

Kurt Kielsgaard Hansen
Thomas Astrup
Ulla Gjøl Jacobsen

Fugttechniske undersøgelser på dansk hørmåtte

Sagsrapport
BYG·DTU SR-04-01
2004
ISSN 1601 - 8605

Fugttekniske undersøgelser på dansk hørmåtte

Kurt Kielsgaard Hansen
Thomas Astrup
Ulla Gjøl Jacobsen

BYG•DTU
DTU Bygning 118
2800 Kgs. Lyngby
<http://www.byg.dtu.dk>

2004

Fugttekniske undersøgelser på dansk hørmåtte

Kurt Kielsgaard Hansen
Thomas Astrup
Ulla Gjøl Jacobsen

Forord

Rapporten ”Fugttekniske undersøgelser på dansk hørmåtte” er en delrapport under projektet Dokumentation af danske hør- og hampemåtters anvendelse som isoleringsmateriale, som Dansk Landbrugsrådgivning har gennemført med delvis støtte fra Energistyrelsens udviklingsprogram for miljø- og arbejdsmiljøvenlig isolering. Rapporten er lavet i samarbejde mellem Dansk Landbrugsrådgivning og BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet.

BYG•DTU sagsnr.: 25509.

Kgs. Lyngby, den 26.01.2004

Kurt Kielsgaard Hansen
Lektor, projektleder

Fugttekniske undersøgelser på dansk hørmåtte

1. Formål

Formålet med projektet er at måle 1) ab- og desorptionskurver ved 20 °C for hør uden og med brandimprægnering i form af vandglas og for vandglas alene, og 2) varmeledningsevne for hørmåtte imprægneret med vandglas under fugtige forhold. Varmeledningsevne for tør hørmåtte uden vandglas måles mhp. sammenligning.

Endelig optages fire ESEM-billeder af repræsentative områder for hver af materialerne hør uden vandglas og hør imprægneret med vandglas.

2. Materialer

BYG•DTU har modtaget 1) løse hørfibre uden og med imprægnering med vandglas, 2) en hørmåtte imprægneret med vandglas, og 3) en hørmåtte uden imprægnering med vandglas. Imprægneringen er foretaget af Dansk Landbrugsrådgivning, Landscentret.

BYG•DTU har målt tørdensiteten for henholdsvis hørmåtte imprægneret med vandglas til 65 kg/m³ og hørmåtte uden imprægnering til 30 kg/m³.

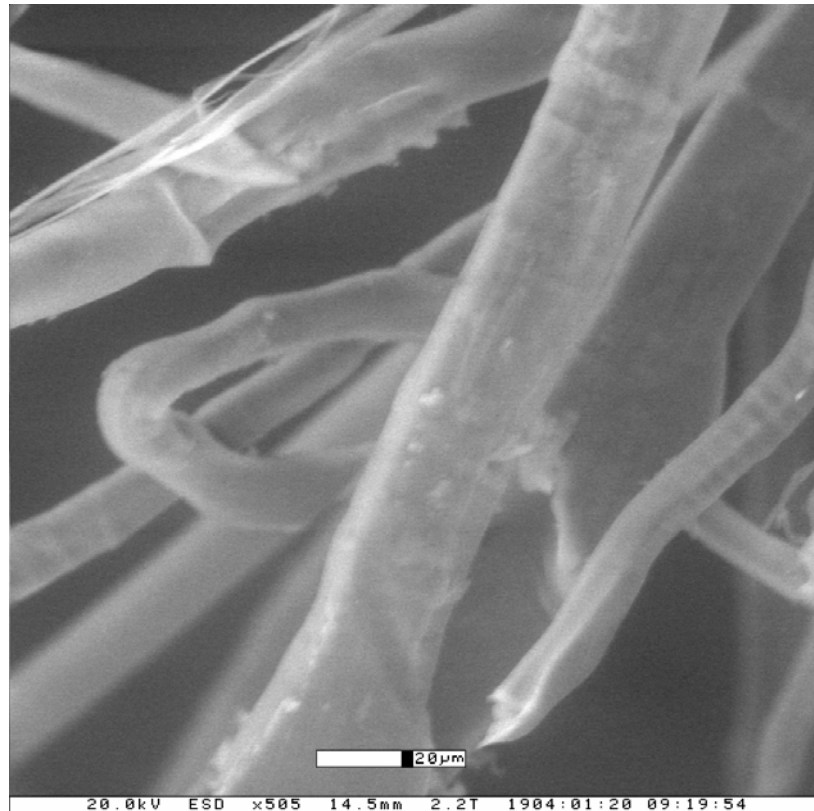
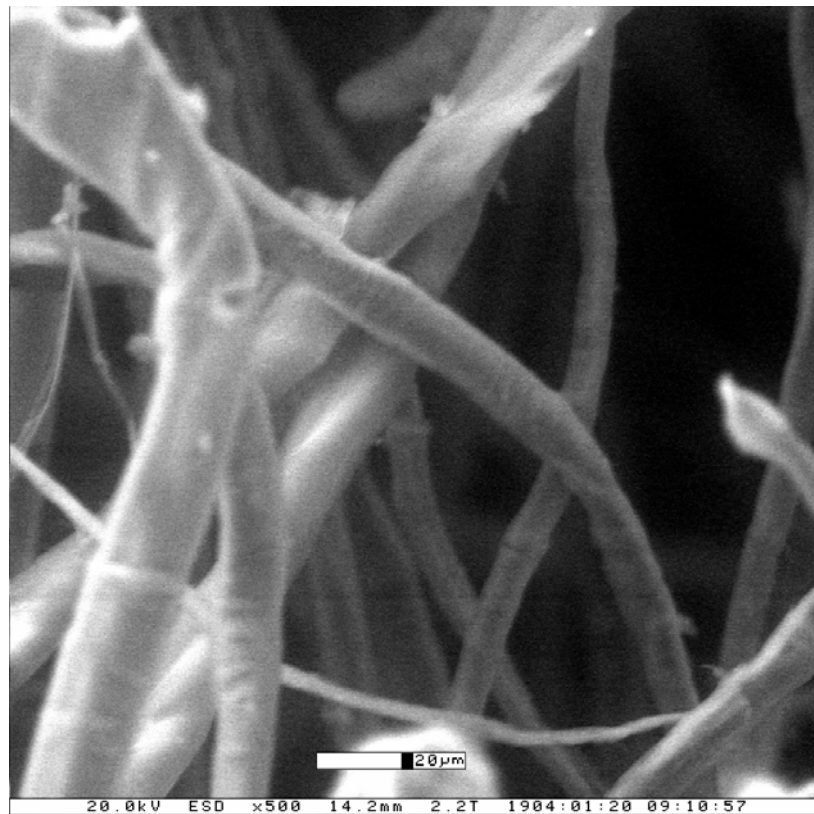
2.1 Vandglas

Den anvendte vandglas er fra CHEMCAP. Vandglas er natriumsilikater iblandet vand på væskeform. Vandglassen har efter det oplyste pH $\approx 11,3$ og densitet $\approx 1,2 - 1,3 \text{ g/cm}^3$. Tørstofindholdet er på BYG•DTU målt til 41% efter tørring ved 70 °C i 24 timer og til 37% efter tørring ved 105 °C i 24 timer.

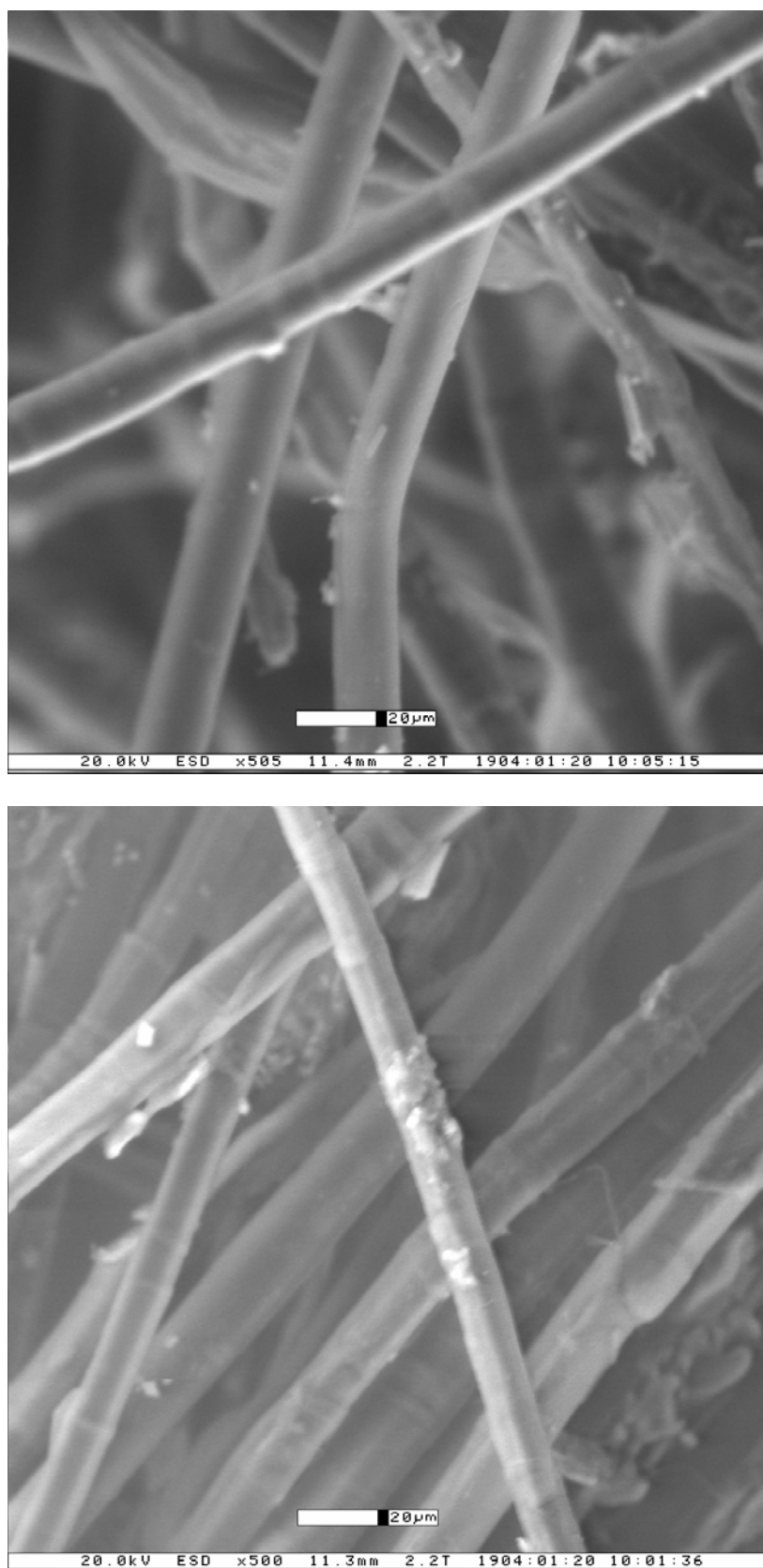
2.2 ESEM-billeder

På RISØs "Environmental Scanning Electron Microscope" (ESEM) er optaget fire billeder af repræsentative områder på løse fibre for hver af materialerne hør uden vandglas og hør imprægneret med vandglas. Figur 1 viser ESEM-billeder af hør uden vandglas, mens figur 2 viser ESEM-billeder af hør imprægneret med vandglas. I ESEM-udstyret indsættes materialeprøven med det aktuelle fugtindhold, hvorefter billeder optages. Fordelen ved ESEM i forhold til SEM er, at ved SEM skal prøven tørres før billedoptagelse, mens ved ESEM kan prøven indsættes ved det aktuelle fugtindhold. Materialeprøverne er opbevaret i tætsluttende plastposer fra modtagelse og indtil ESEM-optagelser; ESEM-optagelser er således sket ved leveringsfugtigheden.

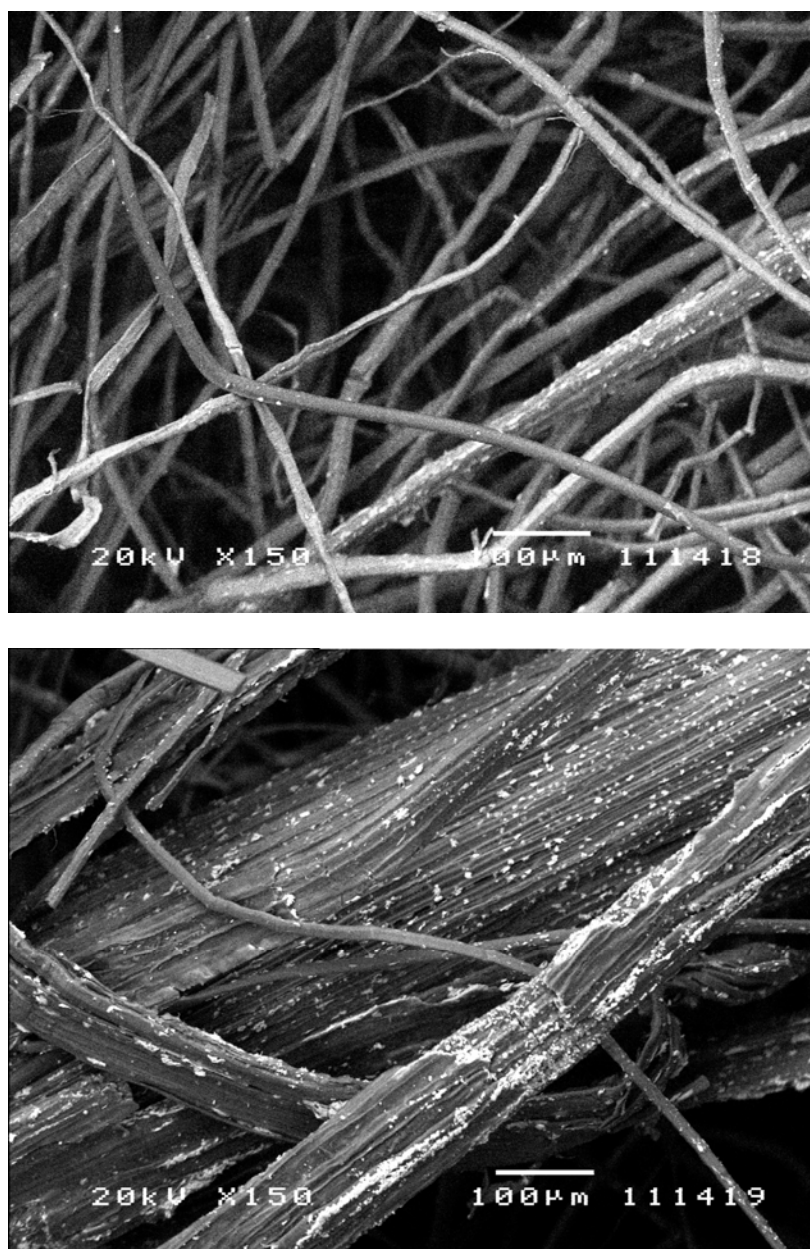
Der er også optaget SEM billeder af hør imprægneret med vandglas, se figur 3. De hvide pletter er vandglasklumper (bekræftet ved spektre). Ved vurdering af fordelingen skal man være opmærksom på, at man kun kan regne med de fibre der er i fokus - fibre ude af fokus viser måske færre vandglasklumper end der er i virkeligheden. På figur 3 ses at hørskæverne er jævnt belagt med vandglasklumper, mens vandglasklumperne sidder mere spredt på hørfibrene.



Figur 1 ESEM-billeder af hår uden vandglas.



Figur 2 ESEM-billeder af hør imprægneret med vandglas.



Figur 3 SEM-billeder af hør med vandglas. Hørskæverne er jævnt belagt med vandglasklumper (nederste billede), mens vandglasklumperne sidder mere spredt på hørfibrene (øverste billede).

3. Sorptionskurver

Porøse materialer er hygroskopiske, dvs. de har en evne til at optage fugt fra luften. Jo højere relativ luftfugtighed (RF) desto mere vand kan optages i materialet. Dette fænomen kaldes *absorption*. Tilsvarende tales om *desorption*, når materialet afgiver fugt. Den kurve, som angiver ligevægt mellem RF og vandindhold ved en given, fastholdt temperatur kaldes en sorptionskurve eller en sorptionsisoterm. Dette afsnit omhandler målinger af ab- og desorptionskurver ved 20°C for hør uden og med vandglas og for vandglas alene.

3.1 Fremgangsmåde

3.1.1 Klimaskabsopstilling

Måling af sorptionskurver er sket i BYG•DTUs klimaskab nr. 2, der er specielt udviklet til porøse og hygroskopisk set meget hurtigt reagerende materialer. For en detaljeret beskrivelse af opstillingen må henvises til /1/. Målemetoden er standardiseret som beskrevet i /2/. Forsøgsopstillingen gør det muligt at benytte ét sæt prøveemner og ændre RF løbende, således at de samme prøveemner gennemløber en hel cyklus fra tør til fugtig til tør tilstand, hvilket giver den mest korrekte bestemmelse af sorptionsisotermen. Dataopsamling sker ved hjælp af programmet Sorption '99, der er beskrevet i /3/.

Figur 4 viser en forenklet skitse af forsøgsopstillingen, og figur 5 og 6 viser fotografier af forsøgsopstillingen. Opstillingen består af et køleskab, der er ombygget på en række punkter. Princippet i opstillingen er, at prøvehåndteringen under vejning skal kunne foregå uden at åbne døren til klimaskabet. I det klimaskab der benyttes ved 20°C, er der i døren indsat en plexiglasrude med en handskeåbning og en latexhandske. Via et lille hul i toppen af klimaskabet er der forbindelse til en digitalvægt placeret på en hylde over klimaskabet.

Klimaet i skabet styres med en PID-regulator ved blanding af tør og fugtig luft tilført skabet.

Prøveemnerne, der kan være løse fibre eller sammenhængende materiale, er anbragt i poser af finmasket polyester med en maskevidde på 73 µm for at undgå tab af materiale under forsøget. I toppen af hver pose er monteret en bøjle til ophængning i klimaskabets trådnæt, under klimatisering henholdsvis under vejning, som antydnet på figur 4.

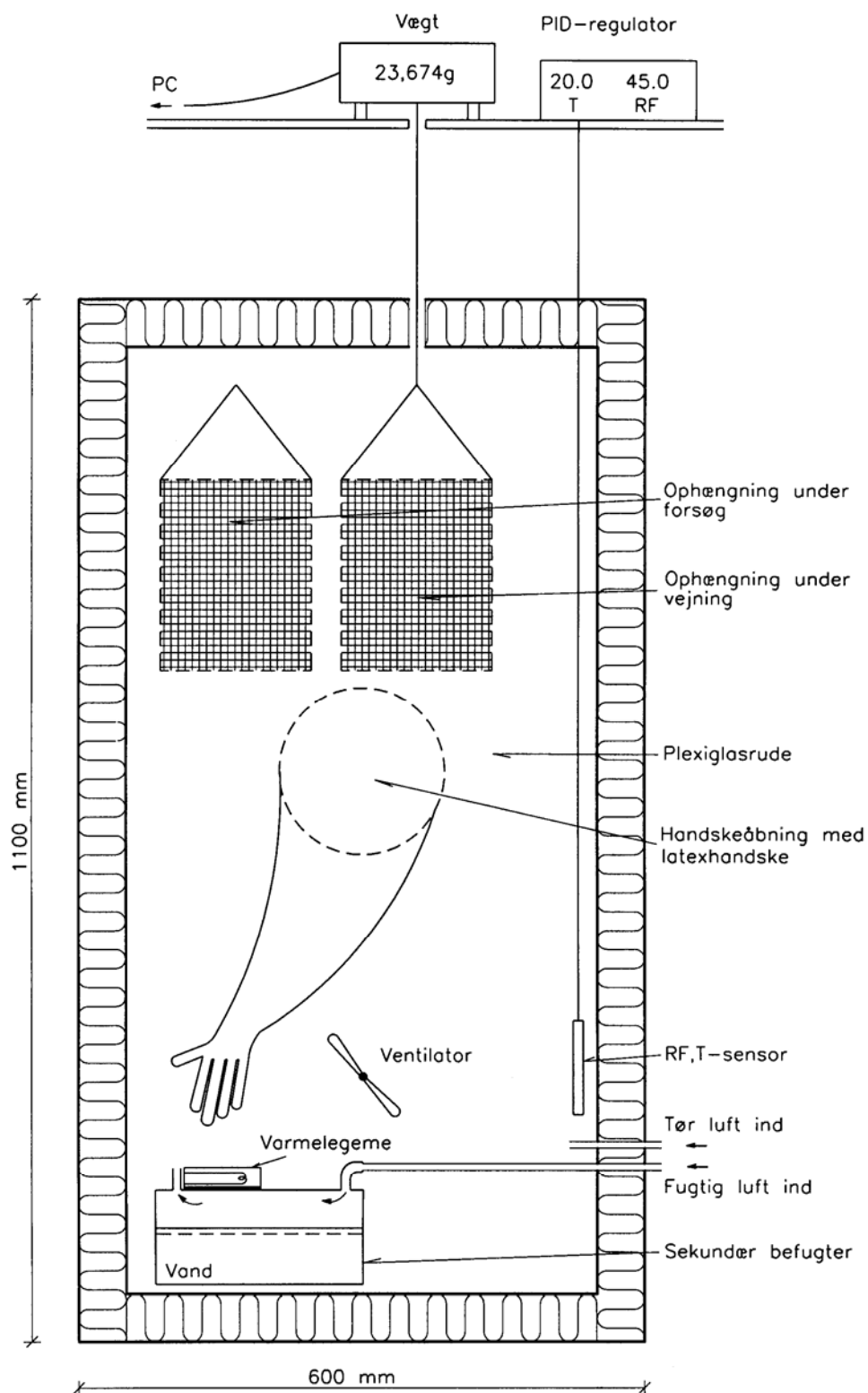
I opstillingen er det muligt ved $20.0 \pm 0.4^\circ\text{C}$ at opretholde en ønsket RF i intervallet 3% til 96% med en nøjagtighed på 0.2 à 2%; størst unøjagtighed ved høj RF.

3.1.2 Forsøgsbeskrivelse

Klimaskabet bringes i ligevægt ved 11% RF og 20°C vha. sætpunkter (RF, temperatur) valgt på PID-regulatoren. Datafil og prøveemner (poser) oprettes i Sorption '99. Poser nummereres så numrene ses tydeligt gennem ruden og placeres i klimaskabet.

De tomme poser vejes vha. Sorption '99, der har en indbygget kalibreringsrutine for vægten. En passende materialemængde afvejes. Materialet fyldes i de respektive poser, hvorefter disse vejes og tørres til ligevægt ved 11% RF i klimaskabet. RF ændres og nye vejninger foretages for at følge materialerne til fugtmæssig ligevægt med den omgivende luft. Før vejning stoppes anlægget. Herved stoppes lufttilførsel og ventilator i klimaskabet.

Først bestemmes adsorptionskurven, dernæst desorptionskurven. Da en decideret udtørring af materialet, fx. i et tørreskab (ovn) kan risikere at ødelægge materialet eller påvirke imprægneringsstoffer, udføres dette til sidst. Den primære grund til at foretage en egentlig tørring af materialet er at opnå en referencetilstand, som alle beregninger kan foretages ud fra. Tørring i ovn ved 70 °C i 24 timer anvendes i dette projekt.



Figur 4 Klimaskabsopstilling til bestemmelse af sorptionsisotermene ved 20 °C.



Figur 5 Klimaskabsopstilling på BYG•DTU til bestemmelse af sorptionskurver. Det er klimaskab nr. 2, der er benyttet til forsøg ved 20 °C. I forgrunden ses dugpunktsmåleren, der benyttes til kontrol af klimaet.



Figur 6 Poser med hørfibre hænger til venstre, og de to vejglas med vandglas hænger i hver side foran.

Ligevægtsvandindholdet i vægt-%, u , bestemmes på basis af tørmassen, m_0 , og den estimerede masse ved fugtligevægt, m , for en given RF

$$u = \frac{m - m_0}{m_0} \cdot 100 \%$$

3.1.3 Undersøgte materialer

Tabel 1 giver en oversigt over de undersøgte materialer. Materialerne angives ved deres kaldenavn.

Tabel 1 Oversigt over undersøgte materialer.

Materiale (kaldenavn) ¹	Beskrivelse	Masse ² , m_0 [g]
Rene1	Løse hørfibre uden imprægnering	4,890
Rene2	Løse hørfibre uden imprægnering	4,640
Impr.3	Løse hørfibre imprægneret med vandglas	5,231
Impr.4	Løse hørfibre imprægneret med vandglas	5,066
Vandglas7	Vandglas tørret ved 70 °C i 24 timer	4,859
Vandglas8	Vandglas tørret ved 70 °C i 24 timer	2,394

Note:

¹⁾ Materialerne angives ved kaldenavn. Tal refererer til posens/vejglassets nummer.

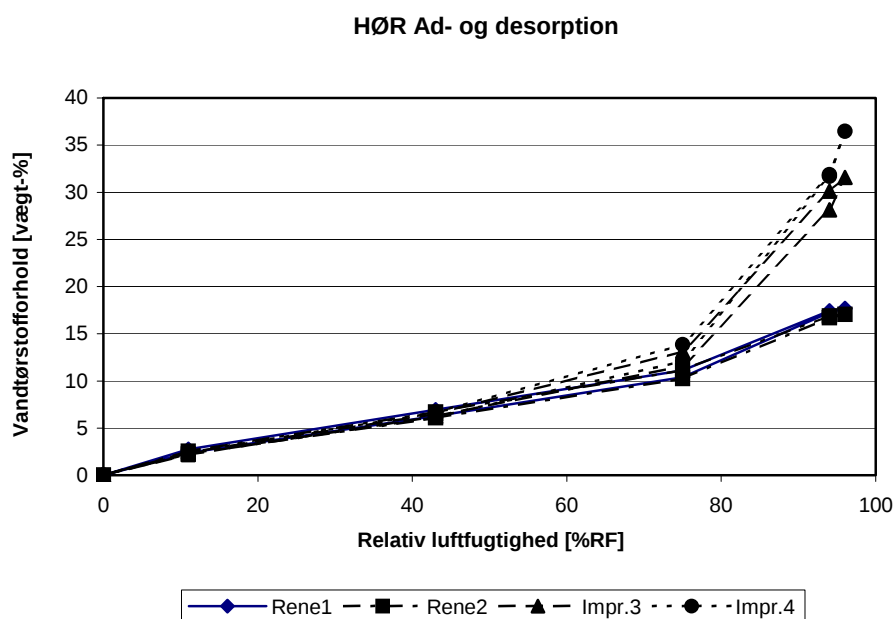
²⁾ Den angivne masse er bestemt efter tørring i ovn ved 70 °C i 24 timer.

3.2 Måleresultater

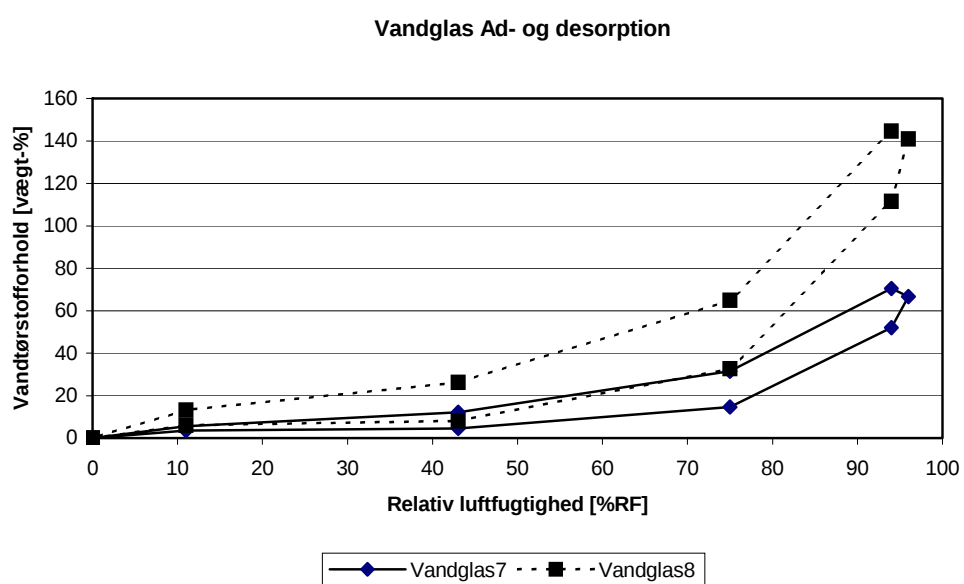
Der er udført adsorptionsmålinger på materialerne ved 11, 43, 75 og 94% RF. Efter 94% RF har klimaet i 4 dage været oppe på 96% RF før desorptionen påbegyndes. Der er bestemt ligevægtsvandindhold under desorption ved følgende RF: 94, 75, 43 og 11% RF. Tørring af materialerne i ovn ved 70 °C i 24 timer er sket efter bestemmelse af desorptionspunkter. Hørmaterialerne er som tidligere nævnt ikke tørret før indsættelse i klimaskabet.

Sorptionskurver for løse hørfibre uden imprægnering med vandglas, mærket "Rene1" og "Rene2", og for løse hørfibre imprægneret med vandglas mærket "Impr.3" og "Impr.4" er vist i figur 7. Ved høje RF stiger den optagne vandmængde meget; ved 94% RF er vandtørstofforholdet dobbelt så stort for hørfibre imprægneret med vandglas som for hørfibre uden vandglas.

Sorptionskurver for vandglas er ligeledes bestemt ved de samme relative luftfugtigheder som for hørmaterialerne, se figur 8. Den store forskel på fugtoptagelsen mellem "Vandglas7" og "Vandglas8" skyldes, at massen af "Vandglas7" er dobbelt så stor som massen af "Vandglas8". Vanddamp optages ved overfladen og en dobbelt masse i "Vandglas7" giver dobbelt diffusionsvej ned gennem materialet. Af tidsmæssige årsager er denne diffusion ikke tilendebragt ved hvert RF-niveau. Vandglasprøverne er tørret ved 70 °C i vejglas før indsættelse i klimaskabet.



Figur 7 Sorptionskurver for løse hør fibre uden imprægnering med vandglas, mærket "Rene1" og "Rene2", og for løse hør fibre imprægneret med vandglas mærket "Impr.3" og "Impr.4".



Figur 8 Sorptionskurver for vandglas.

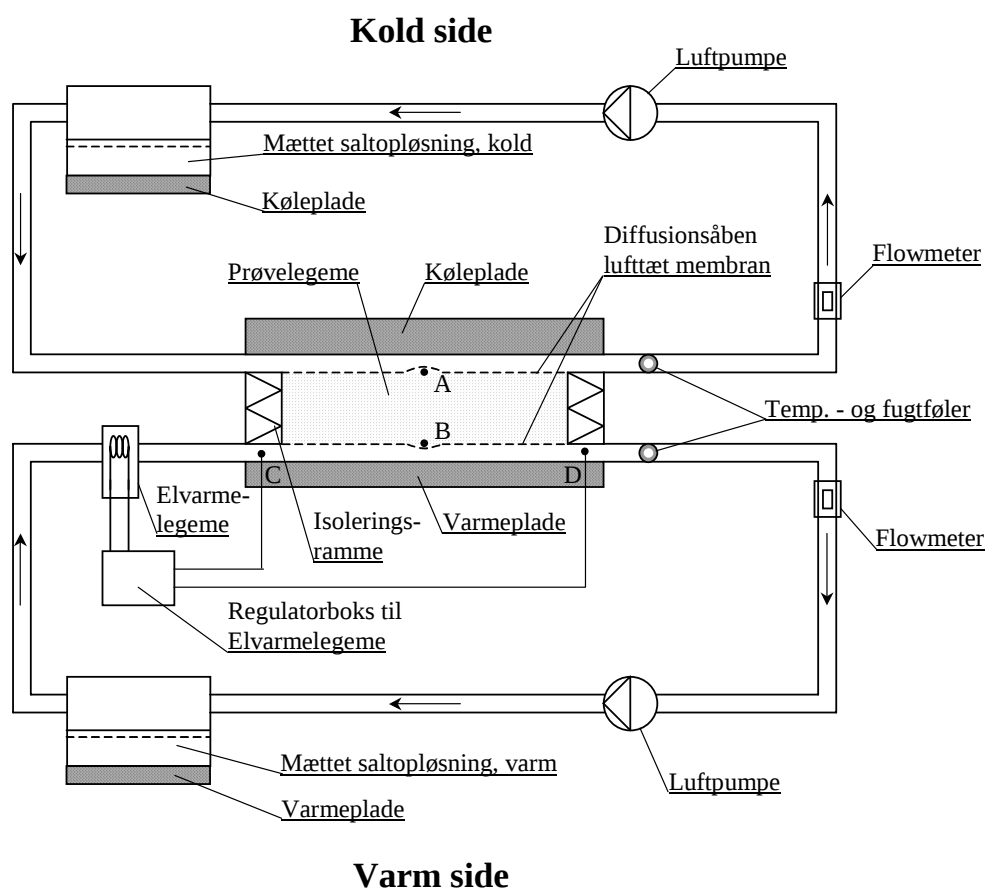
4. Varmeledningsevne under fugtige forhold

Øget fugtighed i porøse materialer giver som regel større varmeledningsevne (λ -værdi). Formålet med målingerne er at fastlægge den relative ændring af varmeledningsevnen ved forskellige fugtige forhold for hørmåtte imprægneret med vandglas. Varmeledningsevnen for tør hørmåtte uden vandglas måles mhp. sammenligning.

4.1 Fremgangsmåde

4.1.1 Forsøgsopstilling

Bestemmelse af varmeledningsevnen ved forskellige fugtforhold foretages vha. et ombygget varmepladeapparat. Det ombyggede varmepladeapparatet er et modified guarded hot-plate apparat /4/. På hver side af prøvelegemet kan forskellige relative fugtigheder etableres, og det er dermed muligt at måle varmeledningsevnen af prøvelegemet ved forskellige fugtforhold. En principtegning af opstillingen er vist i figur 9 og et foto af opstillingen er vist på figur 11.



Figur 9 Principskitse af opstilling til måling af varmeledningsevne under fugtige forhold. Varmepladen er vist i figur 10. På KOLD SIDE er varmevekslere til henholdsvis luftens forkøling efter Luftpumpe og luftens efterkøling før passage af Prøvelegeme ikke vist. På VARM SIDE er varmeveksleren til luftens forvarmning inden passage af Elvarmelegeme ikke vist. Temperatur og relativ luftfugtighed måles ved A og B. Alle luftslanger i opstillingen er varmeisolerede.

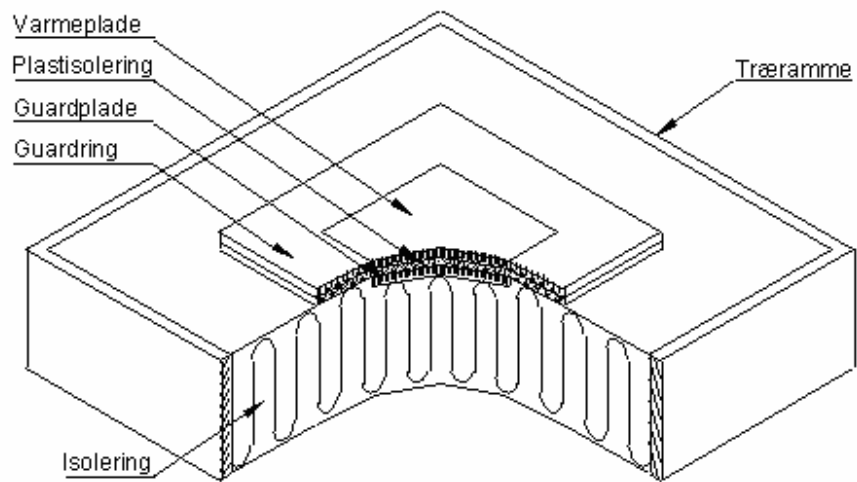


Figure 10 Principskitse af varmepladeapparat. Varmepladen er opdelt i et målefelt og en guardring om målefeltet. Guardpladen ligger under varmepladen.



Figur 11 Opstillingen til måling af varmeledningsevne under fugtige forhold.

4.1.2 Forsøgsbeskrivelse

I et målefelt afsættes en effekt i en varmeplade under prøvelegemet midte, der giver anledning til en varmestrøm gennem prøvelegemet mod apparatets kolde side. Den kolde side holdes på ca. 16 °C ved hjælp af væske fra et kølebad, medens den varme side holdes på ca. 28°C. Ved hjælp af termosøjler (seriekoblede termoelementer) og guardring i et randområde omkring målefeltets varmeplade, samt guardpladen under varmepladen, sikres samme temperatur disse steder som i selve målefeltet. Opbygningen er vist på figur 10. Prøvelegemet har størrelsen 260 x 260 mm og er 50 mm tyk. Prøvelegemet er isoleret med 20 mm ekstruderet polystyren på den lodrette flade. Selve målefeltet er på 160 x 160 mm. Disse dimensioner, og guardring og guardplade sikrer en praktisk taget endimensional varmestrøm gennem prøvelegemet over målefeltet. Den i målefeltet afsatte effekt og temperaturdifferensen mellem den kolde og den varme side af prøvelegemet måles, og derved kan prøvelegemets varmeledningsevne bestemmes.

Den specielle konstruktion ved dette varmepladeapparat gør, at fugtmæssigt konditioneret luft kan passere i spalter placeret mellem prøvelegemet og den varme og kolde plade. Luften befugtes ved bestrygning af mættede saltopløsninger (LiCl , MgCl_2 , $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$, NaCl og KNO_3), hvis temperatur kan reguleres. Varmeledningsevnen kan således bestemmes under forskellige fugtige forhold. Et elvarmelegeme placeret ved luftindtaget til varmepladen tilfører en effekt, der sikrer en temperaturforskel på 0 °C imellem punkt C og punkt D, styret af en termosøjle. Diffusionsåbne, vindspærrende membraner (Tyvek®) på begge sider af prøvelegemet begrænser luftgennemgang gennem prøveemnet, så der ikke af denne årsag forekommer nogen væsentligt særskilt varmestrøm. Luftens temperatur og relative fugtighed måles dels ved skillefladen mellem de to Tyvek membraner og prøvelegemet, dvs. ved A og B på figur 9, dels ved luftens udløb fra både den kolde og den varme plade.

Varmeledningsevnen er først målt på den modtagne hørmåtte imprægneret med vandglas uden spalter for luftstrøm, dvs. som tør varmeledningsevne. De efterfølgende målinger er foretaget med luftstrøm under forskellige, stigende fugtforhold. Der startes med fugtigheder, som ligger nær ved rumluftens fugtighed. Derefter forøges fugtigheden i luftspalterne gradvist. Til sidst i prøvningsforløbet opstår der kondens i materialet.

Apparatets evne til at måle varmeledningsevne er indledningsvis blevet kontrolleret ved at måle på et prøvelegeme af trædefast mineraluld i tør tilstand uden luftspalter. Her blev den forventelige varmeledningsevne opnået indenfor $\pm 5\%$ ved sammenligning med målinger i et konventionelt λ -apparat.

4.2 Måleresultater

Varmeledningsevnen for en 65 mm tyk hørmåtte uden imprægnering med vandglas er målt til 0,046 W/mK i tør tilstand uden luftspalter. Varmeledningsevnen for den 50 mm hørmåtte imprægneret med vandglas er målt i samme opstilling til 0,045 W/mK.

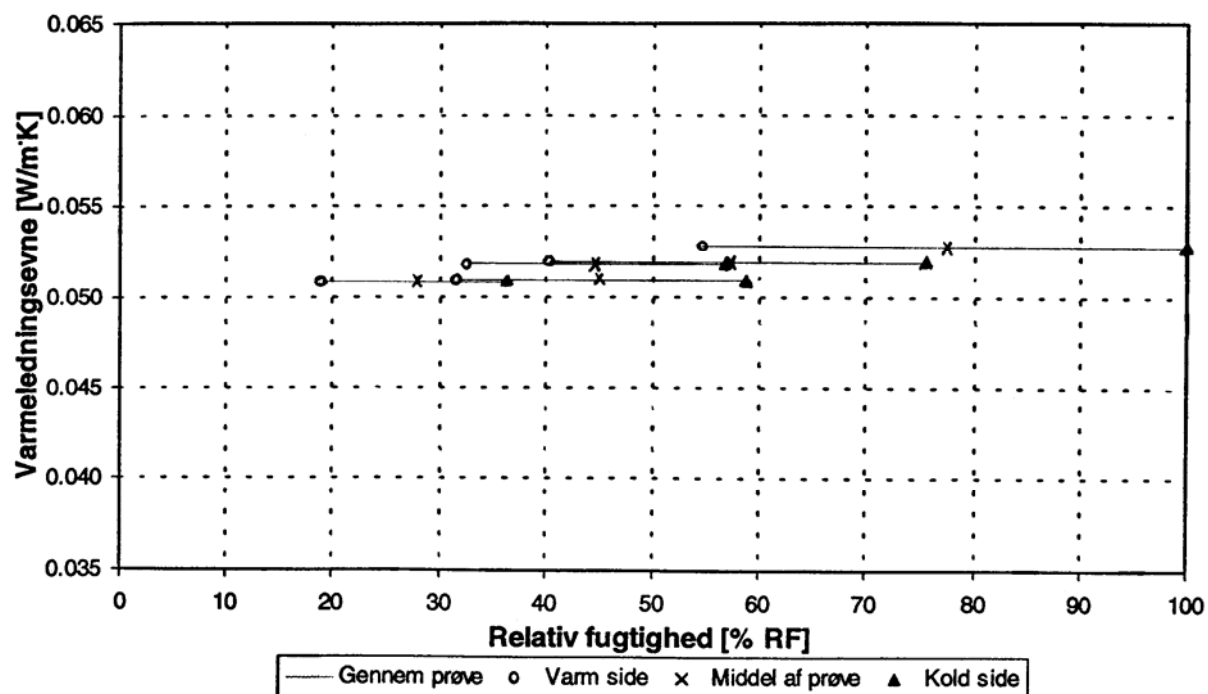
Tabel 2 viser hvilke relative fugtigheder, der har været anvendt som påvirkning ved målinger på hørmåtten imprægneret med vandglas, samt hvilke varmeledningsevner der er målt. De samme resultater er illustreret i figur 12. De sidste målinger inden forsøgets afslutning er foretaget under forhold, hvor der har opbygget sig kondens i den kolde side af isoleringen indenfor Tyvek-membranen. Målingerne med det særlige λ -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 fugtniveaues betydning.

Tabel 2 Temperatur og relative fugtigheder ved skillefladen mellem de to Tyvek membraner og prøvelegemet, dvs. ved A og B, samt den målte varme ledningsevne. Prøvelegemet er hørmåtte imprægneret med vandglas.

	VARM SIDE		KOLD SIDE			Varmeledningsevne ³ , λ [mW/(m·K)]
	Temperatur	Fugtighed	Temperatur	Fugtighed	Middel fugtighed	
	[°C]	[% RF]	[°C]	[% RF]	[% RF]	
Tør varmeledning	35,9	-	15,0	-	-	0,046
Med luftstrøm	28,0	19,2	16,2	36,5	27,9	0,051
	27,5	31,2	16,3	58,9	45,1	0,051
	27,4	32,0	16,8	57,1	44,6	0,052
	28,0	40,2	16,7	75,0	57,6	0,052
	28,6	54,1	17,5	100	77,1	0,053

³: Målingerne med det særlige λ -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 fugtniveaues betydning.



Figur 12 Varmeledningsevne som funktion af relativ luftfugtighed.

5. Konklusion

Hørfibre med og uden imprægnering med vandglas er undersøgt. Sorptionskurver for hørfibre og for vandglas er målt i klimaskabsopstilling ved 20 °C. Ved høje relative luftfugtigheder stiger den optagne vandmængde meget; ved 94% RF er vandtørstofforholdet dobbelt så stort for hørfibre imprægnet med vandglas som for hør uden imprægnering. Tørret vandglas har selv en meget stor vandoptagelse. Varmeledningsevnen for hørmåtte imprægneret med vandglas er målt dels i tør tilstand, dels under fugtige forhold. Varmeledningsevnen viser en svagt stigende tendens ved stigende RF-niveau. Endelig er ESEM-billeder optaget af hørfibre uden vandglas og imprægneret med vandglas foruden SEM-billeder af hør imprægneret med vandglas. SEM-billederne viser, at hørsøkæverne er jævnt belagt med vandglasklumper, mens vandglasklumperne sidder mere spredt på hørfibrene.

6. Litteratur

- /1/ Strømdahl, K.: Water Sorption in Wood and Plant fibres. Ph.D. Thesis. Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark. Series R, No 78, 2000.
- /2/ EN ISO 12571: Hygrothermal performance of building materials - Determination of hygroscopic sorption properties. *CEN/TC89/WG10. European Committee for Standardization*, 1999.
- /3/ Jørgensen, H.B.: Bestemmelse af vandoptagelse i træ- og plantefibre. Eksamensprojekt. Institut for Bærende Konstruktioner og Materialer, 1999.
- /4/ Kristiansen F., Rode C.: Varmeledningsevne ved forskellige fugtforhold. Del af *Varme- og fugttekniske undersøgelser for alternative isoleringsmaterialer*. Rapport SR-0004, Institut for Bygninger og Energi (IBE), DTU, 1999.
- /5/ Munch, T.A., Hansen, K.K.: Vejledning til måling af varmeledningsevne for tørre og fugtige materialer. BYG•DTU, Danmarks Tekniske Universitet, 2003.