



AALBORG UNIVERSITET
KØBENHAVN

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

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

Studenterrapport

Uddannelse: Master i Bygningsfysik

Semester: 4. semester

Titel på masterprojekt:

Valg af isoleringsmaterialer til efterisolering
af specifikke konstruktioner

Projektperiode: 1. februar-3. juni 2019

Vejleder:

Seniorforsker, Ernst Jan de Place Hansen

Bivejleder:

Videnskabelig assistent, Tessa Kvist Hansen

Studerende:



Susie M. Frederiksen

Antal normalsider: 53

Vedlagt kvittering fra Digital Eksamen

Afleveringsdato: 3. juni 2019

Resumé:

Hovedparten af bygningerne i Danmark er opført for år tilbage og skal stå mange år endnu. De er opført i en tid, hvor kravene til energiforbruget var meget mindre, end de er i dag.

Bygningerne bør derfor efterisoleres for at spare på energien til opvarmning og for at få et bedre indeklima. Det kan gøres med mange forskellige isoleringsmaterialer, men spørgsmålet er, om nogle materialer er bedre egnede end andre til efterisolering af specifikke konstruktioner?

10 forskellige almindeligt brugte isoleringsmaterialer vælges ud og en del af opgaven går på at finde deres egenskaber vedrørende fugt og varme ved at tage fat i producenter og leverandører.

Isoleringsmaterialerne simuleres med computerprogrammet WUFI i tre typiske konstruktioner i danske enfamiliehuse. Resultaterne analyseres for at finde ud af, hvordan de forskellige egenskaber påvirker resultatet af efterisoleringen fugtmæssigt. Desuden undersøges det vha. computerprogrammet HEAT2, om bygningsreglementets krav er opfyldt ved de udførte efterisoleringer.

Det viser sig, at isoleringsmaterialers densitet, opbygning, porøsitet, poreudformning, evne til at optage damp og vand samt damptæthed har stor betydning for materialets egnethed til efterisolering af forskellige konstruktioner.

Disse forhold er byggebranchen sandsynligvis ikke opmærksom på, så det er godt, at der er en anvisning om emnet på vej.

Anvisningen kan forhåbentlig være med til at nedsætte antallet af byggeskader, som opstår efter efterisolering.

FORORD

Jeg har i mange år arbejdet med anvisninger til efterisolering af eksisterende bygninger og vejledning af udførende og rådgivere på området.

Anvisningerne har været Videncenter for Energibesparelser i bygningers energiløsninger. Vejledning af udførende og rådgivende har været i form af besvarelser af henvendelser pr. telefon og mail, og som undervisning i korrekt udførelse af efterisolering.

I mit daglige arbejde har jeg savnet en dybere viden om de forskellige isoleringsmaterialer. Da jeg i sin tid læste til ingeniør, var materialelære mit foretrukne fag. Det var før, energi fyldte ret meget på dagsordenen. Det har været en fornøjelse at dykke ned i det emne igen – og kunne kombinere det med energien, som jeg nu har opdateret min viden om med Master i Bygningsfysik.

Tak til min familie og især min mand, som har gjort det muligt at bruge min tid på Masteren.

RESUMÉ

Most of the buildings in Denmark has been built years ago and has to stand for many more years. They were built when Energy regulations were less strict than today, and the new regulation requires better insulation, to reduce the energy consumption and improve the indoor climate. It can be done with a lot of different insulation materials, and the interesting question is if any materials are better than others in specific constructions?

To answer this question 10 insulation materials are chosen and their existing properties/quality concerning moisture and heat are determined by contacting the producers and manufactures. Simulations are done using the program WUFI on the insulation materials placing them in three different typical Danish single-family house constructions.

The WUFI results are analyzed to see how the moisture effects the construction depending on the different insulation materials properties.

Using the HEAT2 program it is determined if the post-insulation complies with the Danish building regulations.

The conclusion is that how suitable an insulation material is in different construction for post-insulation depends highly on its density, structure, porosity, pore design, ability to absorb steam and water plus vapor density.

The construction community is likely not aware of these facts, so it is good that there is planned a best practice instruction concerning insulation materials.

A reduction in the number of building defects after post-insulation will hopefully be the outcome of the best-practice publication.

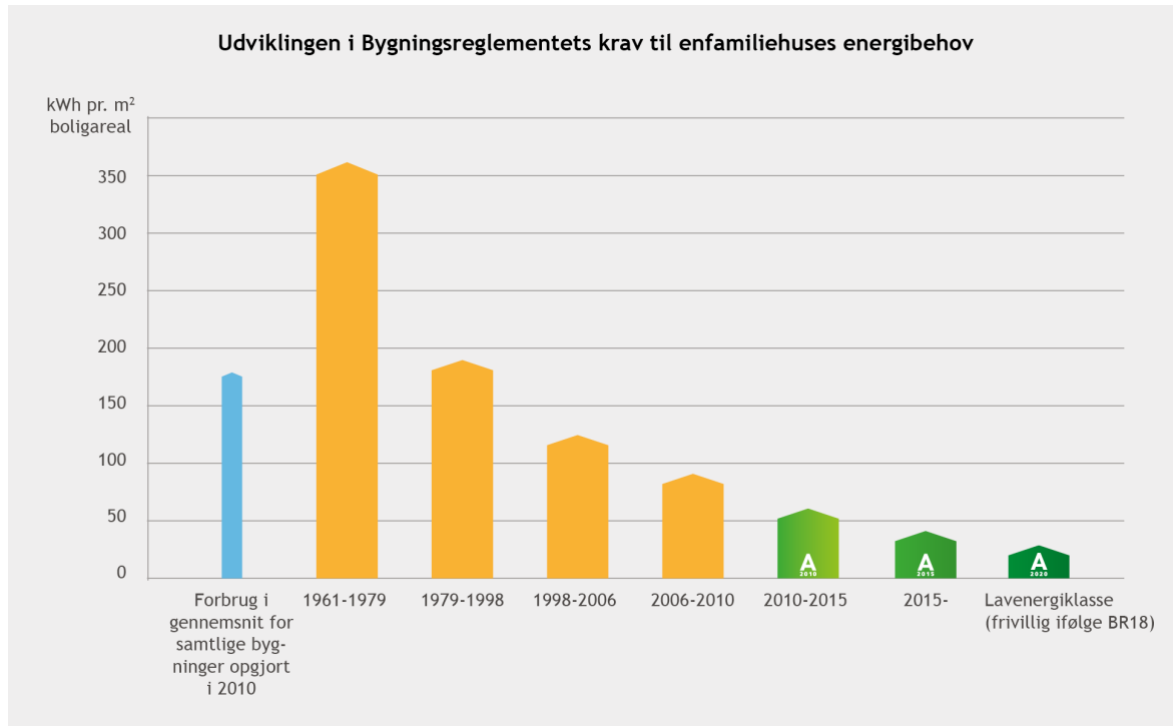
INDHOLDSFORTEGNELSE

1	INDLEDNING	4
1.1	OPGAVEFORMULERING	4
1.2	RAPPORTENS OPBYGNING	5
2	ARBEJDSMETODER	6
2.1	ISOLERINGSMATERIALER	6
2.1.1	<i>Isoleringsmaterialer og konstruktioner til efterisolering</i>	6
2.1.2	<i>Isoleringsmaterialers egenskaber</i>	6
2.1.3	<i>Indsamling af materiale</i>	6
2.2	ANVENDETE COMPUTERPROGRAMMER	6
2.2.1	<i>Simulering i WUFI</i>	6
2.2.2	<i>Beregning i HEAT2</i>	7
2.3	AFGRÆNSNING	7
3	ISOLERINGSMATERIALER	8
3.1	UDVÆLGELSE AF ISOLERINGSMATERIALER	8
3.2	FREMSTILLING AF ISOLERINGSMATERIALER	8
3.3	ISOLERINGSMATERIALERS ANVENDELSE	11
3.4	ISOLERINGSMATERIALERS UDSEENDE	12
3.5	TEORI OM EGENSKABERNE	14
3.5.1	<i>Varmeledningsevne</i>	14
3.5.2	<i>Densitet og porøsitet</i>	15
3.5.3	<i>Fugt i dampform</i>	19
3.5.4	<i>Fugt i væskeform</i>	20
3.5.5	<i>Damptæthed</i>	21
3.5.6	<i>Varmekapacitet</i>	22
3.6	BESTEMMELSE AF EGENSKABER	22
3.6.1	<i>Varmeledningsevne</i>	23
3.6.2	<i>Densitet og porøsitet</i>	23
3.6.3	<i>Fugt i dampform</i>	24
3.6.4	<i>Fugt i væskeform</i>	25
3.6.5	<i>Damptæthed</i>	26
3.6.6	<i>Varmekapacitet</i>	27
3.7	DATA OM ISOLERINGSMATERIALERS EGENSKABER	27
3.7.1	<i>Varmeledningsevne</i>	28
3.7.2	<i>Densitet og porøsitet</i>	29
3.7.3	<i>Fugt i dampform - sorptionsisotermer</i>	31
3.7.4	<i>Fugt i væskeform - kapillarsugningsevne</i>	38
3.7.5	<i>Damptæthed</i>	40
3.7.6	<i>Varmekapacitet</i>	41
4	KONSTRUKTIONER	42
4.1	ALMINDELIGE KONSTRUKTIONER I ENFAMILIEHUSE	42
4.1.1	<i>Tag</i>	42
4.1.2	<i>Ydervægge</i>	43
4.1.3	<i>Mod jord</i>	44
4.2	EFTERISOLERING AF KONSTRUKTIONERNE	44
4.2.1	<i>Udnytteligt tagrum</i>	44
4.2.2	<i>Uudnytteligt tagrum</i>	45
4.2.3	<i>Fladt tag</i>	45
4.2.4	<i>Massiv ydervæg</i>	45
4.2.5	<i>Hulmur</i>	45
4.2.6	<i>Let væg</i>	45
4.2.7	<i>Krybekælder</i>	45

4.2.8	Kælder.....	46
4.2.9	Terrændæk.....	46
4.3	EGNEDE ISOLERINGSMATERIALER TIL KONSTRUKTIONERNE.....	46
4.4	HULMUR MED FASTE BINDERE I WUFI	46
4.4.1	Vandindhold i isoleringslaget iht. WUFI.....	48
4.4.2	Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI	53
4.4.3	Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI.....	55
4.5	HULMUR MED FASTE BINDERE I HEAT2	58
4.5.1	U-værdi for hulmur med faste bindere iht. HEAT2.....	59
4.6	LET YDERVÆG I WUFI	62
4.6.1	Vandindhold i isoleringslaget iht. WUFI.....	64
4.6.2	Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI	69
4.6.3	Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI.....	74
4.7	LET YDERVÆG MED TRÆSKELET I HEAT2	79
4.7.1	U-værdi iht. Heat2	80
4.8	KÆLDERVÆG I WUFI	82
4.8.1	Vandindhold i isoleringslaget iht. WUFI.....	83
4.8.2	Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI	87
4.8.3	Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI.....	89
4.9	VARMETAB Gennem KÆLDERVÆG	91
4.9.1	U-værdi for kældervæg.....	93
5	DISKUSSION	94
5.1	HULMUR MED FASTE BINDERE.....	94
5.1.1	Fugt i efterisoleret hulmur.....	94
5.1.2	Varmetab gennem efterisoleret hulmur.....	96
5.2	LET YDERVÆG	97
5.2.1	Fugt i efterisoleret let ydervæg	97
5.2.2	Varmetab gennem efterisoleret let ydervæg	100
5.3	KÆLDERVÆG.....	101
5.3.1	Fugt i efterisoleret kældervæg.....	101
5.3.2	Varmetab gennem efterisoleret kældervæg	102
6	KONKLUSION.....	103
7	LITTERATURLISTE.....	104
8	BILAG	106

1 INDLEDNING

I Danmark er størstedelen af bygningerne opført i perioder, hvor kravene til isolering har været meget mindre end i dag. Det gælder, hvad enten der er tale om enfamiliehuse, etageejendomme eller kontorer, skoler, institutioner etc. Som det ses af grafen i Figur 1 er kravene til energibehovet for enfamiliehuse blevet strammet mange gange siden energikriserne i 1970'erne. Det samme gælder for alle andre bygninger.



Figur 1: Bygningsreglementets krav til enfamiliehuse siden det første landsdækkende bygningsreglement i 1961. Lavenergiklassen, som tidligere forventedes at blive bygningsreglementets krav i 2020, er medtaget, selvom denne er frivillig¹.

Da vores bygninger holder i mange år, og da der typisk kun opføres ca. 1 % nye bygninger om året, spiller efterisolering af bygninger en stor rolle for at spare på energien. Energiforbruget i bygninger udgør omkring 40 % det samlede energiforbrug i Danmark, og opvarmningen udgør størstedelen af dette. Forbruget i vores eksisterende bygninger er opgjort i den blå søjle. Som det ses, er der langt ned til forbruget i nye huse, så der er en noget at arbejde med.

Det er omkostningsfyldt at nedrive eksisterende bygninger for at opføre nye, men det gøres alligevel ofte. Det på trods af, at der de senere år er blevet øget fokus på bæredygtighed, og det er blevet klart, at det koster lige så meget energi at opføre en bygning, som bygningen forbruger til opvarmning i sin levetid².

1.1 OPGAVEFORMULERING

Der er i byggebranchen opstået et ønske om en guide over isoleringsmaterialers egenskaber. Guiden bør indeholde alle de kendte isoleringsmaterialer, og den skal kunne bruges som

¹ (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2018) Energikravene – Bygningsreglement 2018 side 24

² (Birgisdóttir & Madsen, 2017)

opslagsværk. I dag er det som regel økonomi og sælgere fra de forskellige producenter, der påvirker arkitekter og andre rådgivere ved valget af isoleringsmateriale på en byggesag. Guiden skulle gerne kunne bruges til at nuancere valget af isoleringsmaterialer til en bestemt konstruktion efter det bedst egnede materiale i stedet for.

I projektet sammenholdes isoleringsmaterialers forskellige egenskaber med den konstruktion, som materialet skal bygges ind i. Det undersøges, hvilke egenskaber, der er vigtige for at opnå en sund og tør konstruktion i tre forskellige traditionelle konstruktioner i danske enfamiliehuse. Det betyder, at isoleringsmaterialers forskellige varme- og fugttekniske ydeevner analyseres vha. digitale værktøjer - i dette tilfælde WUFI og HEAT2 - med henblik på at vurdere isoleringsmaterialets egnethed i den specifikke konstruktion.

Isoleringsmaterialernes egenskaber sammenlignes på mange punkter, så alle materialer vil have både plusser og minusser, men fokus er på fugt, da det betyder meget for en velfungerende efterisolering og et godt indeklima. Efterisolering er desværre ofte forbundet med fejl, der gør, at bygningen efterfølgende får problemer med fugt.

Opgaven er opdelt i to spor. Det ene går på at få fundet frem til isoleringsmaterialernes forskellige egenskaber. Det andet på at afprøve isoleringsmaterialerne i de tre forskellige konstruktioner og på den måde finde ud af, hvilke egenskaber, der bidrager positivt og hvilke, der bidrager negativt.

På sigt skulle byggebranchen gerne blive klogere på isoleringsmaterialer, deres egenskaber og brugen af dem, så den meget vigtige energirenovering af de danske bygninger bliver udført korrekt første gang.

1.2 RAPPORTENS OPBYGNING

I kapitel 2 redegøres der først kort for arbejdet med at fremskaffe oplysninger om de forskellige egenskaber for isoleringsmaterialerne. Desuden er de to anvendte computerprogrammer, WUFI og HEAT2, beskrevet.

Kapitel 3 handler omhandler valget af de 10 isoleringsmaterialer og deres egenskaber. De egenskaber, som formodes at have en indflydelse på brugen af materialerne i forskellige situationer, er beskrevet rent teoretisk. Dernæst gennemgås det, hvordan egenskaberne bestemmes et for et med udgangspunkt i de Danske Standarder/Europæiske normer (DS/EN). Til sidst opgøres de fundne egenskaber.

I kapitel 4 gennemgås de almindelige konstruktioner i danske enfamiliehuse, og hvordan de kan efterisoleres. Efterisoleringen bør ske, så energien til opvarmning af bygningerne begrænses. Der kommer med et forslag til tre konstruktioner, som isoleringsmaterialerne afprøves i. Desuden beskrives det, hvordan isoleringsmaterialerne simuleres i de tre konstruktioner, så fugt og varmekonforhold kan undersøges. Derefter kommer resultaterne af brugen af de forskellige materialer i de tre konstruktioner både fugt og varmeteknisk.

Kapitel 5 er diskussionsafsnittet, hvor resultaterne af simuleringerne i de tre konstruktioner sammenholdes med egenskaberne for isoleringsmaterialerne.

2 ARBEJDSMETODER

2.1 ISOLERINGSMATERIALER

2.1.1 Isoleringsmaterialer og konstruktioner til efterisolering

Som udgangspunkt blev der i starten af projektperioden udarbejdet et skema i et regneark, hvor de forskellige isoleringsmaterialer på det danske marked blev sat ind i kolonnerne, sammen med producent- og leverandørnavne. På baggrund af det blev der valgt 10 forskellige isoleringsmaterialer ud.

De konstruktioner, som det er muligt at efterisolere i typiske enfamiliehuse, blev lagt ind i rækkerne og på baggrund af producenter og leverandørs oplysninger, blev der sat krydser ud for de konstruktioner, hvor de anbefaler brugen af isoleringsmaterialet. Det blev brugt til at udvælge tre konstruktioner.

2.1.2 Isoleringsmaterialers egenskaber

Ved hjælp af lærebøger i materialelære og senere i forløbet en række Danske standarder/Europæiske normer (DS/EN) blev de enkelte egenskaber, som forventedes at have indflydelse på isoleringsmaterialernes brug i forskellige konstruktioner, opsummeret ligeledes i et skema i et regneark.

2.1.3 Indsamling af materiale

De egenskaber der har været tilgængelige på producenters og leverandørers hjemmesider, er hentet derfra. De egenskaber, som ikke umiddelbart har været tilgængelige, er forsøgt fremskaffet ved at ringe til producenten eller leverandøren for at bede om oplysningerne. Oprøngningerne blev fulgt op med en e-mail, hvor de ønskede egenskaberne blev beskrevet mere specifikt med henvisninger til de relevante DS/EN'er omhandlende isoleringsmaterialer.

2.2 ANVENDTE COMPUTERPROGRAMMER

2.2.1 Simulering i WUFI

Tre konstruktioner bliver simuleret i computerprogrammet WUFI for at finde ud af, hvad der sker fugtmæssigt ved brug af forskellige isoleringsmaterialer. Programmet er udviklet af Fraunhofers institut for bygningsfysik, som er beliggende i Tyskland. WUFI er en forkortelse for det tyske "Wärme und Feuchte Instationär" (Oversat til dansk: Instationær varme og fugtighed). Programmet kan regne på fugttransport i form af diffusion og kapillarsugning. Det tager udgangspunkt i virkelige forhold i udeklimaet, som f.eks. slagregn og solstråling. WUFI beregner varme- og fugtforhold i en konstruktion med en times interval og tager hensyn til materialerne i konstruktionens evne til at lagre varme og fugt³.

Input er:

- Materialer i konstruktionen
- Orientering i forhold til verdenshjørner, hældning og højde af konstruktionen
- Overflader og overgangsisolanser ind- og udvendigt

³ (Nielsen A. , 2014) Introduktion s. 1-2

- Fugtindhold i materialerne fra start
- Længden af simuleringen
- Klimaet udendørs og indendørs

Generelle input:

- Fugtindholdet i materialerne fra start er ifølge WUFI's anbefaling (80 % RF og 20 °C) med mindre andet er beskrevet.
- Der er valgt at simulere i 5 år i alle tilfælde – også fordi dette anbefales.
- Det udendørs klima er valgt til at være Lund i Sverige.
- Det indendørs klima svarer til EN 15026

2.2.2 Beregning i HEAT2

For at finde varmetabet igennem konstruktioner med kuldebroer, bruges computerprogrammet HEAT2⁴. Det er udviklet af Thomas Blomberg fra Lunds Tekniska Högskola/The Faculty of Engineering at Lund Universitet i Sverige i 1990'erne, som en del af hans ph.d., og det kan beregne varmetab i to dimensioner⁵.

Programmet er velegnet til at beregne kuldebroer, der i nye såvel som efterisolerede bygninger har stor betydning for transmissionstab. Det kan også bruges til at beregne U-værdier og overfladetemperaturer for at finde ud af, om der er risiko for kondens. Endvidere kan det beregne varmetabet til jorden fra et hus.

Input er:

- Geometrien for konstruktionen omkring kuldebroen
- Materialerne fra databasen
- Randbetingelse for inde- og udeklima samt symmetrisnit
- Størrelse af beregningsnettet i X- og y-retning

Specielle input:

- Materialedata for varmeledning rettes til i forhold til vandindhold iht. WUFI

2.3 AFGRÆNSNING

Der findes betydeligt flere isoleringsmaterialer end de 10, som der er kigget på i denne opgave. Nogen er valgt fra i et forsøg på at begrænse rapportens omfang.

Det kunne også have været interessant at undersøge flere konstruktioner, men da tiden er begrænset, er der valgt tre meget forskellige ud.

Der er ikke set på økonomi i nogen tilfælde

Der er ikke set på, hvorledes gassen i lukkede porer i isoleringsmaterialer reagerer over tid.

⁴ (Blocon AB, 2019) Hjemmeside for HEAT2

⁵ (Blomberg, 2019) Profil på LinkedIn

3 ISOLERINGSMATERIALER

3.1 UDVÆLGELSE AF ISOLERINGSMATERIALER

De 10 mest almindeligt isoleringsmaterialer på det danske marked er valgt ud og analyseret i denne rapport. Det er gjort på baggrund af, hvilke typer der er at få i handelen.

Udgangspunktet har været isoleringsmaterialerne i VarmeIsoleringsForeningens (VIF's) Produktoversigt for 2018⁶. Af den fremgår stenuld, glasuld, perlite, ekspanderet polystyren (EPS), fenolskum, polyisocyanuratskum (PIR) og cellulosefibre (papir). I en tidligere udgave fra 2007 fremgik ekstruderet polystyren (XPS) også, men det gjorde Fenolskum og PIR til gengæld ikke. I VIF's udgave fra 2012 er Fenolskum og PIR kommet til, men XPS fremgår heller ikke her. XPS forhandles af de samme, som sælger EPS, så isoleringsmaterialet er inkluderet, selv om det ikke fremstilles i Danmark. Udover det er medtaget træfiberisolering, der også har mange forhandlere herhjemme. Som det sidste isoleringsmateriale er medtaget Aerogel.

For at bevare overblikket organiseres isoleringsmaterialerne i tre grupper igennem hele rapporten – og stilles op i samme rækkefølge. Den første gruppe indeholder de uorganiske, der fremstilles af materialer baseret på sten og sand. Her er mineraluld i form af sten- og glasuld, perlite og aerogel. Den anden gruppe indeholder de organiske plastprodukter, der er baseret på olie eller polymerer – de såkaldte celleplaster. Her er ekspanderet polystyren (EPS), ekstruderet polystyren (XPS), fenolskum og polyisocyanuratskum (PIR). Den tredje indeholder de organiske produkter baseret på træ dvs. cellulose. Her er de mest almindelige organiske isoleringsmaterialer papir og træfiber.

En anden vigtig faktor i udvælgelsen af isoleringsmaterialer har været at kunne dække efterisolering af så mange konstruktioner som muligt med henblik på at kunne se, hvordan de forskellige materialer reagerer i forskellige situationer

3.2 FREMSTILLING AF ISOLERINGSMATERIALER

Hvordan, de enkelte isoleringsprodukter er fremstillet, betyder noget for produktets isoleringsevne, dets densitet, dets porøsitet, dets fugtoptag etc., så det beskrives kort. Beskrivelsen fremgår af anden kolonne i Tabel 1 til Tabel 3. I tredje kolonne er producenterne/leverandørerne på det danske marked nævnt.

Produkter af uorganiske materialer

De uorganiske isoleringsmaterialer har det til fælles, at grundbestanddelen er sand- eller stenmaterialer, dvs. de indeholder Silicium, der udgør ca. 25 % af al grundstof på jorden⁷. Silicium indgår i strandsand, kvarts, granit, basalt etc., så en stor del af jordens skorpe består af det⁸.

⁶ (VarmeisoleringsForeningen, 2019)

⁷ (Jensen, et al., 2005) s. 16

⁸ (Bostrup, et al., 2019) Silicium

Tabel 1: Fremstilling af uorganiske isoleringsmaterialer

	Fremstilling	Producent/leverandør
Stenuld	Basalt (50 % siliciumoxid) og affaldsprodukter blandes og opvarmes til 1.500 °C, så det bliver en flydende stenmasse. Fibrene fra stenmassen spindes sammen til tråde og tilsættes bindemiddel, før produktet hærdes, så det bliver til måtter ⁹ .	Rockwool Paroc
Glasuld	Kvartssand (71-74 % siliciumoxid), sod, kalk og glasaffald blandes og opvarmes til 1.100 °C, så det bliver en flydende glasmasse. Fibrene fra glasmassen spindes sammen til tråde og tilsættes bindemiddel, før produktet hærdes, så det bliver til måtter ¹⁰ .	Isover Knauf
Perlite	En vulkansk bjergart (75 % siliciumoxid) indeholdende vand knuses. Materialet opvarmes til 1.100-1.200 °C, hvorved vandet bliver til damp og får perlitekornene til at ekspandere. De hvide uregelmæssige korn er op til 6 mm store. De overfladebehandles for ikke at suge vand ¹¹ .	Nordisk Perlite
Aerogel	Fremstilles af en gele, hvor væsken erstattes af en gas. På den måde opnås syntetisk siliciumoxid i fast form, der er meget skrøbeligt. Det forstærkes med enten polyesterplasten PET og/eller glasfibre for at blive til tynde isoleringsmåtter ¹² .	Paroc Skalflex

Produkter af celleplast

Celleplasterne er alle organiske og fremstilles ved opskumning af et plastprodukt, så der opstår en porøs skumplast. Opskumning sker på forskellige måder og med forskellige gasser. Gassen kan være medbestemmende for, hvor godt materialet isolerer.

Tabel 2: Fremstilling af organiske isoleringsmaterialer af celleplast

	Fremstilling	Producent/leverandør
Ekspanderet polystyren (EPS)	Opskumning af polystyren (94 %). Vanddamp blødgør polystyrenperlerne, og den tilsatte pentan (6 %) fordamper, hvorved perlerne ekspanderer. Mellemlagring for at opnå trykudligning. Udstøbning i varm form, så perlerne udvider sig endnu en gang og støbes sammen. Afkøling ¹³ .	Jackon Sundolit BEWI (tidl. Styrolit)

⁹ (Bengtsson & Selck, 2006) s. 209-210

¹⁰ (Bengtsson & Selck, 2006) s. 209-210

¹¹ (Pedersen, de Place Hansen, Hansen, & Marsh, 2003) s. 39-40

¹² (Aspen Aerogels, 2019) About Aerogel

¹³ (Schmidt, 2006) s. 77-78 og (Plastindustrien, 2019) EPS-plast (ekspanderet polystyren)

Ekstruderet polystyren (XPS)	Polystyrengranulat smeltes, blandes med additiver og føres ud i en ekstruder. Her injiceres kuldioxid for ekspansion, og massen ekstruderes mellem to plader, hvor afstanden mellem dem bestemmer pladetykkelsen. Dejen opvarmes, så materialet bages sammen. Farve tilsættes afhængigt af producentens varemærke.	Jackson Sundolitt BEWI
Polyisocyanuratskum (PIR)	Fremstilles ved polymerisering af isocyanurat modificeret med polyurethan for ikke at blive for sprødt og for at kunne styre processen ¹⁴ . Gassen brugt til den mekaniske opskumning/drivmiddel kan være en pentan-isomer ¹⁵ eller kuldioxid. Ved opskumningen klæber skummet sig fast til en beklædning på begge sider, der kan bestå af f.eks. glasvæv eller aluminumsfolie. Det sker i en laminator, som bestemmer tykkelsen af pladen.	Kingspan BEWI
Fenolskum	En kemisk plast indeholdende monomererne fenol og formaldehyd skummes mekanisk op med en gas, der isolerer bedre end luft. Skummet udvider sig og klæber sig til glasvæv eller aluminiumsfolie på begge sider i en laminator, som bestemmer tykkelsen af pladen. Den svagt røde farve kommer af urenheder i fenolen ¹⁶ .	Kingspan

Produkter af organiske materialer

De cellulosebaserede isoleringsmaterialer fremstilles med udgangspunkt i træ. I det omfang fremstillingen sker udenfor Danmark, er producentens nationalitet tilføjet i en parentes.

Tabel 3: Fremstilling af cellulosebaserede organiske isoleringsmaterialer

	Fremstilling	Leverandør, producent
Papir	Papirisolering fremstilles af genbrugspapir i form af aviser og reklamer, der rives i småstykker og derefter findeles til en løsuld. Der iblandes midler mod brand og råd i pulverform ¹⁷ .	Papiruld Danmark CBI DK, Isocell (A) Isodan, VarmFiber (S) Papirisolering Aps. Thermofloc (A) Breinholm Gruppen, Climacell (D) STEICO, Steicofloc (D)

¹⁴ (Plastindustrien, 2019) PIR-skum, polyisocyanuratskum og (Jensen, et al., 2005) s. 511

¹⁵ (Thermal insulation materials) s. 7 og (Jensen, et al., 2005) s. 537

¹⁶ (Jensen, et al., 2005) s. 113-114

¹⁷ (Pedersen, de Place Hansen, Hansen, & Marsh, 2003) s. 27-28

Træfiber	Træfiber fremstilles fortrinsvis af frisk nåletræ, der har længere fibre end løvtræ. Træet er enten ikke egnede træstykker eller restprodukter. <u>Våd proces:</u> Først findeles træflisen, og derefter skilles træfibrene ad i en våd mekanisk proces. Hovedsageligt løsfyld til indblæsning, men også måtter. <u>Tør proces:</u> Den findelte træflis får skilt træfibrene ad i en ren mekanisk proces. Hovedsageligt træfibermåtter, men også løsfyld¹⁸.	KKS-Woodfibre (S) TræfiberDanmark, TFDK Flex & Homatherm (D) Dansk Træfiberisolering, Hunton Nativo (N) CBI Danmark, Agepan (P) Thermocell Denmark STEICO, Steicoflex & -zell (D)
----------	--	---

3.3 ISOLERINGSMATERIALERS ANVENDELSE

Isoleringsmaterialer findes i to forskellige variationer. Den ene variation er løsfyld, som kan bruges i hulrum mellem andre byggematerialer, som holder isoleringsmaterialet på plads. I Danmark har det siden 1960'erne været helt almindeligt at fylde løsfyld i hulmure eller på loftet i ældre huse, og i dag er det også almindeligt at bruge løsfyld i skeletkonstruktioner i nye træhuse, hvad enten det er i vægge eller i loftskonstruktioner. Almindelige løsfyldsprodukter er sten- og glasuld, perlite, kugler af ekspanderet polystyren samt papir og træfiber.

Den anden variation er måtter – også kaldet batts - eller plader. Mineraluld, som stenudd og glasuld, er i måtteform eftergiveligt, så materialet relativt nemt kan skæres til, så det slutter tæt imellem spærerne i en tagkonstruktion eller det lodrette træ/stål i en skeletkonstruktion. Det samme gælder måtter af træfiber. Der er også en fordel op af en ujævn overflade som f.eks. ved indvendig efterisolering af en muret væg med puds eller ved udvendig efterisolering af en kældervæg. Plader i celleplast er faste og hårde i det, så de er knap så nemme at arbejde med i en trækonstruktion, da de er sværere at få til at slutte tæt til træet. Til gengæld er de ofte anvendt mod jord, men det stiller krav til planheden af overfladen, så isoleringen kan slutte tæt til. Mod jord er det meget normalt at anvende ekspanderet og ekstruderet polystyren. Generelt bruges den ekspanderede polystyren, hvor trykket ikke er så stort, og den ekstruderede tager over, når trykket på isoleringen bliver større.

¹⁸ (TRÆ.DK Danmarks træportal, 2019) Isolering med træ

3.4 ISOLERINGSMATERIALERS UDSEENDE

I det følgende er vist eksempler på de forskellige isoleringsmaterialers udseende gruppevis.

Produkter af uorganiske materialer



Figur 2: Eksempel på stenuld i måtteform fra Rockwool



Figur 3: Eksempel på glasuld i måtteform fra Isover



Figur 4: Perlite fra Dansk Perlite i løse korn



Figur 5: Spaceloft 10 mm fra Aspen Aerogels i måtteform

Produkter af celleplast



Figur 6: Eksempel på ekspanderet polystyren (EPS) fra Sundolitt i pladeform



Figur 7: Eksempel på ekstruderet polystyren (XPS) fra Jackon i pladeform



Figur 8: Eksempel på Polyisocyanuratskum (PIR) fra Kingspan (Therma) i pladeform



Figur 9: Eksempel på fenolskum fra Kingspan (Kooltherm) i pladeform

Produkter af organiske materialer



Figur 10: Eksempel på papir-isolering fra Isocell (A) som løsfyld



Figur 11: Eksempel på træfiber fra Hunton Nativo (N) i måtteform

3.5 TEORI OM EGENSKABERNE

3.5.1 Varmeledningsevne

Et materials varmeledningsevne er, hvad enten det drejer sig om et isoleringsmateriale eller et hvilket som helst andet materiale i en bygning, en faktor, der har betydning for indeklimaet. Vi ønsker at opvarme vores bygninger til en behagelig temperatur og for at gøre det så økonomisk som muligt, isoleres konstruktionerne i klimaskærmen, så de holder på varmen.

Isoleringsmaterialer har en lav varmeledningsevne i forhold til øvrige byggematerialer, men selv om en konstruktion er isoleret, forsvinder der varme ud gennem den. Bare væsentligt mindre, end hvis den ikke var isoleret. Varmestrømmen Φ [W] gennem et materiale, beskrives således af Fourier¹⁹:

$$\Phi = \lambda \frac{A}{d} \Delta\theta$$

Da A er arealet [m^2], d tykkelsen [m] og $\Delta\theta$ forskellen i temperatur [K eller $^{\circ}\text{C}$] på udvendig og indvendig side af isoleringsmaterialet, er varmeledningsevnen λ [W/m K] bestemmende for varmemstrømmen. Jo mindre λ -værdi, jo bedre holder et materiale på varmen.

Varmeledningsevnen er én af tre måder, som varme transporteres på. De to andre er stråling og konvektion. Varmeledningsevnen er den mest betydende ved de temperaturer, der er indeni og udenom en bygning²⁰. Varmeledning sker ved molekylebevægelser gennem fast stof²¹ som det illustreres i Figur 12²².

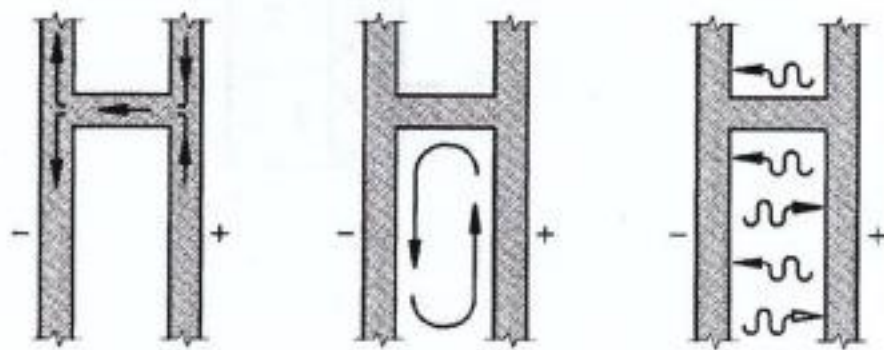
Konvektion sker i hulrum i et materiale, hvis temperaturer på overfladerne er forskellige. Stråling sker mellem to overflader i et materiale – også ved forskel i temperaturen.

¹⁹ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 45

²⁰ (Hagemann, 1988) s. 49-50

²¹ (Møller & Nielsen, 2017) s. 2 og (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 48

²² (Møller & Nielsen, 2017) s. 1



Princip for ledning, konvektion og stråling.

Figur 12: Illustration af varmetransports tre forskellige mekanismer²³

Varmeledningsevnen indgår i isolansen R [$\text{m}^2 \text{ K/W}$] for hvert enkelt lag af et materiale i en konstruktion givet ved

$$R = \frac{d}{\lambda}$$

Ud over isolansen af det enkelte lag i konstruktionen indgår også en overgangsisolans ved yderside og inderside af konstruktionen i summen af isolanser ΣR .

Summen af isolanser indgår i transmissionskoefficienten, også kaldet U -værdien [$\text{W/m}^2 \text{ K}$], som er bestemmende for varmetabet gennem en konstruktion i en bygning

$$U = \frac{1}{\Sigma R}$$

Transmissionstab, også kaldet varmetabet, Φ [W] er givet ved:

$$\Phi = U A \Delta\theta$$

hvor U er transmissionskoefficienten [$\text{W/m}^2 \text{ K}$], A arealet [m^2] og $\Delta\theta$ [$^{\circ}\text{C}$] lig forskellen i temperatur på udvendig og indvendig side af konstruktionen.

3.5.2 Densitet og porøsitet

Densiteten af et materiale ρ [kg/m^3] er givet ved

$$\rho = \frac{m}{V}$$

hvor m er massen [kg], og V er volumenet [m^3].

²³ (Møller & Nielsen, 2017) s. 1

Isoleringsmaterialer er typisk relativt lette, da de består af en stor procentdel hulrum og en mindre del fast materiale. Hulrummene kaldes for porer. Typisk har isoleringsmaterialer en porøsitet på omkring 95 %, hvilket er grunden til, at de isolerer godt. En anden god grund er at ledningen i det faste materiale er mange gange større end ledningen i den luft, som befinder sig i porerne.

Porøsiteten p [%] er givet ved

$$p = \frac{V_p}{V} 100$$

hvor V_p er volumenet af porerne [m^3], og V er volumenet af hele materialet [m^3].

Som det ses i Figur 13²⁴, kan porerne have mange forskellige udformninger og være enten lukkede eller åbne. Endelig kan materialet være diskontinuert, dvs. mange mindre materialestykker der kun rører hinanden få steder. Det samme gælder for andre materialer end isoleringsmaterialer f.eks. træ, mursten og beton.



Figur 13: Porefordeling i materialer

Porernes størrelse og fordeling betyder meget for isoleringsmaterialets egenskaber med hensyn til varmeledning og fugt.

Varmeledning og porøsitet

Varmeledningen afhænger af isoleringsmaterialets opbygning. Den store porøsitet bidrager positivt, især ved små porer. Hvis porerne er større end cirka 1 mm i diameter, kan der opstå konvektion inden i de enkelte porer, som bidrager til, at varmetransporten stiger. Der kan ligeledes opstå stråling, som også trækker i den forkerte retning²⁵. Konvektionen er vist i Figur 14.

Porernes udformning har indflydelse på varmeledningsevnen, idet varmen har sværere ved at bevæge sig i de luftfyldte porer end at gå igennem materialet. Varmeledningsevnen er meget mindre for luft ($\lambda = 0,024$ [W/m K]) end den er for det faste stof i isoleringsmaterialet²⁶.

Isoleringsmaterialer med lukkede porer kan fremstilles med en anden gas end almindelig luft i porerne. F.eks. en pentan-forbindelse, hvis varmeledning er 0,012-0.013 [W/m K]²⁷, dvs. ca.

²⁴ (Brandt, 2009) s. 24

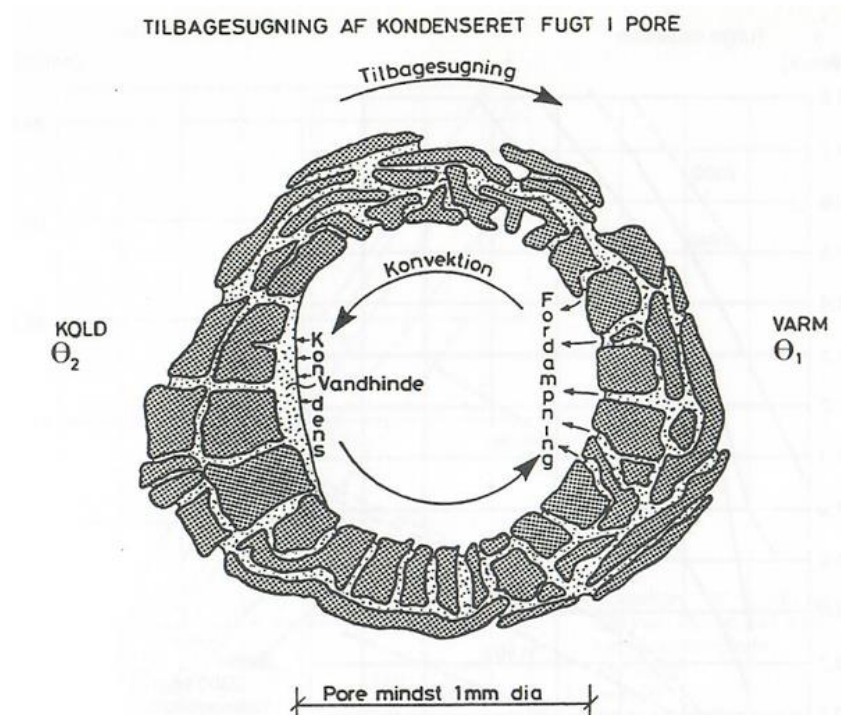
²⁵ (Hagemann, 1988) s. 52 og 60

²⁶ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 56

²⁷ (Thermal insulation materials) s. 7

det halve af luft, eller kuldioxid som har en varmeledning på 0,018 [W/m K]²⁸, dvs. trefjerdedele af lufts. Det giver et isoleringsmateriale, der holder bedre på varmen.

Varmetransporten bliver større, når der kommer fugt i porerne som vist i Figur 14, idet varmeledningsevnen for vand ($\lambda = 0,6$ [W/m K]) er mange gange større end for luft, og fordi varmestrømmen gennem materialet forøges ved konvektionsprocessen²⁹.



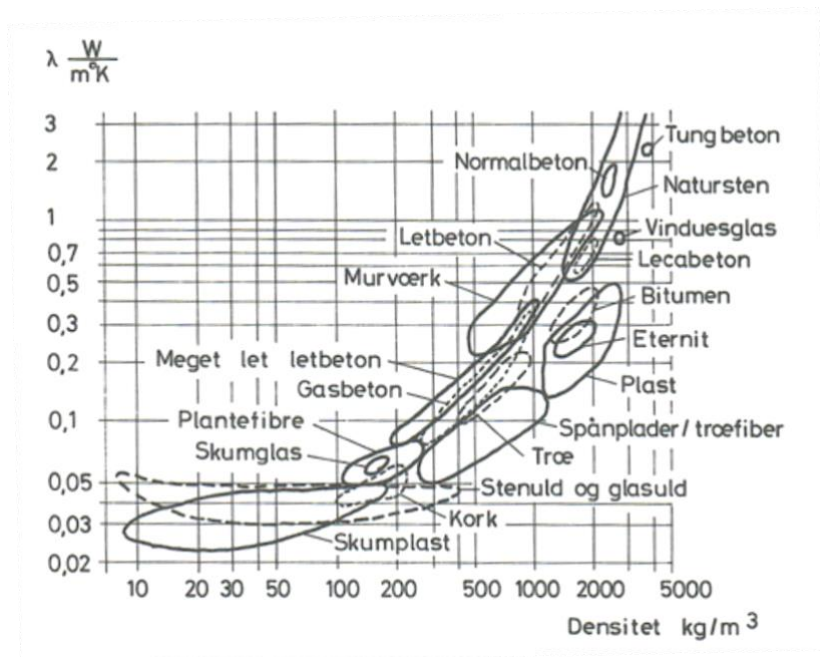
Figur 14: Varme- og fugttransport i og omkring en pore³⁰

Som det ses af Figur 15 har isoleringsmaterialerne skumplast, stenuld og glasuld samt kork en varmeledningsevne, der er mindre end 0,05 [W/m K], og en densitet, der er lavere end øvrige byggematerialer, som f.eks. træ, murværk eller beton.

²⁸ (Møller & Nielsen, 2017) s. 23

²⁹ (Hagemann, 1988) s. 63 og (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 57

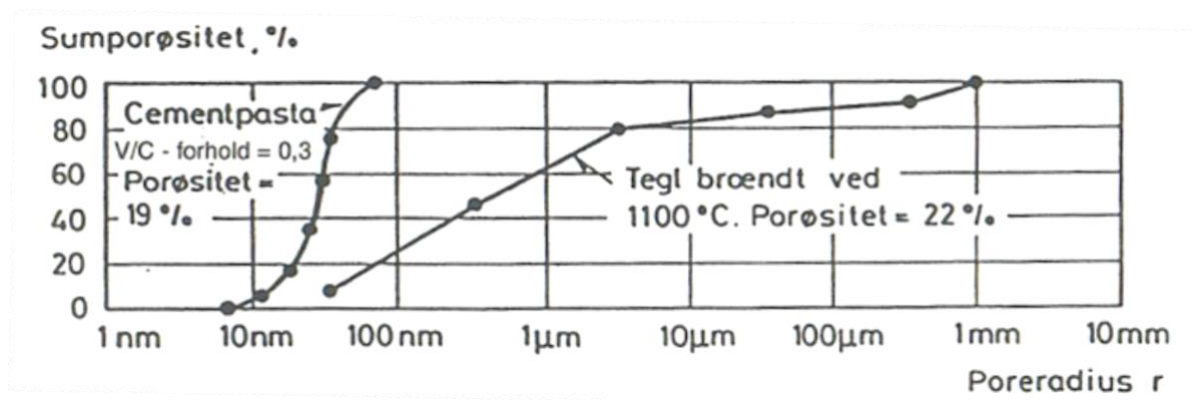
³⁰ (Hagemann, 1988) s. 63 og (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 57



Figur 15: Varmeledningsevne for byggematerialer afhængigt af densiteten (logaritmiske akser) ³¹.

Fugt og porøsitet

Porøsiteten siger intet om materialets egenskaber fugtmæssigt. Det er derfor vigtigt at vide noget om størrelsen af porerne og fordelingen af porerne størrelsesmæssigt. I Figur 16 fremgår porestørrelsesfordelingen for to almindelige byggematerialer med næsten samme porøsitet, men vidt forskellige egenskaber fugtmæssigt. Porestørrelsen opgøres som radius af en kugle, som nogenlunde svarer til poren, og angives på en logaritmisk x-akse.



Figur 16: Porestørrelsesfordeling i cementpasta og tegl ³²

³¹ (Hagemann, 1988) s. 60 og (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 53

³² (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 33

En mere brugbar måde at opgøre porøsiteten på, er den såkaldte specifikke overflade [m^2/kg], som er givet ved

$$\text{Specifik overflade} = \frac{A_{\text{overflade}}}{m}$$

hvor $A_{\text{overflade}}$ [m^2] er arealet af den ydre overflade af materialet og overfladen indeni porerne i materialet, og m er massen [kg].

Porerne har ikke kun indflydelse på varmeledningsevnen og fugten. Porøsiteten betyder også noget for materialets styrke og stivhed, og dets holdbarhed. I det danske klima afhænger holdbarheden af et materiale af hygroskopiciteten, dvs. evnen til at optage vanddamp fra luften³³ og kapillarsugningsevnen, dvs. evnen til at suge vand op, idet fugt/vand i mange tilfælde er skyld i byggeskader.

3.5.3 Fugt i dampform

I porøse materialer kan fugt binde sig, og de kaldes derfor for hygroskopiske. Det gælder, hvad enten porerne er lukkede, åbne eller materialet er diskontinuert, som vist i Figur 13. Hygroskopiske materialer kan optage og afgive fugt fra luften afhængigt af luftfugtigheden³⁴.

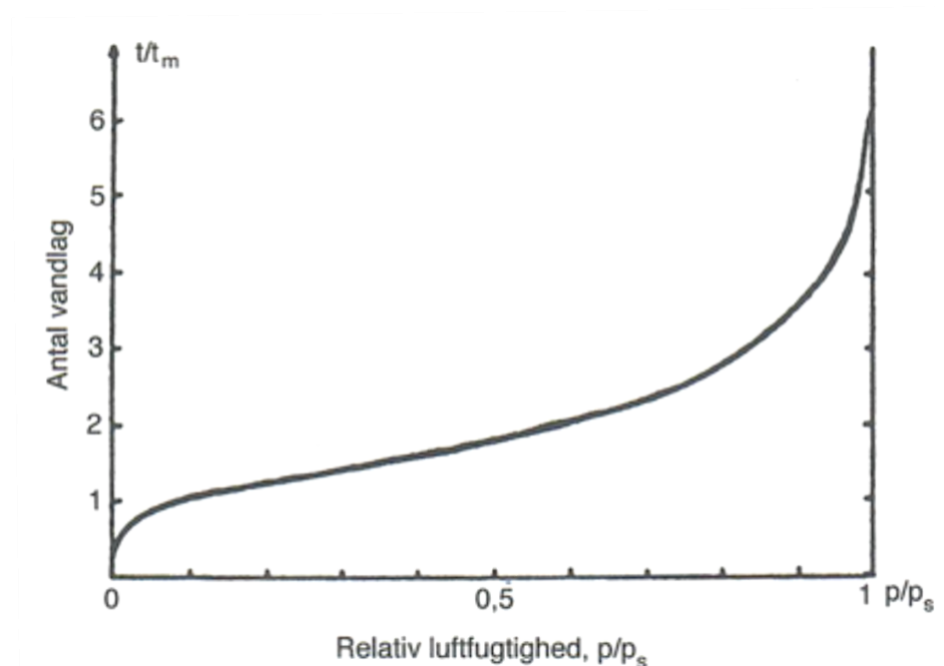
Fugt i luften vil binde sig fysisk til et isoleringsmateriales overflade ved hjælp af adsorption. Jo større luftfugtighed der er, hvor materialet befinder sig, og jo større specifik overflade, jo større mængde fugt kan binde sig til det. Lagene lægger sig et vandmolekylelag ad gangen.

Når isoleringsmaterialet er i ligevægt med den omgivende fugt, er der det samme damptryk i materialet som i luften omkring det, og der opstår en fugtligevægt. Hvis fugtligevægten er fundet ved en række forskellige relative luftfugtigheder, kan den vises i form af en sorptionskurve, hvor ligevægtspunkterne forbindes i en kurve.

Jo mindre porer og jo større overflade af materialet, jo mere fugt kan bindes i materialet. De mindre porer kommer der først fugt i. Jo højere relativ luftfugtighed, jo større mængde fugt kan binde sig også i de større porer. Grænsen for den hygroskopiske fugt sættes normalt ved 98 % relativ luftfugtighed. Eksempler på sorptionskurver ses i Figur 17 og Figur 18.

³³ (Hagemann, 1988) s. 39-40

³⁴ (Brandt, 2009) s. 23-24



Figur 17: Sorptionskurve – antal vandlag som funktion af den relative luftfugtighed³⁵

Fugt i luften, det vil sige i dampform, transporteres enten i form af diffusion eller konvektion. Ved diffusion bevæger vanddampen sig mod områder med mindre tryk/vandindhold. Diffusion er som regel mindre end konvektion, da diffusion foregår igennem det porøse isoleringsmateriale. Konvektion foregår som regel igennem utætheder, men kan også ske i meget porøse isoleringsmaterialer f.eks. mineraluld med lav densitet.

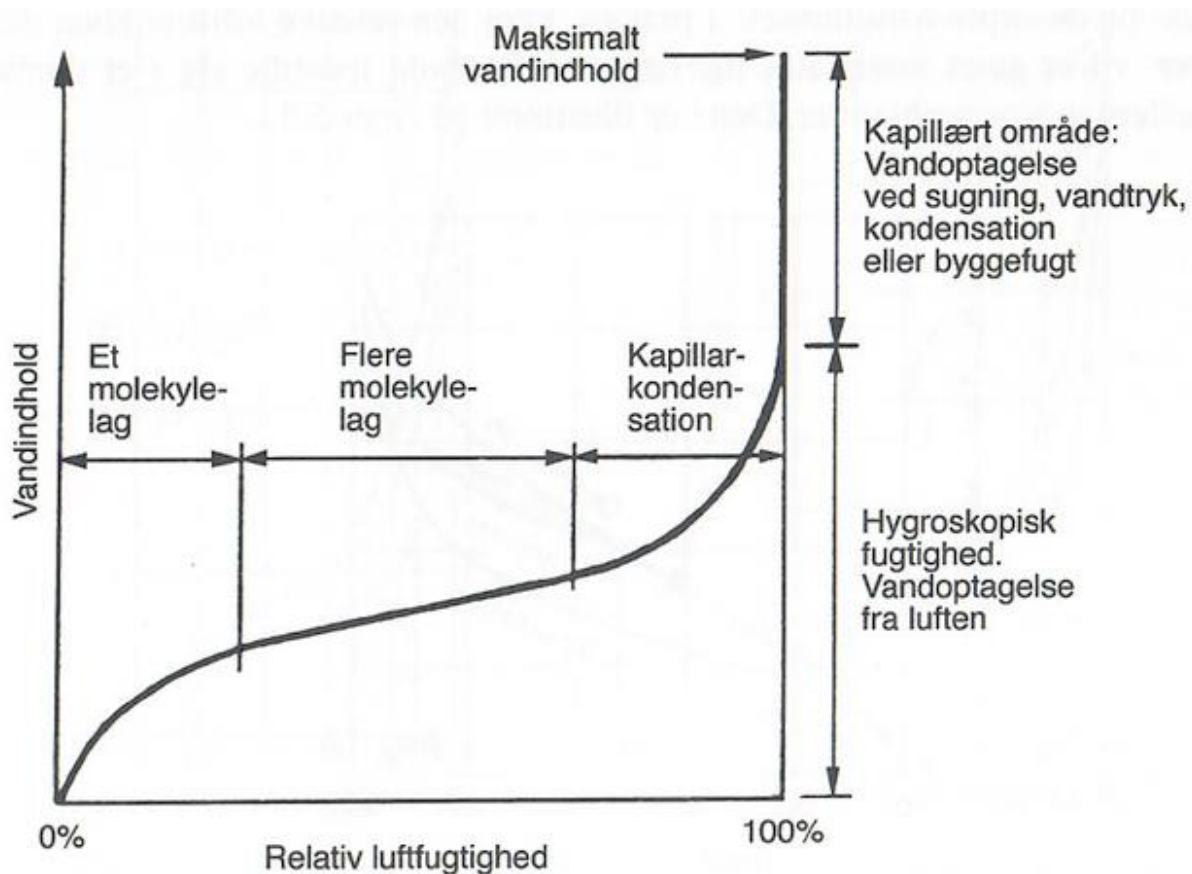
3.5.4 Fugt i væskeform

Et materiales evne til at opsuge vand afhænger også af materialets porøsitet. Her er porernes/hulrummets størrelse og form bestemmende for, hvor meget vand, der suges ind i materialet ved kapillarsugning. I små porer kan vandet suges længere op end i større porer, grundet vedhæftningskraften mellem vand og materiale. I små porer går opsugningen dog langsommere end i store porer³⁶. Det er sammenhængen mellem diameteren på porerne i materialet og den relative luftfugtighed, der bestemmer, hvornår kapillarsugningen begynder³⁷. Typisk sker det så småt fra 80-90 % relativ luftfugtighed som vist i Figur 18.

³⁵ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 76

³⁶ (Brandt, 2009) s. 35-37

³⁷ (Brandt, 2009) s. 27



Figur 18: Sorptionskurve med tilføjelse af det kapillære område³⁸.

3.5.5 Damptæthed

Et materiales tæthed over for vanddamp er givet ved vanddampdiffusionsmodstanden

$$Z_p = \frac{d}{\delta_p}$$

hvor d er tykkelsen af materialet [m], og δ_p er vanddamppermeabiliteten [kg/m s Pa].

Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren μ er givet ved

$$\mu = \frac{\delta_{\text{air}}}{\delta}$$

Hvor δ_{air} er damppermeabiliteten for luften. Diffusionsmodstanden for luft er $\mu = 1$ [GPa s m²/kg].

³⁸ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 77

3.5.6 Varmekapacitet

Den specifikke varmekapacitet c_p [J/kg K] angiver, hvor meget varme, der skal til for at opvarme et kilogram materiale en grad ved konstant tryk, og er givet ved³⁹

$$c_p = \frac{Q}{m \Delta\theta}$$

hvor Q er varmemængden [J], m er massen [kg], og $\Delta\theta$ er temperaturforskellen [K]. Den specifikke varmekapacitet for luft er $c_p = 1.000$ [J/kg K] og for vand $c_p = 4.200$ [J/kg K]⁴⁰.

3.6 BESTEMMELSE AF EGENSKABER

Isoleringsmaterialer skal leve op til en række krav formuleret i Danske standarder/Europæiske normer. Faktisk foreligger der en standard for nærmest hvert eneste isoleringsmateriale. Nogle få isoleringsmaterialer har egenskaber så tæt på hinanden, at de deler standard – f.eks. er glasuld og stenuld i en fælles mineraluldstandard. Polyisocyanuratskum (PIR) dækkes af standarden for polyurethanskum (PUR)⁴¹. Der er også en fælles standard for løsfyld af papir og træfiber, der begge er cellulosebaserede.

9 ud af de 10 udvalgte isoleringsmaterialer dækkes af disse standarder:

- DS/EN 13162 Fabriksfremstillede produkter af mineraluld
- DS/EN 13163 Fabriksfremstillede produkter af ekspanderet polystyren (EPS)
- DS/EN 13164 Fabriksfremstillede produkter af ekstruderet polystyrenskum (XPS)
- DS/EN 13165 Fabriksfremstillede produkter af hårdt polyurethanskum (PUR)
- DS/EN 13166 Fabriksfremstillede produkter af phenolskum (PF)
- DS/EN 13171 Fabriksfremstillede produkter af træfibre
- DS/EN 14064-1 In situ-formede løsfyldsprodukter af mineraluld
- DS/EN 14316-1 In situ-formet ekspanderet perlit
- DS/EN 15101-1 In situ-fremstillede løsfyldsprodukter af cellulose
- DS/EN 16809-1 In situ-fremstillede produkter af løse og bundne EPS-perler

Aerogel er dækket af:

- ASTM C1728 – 17 Standard Specification for Flexible Aerogel Insulation

En generel standard, der er god at kende, er DS/EN ISO 10456 Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaber – Tabeldesignværdier. Den indeholder en tabel med isoleringsmaterials densitet, oplysninger om fugtindhold og varmekapacitet, som kan slå op i, hvis oplysningerne er svære at fremskaffe på anden vis.

Standarderne for det enkelte isoleringsmateriale henviser igen til standarder for de enkelte egenskaber i forhold til størrelsen af måtter/plader (DS/EN 822-25), reaktion overfor ild (DS/EN 13501-1 og DS/EN 15715), dimensions stabilitet (DS/EN 1603-04), styrke (DS/EN 826), bøjestykke (DS/EN 12089) etc. Standarderne beskriver udføreligt, hvordan de enkelte egenskaber bestemmes.

³⁹ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 47

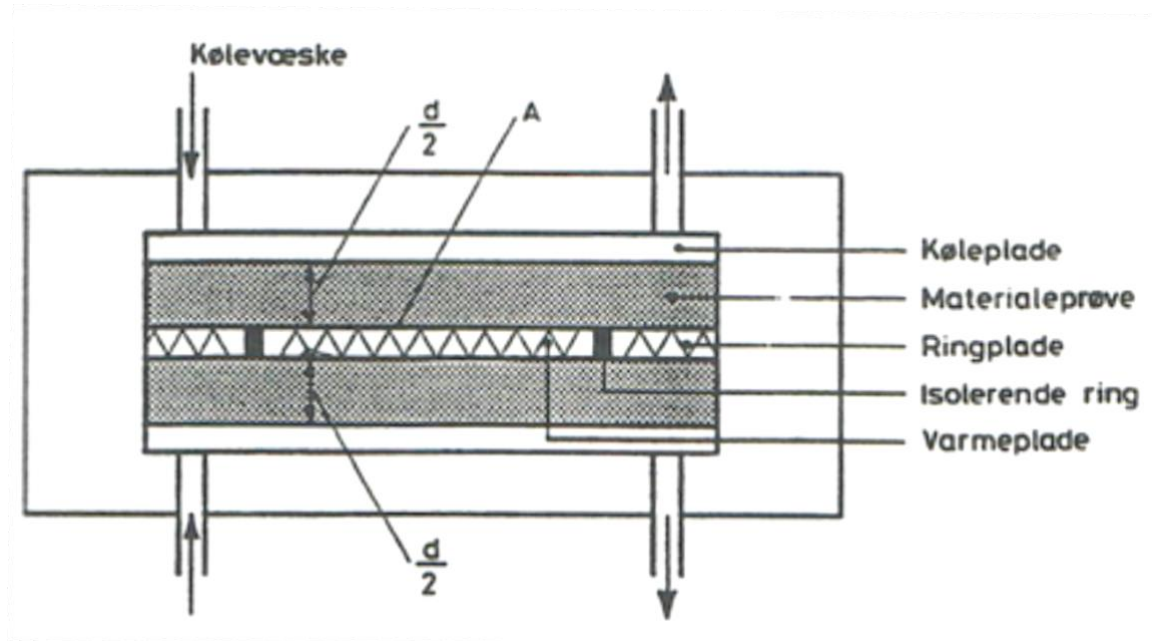
⁴⁰ (Møller & Nielsen, 2017) s. 37 og (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 48

⁴¹ (PUR-sektionen, 2012) s. 5 og 8

I de følgende afsnit er de vigtigste standarder vedr. varmeledning og fugt beskrevet.

3.6.1 Varmeledningsevne

Varmeledningsevnen bestemmes iht. DS/EN 12667 Byggematerialers termiske ydeevne – Bestemmelse af isolans ved hjælp af beskyttet varmeplade og varmestrømsmåler – Produkter med høj og middel isolans eller DS/EN 12939 Termisk ydeevne – Byggematerialer og produkter – Bestemmelse af isolans ved hjælp af beskyttet varmeplade og varmestrømsmåler – Tykke produktet med høj og middel isolans - for isoleringsmaterialer, der er tykkere end 100 mm.



Figur 19: Pladeapparat til bestemmelse af varmeledningsevne⁴²

Varmeledningsevnen findes ved at lægge to ens stykker isolering i et apparat, som har en varmeplade i midten og en køleplade på den anden side af isoleringsprøverne. Det sikres, at varmestrømmen gennem isoleringsmaterialet udelukkende bevæger sig fra varmeplade til køleplade, dvs. igennem prøverne. Når der ikke længere er udsving, kan varmeledningen bestemmes ud fra effekten til varmepladen, temperaturen på de to køleplader samt areal og tykkelse af prøverne – ved hjælp af Fouriers lov⁴³. Apparatet findes også i en udgave med en kun en køleplade, og derfor kun plads til en prøve.

3.6.2 Densitet og porøsitet

Densitet og porøsitet bestemmes vha. Veje-dyppe-veje-metoden, som bygger på Archimedes lov⁴⁴. Prøven mættes med vand og vejes både ovenfor vandet m_{ov} [kg] og nedenunder vandet m_u [kg]. Prøven tørres derefter ud ved 105 °C og vejes igen for at bestemme m_0 [kg].

Det samlede volumen V [m³] er iht. Archimedes

⁴² (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 63 og (Hagemann, 1988) s. 68

⁴³ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 63 og (Hagemann, 1988) s. 68

⁴⁴ (Nielsen & Gottfredsen, 1997) s. 34-35

$$V = \frac{m_{ov} - m_u}{\rho_w}$$

De åbne porers volumen V_a [m³] er givet ved

$$V_a = \frac{m_{ov} - m_0}{\rho_w}$$

hvor ρ_w er vands densitet [kg/m³]

Den tilsyneladende tørdensitet ρ_d [kg/m³] er givet ved

$$\rho_{tf} = \frac{m_0}{V} = \frac{m_0}{m_{ov} - m_u} \rho_w$$

Den tilsyneladende faststofdensitet ρ_d [kg/m³] er givet ved

$$\rho_d = \frac{m_0}{V - V_a} = \frac{m_0}{m_0 - m_u} \rho_w$$

Den åbne porøsitet p_a findes som

$$p_a = \frac{V_a}{V} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov} - m_u}$$

og absorptionen af vand w_a findes som

$$w_a = \frac{V_a \rho_w}{m_0} = \frac{m_{ov} - m_0}{m_{ov}}$$

Arbejdet er beskrevet i DS/EN 1602 Termisk isolering i byggeriet – Bestemmelse af den tilsyneladende densitet. Poreindholdet for celleplast kan bestemmes efter DS/EN ISO 4590 Hård celleplast – Bestemmelse af åbne og lukkede cellers volumenprocent

3.6.3 Fugt i dampform

Vandabsorption ved diffusion i lang tid

Optag af fugt i dampform i isoleringsmaterialer sker iht. DS/EN 12088 Termisk isolering i byggeriet – Bestemmelse af vandabsorption ved diffusion i lang tid.

En prøve af isoleringsmaterialet placeres over en metalkop med vand i og samlingen forsegles, så vanddamp skal bevæge sig gennem isoleringen. Under metalkoppen er der et varmelegeme, som varmer vandet op til 50 °C. Over isoleringen er der en køleplade, der holdes kold dvs. 1 °C vha. et kølemiddel.

Langtidsvandoptaget⁴⁵ ved diffusion w_{dp} eller w_{dv} beregnes som

⁴⁵ (DS/EN 12088, 2013) s. 6-8

$$w_{dp} = \frac{m_D - m_0}{A_p} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

eller

$$w_{dV} = \frac{m_D - m_0}{A_p d} \times \frac{100}{\rho_w} \text{ [Vol \%]}$$

hvor m_0 er massen af prøven inden [kg], m_D er massen af prøven efter at have været udsat for vanddiffusion i 28 dage [kg], A_p er arealet af prøvens bund [m^2] og d er tykkelsen af prøven [m].

Sorptionsisotermer

Sorptionsisotermer for byggematerialer bestemmes iht. DS/EN ISO 12571 Byggematerialers og – produkters hygrotermiske ydeevne – Bestemmelse af hygroskopiske sorptionsegenskaber. Standarden beskriver to forskellige metoder.

Ved klimakammermetoden tørres prøverne, så massen er konstant, inden de placeres i en række forskellige relative luftfugtigheder ved samme temperatur. Når vægten ikke varierer længere, er der opstået ligevægt, og vandindholdet kan bestemmes.

Vandindholdet⁴⁶ u beregnes vha. formlen

$$u = \frac{m - m_0}{m_0}$$

Hvor m_0 [kg] er vandindholdet for den udtørrede prøve, og m [kg] er vandindholdet for den opfugtede.

De relative luftfugtigheder stiger gradvist. Der skal minimum testes ved fire forskellige relative luftfugtigheder – gerne flere.

3.6.4 Fugt i væskeform

Korttidsvandoptag

Test af korttidsvandoptag sker i henhold til DS/EN 1609 Termisk isolering i byggeriet – Bestemmelse af vandabsorption ved delvis nedsenkning i kort tid. Prøven fastholdes 10-12 mm nede i vand i en beholder i 24 timer. Prøven vejes før og efter, og korttidsvandoptaget⁴⁷ er ifølge Metode A givet ved

$$w_p = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

hvor m_{24} er massen [kg] af prøven efter 24 timer, m_0 er massen [kg] af prøven før den delvise nedsenkning, A_p er arealet [m^2] af prøvens underside og ρ_w er vands densitet på 1.000 [kg/m^3]

⁴⁶ (DS/EN ISO 12571, 2013)

⁴⁷ (DS/EN 1609, 2013) s. 6-9

Langtidsvandoptag

Test af langtidsvandoptag sker i henhold til DS/EN 12087 Termisk isolering i byggeriet – bestemmelse af vandabsorption ved nedsenkning i lang tid. Der er to metoder. I den første fastholdes prøven 10-12 mm nede i vandet i en beholder på samme måde som for korttidsvandoptag. I den anden nedsænkes prøven helt, så den er dækket med mindst 50-52 mm vand. I begge tilfælde vejes før og efter 28 døgn. Langtidsvandoptaget⁴⁸ er ifølge Metode 1A (delvis nedsenkning) givet ved

$$w_{lp} = \frac{m_{28}-m_0}{A_p} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

hvor m_{28} er massen [kg] af prøven efter 28 døgn, m_0 er massen [kg] af prøven før den delvise nedsenkning og A_p er arealet [m²] af prøvens underside.

Ifølge metode 2A (helt nedsænket) er langtidsoptaget

$$w_{lt} = \frac{m_{28}-m_0}{V} \times \frac{100}{\rho_w} \text{ [Vol \%]}$$

hvor m_{24} er massen [kg] af prøven efter 24 timer, m_0 er massen [kg] af prøven før nedsenkningen, V er volumen [m³] af prøven og ρ_w er vands densitet på 1.000 [kg/m³].

3.6.5 Damptæthed

Hvor tæt isoleringen er i forhold til, at vanddamp trænger igennem den, findes iht. DS/EN 12086 Termisk isolering i byggeriet – Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber.

For hygroskopiske materialer skal der foretages to forsøg ved 23 °C. Det ene med et spring i relativ luftfugtighed fra 0 % til 50 % og det andet med et spring fra 50 % til 93 %. Det sker i praksis ved, at en prøve af isoleringsmateriale placeres over en metalkop og forsegles til denne. Nede i koppen er der en lav relativ luftfugtighed (0 % eller 50 %) opnået vha. et tørremiddel eller en mættet vandig saltopløsning. Prøven placeres i et klimakammer med en højere relative luftfugtighed (50 % eller 93 %). Prøven vejes med jævne mellemrum, indtil vægten er stabil⁴⁹. Prøven bliver tungere og tungere, idet den fugtige luft diffunderer gennem isoleringen mod den lavere relative luftfugtighed.

Ændringen i masse over tid G beregnes som:

$$G = \frac{m_2-m_1}{t_2-t_1} \text{ [mg/h]}$$

hvor m_1 er massen til tiden t_1 [mg], m_2 er massen til tiden t_2 [mg] og t_1 og t_2 er to på hinanden efterfølgende vejetidspunkter [h].

Fugttransporten beregnes som:

$$g = \frac{G}{A} \text{ [mg/m}^2 \text{ h]}$$

⁴⁸ (DS/EN 12087, 2013) s. 9-12

⁴⁹ (DS/EN 12086, 2013) s. 6-11 samt (Andersen, Christensen, & Nielsen, 1993) s. 27

hvor A [m^2] er arealet af prøven

Vanddamppermeansen W er givet ved

$$W = \frac{G}{A \Delta p} \text{ [mg/m}^2 \text{ h Pa]}$$

hvor Δp [Pa] er lig forskellen i damptryk ved de to forskellige relative luftfugtigheder. Ved testen 0/50 er $\Delta p = 1.400$ [Pa] og ved testen 50/93 er $\Delta p = 1.210$ [Pa].

Diffusionsmodstanden Z er lig

$$Z = \frac{1}{W} \text{ [m}^2 \text{ h Pa/mg]}$$

Damppermeabiliteten δ er givet ved

$$\delta = W d \text{ [mg/ m h Pa]}$$

Hvor d er tykkelsen af prøven [m].

Vanddamppdiffusionsmodstandsfaktoren μ er givet ved

$$\mu = \frac{\delta_{\text{air}}}{\delta}$$

Hvor δ_{air} er damppermeabiliteten for luften.

Det ækvivalente luftlags tykkelse svarende til diffusionsmodstanden kan beregnes vha. en af følgende to formler

$$s_d = \mu d$$

eller

$$s_d = \delta_{\text{air}} Z$$

3.6.6 Varmekapacitet

Den specifikke varmekapacitet kan findes vha. varmeligningen ved nedsækning af en prøve i vand, idet den energi, der skal til for at opvarme 1 kg af materialet er den samme som skal til for at afkøle det.

Der er ikke umiddelbart er DS/EN, der dækker bestemmelsen af den specifikke varmekapacitet c_p [J/kg K].

3.7 DATA OM ISLERINGSMATERIALERS EGENSKABER

Der findes en del flere end de 10 nævnte isoleringsmaterialer på markedet, men de færreste ved egentlig, hvilke egenskaber de forskellige materialer har. Ved søgning på hjemmesider og i salgsbrochurer er det muligt at findes mange relevante oplysninger, men der er også nogle, som er svære at finde. Typisk opgiver alle producenter varmeledningsevnen og trykstyrken, mens de er karrige med oplysninger om fugt. Nogen har dog oplyst det ved henvendelse, hvor

andre har undslået sig med forskellige begrundelser. Nogle producenter vil gerne oplyse densiteten, mens andre ikke oplyser den. Så godt som ingen oplyser porøsiteten.

Isoleringsprodukternes egenskaber burde fremgå af deres ydeevneerklæringer også kaldet DoP (Engelsk for Declaration of Performance), men producenterne vælger ifølge de danske standarder/europæiske normer selv, hvilke værdier de vil deklarere, så ydeevneerklæringerne er meget forskellige. Nogle indeholder en masse egenskaber, og andre indeholder så godt som ingen.

Det er væsentligt at kende de forskellige produkters egenskaber, hvis simuleringer i WUFI skal kunne sammenholdes med disse for at finde ud af, hvordan egenskaberne påvirker det færdige efterisoleringsresultat mht. fugt og varme.

3.7.1 Varmeledningsevne

Varmeledningsevnen for de enkelte isoleringsmaterialer er enten slået op i VIF's produktoversigt 2018⁵⁰ eller er fundet på producenternes hjemmesider. I begge tilfælde er de producentens ansvar.

Tabel 4: Varmeledningsevne for isoleringsmaterialer

	VIF		Fabrikat	Producent		Kilde
	Måtter	Løsfyld	Navn	Måtter	Løsfyld	Navn
Type	λ [mW/m K]			λ [mW/m K]		
Stenuld	32-40	37-41	Rockwool	34-37	34-42	Paroc
Glasuld	30-43	38-42	Isover	32-37	34-40	Knauf
Perlite		42	Nordisk Perlite			
Aerogel				15		Paroc (Aspen)
EPS	31-41		Jackon Styrolit Sundolitt	31-42		BEWI
XPS				27-34 33-39 34-37		Jackon Sundolitt BEWI
PIR	22-26		Kingspan	22-27		BEWI
Fenolskum	18-21		Kingspan			
Papir		39	Papiruld Danmark		37 39 39 38 38	Isocell (A) WarmFiber (S) Thermofloc (A) Climacell (D) Steicofloc (D)
Træfiber				37 38 38 38 38	37	KKS-Woodfibre (S) TFDK Flex Homatherm Hunton (N) Agepan (P) Steicoflex (D)

⁵⁰ (VarmelsoleringsForeningen, 2019)

					38	Steicozell (D)
--	--	--	--	--	----	----------------

For bare 10-15 år tilbage, var varmeledningsevner på 37-38 [mW/m K] almindeligt. I takt med at bygningsreglementets krav er blevet strammet meget de senere år, har producenterne udviklet produkter med en bedre varmeledningsevne for at opnå, at konstruktionerne bliver en anelse tyndere. Aerogels varmeledningsevne er under det halve, dvs. at produktet isolerer cirka dobbelt så godt i forhold til de øvrige sand- og stenbaserede isoleringsmaterialer.

Blandt produkterne af celleplast er der også arbejdet med varmeledningsevnen de senere år. Den ekspanderede polystyren (EPS) fås i dag med grafit, så den isolerer bedre. Den ekstruderede polystyren (XPS) isolerer en anelse bedre end den ekspanderede, mens de nye produkter som Polyisocyanuratskum (PIR) og fenolskum isolerer væsentligt bedre, fordi luften i de lukkede porer er skiftet ud med en gas med lavere varmeledning.

For papirisolering og træfiber ligger varmeledningsevnen i det naturlige leje.

3.7.2 Densitet og porøsitet

Densitet

Densiteten af de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 5. I venstre side fremgår værdier taget fra materialedatabasen i WUFI. Materialerne er dem der er brugt til simulering i de tre konstruktioner. I højre side fremgår producentens værdier, såfremt denne har villet oplyse dem, eller har dem tilgængelige på hjemmesiden.

Hvis værdien for densiteten er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

Tabel 5: Densitet for isoleringsmaterialer

	Densitet [kg/m ³]			
	WUFI	Fabrikat	Producent	Kilde
Stenuld	88 40 135	Speedrock Lamelle Klemmrock 035 Roxul FacadeRock	> 60 32 110 52 30	Rockwool ⁵¹ Hulrumsfyld Rockwool Flexibatts Rockwool Terrænbatts Paroc BLT 10 Paroc Extra
Glasuld	30 25,2	Isover Int. Einblaswolle Isover Ult. Klemmfilz 035	>25 9-35	Knauf supafil 34 (løsfyld) Knauf ⁵²
Perlite	146,7	Poroton-WDF Perlitefüllung	50-90 85	Nordisk perlite Energijtjenesten ⁵³
Aerogel	146	Aspen – Spaceloft Grey	146	Aspen Aerogels

⁵¹ (Nue & Nysøe, 2019) e-mail vedr. Rockwools produkters egenskaber

⁵² (Ingemarsson, 2019) e-mail vedr. Knaufs produkters egenskaber

⁵³ (Energijtjenesten, 2019) Alternative isoleringsmaterialer > Perlite

			150	Skalflex ⁵⁴
EPS	15	No name	12 13 15 20-25 15	Sundolitt Climate Perler Sundolitt S60 Sundolitt Climate C60 Isofloc Pearl (kugler) Sundolitt Drænplade S80
XPS	40	No name		
PIR	26,5	No name	25	Kingspan Therma TR27
Fenolskum	43	No name	35	Kingspan Kooltherm
Papir	50	Isocell Zellulosed.	28-40 38-65	Isocell (løst udblæst) Isocell (fast komprimeret)
Træfiber	40 50	Steicozell AiF Flexible WF	40 30-50	Steicozell Hunton Nativo ⁵⁵

Det er overraskende, hvor svært det kan være at finde densiteten for et specifikt isoleringsmateriale. Nogle leverandører/producenter oplyser det helt naturligt. Andre har ikke den indstilling.

Poreform

Det har været svært at finde oplysninger om de forskellige isoleringsmaterials poreform. Det i Tabel 6 oplyste er fundet i diverse lærebøger om materialelære. Igen har det været svært at få oplysninger fra producenter og leverandører.

Tabel 6: Isoleringsmaterials poreform – og struktur

	Form	Struktur af materialet
Stenuld	Diskontinuert	Tynde tråde af sten, der en anelse smallere i den ene ende, end i den anden. Stenuldsfibre er kortere end glasuldsfibre. Indeholder bittesmå perler af sten ⁵⁶ .
Glasuld	Diskontinuert	Tynde tråde af glas af samme tykkelse i hele længden. Glasuldsfibre er længere end stenuldsfibre ⁵⁷ .
Perlite	Diskontinuert	Løse korn, som er meget porøse < 6 mm i diameter, der pakker sig afhængigt af påvirkninger. Forseglet med silikoneharpiks.
Aerogel	Diskontinuert	Tynde tråde af polyesterplast eller glasfibre belagt med Aerogel.
EPS	Åbne og lukkede porer ⁵⁸	Relativt cirkelrunde porer
XPS	Lukkede porer ⁵⁹	Mere dråbeformede porer
PIR	>90 % lukkede porer ⁶⁰	

⁵⁴ (Skalflex, 2016) Brochure Thermovæg

⁵⁵ (Paustian, 2019) e-mail vedr. Huntons produkters egenskaber

⁵⁶ (Bengtsson & Selck, 2006) s. 210

⁵⁷ (Bengtsson & Selck, 2006) s. 210

⁵⁸ (Brandt, 2009) s. 37, (Møller & Nielsen, 2017) s. 19

⁵⁹ (Brandt, 2009) s. 24 og (Møller & Nielsen, 2017) s. 19

⁶⁰ (Møller & Nielsen, 2017) s. 19 og (Thermal insulation materials) s. 7

Fenolskum	98 % lukkede porer ⁶¹	
Papir	Åbne porer	
Træfiber	Åbne porer	

Porøsitet

Porøsiteten af de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 7. I venstre side fremgår værdier taget fra materialedatabasen i WUFI. Materialerne er dem, der er brugt til simulering i de tre konstruktioner. I højre side fremgår producentens værdier, såfremt denne har villet oplyse dem, eller har dem tilgængelige på hjemmesiden.

Hvis værdien for porøsiteten er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

Tabel 7: Isoleringsmaterialers porøsitet i procent

	Porøsitet [%]			
	WUFI	Fabrikat	Producent	Kilde
Stenuld	96,7	Speedrock Lamelle	98	Rockwool ⁶² Hulrumsfyld
	98,6	Klemmrock 035	99	Rockwool Flexibatts
	95,3	Roxul FacadeRock	96	Rockwool Terrænbatts
Glasuld	99	Isover Int. Einblaswolle		
	95	Isover Ult. Klemmfilz 035		
Perlite	94,46	Poroton-WDF Perlitefüllung		
Aerogel	92	Aspen – Spaceloft Grey		
EPS	95	No name	98	Sundolitt
XPS	95	No name		
PIR	99	No name	>90	Kingspan ⁶³ Therma
Fenolskum	95	No name	>90	Kingspan Kooltherm
Papir	95	Isocell Zellulosed.		
Træfiber	97,3	Steicozell	95	Hunton ⁶⁴ Nativo
	97	AiF Flexible WF		

3.7.3 Fugt i dampform - sorptionsisotermer

Der er kun to producenter, der efter henvendelse er vendt tilbage med sorptionsisotermer for deres isoleringsmaterialer. Sorptionsisotermerne i dette afsnit stammer altså fortrinsvis fra WUFI.

⁶¹ (Kingspan, 2015) Open cell versus closed cell phenolic foams

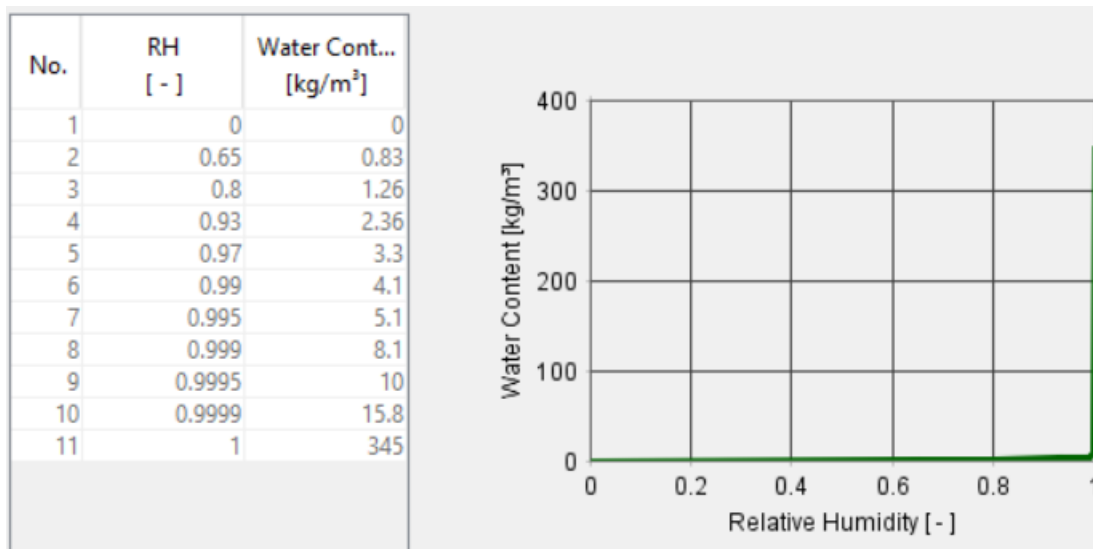
⁶² (Nue & Nysøe, 2019) e-mail vedr. Rockwools produkters egenskaber

⁶³ (McMonagle, 2019) e-mail vedr. Kingspans produkters egenskaber

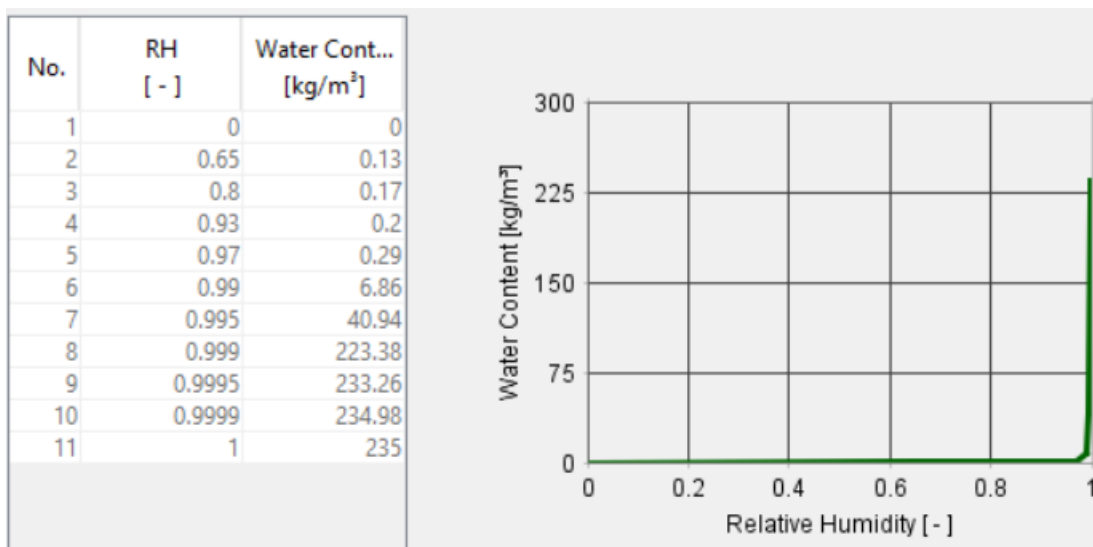
⁶⁴ (Paustian, 2019) e-mail vedr. Hunttons produkters egenskaber

Produkter af uorganiske materialer

Sorptionsisoterm for de tre stenuldsprodukter, der er brugt til simulering i WUFI

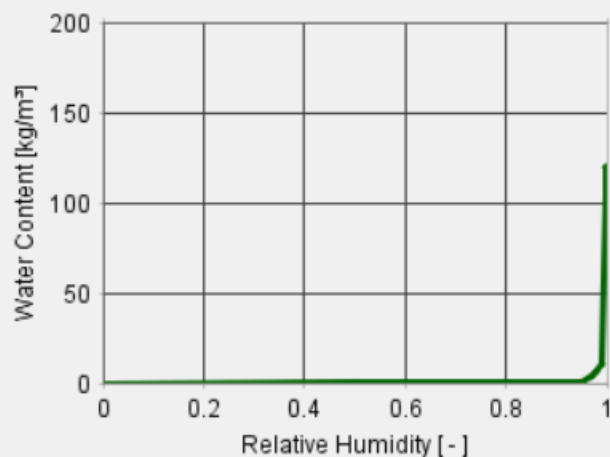


Figur 20: Sorptionsisoterm for stenuld af fabrikat RW Speedroc Lamelle brugt til efterisolering af hulmur med faste bindere iht. WUFI



Figur 21: Sorptionsisoterm for stenuld af fabrikat RW Klemmrock brugt til udvendig efterisolering af let ydervæg iht. WUFI

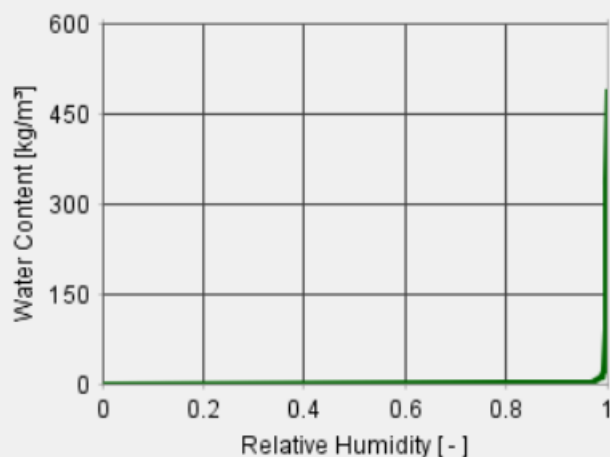
No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.5	0.03
3	0.6	0.05
4	0.8	0.14
5	0.93	0.69
6	0.95	1.11
7	0.97	4
8	0.98	6.6
9	0.99	10.09
10	0.9995	103.9
11	0.9999	118.94
12	1	121



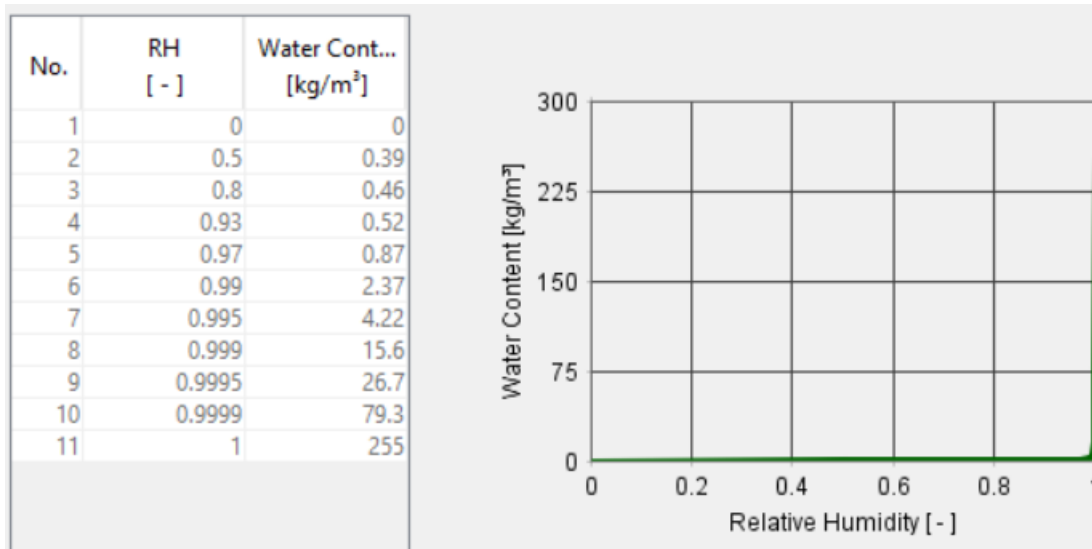
Figur 22: Sorptionsisoterm for stenuld af fabrikat Roxul Facaderock brug til udvendig efterisolering af kældervæg iht. WUFI

Sorptionsisoterner for de to glasuldsprodukter, der er brugt til simulering i WUFI

No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.8	0.2
3	0.93	0.5
4	0.97	1.3
5	0.99	10.8
6	0.995	21.18
7	0.999	90.33
8	0.9995	152.37
9	0.9999	338.01
10	1	486

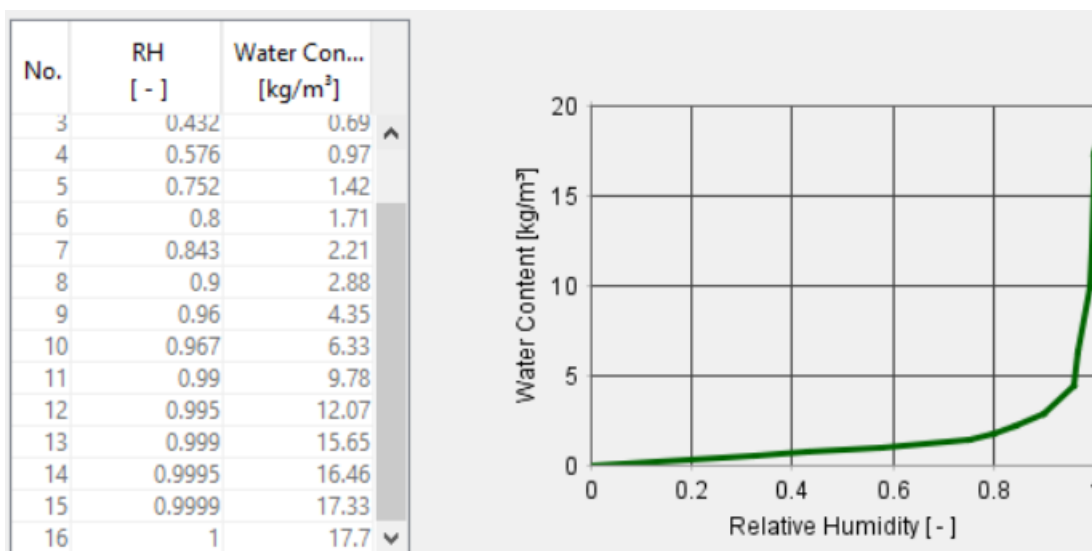


Figur 23: Sorptionsisoterm for glasuld af fabrikat Isover Integra Einblaswolle brugt til efterisolering af hulmur med faste bindere iht. WUFI



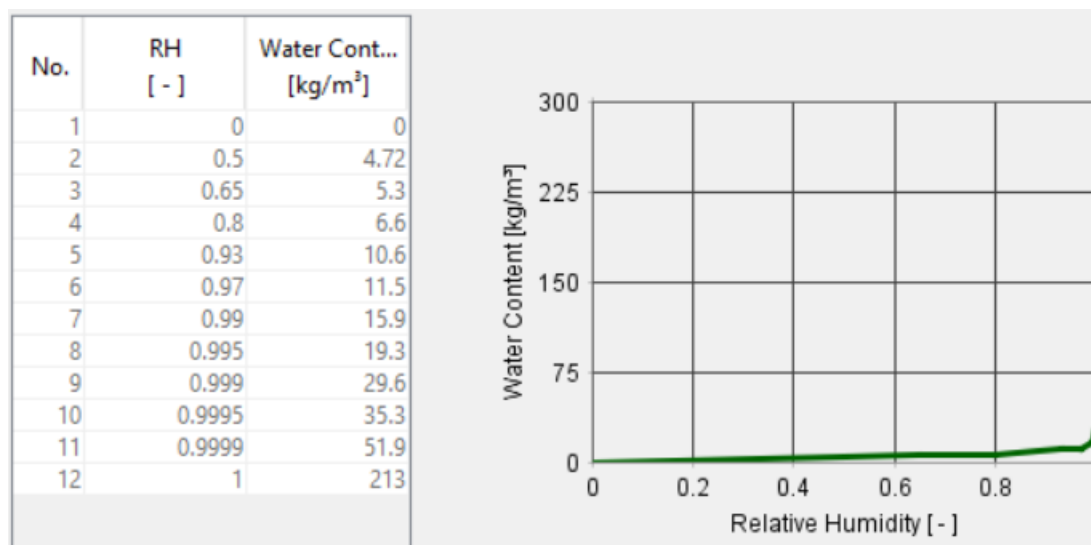
Figur 24: Sorptionsisoterm for glasuld af fabrikat Isover Klemmfilz brugt til udvendig efterisolering af let ydervæg iht. WUFI

Sorptionsisoterner for det perliteprodukt, der er brugt til simulering i WUFI



Figur 25: Sorptionsisoterm for perlite af fabrikat Poroton-WDF Perlitefüllung brugt til hulmur med faste bindere og udvendig efterisolering af kældervæg iht. WUFI

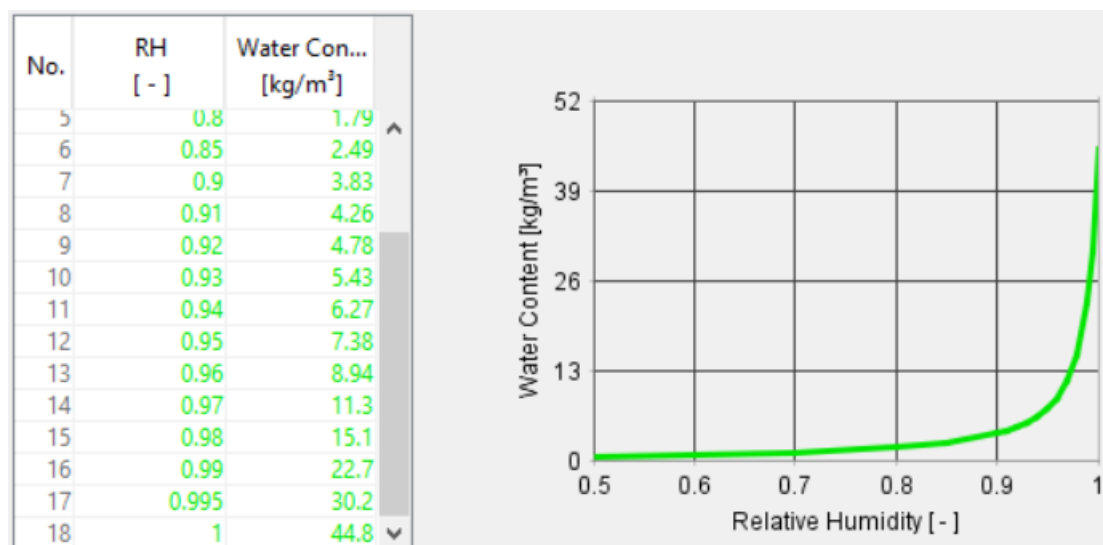
Sorptionsisoterm for det Aerogel-produkt, der er brugt til simulering i WUFI



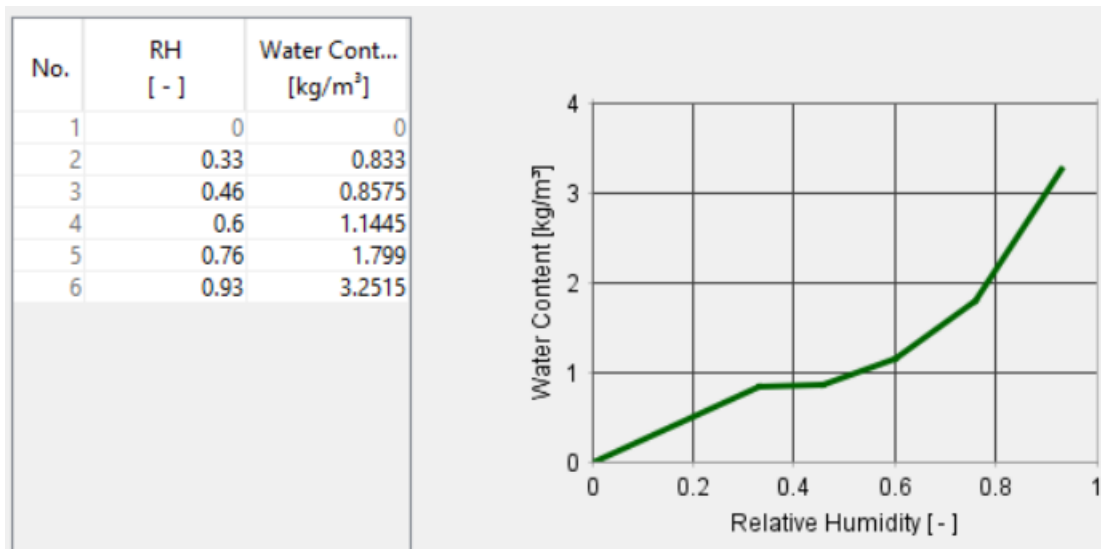
Figur 26: Sorptionsisoterm for Aerogel af fabrikat Aspen - Spaceloft Grey brugt til efterisolering af let ydervæg iht. WUFI

Produkter af celleplast

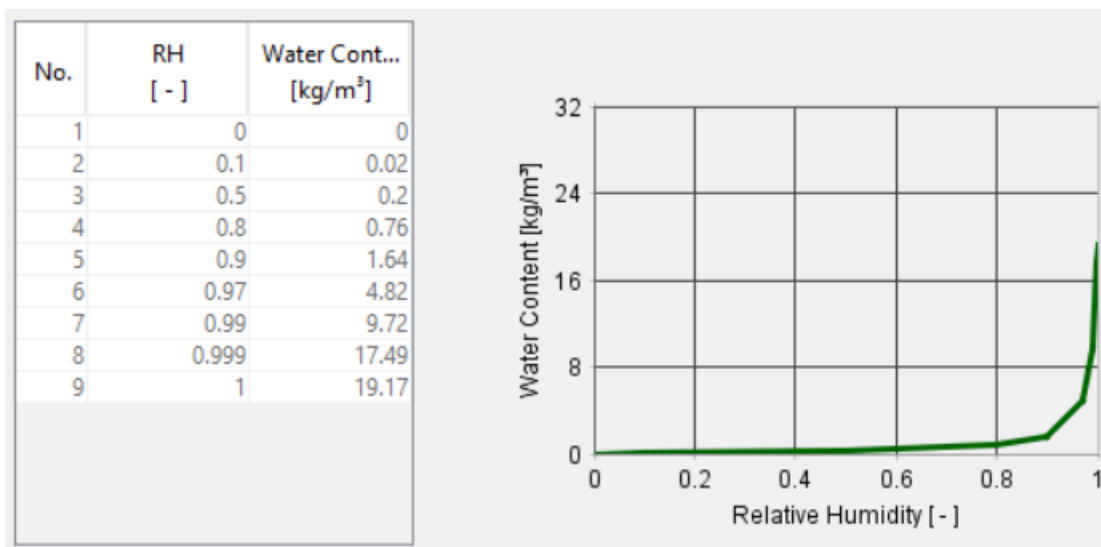
Sorptionsisoterm for de produkter af celleplast, der er brugt til simulering i WUFI.



Figur 27: Sorptionsisoterm for EPS, XPS og fenolskum (PF) af fabrikat No name brugt til udvendig efterisolering af let ydervæg og kældervæg iht. WUFI (Fraunhofer-IBF Insulation Materials)

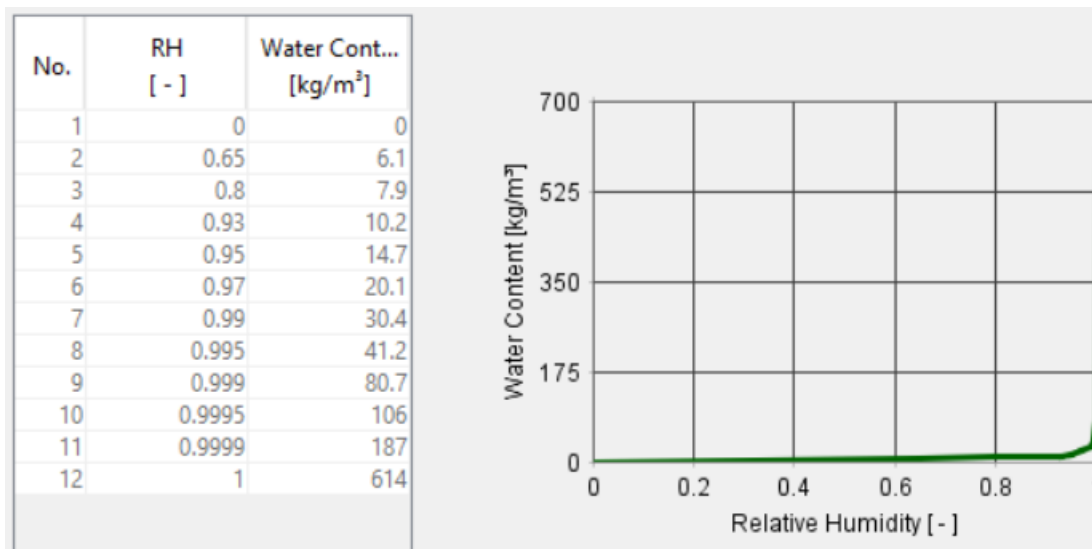


Figur 28: Sorptionsisoterm for for fenolskum af fabrikat K5 Kooltherm brugt til udvendig efterisolering af kældervæg iht. Kingspan

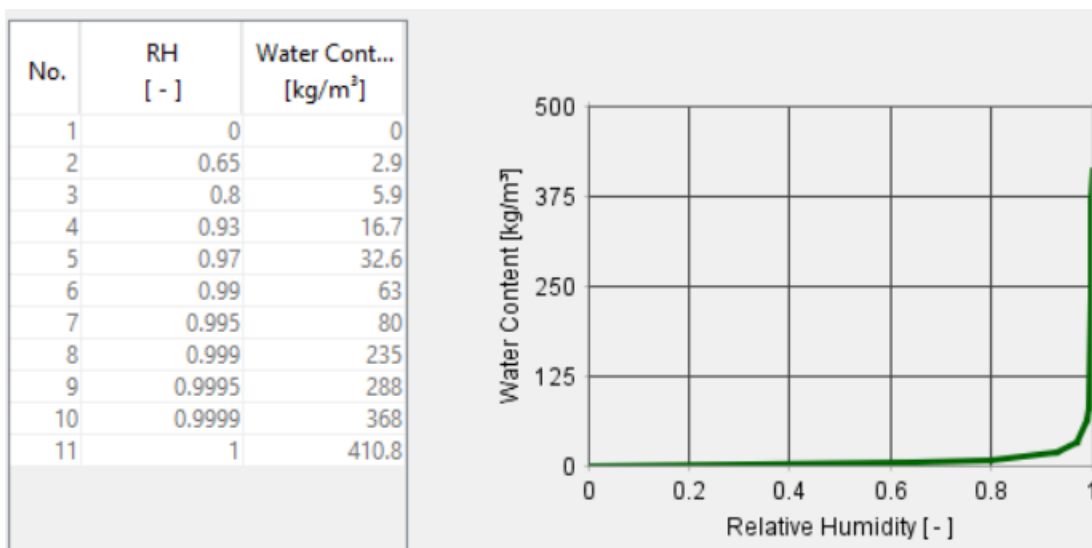


Figur 29: Sorptionsisoterm for PIR af fabrikat No name ifølge WUFI (North American Database)

Produkter af organiske materialer

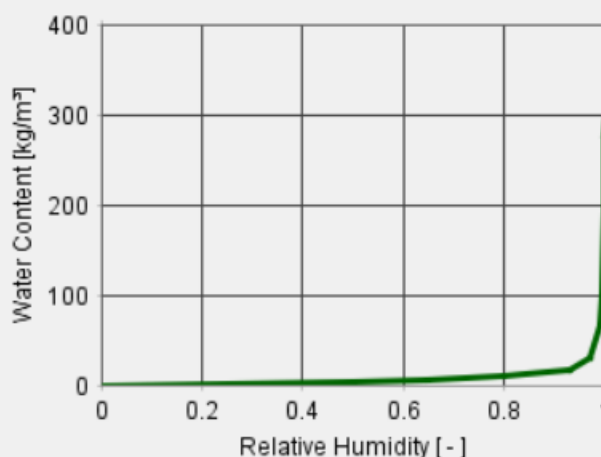


Figur 30: Sorptionsisoterm for papir af fabrikat Isocell brugt til efterisolering af hulmur med faste bindere og udvendig efterisolering af let ydervæg iht. WUFI

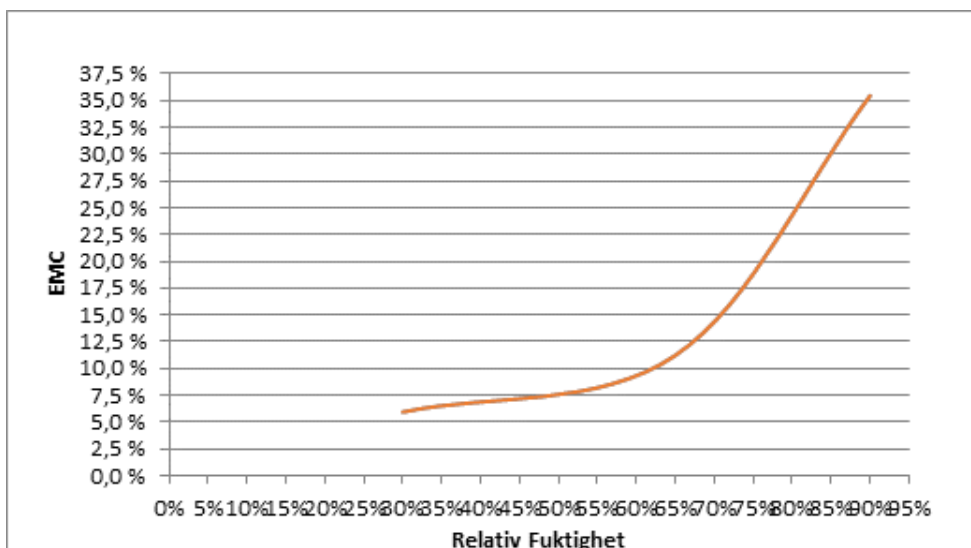


Figur 31: Sorptionsisoterm for træfiber af fabrikat Steicozell brugt til efterisolering af hulmur med faste bindere iht. WUFI

No.	RH [-]	Water Cont... [kg/m ³]
1	0	0
2	0.5	4
3	0.65	5
4	0.8	9
5	0.93	17.5
6	0.97	30
7	0.99	65.53
8	0.995	98.8
9	0.999	193.29
10	0.9995	228.16
11	0.9999	276.38
12	1	300



Figur 32: Sorptionsisoterm for træfiber af fabrikat AiF Flexible Wood-Fiber brugt til udvendig efterisolering af let ydervæg iht. WUFI



Figur 33: Sorptionsisoterm for træfibermåtter af Hunton Nativo iht. Hunton

3.7.4 Fugt i væskeform - kapillarsugningsevne

Korttidsvandoptaget af de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 8. Værdierne er producentens, såfremt denne har villet oplyse dem, eller har dem tilgængelige på hjemmesiden.

Hvis værdien for korttidsvandoptaget er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

Korttidsvandoptag iht. DS/EN 1609

Tabel 8: Korttidsvandoptag for isoleringsmaterialer

	Producent/leverandør	Kilde
	[kg/m ²]	
Stenuld	0,12* 0,28* 0,22*	Rockwool ⁶⁵ Hulrumsfyld Rockwool Flexibatts Rockwool Terrænbatts
Glasuld		
Perlite		
Aerogel	≤ 0,01	Aspen Aerogels
EPS		
XPS		
PIR		
Fenolskum	≤ 0,75 ≤ 1	Kingspan ⁶⁶ Kooltherm K15 Kingspan Kooltherm K5
Papir	15,20 38,95	Isocell ρ = 30 [kg/m ³] Isocell ρ = 60 [kg/m ³]
Træfiber		

*Gennemsnitlige måleresultater for 12 måneders produktion.

Mange producenter og leverandører opgiver ikke det egentlige vandoptag, men i stedet den største værdi, som vandoptaget må antage i henhold til DS/EN1609 eller standarden for det specifikke isoleringsprodukt. Typisk angives vandoptaget med et mindre end tegn og et tal uden decimaler.

Det gør stenuldsproducenten Rockwool også på sin hjemmeside, men ved henvendelse er de reelle værdier oplyst. Andre producenter har oplyst, at de ikke tester dette, og at de derfor ikke kan oplyse det. Det samme gælder for langtidsvandoptaget.

Langtidsvandoptag iht. DS/EN 12087

Langtidsvandoptaget af de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 9. Værdierne er producentens, såfremt denne har villet oplyse dem, eller har dem tilgængelige på hjemmesiden.

Hvis værdien for korttidsvandoptaget er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

⁶⁵ (Nue & Nysøe, 2019) e-mail vedr. Rockwools produkters egenskaber

⁶⁶ (McMonagle, 2019) e-mail vedr. Kingspans produkters egenskaber

Tabel 9: Langtidsvandoptag for isoleringsmaterialer

	Producent/leverandør	Kilde
	[kg/m ²]	
Stenuld	0,65*	Rockwool ⁶⁷ Terrænbatts
Glasuld		
Perlite		
Aerogel		
EPS	≤ 5 ≤ 5 ≤ 3	Sundolitt S60 Jackson Jackopor Jackson super EPS
XPS	0,6 ≤ 0,7	Sunde, Sundolitt ⁶⁸ Jackson
PIR		
Fenolskum		
Papir		
Træfiber		

*Gennemsnitlige måleresultater for 12 måneders produktion.

3.7.5 Damptæthed

Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren μ for de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 10. I venstre side er værdier taget fra WUFI. I højre side er producentens, såfremt denne har villet oplyse den, eller har den tilgængelig på hjemmesiden.

Hvis værdien for vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

Tabel 10: Vanddampdiffusionsmodstand for isoleringsmaterialer

	WUFI	Producent	Oplyst	Kilde
	μ		μ	
Stenuld	1,3 1,3 1,1	Speedrock Lamelle Klemmrock 035 Roxul FacadeRock	1	Rockwool
Glasuld	1,35 1	Isover Int. Einblaswolle Isover Ult. Klemmfilz 035	1	Knauf
Perlite	3,38	Poroton-WDF Perlitefüllung	3-4	Nordisk Perlite

⁶⁷ (Nue & Nysøe, 2019) e-mail vedr. Rockwools produkters egenskaber

⁶⁸ (Jørgensen, 2019) Telefonisk oplyst – under vandet i norsk fjord

Aerogel	4,7	Aspen – Spaceloft Grey	5	Aspen Aerogels
EPS	30 21,7	Frauenhofer-IBF LTH Lund University (S)	5 20-40	Isofloc Pearl (kugler) Sundolitt ⁶⁹ S60-80
XPS	100	No name	158	Sunde Sundolitt ⁷⁰ XPS 300
PIR	51,5	No name	60	Kingspan Therma TR27
Fenolskum	30	No name	35 38	Kingspan ⁷¹ Kooltherm K3+K5 Kingspan Kooltherm K12
Papir	1,8	Isocell Zellulosed.	1	Isocell
Træfiber	1,54 2	Steicozell AiF Flexible WF	2	Hunton ⁷² Nativo

3.7.6 Varmekapacitet

Varmekapaciteten for de forskellige isoleringsmaterialer fremgår af Tabel 11. I venstre side er værdier taget fra WUFI. I højre side er producentens, såfremt denne har villet oplyse den, eller har den tilgængelig på hjemmesiden.

Hvis værdien for varmekapaciteten er fundet på producentens hjemmeside, er der ingen fodnote. Hvis den er oplyst efter henvendelse til producenten/leverandøren, er der en fodnote.

Hvis der ikke er nogen værdi i skemaet, er det ikke lykkedes at finde den på hjemmesiden eller få den oplyst ved henvendelse.

Tabel 11: Varmekapacitet for isoleringsmaterialer

	WUFI	Producent	Oplyst	Kilde
	[J/kg K]		[J/kg K]	
Stenuld	850 850 1030	Speedrock Lamelle Klemmrock 035 Roxul FacadeRock		
Glasuld	850 1.000	Isover Int. Einblaswolle Isover Klemmfilz 035		
Perlite	767	Poroton-WDF Perlitefüllung		

⁶⁹ (EUMEPS, 2016) Tabel 10 s. 46

⁷⁰ (Jørgensen, 2019) e-mail vedr. Sundolit's produkters egenskaber

⁷¹ (McMonagle, 2019) e-mail vedr. Kingspan's produkters egenskaber

⁷² (Paustian, 2019) e-mail vedr. Hunttons produkters egenskaber

Aerogel	1.000	Aspen – Spaceloft Grey		
EPS	1.500	No name	1.000	Isofloc Pearl (kugler)
XPS	1.500	No name		
PIR	1470	No name	1400	Kingspan Therma ⁷³
Fenolskum	1.500	No name	1470	Kingspan Kooltherm ⁷⁴
Papir	2.110	Isocell Zellulosed.	2.110	Isocell
Træfiber	1.400 1.400	Steicozell AiF Flexible WF	2.100	Hunton Nativo ⁷⁵

Varmekapaciteten stemmer i nogle tilfælde godt overens med de værdier, som kan findes i DS/EN ISO 10456⁷⁶, hvor det er muligt at slå værdierne op, hvis ikke producenter og leverandører vil oplyse dem. I andre tilfælde ligger de langt fra f.eks. Isofloc Pearl med 1.000 [J/kg K] ifølge datablad, hvor værdien i DS/EN ISO 10456 er 1.400.

4 KONSTRUKTIONER

4.1 ALMINDELIGE KONSTRUKTIONER I ENFAMILIEHUSE

De enkelte konstruktioner beskrives kort i de næste tre afsnit. Beskrivelsen er baseret på Bygningsguiden⁷⁷ - 15 almindelige danske hustyper, som er udarbejdet med udgangspunkt i 15-20 byggesager pr. hustype fra hele Danmark, Stilguiden fra Bygningsskulptur Danmark⁷⁸, Aalborg kommunes arkitektoniske stilblade⁷⁹, hustypebeskrivelserne fra huseftersynsordningen⁸⁰ og bogen Alletiders parcelhuse⁸¹ mm.

4.1.1 Tag

De tre mest almindelige tagkonstruktioner er:

- Udnytteligt tagrum med paralleltag – typisk over 45 graders hældning på taget
- Uudnytteligt tagrum – typisk under 45 graders hældning på taget
- Fladt tag

⁷³ (McMonagle, 2019) e-mail vedr. Kingspans produkters egenskaber

⁷⁴ (McMonagle, 2019) e-mail vedr. Kingspans produkters egenskaber

⁷⁵ (Paustian, 2019) e-mail vedr. Hunttons produkters egenskaber

⁷⁶ (DS/EN ISO 10456, 2008) Tabel 4

⁷⁷ (Energistyrelsen, 2019) Bygningsguiden – 15 almindelige danske hustyper

⁷⁸ (Bygningsskulptur Danmark, 2015) Stilguide for enfamiliehuse

⁷⁹ (Aalborg Kommune, 2015) Arkitektoniske stilarter for enfamiliehuse

⁸⁰ (Huseftersynsinfo, 2012) Hustypebeskrivelser

⁸¹ (Lind & Møller, 2014)

Den første danske tagtype var det udnyttelige tagrum, selvom det ikke nødvendigvis blev brugt til beboelse fra starten i f.eks. bindingsværkshuset, og i de ældre byhuse og landhuse. Anvendelserne var mange f.eks. tørreloft til vasketøjet eller til oplagring og tørring af korn. Senere kom der værelser til børn eller tyende deroppe. Muremestervillaen fra 1900-1930'erne og den senere 1950'ervilla i halvandet plan var tegnet med værelser på loftet, ligesom parcelhuset i halvandet plan fra 1960-70'erne og de senere typehuse i halvandet plan.

Det uudnyttelige tagrum er meget almindeligt i parcelhusene fra 1960-70'erne og de efterfølgende typehuse, men fandtes allerede i bungalows fra 1930'erne, i den funktionelle villa fra 1930-50'erne og i Statslåns huset fra 1938-58. Her er der som regel så lavt til loftet, at tagrummet reelt ikke kan bruges til beboelse.

Det flade tag kom frem på Funkisvillaen i 1930'erne og kendetegner også den modernistiske villa fra 1950-60'erne. Det var også helt almindeligt på parcelhusene fra 1960-70'erne. Funkisstilen er stadig moderne, så nyere typehuse fås også med fladt tag.

4.1.2 Ydervægge

De tre mest almindelige vægkonstruktioner er:

- Massiv væg
- Hulmur
- Let væg

Ydervæggene i danske enfamiliehuse bestod af massivt murværk, indtil hulmuren tog over. De massive vægge genopstod i 1950'erne i form af gasbetonvægge eller letklinkerbetonvægge, men de kunne ikke leve op til bygningsreglementet fra 1977-79. Det lykkedes gasbetonproducenterne at fremstille gasbetonblokke, der isolerede omkring dobbelt så godt som de oprindelige, så i en periode fra omkring år 2000 og frem blev der igen opført huse med massive gasbetonvægge.

Hulmuren begyndte at blive almindelig i enfamiliehuse fra 1900-1930. I starten var murene i halvanden stens tykkelse med faste bindere (ca. 35 cm). Senere blev de en anelse tyndere og med trådbindere (ca. 30 cm). Først i 1960'erne – efter det første landsdækkende bygningsreglement fra 1961 - begyndte man at komme isolering i hulmuren. Efter de to energikriser i 1970'erne blev kravene i bygningsreglementet strammet, og det betød bl.a. tykkere hulmure aht. mere isolering fra 1977-79 af. Der var en overgangsperiode på to år i bygningsreglementet fra 1977.

De første lette ydervægge var af bindingsværk, hvor tavlerne mellem træværket i de oprindelige bestod af ler på fletværk, senere bestod de af tørrede lersten og i moderne tid er de som oftest erstattet af murværk. De lette træskeletvægge var almindelige i Statslåns huset fra 1938-58, parcelhusene fra 1960-70'erne, og de senere typehuse af træ, som ofte var bedre isoleret end husene med hulmur af samme årgang. Både fordi kravene var skrappe i bygningsreglementet i en periode, og fordi træhusproducenterne markedsførte sig som leverandører af lavenergihuse.

4.1.3 Mod jord

Mod jord er de tre mest almindelige konstruktioner:

- Krybekælder
- Kælder
- Terrændæk

Terrændækket begyndte at komme frem omkring 1950'erne. Før det havde huse enten krybekældre eller kældre. I dag opføres hovedparten af nye huse med terrændæk, men få huse opføres stadig med krybekælder. Kælderen er næsten gået helt i glemmebogen.

4.2 EFTERISOLERING AF KONSTRUKTIONERNE

Tabel 12 viser typiske konstruktioner i danske enfamiliehuse. Disse konstruktioner er mulige at efterisolere. I simuleringen er konstruktionerne efterisoleret iht. anvisningerne i energiløsningerne fra Videncenter for energibesparelser i bygninger, der svarer til SBI-anvisning 240.

Tabel 12: Konstruktioner i danske enfamiliehuse

	Videncenter for energibesparelser i bygningers energiløsninger	SBI-anvisn. 240 Efterisolering af småhuse - byggetekniske løsninger	By&Byg-anvisn. 207 Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer
Udnytteligt tagrum	Loft/skråvæg/skunk	(U)ventileret paralleltag	Paralleltag og udnyttet tagrum
Uudnytteligt tagrum	Loft/loft til kip	Ventileret tagrum	Tag med uudnytteligt tagrum
Fladt tag	Fladt tag	(U)ventileret paralleltag	
Massiv ydervæg	Tung ydervæg	Massiv ydervæg	
Hulmur	Hulmur	Hulmur	Tung bagvæg med formur
Let væg	Let ydervæg	Let ydervæg (med skalmur)	Skeletvæg med regnskærm/formur
Krybekælder	Krybekælder	Krybekælder	Krybekælder
Kælder	Gulv over kælder Kældervæg Kældergulv	Kælderydervæg Kældergulv	
Terrændæk	Terrændæk Sokkel	Terrændæk	Terrændæk

Som der fremgår af tabellen, er der ikke enighed om, hvad de forskellige konstruktioner kaldes, men det er der heldigvis om, hvordan efterisoleringen bør udføres.

4.2.1 Udnytteligt tagrum

I det udnyttelige tagrum er der skrå vægge – som oftest med en skunk i bunden og et hanebånd i toppen. Det er som regel relativt simpelt at komme til at isolere skunken og hanebåndsloftet, idet der er plads. Hvad angår skråvæggen er den rentable løsning at fylde

hulrummet op under hensyntagen til ventilation af tagkonstruktionen, for efterisolering iht. bygningsreglementet kræver et indgreb enten udefra i forbindelse med at taget skiftes eller indefra i forbindelse med en modernisering. Energiløsninger: Efterisolering af loft (hanebånds), af skunk og af skråvæg/loft til kip - indefra eller - udefra.

4.2.2 Uudnytteligt tagrum

Det uudnyttelige tagrum er kendetegnet med knap så meget plads under taget, idet hældningen på spærene og dermed taget er mindre. Her er som regel også plads til at efterisolere. I bungalowen og statslånshuset er der typisk meget lidt plads, så der vil isoleringen typisk blive indblæst. Energiløsning: Efterisolering af loft og loft til kip.

4.2.3 Fladt tag

Det flade tag efterisoleres typisk oppefra i forbindelse med, at taget skal have et nyt lag tagpap alligevel. Isolering til bygningsreglementets krav kræver typisk et tykt lag isolering ovenpå den gamle tagpap, så der skal arbejdes arkitektonisk med detaljen ved sternkanten. Energiløsning: Efterisolering af fladt tag.

4.2.4 Massiv ydervæg

De massive vægge kan isoleres enten udefra eller indefra afhængigt af udhængets størrelse og arkitektoniske parametre som bevaringsværdige facader. Løsningen indefra er problematisk fugtmæssigt. Arbejdet kræver stor omhu. Energiløsning: Udvendig og indvendig efterisolering af tung ydervæg.

4.2.5 Hulmur

Hulmuren er simpel at få blæst fuld med isolering og nærmest altid rentabel. Rentabiliteten kan knibe, hvis den i forvejen er isoleret med f.eks. lecakugler. Energiløsning: Hulmursisolering.

4.2.6 Let væg

De lette vægge er som regel fyldt ud med isolering, så efterisolering kræver påforing enten udvendigt eller indvendigt, for at få plads til den i bygningsreglementet krævede isoleringstykkelse.

Energiløsninger: Udvendig og indvendig efterisolering af let ydervæg.



Figur 34: Udvendig efterisolering af let og tung ydervæg (hulmur) på parcelhus fra 1967 udført i november 2013 (Charlottenlund)

4.2.7 Krybekælder

En krybekælder er dybt problematisk fugtteknisk, så den bør nedlægges og erstattes af et terrændæk. Hvis der ikke er økonomi til det, kan den isoleres nedefra eller oppefra, hvis der ikke er tilstrækkelig højde dernede. Arbejdet kræver stor omhu. Energiløsning: Efterisolering af gulv over krybekælder.

4.2.8 Kælder

Hvis en kælder ønskes brugt til opbevaring og derfor opvarmes, bør den efterisoleres udefra, da det er dybt problematisk at isolere den indefra fugtteknisk. Energiløsning: Udvendig efterisolering af kældervæg.

4.2.9 Terrændæk

Terrændækket bør efterisoleres ved etablering af et nyt terrændæk, hvilket også kræver en god økonomi. En alternativ løsning er at bevare terrændækket og i stedet isolere soklen. Energiløsning: Efterisolering af terrændæk og sokkel

4.3 EGNED EISLERINGSMATERIALER TIL KONSTRUKTIONERNE

For at udvælge konstruktioner for simulering i WUFI er der udarbejdet et regneark, hvor konstruktionerne fremgik af kolonnerne og de udvalgte isoleringsmaterialer af rækkerne. Et uddrag af dette regneark fås af Tabel 13 – bare vendt så konstruktionerne fremgår af kolonnerne og isoleringsmaterialerne af rækkerne. De tre konstruktioner i tabellen er valgt ud, fordi der er mange af den slags konstruktioner i de danske enfamiliehuse – og fordi der er flest egnede isoleringsmaterialer til dem. Desuden er de meget forskellige, så det giver mange forskellige variationer af brugen af isoleringsmaterialer.

Tabel 13: Isoleringsmaterials anvendelse i tre typer konstruktioner

Isoleringsmateriale	Hulmur	Let ydervæg	Kældervæg
Stenuld	X	X	X
Glasuld	X	X	
Perlite	X		X
Aerogel		X	
EPS	X (kugler)	X	X
XPS			X
PIR			
Fenolskum		X	X
Papir	X	X	
Træfiber	X	X	

4.4 HULMUR MED FASTE BINDERE I WUFI

Den første konstruktion, der er simuleret, er en hulmur med faste bindere, som er den første hulmur i Danmark. Hulmuren er 35 cm tyk med 130 mm isolering imellem en formur og en bagmur i murværk. Til efterisolering af en hulmur⁸² bruges normalt et materiale, der kan blæses ind i hulrummet. Simulering er foretaget med 6 forskellige isoleringsmaterialer: Stenuld, træfiber, perlite, glasuld, papir og endelig polystyrenkugler.

Efterisoleringen lever ikke op til bygningsreglementets (BR18's) krav ved ombygning, hvor kravet i §279 er en U-værdi på 0,18 [W/m² K], men efterisoleringen vil være rentabel iht. §275 og på den måde alligevel overholde BR18⁸³.

For stenuld, glasuld, papir og træfiber, var det muligt at finde data i Fraunhofers database over isoleringsmaterialer, som er indbygget i WUFI. Hverken perlite eller polystyrenkugler er at finde i databasen.

Hvad angår perlite er der gået ind med Porotons lerprodukt, der er fyldt med perlite. Det er ikke det helt korrekte produkt, men minder meget om det. Dog er perliten sandsynligvis limet sammen for at blive i lerstenen, hvor den isolering, der blæses ind i en hulmur, normalt er løse korn.

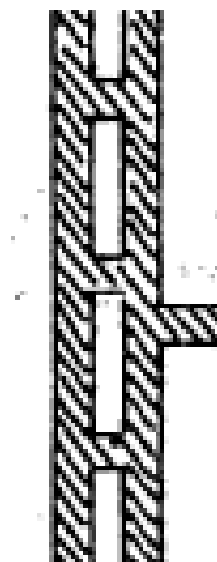
Hvad angår polystyrenkugler, lykkedes det at finde en tysk producent, Isofloc, der havde tilstrækkeligt mange oplysninger om materialets egenskaber på deres datablad. På baggrund af oplysningerne udarbejdedes et nyt isoleringsprodukt i WUFI - med udgangspunkt i ekspanderet polystyren i pladeform.

Hulmur i WUFI – fra venstre mod højre:

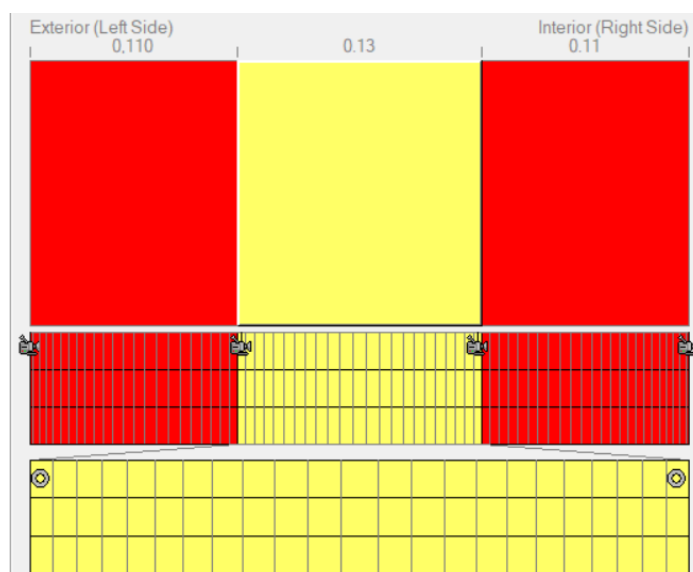
- Formur af mursten 110 mm (Solid brick, hand-formed)
- Efterisoleret hulmur med forskellige materialer
- Bagmur af mursten 110 mm (Solid brick, hand-formed)

Hulmuren er vestvendt for at få størst mulig påvirkning af slagregn.

Det har ikke været muligt at finde en sorptionsisoterm for polystyrenkugler, så i simuleringen indgår den for EPS i pladeform. Ud fra DS/EN ISO 10456⁸⁴, ser det ud til at vandindholdet er det samme i de to forskellige udformninger af materialet.



Figur 35: Vandret snit i hulmur med faste bindere i en arbejderbolig fra 1913 (Kgs. Lyngby)



Figur 36: Opbygning af hulmur i WUFI

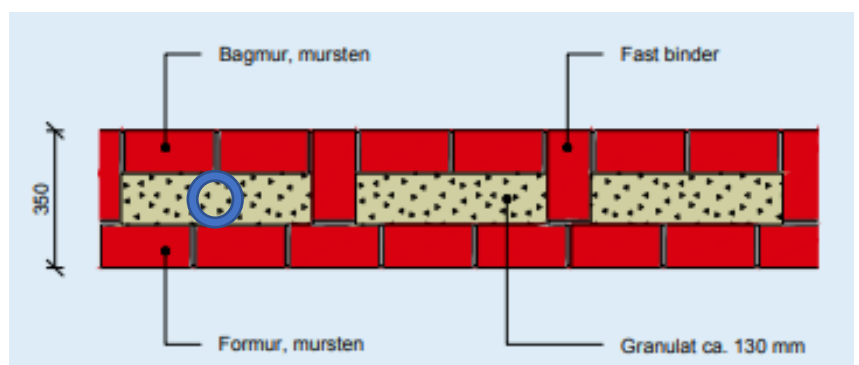
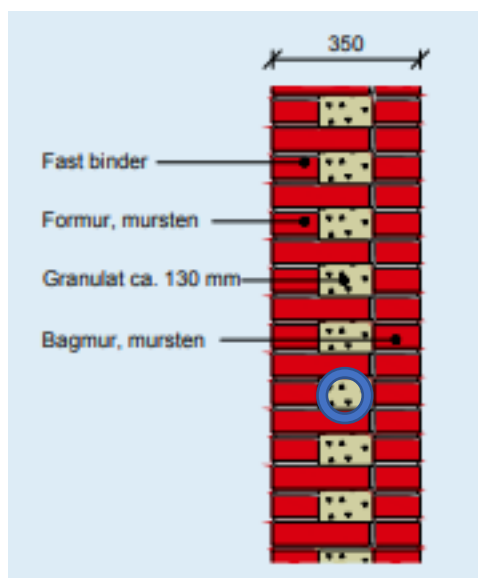
⁸² (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2019) Energiløsning Hulmursisolering

⁸³ (Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen, 2019) Kapitel 11 Energiforbrug

⁸⁴ (DS/EN ISO 10456, 2008) Tabel 4

4.4.1 Vandindhold i isoleringslaget iht. WUFI

De blå cirkler på Figur 37 og Figur 38 viser, hvor vandindholdet er fundet ved simulering.



Figur 37: Hulmursisolering faste bindere – vandret snit – vand i isoleringsmateriale

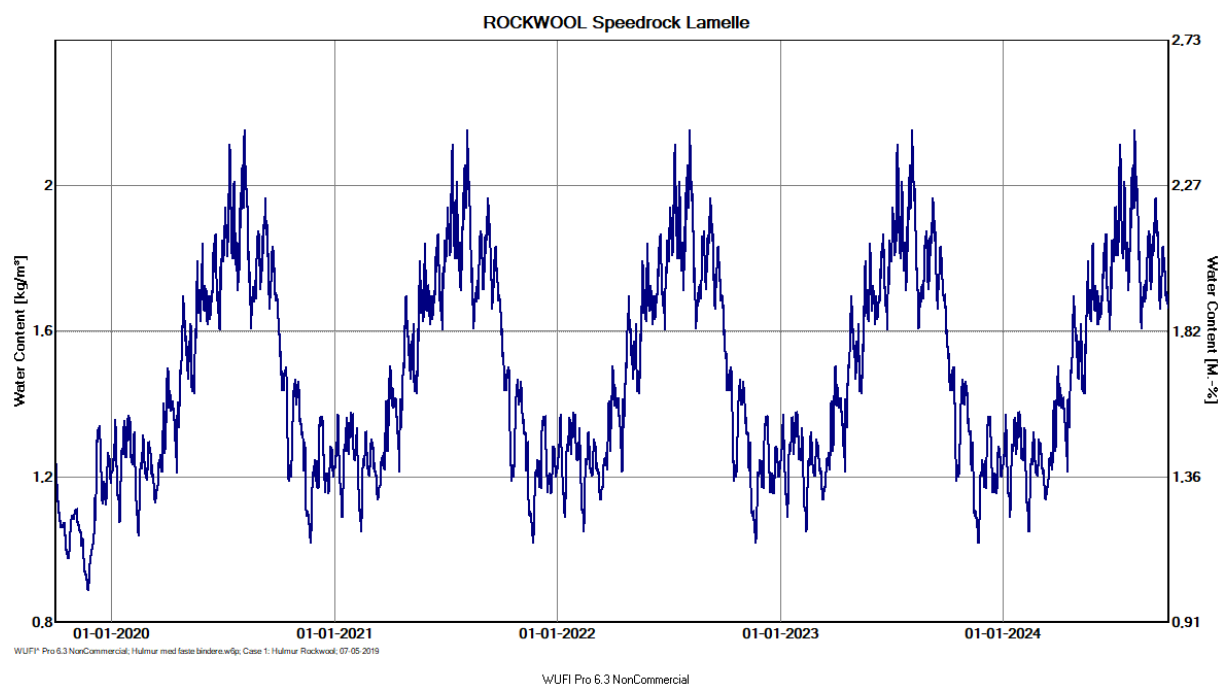
Figur 38: Hulmursisolering faste bindere – lodret snit - vand i isoleringsmateriale⁸⁵

I WUFI vises resultaterne i form af kurver med det samlede vandindhold i isoleringsmaterialet over året i de fem år, simuleringen varer. I venstre side af kurven kan vandindholdet aflæses opgjort i kilogram pr. kubikmeter isoleringsmateriale. I højre side kan vandindholdet aflæses opgjort i masseprocent.

For overskueligheden skyld er der kun vist tre kurver i selve rapporten, dvs. et isoleringsmateriale fra hver gruppe. Her er valgt stenuld, ekspanderet polystyren i form af kugler og træfiber. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 1. I Tabel 14 og Tabel 15 er udsvingene – dvs. laveste og højeste punkt på kurverne opgjort.

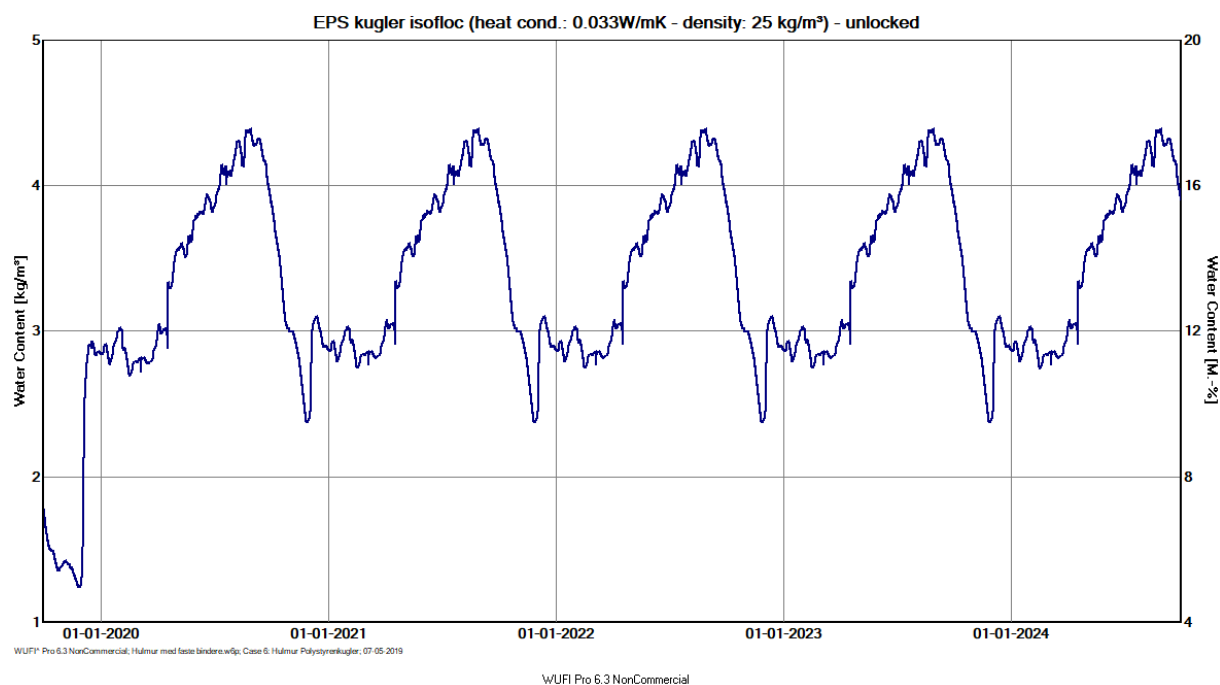
⁸⁵ (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2019) Energiløsning Hulmursisolering

Produkt af uorganisk materiale



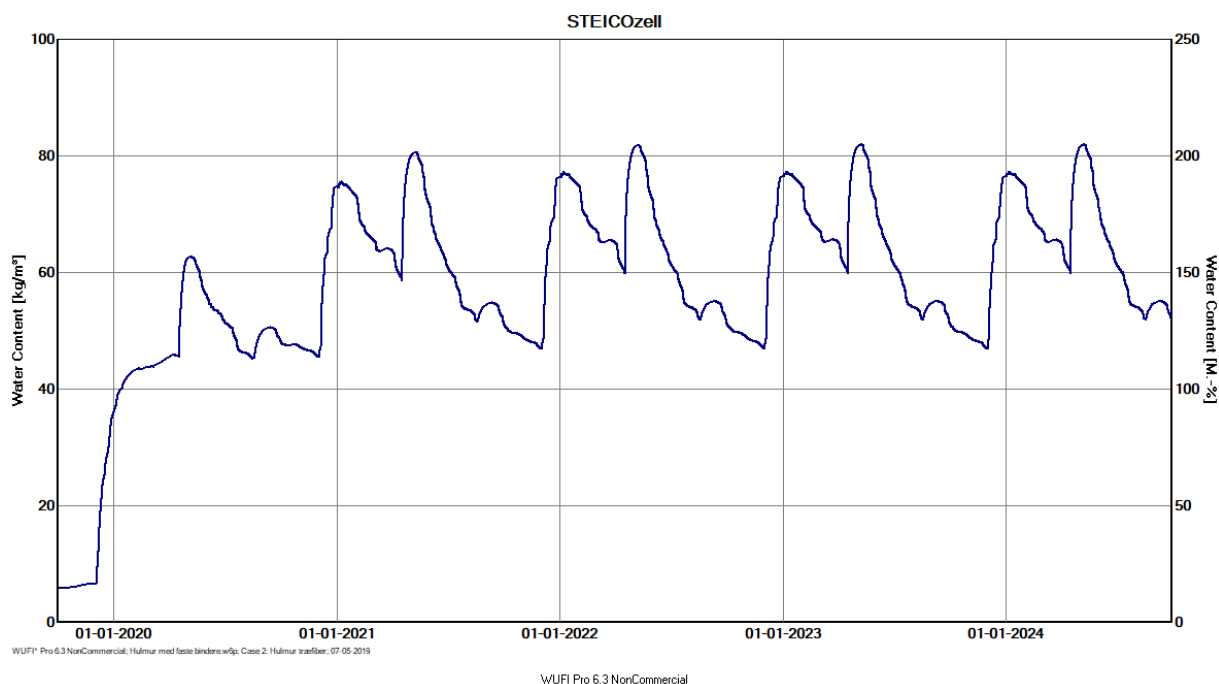
Figur 39: Hulmur med faste bindere - Vandindhold i stenuld af fabrikat Rockwool

Produkt af celleplast



Figur 40: Hulmur med faste bindere - Vandindhold i EPS-kugler af fabrikat Isofloc pearl

Produkt af organisk materiale



Figur 41: Hulmur med faste bindere - Vandindhold i træfiber af fabrikat Steicozell

Tabel 14: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masse pr. volumen iht. bilag 1

Materiale	Indblæst i hulmur [kg/m ³]			
	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
Stenuld	0,9		2,2	
Glasuld		6		0,8
Perlite	1,6		3,1	
EPS kugler	2,4		4,5	
Papir		18		8
Træfiber		82		44

Som det ses af resultaterne i bilag 1 og fremgår af Tabel 14, er vandindholdet for stenuld (Figur 39), perlite og kugler af ekspanderet polystyren (Figur 40) lavest omkring årsskiftet, dvs. om vinteren og højst midt på året, dvs. om sommeren. Vandindholdet er mindst for stenuld og perlite. Det er en smule højere for EPS-kugler.

Af bilag 1 ses det, at kurveforløbet er helt anderledes for glasuld, papir og træfiber (Figur 41). Her er vandindholdet højt omkring årsskiftet og faldende hen over året med nogle store udsving – et stort om foråret og et lille om efteråret.

I glasulden er vandindholdet dog meget lille, hvorimod det er en del højere i papirisolering og allerhøjst i træfiber.

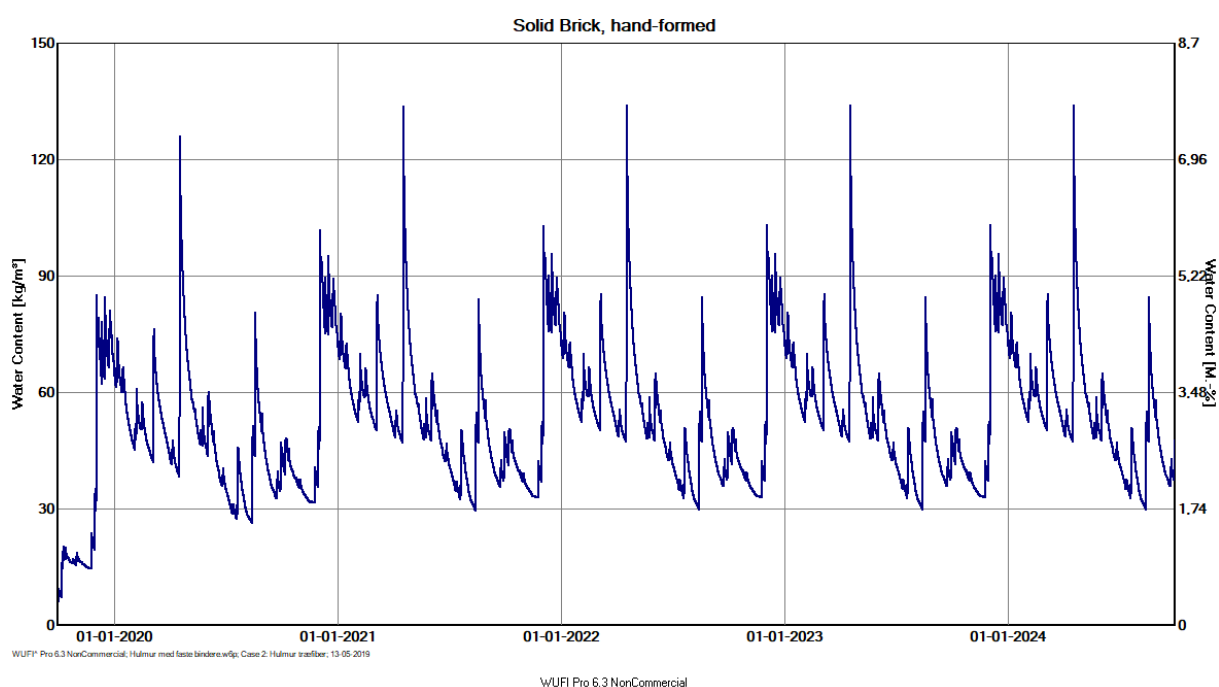
Tabel 15: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masseprocent iht. bilag 1

Materiale	Indblæst i hulmur [M.-%]			
	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
Stenuld	1,2		2,4	
Glasuld		20		3
Perlite	1,1		2,15	
EPS kugler	10		18	
Papir		36		18
Træfiber		205		120

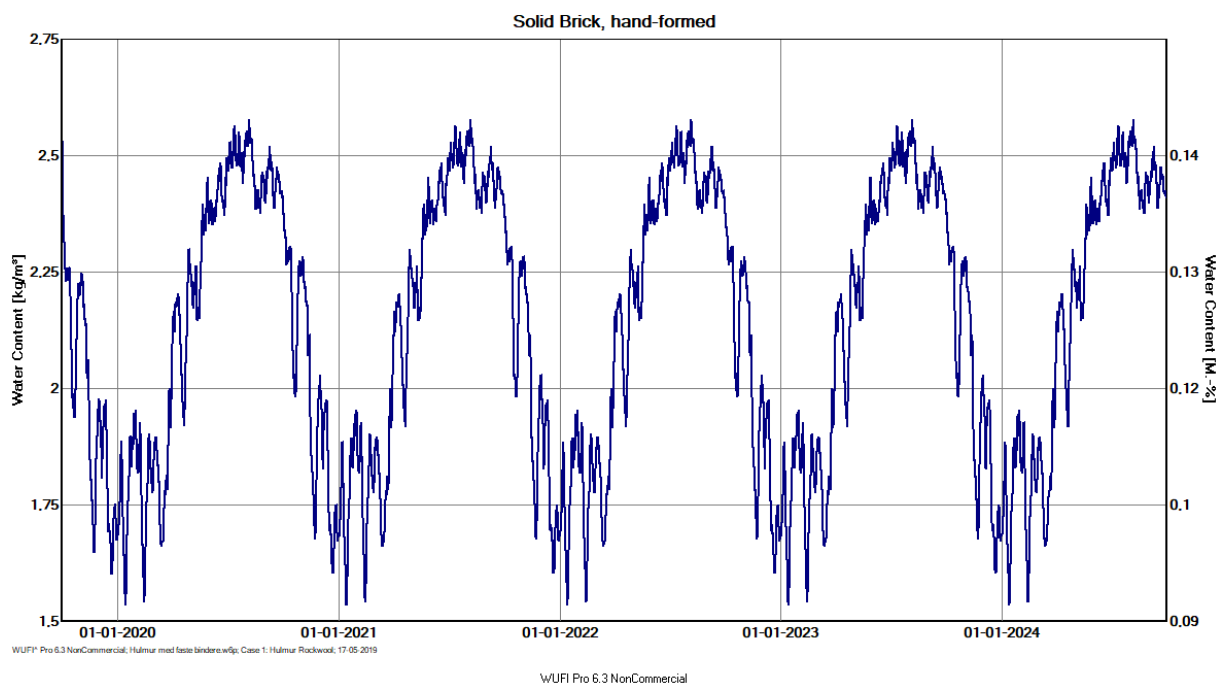
Vandindholdet i masseprocent fremgår af Tabel 15 og fordeler sig en smule anderledes, da materialernes vægt indgår. Stenuld og perlite ligger lavest, glasuld og polystyrenkugler med grafit ligger lidt højere, mens det igen er højt i papirisolering og endnu højere i træfiber.

Da udsvingene for glasuld, papir og træfiber kunne tænkes at hænge sammen med vandindholdet i formuren og bagmuren, er disse også medtaget.

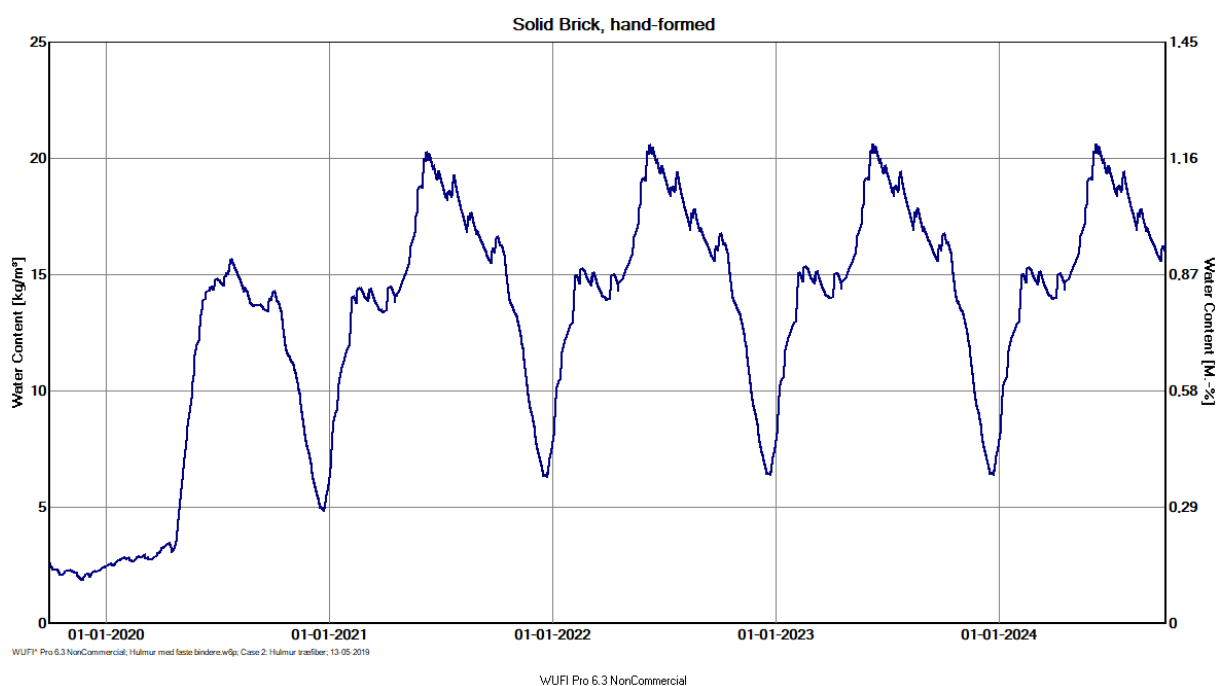
For- og bagmur



Figur 42: Vandindhold i formur ved hulumursisolering med alle isoleringstyper



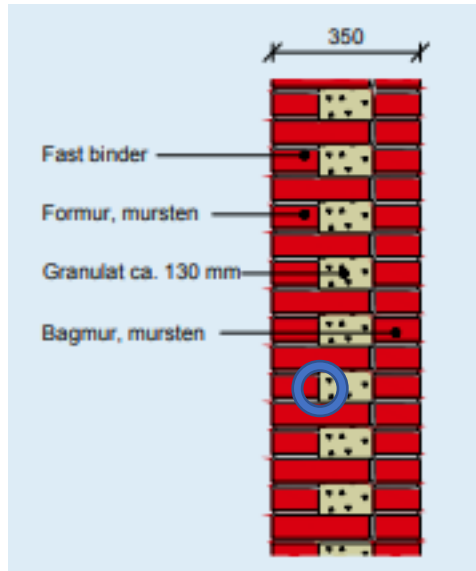
Figur 43: Vandindhold i bagmur ved hulumursisolering med stenuld, glasuld, perlite, EPS-kugler og papiruld



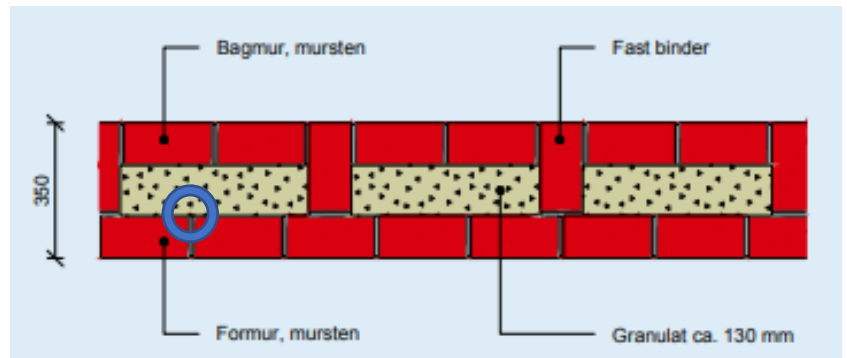
Figur 44: Vandindhold i bagmur ved hulumursisolering med træfiber

4.4.2 Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI

De blå cirkler på Figur 45 og Figur 46 viser, hvor den relative luftfugtighed og temperatur er fundet ved simulering.



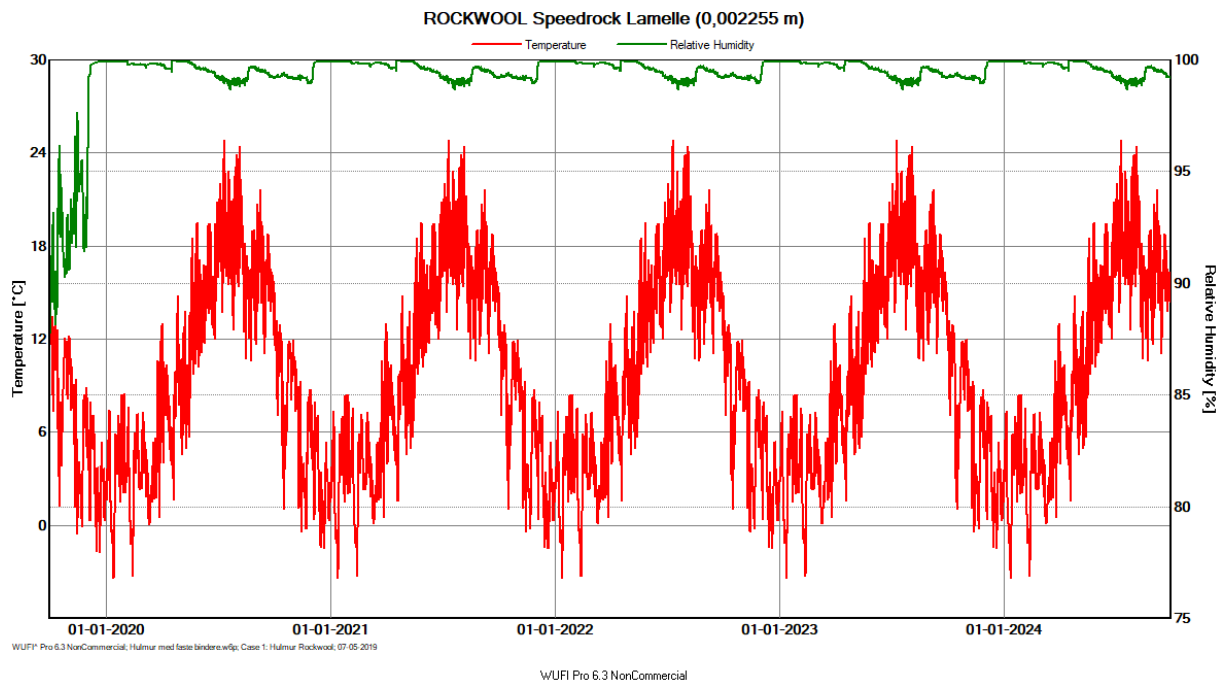
Figur 46: Hulmursisolering faste bindere – lodret snit – RF og temperatur yderst i isoleringen.



Figur 45: Hulmursisolering faste bindere – vandret snit – RF og temperatur yderst i isoleringen

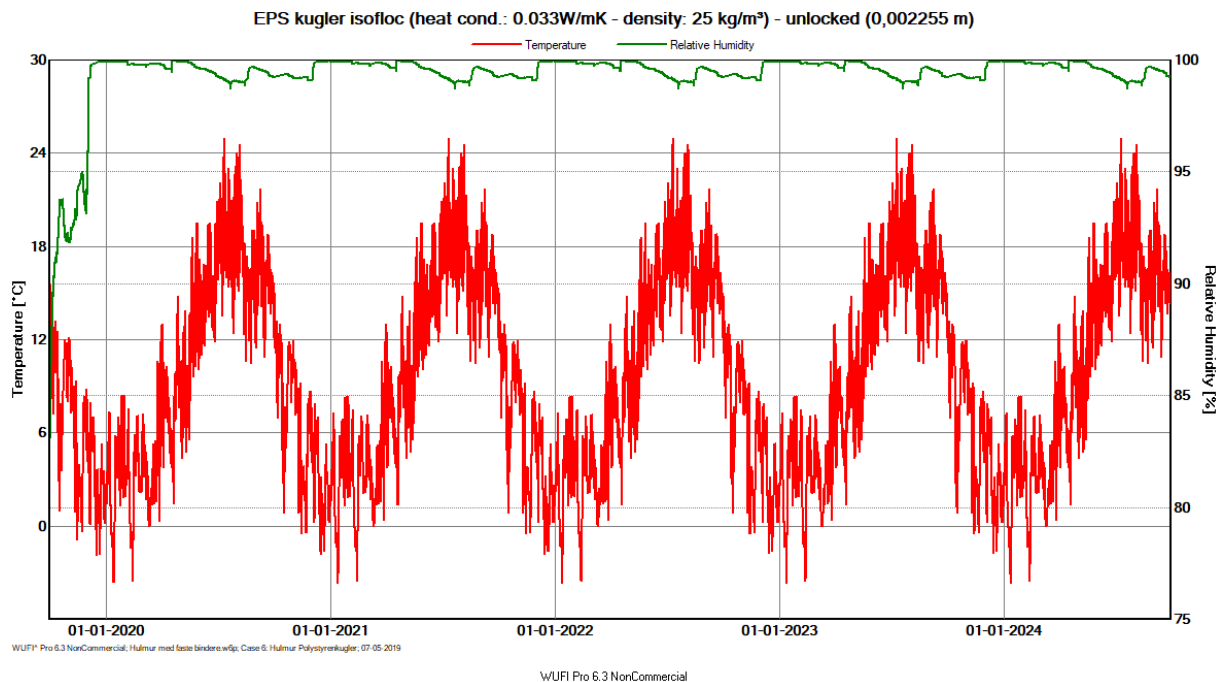
Igen er kurverne vist for stenuld, ekspanderet polystyren i form af kugler og træfiber. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 2. Den grønne kurve er relativ luftfugtighed og den røde er temperaturen. Begge dele er valgt simuleret yderst i isoleringen.

Produkt af uorganisk materiale



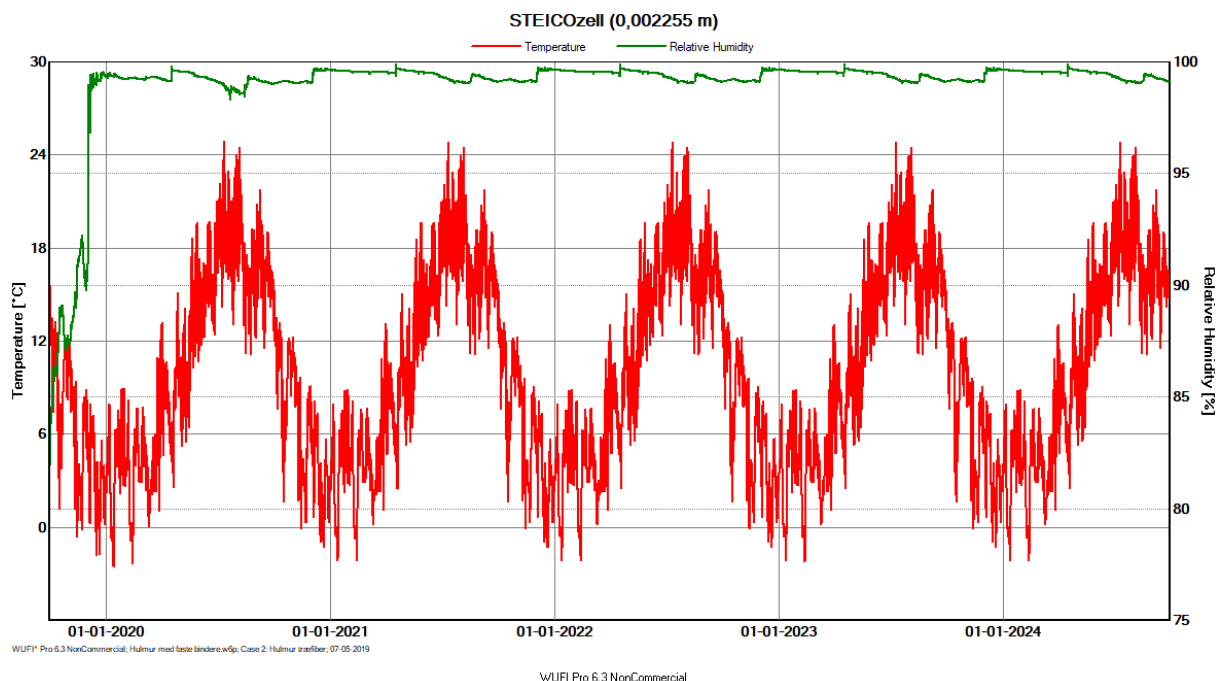
Figur 47: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i stenuld af fabrikat Rockwool

Produkt af celleplast



Figur 48: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i EPS-kugler af fabrikat Isofloc pearl

Produkt af organisk materiale

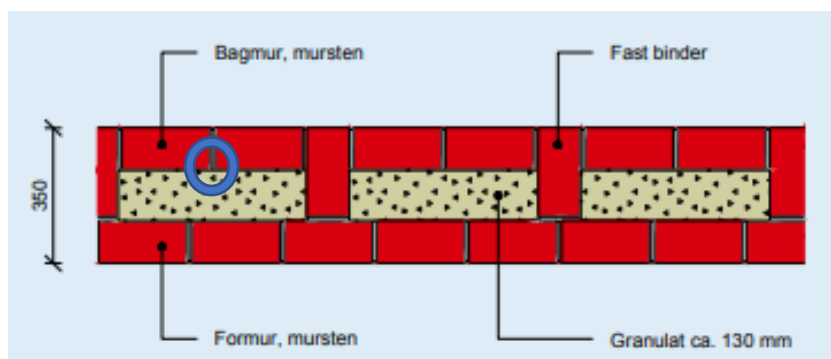
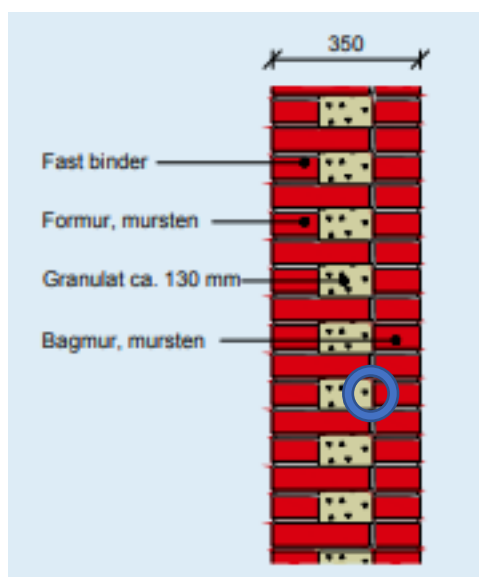


Figur 49: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i træfiber af fabrikat Steicozell

Fugtens fordeling yderst i isoleringslaget i hulmuren fremgår af bilag 2. Det er tydeligt, at der er meget fugtigt yderst i isoleringslaget. Her er nærmest 100 % relativ luftfugtighed (RF) i alle isoleringsmaterialer.

4.4.3 Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI

De blå cirkler på Figur 50 og Figur 51 viser, hvor den relative luftfugtighed og temperatur er fundet ved simulering.

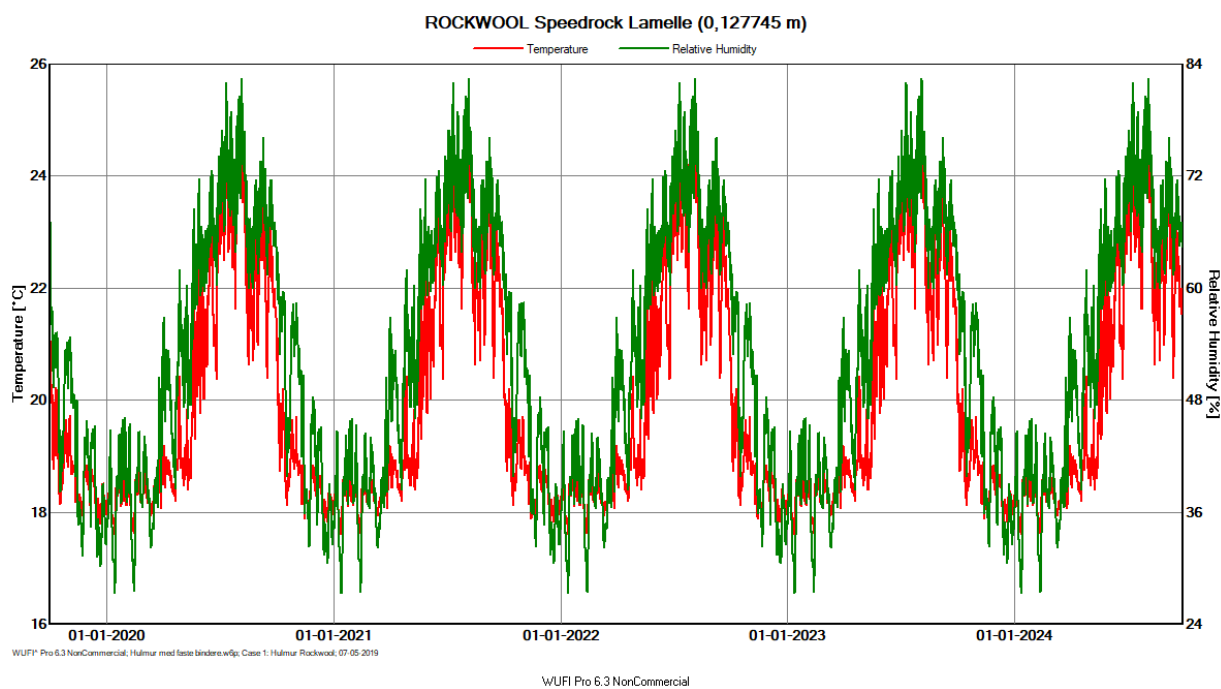


Figur 50: Hulmursisolering faste bindere – vandret snit – RF og temperatur inderst

Figur 51: Hulmursisolering faste bindere – lodret snit – RF og temperatur inderst

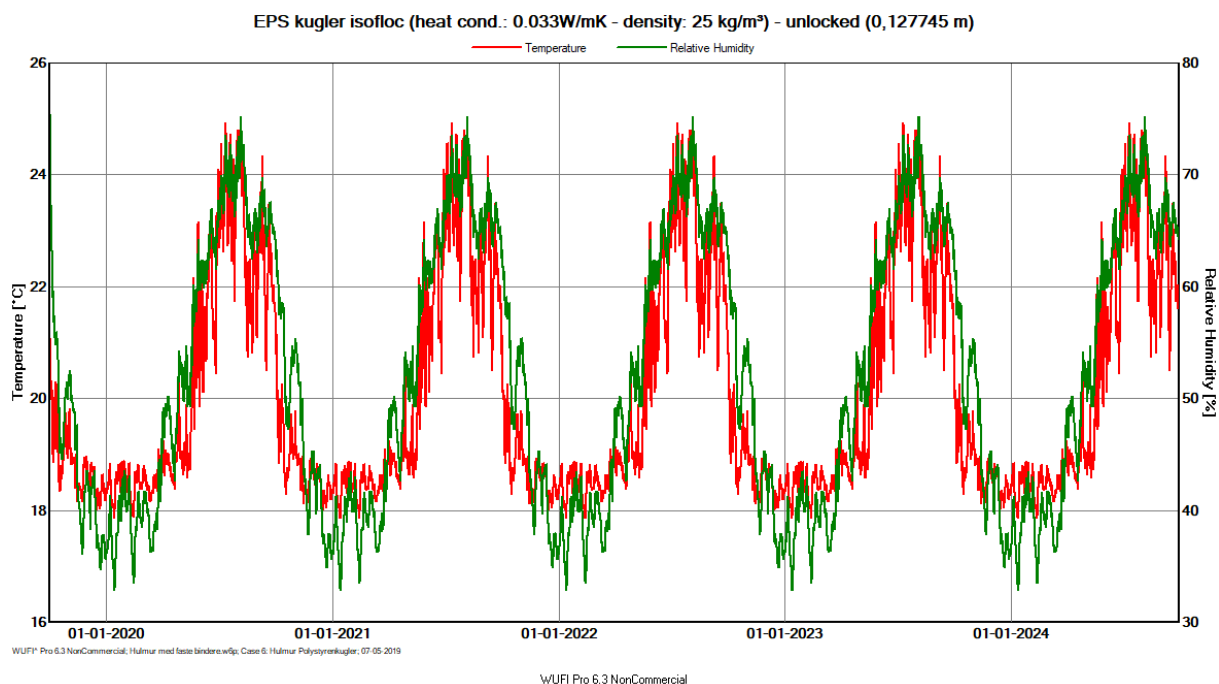
Igen er kurverne vist for stenuld, ekspanderet polystyren i form af kugler og træfiber. Denne gang inderst i isoleringen. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 3. I Tabel 16 er udsvingene i den relative luftfugtighed– dvs. laveste og højeste punkt på kurverne - opgjort. Kurverne gentager sig selv over de fem år, som simuleringen varer, idet WUFI bruger de samme klimadata år efter år, og isoleringen derfor påvirkes ens.

Produkt af uorganisk materiale



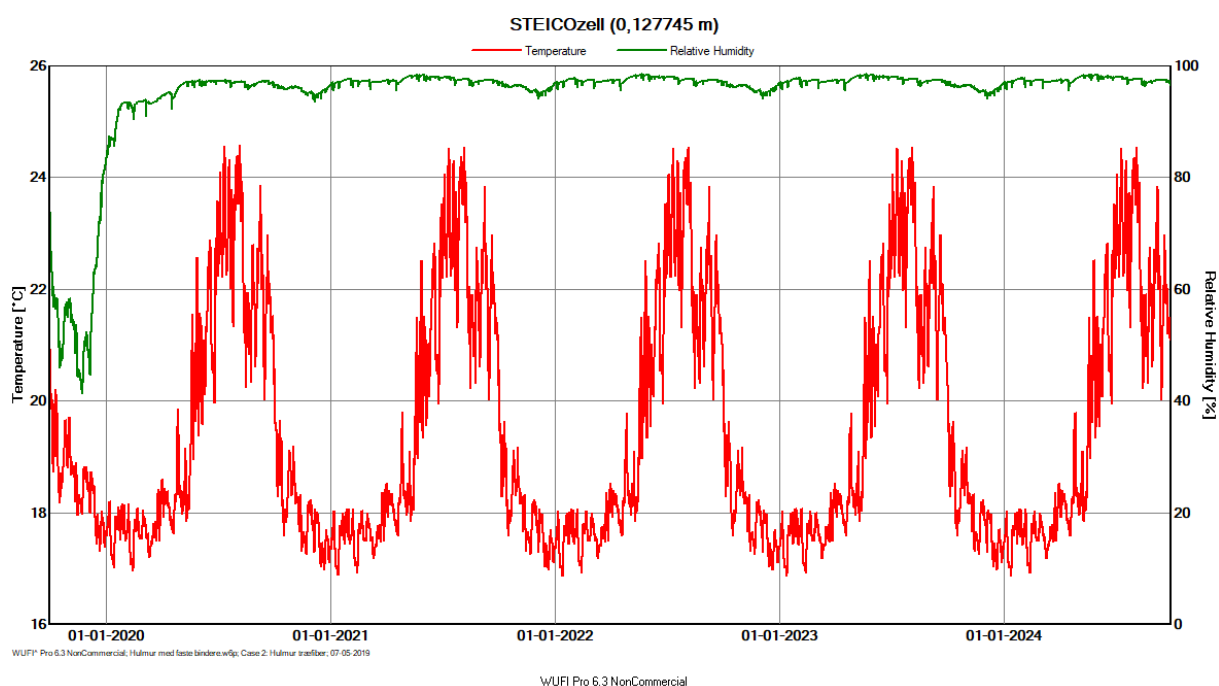
Figur 52: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i stenuld af fabrikat Rockwool

Produkt af celleplast



Figur 53: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i EPS-kugler af fabrikat Isofloc pearl

Produkt af organisk materiale



Figur 54: Hulmur med faste bindere - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i træfiber af fabrikat Steicozell

Tabel 16: Relativ luftfugtighed inderst i isoleringsmaterialer i procent

Materiale	Indblæst i hulmur - RF [%]		Henvisning
	Vinter	Sommer	
Stenuld	30	82	Bilag 3 s. 2
Glasuld	24	84	Bilag 3 s. 3
Perlite	30	80	Bilag 3 s. 3
EPS kugler	34	76	Bilag 3 s. 4
Papir	36	80	Bilag 3 s. 4
Træfiber	95	97	Bilag 3 s. 2

Fugtens fordeling inderst i isoleringslaget fremgår af bilag 3. Alle isoleringsprodukters relative luftfugtighed ligger i området fra 24 % om vinteren til 84 % om sommeren – undtagen træfiber (Figur 54), der skiller sig ud med næsten 100 % RF også på indersiden.

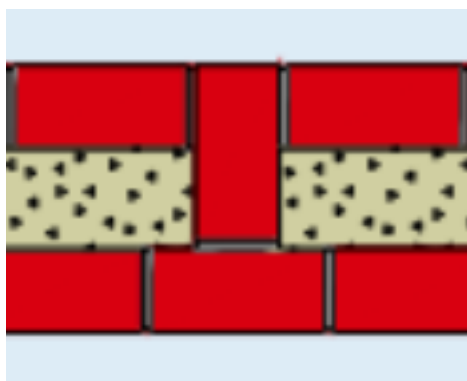
4.5 HULMUR MED FASTE BINDERE I HEAT2

WUFI fremkommer med følgende U-værdier afhængigt af varmeledningsevnen af isoleringsmaterialet i hulumuren.

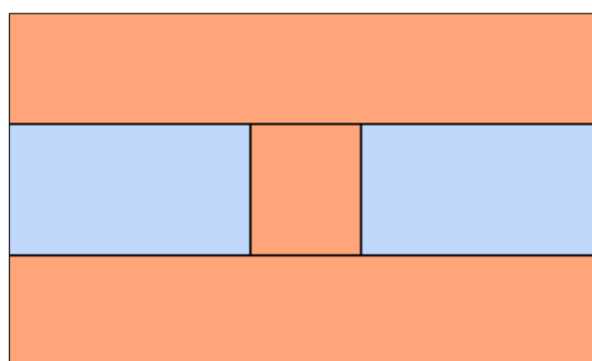
Tabel 17: U-værdier for hulmur med faste bindere ifølge WUFI

	Produkt	λ -værdi [W/m K]	U-værdi [W/m ² K]
Stenuld	RW Speedrock Lamelle	0,041	0,269
Glasuld	Isover Integra	0,0341	0,23
Perlite	Poroton-WDF Perlitefüllung	0,038	0,252
EPS-kugler	Isofloc	0,033	0,223
Papir	Isocell	0,037	0,247
Træfiber	Steicozell	0,040	0,264

U-værdierne er langt fra virkeligheden, da de er baseret på en hulmur uden kuldebroer, dvs. at de faste bindere samt udmuringerne omkring vinduer og døre samt evt. i hjørner af huset ikke indgår. Det er kuldebroer, der bør regnes ind i U-værdien, da de betyder temmeligt meget. U-værdien er opgjort for en tør konstruktion, og det har vist sig at både formuren og isoleringsmaterialet i mindst et tilfælde er meget vådt.



Figur 55: Fast binders placering i hulmur



Figur 56: Hulmur med fast binders opbygning i HEAT2

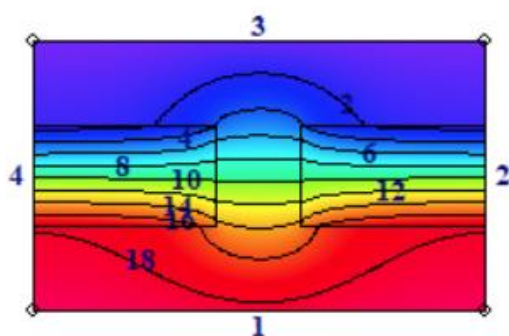
Da der er to murstens længde mellem de faste bindere, bliver længden af den geometriske model i HEAT2 vist i Figur 56 i alt ca. 600 mm, når kuldebroen skal være i centrum. Det kommer af, at en mursten er 228 mm lang, 108 mm bred og 54 mm høj, og en mørtelfuge er 12 mm tyk.

Murstens og isoleringsmateriales λ -værdier er tilgængelige i den indbyggede database. Randbetingelser for de to symmetrisnit i enderne og den indvendige og udvendige overflade defineres. Det samme gælder overgangsisolanser. Beregningsnettet fastlægges, så der regnes på 1 x 1 cm store rektangler.

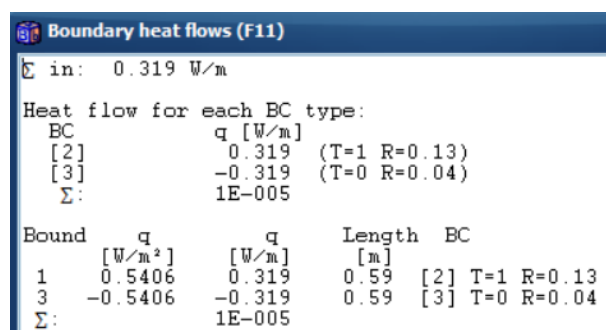
4.5.1 U-værdi for hulmur med faste bindere iht. HEAT2

U-værdien inklusiv kuldebroer fra de faste bindere beregnes i HEAT2 for EPS kugler med grafit, som er det isoleringsmateriale, der har den bedste varmeledningsevne, og samtidig har den laveste relative luftfugtighed på indersiden af isoleringen om sommeren iht. Tabel 16.

U-værdien regnes både med og uden faste binder, da illustrationerne i energiløsningen viser, at der er bindere i hvert andet murstensskifte. Af Figur 57 og Figur 58 fremgår isotermer og U-værdier for hulumuren med bindere.

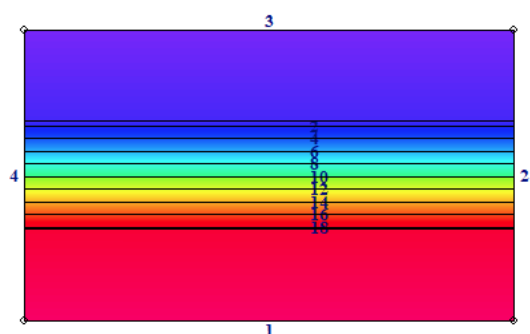


Figur 57: Isothermer for hulmur med faste binder omkring denne

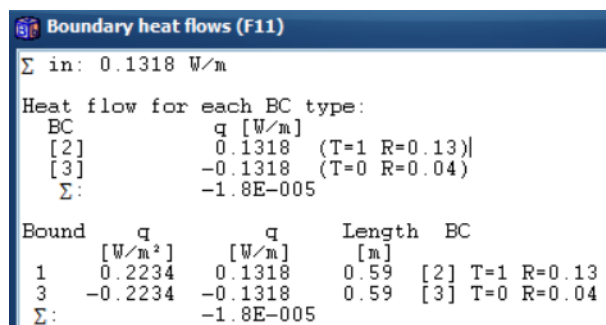


Figur 58: U-værdi = 0,5406 [W/m² K] for hulmur med faste binder

Af Figur 59 og Figur 60 fremgår isotermer og U-værdi for hulumuren uden bindere.

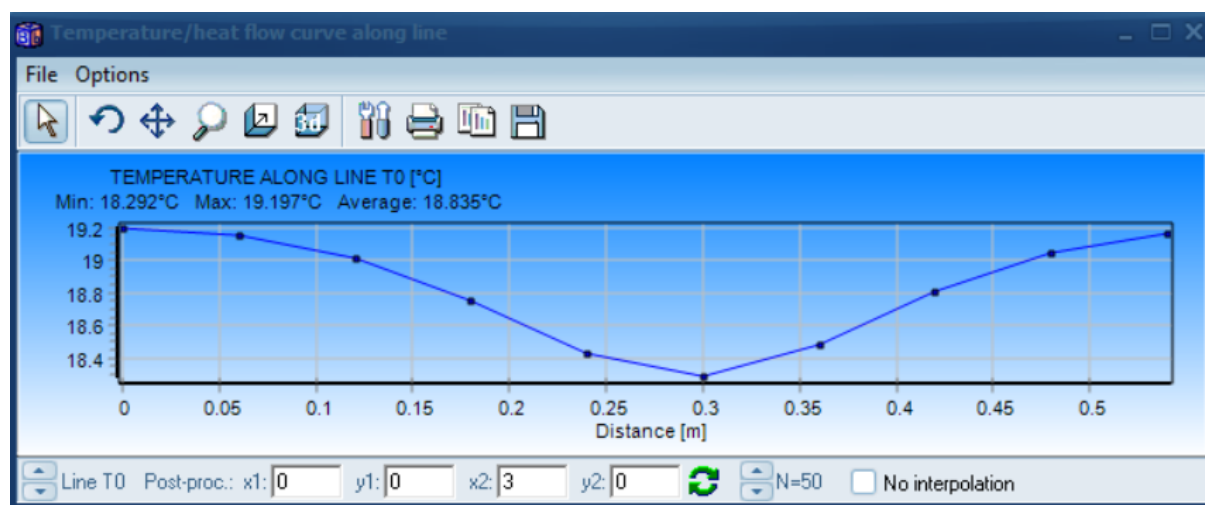


Figur 59: Isothermer for hulmur uden faste binder



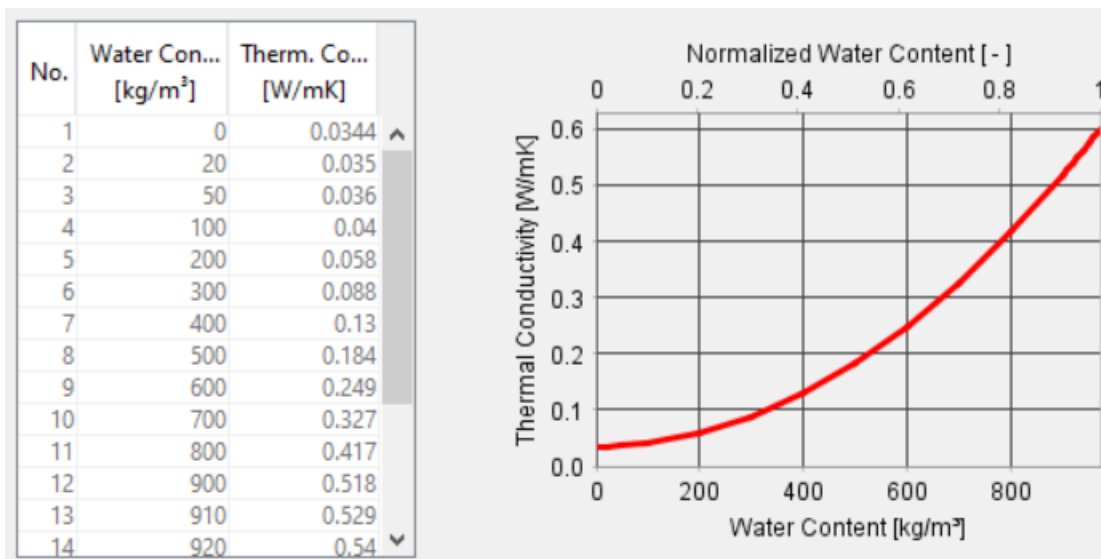
Figur 60: U-værdi = 0,2234 [W/m² K] for hulmur uden faste binder

Desuden undersøges temperaturvariationen på indersiden af væggen med henblik på at undgå kondens, som kan opstå ved for lave temperaturer.



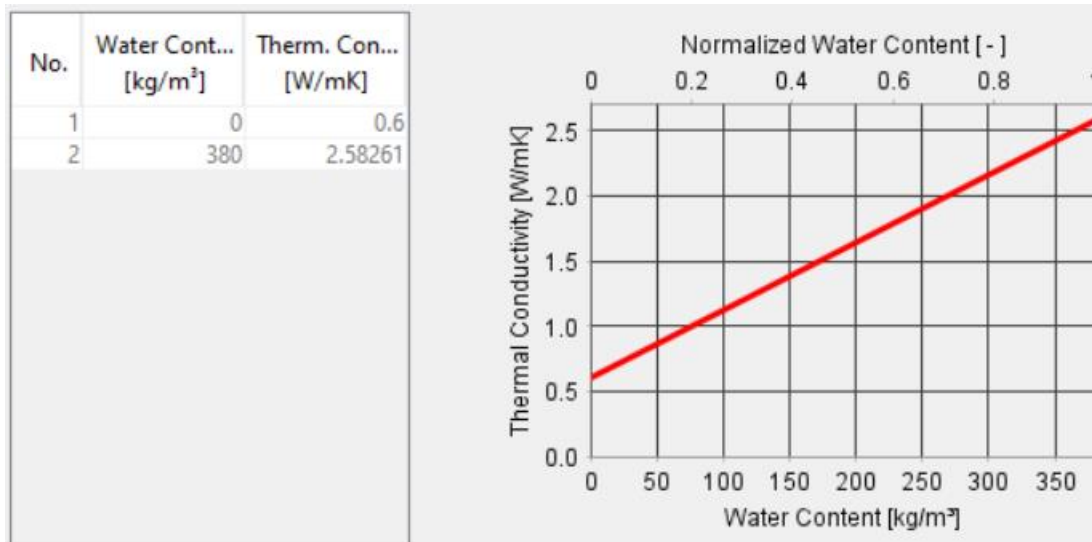
Figur 61: Temperaturfordeling på inderside af hulmur med faste bindere efterisoleret med EPS kugler ved en udetemperatur på 0 °C og en indetemperatur på 20 °C

Derudover regnes U-værdien for den fugtigste konstruktion, dvs. med det mest fugtbelastede isoleringsmateriale, for at få de to yderligheder. For den våde træfiber findes varmeledningsevnen som funktion af vandindholdet i WUFI.



Figur 62: Varmeledningsevne som funktion af vandindholdet i træfiber af fabrikat Steicozell iht. WUFI

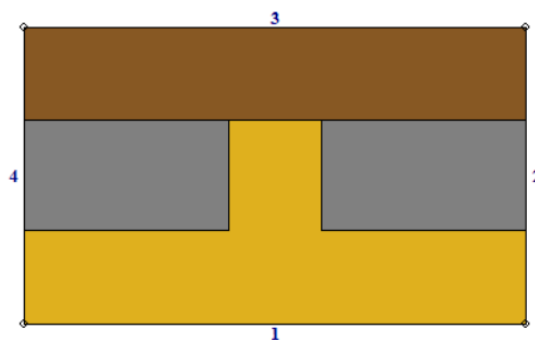
Som det ses af Figur 41 er vandindholdet i træfiberen omkring 75 [kg/m³] ved årsskiftet, så varmeledningsevnen for træfiberen skønnes at være $\lambda = 0,038$ iht. Figur 62.



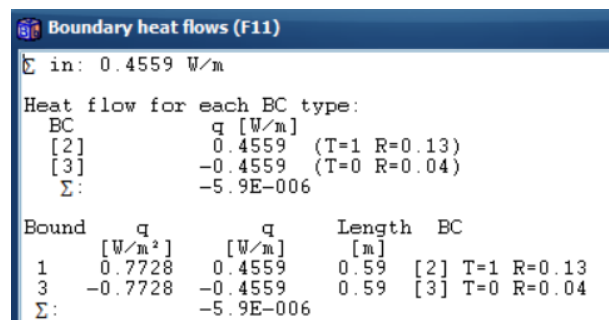
Figur 63: Varmeledningsevne som funktion af vandindhold i mursten i for- og bagmur samt faste bindere

Vandindholdet i murstenene i formuren skønnes på det samme tidspunkt i snit at ligge på omkring 90 [kg/m³] jf. Figur 42. I bagmuren er fugtindholdet helt nede på 5 [kg/m³] jf. Figur 44. Det vil sige, at varmeledningsevnen for formuren er $\lambda = 1,2$ og for bagmuren er $\lambda = 0,6$ iht. Figur 63.

U-værdien regnes både med og uden fast binder, da illustrationerne i energiløsningen viser, at der er bindere i hvert andet murstensskifte. Af Figur 64 og Figur 65 fremgår opbygning af konstruktionen og U-værdier for hulmuren med bindere. Her er varmeledningsevnen i HEAT2 rettet til efter de våde materialer.

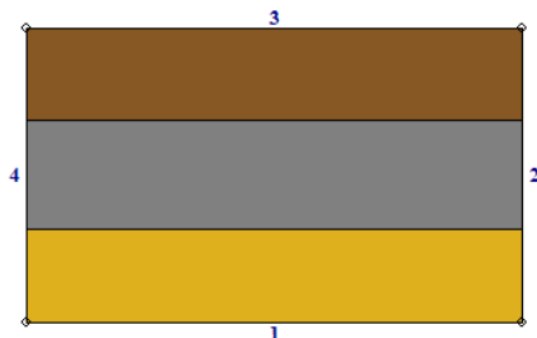


Figur 64: Hulmur med fast binder, fugtig formur og fugtig træfiber

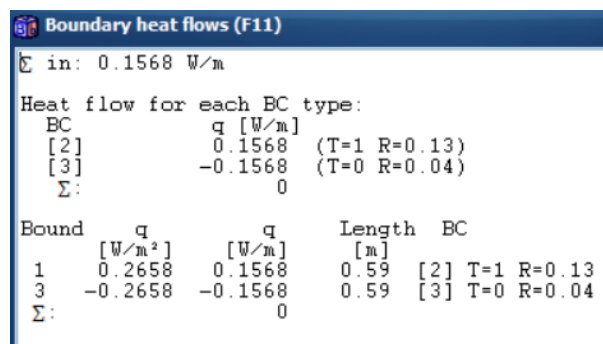


Figur 65: U-værdi = 0,7728 [W/m² K] for hulmur med fast binder

Af Figur 66 og Figur 67 fremgår opbygning af konstruktionen og U-værdi for hulmuren uden bindere.

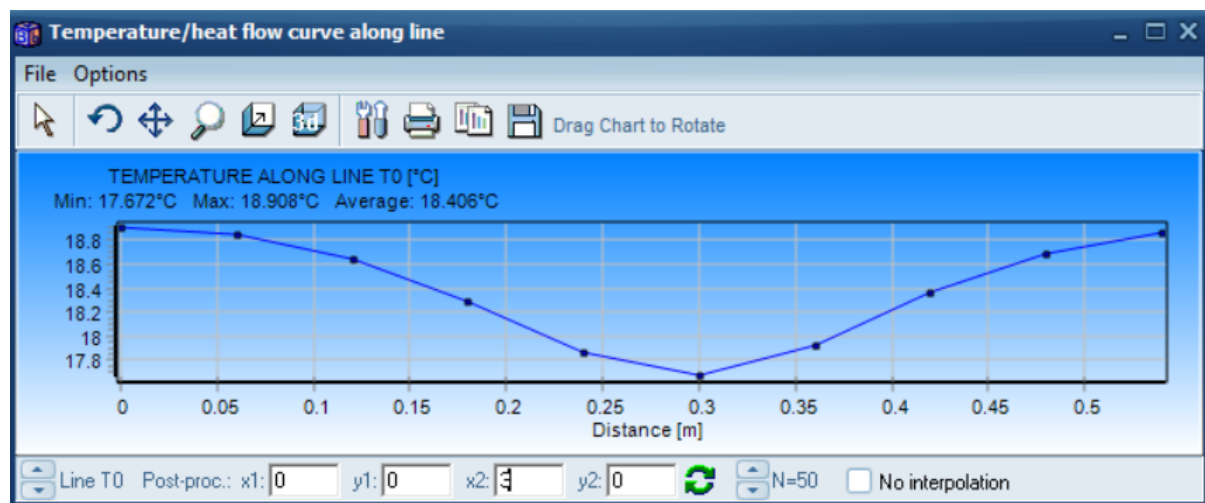


Figur 66: Hulmur med fugtig formur og fugtig træfiber



Figur 67: U-værdi = 0,2658 [W/m² K] for hulmur uden fast binder

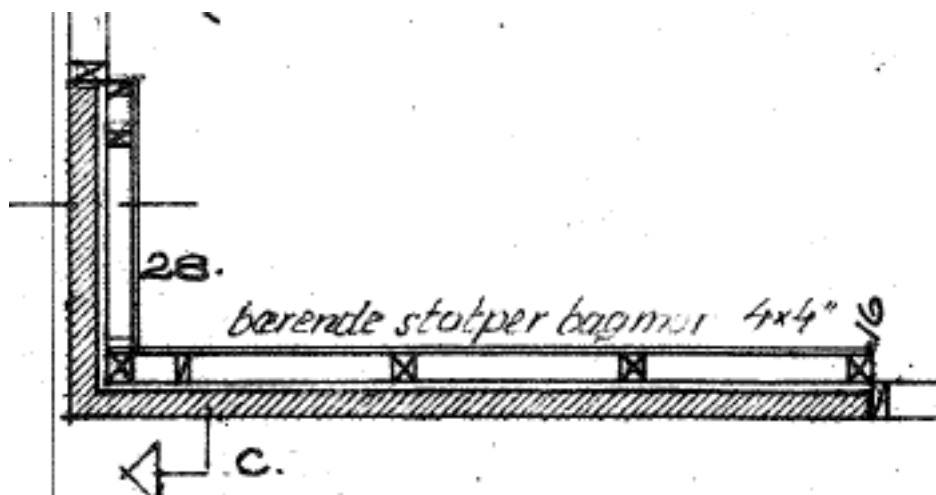
Igen undersøges temperaturvariationen på indersiden af væggen med henblik på at undgå kondens, som kan opstå ved for lave temperaturer.



Figur 68: Temperaturfordeling på inderside af hulmur med faste bindere efterisoleret med træfiber ved en udetemperatur på 0 °C og en indetemperatur på 20 °C

4.6 LET YDERVÆG I WUFI

Den anden konstruktion, der er simuleret, er en typisk dansk let ydervæg, som består af et træskelet med en tykkelse på 100 mm. I træskelettet er der isolering. Denne konstruktion var meget almindelig i parcelhusene i 1960-70'erne. På indersiden – bag den indvendige beklædning – var der oprindeligt dampspærre, men den er sandsynligvis ikke



Figur 69: Vandret snit visende træskelet bag skalmur i hjørne af parcelhus fra 1964 (Vanløse)

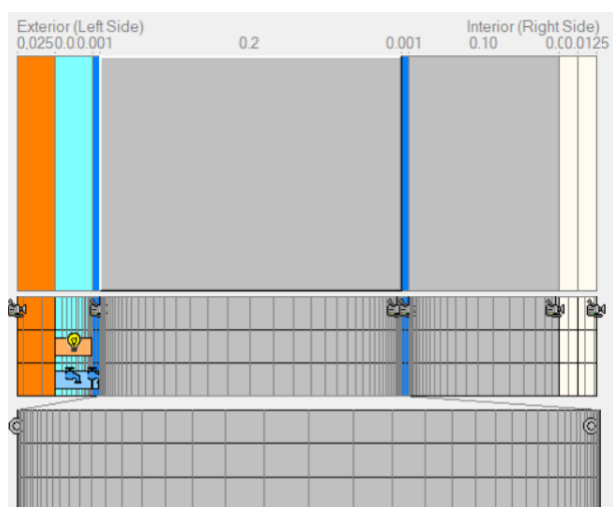
længere tæt. Ved en udvendig efterisolering⁸⁶ er det derfor nærliggende at fjerne den og etablere en ny dampspærre på ydersiden af træskelettet for at få plads til installationer på indersiden uden at perforere dampspærren.

For at leve op til bygningsreglementets isoleringskrav ved ombygning, som ifølge §279 i BR18 er en U-værdi på 0,18 [W/m² K], skal den samlede isoleringstykkelse op på omkring 300 mm. Det vil sige 200 mm på ydersiden, med mindre der vælges et isoleringsmateriale med en bedre varmeledningsevne, så tykkelsen kan begrænses.

Let ydervæg i WUFI – fra venstre mod højre:

- Træbeklædning 25 mm (Spruce, longitudinal)
- Ventileret luftlag (Air Layer 25 mm; without additional moisture capacity)
- Vindspærre (1 mm) (Delta ® – VENT SA)
- Efterisolering 200 mm i forskellige materialer
- Dampspærre ved mineraluld, celleplast og Aerogel/dampbremse ved træfiber/papir
- Oprindelig isolering 100 mm (Rockwool)
- 2 lag gips i alt 25 mm

Dampspærre/-bremse og vindspærre er valgt, så dampspærren/-bremsen er mindst 10 gange så tæt som vindspærren, så forholdet mellem indvendig og udvendig diffusionsmodstand er overholdt.



Figur 70: Opbygning af let ydervæg i WUFI

Den lette ydervæg er simuleret med 7 forskellige isoleringsmaterialer: Stenuld, træfiber, glasuld, papir, EPS, Aerogel og endelig fenolskum.

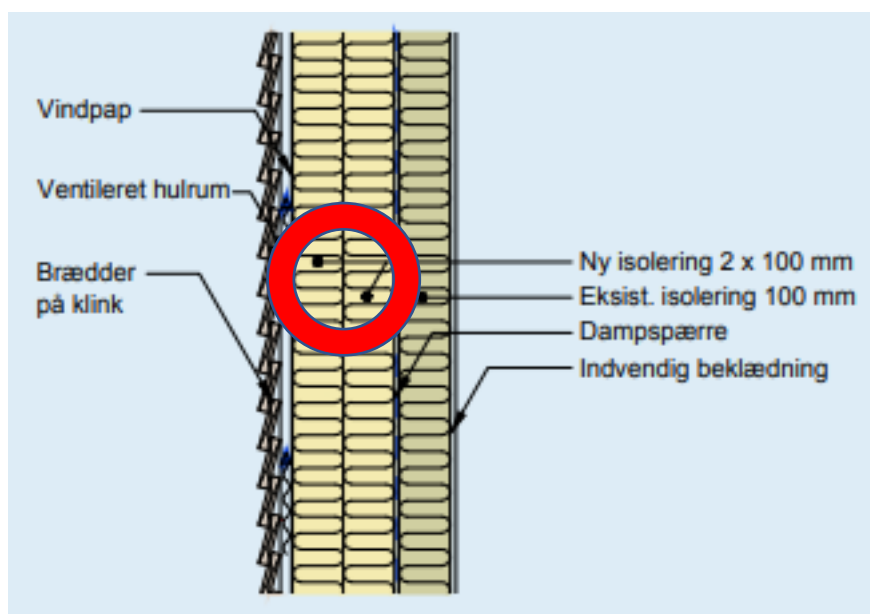
I tilfældet med Aerogel erstatter denne den oprindelige isolering i stedet for at blive lagt udenpå. Det lever måske lige knap op til bygningsreglementet ved ombygning, men er måske rentabelt på trods af, at isoleringsmaterialet er meget dyrt. Der er nemlig ingen udgifter til fremstilling af et nyt ydre træskelet ved denne fremgangsmåde.

⁸⁶ (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2019) Energiløsning Udvendig efterisolering af let ydervæg

Der er valgt at simulere med en dampspærre ved mineraluld, Aerogel og celleplast, og dampbremse ved papir og træfiber, idet kurverne for fugtindhold ifølge By og Byg Dokumentation 025: Fugtsikre træfacader⁸⁷ ligger nærmest oven i hinanden for mineraluld med dampspærre og papirisolering med dampbremse.

4.6.1 Vandindhold i isoleringslaget iht. WUFI

Den røde cirkel på Figur 71 viser, hvor vandindholdet er simuleret.



Figur 71: Udvendig efterisolering af let ydervæg – vand i isoleringsmateriale

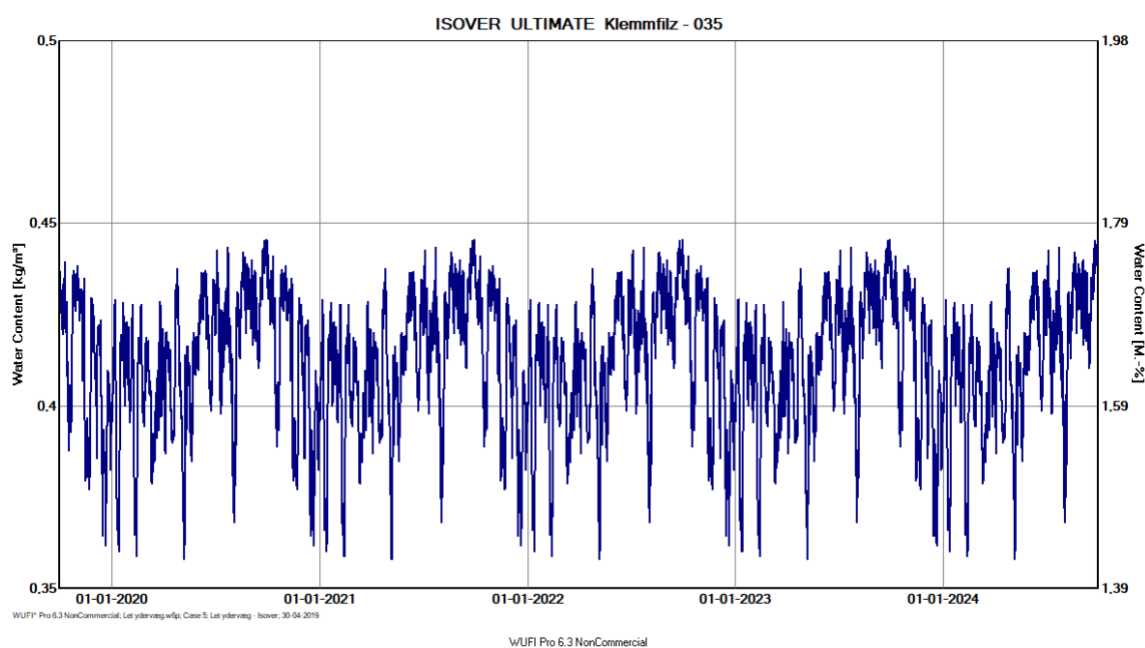
I WUFI vises resultaterne i form af kurver med det samlede vandindhold i isoleringsmateriale over året. I venstre side kan aflæses vandindholdet opgjort i kilogram pr. kubikmeter isoleringsmateriale. I højre side kan aflæses vandindholdet opgjort i masseprocent.

For overskuelighedens skyld er der kun vist seks kurver, dvs. et isoleringsmateriale fra hver gruppe i to situationer. Den første situation er korrekt udført, mens den anden er med flere fejl i udførelsen og for høj fugtbelastning indefra.

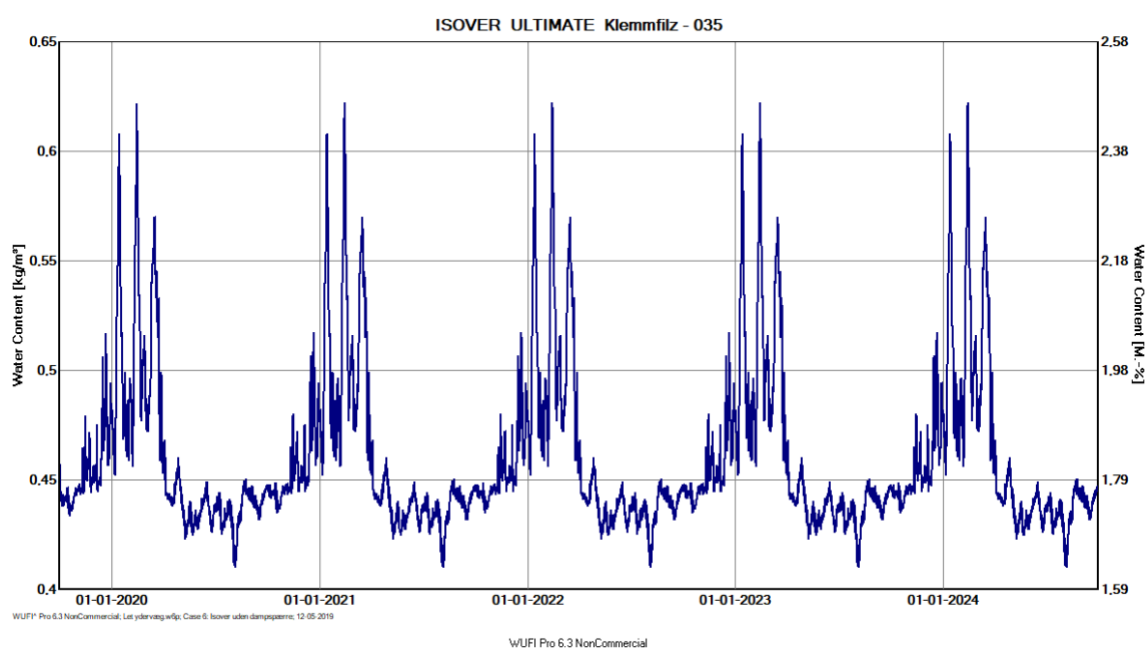
For den lette ydervæg er kurverne vist for glasuld, ekspanderet polystyren og papirisolering. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 4. I Tabel 18 og Tabel 19 er udsvingene – dvs. laveste og højeste punkt på kurverne opgjort.

⁸⁷ (Andersen, Fynholm, Hansen, & Nicolajsen, 2002) s. 33

Produkt af uorganisk materiale

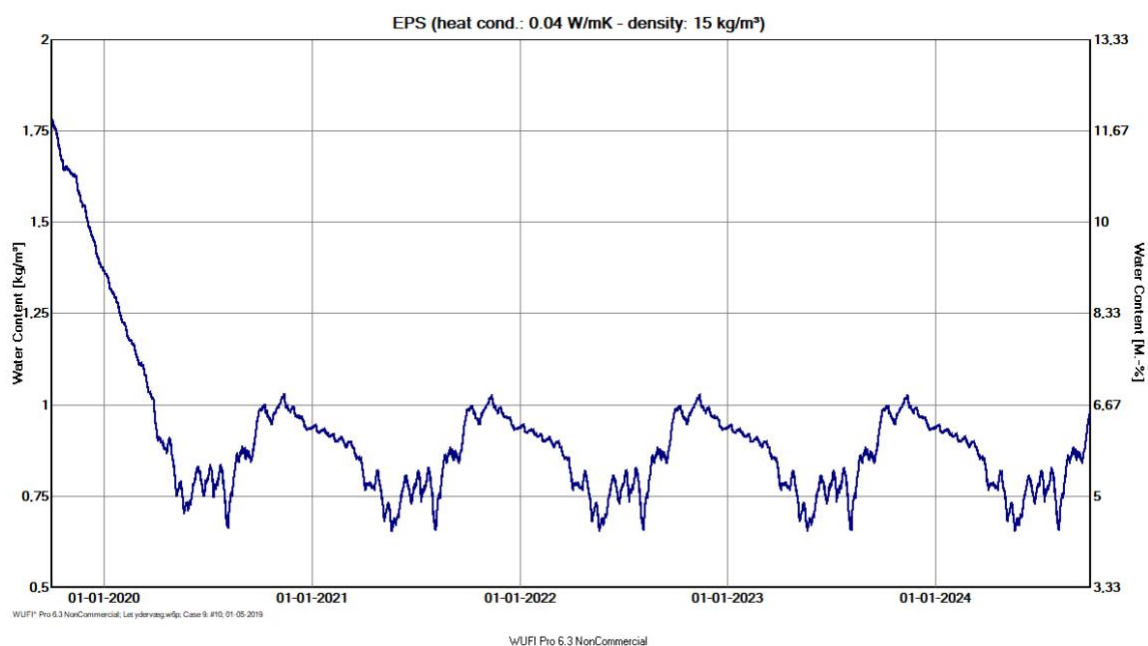


Figur 72: Let ydervæg - Vandindhold i glasuld af fabrikat Isover med dampspærre og ventilation af hulrum

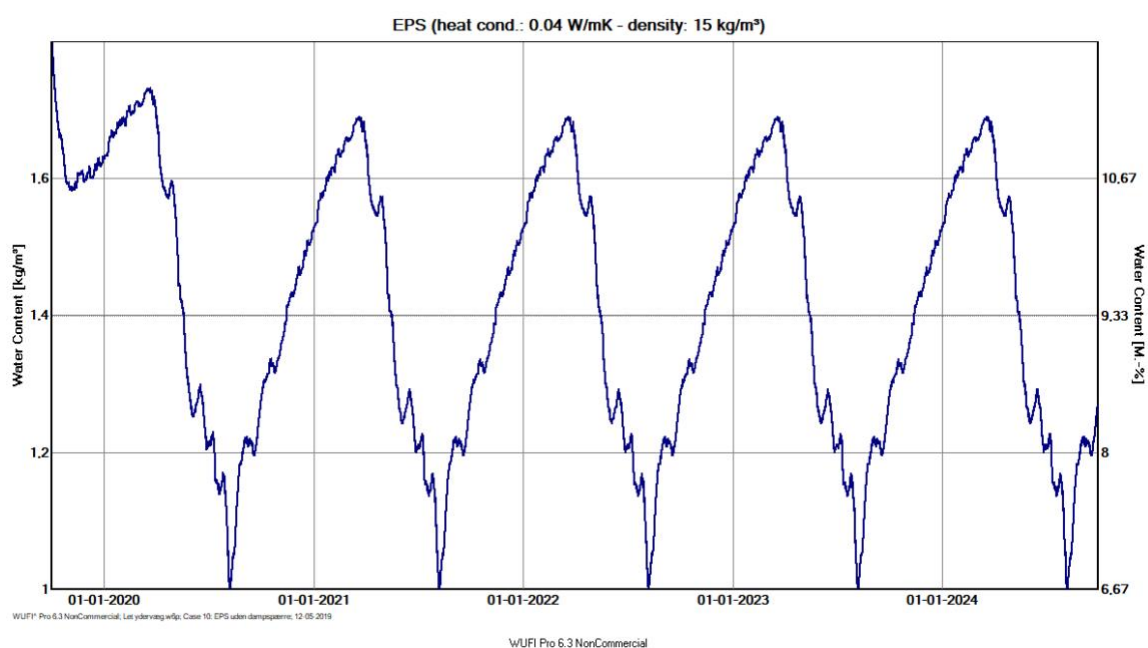


Figur 73: Let ydervæg - Vandindhold i glasuld af fabrikat Isover uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af celleplast

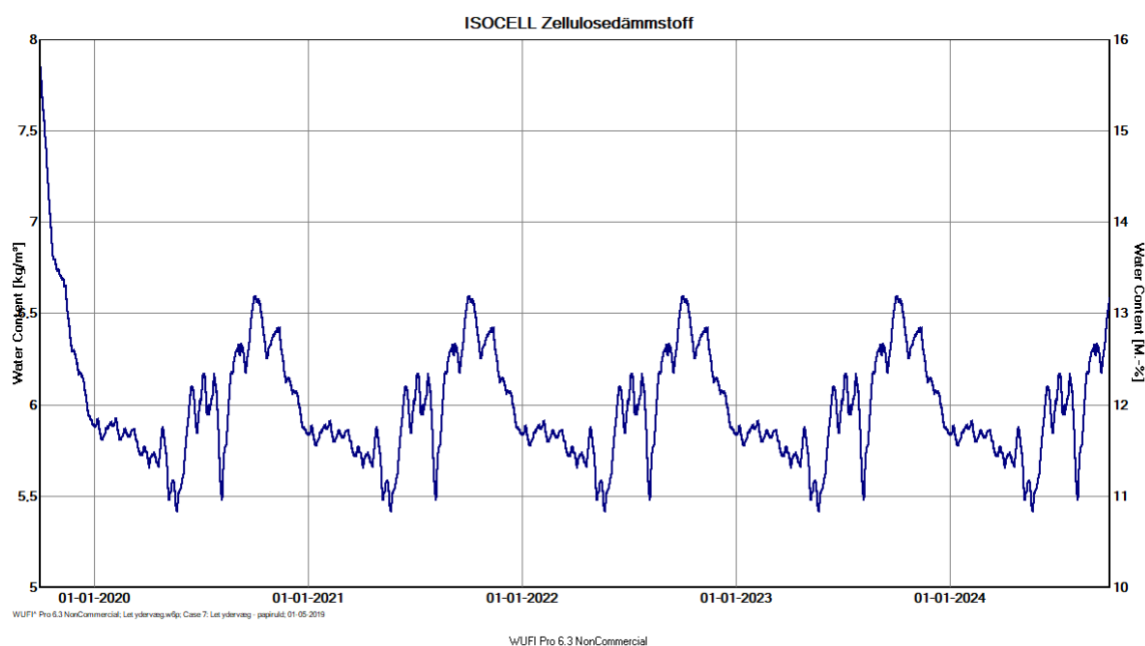


Figur 74: Let ydervæg - Vandindhold i EPS af fabrikat No name med dampspærre og ventilation af hulrum

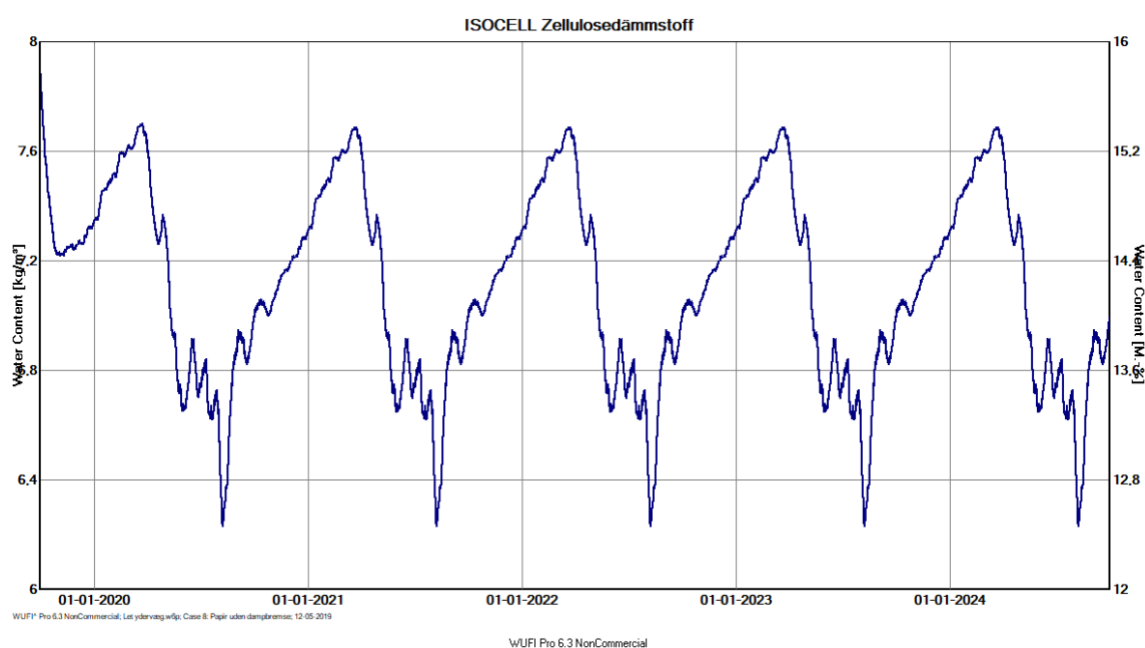


Figur 75: Let ydervæg - Vandindhold i EPS af fabrikat No name uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af organisk materiale



Figur 76: Let ydervæg - Vandindhold i papirisolering af fabrikat Isocell med dampbremse og ventilation af hulrum



Figur 77: Let ydervæg - Vandindhold i papirisolering af fabrikat Isocell uden dampbremse, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Tabel 18: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masse pr. volumen iht. bilag 4

	Korrekt udført ¹⁾				Ikke korrekt udført ²⁾			
	Udv. isolering [kg/m ³]				Udv. isolering [kg/m ³]			
Materiale	Vinter	Forår	Sommer	Efterår	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
Stenuld	0,1-0,15				0,30		0,12	
Glasuld	0,36-0,44				0,63		0,41	
Aerogel		4,4		5,6		6,2	5,1	
EPS			0,7	1		1,7	1	
Fenolskum			0,7	1		1,7	1	
Papir		5,4		6,6		7,7	6,2	
Træfiber			4,5	6,2		9	5,9	

1) Med korrekt udført menes der med dampspærre/-bremse, ventileret hulrum på ydersiden af vindspærren og korrekt ventilation inde i bygningen, så fugtbelastningen er middel.

2) Med ikke korrekt udført menes der uden eller defekt dampspærre/-bremse, ingen ventilation af hulrum og ikke tilstrækkeligt stort luftskifte inde i bygningen.

Det fremgår af resultaterne i bilag 4, som er opsummeret i Tabel 18, at vandindholdet i efterisoleringen på ydersiden af den oprindelige lette ydervæg er forholdsvis lavt ved korrekt udførelse for mineraluld og celleplast. Det samme gælder for EPS og Fenolskum. Udsvingene i vandindholdet er også små.

For Aerogel, papir og træfiber er vandindholdet mange gange større. Mindst for Aerogel.

Hvis dampspærren udelades, og der ingen ventilation er, og hvis der oven i det tilføjes en større fugtbelastning, får det som konsekvens, at udsvingene på kurverne bliver større.

For begge typer af mineraluld bliver udsvingene større og større, jo mere konstruktionen belastes. Udsvingene er dog kortvarige, så vandindholdet kommer relativt hurtigt tilbage i nærheden af udgangspunktet. De højeste toppe er om vinteren – de laveste om sommeren. Vandindhold forbliver bortset fra udsvingene i det samme område.

For celleplasterne er vandindholdet også relativt lavt og svinger ikke nær så meget, dvs. at vandindholdet er det samme i længere tid. Udsvingene er derfor meget bredere og mindst om sommeren, hvorfra det stiger til det højeste punkt om foråret, for at falde igen. Vandindholdet er højere end for mineraluld, men lavere end for Aerogel.

For de organiske isoleringsmaterialer svinger vandindholdet heller ikke ret meget, så vandindholdet er igen ret konstant. Det betyder, ligesom for celleplasterne, at vandindholdet er højere i længere tid. De brede kurver må betyde, at vandet hober sig op. Vandet kommer til om vinteren, topper i foråret og tørrer ud om sommeren. Vandindholdet er væsentligt højere end i celleplasterne og mineraluld.

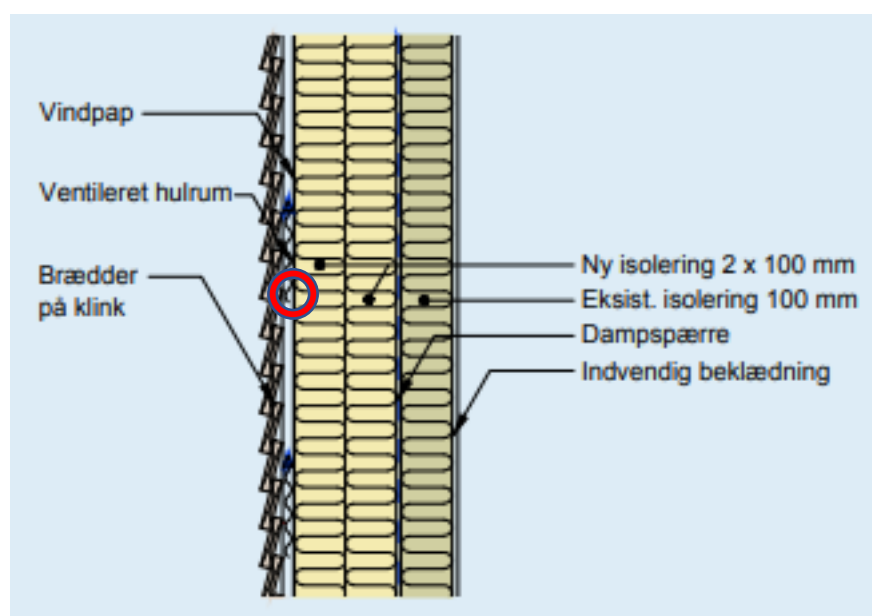
Tabel 19: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masseprocent iht. bilag 4

	Korrekt udført ¹⁾				Ikke korrekt udført ²⁾			
	Udv. isolering [M.-%]				Udv. isolering [M.-%]			
Materiale	Vinter	Forår	Sommer	Efterår	Vinter	Forår	Sommer	Efterår
Stenuld	0,24-0,38				0,75		0,28	
Glasuld	1,4-1,78				2,5		1,6	
Aerogel		3		3,8		4,2	3,5	
EPS			4	6,7		11	6,6	
Fenolskum			1,5	2,4		3,9	2,3	
Papir		10,8		13,2		15,5	12,5	
Træfiber			9	12,2		17,8	11,8	

Vandindholdet i masseprocent fremgår af Tabel 19. Det stiger væsentligt, når dampspærre/-bremse og ventilation på ydersiden ikke er i orden, og fugtbelastningen på indersiden bliver større. Da isoleringsmaterialets vægt indgår i masseprocenten, er fordelingen en smule anderledes, men glasuld har fortsat et større vandindhold i masseprocent end stenuld. I Aerogel er masseprocenten større end i de to mineraluldsfabrikater. Masseprocenten er væsentlig højere i EPS i forhold til Fenolskum, sandsynligvis fordi EPS'en vejer mindre. Masseprocenten i papirisolering har mindre udsving end i træfiber.

4.6.2 Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI

Den røde cirkel på Figur 78 viser, hvor den relative luftfugtighed og temperatur er valgt simuleret.



Figur 78: Udvendig efterisolering af let ydervæg

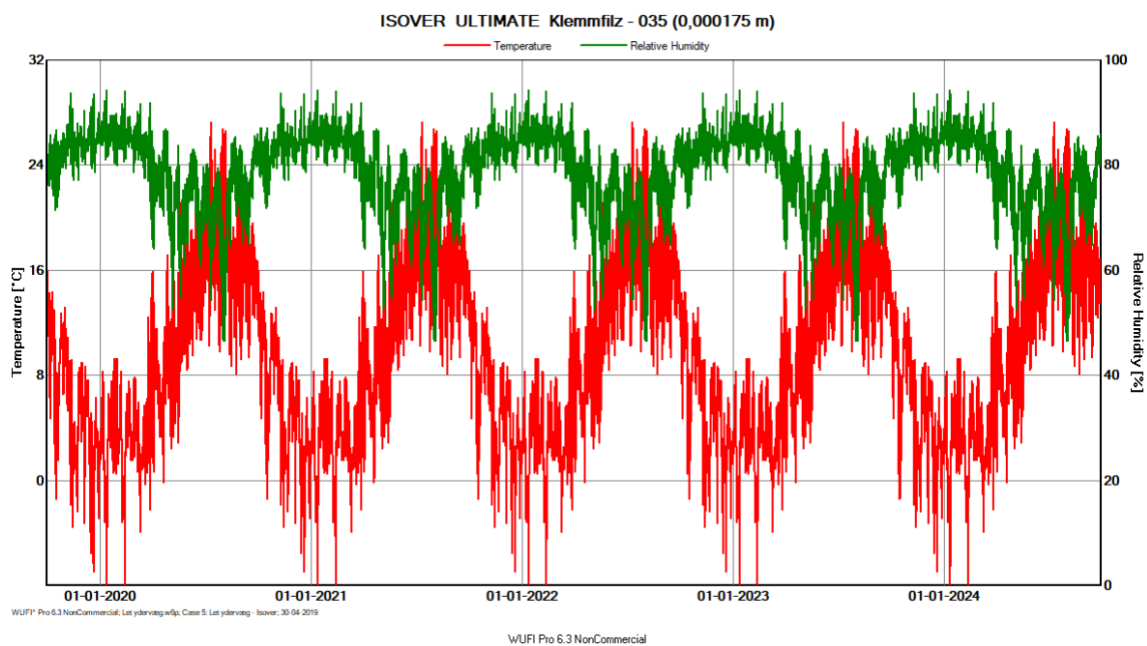
Igen er kurverne vist for glasuld, ekspanderet polystyren og papirisolering. I venstre side kan temperaturen aflæses i grader Celcius. I højre side kan den relative luftfugtighed aflæses i procent. Den grønne kurve er relativ luftfugtighed og den røde er temperaturen. Begge dele er

simuleret yderst i isoleringen. Kurverne gentager sig selv over de fem år, som simuleringen varer, idet WUFI bruger de samme klimadata år efter år, og isoleringen derfor påvirkes ens.

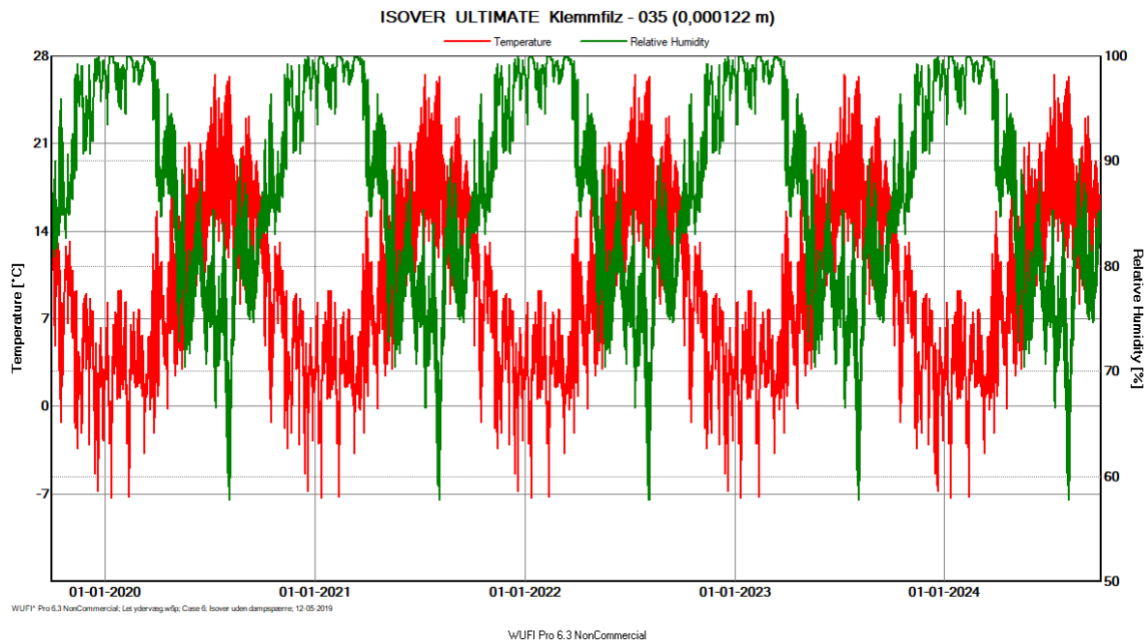
For overskueligheden skyld er der igen kun vist seks kurver, dvs. et isoleringsmateriale fra hver gruppe i to situationer. Den første situation er korrekt udført, mens den anden er med flere fejl i udførelsen og for høj fugtbelastning indefra.

Kurverne er medtaget for glasuld, ekspanderet polystyren og papirisolering. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 5. I Tabel 20 er udsvingene i den relative luftfugtighed – dvs. laveste og højeste punkt på kurverne - opgjort.

Produkt af uorganisk materiale

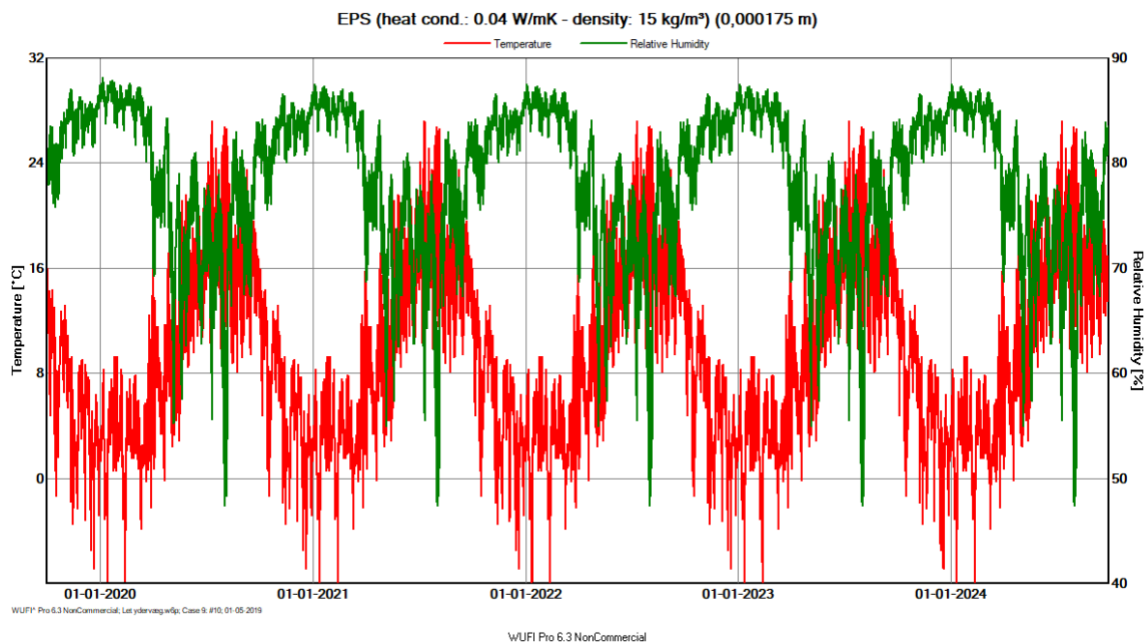


Figur 79: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i glasuld af fabrikat Isover med dampspærre og ventilation af hulrum

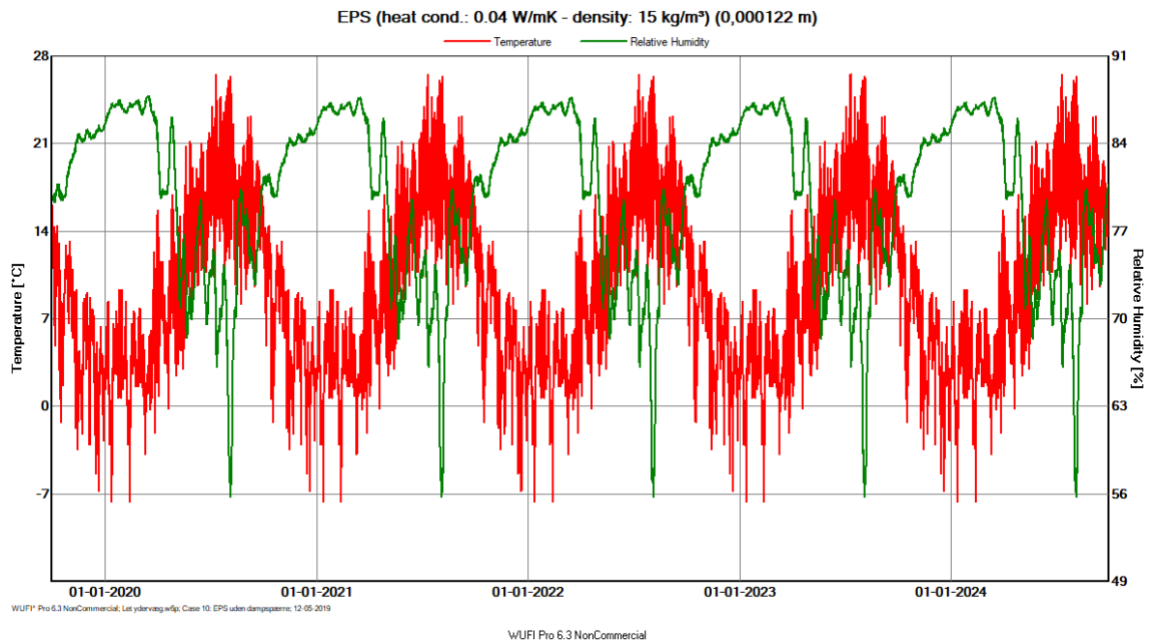


Figur 80: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i glasuld af fabrikat Isover uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af celleplast

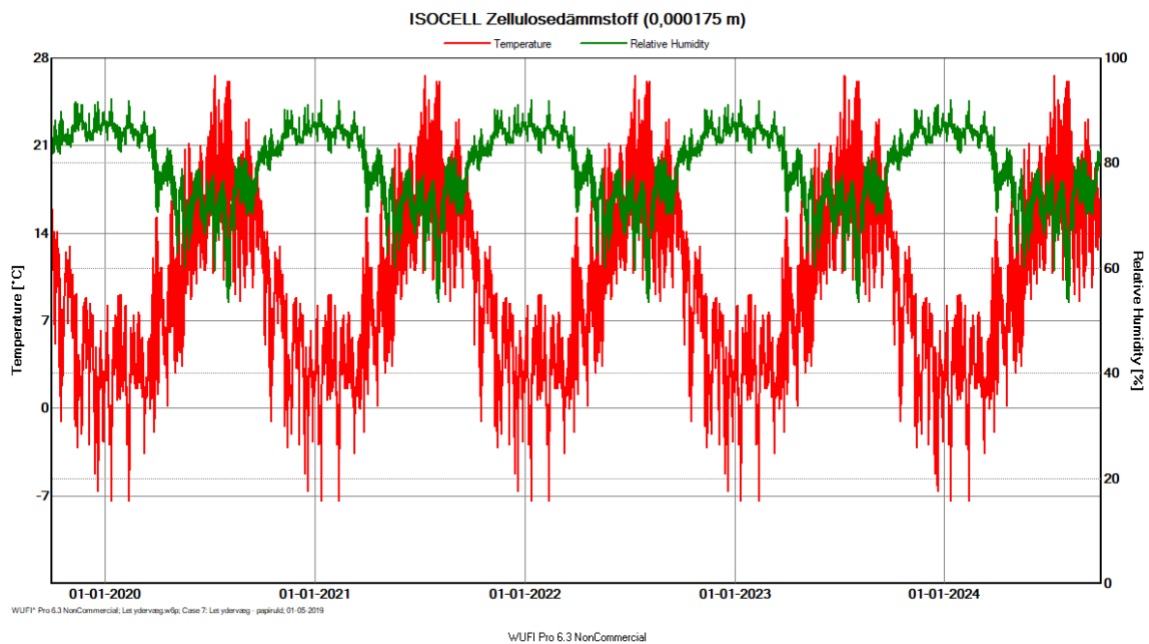


Figur 81: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i EPS af fabrikat No name med dampspærre og ventilation af hulrum

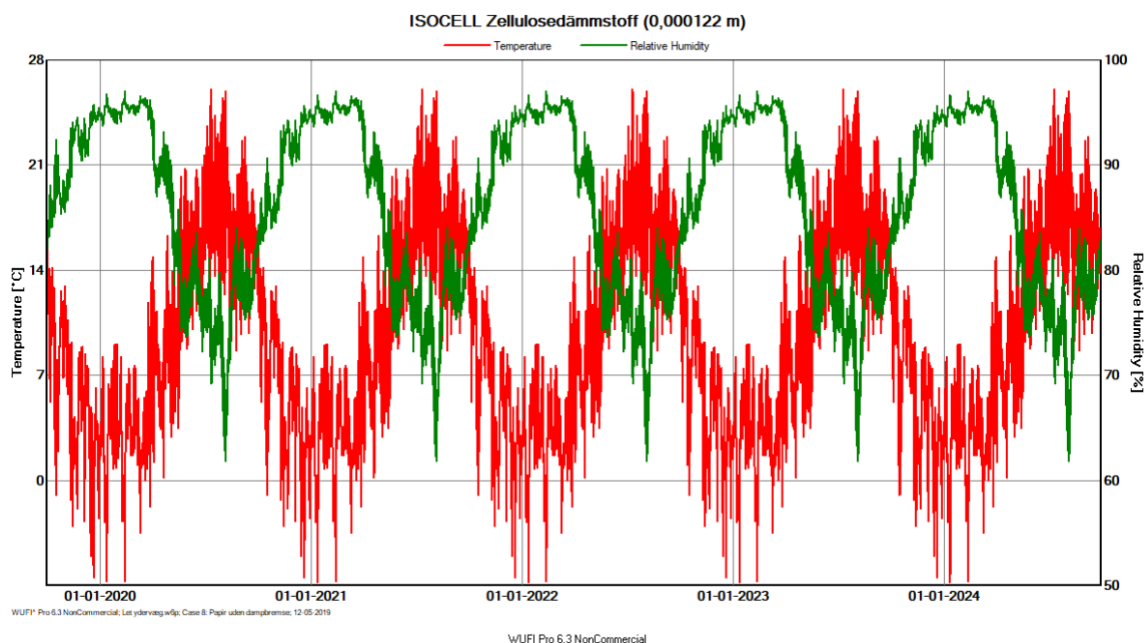


Figur 82: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i EPS af fabrikat No name uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af organisk materiale



Figur 83: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i papirisolering af fabrikat Isocell med dampbremse og ventilation af hulrum



Figur 84: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i papirisolering af fabrikat Isocell uden dampbremse, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Tabel 20: Relativ luftfugtighed yderst i isoleringsmaterialer i procent iht. bilag 5

	Korrekt udført ¹⁾		Ikke korrekt udført ²⁾	
	Udv. isolering - RF [%]		Udv. isolering - RF [%]	
Materiale	Vinter	Sommer	Vinter	Sommer
Stenuld	90	45	98	58
Glasuld	90	45	100	58
Aerogel	87	50	98	58
EPS	87	48	88	56
Fenolskum	87	48	88	56
Papir	90	54	97	62
Træfiber	84	54	95	64

Den relative luftfugtighed yderst i efterisoleringen - på indersiden af vindspærren er givet i bilag 5. Udsvingene på de grønne kurver er opgjort i Tabel 20. Den relative luftfugtighed er højest om vinteren og lavest om sommeren.

For sten- og glasuld (Figur 79 og Figur 80) ligger den relative luftfugtighed fra 45-90 %, når efterisoleringen er udført korrekt. For Aerogel ligger den fra 50-87 %, dvs. et mindre spænd.

Kurverne for celleplasterne har en anelse mindre udsving. De ligger med 48-87 % relativ luftfugtighed ved korrekt udført efterisolering. Kurver for EPS kan ses i Figur 81 og Figur 82.

Kurverne for papirisolering (Figur 83 og Figur 84) samt træfiber er mere konstante, end kurverne for mineraluld. De har et højere niveau om sommeren, nemlig ca. 54 % RF, men nogenlunde samme niveau som de andre om vinteren ca. 84-90 %.

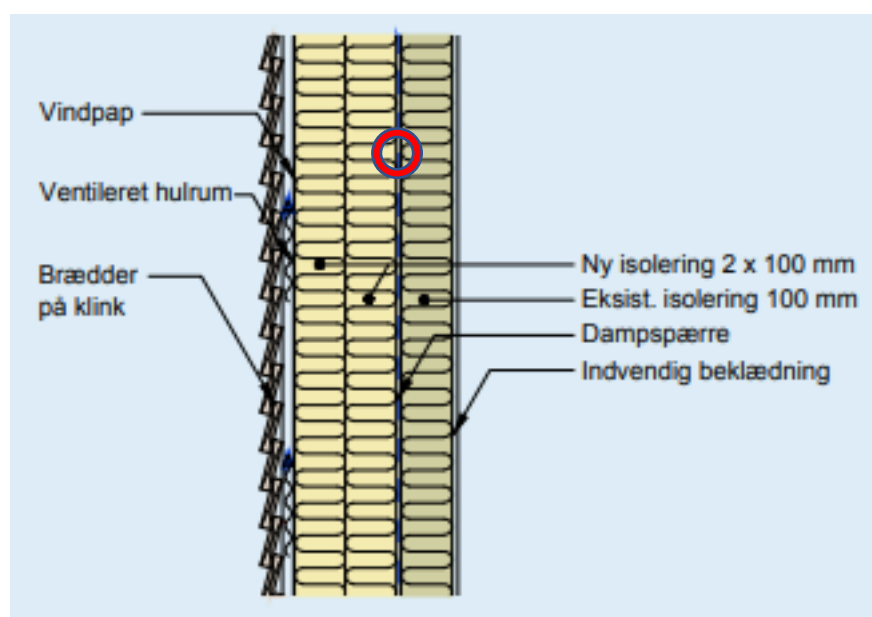
Hvis den lette ydervæg ikke udføres korrekt, stiger den relative luftfugtighed i isoleringslaget. Yderst i isoleringslaget ligger den på omkring de 100 %.

Stigningen i relativ luftfugtighed i isoleringsmaterialerne af celleplast er nærmest nul i den koldeste tid, nemlig fra 87 til 88 %. I den varme tid stiger den relative luftfugtighed dog væsentligt, så det laveste punkt på kurven nu ligger på omkring 56 %.

Stigningen i relativ luftfugtighed for papirisolering og træfiber, hvis isoleringsarbejdet ikke udføres korrekt, minder lidt om celleplasternes om sommeren. Her bliver det laveste punkt på kurven nu 62-64 %, mens det om vinteren minder om mineraluld, og ligger på 95-97 %.

4.6.3 Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI

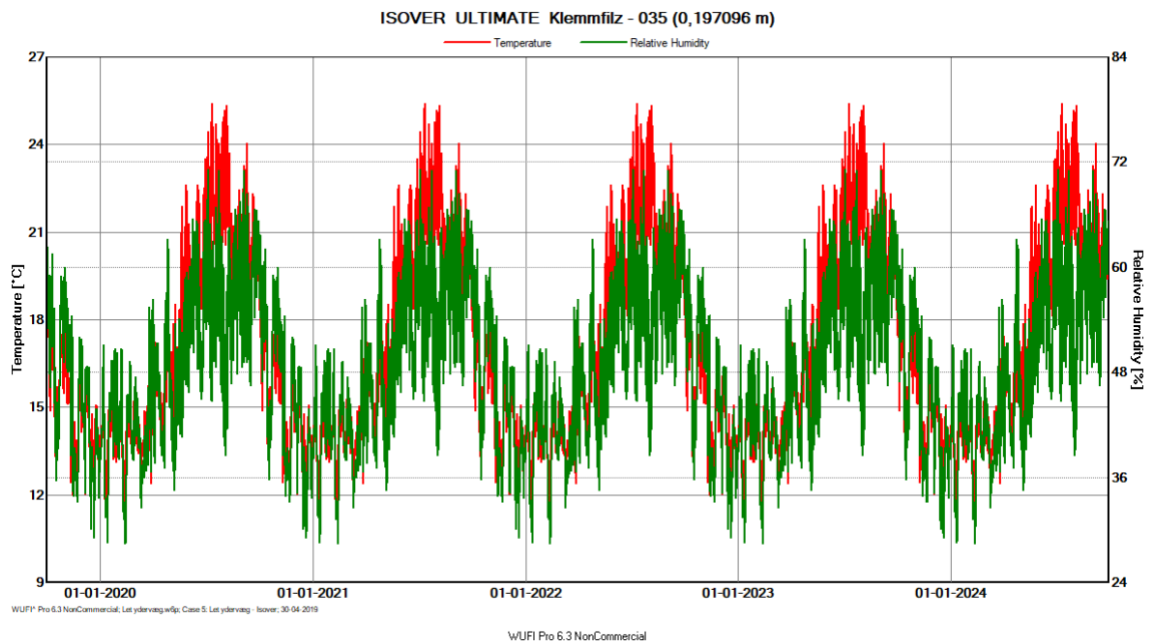
Den røde cirkel på Figur 85 viser, hvor den relative luftfugtighed og temperatur er valgt simuleret.



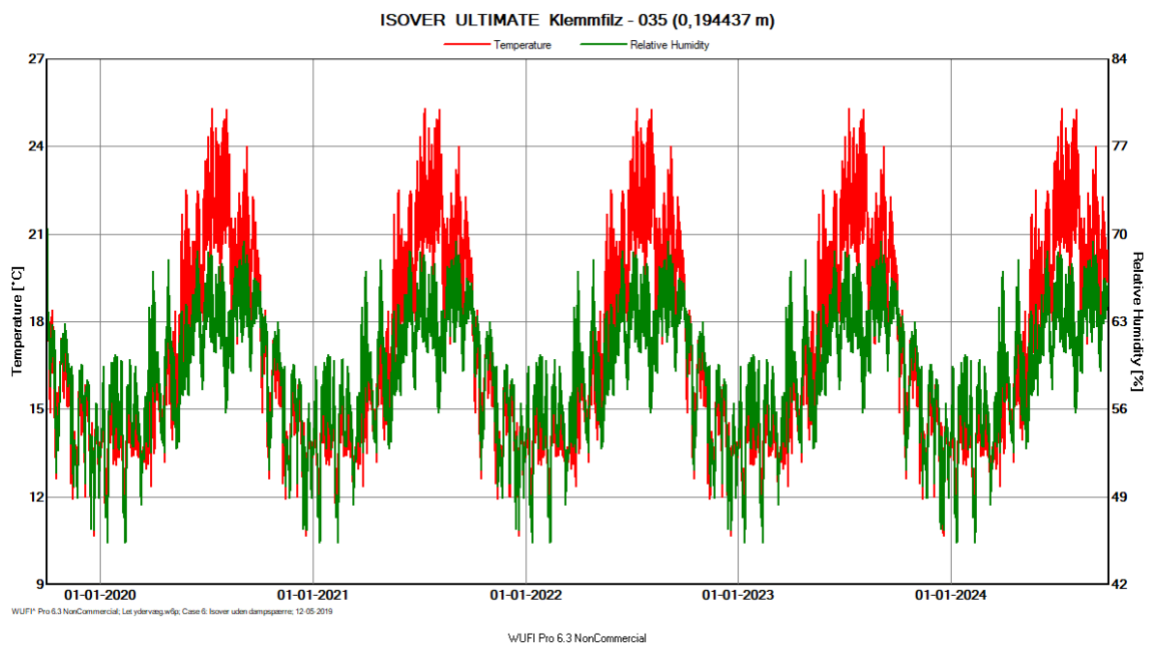
Figur 85: Udvendig efterisolering af let ydervæg

Igen er kurverne vist for glasuld, ekspanderet polystyren og papirisolering. Denne gang inderst i isoleringen. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 6. I Tabel 21 er udsvingene i den relative luftfugtighed– dvs. laveste og højeste punkt på kurverne - opgjort.

Produkt af uorganisk materiale

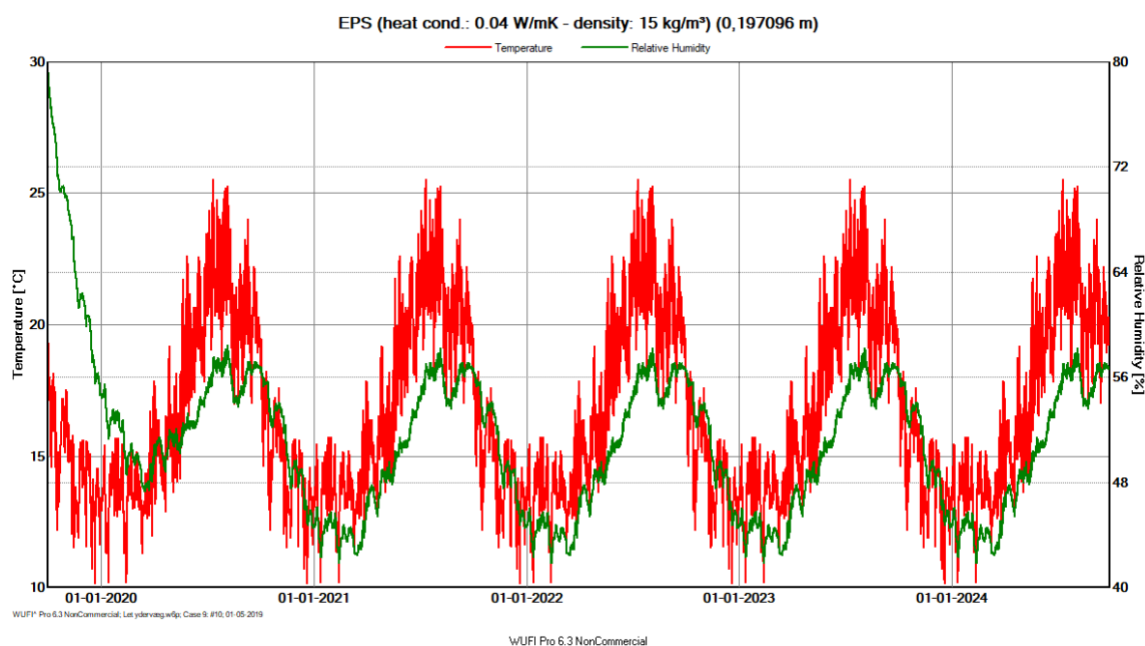


Figur 86: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i glasuld af fabrikat Isover med dampspærre og ventilation af hulrum

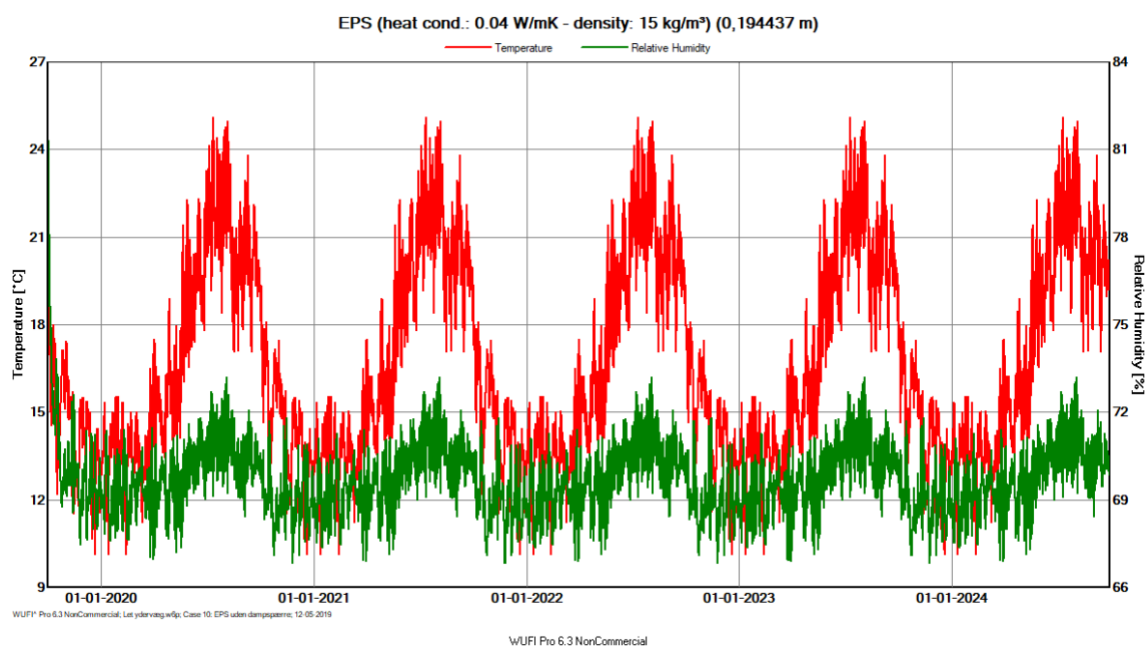


Figur 87: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i glasuld af fabrikat Isover uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af celleplast

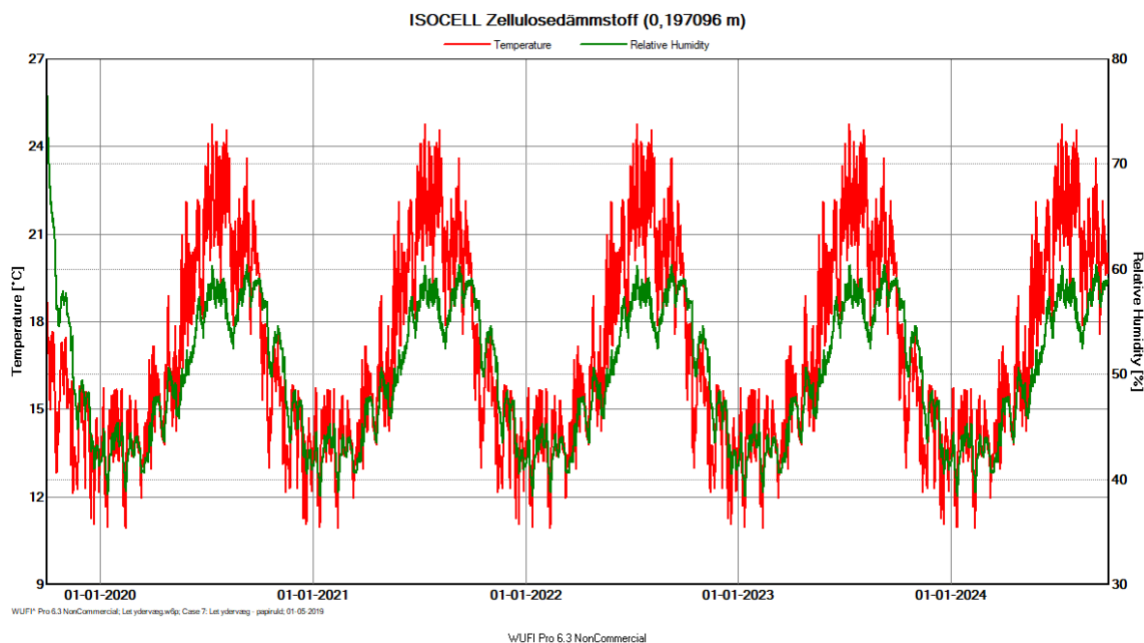


Figur 88: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i EPS af fabrikat No name med dampspærre og ventilation af hulrum

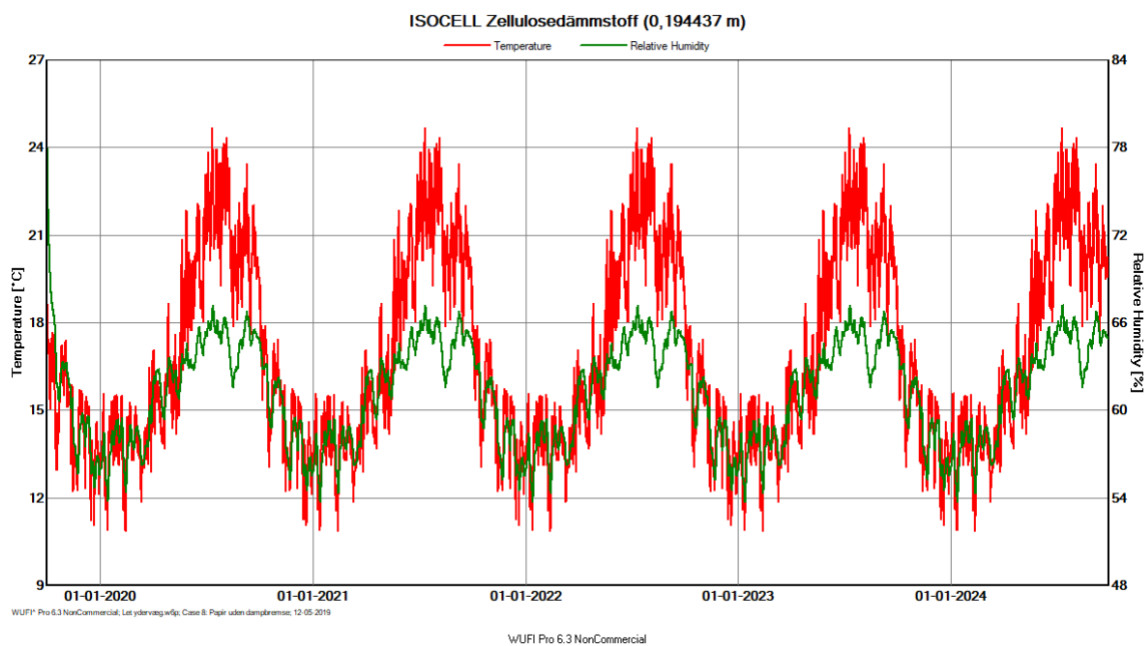


Figur 89: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i EPS af fabrikat No name uden dampspærre, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Produkt af organisk materiale



Figur 90: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i papirisolering af fabrikat Isocell med dampbremse og ventilation af hulrum



Figur 91: Let ydervæg - Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i papirisolering af fabrikat Isocell uden dampbremse, uden ventilation af hulrum og med fugtbelastning indenfor øget med 5 %

Tabel 21: Relativ luftfugtighed inderst i isoleringsmaterialer i procent iht. bilag 6

	Korrekt udført ¹⁾		Ikke korrekt udført ²⁾	
	Udv. isolering - RF [%]		Udv. isolering - RF [%]	
Materiale	Vinter	Sommer	Vinter	Sommer
Stenuld	24	72	47	70
Glasuld	28	72	45	70
Aerogel	24	56	36	66
EPS	42	58	67	73
Fenolskum	42	58	67	73
Papir	40	60	54	67
Træfiber	38	60	54	67

I den inderste del af isoleringen ligger den relative luftfugtighed på 24-72 % for mineraluld. For isoleringen med Aerogel ligger den i samme niveau om vinteren , men lavere om sommeren.

For celleplasterne ligger niveauet på 42-58 % relativ luftfugtighed, dvs. højere om vinteren og lavere om sommeren end for mineraluld. Om sommeren svarer niveauet nogenlunde til for isoleringen med Aerogel.

For de to cellulosebaserede isoleringsmaterialer ligger den relative luftfugtighed i samme leje som for celleplasterne.

Hvis efterisoleringen ikke udføres korrekt dvs. uden dampbremse eller -spærre, uden ventilation på ydersiden af vindspærren og hvis der ikke luftes tilstrækkeligt ud indenfor, stiger den relative luftfugtighed om vinteren, hvorimod sommerniveauet fastholdes for mineraluld. For isolering med Aerogel er der en stigning både vinter og sommer, men den relative luftfugtighed bliver ikke helt så høj som for mineraluld.

For celleplasterne stiger den relative luftfugtighed fra 67-73 %, så den laveste relative luftfugtighed er meget højere end for mineraluld og Aerogel. Til gengæld er der ikke det store udsving, da den højeste relative luftfugtighed er på ca. 73 %.

For celluloseprodukterne ligger den laveste relative luftfugtighed på 54 %, som er over mineralulds, men under celleplasts. Den højeste relative luftfugtighed på 67 % er både lavere end for mineraluld og for celleplast, men på niveau med Aerogel.

4.7 LET YDERVÆG MED TRÆSKELET I HEAT2

WUFI fremkommer med følgende U-værdier afhængigt af varmeledningsevnen af isoleringsmaterialet i den lette ydervæg.

Tabel 22: U-værdier for let ydervæg ifølge WUFI

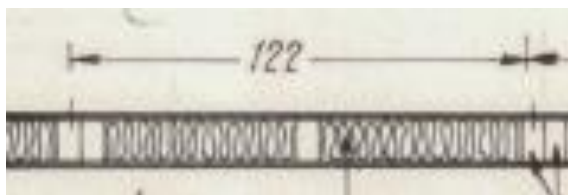
	Produkt	λ -værdi [W/m K]	U-værdi [W/m ² K]
Stenuld	Rockwool Klemmrock 035	0,035	0,11
Glasuld	Isover Ultimate	0,035	0,11
Aerogel	Aspen – Spaceloft Grey	0,014	0,137
EPS	No name	0,04	0,119
Fenolskum	No name	0,04	0,12
Papir	Isocell	0,037	0,113
Træfiber	AiF Flexible Wood-Fiber Insulation WF	0,035	0,116

WUFI's bud på U-værdien holder heller ikke ved den lette ydervæg med træskelet, idet skelettet – både i den oprindelige del og den nye del der bygges udenpå udgør en kuldebro. Kuldebroen skal selvfølgelig indregnes i U-værdien.

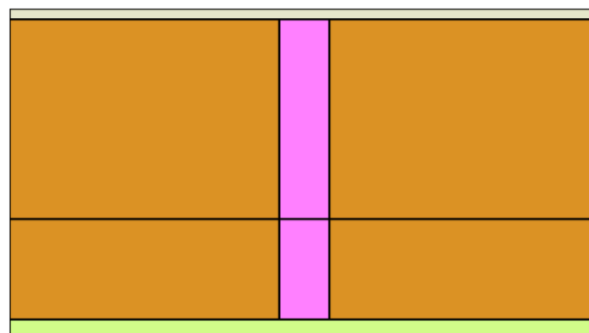
Som regel er de lette ydervægge i parcelhusene fra 1960-70'erne bygget med præfabrikerede træskeletvægge, hvor der er ca. 1,20 mm mellem de lodrette stolper svarende til bredden af vinduet. Der er dog også vandrette stykker træ i bunden og i toppen – og som regel lodrette stolper under vinduerne også – midt imellem. Det giver igen en geometrisk model i HEAT2 på i alt ca. 600 mm.



Figur 92: Træskeletvæg ved vindue i gavl af parcelhus i halvanden plan fra 1972 (Fløng)



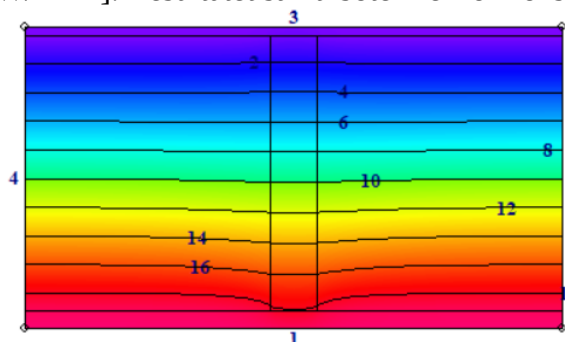
Figur 93: Eksempel på placering af lodret træskelet i parcelhus i halvanden plan fra 1972 (Fløng)



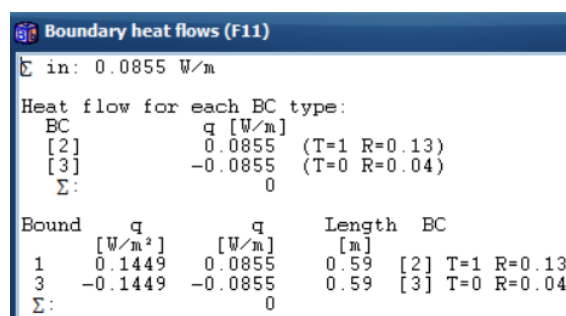
Figur 94: Opbygning af let ydervæg i HEAT2

4.7.1 U-værdi iht. Heat2

I den lette ydervæg er der en kuldebro i form af træskelettet. U-værdien inklusive kuldebro beregnes i HEAT2 for standard isoleringsmateriale med en varmeledningsevne på $\lambda = 0,037$ [W/m² K]. Resultatet samt isotermer for konstruktionen fremgår af Figur 95 og Figur 96.

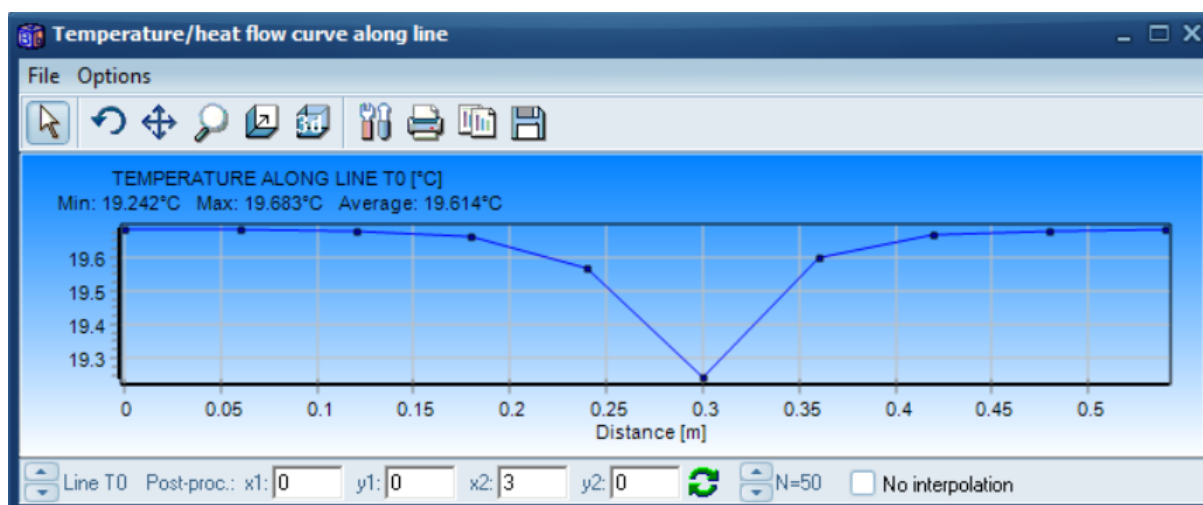


Figur 95: Isothermer for let ydervæg ud for lodret træskelet pr. 60 cm



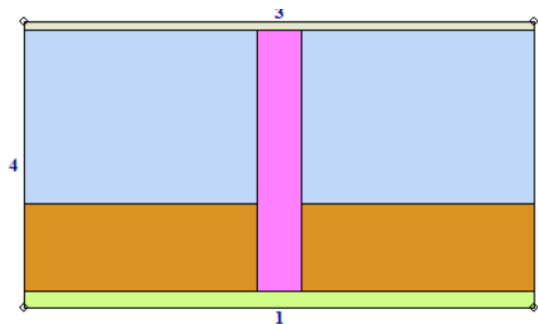
Figur 96: U-værdi = 0,1449 [W/m² K] for let ydervæg med lodret træskelet pr. 60 cm

Igen undersøges temperaturvariationen på indersiden af væggen med henblik på at undgå kondens, som kan opstå ved for lave temperaturer.



Figur 97: Temperatur på inderside af væg ud for lodret træskelet.

U-værdien regnes også med en anden type isoleringsmateriale med varmeledningsevne på $\lambda = 0,040 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$. Resultatet fremgår af Figur 98 og Figur 99.

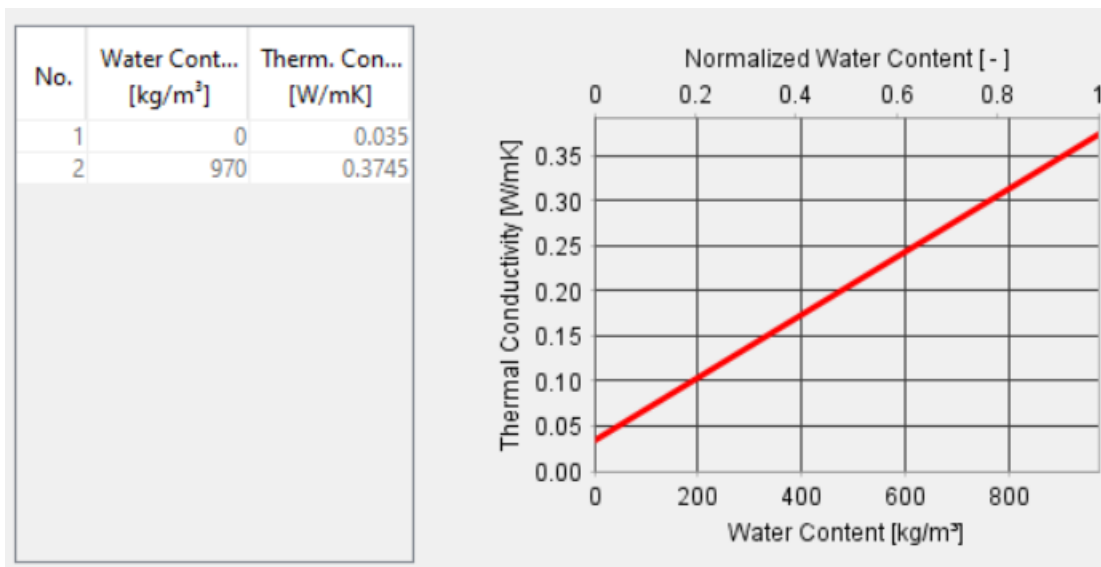


Figur 98: Let ydervæg med isolering af EPS

Boundary heat flows (F11)					
[3]	-0.0886	(T=0 R=0.04)			
Σ:	2E-006				
Bound	q [W/m²]	q [W/m]	Length [m]	BC	
1	0.1502	0.0886	0.59	[2]	T=1 R=0.13
3	-0.1502	-0.0886	0.59	[3]	T=0 R=0.04
Σ:		2E-006			

Figur 99: U-værdi = 0,1502 [W/m² K] for let ydervæg med lodret træskelet pr. 60 cm isoleret med EPS

Som det fremgår af Figur 100, forøges varmeledningen for træfiberisolering nærmest ikke ved et vandindhold på 9 [kg/m³], som det højeste vandindhold iht. Tabel 18.



Figur 100: Varmeledningsevne som funktion af vandindholdet i træfiber af fabrikat AiF Wood-Fiber iht. WUFI

4.8 KÆLDERVÆG I WUFI

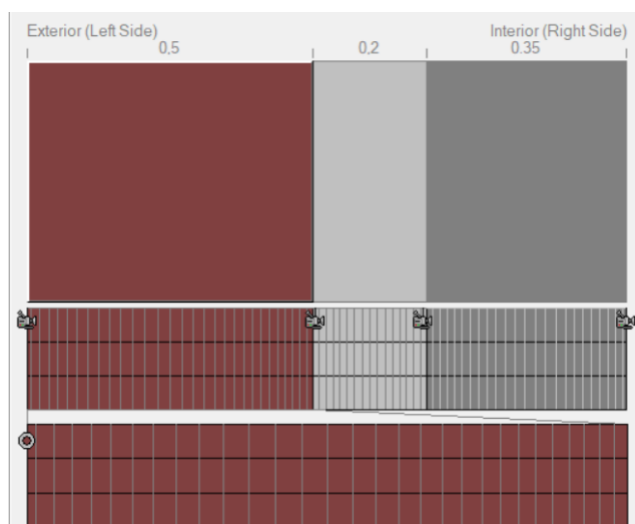
Den tredje konstruktion, der simuleres, er en 35 cm tyk kældervæg i beton, som var almindelig da ydervæggene var i halvanden stens bredde, hvad enten de var massive, med faste bindere eller fulde hulmure, og igen efter 1979 hvor hulmurene blev tykkere pga. de øgede krav i bygningsreglementet. Kældervæggen efterisoleres med det, der svarer til 200 mm isolering⁸⁸ med en varmeledningsevne på 37-38 [mW/m K].

Også her er kravet til U-værdien lig 0,18 [W/m² K] jf. § 279 i bygningsreglementet.

Da kældervæggen forventes at have været direkte i forbindelse med jorden før efterisoleringen, antages væggen at være godt våd. 100 % relativ luftfugtighed svarer til 150 kg/m³ vand i betonen, så denne værdi er udgangspunktet. Normalt er WUFI's udgangspunkt 80 % relativ luftfugtighed.

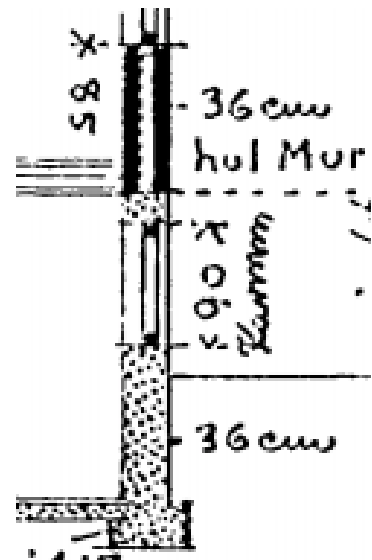
Kældervæg i WUFI – fra venstre mod højre:

- Jord 0,5 m (Soil 'Christian' DIN)
- Udvendig efterisolering med forskellige materialer
- Beton 0,35 (Concrete, w/c = 0,5)



Figur 102: Opbygning af udvendig efterisolering af kældervæg i WUFI,

Til simulering af kældervæg i WUFI bruges en sinuskurve, der beskriver temperaturen i jorden på ydersiden af kældervæggen. Jordtemperaturen er jo forskudt i forhold til lufttemperaturen. Der er valgt en dybde på 1,25 m⁸⁹ vel vidende, at noget af kældervæggen ligger over denne dybde, og noget ligger under.

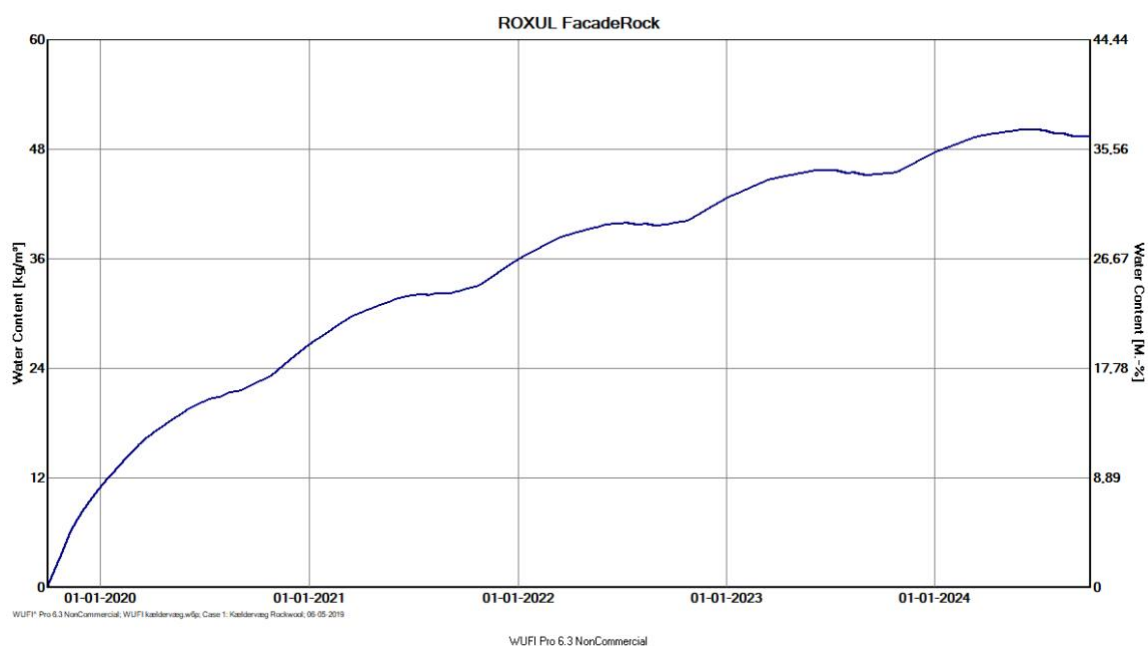


Figur 101: Lodret snit i kældervæg i murer mestervilla fra 1938 (Køge)

⁸⁸ (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2018) Energiløsning Udvendig efterisolering af kældervæg

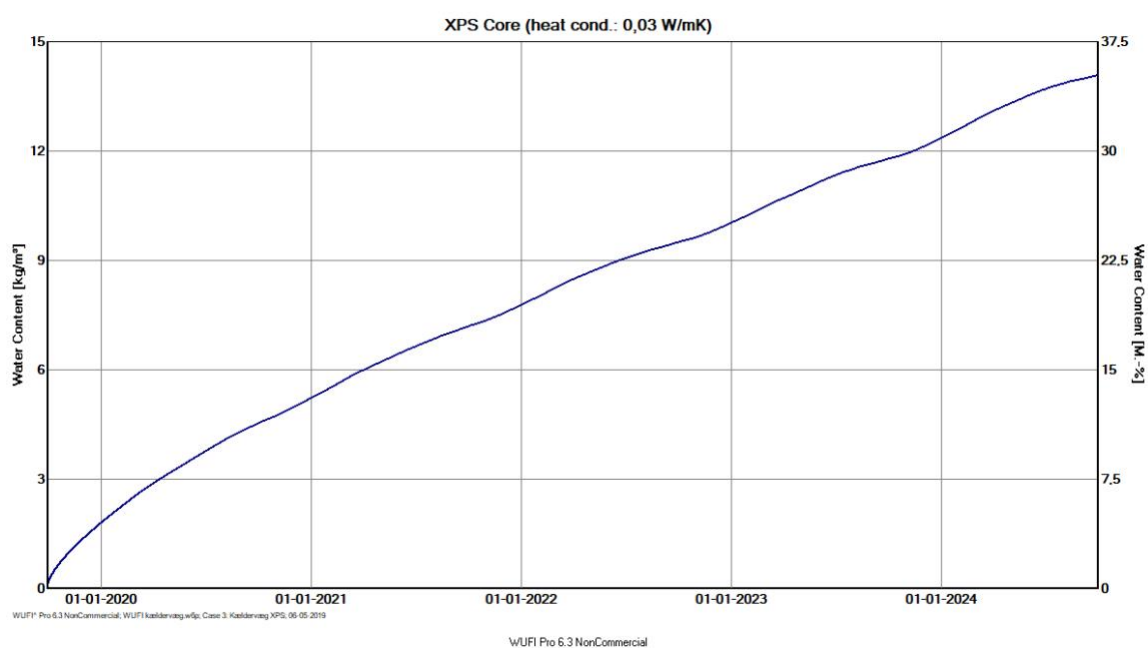
⁸⁹ (Brandt, 2009) Figur 75. Jordtemperaturen gennem året i forskellig dybde (s. 144)

Produkt af uorganisk materiale



Figur 104: Kældervæg - Vandindhold i isolering af stenuld af fabrikat Rockwool

Produkt af celleplast



Figur 105: Kældervæg - Vandindhold i isolering af XPS af fabrikat No name

Tabel 23: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masse pr. volumen iht. bilag 7

	Udvendig efterisolering af kældervæg - [kg/m ³]				
Materiale	Efter 1 år	Efter 2 år	Efter 3 år	Efter 4 år	Efter 5 år
Stenuld	22	32	40	46	50
Perlite	20	29	36	40	44
EPS	10	15	20	25	29
XPS	5	7	10	12	14
Fenolskum	10	15	20	26	29
K5 Kooltherm	27	38	48	58	65

Det tørreste isoleringsmateriale er den ekstruderede polystyren, hvis vandindhold udvikler sig fra 5 [kg/m³] efter et år til 14 [kg/m³] efter fem år. Derefter kommer de andre to celleplaster ekspanderet polystyren og fenolskum, hvis vandindhold er næsten ens og udvikler sig fra 10 [kg/m³] efter et år til 29 [kg/m³] efter fem år. Perliten og stenulden har et højere vandindhold med henholdsvis 20 [kg/m³] og 22 [kg/m³] efter et år samt 44 [kg/m³] og 50 [kg/m³] efter fem år. Det vådeste isoleringsmateriale er K5 Kooltherm, der efter et år har et vandindhold på 27 [kg/m³] og efter fem år et vandindhold på 65 [kg/m³].

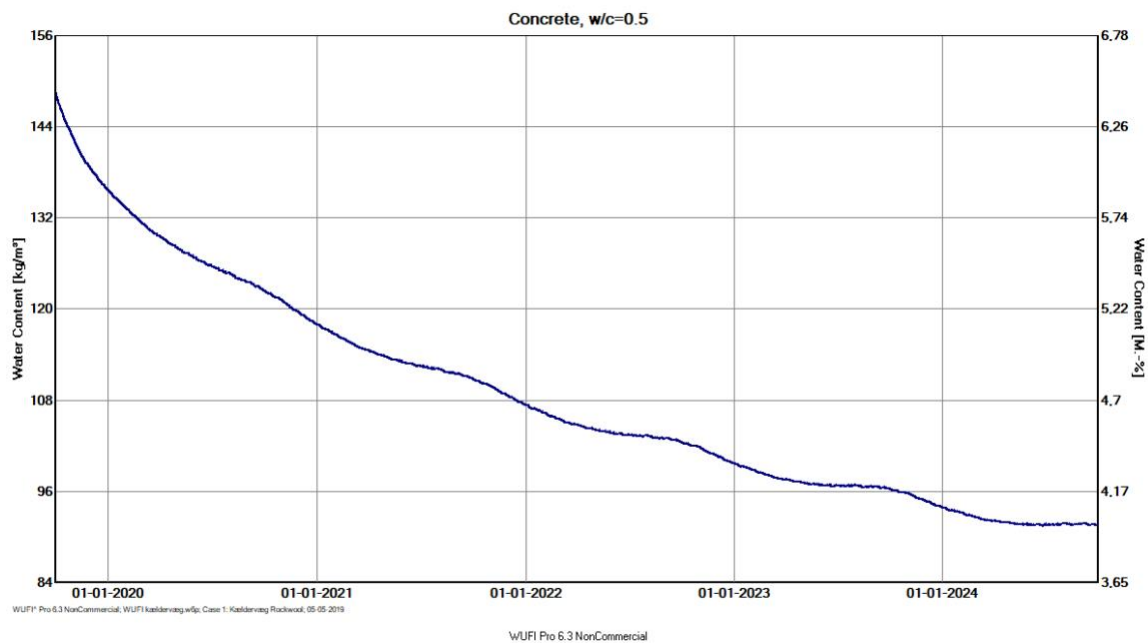
Tabel 24: Vandindhold i isoleringsmaterialer i masseprocent iht. bilag 7.

	Udvendig efterisolering af kældervæg - [M.-%]				
Materiale	Efter 1 år	Efter 2 år	Efter 3 år	Efter 4 år	Efter 5 år
Stenuld	16	24	30	33	37
Perlite	14	20	25	27	30
EPS	70	110	138	170	195
XPS	12	19	24	29	35
Fenolskum	23	37	47	60	66
K5 Kooltherm	77	108	139	164	189

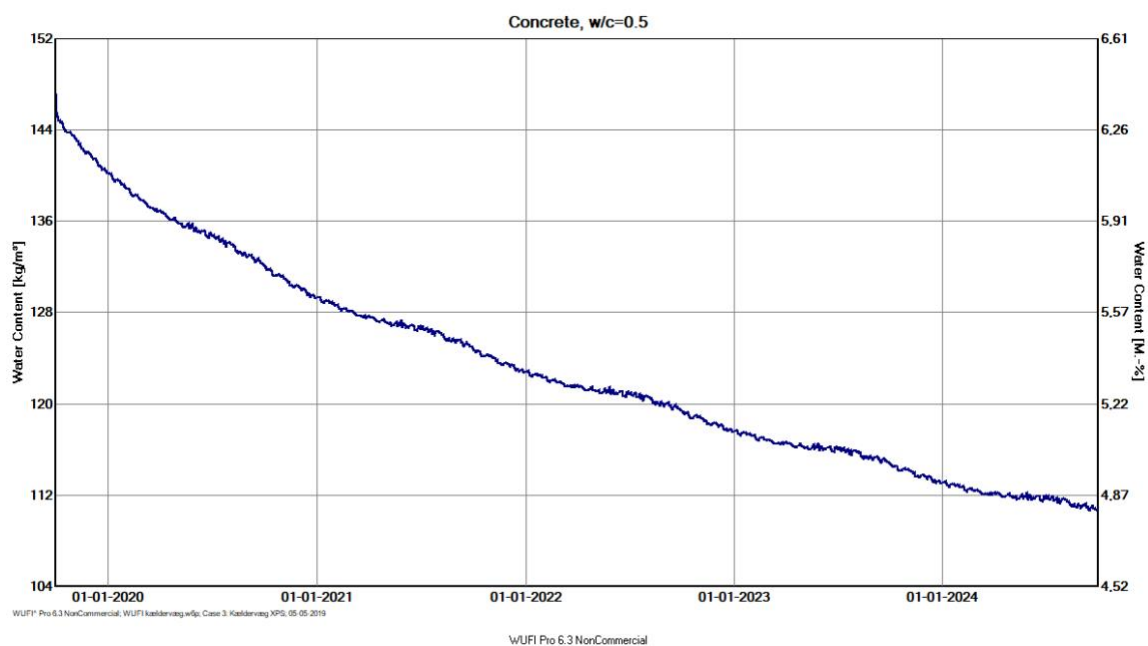
Når der kigges på vandindholdet i masseprocent, ligger den ekstruderede polystyren lavest med perliten lige efter. De har en masseprocent på henholdsvis 12 [M.-%] og 14 [M.-%] efter et år. Efter tre år er masseprocenten næsten den samme nemlig 24 og 35 [M.-%]. Efter fem år har perliten en mindre masseprocent end XPS'en nemlig 30 [M.-%] mod 35 [M.-%]. Stenuld ligger lige efter med 16 [M.-%] efter et år og ca. 37 [M.-%] efter fem år. Fenolskum ligger en del højere med 23 [M.-%] efter et år og 66 [M.-%] efter 5 år. I den absolutte top ligger den ekspanderede polystyren og K5 Kooltherm med 70-77 [M.-%] efter et år og 189-195 [M.-%] efter fem år.

Kældervæg

Da vandindholdet i isoleringen er stigende, ses der også på vandindholdet i kældervæggen. Igen er der vist to kurver, dvs. vandindholdet i væggen, når den er efterisoleret med henholdsvis stenuld og ekstruderet polystyren. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 8. I Tabel 25 og Tabel 26 er værdierne aflæst en gang om året.



Figur 106: Vandindhold i kældervæg ved efterisolering med stenuld af fabrikat Rockwool



Figur 107: Vandindhold i kældervæg ved efterisolering med XPS af fabrikat No name

Tabel 25: Vandindhold i kældervæg af beton i masse pr. volumen iht. bilag 8

	Vandindhold i beton ved udvendig efterisolering af kældervæg - [kg/m³]				
Materiale	Efter 1 år	Efter 2 år	Efter 3 år	Efter 4 år	Efter 5 år
Stenuld	124	112	102	96	92
Perlite	124	113	106	101	96
EPS	130	121	114	106	103
XPS	131	123	118	114	112
Fenolskum	130	121	114	106	103
K5 Koolth.	130	121	114	106	103

Vandindholdet i kældervæggen er faldende for alle isoleringsmaterialerne. Det største fald er for efterisolering med stenuld, der påvirker betonvæggen, så vandindholdet falder fra 124 [kg/m³] efter et år til 92 [kg/m³] efter fem år. Det er et helt pænt fald, ca. 39 % af vandet i betonen er væk. Derefter kommer perlite, hvor betonvæggen har ca. det samme vandindhold efter et år. Vandindholdet aftager en anelse og ender på 96 [kg/m³] efter fem år. EPS og fenolskum påvirker tilsyneladende betonvæggen ens. Vandindholdet er efter et år ca. 130 [kg/m³] og efter fem år ca. 103 [kg/m³]. Til slut kommer XPS'en, hvor vandindholdet i betonvæggen er en anelse højere efter et år – nemlig 131 [kg/m³]. Efter fem år er vandindholdet i betonvæggen ca. 112 [kg/m³].

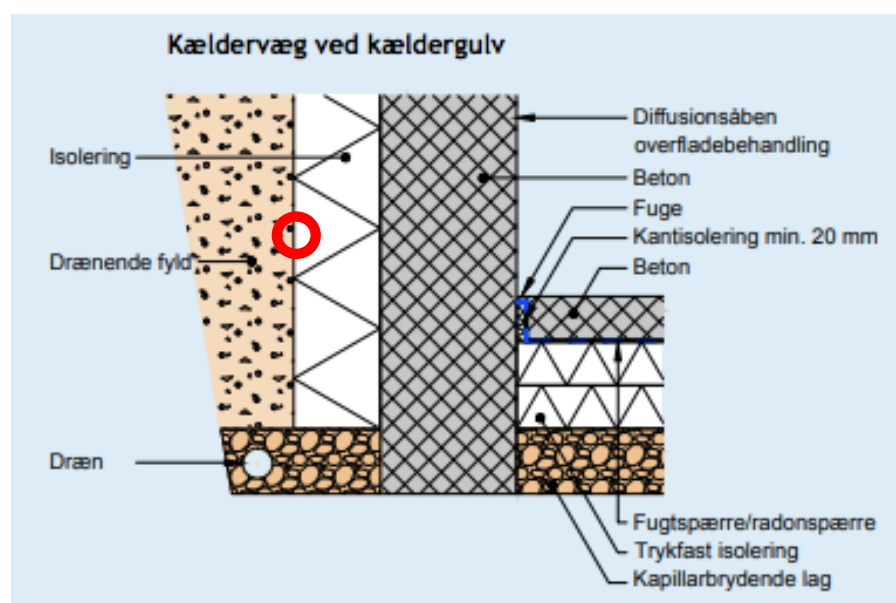
Tabel 26: Vandindhold i kældervæg af beton i masseprocent iht. bilag 8

Materiale	Vandindhold i beton ved udvendig efterisolering af kældervæg - [M.-%]				
	Efter 1 år	Efter 2 år	Efter 3 år	Efter 4 år	Efter 5 år
Stenuld	5,4	4,8	4,5	4,2	4
Perlite	5,5	4,9	4,6	4,4	4,1
EPS	5,7	5,3	4,9	4,6	4,5
XPS	5,7	5,4	5,1	5	4,8
Fenolskum	5,7	5,3	4,9	4,6	4,5
K5 Koolth.	5,7	5,3	4,9	4,6	4,5

Vandindholdet i betonvæggen i masseprocent falder fra 6,3 [M.-%] til 4 [M.-%] i tilfældet med stenuld. Det er en anelse højere ca. 4,1 [M.-%] med perlite, ca. 4,5 [M.-%] med EPS og begge typer fenolskum og højest med XPS på 4,8 [M.-%].

4.8.2 Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isoleringslaget iht. WUFI

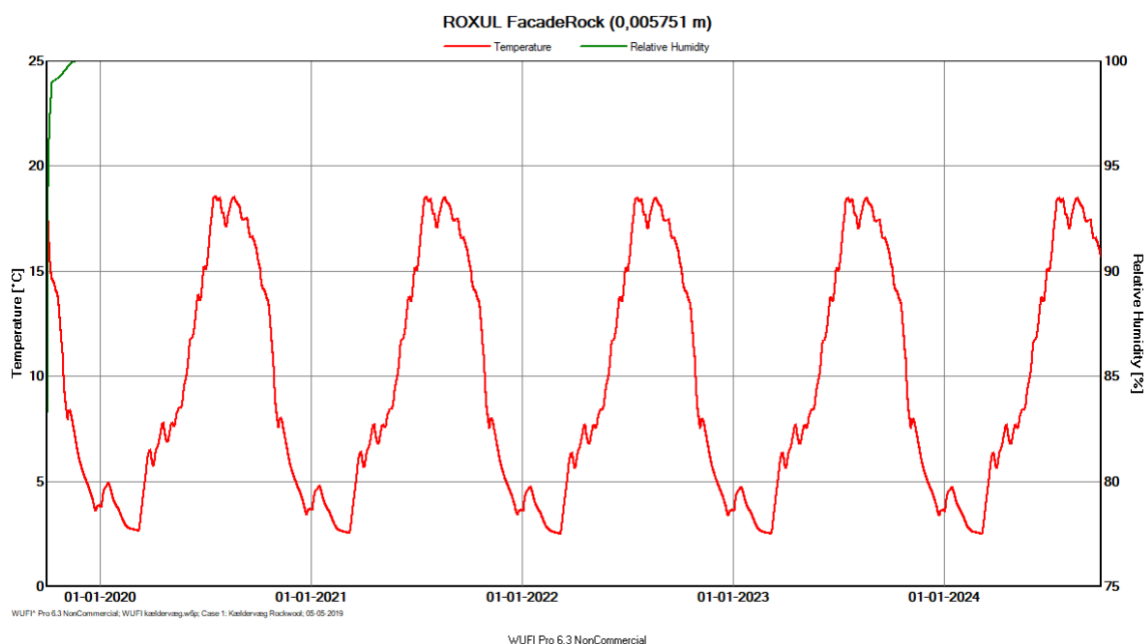
Den røde cirkel på Figur 108 viser, hvor den relative luftfugtighed og temperatur er simuleret.



Figur 108: Udvendig efterisolering af kældervæg

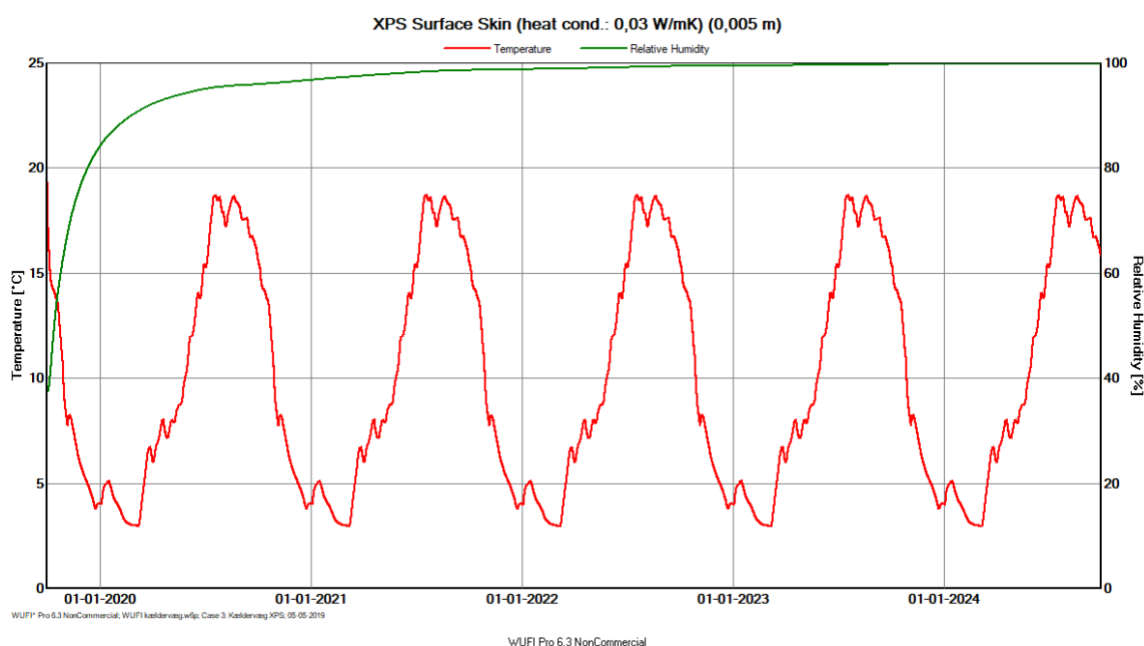
I WUFI vises resultaterne i form af kurver med temperaturen og den relative luftfugtighed yderst i isoleringsmaterialet over året. I venstre side kan temperaturen aflæses i grader Celcius. I højre side kan den relative luftfugtighed aflæses i procent. Den grønne kurve er relativ luftfugtighed og den røde er temperaturen. Kurverne er vist for stenuld og ekstruderet polystyren. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 9.

Produkt af uorganisk materiale



Figur 109: Tabel 13: Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i stenuld af fabrikat Rockwool

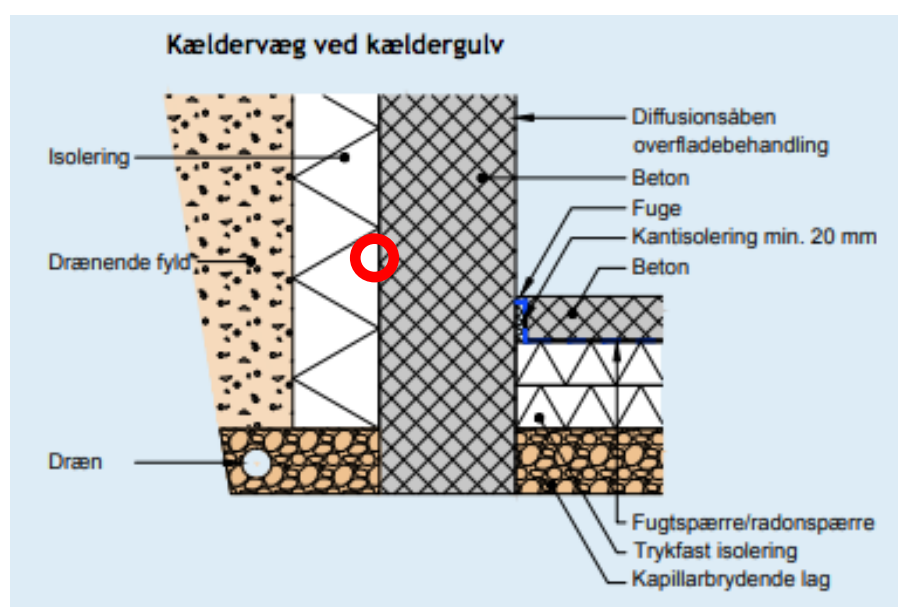
Produkt af celleplast



Figur 110: Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i XPS af fabrikat No name

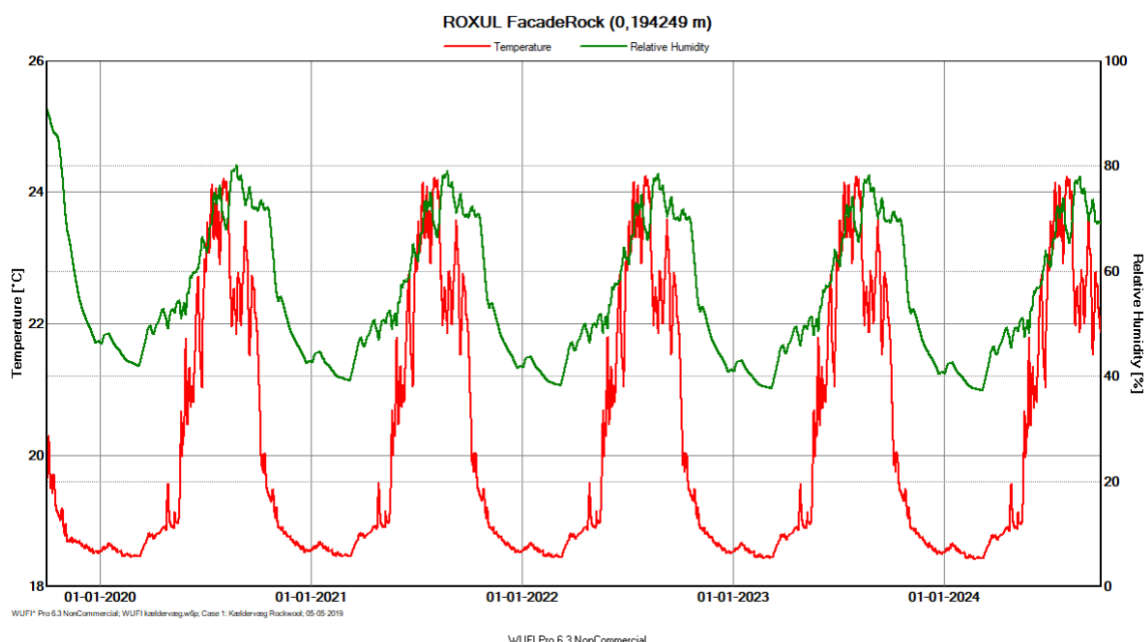
Den relative luftfugtighed yderst i isoleringsmaterialet, dvs. lige op af den tilbagefyldte jord omkring kældervæggen, bliver hurtigt 100 %. Det går hurtigst for perlite, stenuld og K5 Kooltherm, der allerede efter et par måneders simulering er oppe på det tal. For EPS og fenolskum er den relative luftfugtighed yderst i isoleringen oppe på 100 % efter et års tid. For XPS tager det 3 år at nå dertil.

4.8.3 Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isoleringslaget iht. WUFI

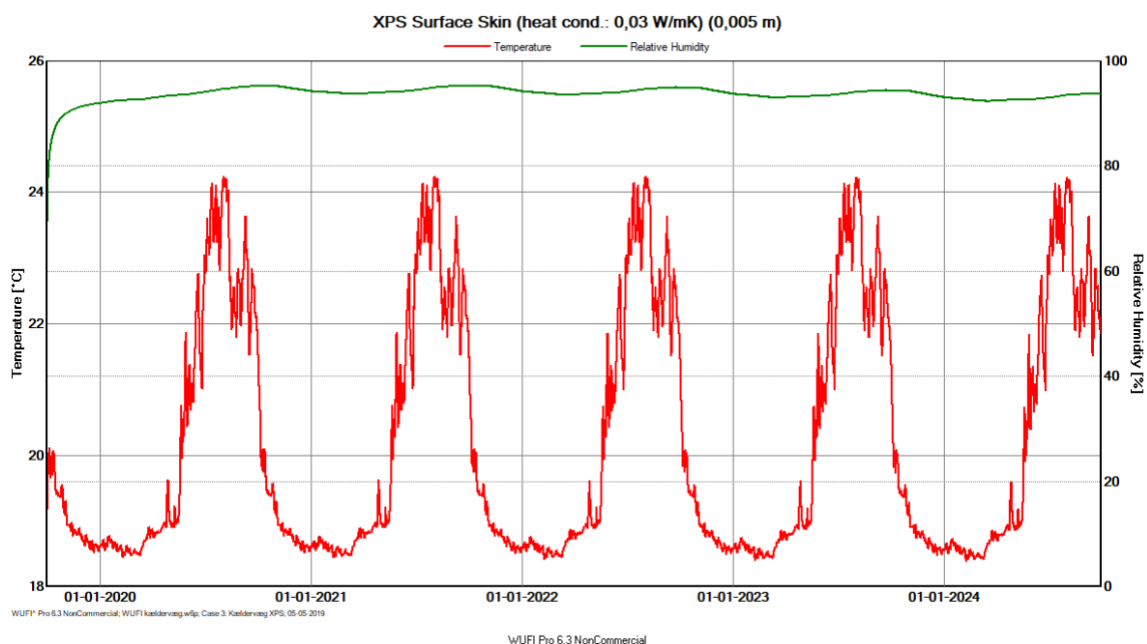


Figur 111: Udvendig efterisolering af kældervæg

Igen er kurverne vist for stenuld og ekstruderet polystyren. Denne gang inderst i isoleringen. Kurverne for de resterende isoleringsmaterialer fremgår af bilag 10.



Figur 112: Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i stenuld af fabrikat Rockwool



Figur 113: Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i XPS af fabrikat No name

Tabel 27: Relativ luftfugtighed inderst i isoleringsmaterialer i procent iht. bilag 10

	Udvendig efterisolering af kældervæg - RF [%]	
Materiale	Vinter	Sommer
Stenuld	39	78
Perlite	60	88

Den relative luftfugtighed inderst i isoleringsmaterialet, dvs. lige op af kældervæggen, varierer i svingninger med det laveste punkt omkring årsskiftet, dvs. om vinteren, og det højeste punkt om sommeren, for stenuld og perlite. For stenuld er den relative luftfugtighed svagt faldende over årene. Den starter på 42 % den første vinter og ender på 38 % den femte vinter. Om sommeren falder den fra 80 til 78. For perliten er det lige omvendt. Her sker en svag stigning i den relative luftfugtighed. Den første vinter er den ca. 58 % og den femte vinter ca. 62. %. Det samme gælder om sommeren, hvor den varierer fra 86-88 %.

Tabel 28: Relativ luftfugtighed inderst i isoleringsmaterialer i procent iht. bilag 10

	Udvendig efterisolering af kældervæg - RF [%]				
	Efter 1 år	Efter 2 år	Efter 3 år	Efter 4 år	Efter 5 år
EPS	96	94	92	90	88
XPS	96	96	96	96	96
Fenolskum	96	94	92	90	88
K5 Kooltherm	96	94	92	90	86

For de fire isoleringsmaterialer i celleplast bliver den relative luftfugtighed hurtigt meget høj og den forbliver deroppe. For EPS og fenolskum ligger den med det samme på ca. 96 % og så falder den svagt over de fem år til ca. 88 %. K5 Kooltherm har næsten den samme kurve, men den falder en smule mere til sidst. For XPS'en ligger den relative luftfugtighed og svinger omkring 95-96 % i alle fem år.

4.9 VARMETAB GENNEM KÆLDERVÆG

WUFI fremkommer med følgende U-værdier afhængigt af varmeledningsevnen af isoleringsmaterialet på ydersiden af kældervæggen.

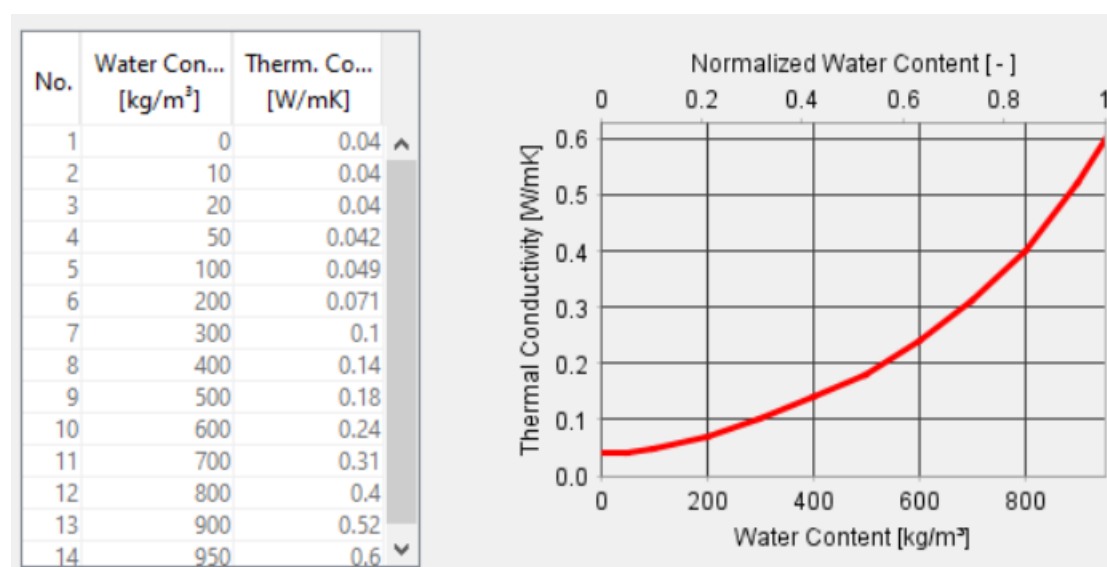
Tabel 29: U-værdier for kældervæg ifølge WUFI

		λ -værdi	Tykkelse	U-værdi
	Produkt	[W/m K]	[mm]	[W/m ² K]
Stenuld	Roxul Facaderock	0,038	200	0,17
Perlite	Porton-WDF Perlitefüllung	0,038	200	0,17
EPS	No name	0,04	200	0,178
XPS	No name	0,03	150	0,179
Fenolskum	No name	0,04	200	0,179
Fenolskum	K5 Kooltherm	0,021	120	1,187

U-værdierne er baseret på en tør kældervæg og tørre isoleringsmaterialer. De lever alle op til bygningsreglementets krav på 0,18 [W/m² K]. Spørgsmålet er så om evt. fugt kan forringe varmeledningen så meget, at det ikke er tilfældet længere?

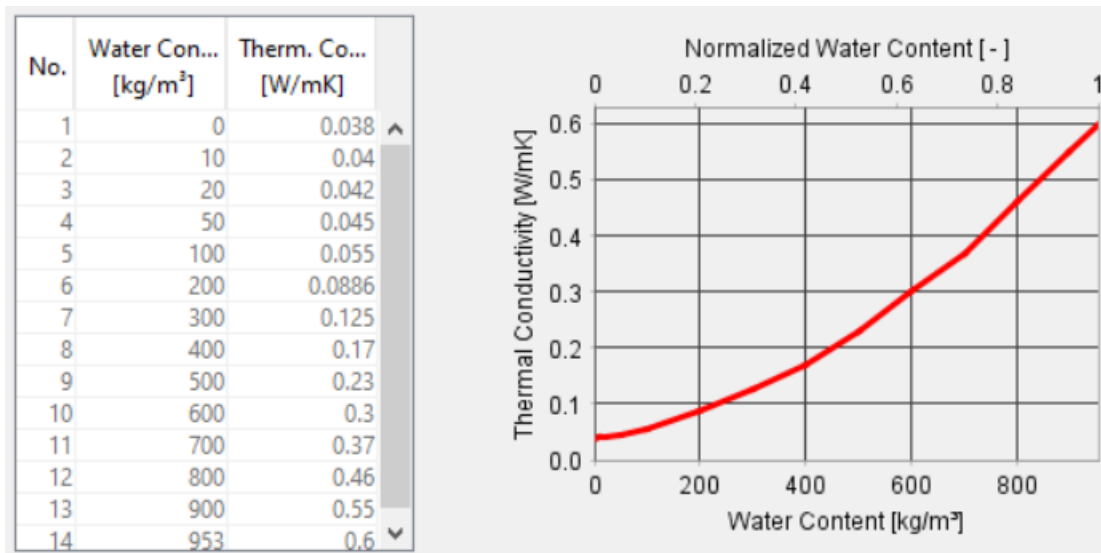
Ved en gennemgang af isoleringsmaterialer brugt til efterisolering af kældervæggen udefra i WUFI kan det konstateres, at det fundne vandindhold i isoleringen influerer på varmeledningsevnen for nogle af isoleringsmaterialerne.

EPS har efter 5 år et vandindhold på 29 [kg/m³]. Iht. Figur 114 er det ikke nok til at varmeledningsevnen ændres.



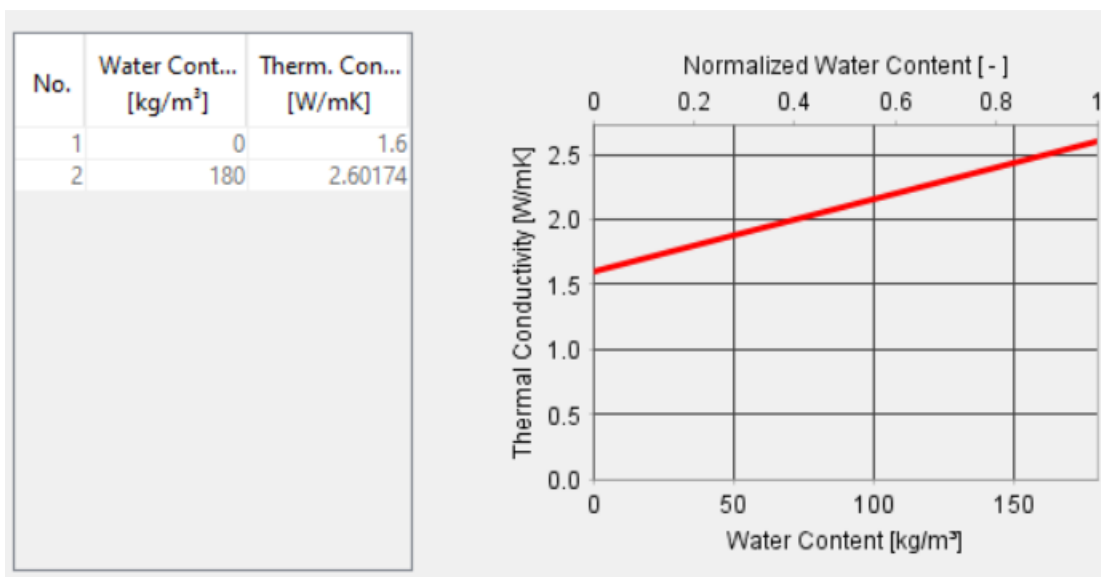
Figur 114: Varmeledningsevne som funktion af vandindholdet i EPS No name iht. WUFI

Stenulden har efter 5 år et vandindhold på 50 [kg/m³]. Iht. Figur 115 betyder det at varmeledningsevnen forøges fra 0,038-0,045 [W/m K], hvilket må siges at være en væsentlig forøgelse.



Figur 115: Varmeledningsevne som funktion af vandindholdet i stenuld af fabrikat Rockwool iht. WUFI

Kældervæggen har efter 5 år et vandindhold på 92 [kg/m³] med stenuld. Det svarer ifølge Figur 116 til en varmeledningsevne på 2,1 [W/m K].



Figur 116: Varmeledningsevne som funktion af vandindhold i betonvæg iht. WUFI

Da der ingen kuldebroer er i kældervæggen, er det relativt enkelt at regne U-værdien. Her er altså ikke behov for at tage HEAT2 til hjælp.

4.9.1 U-værdi for kældervæg

WUFI's bud holder heller ikke her, da der igen er regnet med tørre materialer. WUFI's beregning fremgår her:

Materiale	Tykkelse	Varmeledningsevne	Isolans
	d	λ -værdi	$R = \lambda/d$
	[m]	[W/m K]	[m ² K/W]
R _{si}			0,13
Isolering	0,200	0,038	5,263
Beton	0,350	1,6	0,219
R _{se}			0,04
		ΣR	5,652

hvor R_{si} er den indvendige, og R_{se} er den udvendige overgangsisolans.

$$U = \frac{1}{\Sigma R}$$

$$U = \frac{1}{5,652}$$

$$U = 0,177 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

Hvis U-værdien regnes for den våde konstruktion, ser resultatet en smule anderledes ud.

Den korrekte U-værdi for den våde betonvæg, lige når den er blevet isoleret. Udgangspunktet var, at betonvæggen havde været i direkte kontakt med den våde jord, og derfor var godt våd, dvs. havde et vandindhold på 150 [kg/m³]. Det giver en varmeledningsevne på 2,4 [W/m K] ifølge Figur 116

Materiale	Tykkelse	Varmeledningsevne	Isolans
	d	λ -værdi	$R = \lambda/d$
	[m]	[W/m K]	[m ² K/W]
R _{si}			0,13
Isolering	0,200	0,038	5,263
Beton	0,350	2,4	0,146
R _{se}			0,04
		ΣR	5,579

$$U = \frac{1}{5,579}$$

$$U = 0,179 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

Kældervæggen overholder faktisk stadig bygningsreglementet.

5 DISKUSSION

5.1 HULMUR MED FASTE BINDERE

5.1.1 Fugt i efterisoleret hulmur

Vandindholdet i et isoleringsmateriale i en hulmur afhænger af, hvordan isoleringen transporterer fugt i form af vanddamp og vand. Hulmuren påvirkes af slagregn udefra og diffusion af fugt fra luften indefra.

Da alle andre forhold er ens i hulmuren, der simuleres i WUFI, må isoleringsmaterialernes egenskaber være det, der gør forskellen. Egenskaberne for de anvendte materialer er opsummeret i Tabel 30.

Tabel 30: Hulmur med faste bindere - egenskaber for isoleringsmaterialer brugt til simulering

	Densitet	Porøsitet	80 % RF	93 % RF	100 % RF	Tæthed
Materiale	ρ [kg/m ³]	%	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	μ
Speedrock Lamelle	88	96,7	1,26	2,36	345	1,3
Isover Int. Einblaswolfe	30	99	0,2	0,5	486	1,35
Poroton-WDF Perlitefüllung	146,7	94,46	1,71	2,88*	18	3,38
Isofloc Pearl	25	95	1,79	5,43	45	5
Isocell Zellulose- dämmstoff	50	95	7,9	10,2	614	1,8
Steicozell	40	97,3	5,9	16,7	411	1,54

*Ved 90 % RF

I hulmuren observeredes iht. bilag 1 og Tabel 14 to meget forskellige kurveforløb. Kurverne for stenuld, perlite og EPS kugler viste det laveste vandindholdet i isoleringen omkring årskiftet, og vandindholdet blev højest midt på året.

For glasuld, papir og træfiber, så kurverne meget anderledes ud. Højt omkring årsskiftet og faldende hen over året med to høje toppe – en stor om foråret og en lille om efteråret.

Hvis kurven for vandindhold i træfiber (Figur 41) sammenlignes med kurven for vandindholdet i formuren (Figur 42), ses det tydeligt, at toppene falder sammen med, at vandindholdet i formuren er højt. Det samme gælder for papir og stenuld. Noget kunne altså tyde på, at de tre isoleringsmaterialer suger fugt fra formuren i et eller andet omfang. Dvs. at vand i formuren transporteres videre ind i hulmurskonstruktionen. Transporten af vand er størst for træfiber. Den er mindre for papir og glasuld.

Den relative luftfugtighed yderst i isoleringen lige bag formuren er ifølge bilag 2 høj for alle isoleringsmaterialer. Det tyder på, at det er til dette område, at slagregnen i formuren når ind. Måske understøttes det af, at den varme fugtige luft, der diffunderer gennem bagmuren indefra, rammer formuren, som er tættere og koldere end isoleringen. Ifølge bilag 3 og Tabel 16 er det kun for træfiber, at den relative luftfugtighed også er høj inderst i isoleringslaget, hvilket tyder på, at hele træfiberlaget er fugtigt.

Som beskrevet i kapitel 3.5.4 begynder den kapillære opugning et sted mellem 80 og 90 % relativ luftfugtighed, så data fra punkterne med 80 %, 90-93 % og 100 % RF på sorptionskurverne fremgår af Tabel 30. Hvis man kigger på tallene for træfiber, ses det at opugningen er en anelse mindre end for papir ved 80 % RF, men ved 93 % RF er træfibers størst. Ved sammenligning af de komplette sorptionsisotemer for træfiber og papir, ses det, at træfiberen (Figur 31) suger meget vand meget tidligere end papir (Figur 30).

Den store opugning i træfiberen skyldes formentlig, at den har en porøsitet på 97,3 %, men nok især at træ har mange både store og små porer, der kan optage vand⁹¹. Med andre ord har træfiber en stor specifik overflade, som vandet kan binde sig til⁹².



Figur 117: Foto af træfiber af fabrikat Steicozell fra WUFI

Sorptionsisotermen for glasuld viser ifølge Figur 23, at den kapillære opstigning først begynder ved 99 % relativ luftfugtighed.

For glasuld og papir udgør vandindholdet i isoleringen kun en mindre del af vandindholdet i formuren, mens der for træfiberens vedkommende er ca. to tredjedele af vandindholdet i formuren i den højeste top.

Ud fra fotoet af træfiberisoleringsgranulatet i WUFI, skønnes det, at træfibrene er fremstillet ved tør proces, idet materialet er brunt og groft i det⁹³. Noget tyder på, at den tørre proces giver et ringere materiale fugtmæssigt end den våde proces ved anvendelse i en slagregnsbelastet hulmur. Træ til fremstilling af avisepapir, dvs. papirisolering, har også været igennem en våd proces⁹⁴, og det reagerer væsentligt bedre.

Ingen af leverandørerne eller producenterne tager umiddelbart afstand fra at bruge træfiber som hulmursisolering. En enkelt skriver, at det ikke bør bruges i bunden af en hulmur. Det er sandsynligvis, da der ikke altid er sikkerhed for, at der er en fugtspærre til at forhindre opstigende grundfugt.

I By og Byg Anvisning 207 omhandlende bl.a. træfiber og papir anbefales hulmursisolering ikke med træfiber, og papirisolering anbefales kun til vægge uden slagregnspåvirkning⁹⁵. Der er tilsyneladende ingen forbehold for valg af isoleringsmaterialer i SBI-anvisning 240.

I fugtanvisningen⁹⁶, dvs. SBI-anvisning 204, anbefales det at vælge vandafvisende isoleringsmateriale, f.eks. mineraluld.

⁹¹ (Brandt, 2009) s. 29

⁹² (Brandt, 2009) s. 27

⁹³ (TRÆ.DK Danmarks træportal, 2019) Isolering med træ - træfiberisolering

⁹⁴ (TRÆ.DK Danmarks træportal, 2019) Fremstilling af papir

⁹⁵ (Pedersen, de Place Hansen, Hansen, & Marsh, 2003) s. 98

⁹⁶ (Brandt, 2009) s. 174

I efterisoleringsanvisningen⁹⁷, dvs. SBI-anvisning 240, er der ikke umiddelbart nogen forbehold.

5.1.2 Varmetab gennem efterisoleret hulmur

Varmetabet gennem den efterisolerede hulmur er regnet for de to yderligheder. Hulmuren med EPS kugler, som ikke kan transportere fugt igennem væggen ved kapillarsugning, da isoleringen er diskontinuert og består af små kugler og hulmuren med træfiber, som transporterer og tilsyneladende lagrer fugt.

Hvis det antages, at der som vist i Figur 38 er faste bindere i hvert andet murstensskifte, og der ser bort fra udmuring i hjørner og omkring vinduer og døre, er den samlede U-værdi for hulmuren efterisoleret med EPS kugler

$$U_{hulmur} = \frac{U_{binder} + U_{udenbinder}}{2}$$

$$U_{hulmur} = \frac{0,5406 + 0,2234}{2} \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

$$U_{hulmur} = 0,382 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

Den samlede U-værdi for hulmuren efterisoleret med træfiber er under de samme forudsætninger

$$U_{hulmur} = \frac{0,7728 + 0,2658}{2} \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

$$U_{hulmur} = 0,519 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

U-værdien er bestemmende for varmetabet gennem væggen, da alle andre parametre er ens. Varmetabet gennem hulmuren – om vinteren, hvor der er mest brug for at holde på varmen – forøges altså væsentlig pga. den våde træfiberisolering og de våde mursten i formur og bagmur. Forøgelse af varmetabet gennem hulmuren er ifølge regnestykket på 35 %.

Hulmuren med faste bindere kan altså med fordel isoleres med EPS-kugler eller et af de andre isoleringsmaterialer, der har en lav kapillarsugningsevne. Det gælder sandsynligvis også alle andre hulmure.

Som det ses af Figur 61 er der ikke den store forskel på overfladetemperaturen på indersiden af hulmuren ud for den faste binder i forhold til temperaturen, hvor der ikke er faste bindere, når hulmuren isoleres med EPS kugler. Overfladetemperaturen er i tilfældet med en relativt tørre mur isoleret med EPS kugler lig 18,3 °C. I tilfældet med den relativt våde væg er overfladetemperaturen 17,7 °C, dvs. et fald i temperaturen på 0,6 °C. Ingen af temperaturerne er så lave, at der opstår risiko for kondens på indersiden af væggen ud for kuldebroen ved den faste binder.

⁹⁷ (Møller, Eva B., 2012) s. 104-106

5.2 LET YDERVÆG

5.2.1 Fugt i efterisoleret let ydervæg

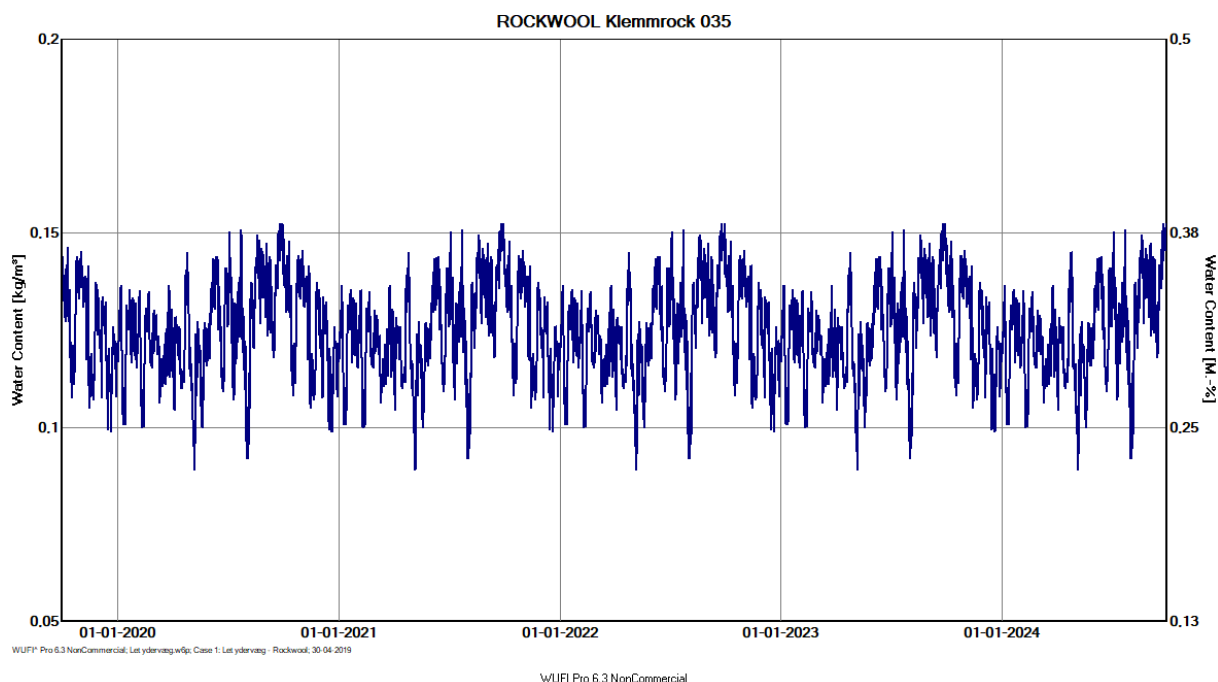
I en let ydervæg bør der ikke være nogen konvektion, da den ældre og som regel utætte dampspærre er skiftet ud med en ny tæt udgave. Der bør altså kun komme fugt i isoleringen hidrørende fra diffusion fra indeklimaet.

Igen må isoleringsmaterialernes egenskaber være det, der giver forskellen i vandindhold og relativ luftfugtighed, da alle andre forhold er ens i den lette ydervæg, der simuleres i WUFI. Egenskaberne for de anvendte materialer er opsummeret i Tabel 31.

Tabel 31: Let ydervæg - egenskaber for isoleringsmaterialer brugt til simulering

	Densitet	Porøsitet	80 % RF	93 % RF	100 % RF	Tæthed
Materiale	ρ [kg/m ³]	%	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	μ
RW Klemmrock 035	40	98,6	0,17	0,2	235	1,3
Isover Ult. Klemmfilz	25,2	95	0,46	0,52	255	1
Aspen Aerogels	146	92	6,6	10,6	213	4,7
EPS No name	15	95	1,79	5,43	45	30
Fenolskum No name	43	95	1,79	5,43	45	30
Isocell Zellulose-dämmstoff	50	95	7,9	10,2	614	1,8
AiF Flexible WF Insul.	50	97	9	17,5	300	2

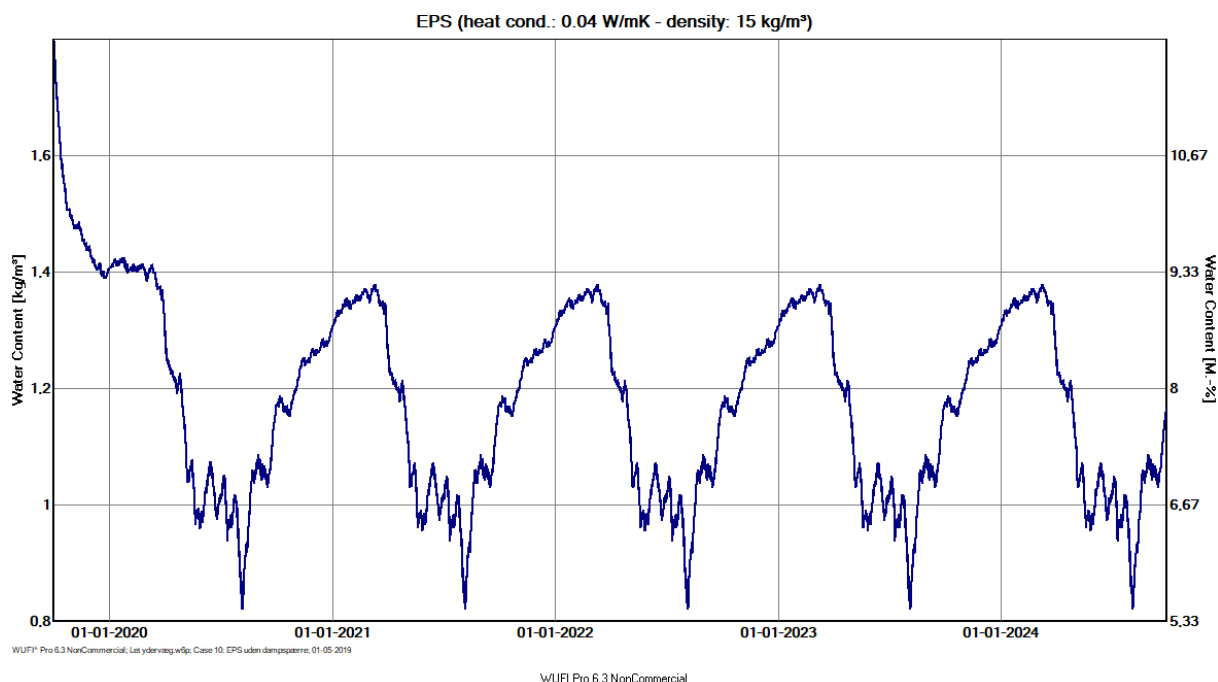
I efterisoleringen af den lette ydervæg observeredes iht. bilag 4 og Tabel 18 også to meget forskellige kurveforløb. For mineraluld og Aerogel svinger vandindholdet hele tiden, mens kurverne for celleplasterne og de cellulosebaserede isoleringsmaterialer svinger med en stor blød kurve hen over året. For at vise forskellen på kurverne er tre eksempler hentet ind fra bilag 4.



Figur 118: Let ydervæg - Vandindhold i stenuld af fabrikat Rockwool med dampspærre og ventilation af hulrum

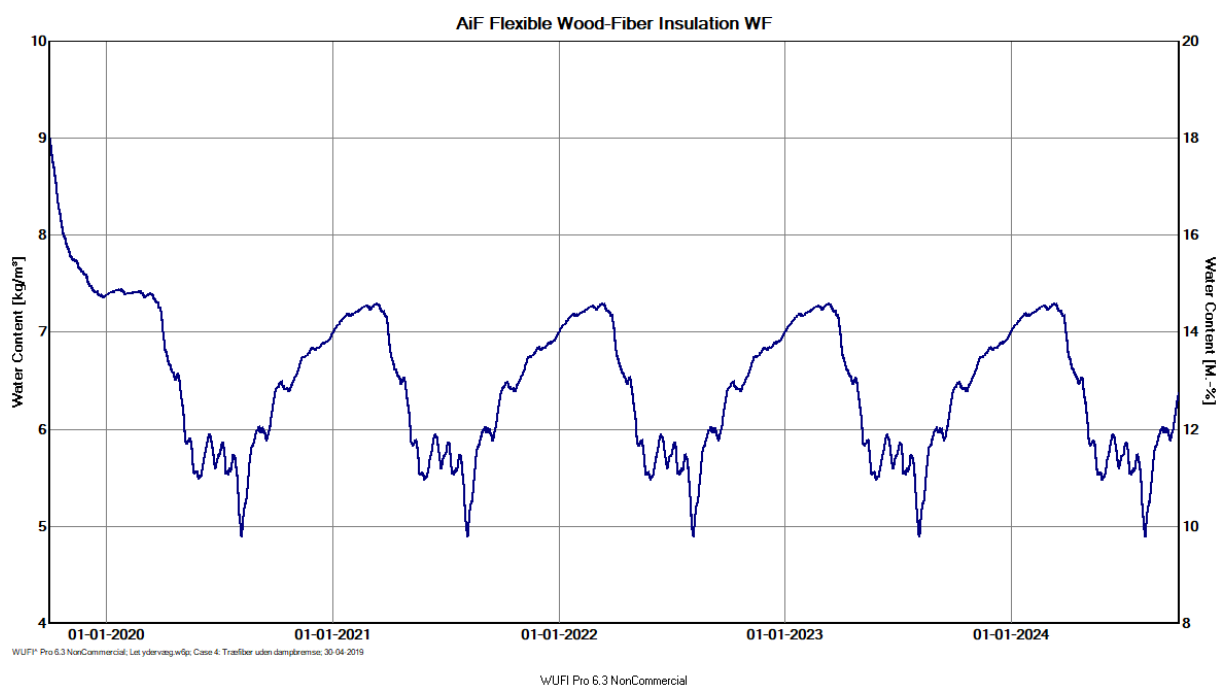
Det første eksempel fremgår af Figur 118. Det er stenuld, hvor vandindholdskurven minder om glasulds (Figur 72) og Aerogels. De kortvarige udsving hænger sandsynligvis sammen med, at mineraluld er et diskontinuert materiale. Det er nemt for den fugtige luft at komme igennem de spundne tråde, i det meget porøse materiale. Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren er i mineraluld lig 1, som er det samme som luft.

I Aerogel sker der nogenlunde det samme, men vandindholdet ligger en del højere. Isoleringen med Aerogel er opbygget på samme måde som mineralulden, men er tættere dvs. har en større densitet og en mindre porøsitet, som det ses af Tabel 31. Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren for Aerogel er desuden knap 5 gange højere, hvilket kan være med til at forklare det høje vandindhold.



Figur 119: Let ydervæg - Vandindhold i EPS af fabrikat No name uden dampspærre og med ventilation af hulrum

Det andet eksempel fremgår af Figur 119. Den store bløde kurve viser, at udsvingene i vandindholdet foregår på en helt anden måde, når der er tale om celleplast. Vanddampen er tilsyneladende længere tid om at diffundere ind i celleplasten og bliver der i længere tid. Det hænger sandsynligvis sammen med celleplastens lukkede porer og den høje vanddampdiffusionsmodstandsfaktor.



Figur 120: Let ydervæg - Vandindhold i træfiber af fabrikat AiF uden dampspærre og med ventilation af hulrum

Som det se af Figur 120 ser kurverne ud på samme måde for papir og træfiber – blot er vandindholdet større. Det må skyldes de åbne porer i de cellulosebaserede materialer.

Kapillarsugningen er, som det ses af Tabel 31, allerede relativt stor ved 80 % relativ luftfugtighed, og den bare stiger. Vanddampdiffusionsmodstandsfaktoren er også meget mindre for de cellulosebaserede isoleringsmaterialer, end den er for celleplasterne.

Vandindholdet er meget lavere i isoleringen i den lette ydervæg, end det var i isoleringen i hulmuren. Med meget lavere menes i størrelsesordenen en tiendedel. Det må hænge sammen med, at bagmuren i mursten ikke er lige så tæt som en dampspærre, hvad angår diffusion af fugtig luft indefra. Desuden kommer slagregn i den lette ydervæg ikke i nærheden af isoleringsmaterialet. Det har ingen våd formur at ligge tæt op af og suge vand ud af vha. kapillarsugning.

Det lave vandindhold betyder, at der ikke burde opstå problemer i konstruktionen, så længe den udføres korrekt med ventileret hulrum, en tæt dampspærre og tilstrækkelig ventilation indvendigt.

Den relative luftfugtighed yderst i isoleringslaget er så højt, at der kunne opstå bekymring om skimmel ved de rette temperaturer og organiske materialer, som svampen kan leve på.

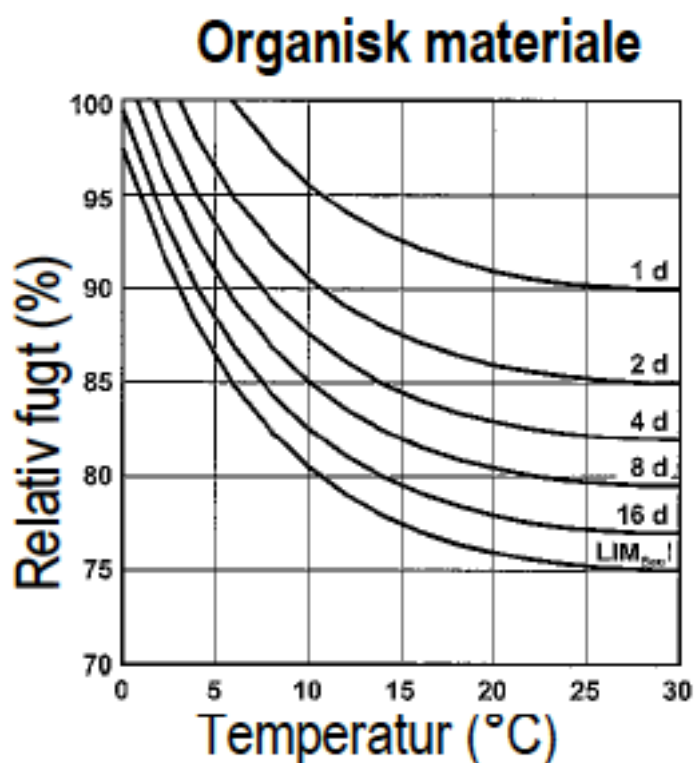
Situationen forværres, når efterisoleringen ikke udføres korrekt – se Tabel 20. I det tilfælde er der tæt på 100 % relativ luftfugtighed. Det er heldigvis om vinteren, hvor temperaturen i udeluften er lavere, og der er færre skimmelsvampesporer i luften, men ikke desto mindre er der forhøjet risiko for skimmel i konstruktionen – se Figur 121⁹⁸.

Den relative luftfugtighed er inderst i isoleringslaget så lav, at der ingen risiko er for skimmel eller angreb af trænedbrydende svampe.

5.2.2 Varmetab gennem efterisoleret let ydervæg

U-værdien inklusive kuldebro i form af træskelet er 0,1449 [W/m² K] ifølge beregning i HEAT2, hvor resultatet fremgår af Figur 96. Den lette ydervæg overholder altså uden problemer kravet til ombygning på 0,18 [W/m² K].

Det isoleringsmateriale, som blev brugt til beregning i HEAT2, var stenuld med en λ -værdi på 0,037 [W/m K]. Ifølge Tabel 22 er isoleringsmaterialet med den ringeste varmeledningsevne EPS eller fenolskum. Hvis isoleringsmaterialet udskiftes til EPS med en λ -værdi på 0,040,



Figur 121: Tid der går, før der opstår vækst af skimmelsvampe, afhængigt af temperatur og relativ luftfugtighed på organisk materiale. Kilde: Sedlbauer, 2001

⁹⁸ (Møller E., 2013) s. 12

giver HEAT2 beregningen også et resultat under kravet til ombygning. U-værdi = 0,1502 [W/m² K] fremgår af Figur 99. Ud fra dette skønnes det, at konstruktionen overholder BR18 med samtlige isoleringsmaterialer.

Det undersøges også, om varmeledningsevnen for det isoleringsmateriale, som suger mest fugt forringes væsentligt. Det gør den ikke, så den mængde fugt, der er isoleringsmaterialerne, er så lille, at den ingen indflydelse har på isoleringsevnen.

Temperaturen på indersiden af den lette ydervæg ud for kuldebroen i form af det lodrette træskelet er 19,24 °C, så der er heller ikke nogen risiko for kondens på indersiden af væggen.

5.3 KÆLDERVÆG

5.3.1 Fugt i efterisoleret kældervæg

Kældervæggen har, før den blev efterisoleret, været i direkte kontakt med den våde jord, så den er sandsynligvis godt våd. Kældervæggen påvirkes udover af vand fra jorden af nedbør som løber ned ad væggen og vanddamp, der diffunderer gennem væggen inde fra kælderen.

Fortsat må isoleringsmaterialernes egenskaber være det, der giver forskellen i vandindhold og relativ luftfugtighed, da alle andre forhold er ens for kældervæggen, når der simuleres i WUFI. Egenskaberne for de anvendte materialer er opsummeret i Tabel 32.

Tabel 32: Kældervæg - egenskaber for isoleringsmaterialer brugt til simulering

	Densitet	Porøsitet	80 % RF	93 % RF	100 % RF	Tæthed
Materiale	ρ [kg/m ³]	%	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	μ
Roxul FacadeRock	135	95,3	0,14	0,69	121	1,1
Poroton-WDF Perlitefüllung	146,7	94,46	1,71	2,88	18	3,38
EPS No name	15	95	1,79	5,43	45	30
XPS No name	40	95	1,79	5,43	45	100
Fenolskum	43	95	1,79	5,43	45	30
K5 Kooltherm	35	95	1,799*	3,25	?	35,6

*Ved 76 % RF

Vandindholdet er for alle isoleringsmaterialerne stigende, idet isoleringsmaterialet forudsættes tørt fra start, og derefter placeres mellem en godt våd betonvæg og den fugtige jord. Der er intet drængrus at finde i WUFI, så desværre er der ikke et filterelement, også kaldet et vægdræn, på ydersiden af isoleringen, som det er forudsat i drænnormen⁹⁹, i energiløsningen¹⁰⁰ og i Fugtanvisningen¹⁰¹. Det fremgår af Fugtanvisningen, at mineraluld er drænende¹⁰², men det virker som om, isoleringen ikke kan komme af med fugten fra betonvæggen på ydersiden. Det er måske grunden til vandindholdet i isoleringen øges med tiden, som det fremgår af Tabel 23 og Tabel 24.

⁹⁹ (DS 436, 1993; Bostrup, et al., 2019) s. 19

¹⁰⁰ (Videncenter for energibesparelser i bygninger, 2019) Energiløsning Udvendig efterisolering af kældervæg

¹⁰¹ (Brandt, 2009) s. 146-147

¹⁰² (Brandt, 2009) s. 146

Det er derfor interessant også at se på, hvorledes betonvæggen udtørres med de forskellige isoleringsmaterialer. Udtørringen går stærkest med stenuld og perlite, som har en lav vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, og derfor er meget diffusionsåbne. De to produkter har reduceret vandindholdet i betonvæggen med ca. 33 % efter 3 år. Celleplasterne når først til det samme punkt efter 5 år.

Tesen understøttes af den observation, at den relative luftfugtighed er tæt på 100 % på ydersiden af alle isoleringsmaterialer – se bilag 9. For stenuld og perlite er den relative luftfugtighed meget lavere på indersiden af isoleringen. For celleplasterne er den relative luftfugtighed nærmest 100 % altid – også på indersiden – se bilag 10 samt Tabel 27 og Tabel 28.

Hvis der havde været et vægdræn ville situationen forhåbentlig have været en helt anden for stenulden og perliten. Spørgsmålet er, om situationen også ville forbedres med celleplasterne, der er meget mere diffusionstætte. Deres vanddampdiffusionsmodstandsfaktor er fra 30 til 100 ifølge Tabel 32.

5.3.2 Varmetab gennem efterisoleret kældervæg

Den efterisolerede kældervæg opfylder kravene i bygningsreglementet på det tidspunkt, hvor efterisoleringen udføres. Der ser derimod ikke helt så godt ud, hvis vandet der intet vægdræn er, og isoleringsmaterialet ikke kan komme af med fugten fra betonvæggen og fra diffusion indefra.

I tilfældet med stenuld ser situation således ud fem år efter isoleringsarbejdet er udført, hvor stenulden har et vandindhold på 50 [kg/m³], og beton med et vandindhold på 92 [kg/m³].

Materiale	Tykkelse	Varmeledningsevne	Isolans
	d	λ-værdi	R = λ/d
	[m]	[W/m K]	[m ² K/W]
R _{si}			0,13
Isolering	0,200	0,045	4,444
Beton	0,350	2,1	0,167
R _{se}			0,04
		ΣR	4,781

$$U = \frac{1}{4,781}$$

$$U = 0,209 \text{ [W/m}^2 \text{ K]}$$

Her overholder kældervæggen ikke længere BR18's krav til U-værdien på 0,18 [W/m² K].

Betonvæggen er dog blevet væsentlig mere tør, og er også blevet meget varmere, da der nu er et lag isolering imellem den kolde jord og betonen. Det vil under alle omstændigheder give et bedre indeklima i kælderen. Desuden vil risikoen for indvendig kondens, som er et stort problem i kældre om sommeren, nedsættes væsentligt med en varmere overflade.

6 KONKLUSION

Det er en fordel at vide, hvilke egenskaber de ønskede isoleringsmaterialer har, inden man kaster sig ud i en efterisolering. Det vil være med til at sikre et godt resultat, og sikre kvaliteten af efterisoleringsarbejdet.

Som det fremgik af eksemplet med efterisolering af en hulmur med faste bindere simuleret i WUFI, betyder kapillarsugning meget i forbindelse med et andet kapillarsugende materiale, nemlig mursten. Hvis sorptionsisotermerne var kendt på forhånd, ville det være nemt at vælge et materiale til hulumuren, der ikke ville give problemer med fugt, og dermed forbedre varmeøkonomien i det efterisolerede huset væsentligt.

I eksemplet med den lette ydervæg bliver isoleringen slet ikke i samme grad belastet af vand. Fugtbelastningen er ca. en tiendedel for de samme isoleringsmaterialer som i hulumuren. Det betyder, at fugtbelastningen er så lille, at den heller ikke influerer på varmelednings- evnen. Til gengæld kan der opstå skimmelproblemer, hvis konstruktionen ikke udføres korrekt.

I eksemplet med kældervæggen viser det sig, at betonen udtørres væsentligt hurtigere med isoleringsmaterialer, der har en lav vanddampdiffusionsmodstandsfaktor, dvs. er meget diffusionsåbne.

Det må konstateres, at det kan være svært at få producenter og leverandører til at levere de relevante oplysninger. Det kan den af byggebranchen ønskede guide forhåbentlig råde bod på ved at gøre benarbejdet med at indsamle oplysningerne, så rådgiverne på byggesagerne har nem adgang til isoleringsmaterialernes egenskaber.

7 LITTERATURLISTE

- Aalborg Kommune. (2015). *Stilblade for enfamiliehuse*. Hentet fra Arkitektoniske stilarter: www.aalborg.dk/om-kommunen/byplanlaegning/temaer-inden-for-byplanlaegning/arkitektoniske-stilarter
- Andersen, N. E., Christensen, G., & Nielsen, F. (1993). *SBi-anvisning 178*. Bygningers fugtisolering: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Andersen, T., Fynholm, P., Hansen, M. H., & Nicolajsen, A. (2002). *By og Byg Dokumentation 025: Fugtsikre træfacader*. Hørsholm: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Aspen Aerogels. (april 2019). Hentet fra About Aerogel: www.aerogel.com/resources/about-aerogel/
- Bengtsson, L., & Selck, P. (2006). *Byggeriets materialer*. Nyt Nordisk Forlag.
- Birgisdóttir, H., & Madsen, S. S. (2017). *Bygningers indlejrede energi og miljøpåvirkninger - Vurderet for hele bygningens livscyklus*. Lyngby: PolytekniskBoghandel og Forlag APS.
- Blocon AB. (2019). *Buildingphysics.com*. Hentet fra <https://buildingphysics.com/heat2-3/>
- Blomberg, T. (2019). *LinkedIn*. Hentet fra Thomas Blombergs profil: <https://se.linkedin.com/in/thomas-blomberg-40345167>
- Bostrup, O., Hunding, C., Gram, N. F., Sørensen, H., Schjørring, J. K., Heydorn, K., & Rasmussen, S. (2019). *Gyldendal Den store danske*. Hentet fra Silicium: <http://denstoredanske.dk/index.php?sideId=158984>
- Brandt, E. (2009). *SBi-anvisning 224*. Fugt i bygninger. 1. udgave: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Bygningskultur Danmark. (2015). *Historiske huse*. Hentet fra Stilguide for enfamiliehuse: <https://historiskehuse.dk/stilguide/#stilguide-enfamiliehuse>
- DS 436. (1993). *Norm for dræning af bygværker m.v.* Dansk Standard.
- DS/EN 12086. (2013). *Termisk isolering i byggeriet*. Bestemmelse af vanddamptransmissionsegenskaber: Dansk Standard.
- DS/EN 12087. (2013). *Termisk isolering i Byggeriet*. Bestemmelse af vandabsorption ved nedsækning i lang tid: Dansk Standard.
- DS/EN 12088. (2013). *Termisk isolering i byggeriet*. Bestemmelse af vandabsorption ved diffusion i lang tid: Dansk Standard.
- DS/EN 1609. (2013). *Bestemmelse af vandabsorption ved delvis nedsækning i kort tid*. Termisk isolering i byggeriet: Dansk Standard.
- DS/EN ISO 10456. (2008). *Byggematerialer og -produkter - Hygrotermiske egenskaber*. Tabelværdier og procedurer til bestemmelse af termisk deklarerede værdier og termiske designværdier: Dansk Standard.
- DS/EN ISO 12571. (2013). *Byggematerialers og -produkters hygrotermiske ydeevne*. Bestemmelse af hygroskopiske sorptionsegenskaber: Dansk standard.
- Energistyrelsen. (2019). *Bygningsguiden*. Hentet fra <https://sparenergi.dk/forbruger/vaerktoejer/bygningsguiden>
- Energitjenesten. (april 2019). Hentet fra Spar energi > Boligen > Klimaskærm og isolering > Isoleringsmaterialer > Alternative isoleringsmaterialer > Perlite : www.energitjenesten.dk/perlite.html
- EUMEPS. (2016). *EPS White Book - Background Information on standardisation of EPS*.
- Hagemann, E. (1988). *Byggematerialer - Grundbog*. Polyteknisk Forlag.
- Huseftersynsinfo. (2012). *Hustypebeskrivelser*. Hentet fra <http://huseftersynsinfo.dk/hustypebeskrivelser>
- Ingemarsson, K. (17. Maj 2019). e-mail vedr Knaufs produkter.

- Jørgensen, C. (24. April 2019). Sundolitt.
- Jensen, B., Johansen, J., Karbæk, K., Kjærsgård, P., Nielsen, C. R., Rasmussen, A. B., & Rasmussen, T. B. (2005). *Plastteknologi*. Erhvervsskolernes Forlag.
- Kingspan. (2015). *Kooltherm - Same on the outside, different on the inside*. Kingspan.
- Lind, O., & Møller, J. (2014). *Alle tiders parcelhuse 1860-2012*. Gyldendal.
- Lorenzen, M. (2016). *Fugtramte svenske husejere vinder milliarderstatning i højesteret*. Hentet fra Ingeniøren: <https://ing.dk/artikel/fugtramte-svenske-husejere-vinder-milliarderstatning-i-hoejesteret-181182>
- Møller, E. (2013). *Materialenedbrydning - Mekanismer og forebyggelse*. Statens Byggeforskningsinstitut.
- Møller, E. B., & Nielsen, A. (2017). *Varmelære teori*. SBI.
- Møller, Eva B. (2012). *SBI-anvisning 240*. Efterisolering af småhuse - byggetekniske løsninger: Statens Byggeforskningsinstitut.
- McMonagle, S. (2019). e-mail vedr Kingspans produkter.
- Nielsen, A. (2014). *WUFI Brugermanual*. SBI.
- Nielsen, A., & Gottfredsen, F. (1997). *Bygningsmaterialer: Grundlæggende egenskaber*. Polyteknisk Forlag.
- Nue, S., & Nysøe, M. (30. April 2019). Rockwool.
- Paustian, R. (2019). e-mail vedr. Huntons produkter.
- Pedersen, C., de Place Hansen, E. J., Hansen, M. H., & Marsh, R. (2003). *By og Byg Anvisning 207*. Anvendelse af alternative isoleringsmaterialer: Statens Byggeforskningsinstitut.
- Plastindustrien. (april 2019). *Det store plastleksikon*. Hentet fra <https://plast.dk/det-store-plastleksikon/>
- PUR-sektionen, P. (2012). *Polyurethanisolering i byggeriet - eksempelsamling*.
- Schmidt, A. (2006). *Miljø- og sundhedsforhold for plastmaterialer*. <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2006/87-7052-135-2/html/kap14.htm>: Miljøstyrelsen.
- Skalflex. (11 2016). *Thermovæg*. Hentet fra Skalflex: www.skalflex.dk
- Thermal insulation materials. (u.d.). *Polyurethane (PUR) og Polyisocyanurater (PIR) foam*. European union - creating the future.
- Trafik-, Bygge- og Boligstyrelsen. (2019). *Bygningsreglementet 2018*. Hentet fra [Bygningsreglementet.dk: http://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav](http://bygningsreglementet.dk/Tekniske-bestemmelser/11/Krav)
- TRÆ.DK Danmarks træportal. (april 2019). Hentet fra <https://www.trae.dk/leksikon/papir-og-miljoe/>: <https://www.trae.dk/leksikon/isolering-med-trae-2/>
- VarmeIsoleringsForeningen. (maj 2019). *Produktoversigt 2018*. Hentet fra VIF isolering: <http://www.vif-isolering.dk/>
- Videncenter for energibesparelser i bygninger. (december 2018). *Energikravene - Bygningsreglement 2018*. Hentet fra Præsentation: www.byggeriogenergi.dk/info-links/download-praesentationer-til-undervisningsbrug/
- Videncenter for energibesparelser i bygninger. (maj 2019). *Energiløsninger og guides*. Hentet fra Enfamiliehuse > Klimaskærm: www.byggeriogenergi.dk/energilosesninger

8 BILAG

Bilag 1: Vandindhold i hulmur med faste bindere

Bilag 2: Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i hulmur med faste bindere

Bilag 3: Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i hulmur med faste bindere

Bilag 4: Vandindhold i let ydervæg

Bilag 5: Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i let ydervæg

Bilag 6: Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i let ydervæg

Bilag 7: Vandindhold i isolering på yderside af kældervæg

Bilag 8: Vandindhold i kældervæg

Bilag 9: Relativ luftfugtighed og temperatur yderst i isolering på yderside af kældervæg

Bilag 10: Relativ luftfugtighed og temperatur inderst i isolering på yderside af kældervæg

Bilag 11: Datablad Isofloc Pearl

Bilag 12: Tilretning af EPS i pladeform til kugleform i WUFI

Bilag 13: Sorptionsisoterm for Kingspans K5 Kooltherm

Bilag 14: Tilretning af Phenolic Foam til K5 Kooltherm i WUFI