisture conditions in well-insulated wood-frame walls. Simulations, laboratory measurements and field measurements, *Wood Material Science & Engineering*, 10:3, pp. 232-244

Hagentoft, C.-E., & Kalagasidis, A.S. (2014). Moisture safe cold attics – Assessment based on risk analysis of performance and cost, 10th Nordic Symposium of Building Physics 2014, pp. 1366-1373, Lund, Sweden

Hägerstedt, S. O. (2012). Fuktsikre träkonstruktioner, Vägledning för utformning av träbaserede väggar, Department of Building Physics, Lund University, Report TVBH-3052, 2012

Kalagasidis, A.S. (2004). HAM-Tools - An Integrated Simulation Tool for Heat, Air and Moisture Transfer Analyses in Building Physics. Doctoral thesis. Chalmers University of Technology

Knudsen, H.N., & Krag, J. (2014). Evaluering af energiklasserne 2015 og 2020 i BR10. Oplevelser blandt ejere af nye lavenergi-enfamiliehuse og erfaringer blandt aktører i byggebranchen. SBI 2014:07. Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København

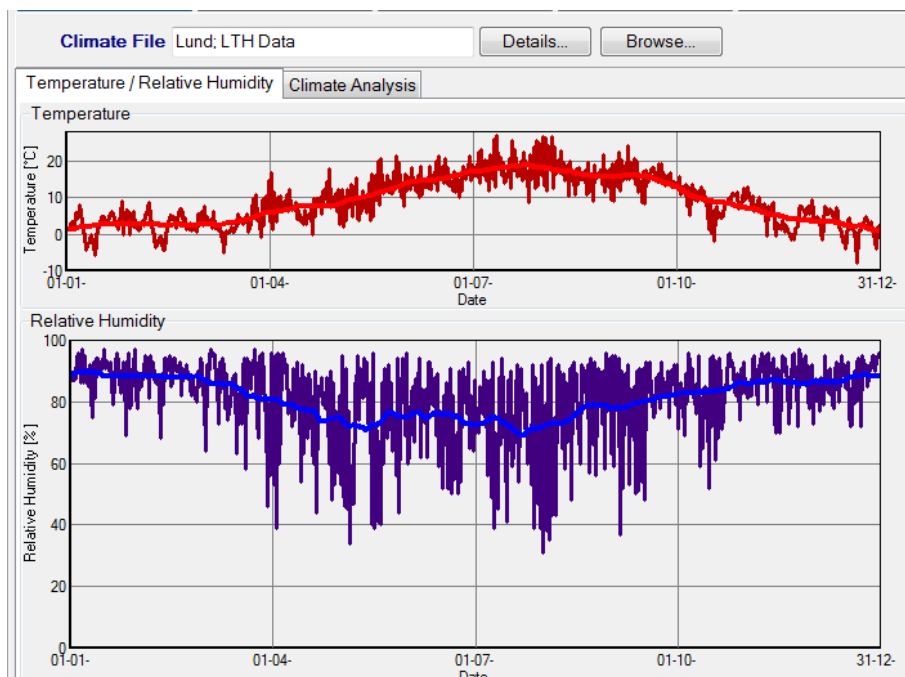
Mundt-Petersen S.O. (2013). Moisture safety in wood frame walls – a blind evaluation of the hygrothermal calculation tool WUFI 5.0 using field measurements and determination of factors affecting the moisture safety. Licentiate thesis, Report TVBH-3059. Lund University, Sweden

- Mundt-Petersen, S.O. (2013a). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house on the west coast of Sweden. Report TVBH-3054. Lund University, Sweden
- Mundt-Petersen, S.O. (2013b). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a multifamily wooden house on the north-eastern coast of Sweden. Report TVBH-3055. Lund University, Sweden
- Mundt-Petersen, S.O. (2013c). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house in the Swedish town of Växjö. Report TVBH-3056. Lund University, Sweden
- Mundt-Petersen, S.O. (2013d). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a multifamily wooden house in the Swedish town of Växjö. Report TVBH-3057. Lund University, Sweden
- Mundt-Petersen, S.O. (2013e). Comparison of hygrothermal measurements and calculations in a single-family wooden house in the Swedish municipality of Upplands-Bro. Report TVBH-3058. Lund University, Sweden
- Mundt-Petersen S.O., & Harderup, L.-E. (2015). Predicting hygrothermal performance in cold roofs using a 1D transient heat and moisture calculation tool. *Building and Environment* 90 (2015), pp. 215-231
- Møller, E.B. (2012). Efterisolering af småhuse – byggetekniske løsninger (SBI-anvisning 240). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København
- Møller, E.B., Brandt, E., & Pedersen, E.S. (2016). Småhuse – klimaskærm (SBI-anvisning 267). Statens Byggeforskningsinstitut, Aalborg Universitet, København.
- Nielsen, A., & Andersen, N.E. (1982). Fugt- og varmetekniske målinger i tage og ydervægge: SBI-forsøgshus. SBI-rapport, nr. 134, Statens Byggeforskningsinstitut, Hørsholm
- Samuelson, I. (1995). Fuktbalans i kalle vindsutrymmen, Betydelsen av ventilation och val av isoleringsmaterial. SP rapport 1995:68, SP, Byggnadsfysik., Borås, Sverige
- Wittchen, K.B., Johnsen, K., & Grau K. (2008). BSim User's Guide. Danish Building Research Institute, Hørsholm, Denmark
- WUFI. (2009a). WUFI 5.0 Manual. Release: 5.0.1.521.DB.24.70. Fraunhofer Institute for Building Physics. Holzkirchen. Germany
- WUFI. (2009b). WUFI 5.0 Material database. Release: 5.0.1.521.DB.24.70. Fraunhofer Institute for Building Physics. Holzkirchen. Germany

Appendiks 1. Beregningsresultater

Opsætning i WUFI Pro

For at undersøge varme- og fugtforhold i højsolerede konstruktioner er der udført 1D simuleringer i WUFI Pro. I simuleringerne er udeklimadata for Lund anvendt, da det er et udeklima svarende til danske forhold, se figur 66.



Figur 66. Illustration af udeklimadata for Lund brugt til simuleringer i WUFI.

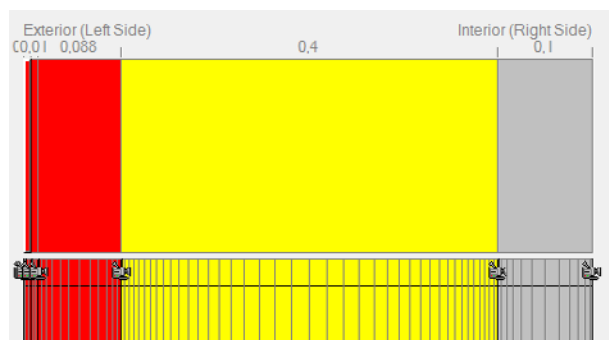
Simuleringerne udføres over mindste 3 år med start i oktober (1/10). Resultaterne for temperatur og relative fugtigheder vises for det andet hele år fra simuleringerne, hvilket starter 15 måneder efter start af simuleringerne.

Som fugtbelastningsklasse i indeklimaet anvendes fugtbelastningsklasse 2 for boliger i henhold til DS/EN ISO 13788 (Dansk Standard, 2013) og SBI-anvisning 224 (Brandt, 2013).

Konstruktionsopbygninger

I det følgende vises konstruktionsopbygninger for de undersøgte højsolerede konstruktioner. Konstruktionsmaterialer er valgt ud fra eksisterende materialer i WUFI's materialedatabase.

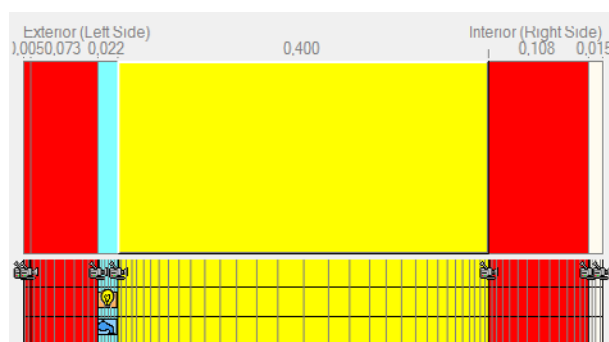
Ydervægge



Konstruktion fra ydersiden:

- 108 mm tegl
- 200-400 mm mineraluld kl. 37
- 100 mm porebeton

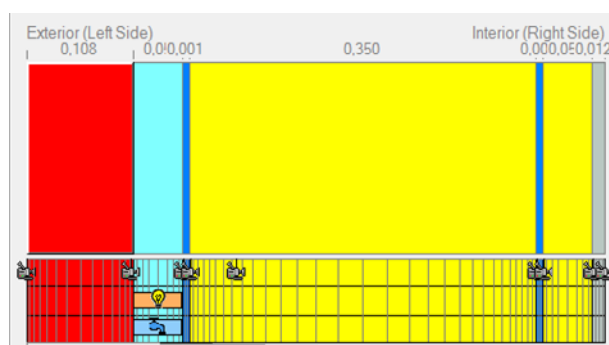
Figur 67. Konstruktionsopbygning af ydervæg 1 (tung ydervæg) i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:

- 78 mm tegl
- 22 mm ventileret hulrum (0-100 h⁻¹)
- 200-400 mm mineraluld kl. 37
- 108 mm tegl
- 15 mm indvendig puds

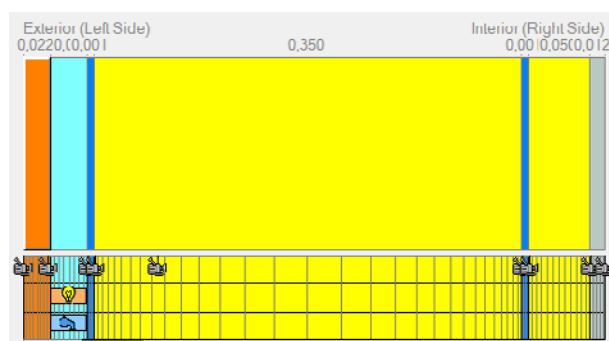
Figur 68. Konstruktionsopbygning af ydervæg 2 (tung ydervæg) i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:

- 108 mm tegl
- 50 mm ventileret hulrum (0-100 h⁻¹)
- 150-350 mm mineraluld kl. 37
- 1 mm damppærre (s_d = 50 m)
- 50 mm mineraluld kl. 371
- 12,5 mm gipsplade

Figur 69. Konstruktionsopbygning af ydervæg 3 (let ydervæg med skalmur) i WUFI.

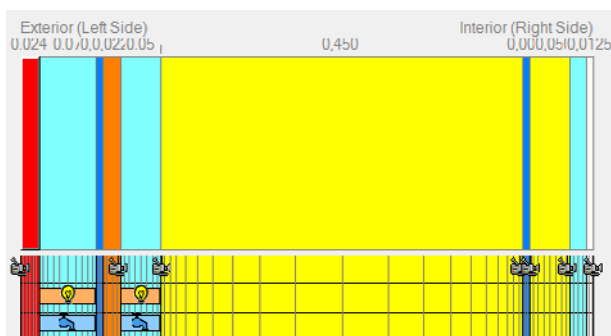


Konstruktion fra ydersiden:

- 22 mm træbeklædning
- 30 mm ventileret hulrum (0-100 h⁻¹)
- vindspærre (diffusionsåben banevare, gipsplade eller krydsfiner)
- 150-350 mm mineraluld kl. 37
- 1 mm damppærre (s_d = 50 m)
- 50 mm mineraluld kl. 371
- 12,5 mm gipsplade

Figur 70. Konstruktionsopbygning af ydervæg 4 (let ydervæg) i WUFI.

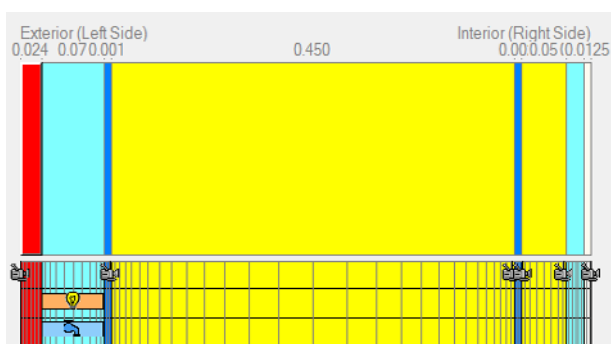
Tagkonstruktioner



Konstruktion fra ydersiden:

- 24 mm teglsten
- 70 mm ventileret hulrum (200 h^{-1})
- 1 mm undertag (tagpap)
- 22 mm krydsfiner
- 50 mm ventileret hulrum ($0-100 \text{ h}^{-1}$)
- 250-450 mm mineraluld kl. 37
- 2 mm dampspærre ($s_d = 87 \text{ m}$)
- 50 mm mineraluld kl. 37
- 20 mm hulrum
- 12,5 mm gipsplade

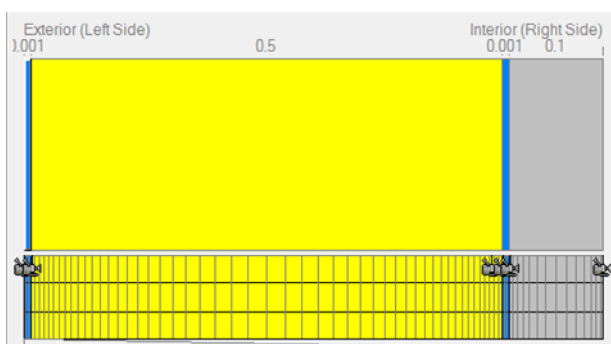
Figur 71. Konstruktionsopbygning af et paralleltag med ventileret undertag og taghældning på 25° i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:

- 24 mm teglsten
- 70 mm ventileret hulrum (200 h^{-1})
- 1 mm undertag (banevare, $s_d = 0,2 \text{ m}$)
- 250-450 mm mineraluld kl. 37
- 2 mm dampspærre ($s_d = 87 \text{ m}$)
- 50 mm mineraluld kl. 37
- 20 mm hulrum
- 12,5 mm gipsplade

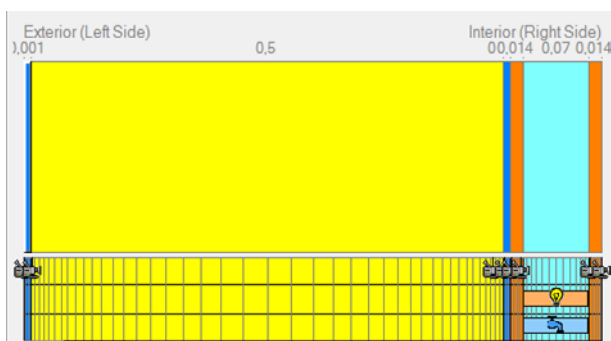
Figur 72. Konstruktionsopbygning af et paralleltag med uventileret undertag og taghældning på 25° i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:

- 1 mm tagpap
- 300-500 mm mineraluld kl. 37
- 1 mm dampspærre (tagpap)
- 100 mm beton ($v/c 0,4$)

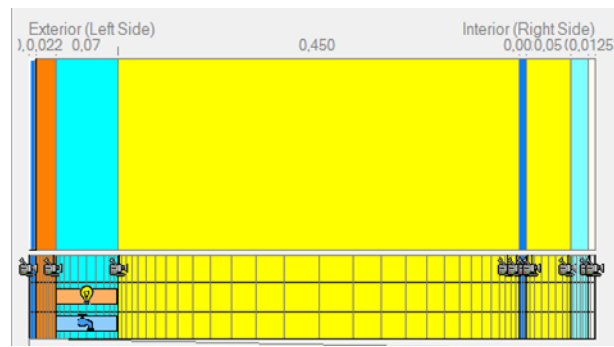
Figur 73. Konstruktionsopbygning af et varmt fladt tag med betondæk som underlag i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:

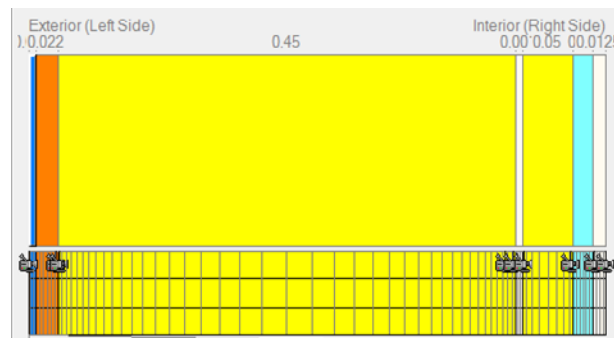
- 1 mm tagpap
- 300-500 mm mineraluld kl. 37
- 1 mm dampspærre (tagpap)
- 14 mm krydsfiner
- 70 mm hulrum
- 14 mm krydsfiner

Figur 74. Konstruktionsopbygning af et varmt fladt tag med træ som underlag i WUFI.



Konstruktion fra ydersiden:
 1 mm tagpap
 22 mm krydsfiner
 70 mm ventileret hulrum (0-100 h⁻¹)
 250-450 mm mineraluld kl. 37
 2 mm dampspærre (S_d = 87 m)
 50 mm mineraluld kl. 37
 20 mm hulrum
 12,5 mm gipsplade

Figur 75. Konstruktionsopbygning af et ventileret koldt tag i WUFI.



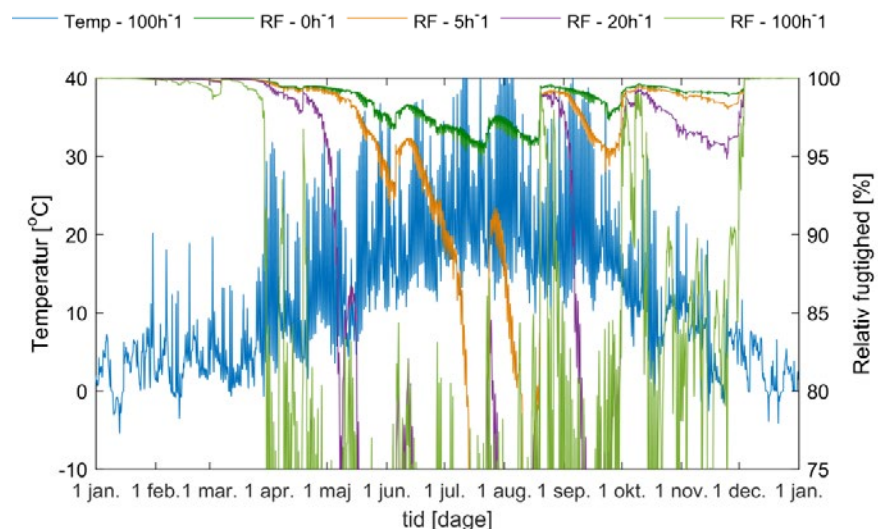
Konstruktion fra ydersiden:
 1 mm tagpap
 22 mm krydsfiner
 250-450 mm mineraluld kl. 37
 1 mm fugtadaptiv dampspærre
 50 mm mineraluld kl. 37
 20 mm hulrum
 12,5 mm gipsplade

Figur 76. Konstruktionsopbygning af et tag med fugtadaptiv dampspærre i WUFI.

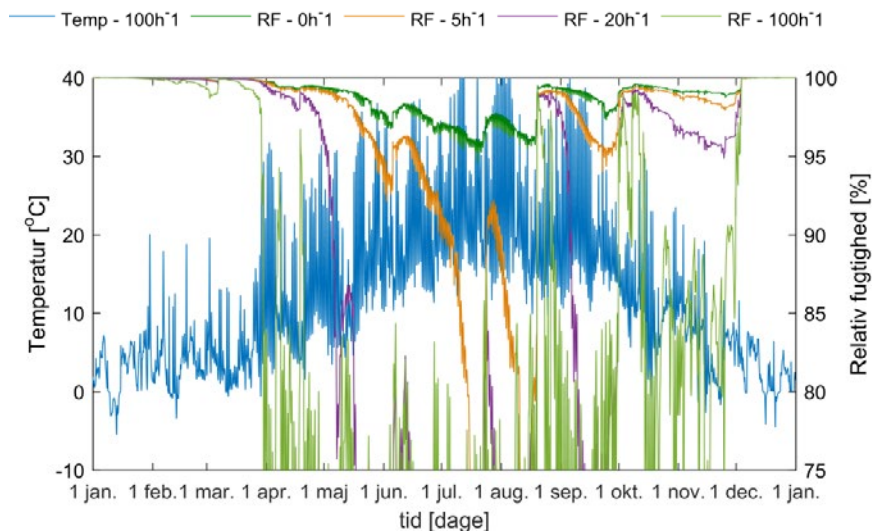
Supplerende simuleringresultater

Tunge ydervægge – ydervæg 2

Figur 77 og figur 78 viser temperatur og relativ fugtighed 80 mm inde i ydervæg 2 med isoleringstykkelse på hhv. 200 og 300 mm, og for forskellige luftskifte. Resultaterne viser at luftskiftet i ventilationsspalten har større indvirkning på den relative fugtighed og dermed udtørring af murværket i sommerperioden end ændring i isoleringstykkelsen.



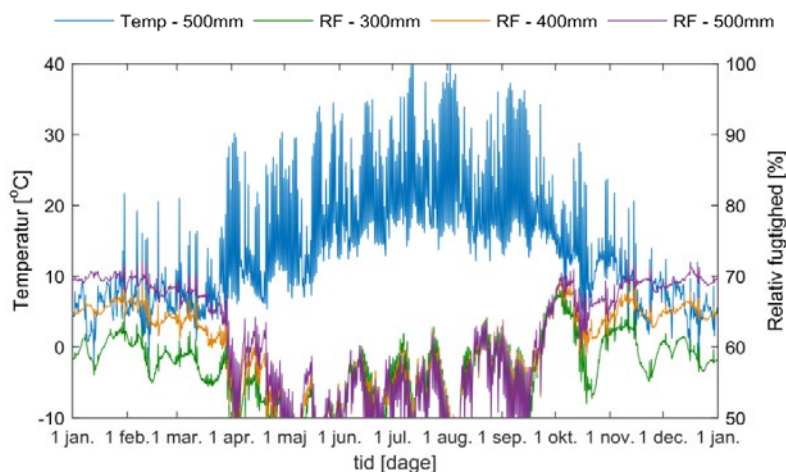
Figur 77. Temperatur og relativ fugtighed 80 mm inde i ydervæg 2 med isoleringstykkelse på 200 mm og forskellige luftskifte.



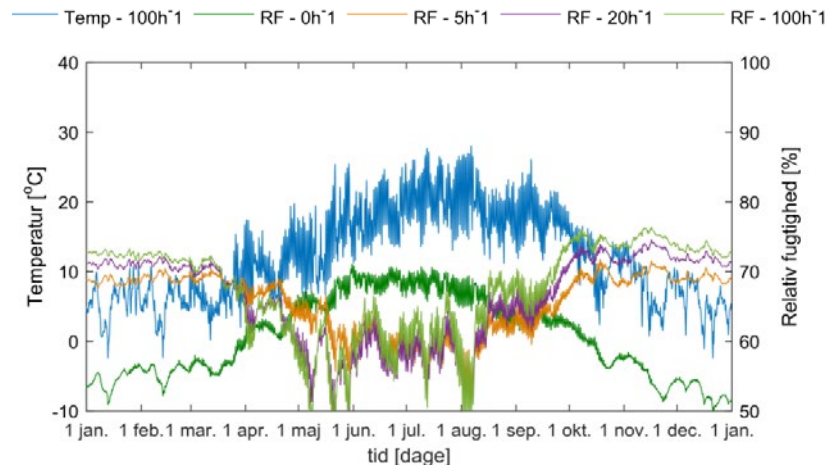
Figur 78. Temperatur og relativ fugtighed 80 mm inde i ydervæg 2 med isoleringstykkelse på 300 mm og forskellige luftskifte.

Lette ydervægge med facadebeklædning -Ydervæg 4

Da der ved brug af et træskelet, der har samme tykkelse som isoleringen mellem vindspærre og damspærre ikke optræder længere perioder med risiko for skimmelvækst, både for en ydervæg orienteret mod nord og syd, forventes det heller ikke ved anvendelse af et slankere træskelet, hvilket bekræftes yderligere af resultaterne i figur 79 og figur 80. I ingen af tilfældene (både vedrørende isoleringstykkelser, orientering eller luftskifter) overstiger den relative fugtighed 75 %, samtidig med at temperaturen er højere end 0 °C.



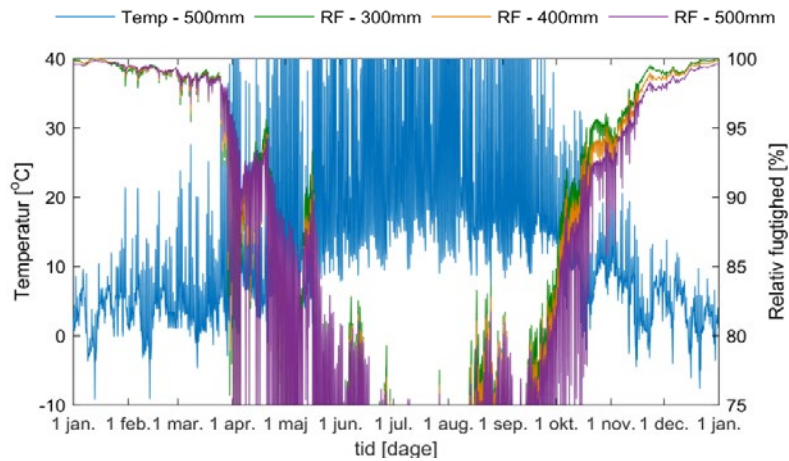
Figur 79. Temperatur og relativ fugtighed 50 mm bag diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod syd for forskellige isoleringstykkelser og med luftskifte 20 h⁻¹.



Figur 80. Temperatur og relativ fugtighed 50 mm bag diffusionsåben banevare som vindspærre i ydervæg 4 mod nord med isoleringstykkelse på 400 mm og forskellige luftskifte.

Varmt fladt tag med træ som underlag

Resultaterne ved anvendelse af træ som underlag viser de samme tendenser som ved anvendelse af et betondæk som underlag. Varme tage kan generelt anses for fugtteknisk sikre konstruktioner, da der normalt ikke er risiko for kondens og fugtophobning under forudsætning, at konstruktionen holdes tør både under udførelse og i brug.



Figur 81. Temperatur og relativ fugtighed under tagpappen i et varmt tag med træ som underlag for forskellige isoleringstykkelser.

Appendiks 2. Målinger i ventileret tagrum

Testmålinger fra december 2011

Målesystemet er testet på et 1½ plans hus i Birkerød fra 1962 som er efterisoleret, hvor følere er placeret inde i huset og i tagrummet.



Figur 82. Billede af boligen med tagrums målinger.

Der er specielt set på temperaturer og fugtighed i tagrummet. Da huset vender øst/vest varmes den ene tagflade meget op, når der kommer sol. Oprindeligt var huset varmeisoleret med 100 mm mineraluld mellem overetage og tagrum. Der er senere placeret 100 mm mere isolering. Følere er placeret i tagrummet, ude under terrassetag, i et udhus og i beboelsesrum. Dataloggeren er placeret i overetagen.

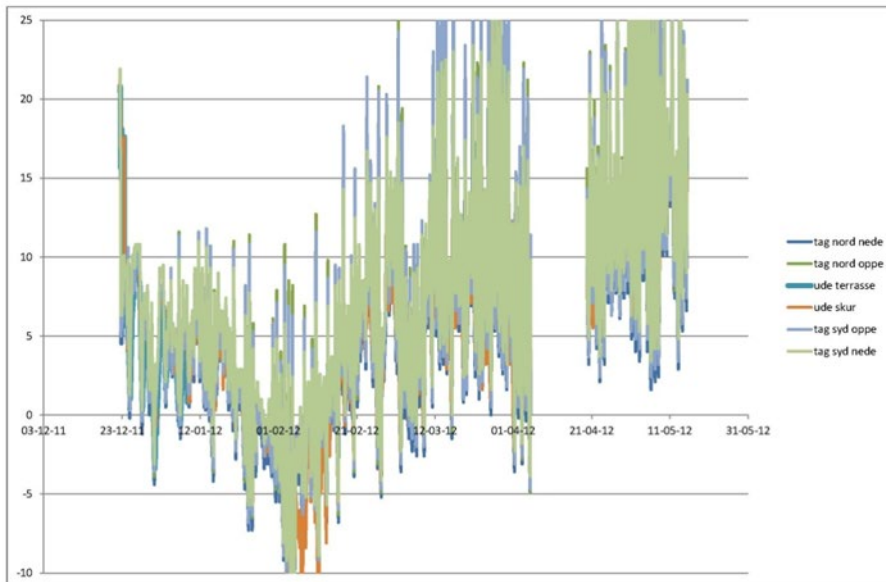


Figur 83. Føler placeret på loftsgulv.



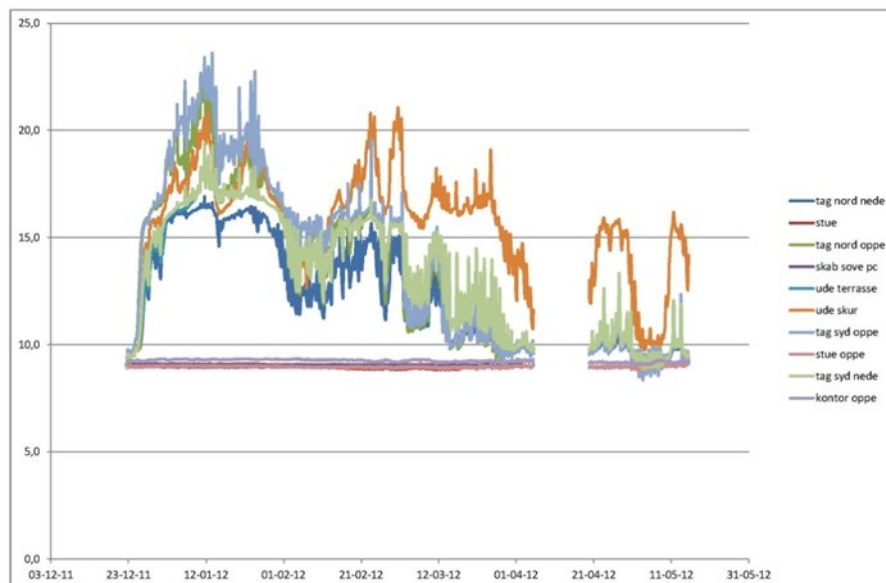
Figur 84. Føler placeret i tag under tagrygning.

I tagrummet er der placeret en føler på gulvet og en oppe på et spær lige under tagrygge. Dette giver mulighed for at se effekten af solindfald på taget. Resultater for temperaturer i tagrummet og ude fremgår af figur 85. Der er meget store temperatursvingninger, når solen varmer taget op. Temperaturen kan øges op imod 20 °C på nogle få timer.



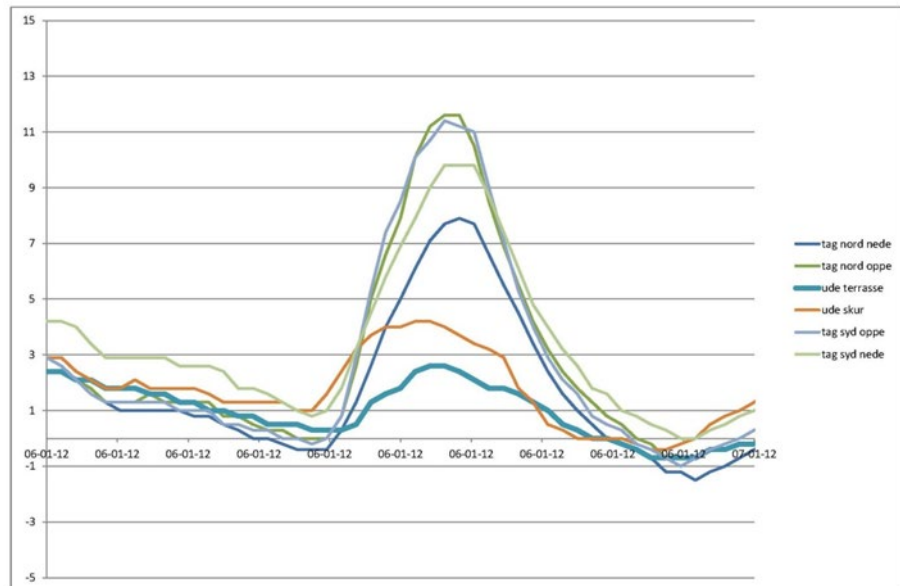
Figur 85. Temperatur december 2011 til maj 2012. Y-aksen er temperatur i °C.

Om vinteren kan temperaturen i tagrummet nå ned på -10 °C, men den er typisk lidt højere end udetemperaturen. Om sommeren bliver temperaturen i tagrummet væsentlig højere end udeluften. Der er registreret temperaturer på op til 49 °C ved sol og udetemperaturer på 25-30 °C.



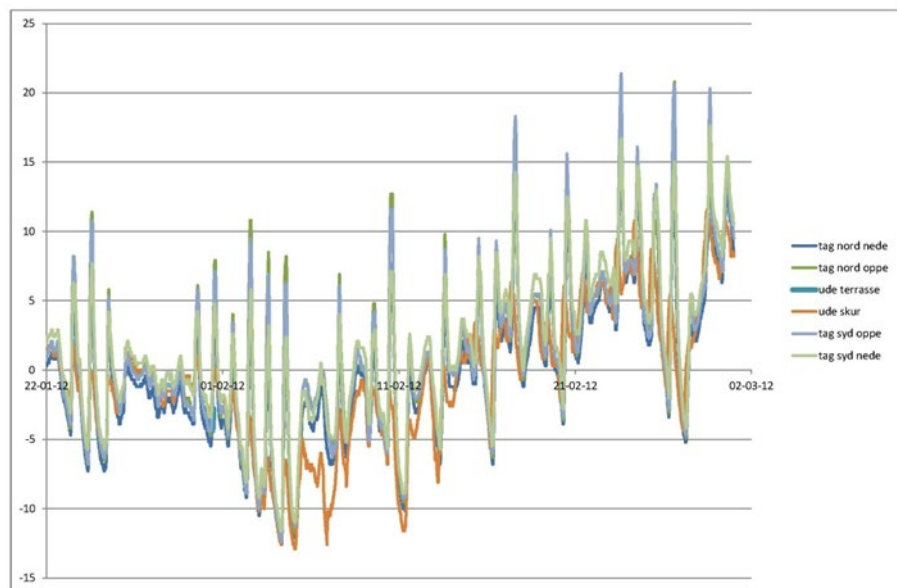
Figur 86. Fugt december 2011 til maj 2012. Y-aksen er fugtindhold i vægt%.

Figur 86 viser fugtmålingerne i tagrummet og huset, Målinger viser som ventet at fugtindholdet er højere om vinteren, men også at temperaturvariationerne påvirker fugtmålingerne. Det ses, at fugtindholdet i indeluften er meget stabil gennem hele perioden. Det ses, at fugtniveauet er højere i et ikke opvarmet skur (den brune kurve som ligger øverst fra februar til maj) end i tagrummet. Dette skyldes, at solen opvarmer tagrummet og dermed tørrer fugten ud. Solindfald er derfor en vigtig parameter for fugtforholdene i tagrummet. I vinterperioden ligger fugtindholdet lidt højere i tagrummet end i skuret. Det tyder på, at der tilføres lidt fugt fra huset til tagrummet.



Figur 87. Temperatur 5. januar 2012.

Figur 87 viser temperaturvariationerne for en enkelt dag i januar med sol på taget. Det ses, at temperaturen i tagrummet stiger hurtigt med højest temperatur lige under tagryggen.

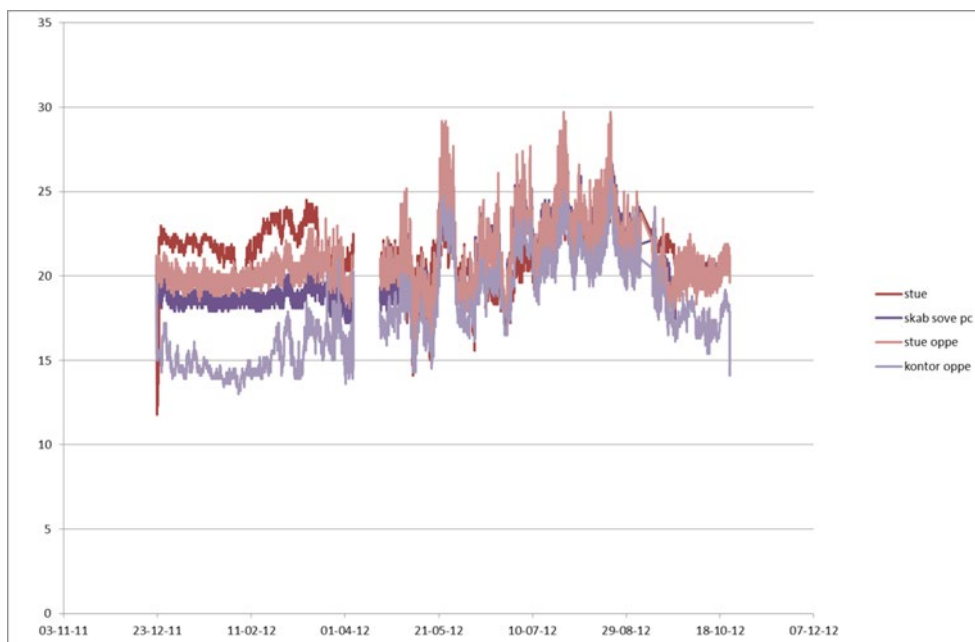


Figur 88. Temperatur februar til marts 2012.

Figur 88 viser temperaturvariationerne i februar måned. Dage med sol ses tydeligt.

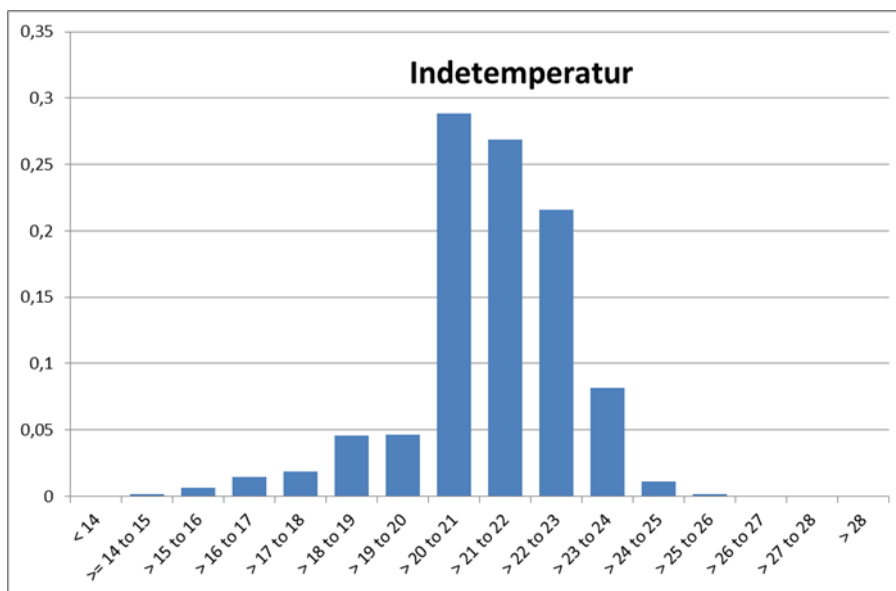
Målinger

Der er foretaget en bearbejdning af data fra målingerne fra december 2011 til oktober 2012.



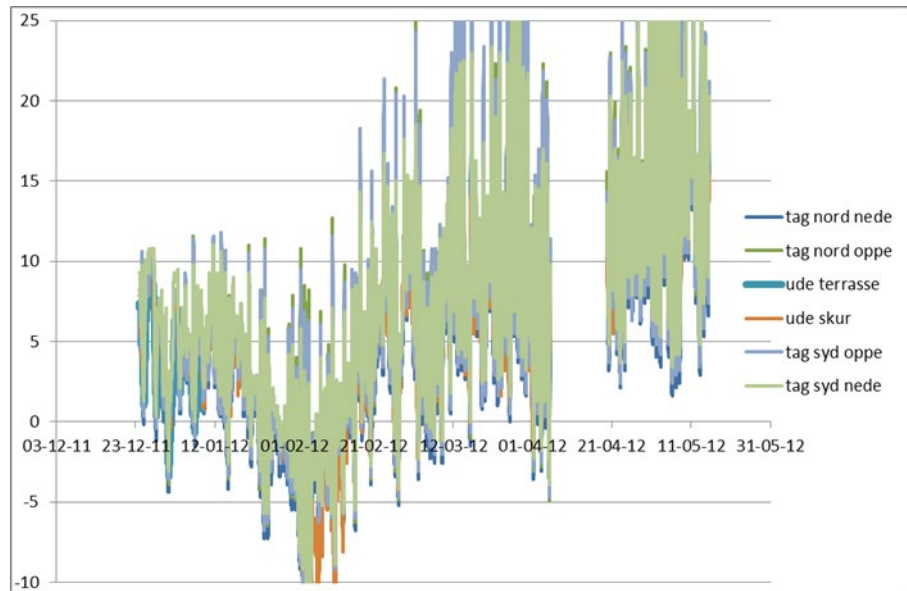
Figur 89. Indetemperatur i huset.

Figur 89 viser at indetemperaturen er meget konstant i vinterperioden, og at der først om sommeren er højere værdier fra solindfald. Figur 90 viser et histogram for indetemperaturen i stuen. Der er i 77 % af tiden en temperatur mellem 20 °C og 23 °C. Der optræder lavere temperaturer i 13 % af tiden i vinterperioden. Der optræder tilsvarende højere temperaturer i 10 % af tiden om sommeren.

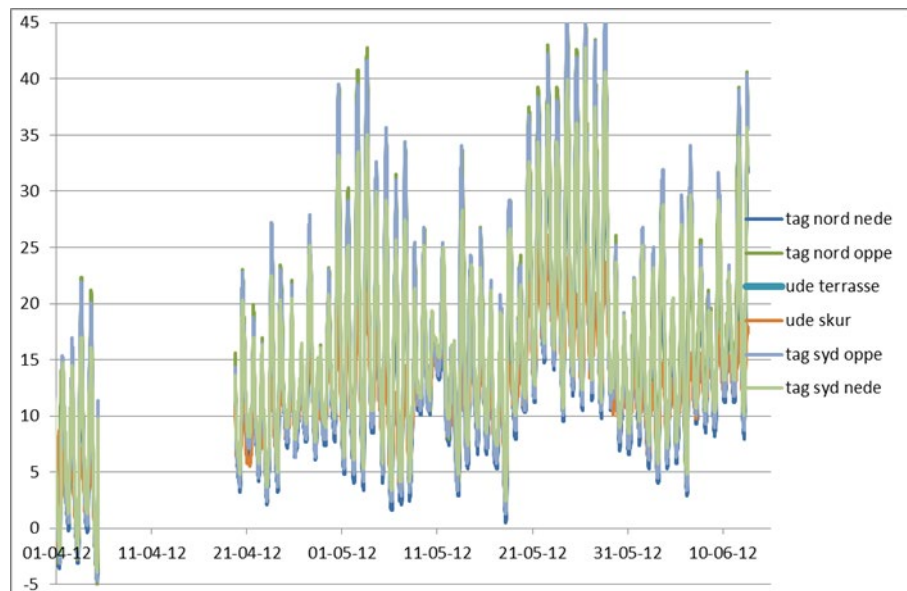


Figur 90. Histogramfordeling af indetemperatur i stuen.

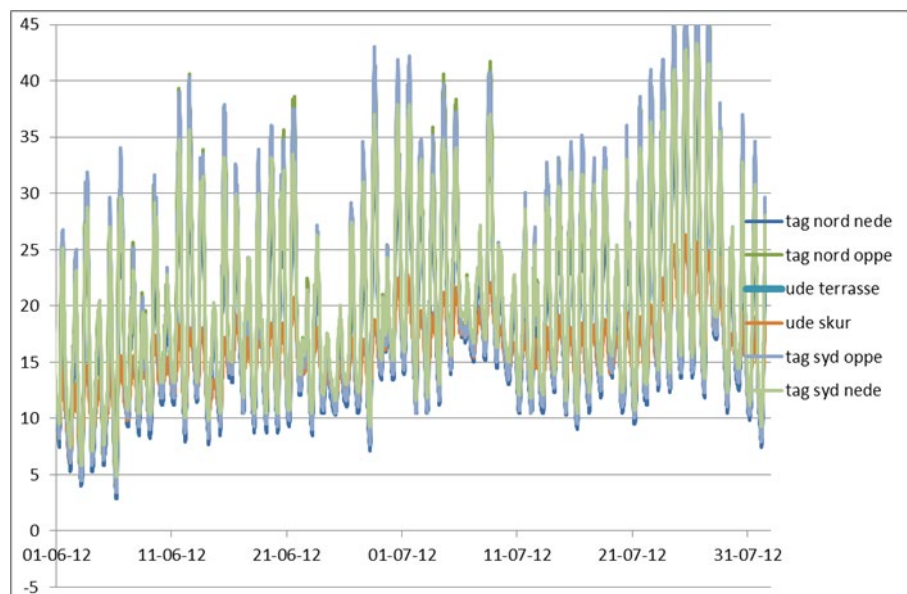
De følgende figur 91-figur 94 viser temperaturen i tagrummet opdelt i nogle perioder, så det er muligt at se døgnsvingninger i temperaturen.



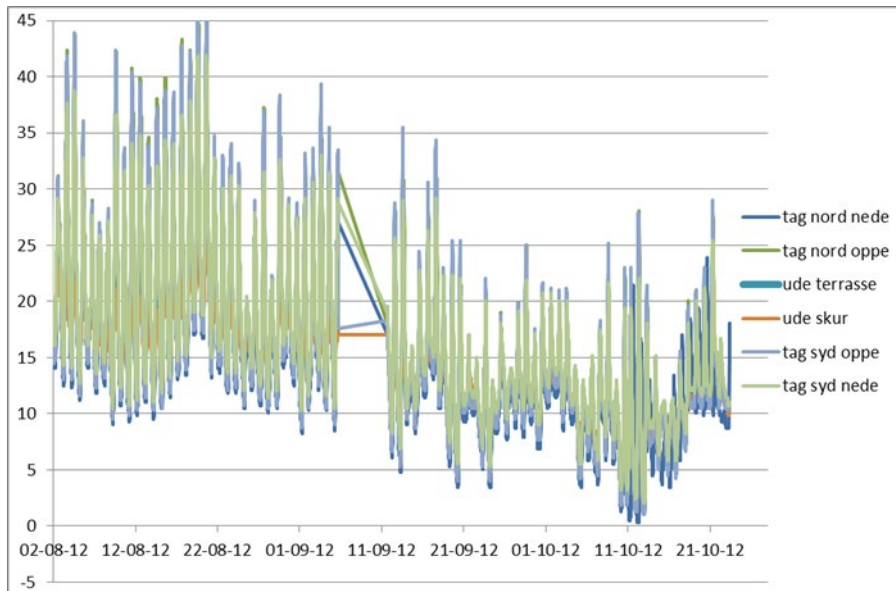
Figur 91. Temperaturer ude og i taget fra december 2011 til maj 2012.



Figur 92. Temperaturer ude og i taget fra april til juni 2012.



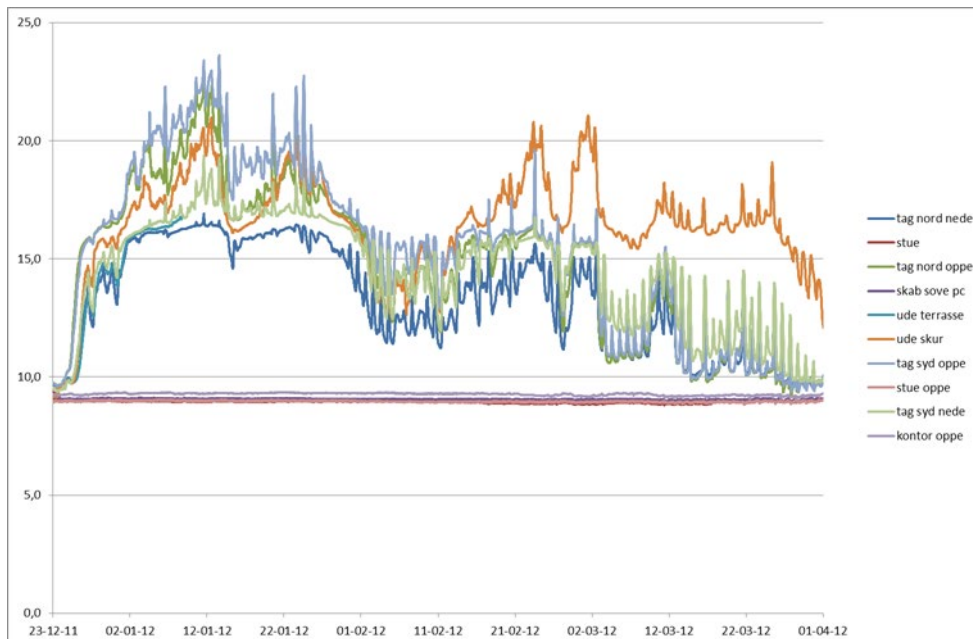
Figur 93. Temperaturer ude og i taget fra juni til juli 2012.



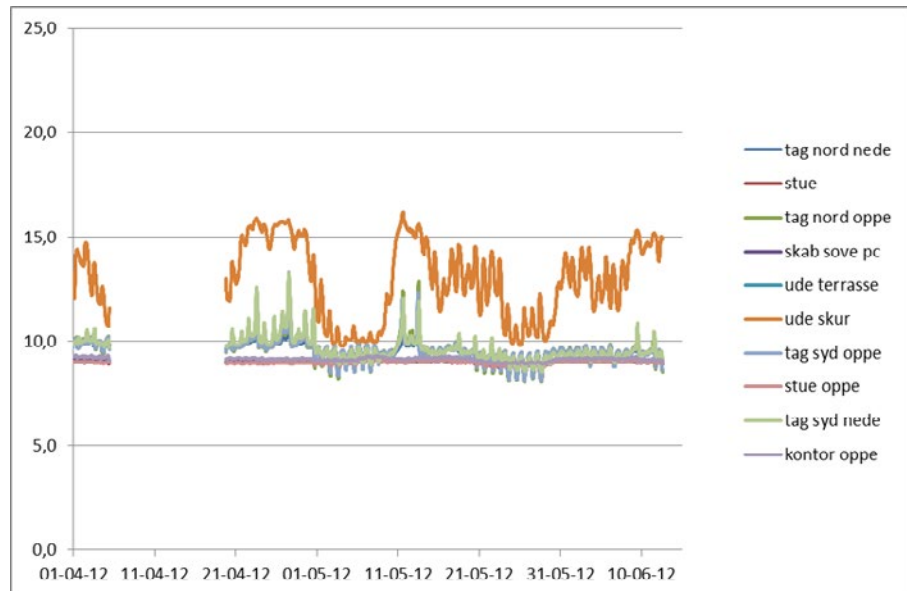
Figur 94. Temperaturer ude og i taget fra august til oktober 2012.

Temperaturerne i taget viser store variationer over døgnet – meget mere end variationer i udetemperaturen, idet solindfald varmer tagrummet op. I sommerperioden kan temperaturen komme op på 45 °C. Det medvirker til at tørre eventuelt fugt ud.

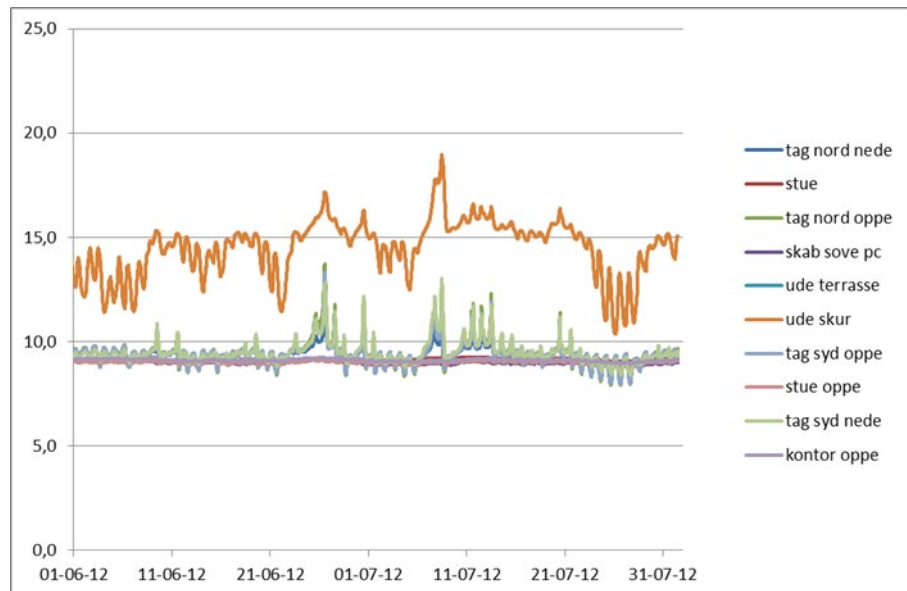
Figur 95-figur 98 viser fugtindholdet i målerondellerne placeret i målepunkterne. Fugtindholdet er derfor angivet i vægt%.



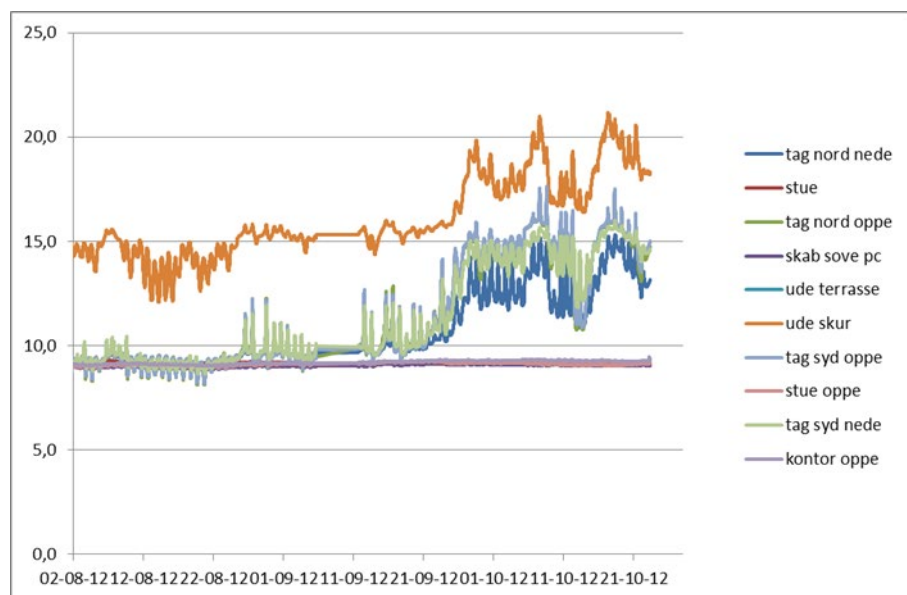
Figur 95. Fugt vægt% (i træ) fra december 2011 til april 2012.



Figur 96. Fugt vægt% (i træ) fra april til juni 2012.



Figur 97. Fugt vægt% (i træ) fra juni til juli 2012.

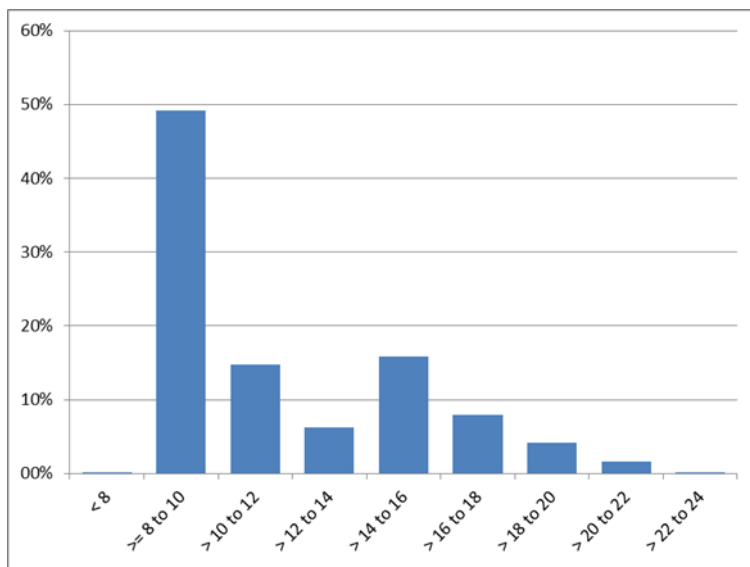


Figur 98. Fugt vægt% (i træ) fra august til oktober 2012.

Fugtindholdet i indeluften er målt fire steder og viser et stabilt fugtindhold på omkring 9 vægt%, som svarer til normalt tørt indeklima. Den orange kurve, som normalt altid ligger højest er fugtindholdet fra en føler placeret i et uopvarmet udhus. Det ses, at fugtindholdet kommer op på 20 vægt% i december 2011 til april 2012 og igen i oktober 2012. Resten af året ligger værdierne omkring 15 vægt%. Der ses et fald i fugtindholdet i februar – det hænger sammen med en meget kold periode. En del af faldet skyldes at kalibreringskurven er temperaturafhængig – formentlig er effekten noget overdrevet, så der ikke er så stort fald på så kort tid.

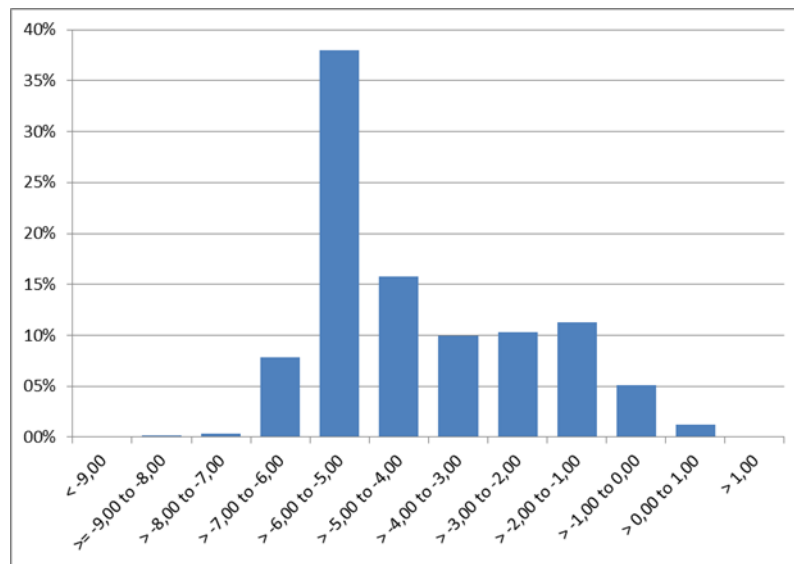
Fugtindholdet i taget er målt fire steder – 2 i toppen af tagrummet og 2 i bunden af tagrummet – kurverne er grønne og blå. I vinterperioden januar 2011 til slutningen af februar 2012 kan fugtindholdet i taget komme tæt ved fugt målt i udhuset og for enkelte punkter komme lidt højere. Allerede i marts er taget mere tørt end udhuset og fugtindholdet kommer under 15 vægt%.

I perioden fra april til september er fugtindholdet næsten på samme niveau som i indeluften. Det vil sige, at solindfald på tagfladen medvirker til at give højere temperatur i tagrummet og dermed udtørring.



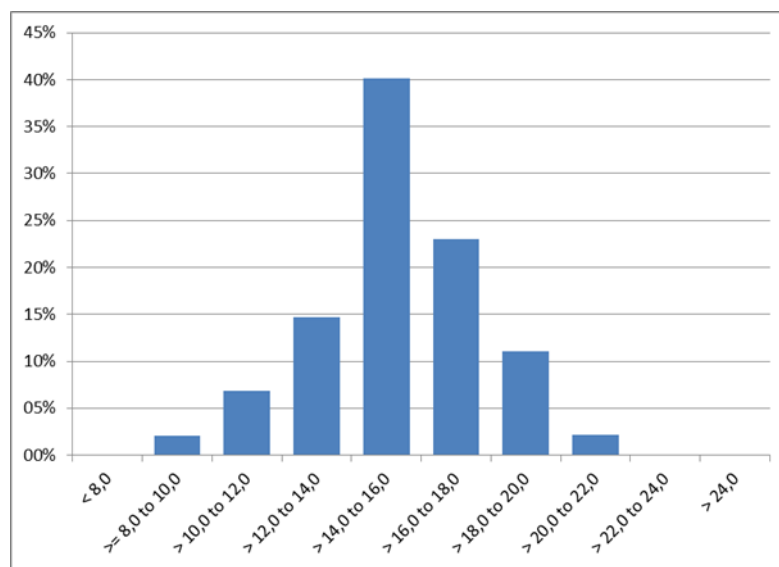
Figur 99. Histogramfordeling af fugt i vægt% (i træ) i top af tagrum – middel 11,9%.

Figur 99 viser et histogram over fugtindholdet målt i tagrummets øverste del. Det ses, at næsten 50 % af tiden er fugtindholdet 8-10 vægt% og dermed ganske tørt. Det interessante er, hvor lange perioden er, hvor høje fugtigheder optræder. Træfugten kommer over 18 vægt% i ca. 6 % af tiden. Det interessante er hvad temperaturen er i de peioder, og her er temperaturen lav, hvilket gør at skimmelsvamp ikke kan trives.



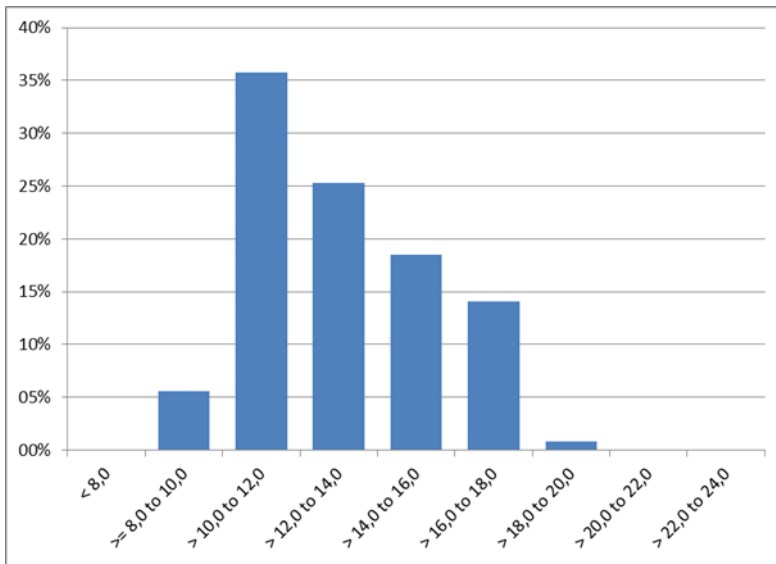
Figur 100. Histogram fordeling af fugt i vægt% (i træ) angivet som forskel mellem fugt i tag og fugt i udhus – middel -4.2 %.

Figur 100 viser forskel i fugtindhold mellem fugt i taget og fugt i udhuset. Alle værdier er negative og det betyder, at det er mere tørt i taget end i udhuset. I den forbindelse kan fugtigheden i udhuset ses som fugt i udeluften. Derfor er taget mere tørt - først og fremmest fra solindfald på taget. I den største del af tiden er forskellen 4-5 vægt%.



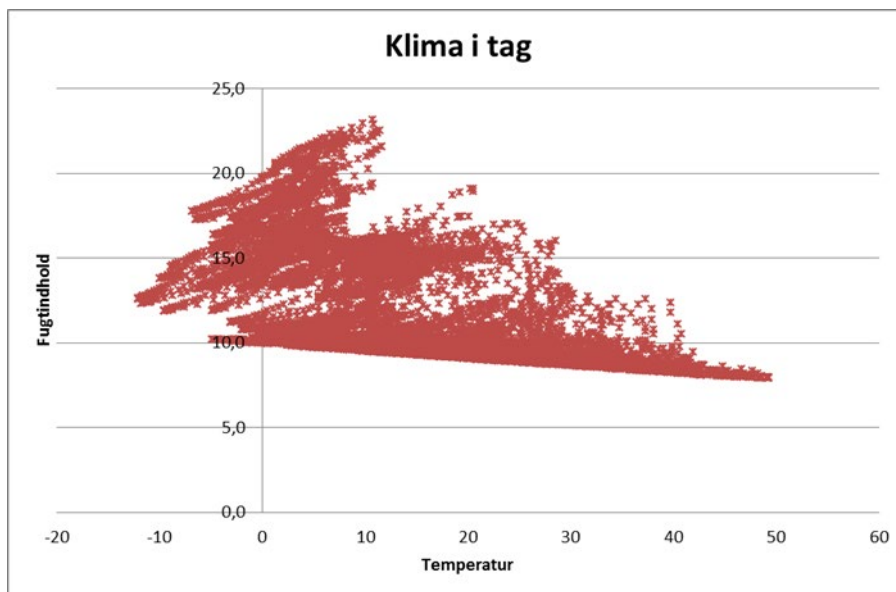
Figur 101. Histogram - fordeling af fugt i vægt% (i træ) i udhus – middel 15,3 %.

Figur 101 viser fordelingen af fugtindholdet i udhuset. Her ses, at der normalt er 14-16 vægt% (sommerperioden). Fugtindholdet overskrider 18 vægt% i ca. 14 % af tiden. Her er altså større risiko for skimmelsvamp end i tagrummet.



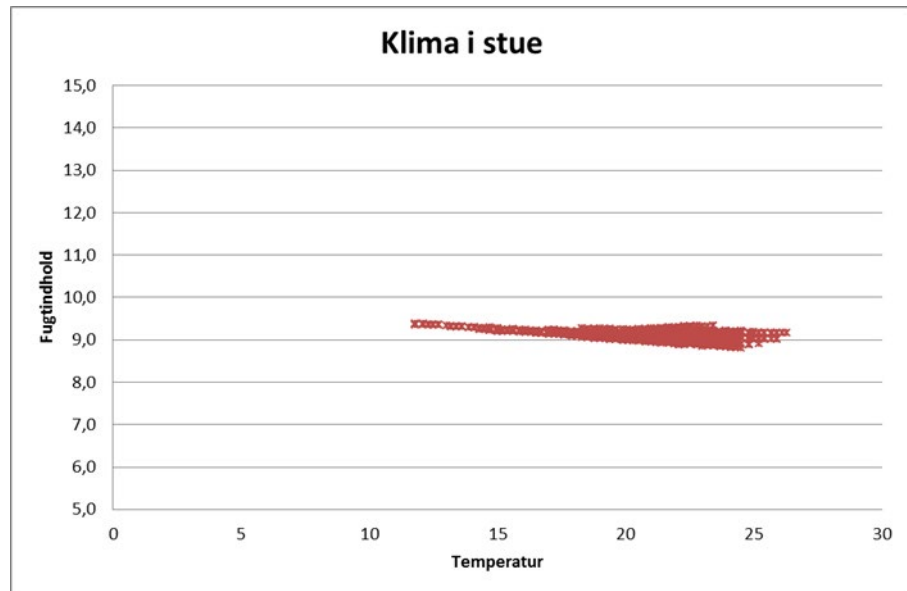
Figur 102. Histogram fordeling af fugt i vægt% (i træ) på terrasse – middel 13,0 %.

Figur 102 viser fugtfordelingen på et målepunkt placeret på en udendørs terrasse med en overdækning, så der ikke kan komme regn på føleren. Regn på føleren ville kunne gøre at måleresultaterne blev helt forkerte. Her ligger middelfugtindholdet på 13 vægt%, og der er kun 2 % af tiden, hvor fugtindholdet er over 18 vægt%.



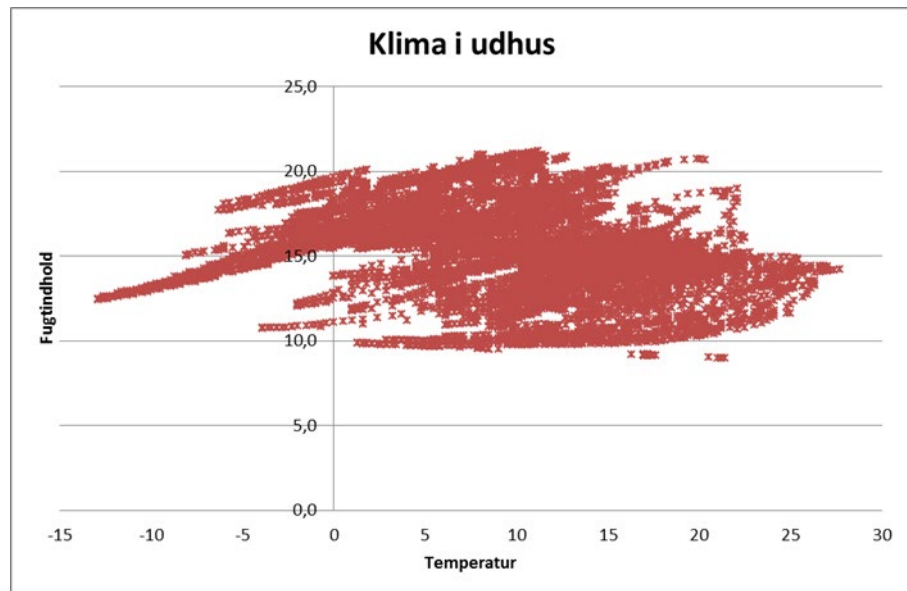
Figur 103. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træ (vægt%) i top af tagrum.

Figur 103 viser klimaforholdene – fugtindhold mod temperatur for et punkt i toppen af tagrummet. Det interessante er at se på, hvornår der optræder høje fugtindhold – over 18 vægt%. Det ses, at med undtagelse af et par enkelte værdier sker ved temperaturer under 10 °C. Her kan skimmelsvamp ikke gro. Så dette viser, at der ikke skulle komme skimmelsvamp i taget, hvilket der heller ikke er registreret.



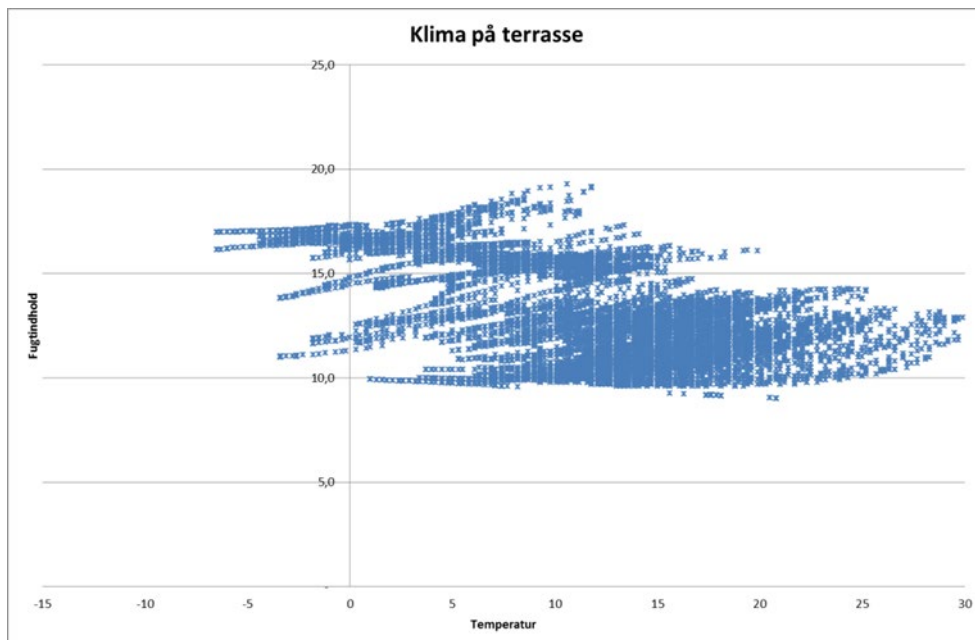
Figur 104. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træ (vægt%) i stue.

Figur 104 viser klimaforholdene i stuen. Det ses tydeligt, at der er stabile fugt-forhold, og at det kun er temperaturen som varierer.



Figur 105. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træ (vægt%) i udhus.

Figur 105 viser klimaforholdene i udhuset. Her ses, at der er en langt større risiko for skimmelsvamp, idet der er en del målepunkter med temperatur over 10 °C og fugtindhold over 18 vægt%. Udhuset vil ikke egne sig for opbevaring af ting, som kan angribes af skimmelsvamp. Sammenlignet med tagrummet (figur 103) er det meget større risiko.



Figur 106. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træ (vægt%) på terrasse.

Figur 106 viser klimaforholdene på den overdækkede terrasse. Her ses en del lavere risiko for skimmelvækst i forhold til udhuset. Det hænger sammen med, at der er en bedre udtørring fra vind på træ placeret frit i udeluften men beskyttet mod regn.

Konklusioner

Det interessante er temperatur og fugtforhold i tagrummet. Tagrummet er ventileret med udeluft og har 200 mm varmeisolering mellem tagrum og rummene under. Det ses, at fugtindholdet stiger i vinterperioden, men at det ret hurtigt tørrer ud igen. I hele sommerperioden er fugtindholdet næsten som nede i huset. Det lave fugtindhold om sommeren skyldes i meget stor grad, at taget varmes op af solen. Det ses, at temperaturen kan stige 10-25 °C på nogle få timer. Temperaturen i tagrummet kan nå ca. 50 °C. Klimaforholdene viser, at der er få perioder med fugtindhold over 18 vægt% og samtidig temperatur over 10 °C. Det betyder, at risiko for skimmelsvamp er lav. Sammenlignes med fugtforhold ude – svarende til udhus eller terrasse - er tagrummet mindre udsat.

I forbindelse med højisolerede huse øges varmeisoleringen til f. eks. 400 mm. Det betyder, at der er et mindre varmetab fra huset til tagrummet om vinteren og dermed bliver temperaturen lidt lavere. For sommerperioden skulle øget isolering give anledning til lidt højere temperatur – det meste af varmen forsvinder via ventilation eller gennem tagfladen, så en øget isolering kan ikke hæve temperaturen ret meget.

I selve rapporten er der foretaget beregninger af dette tilfælde samt med større isoleringstykkelse, så det kan ses om konklusionerne holder. Desuden vil målinger på udeluftede tagkonstruktioner og væg give oplysninger om disse konstruktioner.

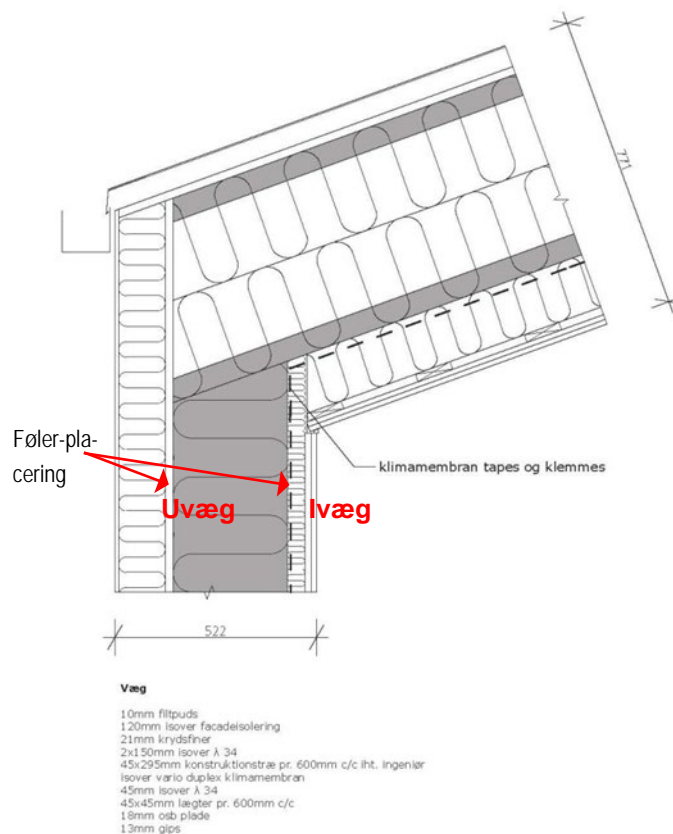
Appendiks 3. Målinger i nyt enfamiliehus

Baggrundsinformation

Målingerne er udført i Århus

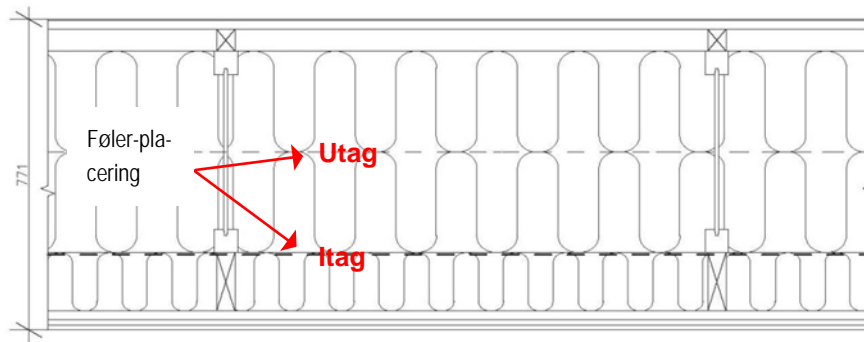
Det var i projektet oprindeligt forventet, at der skulle måles i 3 til 4 huse. Der blev derfor gjort et stort arbejde for at få husfirmaer gjort interesseret i at deltage med et højisoleret hus. Da dette ikke lykkedes, fik SBI kontakt til en bygherre i 2013 om måling på et nyopført højisoleret enfamiliehus. Huset er i 2 etager med stor isoleringstykkelse og lufttæt konstruktion. Følere for måling af temperatur og fugtighed blev monteret i maj 2013 i væg og tag. Da de er indbygget i konstruktionen kan de ikke tages ud igen. Målinger på enfamiliehuset er startet 2. oktober 2013, hvor der var indflytning.

Konstruktioner



Figur 107. Snit af væg med 460 mm isolering og angivelse af målepunkter.

Målepunkter i væggen er placeret på ydersiden af det isolerende lag med krydsfiner og på indersiden i det isolerede lag. Figur 110 og figur 111 viser placeringen af følerne i væggen.



Tag 20 grader
 2 lag tagpap
 21mm ru bræddebeklædning i tæt forskalling
 50mm ventileret hulrum
 500mm isover λ 37
 58x500mm I-bjælker pr. 1210 c/c iht. ingeniør
 Isover værlo duplex klimamembran
 45x145mm forskalling pr. 300mm c/c
 150mm isover λ 37 - installationslag
 21x95mm forskalling pr. 300mm c/c
 2x13mm gips i værelser / 13mm gips 13mm akustikgips i stue og dobbelt højt rum

Figur 108. Snit af tag – 650 mm isolering med placering af målepunkter.

Føler er placeret i det indvendige isoleringslag og oppe i isoleringen. Den nøjagtige placering er ikke kendt da de er placeret efter besøget i maj 2013. Udfra en beregning af de målte temperature ligger den udvendige målepunkt ca. midt i det tykke isoleringslag, se figur 108.



Figur 109. Foto af tag og vægge under bygning.



Figur 110. Foto af væg indefra – føler ses placeret i inderste isoleringslag.



Figur 111. Foto af væg udefra – med føler placering i yderste isoleringslag.

Resultater fra målinger

Uvæg-579 er placeret i det yderste isoleringslag og kommer derfor tæt ved udetemperatur og fugtighed.

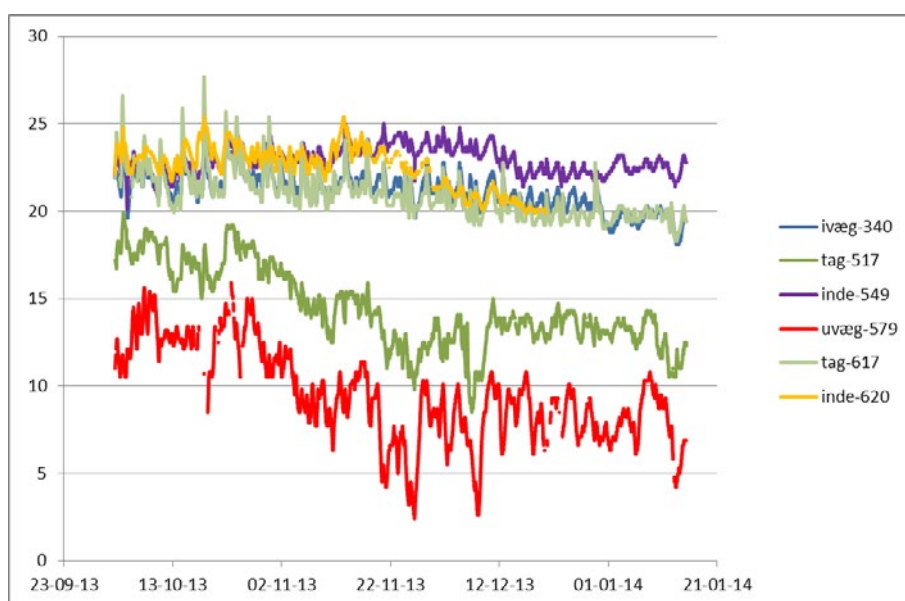
Ivæg-340 er placeret i de inderste isoleringslag og viser derfor næsten det samme som indetemperaturen. Placering ses på figur 110.

Tag-517 er placeret oppe i isoleringen og er derfor ikke så kold som ydervæg.

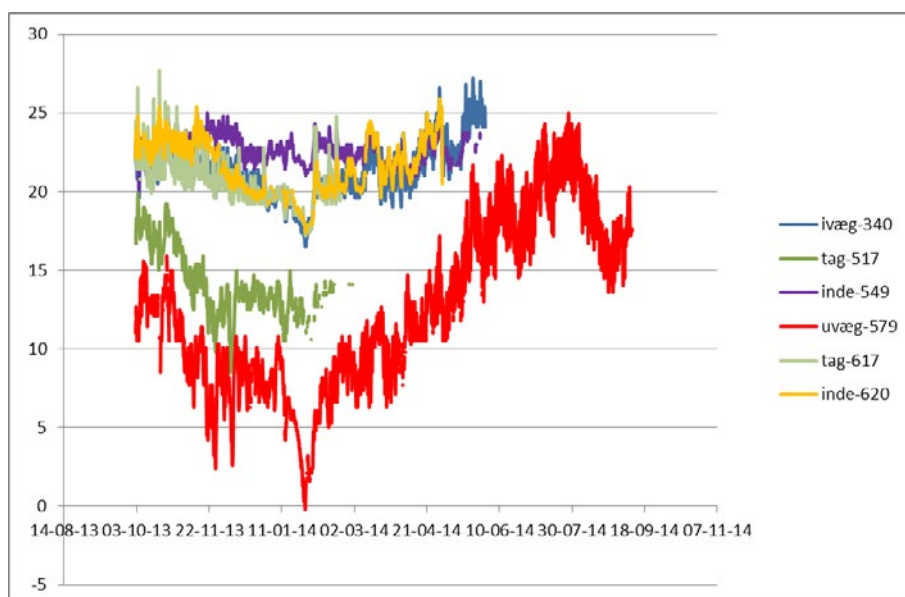
Tag-617 er placeret i inderste isoleringslag og er derfor nær ved indetemperatur.

Indetemperaturen er vist som nummer 620 og 549.

Temperaturmålinger



Figur 112. Temperaturmålinger i 2013. Her er der forholdsvis få målefejl.

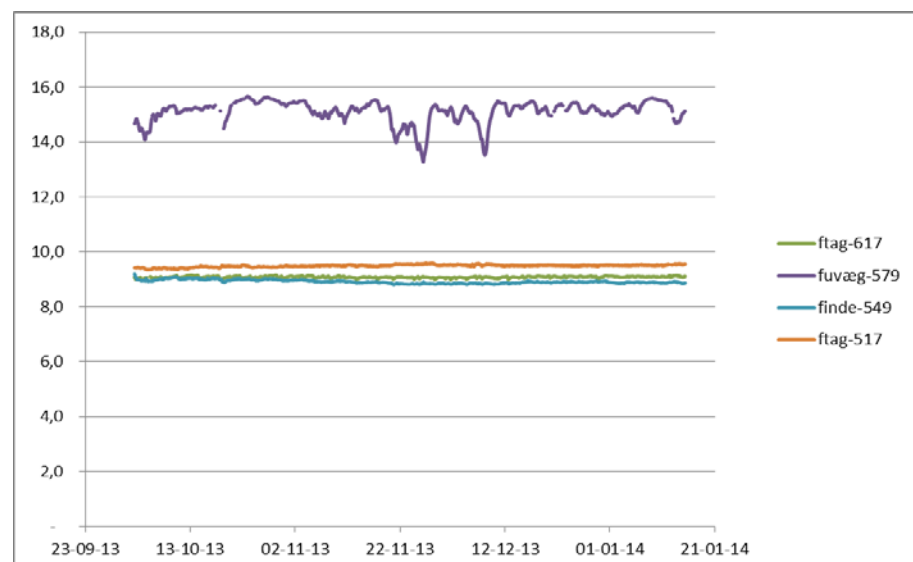


Figur 113. Temperaturforløb for hele måleperioden.

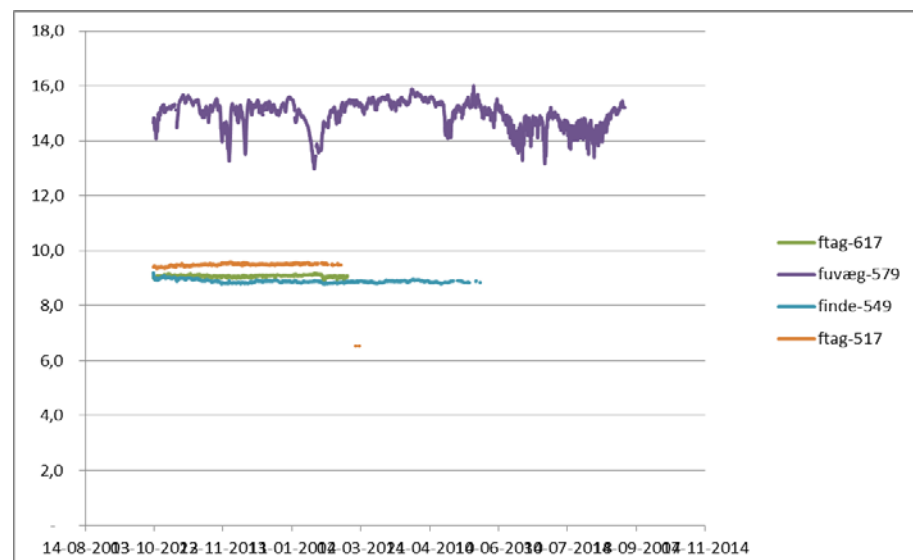
Figur 113 viser alle temperaturer i hele perioden. De fleste temperaturer følger indetemperaturen på 20-24 °C. Dette gælder også indvendige temperatur i tag og væg. Med de store isoleringstykkelser er det forventeligt, at temperaturen er nær indetemperaturen. De 2 afvigende kurver er yderside af tag og væg. For yderside af væg kommer temperaturen i nærheden af udetemperaturen, da føleren ligger langt ude. Laveste temperatur målt er -1 °C. For føleren i taget er værdierne ikke så tæt på udetemperaturen, da der er mere varmeisolering mellem føler og udeluft. Det ses at føleren svigter periodevis i januar til marts. I marts ser den ud til at stoppe med at fungere.

Fugtindhold i træ – vægt procent

Fugtindholdet inde ligger meget konstant på 9 vægt%, hvilket svarer til en relativ fugtighed på omkring 50 %, se figur 114 og figur 115. Dette er normal indvendig fugtighed. Fugtighed i taget viser ca. 9,2 vægt%. En anelse højere end fugtindholdet inde, men der er ingen væsentlig stigning i vinterperioden. Så taget ser ud til at holde sig tørt. Fugtindhold i ydervæg ligger på 14-16 vægt%. Det svarer til en relativ fugtighed på 75 %, som svarer godt til relativ fugtighed i udeluften. Der er ingen væsentlig ophobning af fugt om vinteren. De tilfælde hvor fugtindholdet falder under 14 vægt% skyldes kraftige temperaturfald, som det ses på kurven over temperaturer. I realiteten er fugtindholdet nok ikke ændret, men det er temperaturkorrektion fra lavere temperaturer som er for stor. Her ses også at følerne i taget er ophørt med at virke.



Figur 114. Fugtighed (vægt%) målt i 2013 med få fejlmålinger. Fugtindholdet er meget stabilt. Den eneste afvigelse er fugtigheden i væggens yderside. Den vil også forventes at følge fugtighed i udeluften.



Figur 115. Fugtindhold (vægt%) i træ for hele perioden på samme steder, som temperaturen er målt.

I løbet af sommeren 2014 er de fleste målepunkter ophørt med at virke. Dette skyldes, at batteriet som sidder i følere er tomt. Det er ikke muligt at skifte batteri i følerene, som er indbygget i væg og tag. Derfor har målinger måtte standses.

Resultater set i relation til udeklimaet var, at vinteren var væsentlig over normaltemperaturen. December var 3,7 °C over normalen, januar 1,8 °C over normalen, februar 4,2 °C over og marts var 3,7 °C over normalen. Det betyder, at det har været en meget mild vinter.

Appendiks 4. Målinger i ventileret krybekælder

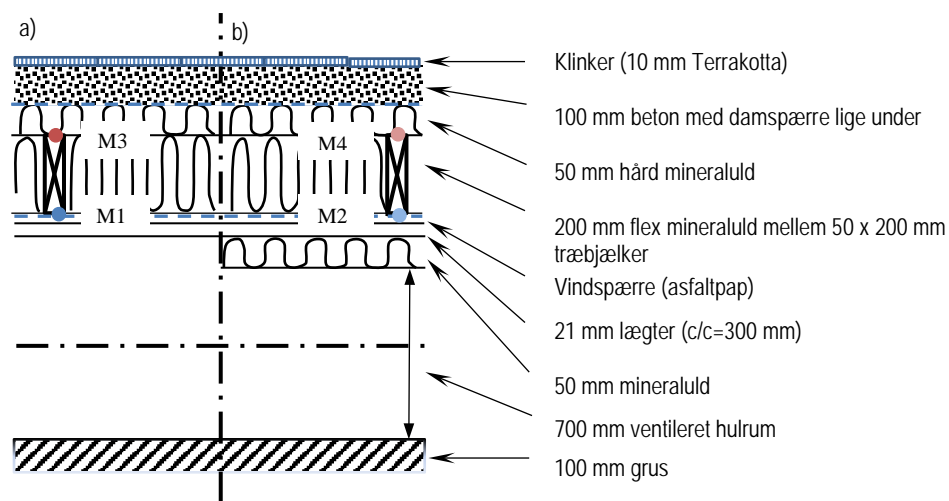
Baggrundsinformation

Målinger er udført i et hus beliggende i Annisse i perioden marts 2015 til december 2015, men fortsætter frem til minimum marts 2016.

Ved installering af fugtfølere var huset ikke beboet, men det ny opførte hus var ved at blive færdig apteret.

Konstruktion

Krybekælderens er opbygget indefra og ud



Figur 116. Opbygning og snit i krybekælder med hhv. 50 mm isolering på undersiden af vindpappen. Målepunkter M2 og M4 er med 50 mm isolering mod det ventilerede hulrum, mens målepunkter M1 og M3 er uden de nederste 50 mm isolering. Det ventilerede hulrum er ca. 70 cm højt.

Føler placeringer

Der måles på to træbjælker, hvor følerne er placeret i samme niveauer. Forskellen på de to målinger er, at der er fjernet en 50 mm isoleringbatt ved den ene bjælke der dermed eksponere bjælken mod klimaforholdene i krybekældere, dog beskyttet af en vindspærre.

Følerne er placeret ved toppen af bjælken på siden ind mod isoleringen.

Yderligere er der placeret en føler på undersiden af bjælken, så den er mellem vindspærren og bjælkens underside. For måling af forholdene i krybekælderen måles der med to målesystemer på en flise placeret på jorden i krybekælderen. Der måles også i oversiden af krybekælderen.

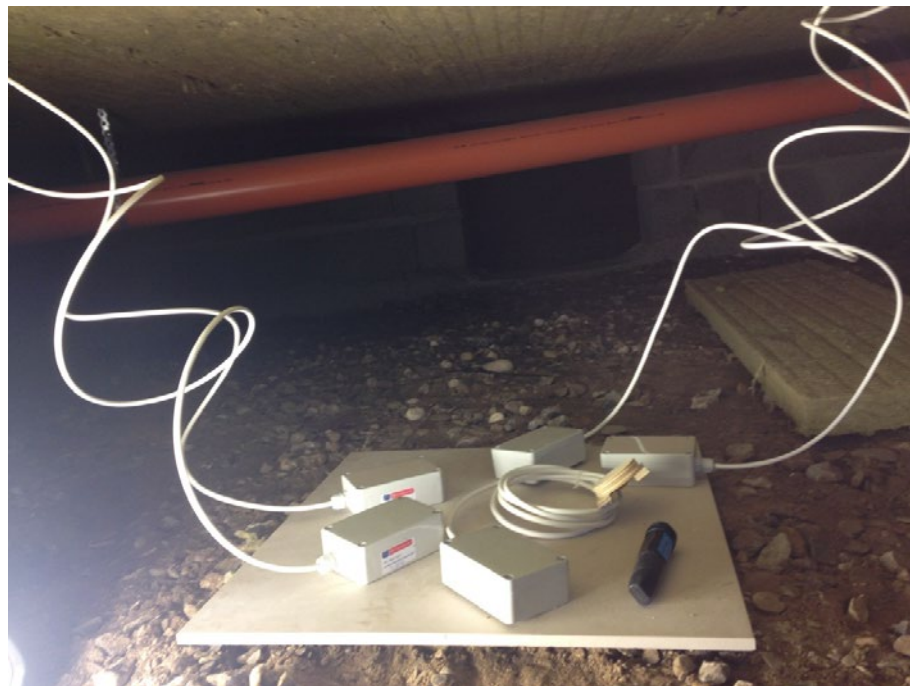
I huset måles der i køkkenet, hvilket er rummet over målepunkterne i krybekælderen. Udeklimadata bruges fra et nærliggende vejrstation.



Figur 117. Krybekælder med isoleringsbatts på undersiden.



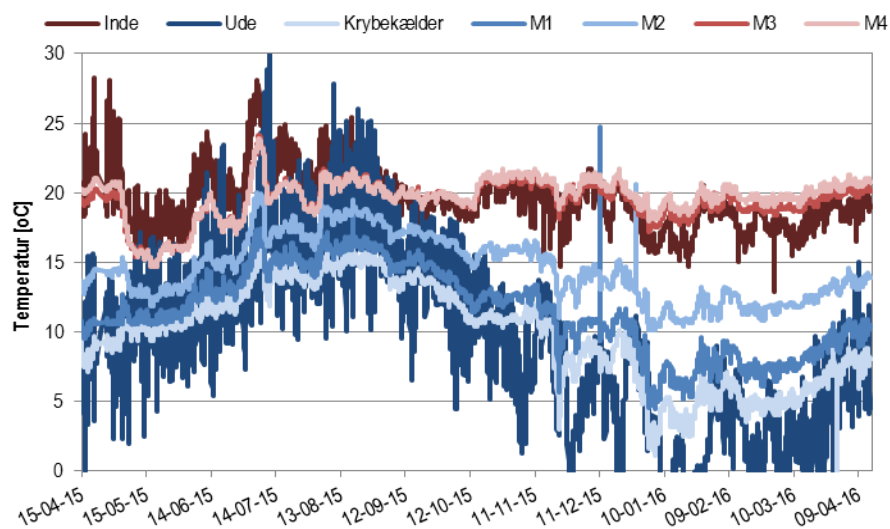
Figur 118. To fugtfølere placeret i konstruktionen uden isolering mod krybekælder. En føler er ført op i toppen af isoleringen og en er placeret lige over vindspærren mod træbjælkens bund.



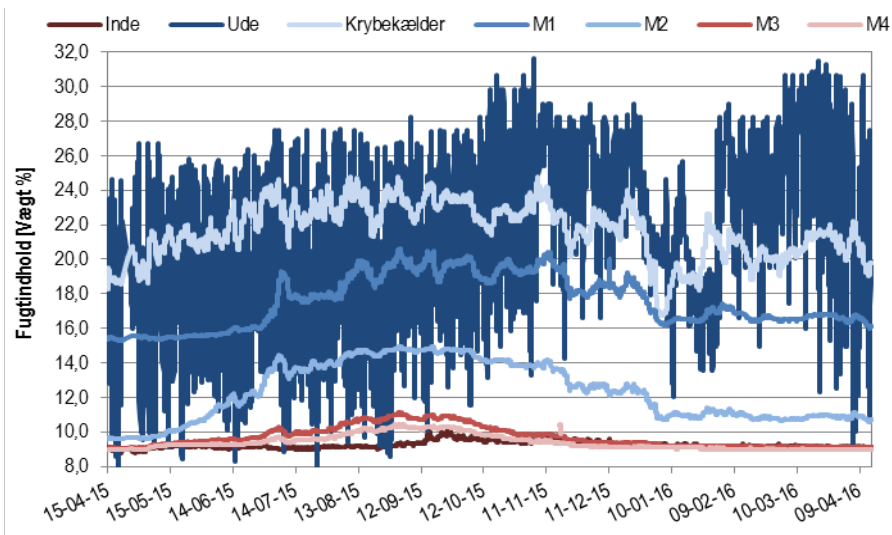
Figur 119. Måleudstyr installeret med to målepunkter med isolering mod krybekælder og to uden. På fislen ligger en rondel som måler krybekælder krybekælderforhold.

Føler nummer og beskrivelse

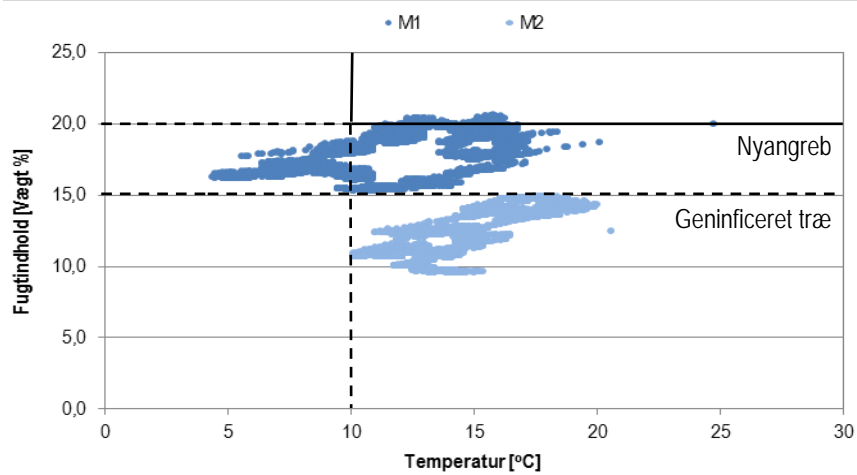
Navn på graf	Placering i bolig
Inde	Køkken
Ude	Data fra nærliggende vejrstation
Krybekælder	Krybekælder på jorden
M1	Nederst på uisoleret bjælke
M3	Øverst på bjælke med uisoleret bjælke mod kælder
M2	Nederst på isoleret bjælke
M4	Øverst på bjælke med isoleret bjælke mod kælder



Figur 56. Temperaturer i krybekælder, konstruktionen og ude- og indeklima for perioden 15/4/2015-15/4/2016.



Figur 57. Fugtforholdene i krybekælder, konstruktionen og ude- og indeklima for perioden 15/4/2015-15/4/2016.



Figur 120. Klimaforhold – temperatur versus fugtindhold i træfugt i vægt% i nederste målepunkter i dækket (M1 og M2) for perioden 15/4/2015-15/4/2016.

I denne rapport belyses, hvilke fugtforhold der kan forventes i fremtidens højisolerede klimaskærm med fokus på tage, ydervægge og krybekældre. Analyserne sker med henblik på at forebygge fugtproblemer, der kan opstå, når klimaskærmen udsættes for mere ekstreme påvirkninger forårsaget af reduceret varmestrøm gennem konstruktionerne. Højisolerede konstruktioner skal forstås som de isoleringstykkelser, der forventes brugt for at opfylde Bygningsreglement 2020 og frem over. Konklusionerne gælder for bygninger som boliger og kontorer med normal fugtbelastning. Spørgsmålet på, om de øgede isoleringstykkelser vil udsætte klimaskærmens konstruktioner for en øget risiko for fugtrelaterede skader, fx skimmelsvamp og frostsprængninger, besvares gennem litteraturstudier fra de nordiske lande, beregninger af de typiske konstruktioner samt målinger i udvalgte enfamiliehuse.

1. udgave 2017
ISBN 978-87-563-1869-3