

# EGENKONVEKTION I FÅREULD OG PAPIRISOLERING

Del af Varme- og fugttekniske undersøgelser  
af alternative isoleringsmaterialer



**DTU**



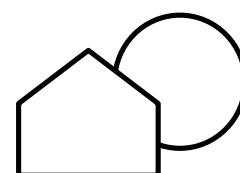
FINN KRISTIANSEN  
CARSTEN RODE

**SAGSRAPPORT  
SR-0005**

**1999**

ISSN 1396-402x

INSTITUT FOR BYGNINGER OG ENERGI  
DANMARKS TEKNISKE UNIVERSITET



**IBE**

# EGENKONVEKTION I FÅREULD OG PAPIRISOLERING

## Forord

Den foreliggende rapport er en del af rapporteringen 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 Bygninger og Energi (IBE) og Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer (BKM), DTU. De øvrige rapporter omhandler

- Hovedrapport (BKM & IBE)
- Produktionsprocesser og hygrotermiske egenskaber for isoleringsmaterialer - leverandør/producentoplysninger (BKM)
- Sorptionsisotermer (BKM)
- Vanddamppermeabilitet (BKM)
- Kapillarsugning (BKM)
- Fugtbuffervirkning (BKM)
- Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold (IBE)
- Beregnede fugtforhold i konstruktioner (IBE)

Den foreliggende rapport omhandler målinger af egenkonvektion i fåreuld og papirisolering.

Lyngby, december 1999  
Finn Kristiansen

## Sammenfatning

Egenkonvektionen for to typer alternative isoleringsmaterialer er målt i Institut for Bygninger og Energis konvektionsapparat. Der er målt på en type fåreuld (Herawool) med støttefibre fra firmaet Heraklith og en type papirisolering (Ekofiber Vind) fra Ekofiber. Den samlede prøvetykkelse af fåreulden har været 0,36 m og 0,40 m for papirisoleringen. Densiteten af fåreulden ved målingerne har været  $28 \text{ kg/m}^3$  og for papirisoleringen  $65 \text{ kg/m}^3$ . Temperaturen på den varme side af prøveemnet har været  $30^\circ\text{C}$  og på den kolde side ca.  $-10^\circ\text{C}$ , altså en temperaturdifferens over prøveemnet på ca. 40 K.

Målingerne på de to alternative isoleringsmaterialer er sammenholdt med tidligere målinger på et traditionelt isoleringsmateriale (Rockwool).

Der er foretaget beregninger af konvektionsforholdene i de to materialer vha. et computerprogram CHConP. Målingerne er sammenholdt med disse beregninger.

## Indholdsfortegnelse

	side
Forord .....	1
Sammenfatning .....	2
Indholdsfortegnelse .....	3
1. Formål .....	4
2. Fremgangsmåde.....	4
2.1 Forsøgsopstilling .....	4
2.2 Konstruktion af konvektionsapparat .....	4
2.3 Måleplader og varm side i apparatet.....	7
2.4 Apparatets kolde side .....	9
2.5 Guard-sektionerne i apparatet.....	9
2.6 Forsøgsbeskrivelse.....	9
2.7 Teori.....	10
2.8 Computerberegninger .....	11
3. Materialer.....	11
4. Måleresultater .....	11
4.1 Fåreuld.....	12
4.2 Diskussion.....	16
4.3 Papirisolering .....	17
4.4 Sammenfatning.....	22
5. Konklusion.....	23
6. Litteratur.....	24
Appendix A .....	25
Appendix B.....	27

# EGENKONVEKTION I FÅREULD OG PAPIRISOLERING

## 1. Formål

Kravet til en lavere U-værdi for boliger er steget igennem de sidste ca. 20 år. Da de forskellige isoleringsmaterialer stort set har samme varmeledningsevne, må isoleringstykkelsen og dermed konstruktionen blive større for at kunne opfylde kravene til U-værdien. Ved større tykkelser bliver den naturlige konvektion i isoleringsmaterialer med en åben luftporestruktur en større faktor som vil forøge varmeledningsevnen og dermed energiforbruget.

Formålet med de nærværende målinger er at fastlægge betydningen af naturlig konvektion i forholdsvis tykke isoleringskonstruktioner som f.eks. ydervægge, hvor de to alternative isoleringsmaterialer fåreuld og papirisolering vil blive anvendt. Det er ønsket at bestemme i hvilket omfang konvektionen indvirker på den samlede varmetransmission (ledning, konvektion og stråling) gennem konstruktioner med tyk isolering.

Af de alternative isoleringsmaterialer fåreuld, hør, papirisolering og perlite der undersøges i projektet "Varme- og fugttekniske undersøgelser af alternative isoleringsmaterialer", er det valgt at undersøge konvektion i fåreuld og papirisolering af følgende grunde: I projektet skulle egenkonvektion undersøges for to forskellige isoleringsmaterialer. Fåreulden er mere porøs end hør, da densiteten af fåreulden er mindre. Ved at måle på fåreuld, så fås konvektionsbidraget samt en formodet øvre grænse for bidraget for hør. Papirisoleringen er valgt fordi den er det mest anvendte alternative isoleringsmateriale på markedet p.t., og det har en helt anden struktur end fåreuld og hør samt en højere densitet.

## 2. Fremgangsmåde

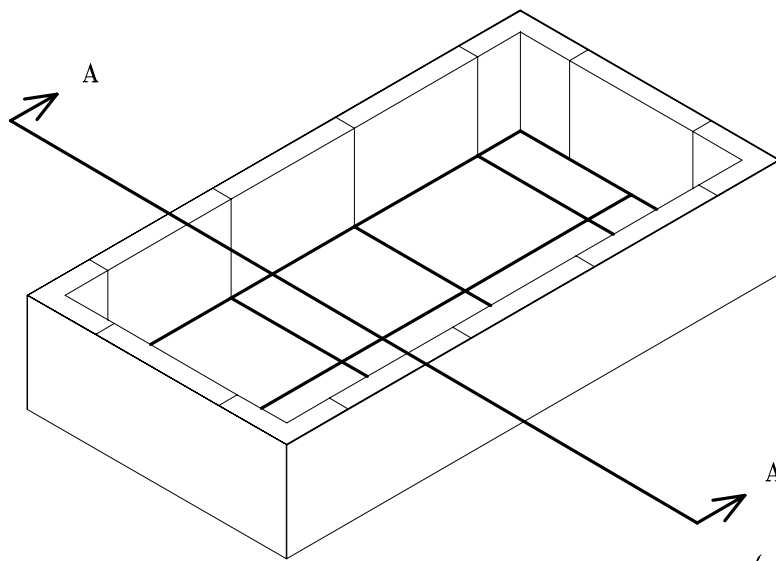
### 2.1 Forsøgsopstilling

Bestemmelse af konvektion i isoleringsmaterialer foretages vha. et nyudviklet "konvektionsapparat" (Dyrbøl, 1998), se figur 1, 2 og 3. Apparatet måler varmestrømmen i forskellige sektioner i en væg med isoleringsmaterialet, når apparatet 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. De følgende afsnit beskriver konvektionsapparatets konstruktion.

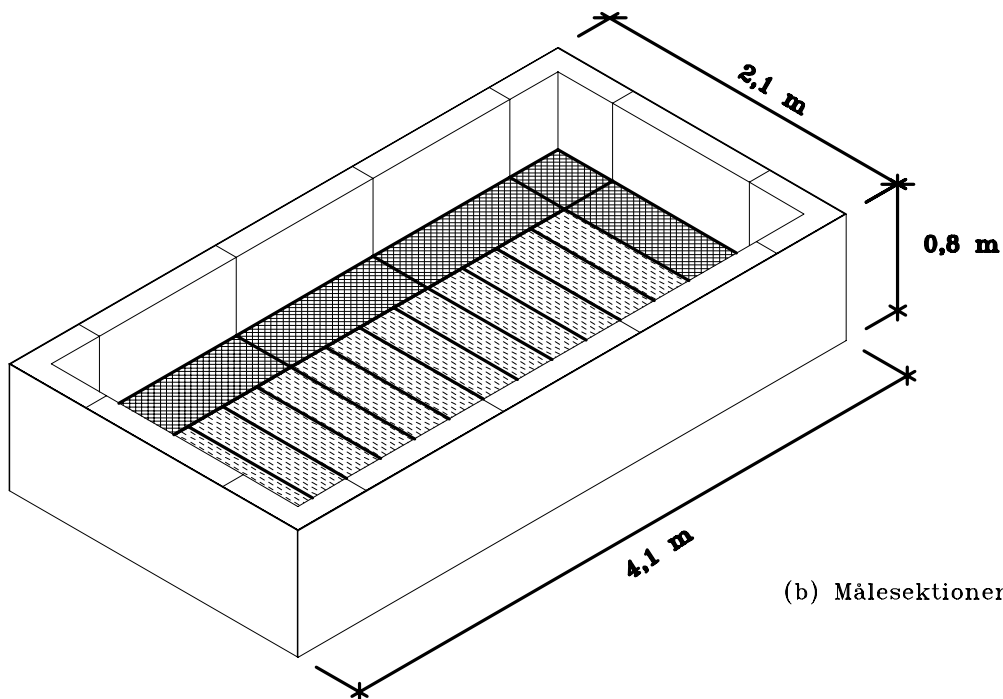
### 2.2 Konstruktion af konvektionsapparat

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 1b, der gør det muligt at måle varmestrømmen igennem enkelte områder af prøveemnet. Arealet af hver målesektion er  $1,0 \times 0,25 \text{ m}^2$ . For at opnå en éndimensional varmestrøm gennem prøveemnet er

konvektionsapparatet monteret med et system af guardplader omkring varmepladerne. Figur 1 viser geometrien og guard-arrangementet i apparatet.



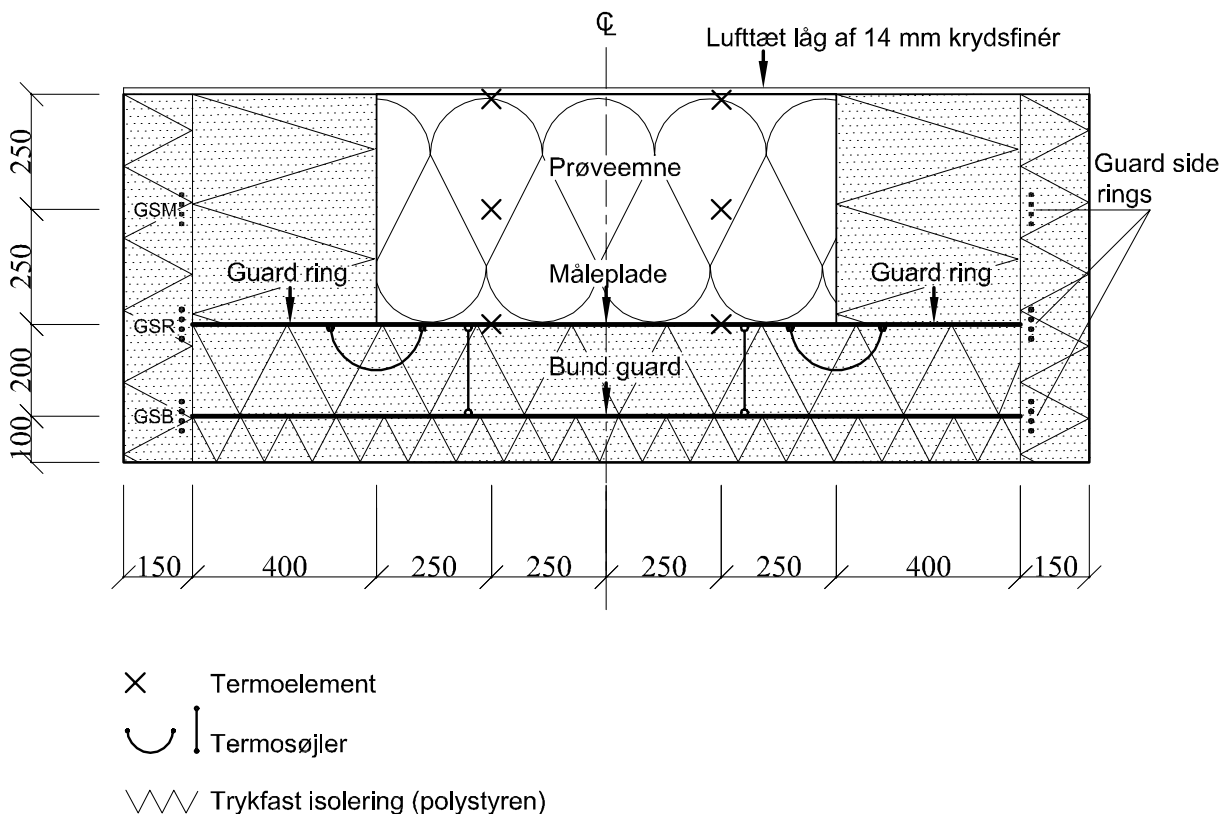
(a) bund- og side guard



(b) Målesektioner- og guard ring

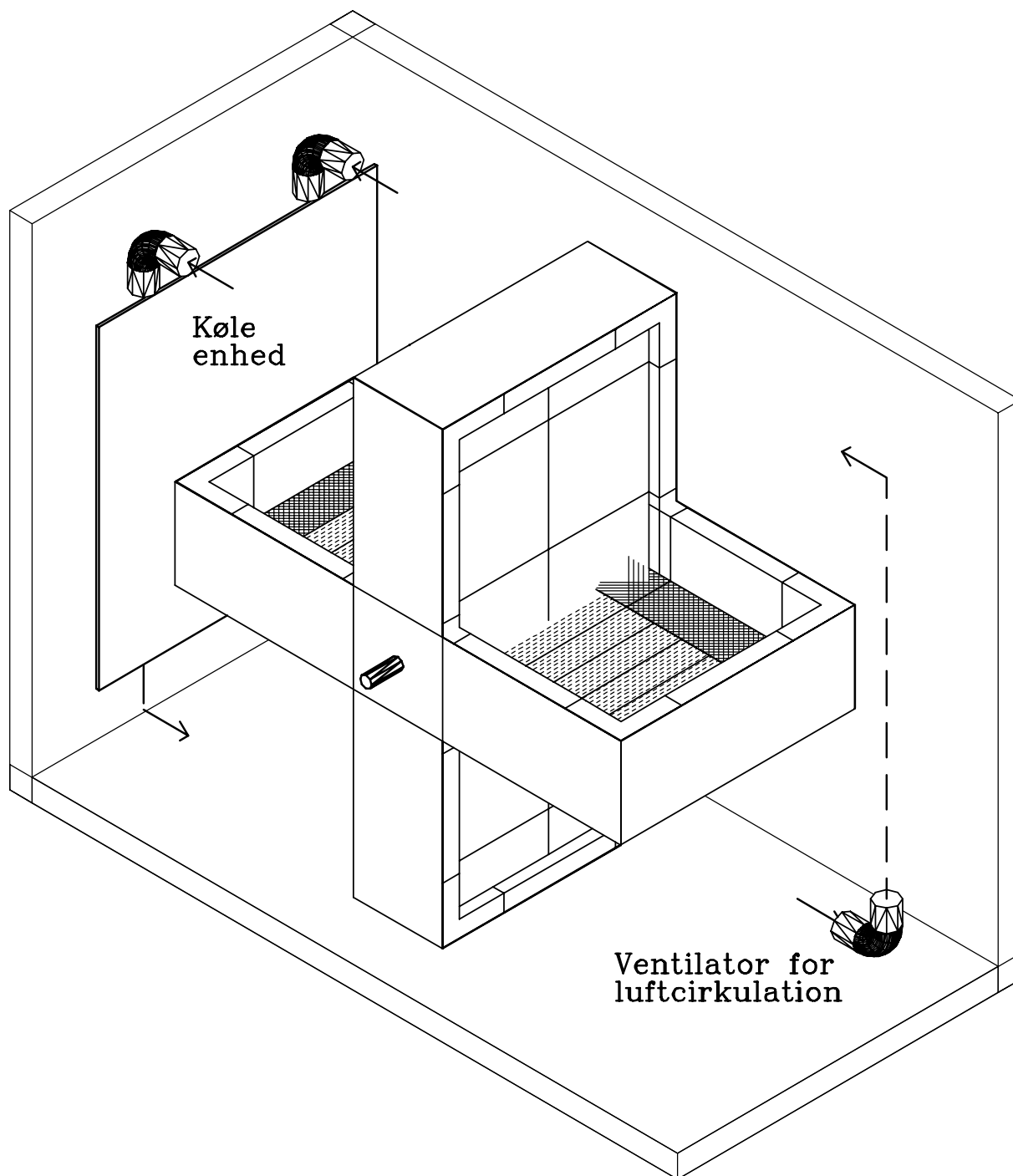
Figur 1. Principskitse af konvektionsapparatet. (a) viser placeringen af bund- og side-guards og (b) viser placeringen af de tolv målesektioner og guard-ringen der omringer målearealet.

Arealet over guard-ringen er dækket af et lufttæt isoleringsmateriale (ekspanderet trykfast polystyren), således at målingerne ikke forstyrres af luftbevægelser uden for målesektionerne. Tykkelsen af guard-isoleringen varieres med tykkelsen af prøveemnet. En lufttæt plade af krydsfinér hviler på guard-isoleringen og udgør låget til kassen, se figur 2. Apparatet er konstrueret til at måle prøveemner med en tykkelse fra 100 til 500 mm. Når apparatet måler varmestrømmen, har det en maksimumkapacitet på  $51,2 \text{ W/m}^2$ , dvs.  $12,8 \text{ W/0,25 m}^2$ .



Figur 2. Lodret tværsnit A – A i konvektionsapparat. Placeringen af tværsnittet er vist i figur 1. Mål i mm.

Apparatet er placeret i et koldt klimakammer der har målene  $5,90 \times 3,10 \times 3,50 \text{ m}^3$  (længde x bredde x højde), med temperaturer ned til  $-10^\circ\text{C}$ , der udgør den kolde side af apparatet. Apparatet er ophængt på en måde, hvor det er muligt at placere det i det kolde kammer i en lodret position, eller vandret med varmepladen foroven eller forneden, se figur 3. Det er hermed muligt at efterligne forholdene enten på et loft eller i en væg.

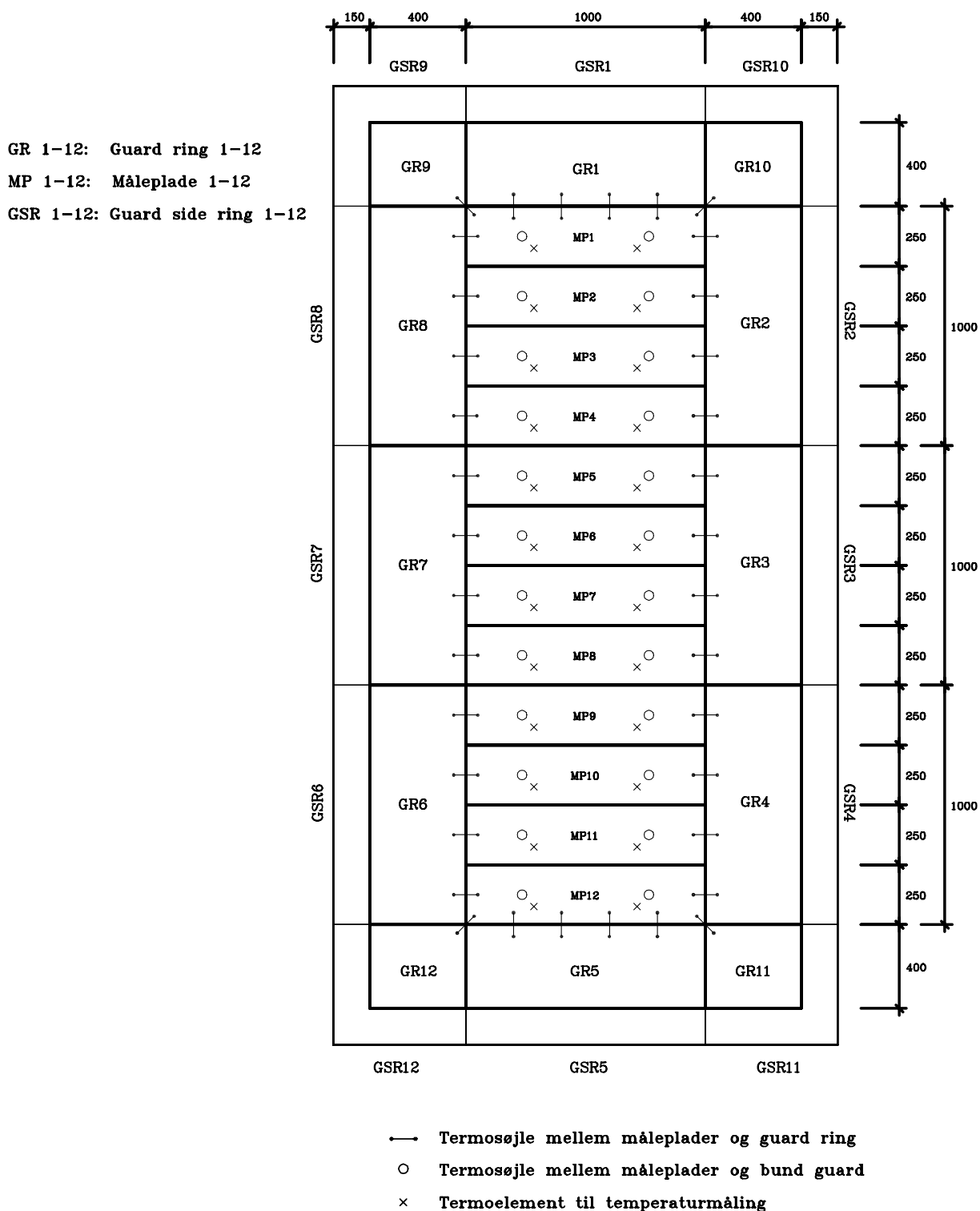


Figur 3. Konvektionsapparat placeret i den kolde kasse. Ophængningen af apparatet gør det muligt at rotere det 360° og foretage målinger i forskellige positioner.

### 2.3 Måleplader og varm side i apparatet

De enkelte målesektioner består af en glasplade med en elektrisk ledende belægning på den ene side. Belægningen vender ned mod guardisoleringen, således at belægningen ikke beskadiges, når f.eks. isoleringsmaterialerne ilægges. Målepladerne styres individuelt og søges holdt på samme konstante temperatur.





Figur 4. Plan over den varme side i konvektionsapparatet der viser opstillingen af termoelementer og termosøjler til temperatur-regulering af måleplader og guard-ring.

Effekten, der tilføres glasbelægningen for at styre pladetemperaturen, styres af en PID-regulator. Glaspladernes temperatur måles hvert tiende sekund. Ud fra de målte temperaturer beregnes den effekt, der kræves for at opretholde en konstant temperatur på pladerne, hvor-

efter den bliver tilført belægningen inden for ti sekunder. Idet belægningernes elektriske ledningsevne er kendt, kan varmestransmissionen, ud gennem de enkelte målesektioner bestemmes, ud fra den effekt, der afsættes i belægningerne. Apparatets konstruktion og regulering beskrives indgående i (Nielsen, 1997) og (Dyrbøl, 1998).

Placeringen af termoelementer til temperaturmålinger og termosøjler til kontrol af guard-ringen er vist i figur 4. Temperaturfordelingen over det totale måleareal er jævnt fordelt inden for  $\pm 0,1\text{K}$ , når der ikke forekommer nogen konvektion.

## 2.4 Apparatets kolde side

Konvektionsapparatets kolde side består af et 14 mm tykt krydsfinérlåg, der danner et plant, lufttæt låg til prøveemnet. Mellem låg og prøveemne er der lagt et tyndt lag skumgummi for at undgå luftlommer på dette sted. Lufttemperaturen i det kolde klimakammer, hvori apparatet er placeret, bruges til at regulere temperaturen på den kolde side af apparatet. Temperaturen i klimakammeret reguleres af en PI-regulator, og det er muligt at regulere temperaturen ned til ca.  $-10^{\circ}\text{C}$ . For at få en jævn temperaturfordeling i klimakammeret, sættes kassens luft i cirkulation af tre ventilatorer. Temperaturerne på den kolde side af prøveemnet måles af termoelementer placeret mellem skumgummiet og prøveemnet, lige over de steder hvor temperaturerne bliver målt på målepladerne, se figur 4. Temperaturen på den kolde side af prøveemnet er jævnt fordelt inden for 0,5 K.

## 2.5 Guard-sektionerne i apparatet

For at sikre en endimensional varmestrøm igennem prøveemnet er konvektionsapparatet konstrueret med et tredimensionalt guard-system. Guard-ring sektionerne (GR), som er i niveau med målepladerne (MP), er lavet af glas ligesom MP. Bund guard-sektionerne i bunden (GB) under målepladerne er lavet af aluminium, der har en stor varmeledningsevne. Guard-sektions enhederne på siden (GSB, GSR, GSM) er lavet af rustfrit stål; hver af dem med tre varmebånd, (figur 2). Stålets høje varmeledningsevne bidrager til at opnå en lineær temperaturprofil ved kanterne i apparatet. De tre guard side ringe (GSB, GSR, GSM) er placeret henholdsvis i samme niveau som bund guard-sektionerne (GB), guard-ring sektionerne (GR), og 0,25 m over målepladerne (MP) hvilket svarer til midten af prøveemnet, når det har en tykkelse på 500 mm. Hvert varmebånd er reguleret ud fra temperaturen på guarden foran det. Varmebåndet GSM, som styrer temperaturen i midten af emnet, reguleres ud fra temperaturen i guard-isoleringen ved siden af prøveemnet og 0,2 m over målepladerne, når der måles på et prøveemne, som har en tykkelse på 400 mm. Bund-guard-sektionen reguleres ud fra den gennemsnitlige temperatur af de fire måleplader over den. Temperaturen for de enkelte guard-sektioner afviger med mindre end 0,1 K fra den temperatur den reguleres ud fra.

## 2.6 Forsøgsbeskrivelse

Ved målingerne anbringes kassen med isoleringsmaterialet først vandret med varmepladerne øverst, således at naturlig konvektion gennem prøveemnet undgås. Varmeledningsevnen af prøveemnet ved hver af de 12 måleplader måles. Denne måling betegnes som referencen i forhold til de efterfølgende målinger. Herefter drejes kassen til hver af de to lodrette stillinger,

hvor henholdsvis måleplade 12 (MP12) og måleplade 1 (MP1) er øverst. Herved fås to målinger som skulle være ens, når den ene spejlvendes. Varmepladerne holdes på en konstant temperatur på ca.  $30^{\circ}\text{C} \pm 0,1 \text{ K}$  og omgivelserne på ca.  $-10^{\circ}\text{C} \pm 0,5 \text{ K}$ , dvs. en temperaturforskelle på ca.  $40 \text{ K}$  over prøven.

## 2.7 Teori

Forholdet mellem varmestrømmen,  $Q$  med konvektion (lodret stilling) og uden konvektion (vandret stilling dvs. varmepladerne øverst) anvendes i det følgende. For at tage hensyn til de små forskelle i temperaturdifferencer over prøven for de 12 måleplader er følgende beregningsudtryk for hver måleplade anvendt, og angives i det følgende som Nusselt-tallet med index  $i$  for at præcisere, at det refererer til forskellige positioner i prøven:

$$\text{Nu}_i = \frac{(Q_{\text{med konvektion}} / \Delta T_{\text{med konvektion}})}{(Q_{\text{uden konvektion}} / \Delta T_{\text{uden konvektion}})}$$

hvor  $Q_{\text{med konvektion}}$  er varmestrømmen med konvektion  
 $\Delta T_{\text{med konvektion}}$  er temperaturdifferensen over prøveemnet med konvektion  
 $Q_{\text{uden konvektion}}$  er varmestrømmen uden konvektion  
 $\Delta T_{\text{uden konvektion}}$  er temperaturdifferensen over prøveemnet uden konvektion

Reference =  $Q_{\text{uden konvektion}} / \Delta T_{\text{uden konvektion}}$   
 Nusselt-tallet anvendes til at indikere egenkonvektionens betydning.

Er summen af  $\text{Nu}_i$ , for de 12 måleplader, større end 1,00 så vil den naturlige konvektion forøge varmestrømmen gennem materialet. Summen beregnes vha. følgende udtryk:

$$\text{Nu} = \sum \text{Nu}_i = \frac{\sum (Q_{\text{med konvektion}} / \Delta T_{\text{med konvektion}})}{\sum (Q_{\text{uden konvektion}} / \Delta T_{\text{uden konvektion}})}$$

Prøveemnets varmeledningsevne  $\lambda$  kan beregnes ud fra de målte temperaturer på henholdsvis den varme og kolde side af prøveemnet, tykkelsen af prøven samt fra den afsatte effekt og arealerne af varmepladerne. Varmeledningsevnen bestemmes ud fra følgende udtryk:

$Q = A \cdot \lambda \cdot \Delta T / s$ , hvilket medfører  $\lambda = Q / A \cdot s / \Delta T$ , kan omskrives til  $\lambda \cdot A / s = Q / \Delta T$

hvor  $Q$  er varmestrømmen [W]  
 $A$  er arealet [ $\text{m}^2$ ]  
 $\lambda$  er varmeledningsevnen [ $\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$ ]  
 $\Delta T$  er temperaturdifferensen over prøven [K]  
 $s$  er tykkelsen af prøven [m]

Luftstrømmen (konvektionen) i materialerne, når de er lodret stillet, er generelt således, at luften stiger op gennem materialet langs den varme side i kassen, 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 højden. 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 ( $Nu = 1,0$ ).

## 2.8 Computerberegninger

Ved hjælp af simuleringsprogrammet CHConP (Convection Heat Conduction Program) er der foretaget beregninger af effekten af den naturlige konvektionen i fåreuld og papirisolering i lodrette positioner magen til forholdene ved målingerne.

Computerprogrammet CHConP er udviklet af professor C-E Hagentoft, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg.

For at kunne anvende CHConP er følgende input for materialet nødvendig:

- 1) Geometrien af prøveemnet
- 2) Materialets luftpermeabilitet vandret og lodret
- 3) Varmeledningsevnen, vandret og lodret
- 4) Grænsebetingelser: temperatur og termisk overgangsisolans, tryk og trykfald.

Måling af luftpermeabiliteten for de to materialer er foretaget af Rockwool International A/S. Permeabiliteten anvendes i CHConP beregningerne.

Resultaterne af beregningerne er angivet i kapitel 4.1, 4.2 og 4.3.

## 3. Materialer

To forskellige alternative isoleringsmaterialer, fåreuld og papirisolering, er undersøgt i apparatet. Fåreuld (Herawool BP 040) med støttefibre i batts på 1,2 m x 1,0 m x ca. 0,18 m med en nominal densitet på  $25 \text{ kg/m}^3$  fra firmaet Heraklith. Papirisolering (Ekofiber Vind) i granulat med en densitet på  $65 \text{ kg/m}^3$  fra Nordisk Ekofiber AB.

## 4. Måleresultater

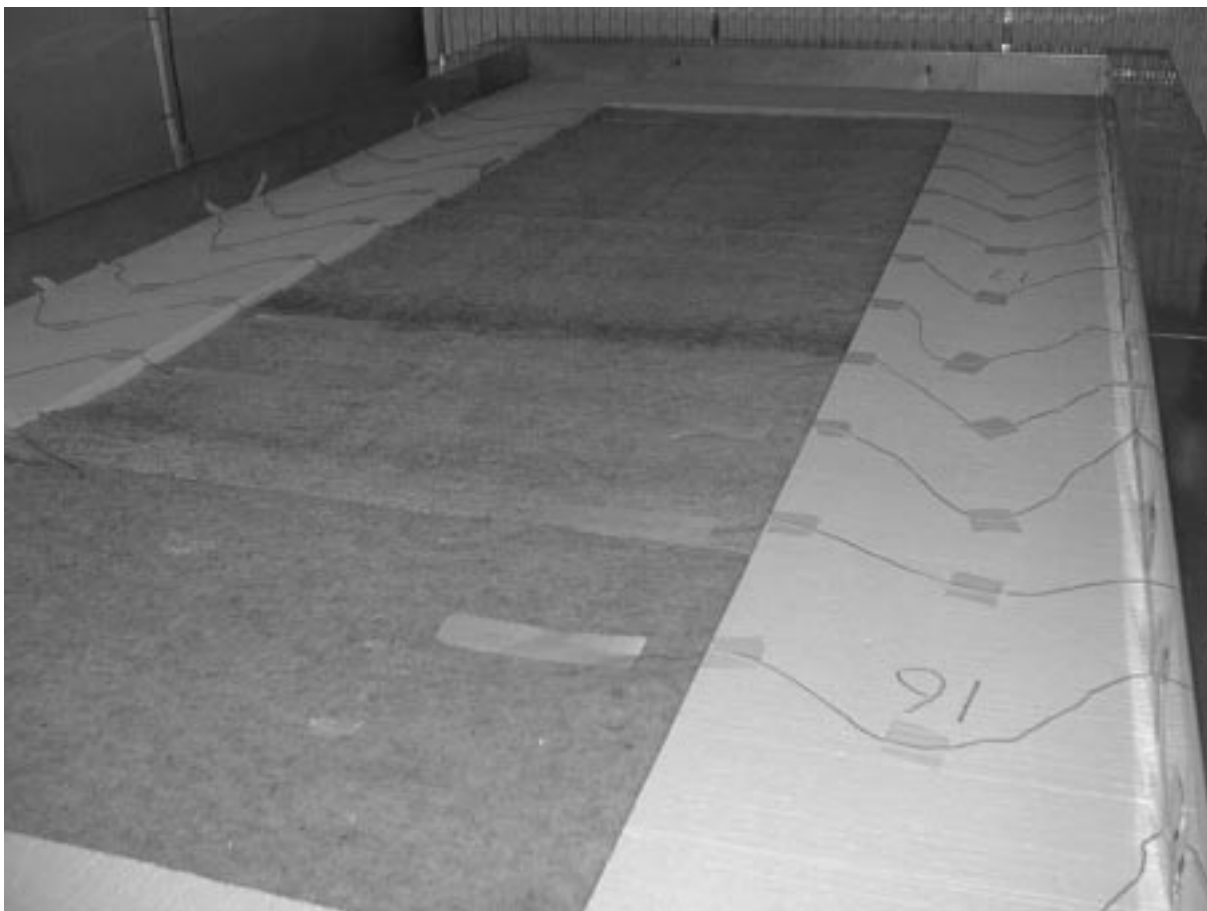
For hvert materiale er der foretaget 3 målinger: En hvor kassen er vandret med varmepladerne øverst som kaldes referencemålingen, to lodrette målinger med henholdsvis måleplade 1 (MP1) og måleplade 12 (MP12) øverst. Målesekvenserne varede ca. 1 til 1,5 måned for hver af de to materialer.

Måledata blev opsamlet og lagret i en PC'er.

Det har vist sig, at det tager forholdsvis lang tid før målingerne bliver stabile dvs. før varmeledningsevnen bliver konstant. Ligevægtsfugtigheden før montering i kassen er ca. 10 vægtprocent, for de to materialer. Dette er et naturligt (hygroskopisk) fugtindhold for de organiske materialer ved opbevaring under normale indendørs forhold. Ved de temperaturforhold materialerne udsættes for i kassen vil der ske en transport af fugt fra den varme side (målepladerne) til den kolde side. Denne fugttransport har vist sig at foregå meget langsomt. Fugttransporten gav anledning til, at der opbygges et højt vandindhold i prøvemnerne ved den kolde side, og at der kondenserede vand på indersiden af krydsfinérpladen.

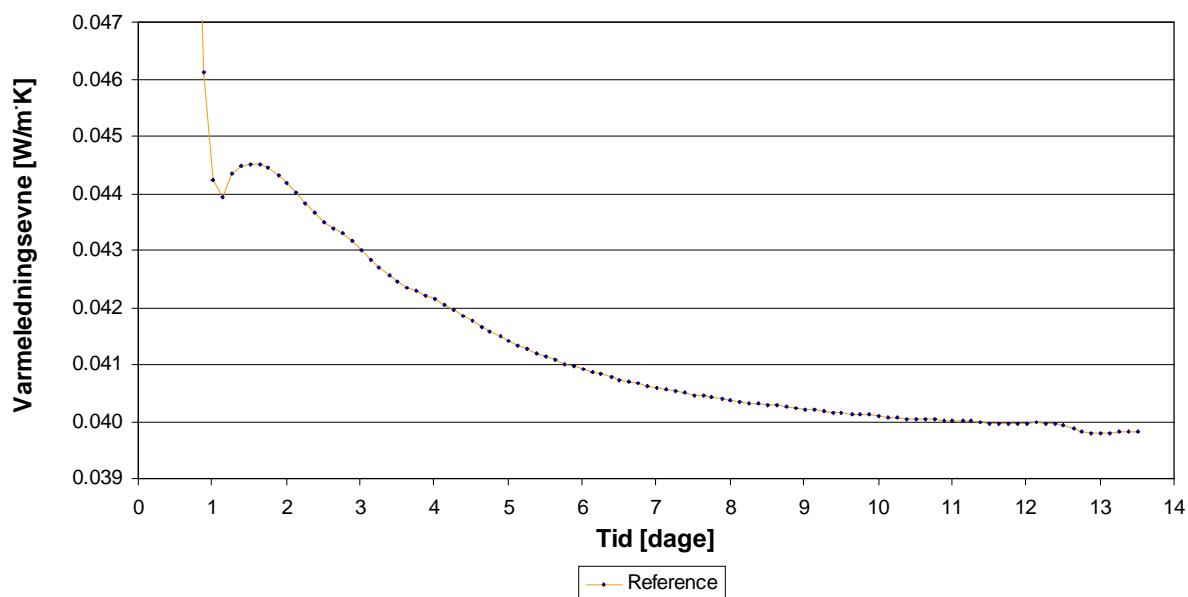
#### 4.1 Fåreuld

To lag af fåreulden med en samlet tykkelse på ca. 0,36 m blev monteret i konvektionsapparatet. Der er anvendt en fåreuld som indeholder støttefibre således at ulden ikke synker sammen, når de to lag monteres og når konvektionsapparatet drejes. Densiteten af fåreulden i apparatet var  $28 \text{ kg/m}^3$ .



Figur 5. Foto af fåreuld i konvektionsapparat med guard-isoleringen i en ring udenom. Krydsfinèrlåget er ikke monteret.

I nedenstående figur er middelvarmeledningsevnen for referencemålingen angivet for de 12 stk. måleplader som funktion af tiden. Værdierne for de lodrette målinger er vist i appendix A.



Figur 6. Varmeledningsevnen af fåreuld som funktion af tiden for referencemåling (vandret position, varmeplader øverst).

Under selve målesekvensen beregner et program, hvornår målingerne og dermed varmeledningsevnen har nået et stabilt niveau. Dataprogrammet viste, via et skærbillede, at varmeledningsevnen skulle være stabil efter 12,5 døgn. Herefter fortsattes et ekstra døgn da de 8 sidste 3 timers middelværdier for varmeledningsevnen anvendes til beregningerne.

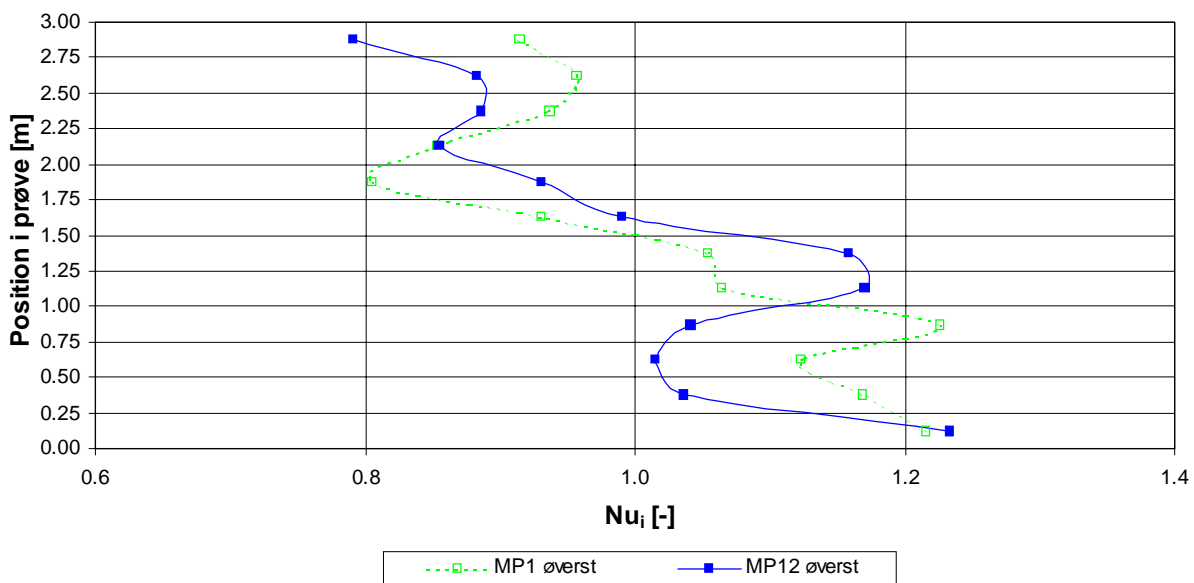
Af figur 6 ses, at varmeledningsevnen, for den vandrette måling (referencen) er stoppet efter 13,5 døgn.

For at sandsynliggøre, at målingerne har nået et stabilt niveau er ISO 8302 gennemgået.

Kravene til, hvornår en måleserie i et guarded varmeplade apparat kan betragtes som stabil er beskrevet i ISO 8302. Den maksimale tilladte afvigelse mellem 5 efterfølgende observationer må ikke ændre sig mere end 1 %. Standarden foreskriver desuden at 5 observationer efter hinanden ikke må ændre sig monotont, dvs. i samme retning. Der er foretaget en beregning, ifølge foreskrifterne i ISO 8302 Annex A afsnit A.2.10, som giver at tidsintervallet mellem observationerne skal, på grund af den store isoleringstykkelse, være mindst 58 timer for fåreulden i konvektionsapparatet. Observationen af varmeledningsevnen 58 timer før måleafslutning og ved måleafslutning er sammenholdt og viser en afvigelse på 0,5 %, hvilket opfylder betingelsen for stabilitet. Kravet om de 5 efterfølgende observationer altså 5 gange 58 timer (12 dage) med en afvigelse på max. 1%, samt kravet om at der ikke må være monoton er dog ikke opfyldt.

Det er på baggrund af ovenstående skønnet, at måleværdierne er tilstrækkeligt stationære til at de er anvendelige til beregningerne af Nusselt-tallene.

Nusselt-tallet findes for henholdsvis måleplade 1 og 12 værende øverst.



Figur 7. Fåreuld. Målte Nusselt-tal i forskellige positioner i prøven, målt med henholdsvis MP1 og MP12 øverst.

Af ovenstående figur ses, at de målte  $Nu_i$  er mindre i toppen og større i bunden af prøven, når apparatet og dermed isoleringsmaterialet er placeret lodret. Det vil sige at der opstår naturlig konvektion i materialet og at varmetransmissionen ind i væggen fra den varme side er mindre i toppen og større i bunden i forhold til referencemålingen (den vandrette måling).

Det er det samlede Nusselt-tal som er interessant, da det siger noget om forøgelsen i varmeledningsevnen. Dette er diskuteret efter tabel 1.

I tabel 1 er de målte og beregnede Nusselt-tal for fåreuld angivet. Desuden er Nusselt-tallet for Rockwool i batts, med densiteten  $30,5 \text{ kg/m}^3$  og tykkelsen  $0,5 \text{ m}$ , angivet, dvs. altså 1,39 gange tykkere end fåreulden (Dyrbøl, 1998).

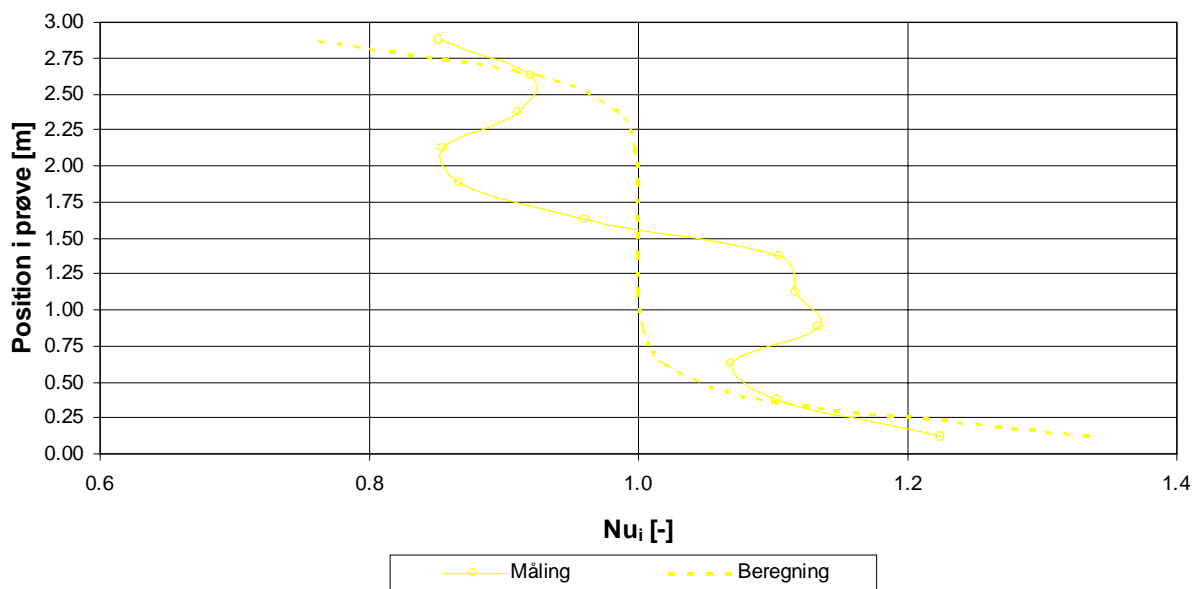
Placering	Nusselt-tal $\Sigma Nu$	Afvigelse fra reference måling	Varmelednings- evne $\Sigma \lambda$
	-	%	W/mK
Reference måling, fåreuld	1,000	---	0,0398
Gennemsnit af 12 pkt. med MP1 øverst, fåreuld	1,021	2,1	0,0406
Gennemsnit af 12 pkt. med MP12 øverst, fåreuld	1,000	0,0	0,0398
Middelværdi, fåreuld	1,011	1,1	---
Beregning vha. CHConP, fåreuld	1,009	---	---
Middelværdi målt, mineraluld (Dyrbøl, 1998)	1,001	---	---

Tabel 1. Fåreuld. Nusselt-tal, afvigelser og varmeledningsevne.

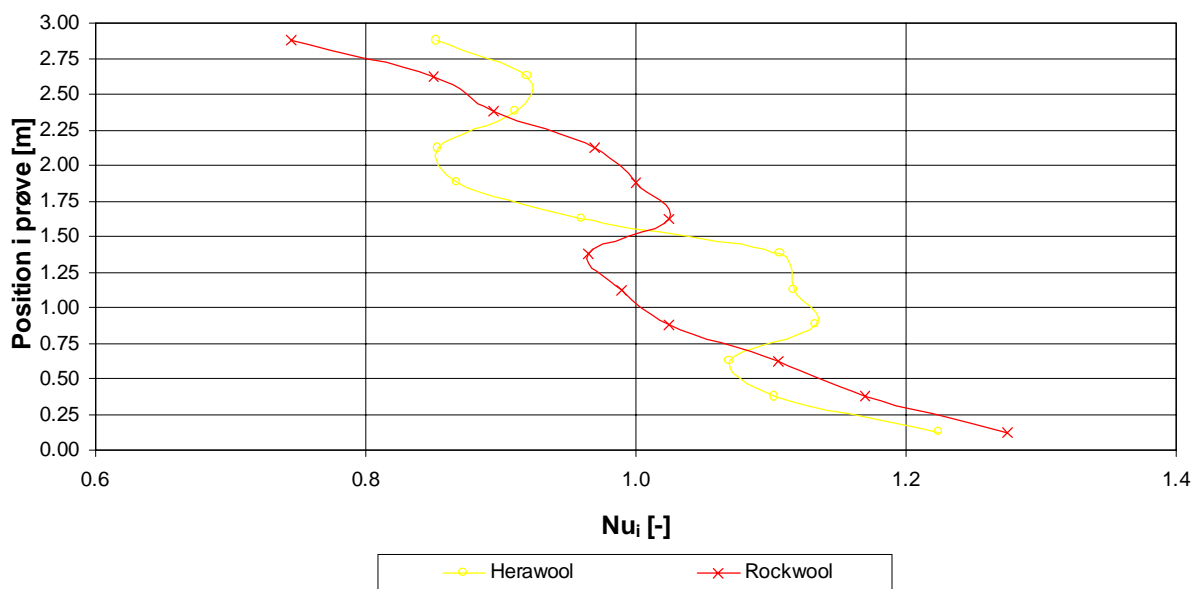
Note: Konvektionsapparatet er ikke konstrueret med henblik på at måle den almindelige varmeledningsevne  $\lambda_{10}$ . Derfor må der tages forbehold for anvendelsen af disse værdier, der dog stemmer godt overens med oplysninger fra (Olsen, 1998).

De specifikke luftpermeabiliteter for fåreuld som anvendes i CHConP er:  $B_{0,x} = 5,26 \times 10^{-9} \text{ m}^2$   
 $B_{0,y} = 6,85 \times 10^{-9} \text{ m}^2$

Middelværdien i tabel 1 vil sige gennemsnittet af målingerne med henholdsvis måleplade 1 og 12 øverst.



Figur 8. Beregnede og målte Nusselt-tal for fåreuld. Kurven for målte værdier er middelværdi for de 2 kurver vist i figur 8.



Figur 9. Sammenligning af Nusselt-tal for mineraluld og fåreuld (middelværdi for de 2 kurver vist i figur 8).

I figur 9 er de lokale Nusselt-tal for fåreuld og mineraluld angivet. Værdierne er middel af måling med henholdsvis måleplade 1 og 12 øverst. Det ses af figuren at mineralulden har et lavere Nusselt-tal i toppen og et lidt større i bunden i forhold til fåreulden. Fåreulden har nogle lokale udsving omkring position 1,00 og 2,00. Dette skyldes givetvis samlingen mellem



battsene. Det skal bemærkes, at der generelt sker en forøgelse af den naturlige konvektion ved en øget tykkelse af porøse isoleringsmaterialer, bør man derfor være opmærksom på, at sammenligning mellem fåreuld og mineraluld da mineralulden har en tykkelse som er 0,14 m større end fåreulden.

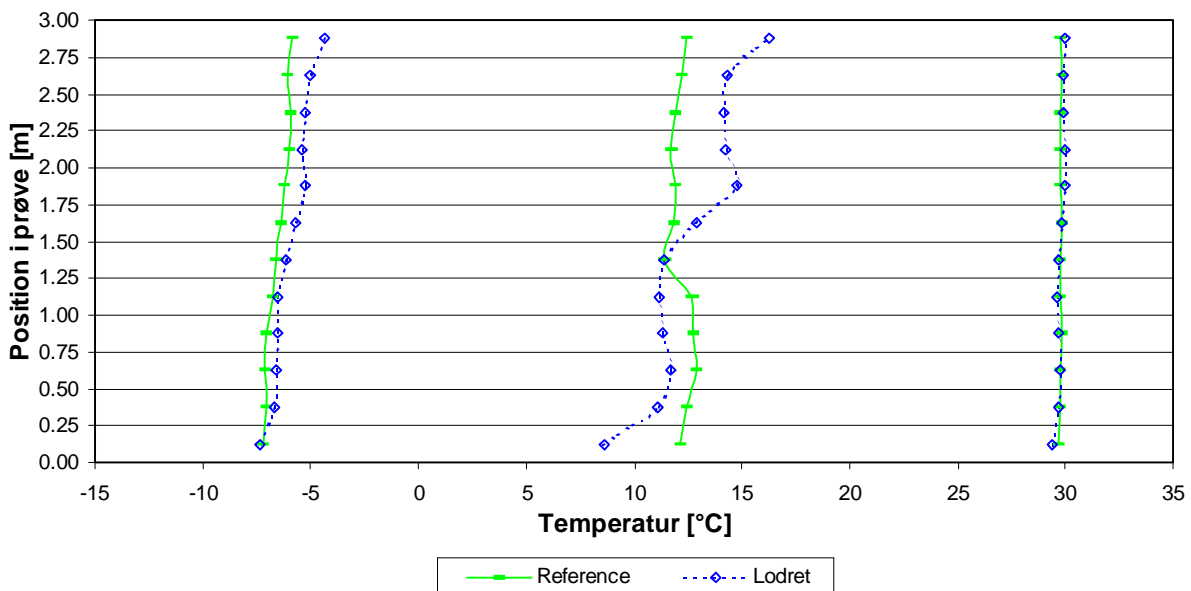
## 4.2 Diskussion

Af tabel 1 ses, at de målte Nusselt-tal er mellem 0,0 % og 2,1 % større, når prøven er placeret lodret. Forøgelsen i det samlede Nusselt-tal, i middel er på 1,1 %. Måleusikkerheden på apparatet er ca. 3 % skønnet ud fra (Dyrbøl, 1998).

Måleusikkerheden taget i betragtning så er det samlede Nusselt-tal fra tabel 1 for mineraluld og for fåreuld praktisk taget ens. Da  $Nu$  er meget nær ved 1,00 for de to materialer giver dette ikke anledning til en samlet væsentlig forøgelse af varmetransmissionen.

Computerberegningen viser et samlet Nusselt-tal på 1,009, hvilket underbygger målingerne og vil sige, at den naturlige konvektionen i materialet praktisk taget ikke vil forøge varmeledningsevnen.

I figur 10 er temperaturene på den varme og kolde side, samt i midten af fåreulden vist. Der er angivet to temperatursæt, henholdsvis for referencemålingen og gennemsnitsværdier for de to lodrette målinger. De detaljerede temperatursæt er angivet i appendix A.



Figur 10. Temperaturen på den kolde, den varme side samt i midten af fåreulden ved referencemålingen og gennemsnitsværdier af de to lodrette målinger.

Kurven i figur 10, der gælder for referencemåling (vandret) ses, at temperaturen på den varme side og i midten af prøven er næsten konstant op gennem prøveemnet. På den kolde side stiger temperaturen med afstanden fra position 0,00 til 3,00. Dette skyldes at temperaturfordelingen i de kolde klimakammer ikke er helt ensartet. Position 0,0 i prøven er tættere på kølepladen end position 3,00.

For den lodrette måling, ses, i midten af prøven, en stigning af temperaturen med højden. Denne tendens er noget mindre ved den kolde side. Denne temperaturvariation skyldes den naturlige konvektion som opstår i fåreulden når den er placeret lodret.

Af ovenstående figur 10 ses desuden, at temperaturen er lidt højere i toppen end i bunden af prøven. Dog er temperaturen på varmepladerne (den varme side) næsten ens. Dette skyldes at styringen kontrollerer temperaturen på pladerne og afsætter nøjagtig den effekt, som der skal til for at holder pladerne ved samme temperatur. Alt i alt sker der en omlejring af temperaturene, når prøven er placeret lodret, således at der er varmere i toppen end i bunden af prøven.

### 4.3 Papirisolering

For papirisolering er benyttet samme fremgangsmåde som for fåreulden. Tykkelsen af papirisoleringen i konvektionsapparatet var 0,40 m.

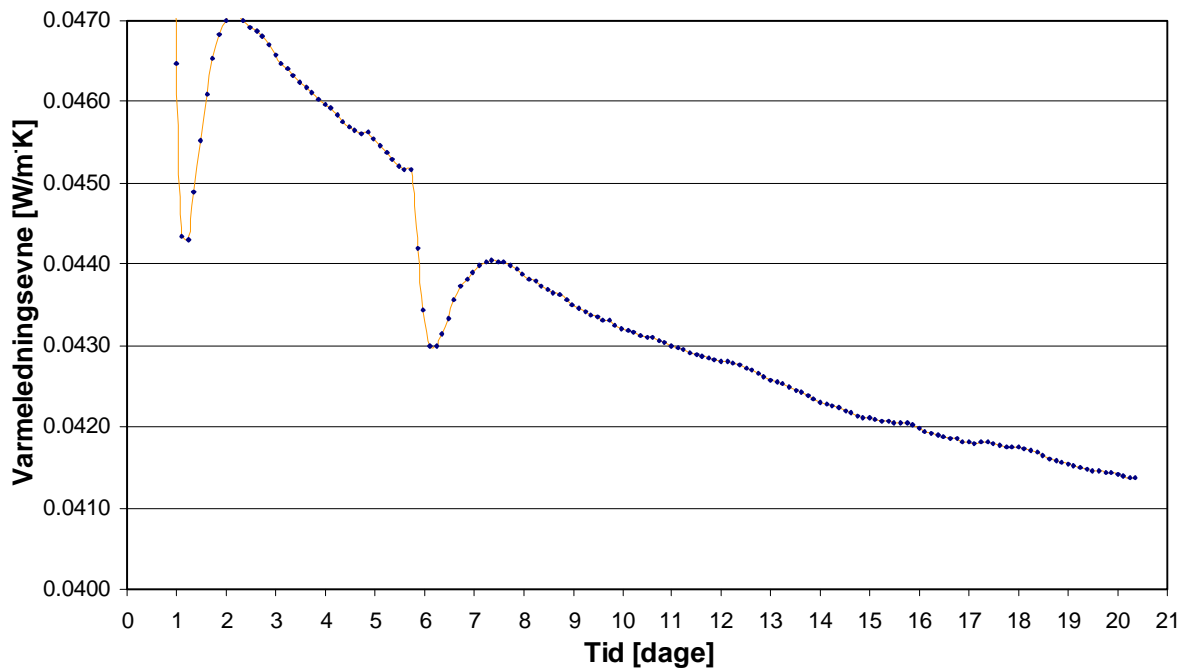


*Figur 11. Foto af indblæsning af papirisolering i kasse til konvektionsmåling.*

Densiteten ved konvektionsmålingen var  $65 \text{ kg/m}^3$ . Den høje træramme i figur 11 er en midlertidig foranstaltning da papirisoleringen fylder mere under indblæsningen idet der indblæses til en densitet på ca.  $34 \text{ kg/m}^3$ . Derfor har papirgranulatet skulle trykkes sammen til ca. halv tykkelse efter indblæsningen. Herefter er trærammen fjernet.

Ved en densitet på  $65 \text{ kg/m}^3$  af papirisoleringen (Ekofiber Vind) sker der ifølge fabrikanten ingen sætning.  $65 \text{ kg/m}^3$  er den densitet fabrikanten anbefaler i hulmure.

I nedenstående figur 12 er varmeledningsevnen som funktion af tiden angivet for referencen (vandret måling med varmeplader øverst). Varmeledningsevnen er gennemsnittet beregnet ud fra værdierne fra de 12 måleplader. Målingerne stod på i 19,5 døgn før styreprogrammet meldte, at der var opnået stationære forhold. Herefter fortsattes et ekstra døgn da de 8 sidste 3 timers middelværdier for varmeledningsevnen anvendes til beregningerne.



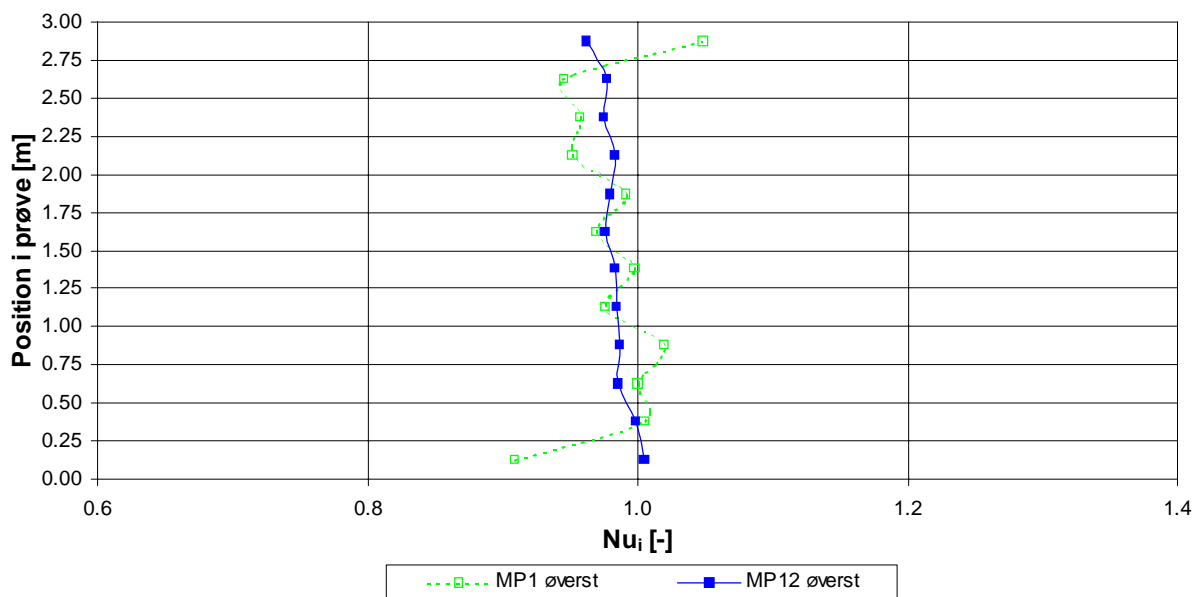
Figur 12. Papirisolering. Varmeledningsevnen for referencen som funktion af måletiden.

Ligesom for fåreulden er der også foretaget en beregning iht. ISO 8302 af tidsintervallerne mellem måleobservationerne samt tilladt afvigelse for papirisoleringen. Beregningen, ifølge forskrifterne i ISO 8302 Annex A afsnit A.2.10, giver at tidsintervallet mellem observationerne skal, på grund af den meget store isoleringstykkelse, være mindst 110 timer for papirisoleringen i konvektionsapparatet. Observationen af varmeledningsevnen 110 timer før måleafslutning og ved måleafslutning er sammenholdt og viser en afvigelse på 1,6 %, hvilket er 0,6 % over kravet til max. afvigelse. Kravet om de 5 observationer med en afvigelse på max. 1%, samt kravet om at der ikke må være monotoner er heller ikke opfyldt.

Ifølge figur 12 og ovenstående kontrol, så er målingerne blevet stoppet for tidligt.

Det er dog valgt alligevel, at bruge måleværdierne som reference ved beregning af Nusselt-tallene, idet det dog bemærkes, at der hermed nok introduceres en vis forskydning af Nu-tallene i forhold til værdien 1,0. Varmestrømmen ved referencemålingens afslutning har nok været for stor, hvorfor Nu-tallene bliver for små. Krumningen af Nu-tallets forløb gennem væghøjden giver ikke desto mindre et godt kvalitativt billede af konvektionens betydning.

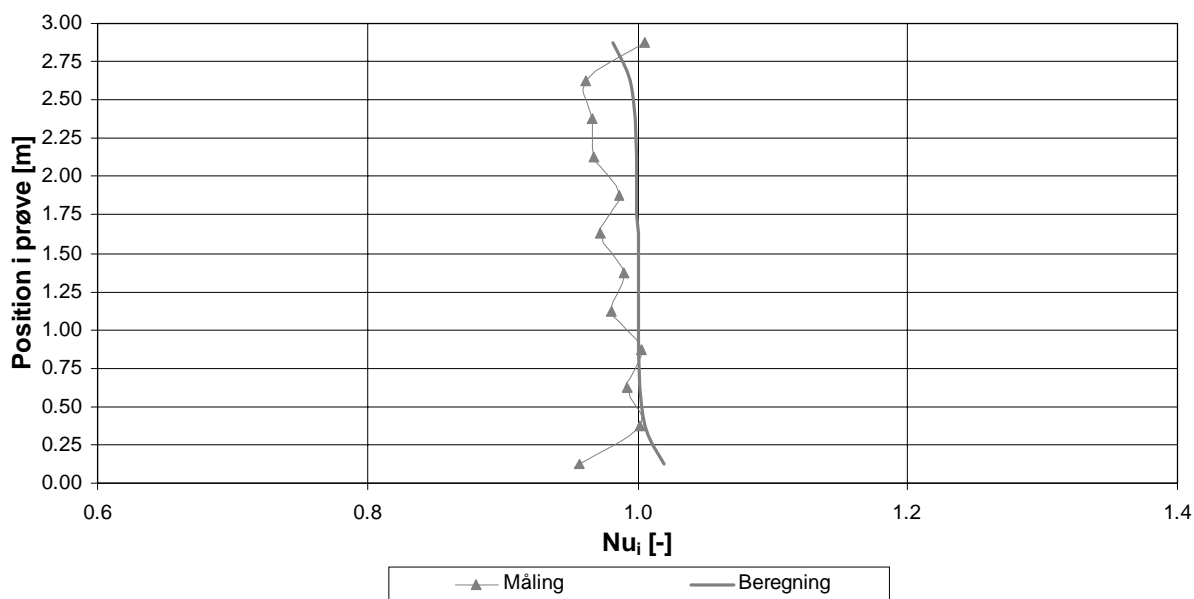
Ved at beregne forholdet mellem varmeledningsevnen i lodret- og i vandret position findes Nusselt-tal. Disse er i nedenstående figur 13 angivet i forskellige positioner af prøveemnet.



Figur 13. Papirisolering. Målte Nusselt-tal for henholdsvis måleplade 1 og 12 øverst.

Af ovenstående figur 13 ses, at de målte Nusselt-tal  $Nu_i$  er stort set ens op gennem materialet dog med en lille til at blive en anelse mindre mod toppen og større i bunden af prøven, når apparatet og dermed isoleringsmaterialet er placeret lodret. Det vil sige at varmeledningen er mindre i toppen og større i bunden i forhold til den vandrette måling (Referencen).

De målte og de beregnede Nusselt-tal vha. CHConP er angivet i nedenstående figur.



Figur 14. Papirisolering. Beregnede og målte Nusselt-tal. De målte værdier er middel af måling med henholdsvis måleplade 1 og 12 øverst.

Af figur 14 ses, at de beregnede Nusselt-tal ligger meget nær 1,00 med et lille udsving i top og bund. Det ses, at det samme forløb praktisk taget også er gældende for målingerne dog med en lille forskydning til venstre.

I tabel 1 er de målte og beregnede Nusselt-tal, middelværdien af Nusselt-tallene, varmeledningsevner samt afvigelser angivet. Desuden er angivet værdien for mineraluld i en tykkelse på 0,5 m fra /2/.

Placering	Nusselt-tal $E Nu_i$	Afvigelse fra reference måling	Varmelednings- evne $E\lambda_i$
	-	%	W/m <sup>2</sup> K
Reference	1,000	---	0,0414
Gennemsnit af 12 punkter med målepl. 1 øverst	0,980	-2,0	0,0406
Gennemsnit af 12 punkter med målepl. 12 øverst	0,983	-1,7	0,0407
Middelværdi, papirisolering	0,982	-1,8	---
Beregning vha. CHConP, papirisolering	1,000	---	---
Middelværdi mineraluld (Dyrbøl, 1998)	1,001	---	---

Tabel 2. Nusselt-tal, varmeledningsevnen samt afvigelser.

Note: Konvektionsapparatet er ikke konstrueret med henblik på at måle den almindelige varmeledningsevne  $\lambda_{10}$ . Derfor må der tages forbehold for anvendelsen af disse værdier, der dog stemmer godt overens med oplysninger fra (Olsen, 1998).

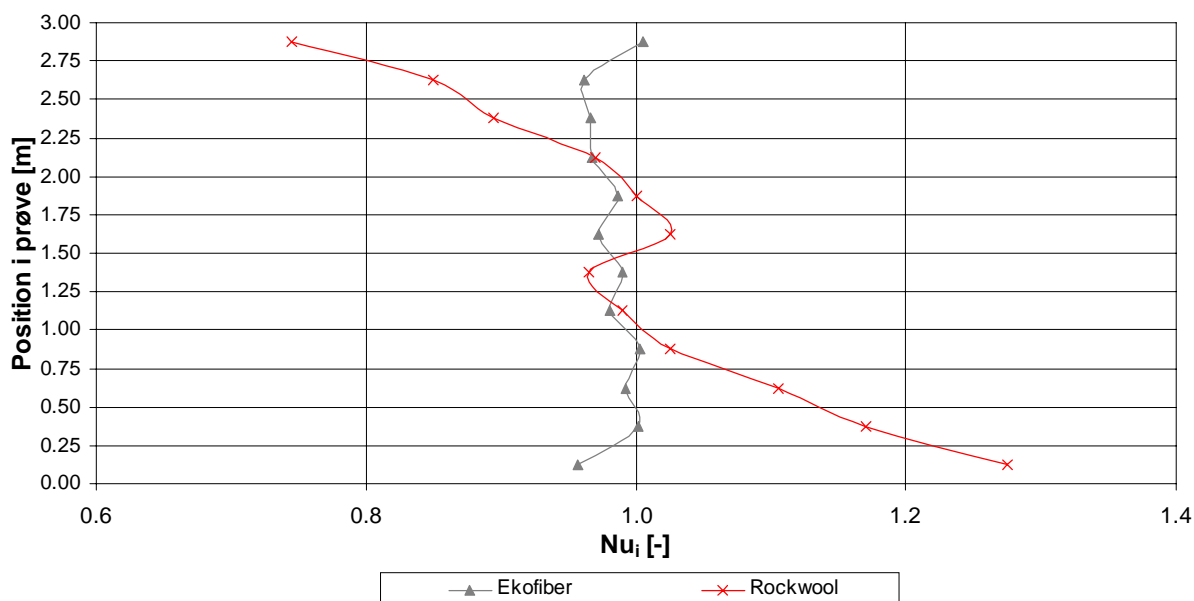
De specifikke luftpermeabiliteter for papirisoleringen som anvendes i CHConP er:

$$B_{0,x} = 0,33 \times 10^{-10} \text{ m}^2$$

$$B_{0,y} = 0,33 \times 10^{-10} \text{ m}^2$$

Af tabellen ses, at Nusselt-tallet er mellem -2,0 og -1,7 % mindre end referencen, når prøveemnet er placeret lodret. Middelværdien mellem de to lodrette målinger er -1,8 %. Måleusikkerheden på apparatet, er under de givne prøvningsforhold ca. 3 % skønnet ud fra usikkerhedsvurdering i (Dyrbøl, 1998), dog uden hensyntagen til at referencemålingen ikke var nået helt til stationære forhold. Beregningerne i tabellen viser et  $Nu$ -tal på 1,000, hvilket indikerer, at den samlede varmeledningsevne ikke vil blive forøget af naturlig konvektion i papirisoleringen. Usikkerheden på målingerne taget i betragtning samt sammenligning mellem målinger og beregninger viser det samlet, at den naturlige konvektion i papirisoleringen ikke vil forøge den samlede varmetransmission.

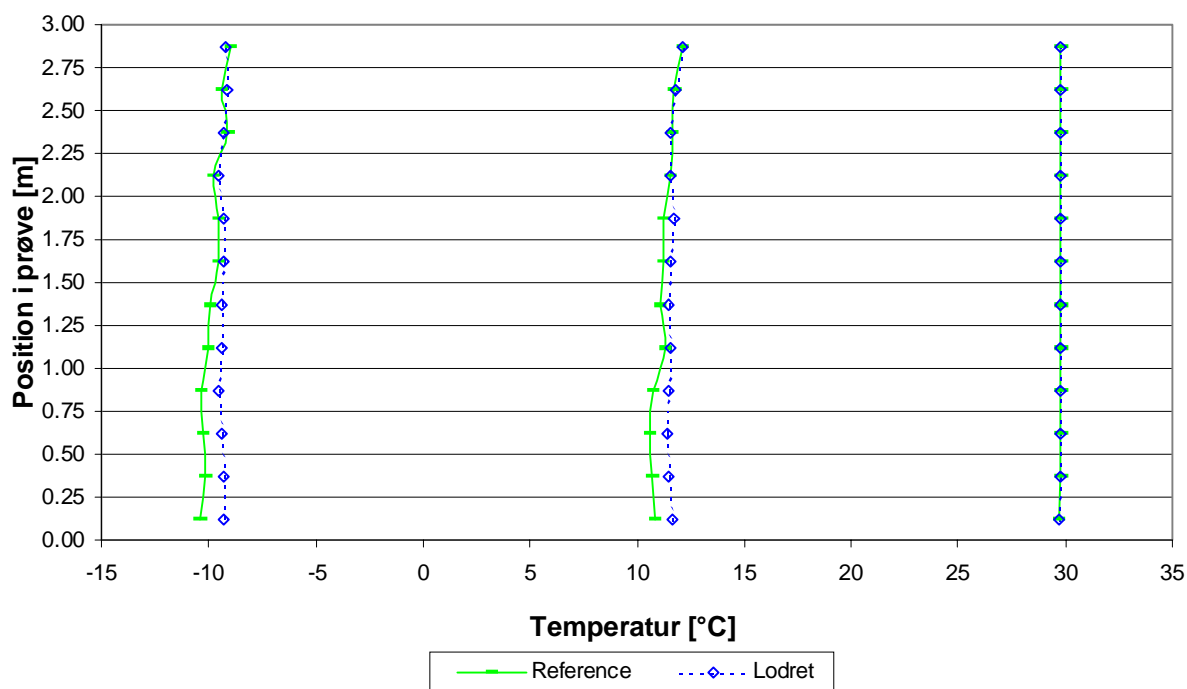
I nedenstående figur er Nusselt-tallet for papirisoleringen sammenlignet med konvektionsmåling af Rockwool i batts med en densitet på 30,5 kg/m<sup>3</sup> (Dyrbøl, 1998) med en tykkelse på 0,5 m altså 0,1 m tykkere end papirisoleringen. De to kurver er fremkommet ved at tage middel af målingerne, hvor henholdsvis måleplade 1 og 12 har været øverst.



Figur 15. Målte Nusselt-tal for papirisolering og mineraluld. Middelt af målinger af papirisolering med henholdsvis måleplade 1 og 12 øverst.

Ud fra figuren ses, at Nusselt-tallet for papirisoleringen ikke har de store udsving. Rockwool har derimod, i forhold til, tydelige udsving i Nusselt-tal med en stor værdi i bunden og en lille værdi i toppen. Ifølge tabel 2 er det samlede Nusselt-tal for Rockwool 1,001, hvilket praktisk taget er det samme som for papirisoleringen. Den naturlige konvektion i mineralulden er lokalt større end for papirisoleringen, men den naturlige konvektion forøger ikke den samlede varmetransmission væsentligt for nogle af materialerne.

I figur 16 er temperaturerne på den varme og kolde side, samt i midten af papirisoleringen vist. Der er angivet to temperatursæt, henholdsvis for referencemålingen og gennemsnits-værdier for de to lodrette målinger. De detaljerede temperatursæt er angivet i appendix B.



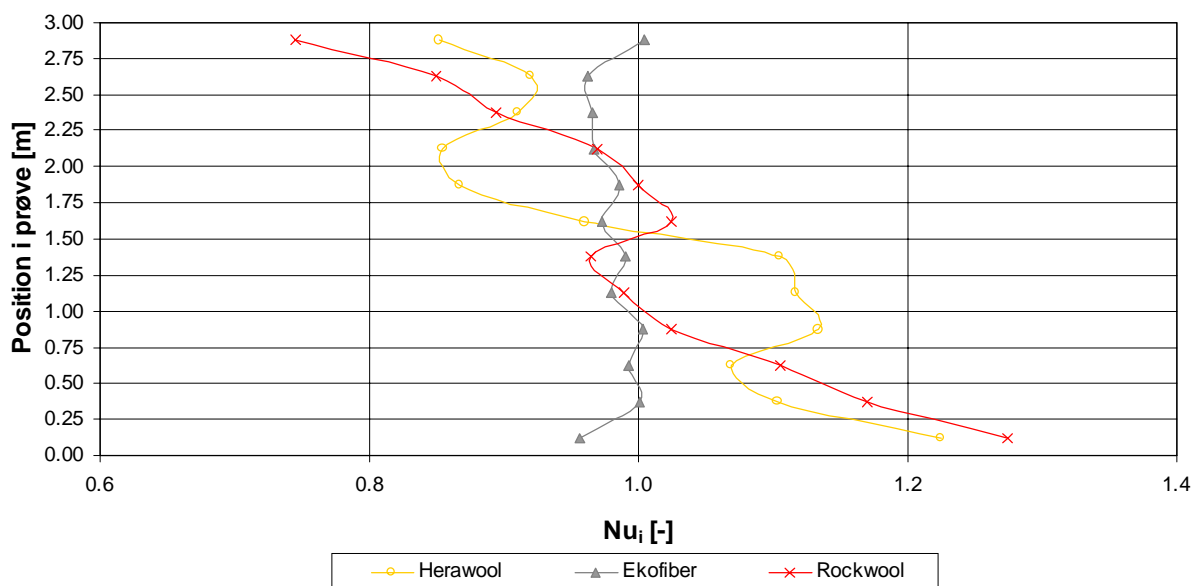
Figur 16. Papirisolering. Temperaturfordeling i forskellige positioner i prøven.

For referencen i figur 16, ses at temperaturerne i materialet er næsten ens dog med en tendens til at være lidt varmere i den ene ende på den kolde side (ca.  $-10^{\circ}\text{C}$ ). Samme tendens ses også for målingen at temperaturen i midten af materialet (ca.  $12^{\circ}\text{C}$ ). Dette beror sandsynligvis på at målepunktet 0,125 m er tættest på kølepladen i det kolde klimakammer end målepunktet 2,875 m (MP 12) som er længst væk. Temperaturfordelingen i det kolde klimakammer ved den vandrette måling er givetvis ikke helt jævnt fordelt, hvilket kan bero på fordelingen af den kolde luft, pga. ventilatorene.

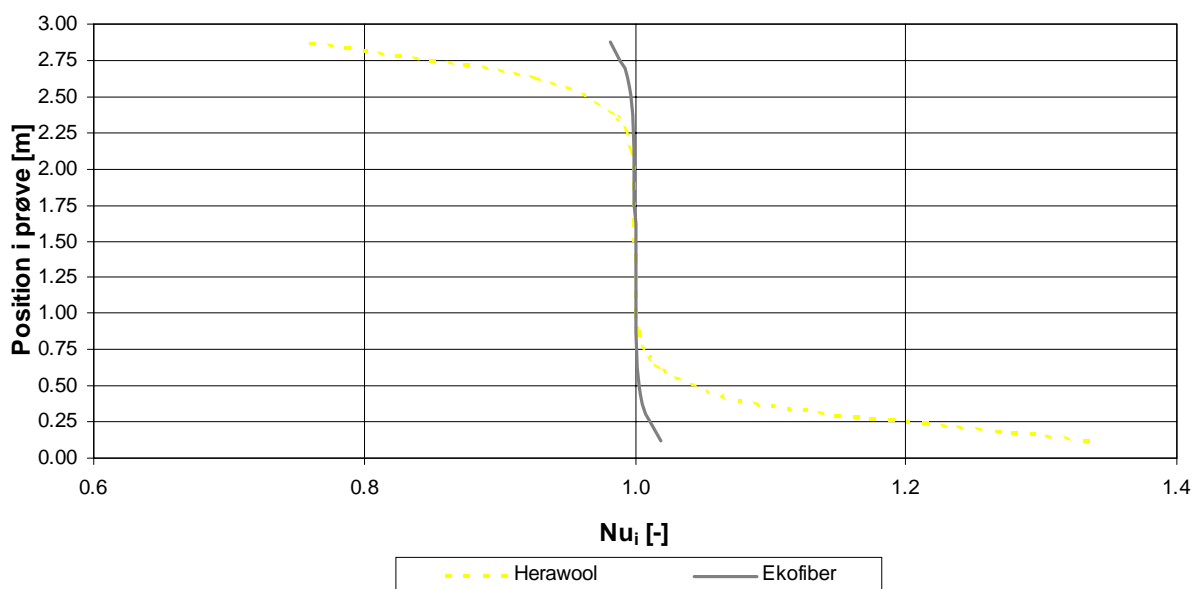
Ud fra figur 16 ses, at temperaturerne i de 3 placeringer er næsten ens op gennem højden. Konvektionsmålingerne underbygger dette, da den målte konvektionen i materialet er meget lille.

#### 4.4 Sammenfatning

I figur 17 er Nusselt-tallene i forskellige positioner i fåreuld, papirisolering samt for mineraluld angivet. Det ses, at forskel mellem top og bund er størst i mineralulden og mindst for papirisoleringen. Der er således størst konvektion i mineralulden og mindst i papirisoleringen. Det samlede Nusselt-tal ligger for alle materialerne meget nær 1,00, hvilket vil sige at effekten af den naturlige konvektion er målelig, men ikke giver nogen væsentlig forøgelse af den samlede varmetransmission.



Figur 17. Målte Nusselt-tal i forskellige positioner i fåreuld, papirisolering og mineraluld.



Figur18. Beregnede Nusselt-tal for fåreuld og papirisolering.

Figur 18 viser de beregnede kurver for variationen af Nusselt-tallet op gennem fåreuld og papirisoleringen. Det ses, at variationen er størst for fåreulden, hvilket også var tilfældet ved målingerne (figur 17).

## 5. Konklusion

Ud fra konvektionsmåling samt beregning på fåreuld og papirisolering sker der praktisk taget ingen forøgelse af varmetransmissionen som følge af naturlig konvektion i materialerne.



Fordelingen af Nusselt-tallene op gennem fåreulden giver større ekstremumsværdier i bunden ( $Nu = 1,22$ ) og mindre i toppen ( $Nu = 0,85$ ) end for papirisoleringen, hvor Nusselt-tallet kun afveg meget lidt fra 1,00, dvs. at den naturlige konvektion er mindre. I beregningerne fremkommer samme tendens for Nusselt-tallene for de to materialer dog med en mere glidende ændring.

Konvektionsmålingerne på de to materialer er sammenlignet med en konvektionsmåling på mineraluld (Dyrbøl, 1998) med en tykkelse på 0,5 m. Nusselt-tallene for mineralulden er noget mindre i bunden og større i toppen end for de to andre materialer, dvs. at den naturlige konvektion er større for mineralulden. Det samlede Nusselt-tal for fåreuld, papirisolering og mineraluld ligger alle nær 1,00 hvilket praktisk taget betyder, at den naturlige konvektion kun har ringe indflydelse på den samlede varmetransmission.

## 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.

## 6. Litteratur

Apparat til måling af konvektion i isolering  
Institut for Bygninger og Energi  
Nielsen T. R., 1997

Dokumentation af konvektionsapparat  
Institut for Bygninger og Energi, sagsrapport SR-9814  
Dyrbøl, Susanne

Ekofiber, 1997. Product information, [www.ekofiber](http://www.ekofiber).

European Standard Draft prEN 12667, december 1996. Building materials – Determination of thermal resistance by means of guarded hot plate and heat flow meter methods – Products of high and medium thermal resistance

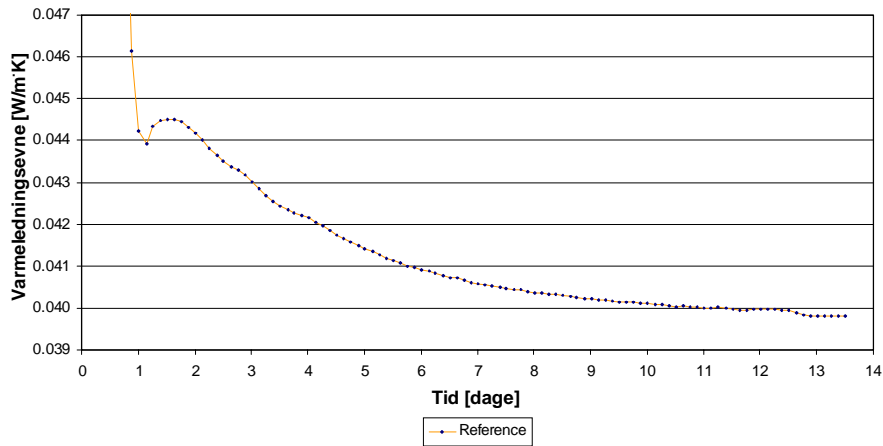
Heat transfer in Rockwool - modelling and method of measurement  
Departments of Buildings and Energy, DTU. Rapport R-024, 1998  
Dyrbøl, Susanne

ISO 8302, 1991. Thermal insulation – Determination of steady-state thermal resistance and related properties – Guarded hot plate apparatus

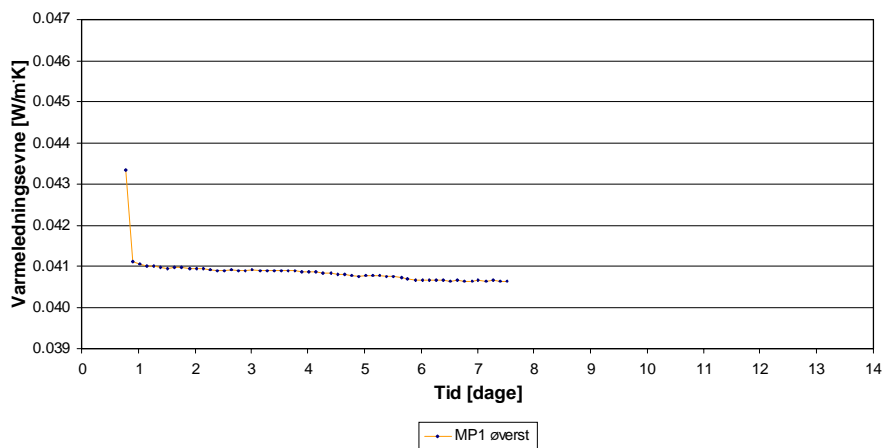
Sætningsforhold og varmeledningsevne af alternative isoleringsmaterialer – litteraturstudie.  
DTI Byggeri, 1998 september  
Lars Olsen, Dansk Teknologisk Institut, DTI Byggeri  
Dan Brøsted Pedersen, DELTA Akustik & Vibration  
Johny Herman Jensen, Dansk Teknologisk Institut, DTI Byggeri

## Appendix A

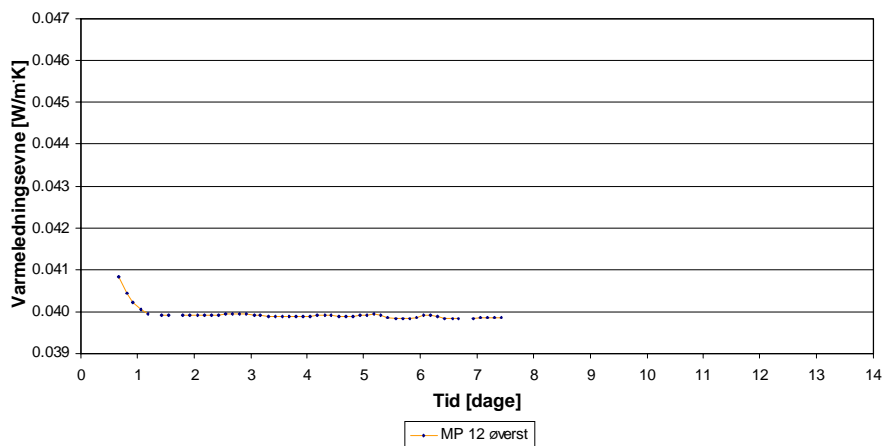
Måleforløb for fåreuld.



Varmeledningsevnen af fåreuld som funktion af tiden for referencemåling (vandret position. Varmeplader øverst).

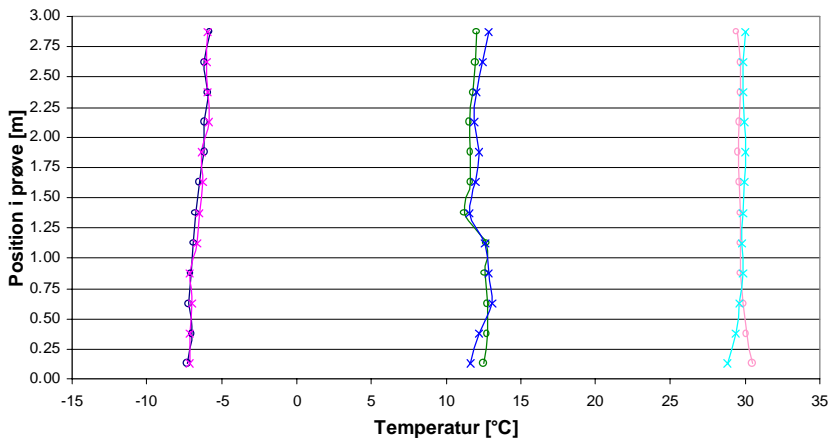


Varmeledningsevnen af fåreuld som funktion af tiden for måling i lodret position med måleplade 1 øverst.

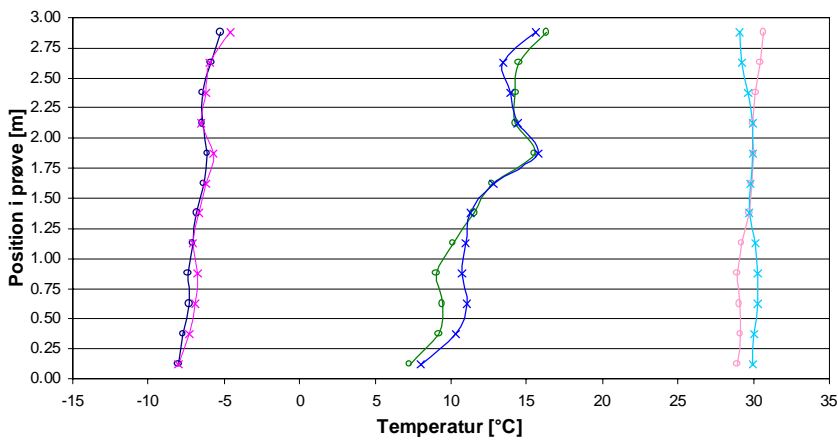


Varmeledningsevnen af fåreuld som funktion af tiden for måling i lodret position med måleplade 12 øverst.

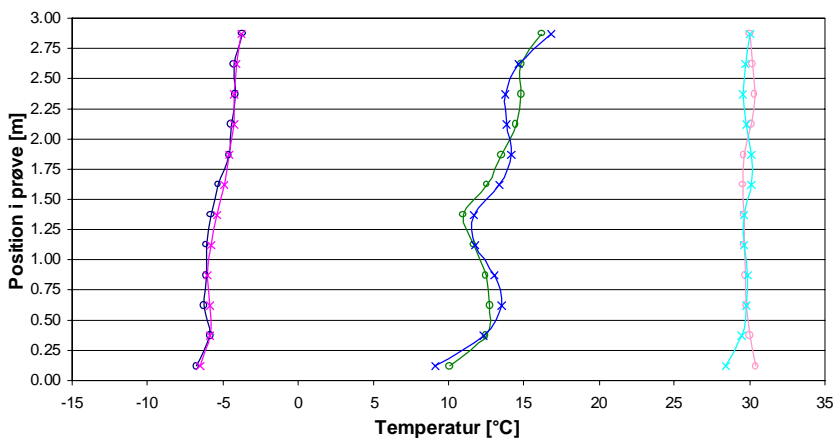
I de 3 nedenstående figurer er temperaturene på den varme og kolde side, samt i midten af fåreulden vist. Temperaturer i fåreulden er målt i henholdsvis højre og venstre side i prøven. "o" er højre og "x" er venstre side.



*Temperaturfordelingen i fåreulden ved referencemålingen.*



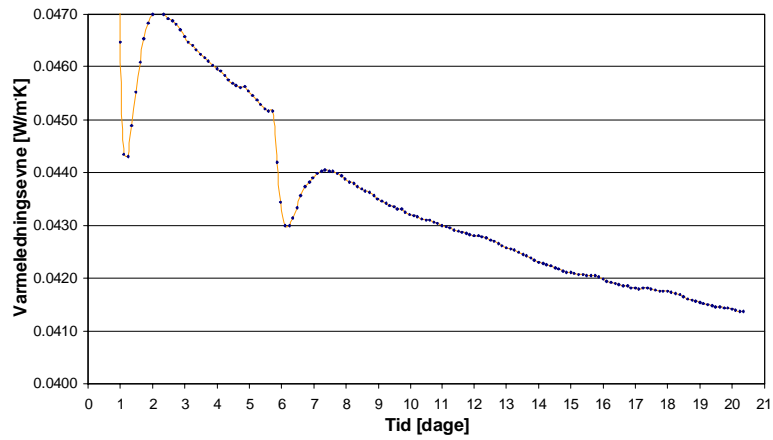
*Temperaturfordelingen i fåreulden med måleplade 1 øverst.*



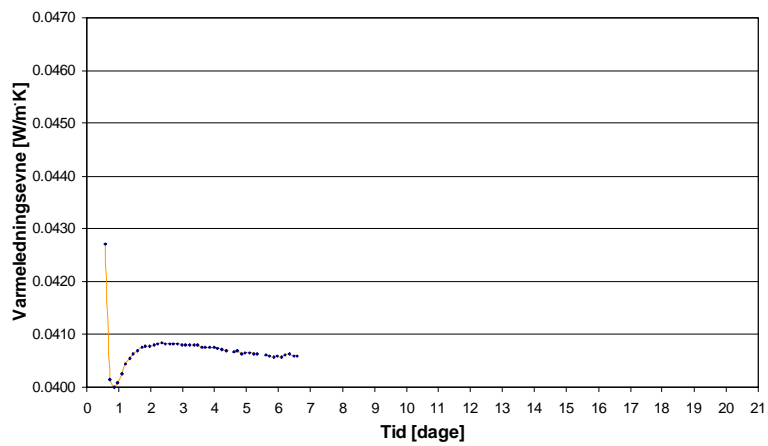
*Temperaturfordeling i fåreulden med måleplade 12 øverst.*

## Appendix B

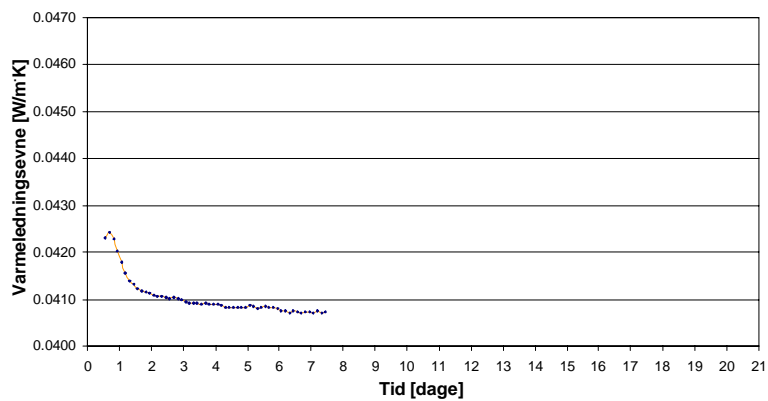
Måleforløb for papirisolering.



Varmeledningsevnen for referencen som funktion af måletiden.



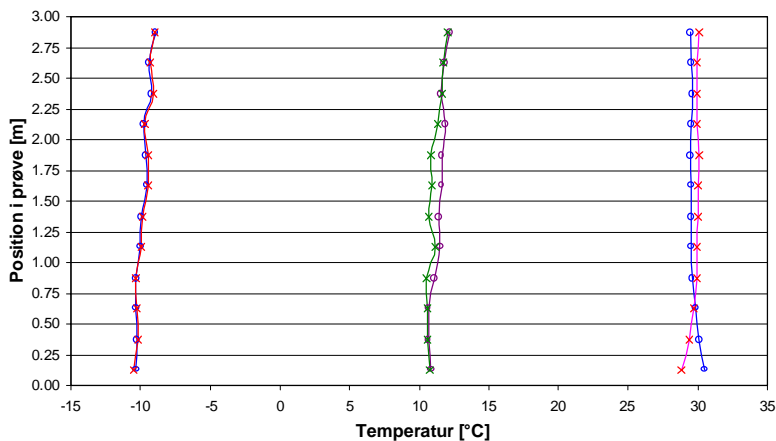
Varmeledningsevnen som funktion af måletiden for måleplade 1 øverst.



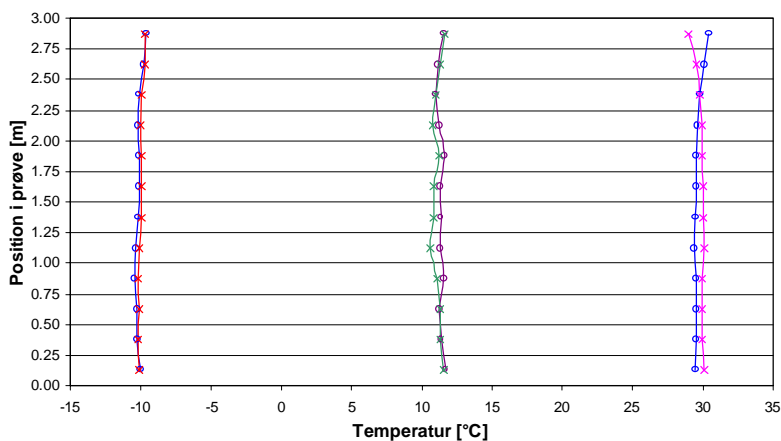
Varmeledningsevnen som funktion af måletiden for måleplade 12 øverst.

## Temperaturer i papirisoleringen (Ekofiber Vind).

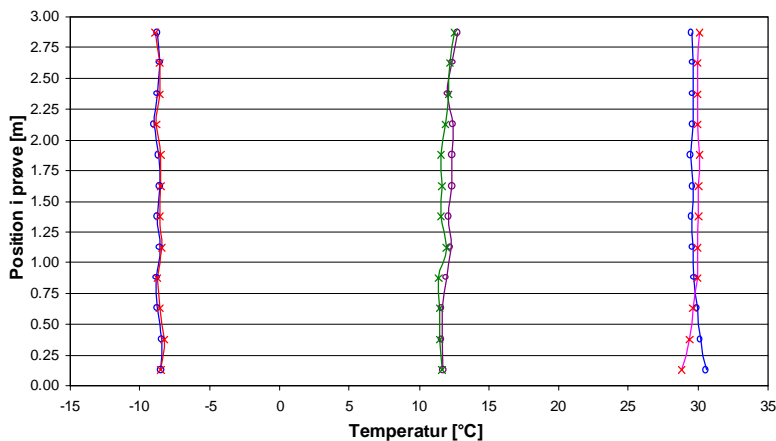
I de 3 nedenstående figurer er temperaturene på den varme og kolde side, samt i midten af papirisoleringen vist. Temperaturer i papirisoleringen er målt i henholdsvis højre og venstre side i prøven. "o" er højre og "x" er venstre side.



*Temperaturfordeling i forskellige positioner i prøven. Vandret position af prøven (reference).*



*Temperaturfordelingen i papirisoleringen med måleplade 1 øverst.*



*Temperaturfordelingen i papirisoleringen med måleplade 12 øverst.*