

# Hovedrapport

Varme- og fugttekniske undersøgelser  
af alternative isoleringsmaterialer





Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer  
Institut for Bygninger og Energi  
Danmarks Tekniske Universitet



# Hovedrapport

Varme- og fugttekniske undersøgelser  
af alternative isoleringsmaterialer

Kurt Kielsgaard Hansen, BKM  
Ernst Jan de Place Hansen, BKM  
Tim Padfield, BKM  
Carsten Rode, IBE  
Finn Kristiansen, IBE

December 1999

## **Hovedrapport**

### **Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer**

Danmarks Tekniske Universitet

Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM)

Institut for Bygninger og Energi (IBE)

Kgs. Lyngby

BKM: Serie R No 62 1999

IBE: SR-0003

ISBN 87-7740-267-7

ISSN 1396-2167

Electronic Publication

[www.bkm.dtu.dk](http://www.bkm.dtu.dk)

## **Forord**

Den foreliggende rapport udgør slutrapporten for projektet "Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer" finansieret af Energistyrelsen (J.nr. 75664/98-0034). Projektet er udført i et samarbejde mellem Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM) og Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU.

Det er formålet med den foreliggende rapport at opsummere det udførte arbejde i projektet og give hovedresultaterne fra projektet.

Det er intentionen at rapporten skal være let læst, og derfor er udledning af formler og andet baggrundsmateriale ikke indeholdt i teksten. Dette kan findes i de enkelte rapporter og artikler, der er udarbejdet i løbet af projektet. En fuldstændig liste over rapporter og artikler kan findes bagest i rapporten.

Alle rapporter fra projektet kan findes på internettet på adressen <http://www.sbi.dk/Forskning/Bogp/Materialer/Isolering/Isolering.htm> hvor der ligeledes findes en database med anden litteratur om de emner, der er behandlet i dette projekt.

Lyngby, 30. december 1999  
Kurt Kielsgaard Hansen  
Projektleder

## **Tak til**

Tak til Energistyrelsens udviklingsprogram for miljø- og arbejdsmiljøvenlig isolering for støtte til projektet "Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer".

Følgegruppen for projektet bestående af teknikuming. HD Kurt Stokbæk, eget firma, civ. ing. Sergio Fox, Energistyrelsen (tidl. Niras) og civ.ing. Georg Christensen, Bygge og Miljøteknik ApS (tidl. Statens Byggeforskningsinstitut, SBI) takkes for gode diskussioner på følgegruppemøderne.

## Resume

I rapporten præsenteres hovedresultaterne for målinger af sorptionsisoterm, vanddamppermeabilitet, vandopsugningsevne, fugtbuffervirkning, varmeledningsevne for fugtige materialer samt egenkonvektion for en række alternative isoleringsprodukter. De alternative isoleringsprodukter omfatter tre fabrikater papirisolering, perlite (vulkansk aske) med og uden siliconebehandling, samt hør og fåreuld. For sammenligningens skyld er desuden målt på to fabrikater mineraluld. Det skal bemærkes, at ikke alle ovennævnte målemetoder er anvendt til alle isoleringsprodukter.

Den fugtmæssige ydeevne af forskellige konstruktioner er blevet analyseret med den endimensionale beregningsmodel MATCH for beregning af koblet fugt- og varmetransport. Analysen vedrører både traditionelle væg- og tagudformninger med de alternative isoleringsprodukter, og nogle alternative udformninger, der er anvist af leverandører af alternative isoleringsprodukter. Analysen omfatter brug af de alternative isoleringsprodukter papirisolering, hør og perlite, hvoraf de første to er meget hygroskopiske, medens perlite kun er meget svagt hygroskopisk. Til sammenligning er tillige gennemført beregninger af de samme konstruktioner isoleret med glas- og stenuld. Til MATCH-beregningerne er anvendt de i projektet opnåede resultater for sorptionsisoterm og vanddamppermeabilitet. For øvrige inputparametre er MATCH's materialebibliotek anvendt.

## Indholdsfortegnelse

|    |                                                                            |    |
|----|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 1  | Indledning .....                                                           | 1  |
| 2  | Oversigt over undersøgte isoleringsprodukter og anvendte målemetoder ..... | 2  |
| 3  | Sorptionsisotermer .....                                                   | 5  |
| 4  | Vanddamppermeabilitet (kopforsøg) .....                                    | 9  |
| 5  | Kapillarsugning .....                                                      | 12 |
| 6  | Fugtbufferevne .....                                                       | 15 |
| 7  | Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold .....                        | 16 |
| 8  | Egenkonvektion i fåreuld og papirisolering .....                           | 20 |
| 9  | Beregnete fugtforhold i konstruktioner .....                               | 24 |
| 10 | Litteratur .....                                                           | 27 |
| 11 | Rapporter fra projektet .....                                              | 27 |





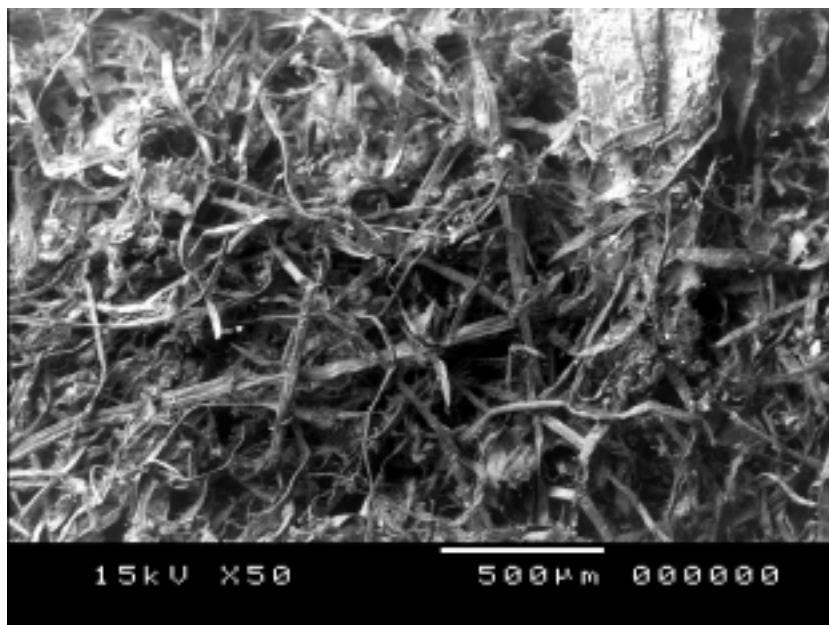
## 1. Indledning

Formålet med projektet "Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer" er at vurdere den byggetekniske anvendelighed af alternative isoleringsmaterialer. I projektet er der gennemført omfattende målinger af de basale varme- og fugtfysiske parametre for alternative - og mineraluld materialer, samt udført beregninger af fugtforhold ved simulering med MATCH-programmet af ca. 10 konstruktioner med alternative - og traditionelle materialer.

Følgende varme- og fugtfysiske parametre er målt

- Sorptionsisotermer (BKM)
- Vanddamppermeabilitet målt med kopforsøg (BKM)
- Vandopsugningsevne målt med kapillarsugningsforsøg (BKM)
- Fugtbuffervirkning (BKM)
- Varmeledningsevne for fugtige materialer (IBE)
- Egenkonvektion i fåreuld og papirisolering (IBE)

Der er udarbejdet separate rapporter for hver af disse emner. Der er ligeledes udarbejdet en rapport der dels indeholder en kort beskrivelse af fremstillingen af de isoleringsprodukter, der indgår i nærværende projekt, dels leverandør/producent-oplysninger om de hygrotermiske egenskaber for de undersøgte isoleringsprodukter. For hvert produkt er vist et billede, der illustrerer strukturen i produktet i form af fibergeometri og -orientering, samt tilstedeværelsen af eventuelle støttestrukturer af polyester. Disse billeder er taget i scanningelektronmikroskop, hvorved billeder med en relativ stor dybdeskarphe og kontrast er opnået. Alle billeder vises i samme forstørrelse angivet ved en målestok nederst på billedet. Et eksempel ses på figur 1.



Figur 1 Scanningelektronmikroskop-billede af Miljø Isolering (papirisolering med salte). Længden af den hvide markør (målestok) nederst i billedet er 500  $\mu\text{m}$ .

## 2. Oversigt over undersøgte isoleringsprodukter og anvendte målemetoder

I tabel 2 er givet en oversigt over de undersøgte isoleringsprodukter og anvendte målemetoder. Isoleringsprodukterne er opdelt i uorganiske - og organiske produkter, og ud for hvert produkt er angivet en produktbetegnelse, en produkttykkelse/form, oplysning om hvordan produktet er anskaffet, samt de anvendte målemetoder.

For papirisolering fra Miljø Isolering er undersøgt såvel et imprægneret produkt udtaget på lager hos Miljø Isolering, et produkt uden kemisk behandling, samt et imprægneret produkt hentet på Statens Byggeforskningsinstitut (SBI). Dette skyldes at SBI har målinger i gang med papirisolering i vægge i instituttets fugtforsøgshus. For sammenligningens skyld er en prøve af SBI's sending fra Miljø Isolering derfor indgået i bestemmelsen af sorptionsisoterm. Prøver af produkterne Heraflax og Herawool er ligeledes hentet på SBI, da de bestilte varer af Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt bestemmelse af sorptionsisoterm (målemetode C) af tidsmæssige grunde blev sat igang. Mineraluldsprodukter er inkluderet mhp. sammenligning af måleresultater efter ønske fra Energistyrelsen.

Produkttykkelsen er firmaernes nominelle produkttykkelse for plade- henholdsvis rullevarer, se dog note 9 til tabellen. Det er ligeledes angivet, hvis produktet er et løsfyldprodukt.

I kolonnen "Anskaffet" betyder "Udtaget på lager" at en projektmedarbejder enten har indkøbt produktet via f. eks. en tømmerhandel eller har udtaget produktet direkte hos producenten. Borry Henriksen har fremsendt en prøve af Ekofiber Væg, Jens Ambjerg Pedersen en prøve af fåreuld fra Scandan. I tabel 1 nedenfor findes en fuldstændig producent/leverandørliste.

I kolonnen for målemetoder i tabel 2 er med "x" angivet de anvendte målemetoder.

*Tabel 1 Leverandør/producentliste for de undersøgte produkter.*

| Produkt                                               | Leverandør/producent                                                                                       |
|-------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Rockwool A-batt                                       | Rockwool, Hovedgaden 501, 2640 Hedehusene via tømmerhandel                                                 |
| Glasuld 39                                            | Glasuld, Østermarksvej 4, 6580 Vamdrup via tømmerhandel                                                    |
| Perlite SC (behandlet)<br>Perlite (ubehandlet)        | Nordisk Perlite ApS, Sundkrogsvej 2, 2100 Kbh. Ø                                                           |
| Ekofiber Vind<br>Ekofiber Væg                         | Ekofiber, Sverige via Borry Henriksen, Kystvejen 178, 4671 Strøby                                          |
| Miljø Isolering<br>Miljø Isolering uden salte         | Miljø Isolering ApS, Brødeskovvej 40, 3400 Hillerød                                                        |
| Isodan<br>Isodan uden salte                           | Isodan Danmark ApS, Maribovej 20, 4960 Holeby via Egen Vinding og Datter ApS, Rønnedevej 18, 4100 Ringsted |
| Heraflax SF 040<br>Herawool NF 040<br>Herawool BP 040 | Heraklith GmbH, Tyskland via Holbæk Byggevare Compagni, Kalundborgvej 123, 4300 Holbæk                     |
| Scandan                                               | Scandan, Flinterupvej 21B, Kirke Flinterup, 4180 Sorø                                                      |

Tabel 2 Undersøgte isoleringsprodukter i projektet “Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer”. Oversigt.

| Produkt                                            | Produktbetegnelse                                        | Tykkelse/form               | Anskaffet        | Målemetoder      |                  |   |                      |                      |   |
|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|------------------|---|----------------------|----------------------|---|
|                                                    |                                                          |                             |                  | A                | B                | C | D                    | E                    | F |
| Produkter af uorganiske materialer                 |                                                          |                             |                  |                  |                  |   |                      |                      |   |
| Rockwool A-batt                                    | Mineraluld <sup>3)</sup>                                 | 50 mm, plade                | Udtaget på lager | x                |                  | x | x                    | x                    |   |
| Glasuld 39                                         | Mineraluld <sup>4)</sup>                                 | 50 mm, rulle                | Udtaget på lager |                  |                  | x | x                    | x                    |   |
| Perlite SC (behandlet)                             | Ekspanderet vulkansk aske <sup>5)</sup>                  | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x                |                  | x | x                    | x                    |   |
| Perlite (ubehandlet)                               | Ekspanderet vulkansk aske <sup>6)</sup>                  | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager |                  |                  | x |                      | x                    |   |
| Produkter af organiske materialer - papirisolering |                                                          |                             |                  |                  |                  |   |                      |                      |   |
| Ekofiber Vind <sup>12)</sup>                       | Papiruld + 18 vægt% borsalte                             | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x <sup>10)</sup> | x <sup>10)</sup> | x | x <sup>10) 11)</sup> | x <sup>10) 11)</sup> |   |
| Ekofiber Væg                                       | Papiruld + 5 vægt% borsalte                              | Løsfyldprodukt              | Borrry Henriksen |                  |                  | x |                      |                      |   |
| Miljø Isolering - 1                                | Papiruld + 6 vægt% borsalte + 9 vægt% aluminiumhydroxid  | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x <sup>14)</sup> |                  | x | x <sup>11)</sup>     | x <sup>11)</sup>     |   |
| Miljø Isolering - 2 (u. salte)                     | Papiruld                                                 | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x <sup>14)</sup> |                  | x | x <sup>11)</sup>     |                      |   |
| Miljø Isolering - SBI <sup>1)</sup>                | Som Miljø Isolering - 1                                  | Løsfyldprodukt              | Hentet på SBI    |                  |                  | x |                      |                      |   |
| Isodan                                             | Som Miljø Isolering - 1                                  | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x <sup>11)</sup> |                  | x |                      |                      |   |
| Isodan u. salte                                    | Papiruld                                                 | Løsfyldprodukt              | Udtaget på lager | x <sup>14)</sup> |                  |   |                      |                      |   |
| Produkter af organiske materialer - hør, fåreuld   |                                                          |                             |                  |                  |                  |   |                      |                      |   |
| Heraflax SF 040 <sup>7)</sup>                      | Hør + støttefibre + 8 vægt% ammoniumsulfat/fosfat        | 30 mm, rulle                | Lev. fra Tyskl.  | x                |                  |   | x                    | x                    |   |
| Heraflax SF 040 <sup>2)</sup>                      | Som ovenfor                                              | 100 mm, rulle               | Hentet på SBI    |                  |                  | x |                      |                      |   |
| Herawool NF 040 <sup>8)</sup>                      | Fåreuld + 2-4 vægt% borsalte + 1 vægt% urea              | 30 mm, rulle                | Lev. fra Tyskl.  | x                |                  |   |                      |                      |   |
| Herawool NF 040                                    | Som ovenfor                                              | 100 mm, rulle               | Lev. fra Tyskl.  |                  |                  |   | x                    | x                    |   |
| Herawool BP 040 <sup>8)</sup>                      | Fåreuld +støttefibre + 2-4 vægt% borsalte + 1 vægt% urea | 190 mm, plade <sup>9)</sup> | Lev. fra Tyskl.  |                  | x                |   |                      |                      |   |
| Herawool BP 040 <sup>2)</sup>                      | Som ovenfor                                              | 160 mm, plade               | Hentet på SBI    |                  |                  | x |                      |                      |   |
| Scandan                                            | Fåreuld <sup>13)</sup>                                   | 70 mm, rulle                | Lev. fra Scandan |                  |                  |   |                      |                      | x |

*Noter til målemetoder, tabel 2:*

|   |                                               |
|---|-----------------------------------------------|
| A | Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold |
| B | Egenkonvektion i fåreuld og papirisolering    |
| C | Sorptionsisotermer                            |
| D | Vanddamppermeabilitet                         |
| E | Kapillarsugning                               |
| F | Fugtbuffervirkning                            |

*Noter i øvrigt, tabel 2:*

- 1) Supplerende målinger på SBI's beholdning af materiale fra Miljø Isolering efter aftale med Statens Byggeforskningsinstitut (SBI). KUN anvendt ved forsøg med målemetode C
- 2) Materiale hentet hos SBI, da de bestilte varer af Heraflax og Herawool ikke var leveret til DTU på det tidspunkt forsøg med metode C af tidsmæssige grunde blev sat i gang. KUN anvendt til målemetode C
- 3) Densitet 30-32 kg/m<sup>3</sup>
- 4) Densitet 16 kg/m<sup>3</sup>
- 5) Vandafvisende (siliconebehandlet), kornstørrelse 0.5 - 6 mm fra Nordisk Perlite (betegnelse Perlite 0560 SC). Densitet 85±20 kg/m<sup>3</sup>
- 6) Ikke behandlet, kornstørrelse 0.5 - 6 mm fra Nordisk Perlite (betegnelse Perlite 0560). Densitet 85±15 kg/m<sup>3</sup>
- 7) Heraflax SF 040 fra Heraklith er produkt med støttefibre (polyester, 18%), densitet 30 kg/m<sup>3</sup>
- 8) Herawool BP 040 fra Heraklith er produkt med støttefibre (polyester, 14%), densitet 25 kg/m<sup>3</sup>, Herawool NF 040 er uden støttefibre, densitet 25 kg/m<sup>3</sup>
- 9) Den reelle tykkelse varierer mellem 170 og 215 mm inden montering i konvektionsapparat. Middelværdi er indført i tabellen
- 10) Densitet 65 kg/m<sup>3</sup>
- 11) Densitet 40 kg/m<sup>3</sup>
- 12) Vind er svensk for loftsrum
- 13) Mængden af tilsætningsstoffer er ikke oplyst, men typisk tilsættes urea for at modvirke insektangreb
- 14) Densitet 60 kg/m<sup>3</sup>

### 3. Sorptionsisotermer

Sorptionsisotermer for alternative - og traditionelle isoleringsprodukter er bestemt ved 20 °C og 40 °C ved brug af to forskellige forsøgsopstillinger. I klimaskab (figur 2) styres den relative fugtighed ved tør og fugtig luft tilført skabet, og i ekssikkatorer styres den relative fugtighed ved mættede saltopløsninger. Ved 20 °C er med klimaskabsopstillingen målt på to typer Perlite, fem typer papirisolering (to typer fra Ekofiber, to typer fra Miljø Isolering, en type fra Isodan), en type af fåreuld (Herawool), en type af hør (Heraflax), samt to typer af mineraluld fra henholdsvis Rockwool og Glasuld.

Adsorptionsisotermer ved 20 °C for udvalgte produkter er vist i figur 3, mens desorptionsisotermer ved 20 °C for de samme produkter er vist i figur 4.

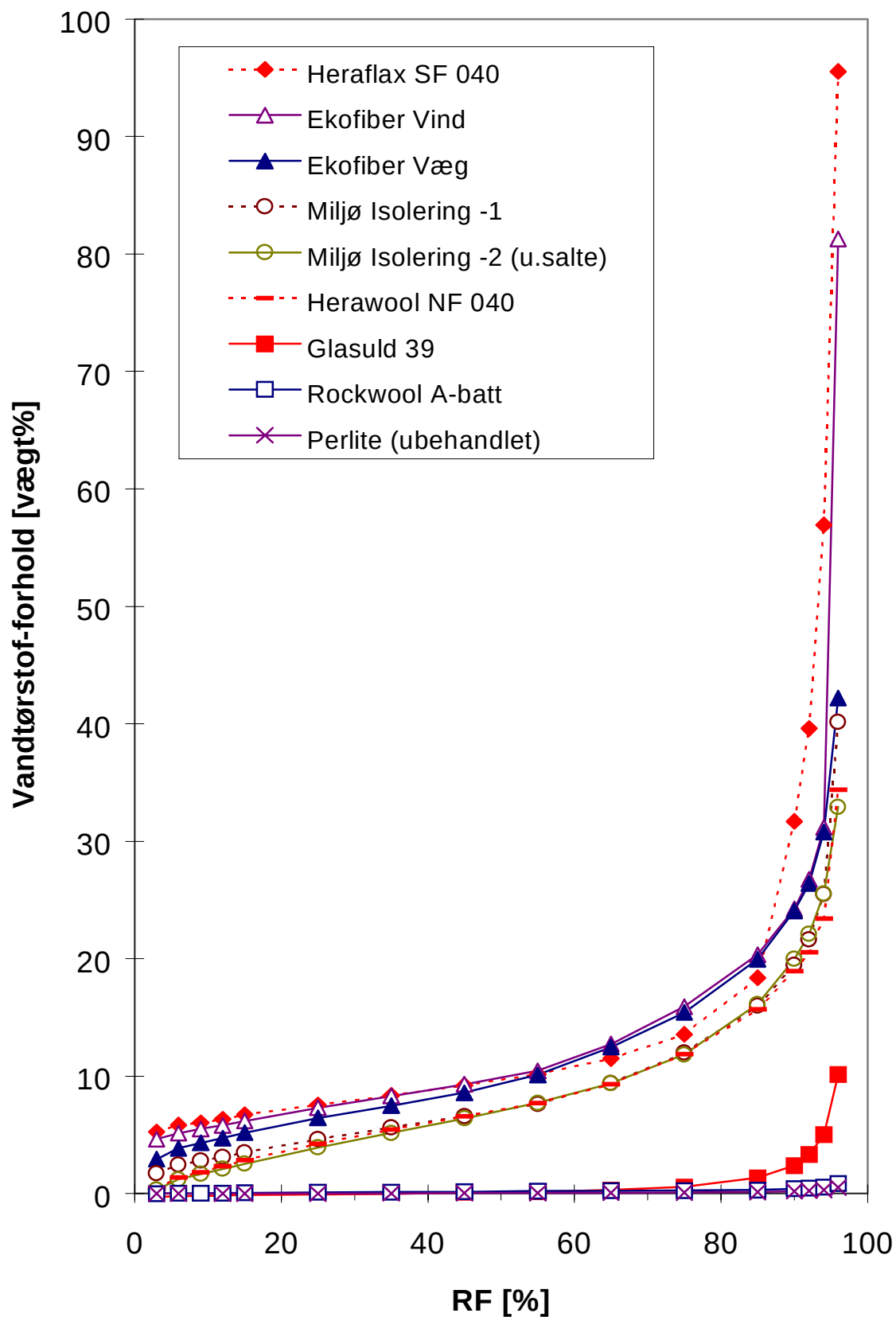
Ved 40 °C er målt adsorptionsisotermer på en type af fåreuld og to typer af papirisolering (Ekofiber, Miljø Isolering) med ekssikkatoropstilling og en type papirisolering (Ekofiber) med klimaskabsopstilling. Adsorptionsisotermer ved 40 °C (ekssikkatoropstilling) og 20 °C (klimaskabsopstilling) for udvalgte produkter er sammenlignet i figur 5.

Adsorptionsisotermer for rene salte fra produkterne er bestemt ved 21 °C.

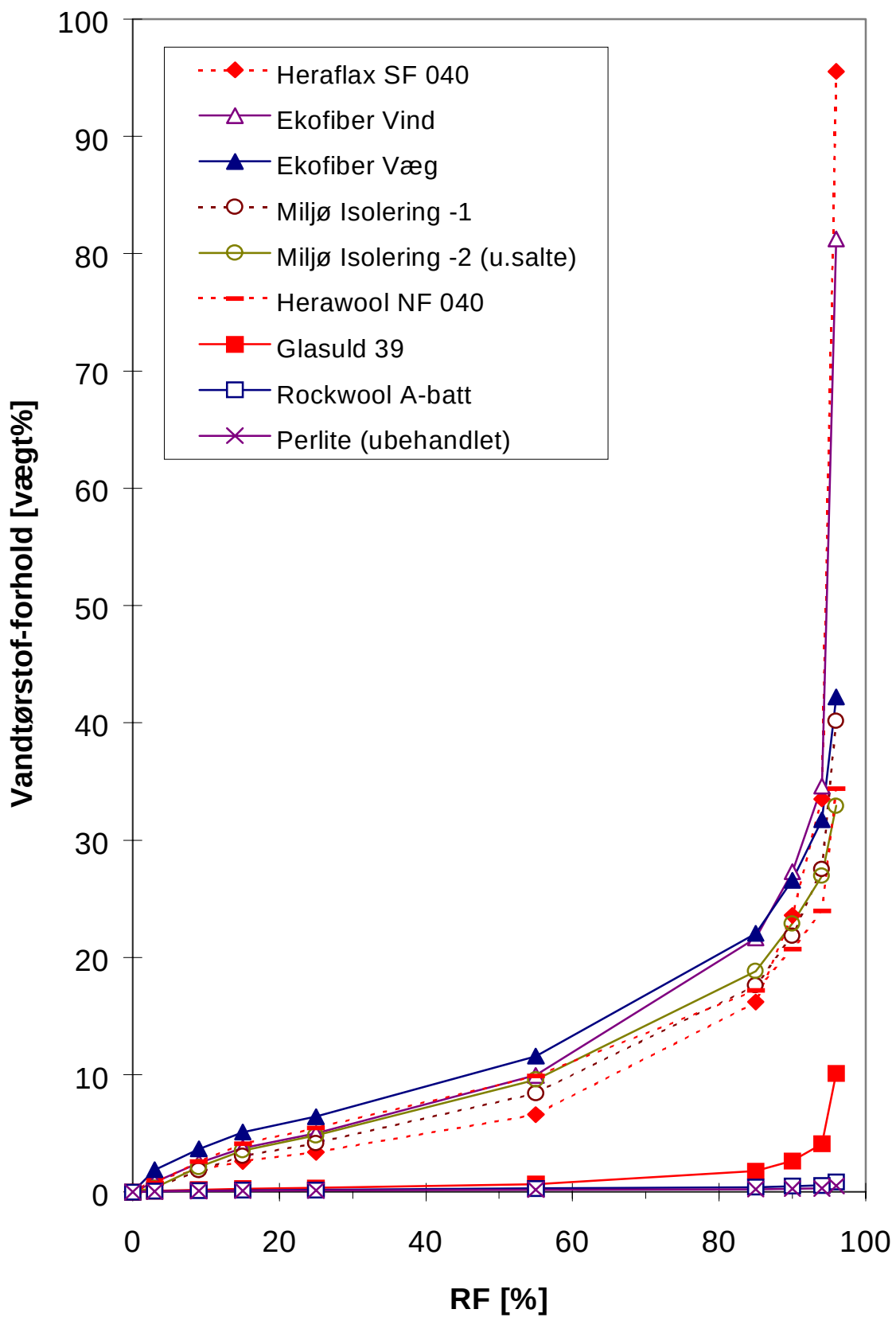
De opnåede resultater er i den separate rapport om sorptionsisotermer sammenlignet med resultater fra litteraturen for Leca samt for mineralulds- og papirisoleringsprodukter.



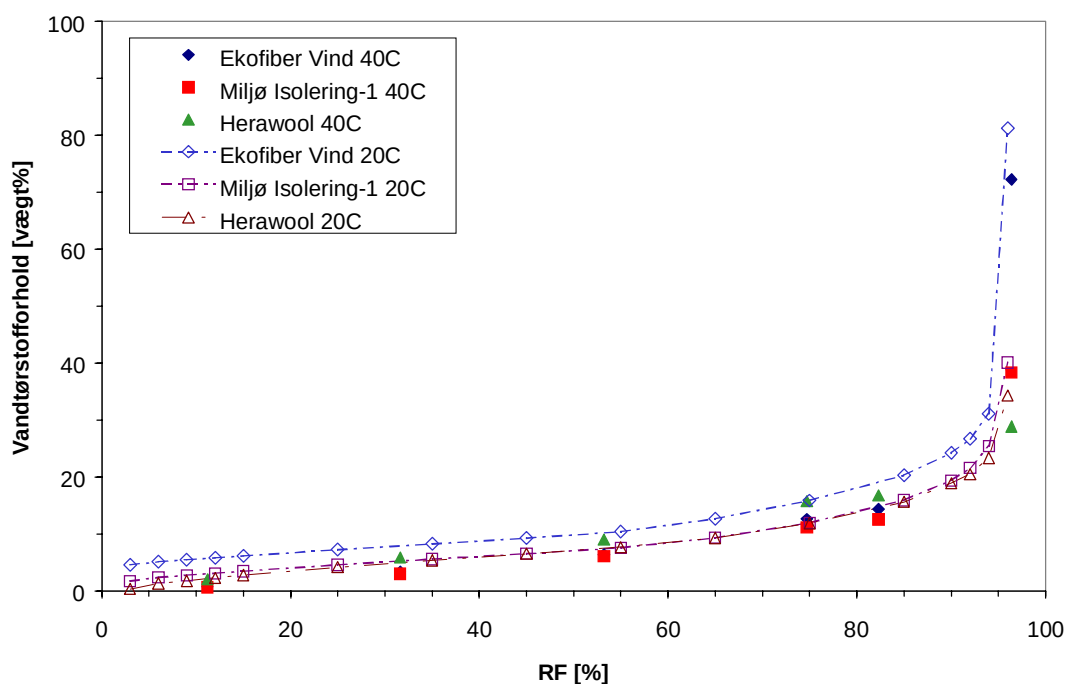
*Figur 2 Klimaskabsopstilling på BKM til bestemmelse af sorptionsisotermer. De to klimaskabe til venstre benyttes til forsøg ved 20 °C. Klimaskabet til højre benyttes til forsøg ved andre (højere) temperaturer, i det aktuelle tilfælde 40 °C. I samtlige skabe udføres vejninger af prøveemner uden at skabene åbnes.*



Figur 3 Adsorptionsisotermer, 20°C, klimaskabsopstilling. Udvalgte produkter. Produkterne angives efter aftagende sorptionsevne ved RF større end 90%. Reference for vandtørstofforhold er tørring over magnesiumperchlorat (1% RF).



Figur 4 Desorptionsisotermer, 20°C, klimaskabsopstilling. Udvalgte produkter. Produkterne angives efter aftagende sorptionsevne ved RF større end 90%. Reference for vandtørstofforhold er tørring over magnesiumperchlorat (1% RF).



Figur 5 Adsorptionsisotermer ved 40°C (ekssikkatoropstilling) og 20°C (klimaskabsopstilling). Tørring over magnesiumperchlorat (1% RF) benyttes som reference ved ekssikkatoropstilling og 3% RF ved klimaskabsopstilling.

Det kan konkluderes at de uorganiske produkter Perlite, Rockwool A-batt og Glasuld 39 alle har et vandtørstofforhold under 2 vægt%, dog med undtagelse af Glasuld 39, der har en begyndende fugtbinding ved 75 %RF og med et vandtørstofforhold på ca. 10 vægt% ved 96 %RF. Alle de organiske produkter følger stort set samme kurve op til ca. 80 %RF, hvorefter fugtbindingen i de tilsatte salte giver de meget høje vandtørstofforhold for høje RF.

Det kan ikke ud fra de opnåede resultater konkluderes om det høje vandtørstofforhold er skadeligt eller ikke-skadeligt for anvendelsen af de organiske, alternative isoleringsprodukter. Desuden har problematikken omkring eventuel udvaskning af salte ved en høj RF ligget udenfor dette projekts rammer.

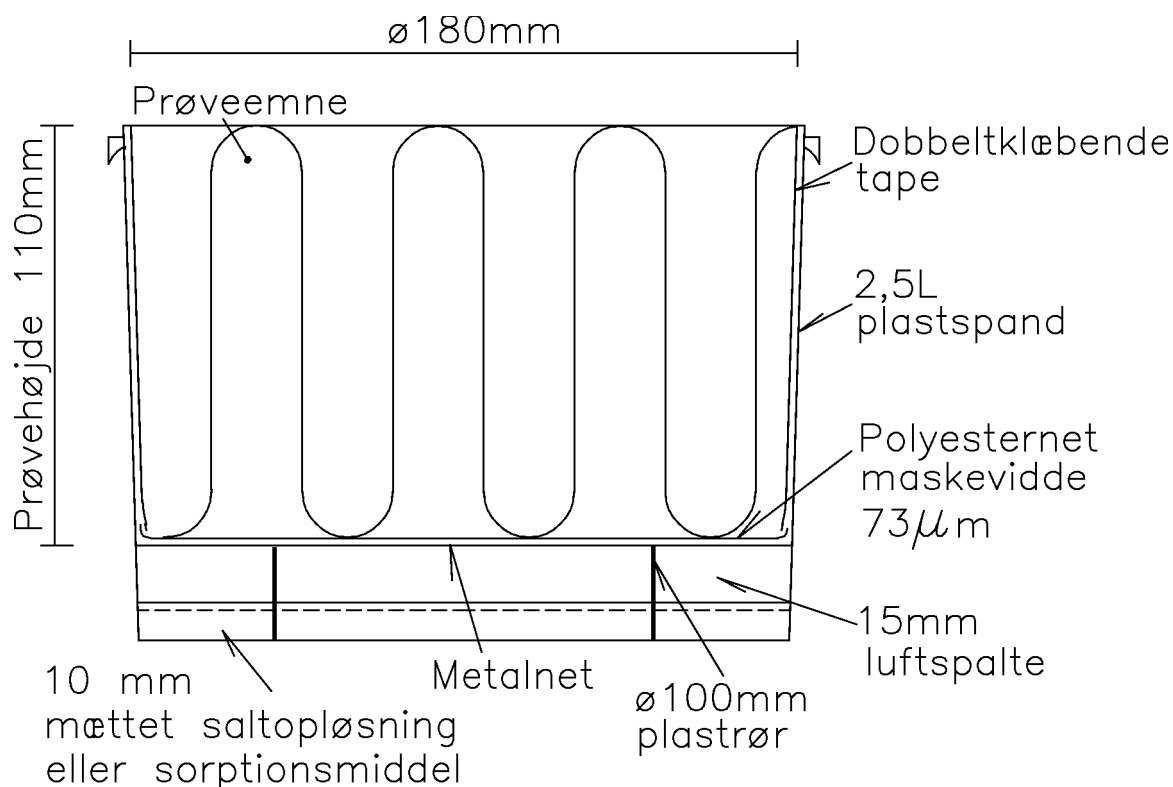


#### 4. Vanddamppermeabilitet (kopforsøg)

Fugtmodstandstal og vanddamppermeabilitetskoefficienter er bestemt ved 23 °C. Som målebetingelser er benyttet 50 %RF i målekammeret og 1%RF (tørkop) henholdsvis 94 %RF i koppen (vådkop). De undersøgte produkter fremgår af tabel 3 og 4. Løsfyldprodukter (Perlite, Ekofiber, Miljø Isolering) har været pakket til den af leverandøren anbefalede densitet. For øvrige produkter benyttes leveringstykkelser. Ekofiber er undersøgt ved to densiteter (40 kg/m<sup>3</sup> og 65 kg/m<sup>3</sup>) og den ene type fra Miljø Isolering ved to tykkelser (110 mm og 50 mm) for at studere henholdsvis densitetens og prøvetykkelsens betydning for fugtmodstandstallet og vanddamppermeabilitetskoefficienten.

Resultater er vist i tabel 3 (vådkop) og i tabel 4 (tørkop). I den separate rapport om kopforsøg er gennemgået en metode til at foretage korrektion for luftlag i koppen og overgangsmodstande på prøveemnets to sider. Fugtmodstandstal og vanddamp-permeabilitetskoefficienter er her angivet dels som målte dels som korrigerede værdier.

Det kan konkluderes at samtlige materialer er meget åbne for diffusion af vanddamp, samt at der, i modsætning til porøse bygningsmaterialer generelt, stort set ingen forskel er på tørkop- og vådkopresultater. Forsøgene er udført med identiske prøvningsbetingelser.



Figur 6 Kop med prøveemne til bestemmelse af vanddamppermeabilitetskoefficienten.

**Tabel 3 Fugtmodstandstal og vanddamppermeabilitetskoefficienter ved 23°C og en RF-gradient: 50% - 94% (vådkop).**

| Produkt                         | Densitet<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Oprindelig<br>tykkelse<br>[mm] | Sætning under<br>prøvning<br>[%] | $Z_p \cdot 10^9 \text{ (Pa s m}^2\text{) / kg}$ |  | $\delta_p \cdot 10^{-12} \text{ kg / (Pa m s)}$ |  |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------------------------|--|-------------------------------------------------|--|
|                                 |                                  |                                |                                  | Værdier ifølge standard 1)                      |  | Værdier ifølge standard 1)                      |  |
| Perlite SC (behandlet)          | 85                               | 110                            | 0                                | 1.14 ± 0.15                                     |  | 90 ± 12                                         |  |
| Ekofiber Vind                   | 40                               | 110                            | < 5                              | 0.66 ± 0.04                                     |  | 170 ± 10                                        |  |
| Ekofiber Vind                   | 65                               | 110                            | 0                                | 1.15 ± 0.02                                     |  | 93 ± 2                                          |  |
| Miljø Isolering -1              | 40                               | 110                            | 5                                | 0.62 ± 0.09                                     |  | 177 ± 27                                        |  |
| Miljø Isolering -1              | 40                               | 50                             | < 10                             | 0.44 ± 0.05                                     |  | 113 ± 13                                        |  |
| Miljø Isolering -2 (u.salte)    | 40                               | 110                            | < 5                              | 0.78 ± 0.13                                     |  | 147 ± 23                                        |  |
| Herawool NF 040 (u.støttefibre) | 25                               | 100                            | 0                                | 0.72 ± 0.14                                     |  | 160 ± 35                                        |  |
| Heraflax SF 040                 | 30                               | 30                             | 0                                | 0.28 ± 0.11                                     |  | 120 ± 50                                        |  |
| Rockwool A-batt                 | 32                               | 50                             | 0                                | 0.40 ± 0.05                                     |  | 127 ± 17                                        |  |
| Glasuld 39                      | 16                               | 50                             | 0                                | 0.38 ± 0.09                                     |  | 137 ± 36                                        |  |

Note:

- Tykkelsen af et prøveemne er enten produkttykkelsen ved levering (Herawool, Heraflax, Rockwool og Glasuld) eller en tykkelse specificeret i prEN ISO 12572 (1998)
- 1): Beregnet efter prEN ISO 12572 (1998)
- Værdier for fugtmodstandstal  $Z_p$  og permeabilitetskoefficient  $\delta_p$  er middelværdier ± spredning (af 3 prøveemner)
- Luftlagstykkelse i koppen er 15 mm, lufthastighed over kopperne er 2.5 m/s

*Tabel 4 Fugtmodstandstal og vanddamppermeabilitetskoefficienter ved 23°C og en RF-gradient: 50% - 1% (tørkop).*

| Produkt                         | Densitet<br>[kg/m <sup>3</sup> ] | Oprindelig<br>tykkelse<br>[mm] | Sætning under<br>prøvning<br>[%] | Værdier ifølge standard 1)                   |                                         |
|---------------------------------|----------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------|-----------------------------------------|
|                                 |                                  |                                |                                  | $Z_p \cdot 10^9$ (Pa s m <sup>2</sup> ) / kg | $\delta_p \cdot 10^{-12}$ kg / (Pa m s) |
| Perlite SC (behandlet)          | 85                               | 110                            | 0                                | 1.01 ± 0.42                                  | 113 ± 47                                |
| Ekofiber Vind                   | 40                               | 110                            | < 5                              | 0.82 ± 0.02                                  | 133 ± 4                                 |
| Ekofiber Vind                   | 65                               | 110                            | 0                                | 0.96 ± 0.02                                  | 113 ± 2                                 |
| Miljø Isolering -1              | 40                               | 110                            | 5                                | 0.59 ± 0.10                                  | 190 ± 34                                |
| Miljø Isolering -1              | 40                               | 50                             | < 10                             | 0.43 ± 0.02                                  | 117 ± 5                                 |
| Miljø Isolering -2 (u.salte)    | 40                               | 110                            | < 5                              | 0.76 ± 0.03                                  | 143 ± 5                                 |
| Herawool NF 040 (u.støttefibre) | 25                               | 100                            | 0                                | 0.71 ± 0.05                                  | 157 ± 13                                |
| Heraflax SF 040                 | 30                               | 30                             | 0                                | 0.30 ± 0.03                                  | 100 ± 7                                 |
| Rockwool A-batt                 | 32                               | 50                             | 0                                | 0.44 ± 0.05                                  | 113 ± 12                                |
| Glasuld 39                      | 16                               | 50                             | 0                                | 0.44 ± 0.02                                  | 113 ± 6                                 |

Note:

- Tykkelsen af et prøveemne er enten produkttykkelsen ved levering (Herawool, Heraflax, Rockwool og Glasuld) eller en tykkelse specificeret i prEN ISO 12572 (1998)
- 1): Beregnet efter prEN ISO 12572 (1998)
- Værdier for fugtmodstandstal  $Z_p$  og permeabilitetskoefficienter  $\delta_p$  er middelværdier ± spredning (af 3 prøveemner)
- Luftlagstykkelse i koppen er 15 mm, luftfartshastighed over kopperne er 2.5 m/s

## 5. Kapillarsugning

Ved kapillarsugningsforsøg er bestemt vandopsugningsevne, vandindhold og sugehastighed for de i tabel 5 listede produkter.

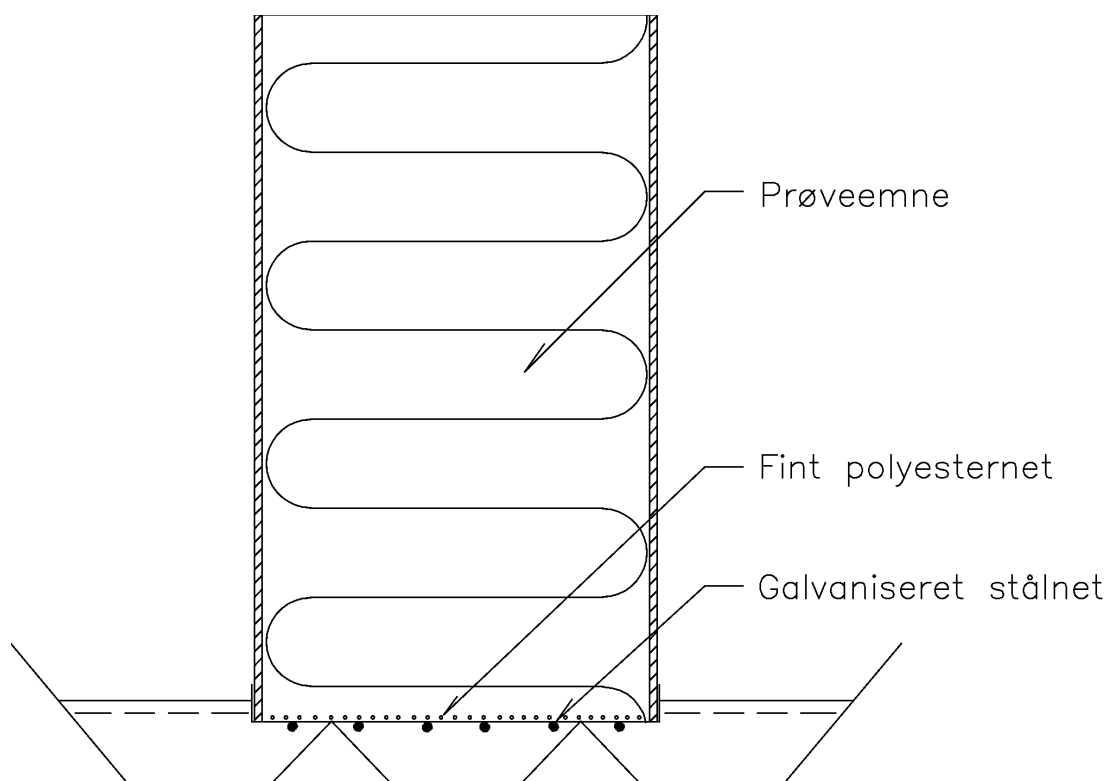
Måling af vandopsugningsevne er sket med de på figur 7 og figur 8 viste opstillinger. Figur 7 viser opstillingen til løsfyldsprodukter (Perlite, Ekofiber, Miljø Isolering), og figur 8 viser opstillingen til sammenhængende produkter.

Opstillingen på figur 7 består af et plexiglasrør med et galvaniseret stålnet i bunden hvorpå der ligger et fint polyesternet. Der er ikke låg over røret, dvs. fordampning modvirkes ikke. Opstillingen på figur 8 består af et ”bur” af galvaniseret stålnet med variabel højde. Klimaet i laboratoriet er  $50 \pm 5$  %RF,  $23 \pm 1.5$  °C under forsøgenes udførelse. Undersiden af prøveemnet har været 1 cm under vandoverfladen.

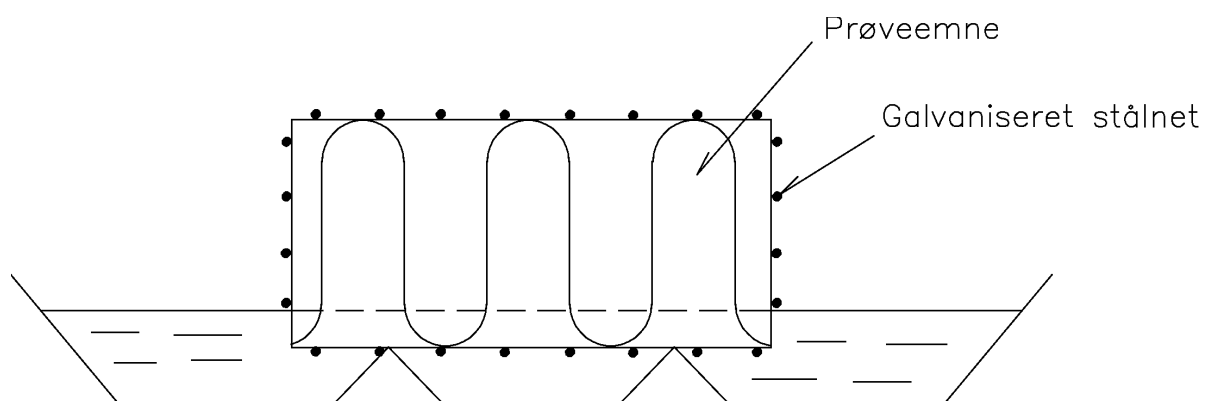
*Tabel 5 Måleresultater. Kapillarsugningsforsøg. Middelvandindhold for Perlite SC (behandlet) er angivet for to højder aht. sammenligning med tidligere fundne måleresultater.*

| Produkt                               | Opsuget vand $Q_{kap}$<br>[kg/(m <sup>2</sup> sugeflade)] | Kapillaritetstal $k$<br>[kg/(m <sup>2</sup> · $\sqrt{s}$ )] | Middelvandindhold<br>[vægt % (105°C)] |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|---------------------------------------|
| Perlite (ubehandlet)                  | 66                                                        | 0.27                                                        | 314                                   |
| Perlite SC (behandlet)                | 0.5                                                       | 0.005                                                       | 3.4                                   |
| Nederste 0-2 cm                       |                                                           |                                                             | 27                                    |
| Øverste 2-20 cm                       |                                                           |                                                             | 1.5                                   |
| Ekofiber Vind (40 kg/m <sup>3</sup> ) | 39                                                        | 0.56                                                        | 550                                   |
| Ekofiber Vind (65 kg/m <sup>3</sup> ) | 67                                                        | 0.81                                                        | 657                                   |
| Miljø Isolering - 1                   | 37                                                        | 0.27                                                        | 453                                   |
| Herawool NF 040                       | 2.5                                                       | 0.012                                                       | 79                                    |
| Heraflax SF 040                       | 2.9                                                       | 0.016                                                       | 387                                   |
| Rockwool A-batt                       | 0.1                                                       | 0.001                                                       | 5.8                                   |
| Glasuld 39                            | 3.0                                                       | 0.03                                                        | 394                                   |

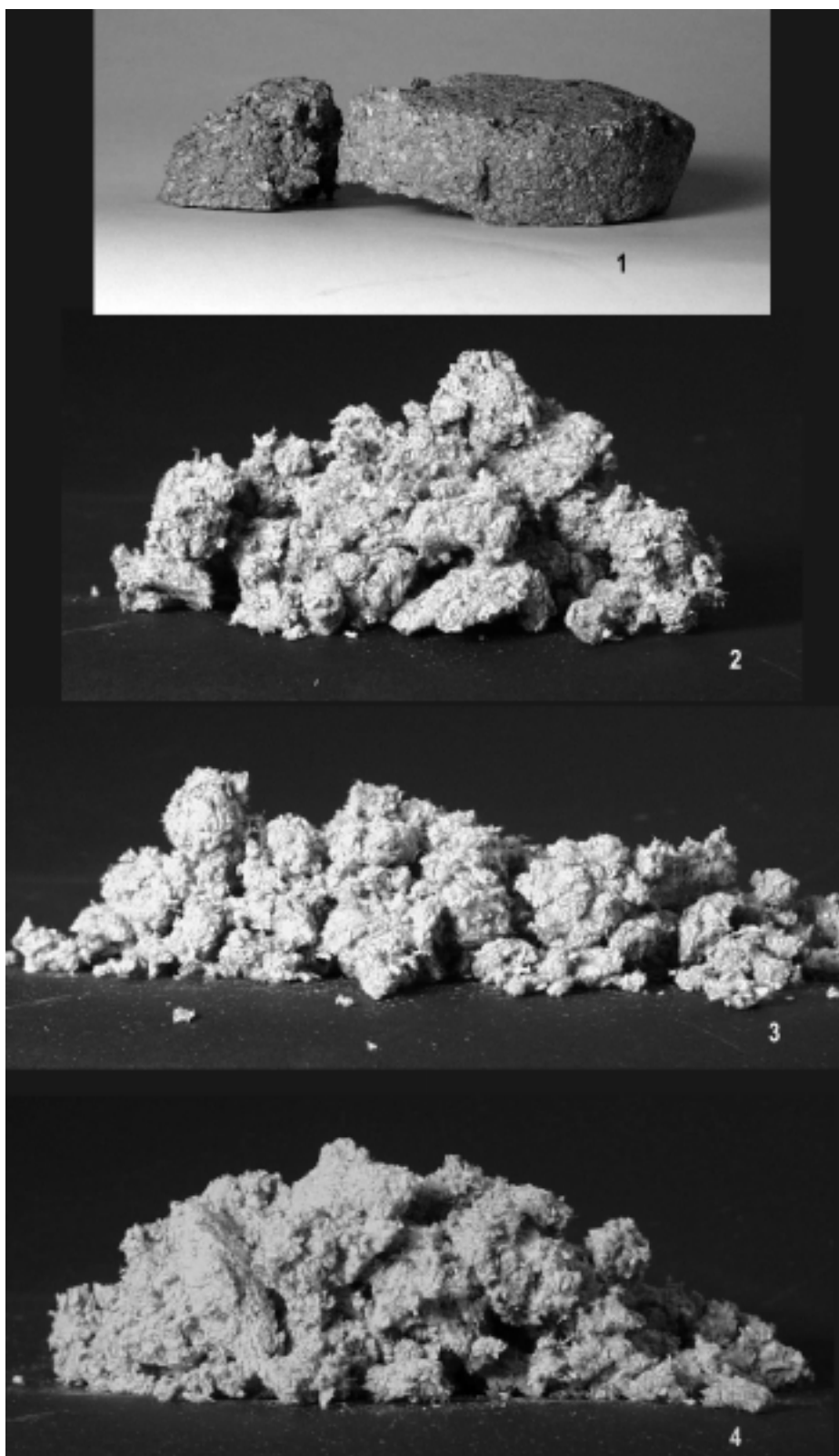
Det kan konkluderes at Perlite SC (behandlet), Herawool NF 040, Heraflax SF 040, Rockwool A-batt og Glasuld 39 har en lille vandopsugningsevne målt som opsuget vand i kg/(m<sup>2</sup> sugeflade) og et lille kapillaritetstal målt i kg/(m<sup>2</sup>·√s). Perlite (ubehandlet) og de tre papirisoleringsprodukter har alle stor vandopsugningsevne. Figur 9 viser udseendet af Ekofiber Vind (65 kg/m<sup>3</sup>) efter tørring ved 105°C. Prøven er delt i 4 lag, der er tørret og vejet hver for sig til bestemmelse af vandindholdet i hvert af lagene. Undersiden af det nederste lag, vist øverst i figur 9, har været 1 cm under vandoverfladen.



Figur 7 Opstilling til måling af vandopsugningsevne for løsfyldprodukt.



Figur 8 Opstilling til måling af vandopsugningsevne for sammenhængende materiale.



Figur 9 Ekofiber Vind ( $65 \text{ kg/m}^3$ ) efter tørring ved  $105^\circ\text{C}$ . Billede 1 viser de nederste 5 cm af prøven (fra 1 cm under vandoverfladen til 4 cm over), billede 2 viser laget 4-9 cm over vandoverfladen, billede 3 og 4 viser lagene 9-14 cm og 14-19 cm over vandoverfladen.

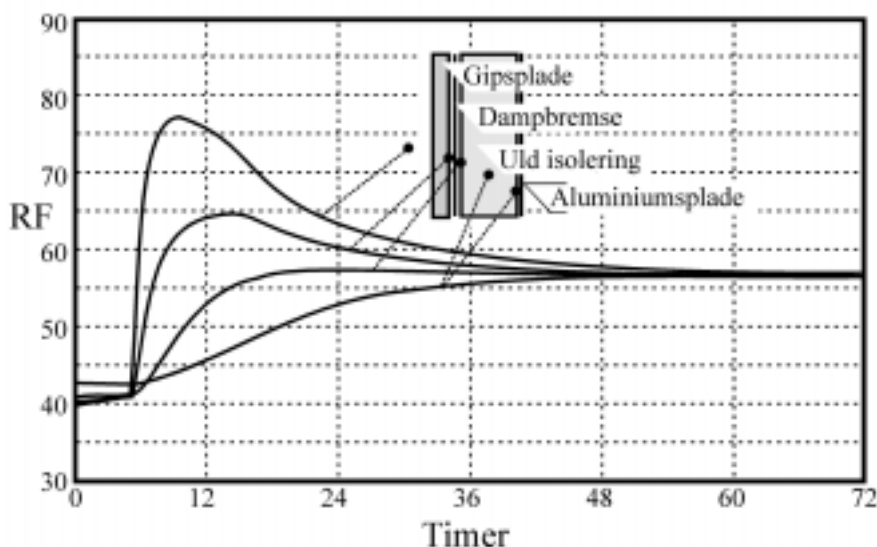
## 6. Fugtbufferevne

Porøse, absorberende materialer afgiver vanddamp til luften når RF falder, idet materialet reagerer mod den proces – sædvanligvis ventilation – der forårsager faldet i RF. Vanddamp absorberes igen i materialet når RF stiger. Denne proces er i dette projekt defineret som fugtbufferevne.

Der er ingen international enhed til beskrivelse af et materiales fugtbufferevne og heller ingen international standard for at måle denne evne.

I et lukket kammer er målt hvorledes forskellige vægkonstruktioner udjævner variationer i kammerluftens RF. Kammeret består af en lufttæt, rustfri stålkasse med et volumen på  $0.5 \text{ m}^3$  hvori et udstyr kan afgive vanddamp til eller kan optage vanddamp fra kammerluften. RF i kammerluften kontrolleres af interaktionen mellem den absorberende forsøgsvæg i kammeret og kammerluften.

Ved analyse af måleresultater kan det konkluderes, at absorberende isolering bag en dampbremse og en gipsplade ikke har nogen praktisk indflydelse på et hus' indeklima, hvis huset er ventileret som det anbefalede, dvs. 0.5 gang per time.

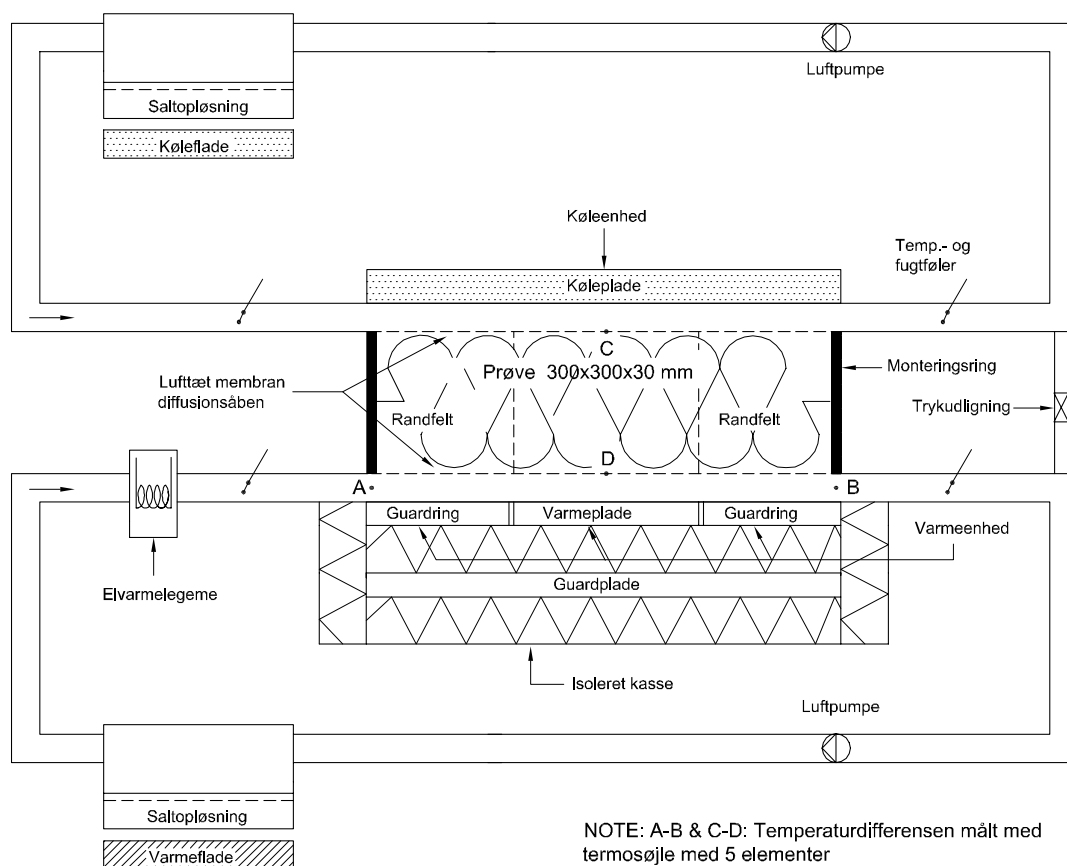


Figur 10 Udvikling af den relative fugtighed [%] igennem en væg efter pludselig tilførsel af vanddamp til rummet. Væggen består af en gipsplade, en dampbremse og uldisolering. Bagsiden er en aluminiumsplade. Testvæggen er forkonditioneret til ca. 42 %RF. Ved time 5 er testkammeret tilført vanddamp, svarende til at der uden væggen ville kondensere  $20 \text{ g/m}^3$  vand i kammeret. Testvæggen absorberer vanddampen så effektivt at RF aldrig overstiger 80 %. I begyndelsen er det gipspladen der absorberer vanddampen, hvorefter den langsomt videregives til den bagvedliggende uldisolering. Efter 60 timer er hovedparten af vandet oplagret i ulden og RF i rummet er dalet til 57 %. Uldisoleringen er derfor en effektiv fugtbuffer i dette lukkede kammer, men i et virkeligt rum ville naturlig ventilation have skiftet luften ud flere gange inden ulden er rigtig begyndt at absorbere vandet.

## 7. Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold

Varmeledningsevnen ( $\lambda$ -værdien) for flere alternative isoleringsprodukter er bestemt under forskellige fugtmæssige betingelser i et specielt konstrueret varmepladeapparat. Apparatet er illustreret i figur 11.

I et målefelt afsættes en effekt i en varmeplade under prøveemnets midte, der giver anledning til en varmestrøm gennem prøveemnet mod apparatets kolde side. Den kolde side holdes på ca. 14°C ved hjælp af væske fra et kølebad, medens den varme side holdes på ca. 28°C. Ved hjælp af termosøjler (seriekoblede termoelementer) og guard varmeplader i et randområde ved siden af målefeltets varmeplade, samt under denne, sikres samme temperatur disse steder som i selve målefeltet. Prøveemnets flade har størrelsen 300 x 300 mm og er 30 mm tyk. Selve målefeltet er på 160 x 160 mm. Disse dimensioner, og de nævnte guard-varmeplader, sikrer en praktisk taget endimensional varmestrøm gennem prøveemnet over målefeltet. Den i målefeltet afsatte effekt og temperaturdifferensen mellem den kolde og den varme side af prøveemnet måles, og derved kan prøveemnets varmeledningsevne bestemmes.



Figur 11 Pladeapparat til bestemmelse af varmeledningsevne for materialer, der påvirkes med fugtmæssig konditioneret luft.



Den specielle konstruktion ved dette varmepladeapparat gør, at fugtmæssigt konditioneret luft kan passere i spalter placeret mellem prøveemnet og den varme og kolde plade. Luften befugtes ved bestrygning af mættede saltopløsninger ( $\text{MgCl}_2$ ,  $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$  og  $\text{NaCl}$ ), hvis temperatur kan reguleres. Varmeledningsevnen kan således bestemmes under forskellige fugtmæssige betingelser. Et varmelegeme placeret ved luftindtaget til varmepladen tilfører en effekt, der modsvare varmetab ved passagen gennem slanger og henover saltopløsningen, hvor den ønskede fugtmæssige kondition opnås. Luftens temperatur og relative fugtighed måles ved indløb og udløb til både den kolde og den varme plade. Diffusionsåbne, vindspærrende membraner (Tyvek<sup>®</sup>) på begge sider af prøveemnet begrænser luftgennemgang gennem prøveemnet, så der ikke af denne årsag forekommer noget væsentligt særskilt varmetab. Tyvek's (lave) diffusionsmodstand er målt særskilt ved tør- og vådkopsforsøg, og værdierne ( $0,08\text{--}0,29 \text{ GPa}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s/kg}$ ) indregnes sidenhen som korrektioner ved bestemmelse af, hvilke fugtigheder prøveemnerne har været udsat for.

Varmeledningsevnen er først målt med luftstrøm, men uden fugtmæssig konditionering af luften i spalterne (rumkondition). De efterfølgende målinger er foretaget med luftstrøm under forskellige, stigende, fugtforhold. Der startes med fugtigheder, som ligger nær ved rumluftens (ca. 30-50 %RF). Derefter forøges fugtigheden i luftspalterne gradvist. Til sidst i prøvningsforløbet opstår der kondens i materialet.

Varmeledningsevnen er bestemt ved mindst 10 forskellige fugtpåvirkninger for hver af de alternative isoleringsprodukter: Ekofiber Vind, Heraflax SF 040, Herawool NF 040 (uden støttefibre), Perlite SC (behandlet), og for Rockwool A-Batts til sammenligning. Til yderligere sammenligning er gennemført målinger ved et mindre antal forskellige fugtpåvirkninger (dog mindst 3) for hvert af isoleringsprodukterne: Miljø Isolering og Isodan (begge produkter undersøges både i varianter med tilsætningsstoffer i form af salte, og uden).

Apparatets evne til at måle varmeledningsevnen er indledningsvis blevet kontrolleret uden luftspalte på den varme side ved at måle på et prøveemne af ekstruderet polystyren. Her blev den forventelige varmeledningsevne opnået indenfor  $\pm 1\%$  ved sammenligning med målinger i et konventionelt  $\lambda$ -apparat. Apparatets evne til at måle varmeledningsevnen, når der er luftspalter mellem prøveemnet og de kolde og varme plader, er herefter blevet afprøvet ved at måle på et prøveemne af ekstruderet polystyren – med og uden luftstrøm i spalterne, men uden fugtpåvirkning. Uden luftstrøm opnåedes en varmeledningsevne, der lå indenfor  $\pm 3\%$  af det forventelige, medens denne afvigelse var  $\pm 11\%$  med luftstrøm.

Alle målinger med de her undersøgte materialer er startet uden fugtpåvirkning. Ikke desto mindre er opnået resultater, både med og uden fugtpåvirkning, der lå 0-20% over det forventelige for de anvendte materialer. Målingerne i nærværende undersøgelse bør derfor ikke betragtes at give rigtige absolutte værdier for varmeledningsevnen – men kan give indikationer af fugtniveauets relative betydning.

Tabel 6 viser hvilke relative fugtigheder, der har været anvendt som påvirkning ved målinger på produktet Ekofiber Vind, hvilke beregnede relative fugtigheder dette modsvare mellem prøveemnet og Tyvek-membranerne på den kolde og den varme side, og endelig hvilke varmeledningsevner, der er målt. De samme resultater er illustreret i figur 12. De sidste målinger inden forsøgets afslutning er foretaget under forhold, hvor der formentlig har opbygget sig kondens i den kolde side af isoleringen, indenfor Tyvek-membranen. Under

disse forhold har den målte  $\lambda$ -værdi typisk haft svært ved at stabilisere sig på en endelig værdi.

Figur 13 viser de målte  $\lambda$ -værdier for alle materialer. Værdierne er optegnet som funktion af den gennemsnitlige relative fugtighed i spalterne på hver side af prøveemnet.

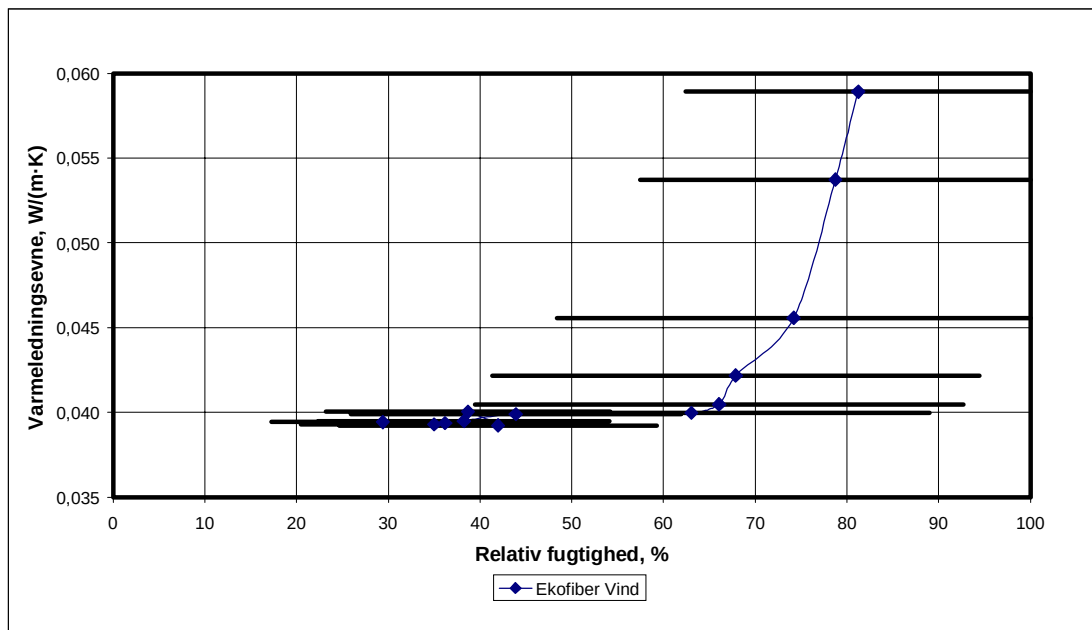
Varmeledningsevnen udviser for alle materialerne kun en lille afhængighed af fugtniveauet indtil dette når et vist højt niveau (gennemsnits-RF over ca. 75%). Derefter stiger varmeledningsevnen betydeligt – med op mod 50%. Men denne stigning må i virkeligheden formodes at være forårsaget af en ophobning af fugt som kondens i de dele af isoleringen, der ligger umiddelbart bag Tyvek-membranen på den kolde side. De fundne  $\lambda$ -værdier har således ikke nogen praktisk betydning i konstruktioner, hvor kondens ikke forekommer. Når der ses bort fra disse kondenssituationer, er den maksimale stigning i varmeledningsevnen på 5-10% pga. det hygroskopiske optag af fugt fra den omgivende luft.

*Tabel 6 Relative fugtigheder i luftspalterne omkring prøveemnet (Ekofiber Vind) og på prøveemnets overflader indenfor Tyvek-membranerne samt den målte varmeledningsevne.*

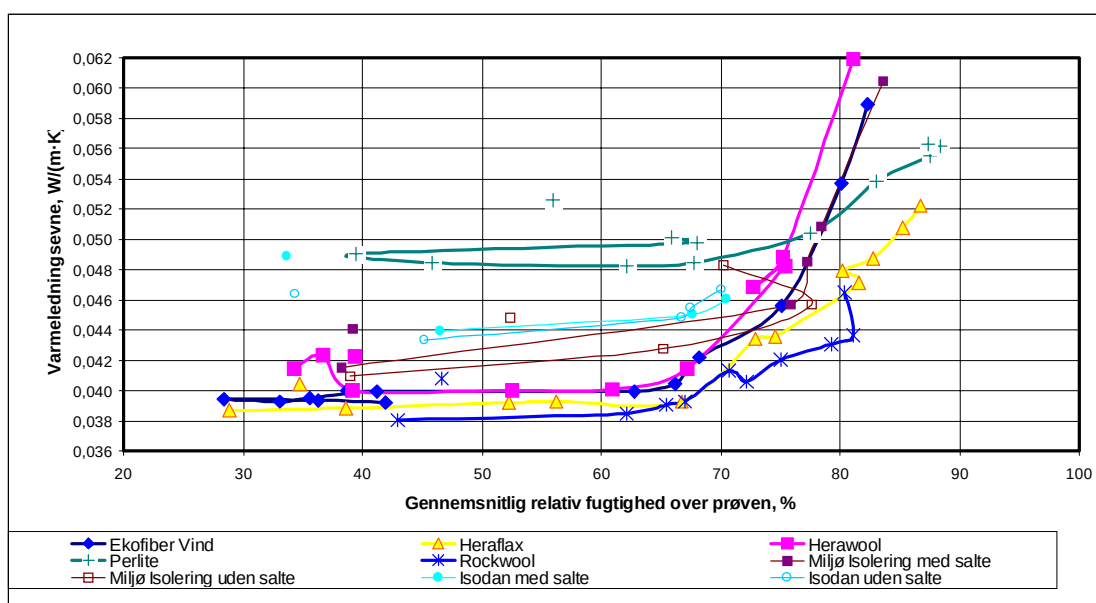
|                | Relativ fugtighed, RF |                     |                     |                       |                     | Varmelednings-<br>evne, $\lambda$ <sup>*</sup><br>[mW/(m·K)] |
|----------------|-----------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|---------------------|--------------------------------------------------------------|
|                | Varm<br>spalte<br>[%] | Varm<br>side<br>[%] | Kold<br>side<br>[%] | Kold<br>spalte<br>[%] | Middel<br>RF<br>[%] |                                                              |
| Uden luftstrøm | 23                    | 23                  | 54                  | 54                    | 39                  | 40,0                                                         |
| Med luftstrøm  | 25                    | 25                  | 59                  | 59                    | 42                  | 39,2                                                         |
|                | 20                    | 21                  | 51                  | 52                    | 36                  | 39,4                                                         |
|                | 19                    | 17                  | 42                  | 37                    | 28                  | 39,4                                                         |
|                | 26                    | 20                  | 50                  | 40                    | 33                  | 39,3                                                         |
|                | 30                    | 22                  | 54                  | 41                    | 36                  | 39,5                                                         |
|                | 36                    | 26                  | 62                  | 46                    | 41                  | 40,0                                                         |
|                | 35                    | 37                  | 89                  | 90                    | 63                  | 40,0                                                         |
|                | 40                    | 39                  | 93                  | 92                    | 66                  | 40,5                                                         |
|                | 46                    | 41                  | 94                  | 91                    | 68                  | 42,2                                                         |
|                | 63                    | 48                  | 100                 | 87                    | 75                  | 45,6 <sup>**</sup>                                           |
|                | 71                    | 57                  | 100                 | 89                    | 80                  | 53,7 <sup>**</sup>                                           |
|                | 76                    | 62                  | 100                 | 89                    | 82                  | 58,9 <sup>**</sup>                                           |

<sup>\*</sup>: Målingerne med det særlige  $\lambda$ -apparat, der er anvendt i nærværende undersøgelse, skal opfattes som relative målinger, der ikke kan betragtes at give sande absolutte værdier for materialernes varmeledningsevne, men som giver indikationer af fugtniveauets betydning.

<sup>\*\*</sup>:  $\lambda$ -værdien konvergerer ikke mod en bestemt værdi – formentlig pga. kondensdannelse.



Figur 12  $\lambda$ -værdi for Ekofiber Vind optegnet som funktion af den relative fugtighed (RF) beregnet for prøveemnets overflader indenfor Tyvek-membranerne. Hver vandret linie repræsenterer én måling, og går fra RF ved den varme side til RF ved den kolde side.



Figur 13  $\lambda$ -værdi for alle de afprøvede materialer optegnet som funktion af den gennemsnitlige relative fugtighed i spalterne på de to sider af prøveemnet.

## 8. Egenkonvektion i fåreuld og papirisolering

Der er gennemført målinger for at undersøge naturlig konvektion i forholdsvis tykke isoleringskonstruktioner f.eks. ydervægge, hvis der anvendes et af de to alternative isoleringsmaterialer fåreuld (produktet Herawool BP 040 med støttest fibre,  $28 \text{ kg/m}^3$ ) og papirisolering (Ekofiber Vind,  $65 \text{ kg/m}^3$ ). Det har været formålet at bestemme størrelsesordenen af denne konvektion ved at fastlægge i hvilket omfang, konvektionen indvirker på den samlede varmetransmission (ledning, konvektion og stråling).

Bestemmelse af konvektion i isoleringsmaterialer foretages vha. et nyudviklet "konvektionsapparat" (Dyrbøl, 1998), se figur 14, 15 og 16. Apparatet måler varmestrømmen i forskellige sektioner i isoleringsmaterialet, når en "væg" med materialet befinder sig i forskellige positioner og under forskellige temperaturforhold. Apparatets konstruktion følger princippet for et guarded hot plate apparat til måling af varmeledningsevne (ISO8302, 1991) – dvs. med en varmeplade placeret på den ene side af prøveemnet.

Konvektionsapparatet har et totalt måleareal på  $1,00 \times 3,00 \text{ m}^2$ , og isoleringstykkelsen kan gå op til 0,50 m (i nærværende forsøg er anvendt tykkelsen 0,36 m for fåreuld og 0,40 m for papirisolering). Varmepladen er delt op i 12 enkelte sektioner, som vist i figur 14b, der gør det muligt at måle varmestrømmen igennem enkelte områder af prøveemnet.

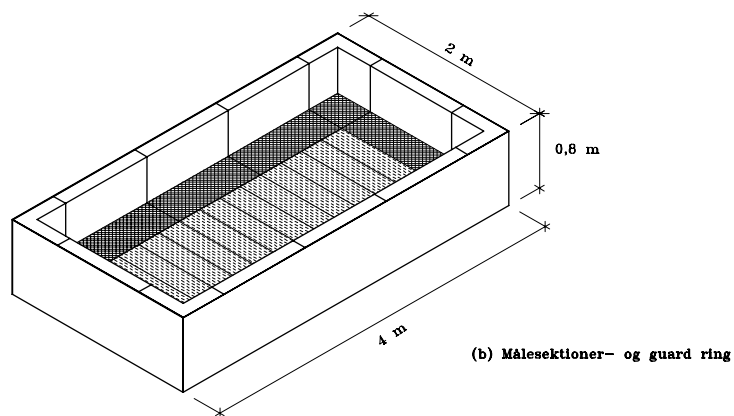
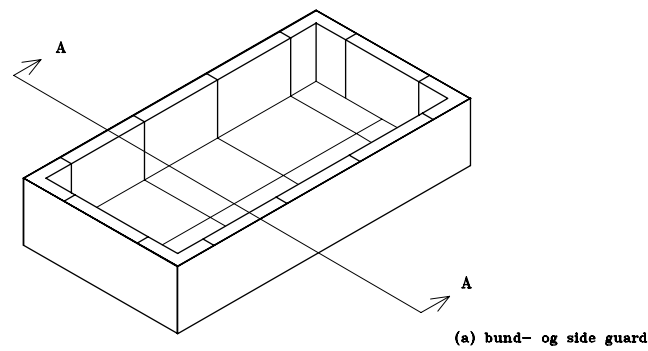
Apparatet er placeret i et koldt klimakammer med temperaturer ned til  $-10^\circ\text{C}$ , der udgør den kolde side af apparatet, idet der er placeret en plade af krydsfinér som låg over isoleringen. Apparatet er ophængt på en måde, der gør det muligt at placere det i det kolde kammer i en lodret position, eller vandret med varmepladen foroven eller forneden.

Varmepladens enkelte målesektioner består af en glasplade med en elektrisk ledende belægning på den ene side. Varmepladerne styres individuelt og søges holdt på samme konstante temperatur, samtidig med at den tilførte effekt til pladerne kan bestemmes.

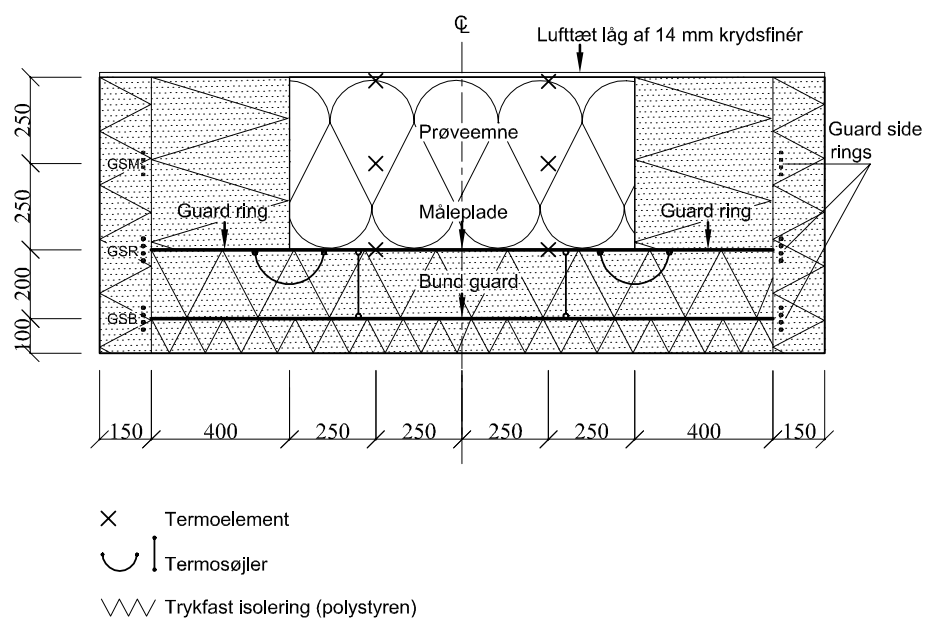
For at sikre en endimensional varmestrøm igennem prøveemnet er konvektionsapparatet konstrueret med et system af guard-varmeplader ved siden af måleområdet, som holdes på samme temperatur som målepladerne (se figur 15).

Ved målingerne er konvektionsapparatet først anbragt med isoleringsmaterialet vandret med varmepladerne øverst, således at naturlig konvektion gennem prøveemnet undgås, og varmeledningsevnen af prøveemnet ved hver af de 12 måleplader er bestemt. Denne måling er reference i forhold til de efterfølgende målinger, hvor konvektionsapparatet drejes til hver af to lodrette stillinger med henholdsvis måleplade 12 og måleplade 1 øverst. Varmepladerne holdes på en konstant temperatur på ca.  $30^\circ\text{C}$ , og omgivelserne på ca.  $-10^\circ\text{C}$ , dvs. en temperaturforskel på ca. 40 K over prøven.

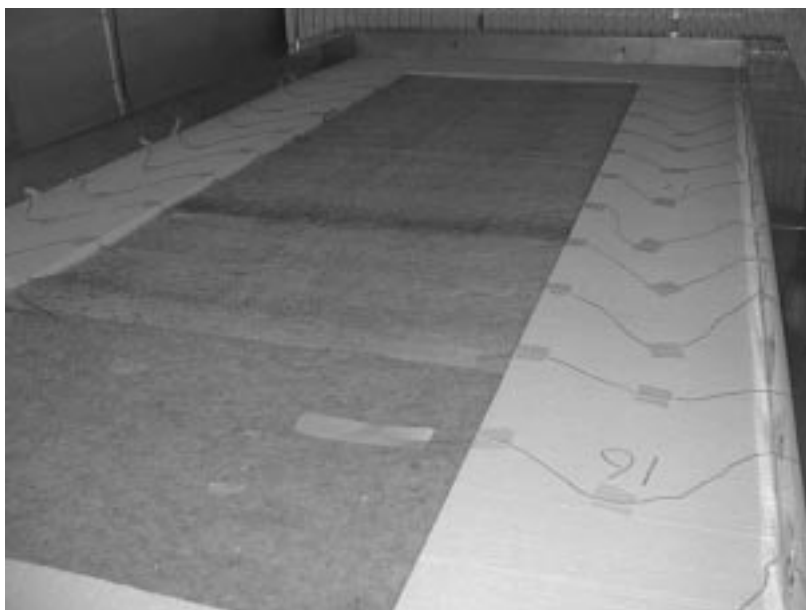
Forholdet mellem varmeledningsevnen,  $\lambda$ , målt med egenkonvektion i materialet (i en af de lodrette stillinger) og varmeledningsevnen målt, når der ikke er egenkonvektion (målt i vandret stilling med varmepladerne øverst) betegnes Nusselt-tallet,  $Nu$ , og anvendes til at indikere egenkonvektionens betydning.



Figur 14 Principskitse af konvektionsapparatet. (a) viser placeringen af bund- og sideguards, og (b) viser placeringen af de tolv målesektioner (med lyst raster) og guard-ring (mørk), der indfatter målearealet i samme plan som målesektionerne.



Figur 15 Lodret tværsnit A – A i konvektionsapparat. Placeringen af tværsnittet er vist i figur 14. Mål i mm.



*Figur 16 Foto af målekasse i konvektionsapparatet ilagt fåreuld, men uden krydsfinérlåg. Man ser guard-isoleringen af ekstruderet polystyren i et område udenom.*

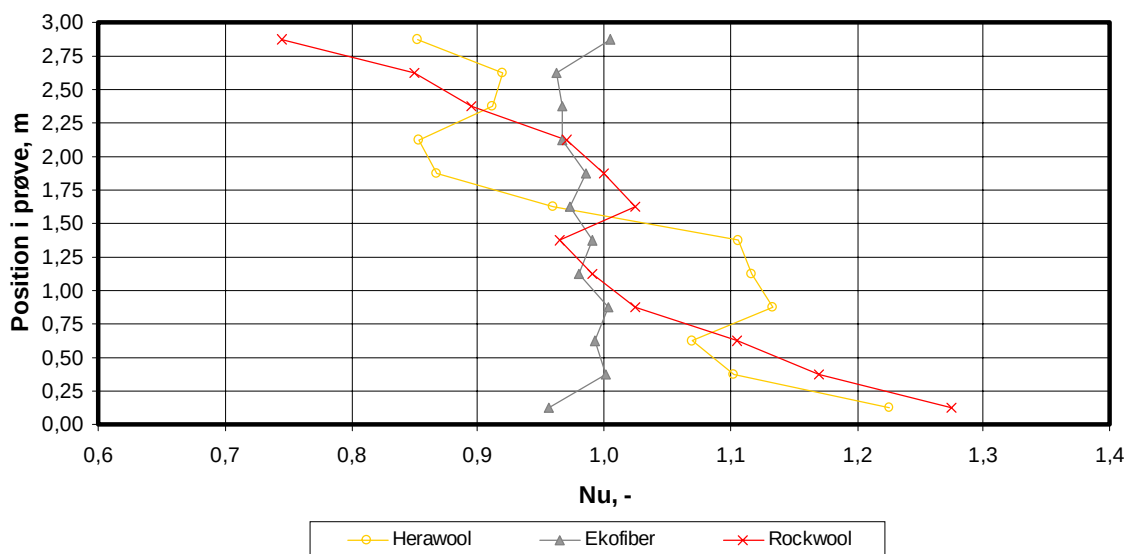
De beregnede  $Nu$ -tal i fåreuld og papirisolering med målekassen i lodret position vises i figur 17. I samme figur er til sammenligning vist tilsvarende resultater for mineraluld (Rockwool Batts,  $30,5 \text{ kg/m}^3$ ) målt tidligere under lignende forhold i samme opstilling men i tykkelsen  $0,50 \text{ m}$  (Dyrbøl, 1998).

Der er tillige bestemt luftpermeabilitet for de to alternative isoleringsprodukter, og ved hjælp heraf er Nusselt-tallene beregnet med programmet CHConP (fra Chalmers Tekniska Högskola). Resultatet vises i figur 18.

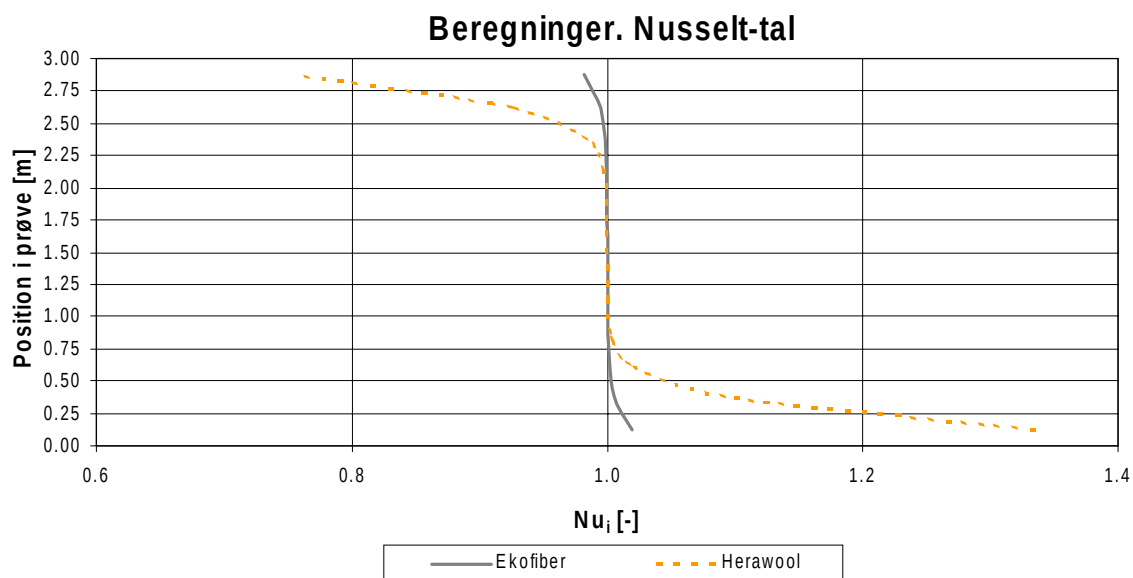
Luftstrømmen (konvektionen) i materialerne, når målekassen er lodret stillet, er generelt således at luften stiger op gennem materialet langs den varme side af væggen og falder ned langs den kolde side. Set fra den varme side forårsager det et ekstra varmetab (varmetab) fra de nederste sektioner af varmepladen, hvor den kolde luft kommer ind gennem materialet, og der fås et mindre varmetab fra den øverste del, idet forvarmet luft her tilføres gennem materialet nedefra langs varmepladen. Derfor fås S-formede afbøjninger af  $Nu$ -tallets forløb op gennem væggen. Set fra den varme side er varmetabet altså større fra de nedre dele af væggen og mindre fra de øvre dele, end hvis der kun var varmeledning i isoleringsmaterialet ( $Nu = 1,0$ ).

Af figur 17 ses, at blandt de her undersøgte produkter er de lokale  $Nu$ -tal mest påvirket af konvektionen i mineraluld og fåreuld, medens denne påvirkning synes noget mindre for papirisolering. Den gennemsnitlige værdi af  $Nu$ -tallene ( $\overline{Nu}$ ), regnet over højden, er i alle tilfælde tæt på  $1,00$ . Afvigelsen fra  $\overline{Nu} = 1,00$  ligger indenfor usikkerheden på bestemmelsen af  $Nu$ -tallet i konvektionsapparatet, der er skønnet til ca. 3% (Dyrbøl, 1998).

På basis af målingerne i konvektionsapparatet konkluderes, at luftstrømninger i isoleringsmaterialerne fåreuld og papirisolering nok har en målelig termisk effekt, men at det for disse materialer ikke giver anledning til nogen væsentlig forøgelse af den samlede varmestrøm.



Figur 17 Målte Nusselt-tal i forskellige positioner i fåreuld (Herawool), papirisolering (Ekofiber) og mineraluld.



Figur 18 Beregnede Nusselt-tal for fåreuld (Herawool) og papirisolering.

### Anerkendelse

Susanne Dyrbøl, Rockwool International A/S har velvilligt bistået med hjælp til måling af luftpermeabilitet for fåreuld og papirisolering og gennemførelse af beregninger med CHConP.

## 9. Beregnede fugtforhold i konstruktioner

Den fugtmæssige ydeevne af forskellige konstruktioner er blevet analyseret med den én-dimensionale beregningsmodel MATCH for beregning af koblet fugt og varmetransport. Analysen vedrører både traditionelle væg- og tagudforminger med de alternative isoleringsmaterialer, og nogle alternative udformninger, der er anvist af leverandører af alternative isoleringsmaterialer. Analysen omfatter brug af de alternative isoleringsprodukter: papirisolering, hør og perlite, hvoraf de første to er meget hygroskopiske, medens perlite kun er meget svagt hygroskopisk. Til sammenligning er tillige gennemført beregninger af de samme konstruktioner isoleret med glas- og stenuld.

For isoleringsmaterialer, der indgår i den beregningsmæssige analyse, er materialedata om sorption og damppermeabilitet taget fra de i projektet indgående forsøg. Oplysninger om øvrige hygrotermiske egenskaber for isoleringsmaterialerne og egenskaber for andre byggematerialer end isolering, er taget fra MATCH's materialebibliotek.

Alle beregninger er gennemført med en indendørs temperatur på 20°C og et indeklima med en moderat fugttilvækst, som i en bolig (3 g/m<sup>3</sup>). Udeklimaet er beskrevet ved timeværdierne i det danske referenceår, og alle ikke-vandrette konstruktioner er regnet med en orientering mod nord. Der er beregnet en tre-års periode fra en 1. oktober, og resultaterne gives for det sidste af de tre år. For det sidste beregningsår bestemmes antallet af dage, hvor den relative fugtighed er større end 85%, og den daglige gennemsnitstemperatur samtidig er mindst 5°C. Antallet af dage med sådanne kritiske forhold er opgjort for de yderste 0-10 mm, 10-30 mm og 30-50 mm af isoleringen (benævnt i denne rækkefølge som henholdsvis "10 mm", "20 mm" og "20 mm" i nedenstående resultatoversigt).

Der er undersøgt i alt fire forskellige varianter af ydervægge: To vægge af tegl/porebeton (med og uden ventilationsspalte mellem isolering og formur), og to træskeletvægge (med dampspærre,  $Z = 375 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$  eller dampbremse,  $Z = 9,7 \text{ GPa} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s/kg}$ ). Væggene af tegl/porebeton har 125 mm isolering, medens den samlede isoleringstykkelse i træskeletvæggene er 180 mm. Endvidere er der regnet på i alt seks forskellige varianter af tagkonstruktioner: Et uventileret fladt tag, et hældningstag med diffusionsåbent undertag, og et ventileret loftsrum med fladt loft og skrå tagbeklædning - alle tagkonstruktioner har enten været med dampspærre eller med en mere diffusionsåben dampbremse. Både det flade tag og hældningstaget har 200 mm isolering, medens der er 250 mm isolering i loftsrummet.

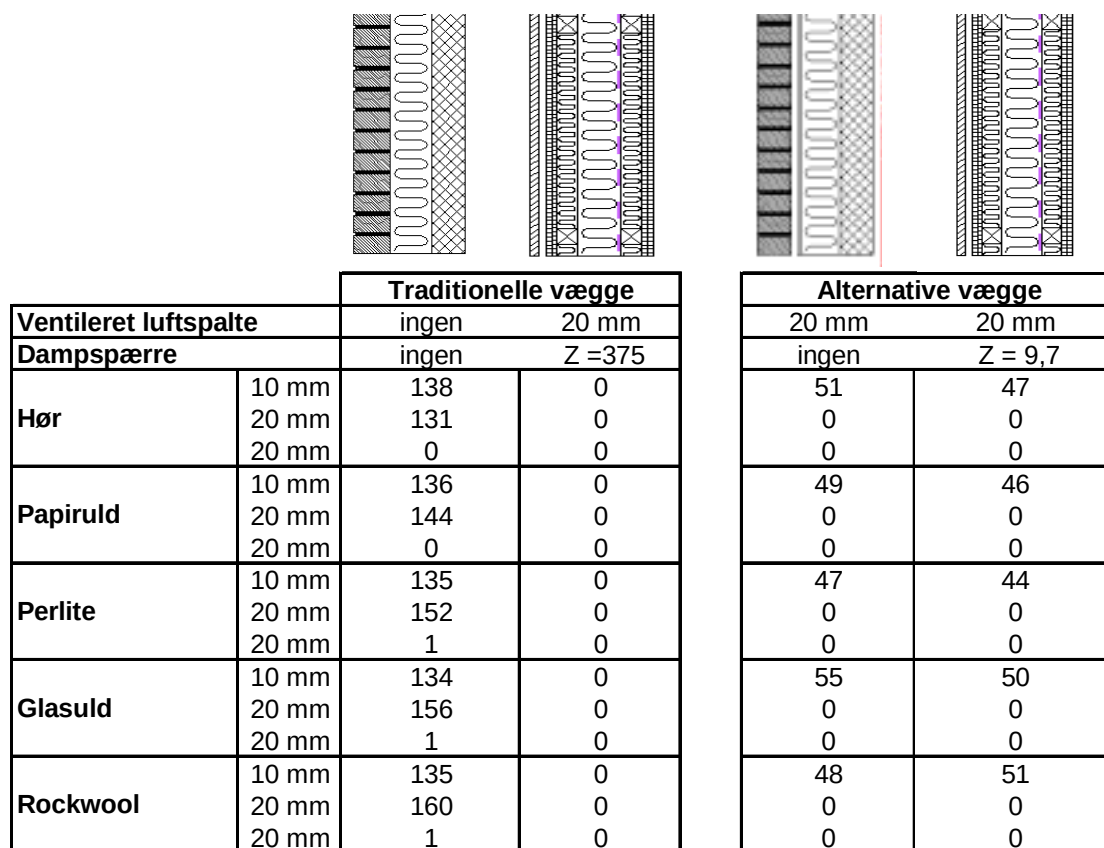
En resultatoversigt vises i tabelform i figur 19 (vægge) og figur 20 (tage).

De udførte beregninger synes at vise, at fugtforholdene i konstruktioner med alternative isoleringsmaterialer er på stort set samme niveau, som hvis mineraluld anvendes. Dog bliver perioden med kritiske fugttilstande i et uventileret fladt tag væsentligt længere når der anvendes organiske isoleringsmaterialer, end hvis isoleringsmaterialet er uorganisk. I mange konstruktioner optræder der, uanset valget af isoleringsmateriale, perioder med høje fugtigheder (>85% RF) yderst i isoleringen, og materialerne må kunne tåle dette. Med de organiske varianter af de alternative isoleringsmaterialer indbygges altid noget fugt, og det kan derfor være hensigtsmæssigt, at disse konstruktioner er åbne for fugttransport udadtil, fx ved at der udvendigt findes en ventileret luftspalte. Det uorganiske alternative isoleringsprodukt, perlite, synes at have samme hygrotermiske ydeevne som mineraluld.



Beregningerne viser som regel, at fugtindholdene er lavere i konstruktioner, hvor der er anvendt en dampspærre af fx plastfolie, end hvis der anvendes en mindre diffusionstæt dampbremse – dog ikke for det uventilerede flade tag. Supplerende beregninger til de her i hovedrapporten viste, indikerer at med et mere fugtigt indeklima (fugttilvækst  $5 \text{ g/m}^3$ ) fordobles varigheden af perioden med kritiske fugtindhold i lette ydervægskonstruktioner med dampbremsere med begrænset diffusionstæthed, medens der i tilsvarende konstruktioner med dampspærre af plastfolie ikke er perioder med kritiske fugtforhold i isoleringen.

Det skal nævnes, at beregningerne er udført uden hensyntagen til fugttransport på væskeform, og at der ikke er taget hensyn til slagregn. Det er derfor ikke muligt ud fra beregningerne at sige noget om, hvorvidt isoleringsmaterialerne bliver opfugtet på grund af regn og kapillarsugning gennem de udvendige bygningsdele. Det skal også nævnes, at der er udtrykt usikkerhed omkring muligheden for med de beregningsmetoder, der er til rådighed i dag, at tage alle relevante transportprocesser i regning, når der regnes på fugtforhold i konstruktioner med organisk isolering. Der kan muligvis forekomme en såkaldt ”ikke-Fick’sk” diffusionstransport, der kan forekomme andre fugttransporter, fx på væskeform, eller sorptionslignevægten kan være forsinket. Disse forhold vil blive undersøgt i efterfølgende projekter.



Figur 19 Antal dage med kritiske fugtforhold ( $RF > 85\%$  og temperatur  $> 5^\circ\text{C}$ ) i de yderste 0-10, 10-30 og 30-50 mm af isoleringen i de viste ydervægge.



|                 |         | Fladt tag |         | Hældningstag |         | Loftsrum |         |
|-----------------|---------|-----------|---------|--------------|---------|----------|---------|
| Dampspærre      |         | Z = 375   | Z = 9,7 | Z = 375      | Z = 9,7 | Z = 375  | Z = 9,7 |
| <b>Hør</b>      | x-finér | 149       | 102     |              |         |          |         |
|                 | 10 mm   | 173       | 114     | 43           | 65      | 44       | 52      |
|                 | 20 mm   | 80        | 60      | 0            | 0       | 0        | 3       |
|                 | 20 mm   | 13        | 0       | 0            | 0       | 0        | 0       |
| <b>Papiruld</b> | x-finér | 161       | 107     |              |         |          |         |
|                 | 10 mm   | 199       | 126     | 44           | 62      | 41       | 51      |
|                 | 20 mm   | 193       | 77      | 0            | 0       | 1        | 4       |
|                 | 20 mm   | 57        | 0       | 0            | 0       | 0        | 0       |
| <b>Perlite</b>  | x-finér | 102 *     | 82      |              |         |          |         |
|                 | 10 mm   | 108       | 94      | 44           | 67      | 51       | 57      |
|                 | 20 mm   | 68        | 71      | 0            | 10      | 3        | 11      |
|                 | 20 mm   | 66        | 30      | 0            | 0       | 0        | 0       |
| <b>Glasuld</b>  | x-finér | 107 *     | 82      |              |         |          |         |
|                 | 10 mm   | 106       | 96      | 45           | 66      | 56       | 61      |
|                 | 20 mm   | 64        | 70      | 0            | 8       | 4        | 7       |
|                 | 20 mm   | 62        | 24      | 0            | 0       | 0        | 0       |
| <b>Rockwool</b> | x-finér | 30 *      | 84      |              |         |          |         |
|                 | 10 mm   | 81        | 99      | 45           | 65      | 56       | 61      |
|                 | 20 mm   | 63        | 70      | 1            | 11      | 7        | 14      |
|                 | 20 mm   | 62        | 30      | 0            | 0       | 0        | 0       |

Figur 20 Antal dage med kritiske fugtforhold ( $RF > 85\%$  og temperatur  $> 5^{\circ}\text{C}$ ) i de yderste 0-10, 10-30 og 30-50 mm af isoleringen i de viste tagkonstruktioner.

\*: Den relative fugtighed i krydsfinér over uorganisk isolering er i alle tilfælde ganske konstant med en værdi tæt på 85%. Det er derfor ret tilfældigt hvor mange dage, værdien efter ovenstående kriterium kan betragtes at være kritisk, og den tilsyneladende forskel, de tre materialer imellem, må ikke tillægges nogen signifikans.

## 10. Litteratur

Dyrbøl, S (1998). *Heat Transfer in Rockwool. Modelling and Method of Measurement*. Ph.D. thesis. Department of Buildings and Energy, DTU.

ISO 8302 (1991). *Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus*. International. Organization for Standardization.

prEN ISO 12572 (1998). *Hygrothermal performance of building materials and products - Determination of water vapour transmission properties*. CEN/TC89/WG10 N230. European Committee for Standardization.

## 11. Rapporter fra projektet

Hansen, E.J. de Place (1999): *Produktionsprocesser og hygrotermiske egenskaber for isoleringsprodukter - leverandør/producentoplysninger*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No.57, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.

Hansen, E.J. de Place og Hansen, K.K. (1999): *Sorptionsisotermer*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No.58, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.

Hansen, E.J. de Place og Hansen, K.K. (1999): *Vanddamppermeabilitet (kopforsøg)*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No.59, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.

Hansen, E.J. de Place; Hansen, K.K. and Padfield, T. (1999): *Measured moisture properties for alternative insulation products*. Proc. 5<sup>th</sup> Symp. on Building Physics in the Nordic Countries, Göteborg, Sweden, Aug 24-26, 1999. Chalmers University of Technology. Vol. 1, pp.121-128.

Hansen, K.K. og Hansen, E.J. de Place (1999): *Kapillarsugning*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No.60, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU.

Hansen, K.K.; Hansen, E.J. de Place; Padfield, T.; Rode, C. og Kristiansen, F. (1999): *Hovedrapport for Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Serie R No.62, Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM) og Rapport SR-0003, Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU.

Kristiansen F. og Rode C. (1999): *Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Rapport SR-0004, Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU.

Kristiansen F. og Rode C. (1999): *Egenkonvektion i fåreuld og papirisolering*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Rapport SR-0005, Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU.

Padfield T. (1999): *Humidity buffering of the indoor climate by absorbent walls*. Proc. 5<sup>th</sup> Symp. on Building Physics in the Nordic Countries, Göteborg, Sweden, Aug 24-26, 1999. Chalmers University of Technology. Vol. 2, pp.637-644.

Padfield T. (1999): *Humidity buffering of interior spaces by porous, absorbent insulation*. Part of *Hygrothermal properties of alternative insulation materials*. Series R No.61, Dept. of Structural Engineering and Materials (BKM), DTU.

Rode C. og Rasmussen, N.T. (1999): *Beregnete fugtforhold i konstruktioner*. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Rapport SR-0006, Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU.

Rode C., Kristiansen F. and Rasmussen, N.T. (1999): *Investigation of the hygrothermal performance of alternative insulation materials*. Proc. 5<sup>th</sup> Symp. on Building Physics in the Nordic Countries, Göteborg, Sweden, Aug 24-26, 1999. Chalmers University of Technology. Vol. 1, pp.137-144.

INSTITUT FOR BÆRENDE KONSTRUKTIONER OG MATERIALER  
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET

Department of Structural Engineering and Materials  
Technical University of Denmark, DK – 2800 Lyngby

SERIE R  
(Tidligere: Rapporter)

- R 42 OLSEN, DAVID HOLKMANN: Concrete Fracture and Crack Growth  
A Fracture Mechanocs Approach 1998
- R 43 HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Determination of te Fracture Energy of  
Concrete- Comparison of te TPBT and theWST Method 1998
- R 44 NIELSEN, LAUGE FUGLSANG: Modified Dugdale cracks and Fictitious cracks
- R 45 CHRISTIANSEN, MORTEN BO: Crack Tip Stress Field Modelling 1998
- R 46 JENSEN, MEJLHEDE OLE: Clinker mineral hydration at  
reduced relative humidities
- R 47 JENSEN, MEJLHEDE OLE: Influence of temperature on autogenous deformation  
and RH-change in hardening cement paste
- R 48 HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Holdbarhed af fiberarmeret beton og revnet  
beton. 1998.
- R 49 LANGE-HANSEN, P.: Comparative Study of Upper Bound Methods for the  
Calculation of Residual Deformations after Shakedown. 1998.
- R 50 KELLEZI, LINDITA: Dynamic Soil-Structure-Interaction. Transmitting Boundary  
for Transient Analysis. 1998.
- R 51 MEJLHEDE JENSEN, OLE: Chloride ingress in cement paste and mortar measured  
by Electronic Probe Micro Analysis. 1999
- R 52 KLENZ LARSEN, POUL: Desalination of painted brick vaults. 1999
- R 53 GERMAN HAGSTEN, LARS. GUDMAN-HØYER, TIM. ZENKE HANSEN, LARS  
OG NIELSEN, M.P: Eksperimentel bestemmelse af teglbjælkens bæreevne. 1999
- R 54 PADFIELD, TIM: The Role of Absorbent Building Materials in moderating changes  
of Relative Humidity. 1999
- R 55 TEOH, B.K., HOANG, L.C. OG NIELSEN, M.P.: Shear Strength of Concrete I-  
Beams- Contributions of Flanges. 1999
- R 56 WEIQING, LIU. NIELSEN, M.P. DAJUN, DING: Experimental Study on the Shear  
Transfer Across Cracks in Reinforced Concrete. 1999
- R 57 HANSEN, ERNST JAN DE PLACE: Produktionsprocesser og hygrotermiske  
egenskaber for isoleringsmaterialer - Leverandør/producentoplysninger. Del af  
Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternativ isoleringsmaterialer. 1999
- R 58 HANSEN, ERNST JAN DE PLACE OG HANSEN, KURT KIELSGAARD:  
Sorptionisotermer. Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative  
isoleringsmaterialer. 1999
- R 59 HANSEN, ERNST JAN DE PLACE OG HANSEN, KURT KIELSGAARD:  
Vanddamppermeabilitet (kopforsøg). Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af  
alternative isoleringsmaterialer. 1999
- R 60 HANSEN, KURT KIELSGAARD OG HANSEN, ERNST JAN DE PLACE:  
Kapillarsugning. Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative  
isoleringsmaterialer. 1999
- R 61 PADFIELD, TIM: Humidity buffering of interior spaces by porous, absorbent  
insulation. Part of Hygrothermal properties of alternative insulation materials. 1999